



硕士学位论文

有机与常规谷物营养品质差异初步研究

作者姓名：_____宋彦洁_____

指导教师：_____蒋高明 研究员 中国科学院植物研究所_____

学位类别：_____理学硕士_____

学科专业：_____生态学_____

培养单位：_____中国科学院植物研究所_____

2018 年 6 月

**A Preliminary Study on Nutritional Quality Differences between
Organic and Conventional Cereals**

**A thesis submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Master of Natural Science
in Ecology**

By

Song Yanjie

Supervisor: Professor Jiang Gaoming

Institute of Botany, The Chinese Academy of Sciences

June 2018

中国科学院大学

研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学

学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

导师签名：

日 期：

日 期：

摘 要

谷物作为人类日常饮食的重要组成部分，是人体内营养物质的重要来源，其营养品质直接关系到人体健康。近年来，由于谷物营养品质下降问题严重，人们开始探索新的途径提高其营养品质状况，有机种植方式进入人们视野。但关于有机与常规谷物营养品质之间是否存在差异一直存在争议。本研究采用控制区试验和大田试验两种研究方式，探索有机与常规谷物营养成分差异状况，并探索肥料对谷物营养品质的影响，主要结论如下：

（1）土壤特性。在投入等量 N、P、K 肥的情况下，土壤微生物 C、N，土壤 pH，土壤全 N（TN）以及土壤有机质（SOC）的含量与有机肥的投入量成正比。施用有机肥时，土壤微生物 C、N 量，土壤全 N 量，土壤有机质含量分别比施用化肥时，显著高出 127.4%，351.3%，46.2%，76.5%（ $P<0.05$ ）。表明有机种植方式能够提高土壤质量和土壤有机质含量，改善土壤理化性质，增加土壤微生物数量。

（2）蛋白质品质。在施入相等 N 肥的情况下，施用化肥时，谷物籽粒蛋白质含量高于施用有机肥。且随着化肥用量增加，夏玉米蛋白质含量总体上呈现上升趋势。从氨基酸角度来看，有机谷物 16 种氨基酸总量高于常规谷物，有机冬小麦 16 种氨基酸总量比常规冬小麦显著高出 14.2%（ $P<0.05$ ），有机夏玉米 16 种氨基酸总量比常规夏玉米显著高出 7.3%（ $P<0.05$ ）。且有机谷物的限制性氨基酸（赖氨酸和苏氨酸）含量高于常规谷物。因此，从蛋白质含量角度，有机谷物蛋白质含量要低于常规谷物；从氨基酸含量角度，有机谷物蛋白质营养品质要高于常规谷物。

（3）有益元素。有机冬小麦籽粒 Mo、K、P、S、Mg 元素含量高于常规冬小麦，且 S、K、Mo 元素含量差异极显著（ $P<0.01$ ）；有机夏玉米籽粒 Mo、B 元素含量高于常规夏玉米，且 Mo 元素含量差异极显著（ $P<0.01$ ）。控制肥料施入比例时，冬小麦籽粒 Ca、Mg、P、S、K、Zn、Cu 元素和夏玉米籽粒的 Ca、Mg、P、K、Cu 元素都在 0% 处理（全化肥处理）时含量最低，且谷物籽粒 Mo 元素的含量几乎与有机肥施用量成正比，说明施用化肥能够抑制作物对某些矿质元素，尤其是 Mo 元素的吸收。

(4) 有害元素。有机谷物籽粒的有害元素 As、Pb、Cr、Ni 含量都要低于常规谷物，Mn、Al 元素含量极显著低于常规谷物 ($P<0.01$)。控制肥料施入比例时，Cr、As、Ni 元素含量总体上随着化肥施用比例的增加而升高。施用有机肥时，谷物籽粒 As、Ni 元素含量处于安全级别，施用化肥时，谷物籽粒 Ni、Pb、Cr 元素含量都超过安全标准，处于污染级别。因此，有机谷物整体上比常规谷物更安全。

关键词：有机谷物，常规谷物，蛋白质，氨基酸，矿质元素

Abstract

As a part of daily diet, cereal is an important source of nutrients for human, and its nutritional quality is directly related to human health. In recent years, people began to explore new ways to improve the nutritional contents of cereal due to the serious decline of quality caused by modern agricultural indusion. Organic system arose people's attention. However, there has been a long-term dispute over the nutritional differences between organic and conventional cereals. In this study, we used two ways (field trial and farm survey) to compare the differences of nutritional quality between organic and conventional cereals, and to explore the effects of different fertilizers on the nutrients. The results showed that:

(1) With the same input of N, P and K fertilizer, soil microbial biomass C, N, soil pH, soil total N (TN) and soil organic matter (SOC) were found to be directly proportional to the proportion of manure. Soil microbial biomass C and N content, total N content and soil organic matter content in 100% manure were significantly 127.4%, 351.3%, 46.2% and 76.5% higher than those in 0% manure ($P < 0.05$). It was noted that organic farming could improve soil quality and organic matter content, improve soil physical and chemical properties, and increase soil microbial quantity.

(2) With the same input of N fertilizer, the protein content of cereal in 0% manure treatment was higher than that in 100% manure treatment. Along with the increase of the ratio of chemical fertilizer, the protein content of summer maize showed an increasing trend. As for amino acids, the total content of 16 amino acids in organic cereals were higher than those in conventional ones. The total content of 16 amino acids in organic winter wheat was 14.2% higher than that in conventional one ($P < 0.05$), and the total content of 16 amino acid in organic summer maize was 7.3% significantly higher than that in conventional one ($P < 0.05$). The content of Lysine and Threonine in organic cereals were higher than those in conventional ones. Therefore, organic cereal had lower protein content than conventional one, but higher amino acid content.

(3) The contents of Mo, K, P, S and Mg elements in organic winter wheat grain were higher than those in conventional one, and the S, K and Mo contents were extremely significantly different ($P < 0.01$). The contents of Mo and B elements in organic summer maize were higher than those in conventional one, and the content of Mo element was extremely significantly different ($P < 0.01$). When controlling the

proportion of different fertilizers, the Ca, Mg, P, S, K, Zn, Cu contents in winter wheat and the Ca, Mg, P, K, Cu contents in summer maize were the lowest in 0% manure treatment, and the content of Mo element was proportional to the ration of manure. It showed that the use of manure facilitated the absorption of some mineral elements, especially Mo element.

(4) The contents of harmful elements As, Pb, Cr and Ni in organic cereals were lower than those in conventional cereals, and the Mn and Al contents were extremely significantly lower than those of conventional ones ($P < 0.01$). When controlling the proportion of different fertilizers, the contents of Cr, As and Ni elements increased with the increase of the proportion of chemical fertilizer. The As and Ni contents of cereals in 100% manure treatment were at safe levels. The Ni, Pb and Cr contents of cereals in 100% chemical fertilizer treatment were all at unsafe levels. Therefore, the organic cereal was safer than the conventional one.

Key Words: Organic Cereal, Conventional Cereal, Protein, Amino Acid, Mineral Elements

目 录	
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 第一次“绿色革命”	1
1.1.2 作物营养品质下降	2
1.1.3 农业政策和营养品质政策发展史	3
1.1.4 有机产品营养品质	5
1.2 有机与常规谷物营养品质差异的研究现状	6
1.2.1 蛋白质和氨基酸	6
1.2.2 矿质元素	7
1.2.3 其他营养物质	8
1.3 有机肥和化肥配施的研究现状	9
1.3.1 化肥对环境的影响	9
1.3.2 有机肥的利用	10
1.3.3 有机肥化肥配施的研究现状	10
1.4 研究方案与研究目的	11
1.4.1 研究方案	11
1.4.2 研究目的	11
第 2 章 有机与常规谷物营养品质差异	13
2.1 试验区基本情况	13
2.2 实验设计与处理	13
2.3 测定指标	14
2.3.1 测试仪器	14
2.3.2 测定项目及方法	14
2.4 数据处理与分析	14
2.5 结果与分析	14
2.5.1 有机与常规谷物 16 种氨基酸含量差异	14
2.5.2 有机与常规谷物籽粒矿质元素含量差异	16
2.5.3 有机与常规谷物籽粒重金属元素含量差异	19
2.5.4 有机与常规谷物籽粒中部分元素比值的差异	22

2.6 讨论	22
2.7 小结	24
第 3 章 肥料配施对谷物营养品质含量的影响	25
3.1 试验区基本情况	25
3.2 实验设计与处理	25
3.2.1 试验品种	25
3.2.2 有机肥与化肥配施试验	25
3.2.3 样品采集	26
3.3 测定指标	27
3.3.1 测试仪器	27
3.3.2 测定项目及方法	27
3.4 数据处理与分析	27
3.5 结果与分析	28
3.5.1 不同肥料配比处理对土壤特性的影响	28
3.5.2 不同肥料配比处理对谷物产量的影响	28
3.5.3 不同肥料配比处理对谷物蛋白质含量的影响	28
3.5.4 不同肥料配比处理对谷物籽粒元素含量的影响	30
3.6 讨论	38
3.7 小结	40
第 4 章 结论与展望	43
4.1 结论	43
4.2 展望	44
参考文献	45
致 谢	53
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	55

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 第一次“绿色革命”

第二次世界大战后的恢复发展时期，人口迅速增加，工业快速发展，使发展中国家对农产品的需求不断扩大，同时，农业基础相当薄弱，自然灾害频繁发生，因此粮食短缺成为发展中国家面临的首要问题，如何采取有效的措施发展农业，解决粮食短缺问题，成为发展中国家的当务之急(戴小枫 等, 1997)。

20 世纪 60 年代中期，以印度为首的发展中国家进行了以水稻和小麦品种改良为中心的农业技术变革，带来粮食产量的显著增长，国际上称之为第一次“绿色革命”(文杜娟和陈风波, 2016)。

此次革命以半矮秆小麦、水稻的选育成功为中心，配以化学肥料、灌溉技术、农业机械化及化学农药等新技术，不仅使世界粮食产量大幅度提高，解决了 18 个发展中国家的粮食问题，改善了粮食的供应问题，实现了粮食的自给(戴小枫等, 1997)。同时，增加了作物管理的劳动力需求，引进了节省劳动力的技术，增加了农业收入，也为发达国家探索出了一条以高产、高效、优质、高出口值为目标，以良种化、机械化、集约化、喷灌化、化学化（化肥、农药）、产品化、商品化、国际化为特色的现代化农业发展道路(文杜娟和陈风波, 2016； 戴小枫 等, 1997)。

但是，化肥农药的大量使用，也带来严重环境和健康的问题，如全球变暖，环境恶化，水源污染，生物多样性减少，作物营养品质下降，人类健康状况下降等(Amundson et al., 2015； Rockström et al., 2013； Godfray et al., 2010)。

第一次“绿色革命”化肥农药的大量施用严重影响人类身体健康。根据 WHO 和 UNEP 的报告，全世界每年有 2600 万人农药中毒，其中有 22 万人死亡，美国每年有 67000 人农药中毒(Zhang et al., 2011)。农药的使用也加剧了多种癌症，如肺癌、直肠癌、骨髓瘤、乳腺癌以及白血病等的发生几率(Weichenthal et al., 2012)。农药引发的癌症病人占全部癌症病人的 10%(Xiao, 2005)。另外，很多研究表明，农药残留增加了患帕金森综合征的几率(Mark et al., 2012； Betarbet et al., 2000)。农药还严重影响儿童智力发育，孕期接触农药的产妇，会严重影响孩子出生后的

智商(Bouchard et al., 2011; Stewart et al., 2008)。

化肥的过量施用使农作物中重金属含量超标,也对人体健康产生威胁。重金属是一种持久性的潜在的有毒污染物,进入土壤之后,因为无法被生物降解而长期存在于土壤中,并不断积累,从而将会导致农作物中重金属含量富集,甚至可能超出国家规定标准,最终在人体内积累,影响人类健康(徐友宁 等,2014; 秦文淑 等,2008)。某些重金属,如 Ag、Hg 等,没有生物学功能,对生物体来说是非必需且具有潜在毒性及致癌作用(Hussein et al., 2005; Granero and Domingo, 2002)。

1.1.2 作物营养品质下降

自 20 世纪 70 年代早期,诺尔曼·艾·布劳格团队培育出“墨西哥小麦”新品种,掀起第一次“绿色革命”后,作物的育种更重视产量或口感,忽视了营养特性,现代的作物品种经过多代的选育,更重视甜度、外观或高产特性,以便满足生产者的经济需求,从而导致这些作物失去了重要的营养价值,造成作物营养品质的下降(Gruber, 2016)。

研究发现,从 1950 年到 1999 年,水果和蔬菜的蛋白质、矿质元素和维生素的含量明显下降,主要原因是这些作物的育种倾向于提高某些特性而忽视了营养品质(Davis et al., 2004)。近年关于小麦的研究也发现,从 1920 年到 2000 年,小麦中 Fe 浓度下降了 28%,Zn 浓度下降了 25%,Se 浓度下降了 18%(Gruber, 2016)。

作物营养品质的下降,造成了大量健康问题,如隐性饥饿、营养不良等。隐性饥饿是指人体内微量营养素(维生素和矿物质)缺乏。隐性饥饿多发生于妇女和儿童,会导致新生婴儿的缺陷以及发育不良,并增加儿童及孕产妇的死亡率和免疫系统弱化等疾病,隐性饥饿不像显性饥饿容易被发现,但却会严重影响一个国家或地区的人口素质和经济发展(吕爱清 等,2017)。隐性饥饿还能导致甲状腺肿、糖尿病等慢性疾病,直接或间接损害学习、认知和社会生产能力(谢磊,2010; Welch and Graham, 2004)。隐性饥饿威胁着世界上 20 多亿人口(Burchi et al., 2011)。根据 FAO 统计,全世界 11%的人口患有营养不良的症状(Food and Nations, 2015)。儿童死亡数的三分之二是由于营养不良(Welch and Graham, 2004)。因此,提高农作物的营养品质迫在眉睫。

表 1.1 人体所必需的 49 种营养物质（数据来源于 Welch and Graham, 2004）

Table 1.1 The 49 essential nutrients for sustaining human life (data from Welch and Graham, 2004)

水和能量	蛋白质 (氨基酸)	脂类-脂肪 (脂肪酸)	大量元素	微量元素	维生素
水	组氨酸	亚麻油酸	Na	Fe	A
碳水化合物	亮氨酸	次亚麻油酸	K	Zn	D
	异亮氨酸		Ca	Cu	E
	甲硫氨酸		Mg	Mn	K
	赖氨酸		S	I	C（抗坏血酸）
	苯丙氨酸		P	Fe	B ₁ （硫胺）
	色氨酸		Cl	B	B ₂ （核黄素）
	苏氨酸			Se	B ₃ （泛酸）
	缬氨酸			Mo	烟酸
				Ni	B ₆ （吡哆醛）
				Cr	叶酸
				V	生物素
				Si	B ₁₂ （钴胺素）
				As	
				Sn	
				Co	

人体需要至少 49 种营养物质来满足代谢需求（表 1.1）(Welch and Graham, 2004)，其中有 19 种必需微量营养物质是为了满足人类身体和智力发育，免疫系统功能和多种代谢过程的需要(Graham et al., 2007; Kennedy et al., 2007)。据调查，目前世界上有 20 亿人口存在缺铁性贫血，其中大部分是妇女和儿童(Díaz et al., 2003)；5 岁以下儿童由于缺乏维生素 A 而患有夜盲症的有 280 万(Díaz et al., 2003)。农作物是所有营养物质最主要的来源，因此，提高农作物的营养品质提升人类健康有重要意义(Graham et al., 2001)。

1.1.3 农业政策和营养品质政策发展史

1.1.3.1 农业政策发展史

传统的农业政策只注重提高该国家粮食的产量、生产力和总的粮食可用量。正如布依和韦尔奇所说，“农业制度从未明确规定要提升人类健康状况，反而只注重增加农民和农业公司的利润” (Howarthe and Rossm, 2010)。

在美国这样的工业化国家，国家的农业政策很少与公众健康有关(Mozaffarian and Ludwig, 2010; MarkMuller et al., 2009)。20 世纪 30 年代，美国农业政策的目标是维持或者提高农民家庭的生活水平，并确保有足够的粮食供给全部美国人(Freebairn, 1995)。其食物援助项目也主要集中于通过提高热量来提高营养，却很少关注提高食物的品质(Burchi et al., 2011)。“所有这些项目都是基于一个前提：消费者能够能到充足的食物、热量以及营养供应”(Mozaffarian and Ludwig, 2010)。

至于发展中国家，第一次“绿色革命”之后，很多节省劳动力的技术，如化肥、农药和各种育种技术促进了农业生产力(Burchi et al., 2011)。尽管一定程度上缓解了饥饿，但仍有一些限制(Freebairn, 1995; Swaminathan, 2000)。此次“绿色革命”主要集中于提高大米和小麦等主粮作物的产量，忽视了糖类、蛋白质和一些其他的必需营养物质的含量(Swaminathan, 2000)。在“绿色革命”之前，很多亚洲国家农民所种植的食物更加多样，而此次革命一定程度上改变了人们的饮食结构，导致了南亚地区人们的营养不良状况和全世界范围的隐性饥饿(Graham et al., 2007)。

80 年代初期，由于食品安全概念的提出，一些的农业政策添加了很多关于营养物质的规定(Pinstrup-Andersen, 1982; Pinstrup-Andersen et al., 1981)。农业能够提高农民收入和资产，是减少农村地区饥饿状况的一个重要手段(Kennedy and Bouis, 1993)。但很多证据表明，很多致力于提高农民收入的农业政策并没有增加儿童的营养(Braun and Kennedy, 1994)。只有一些添加了营养学教育，生产高营养产品的农业政策起到一定作用(Ruel, 2001)。

90 年代，农业政策更加重视能够提高农产品营养品质的生产方式、研究和技术，以此来缓解微量营养素缺乏的状况，由此引发了实现以食物为基础的政策(Ruel, 2001; Haddad, 2000)。在 1996 年世界粮食顶级峰会 (World Food Summit) 上给出的粮食安全定义很好的反映了营养安全和公众健康的重要性(Burchi et al., 2011)。

1.1.3.2 营养政策发展史

20 世纪 70 年代，营养政策和项目主要集中是关于蛋白质-能量的缺乏。但随着营养缺乏的决定因素越来越明确，维生素和矿质元素在提高营养品质方面所起的关键作用也逐渐明确(Burchi et al., 2011)。

尽管有大量证据表明,基于食物补充和强化的项目改善了目标人群的营养状况,但这种干预也存在缺点(Burchi et al., 2011)。首先,这些项目主要集中于三大微量营养物质——维生素 A、铁、和碘,虽然这三种营养物质最为普遍,且与之相关的症状影响人数最多,但却忽视其他一些非常重要的必需营养素对人体的作用;第二,这些项目主要集中于单一微量营养物质,而一个人可能同时缺乏多种微量营养物质(Frison et al., 2006)。因此,单一营养物质的补充剂,虽然在处理某些矿物质缺乏症状方面有重要作用,但无法确保世界范围内的饮食的可持续提高(Burchi et al., 2011)。

1.1.4 有机产品营养品质

第二次世界大战之后,尤其是绿色革命以来,发达国家大规模采用现代的科技手段,农业生产取得令人瞩目成就的同时,也面临着一系列严重问题,主要表现为不可再生资源的耗竭,粮食营养品质下降,生态环境恶化。在这样的农业背景下,新型的替代农业逐渐兴起,主要目标是生产有机产品,从而减缓常规农业的生产方式给资源、环境造成的严重压力(李正明, 2002)。尤其是 20 世纪 80 年代以来,世界各国纷纷响应可持续发展的思想,有机生产方式成为全球可持续农业的重要途径之一(李正明, 2002)。

近年来,有机农业迅速发展,部分研究者为提高农作物营养品质倡导将有机农业发展。有机农业的定义和标准在全世界不同地方都有一定的差异,总体来说,有机农业的共同特征是不使用农药、化肥、抗生素以及生长激素(Smith-Spangler et al., 2012)。

有机食品与其他食品相比,主要有三点差异。第一,化学肥料、化学农药及生长素等人工合成物质在有机食品的生产和加工过程中绝对禁止使用;第二,有机产品的生产和加工过程中,必须发展替代常规农业的生产和食品加工的更加安全环保的技术和方法,并建立严格的生产和管理体系,因此有机农产品的标准化管理比其他食品严格很多;第三,与其他食品相比,有机食品在整个生产加工过程中更强调环境和食品的安全性,人类的健康,以及人类、自然和社会的协调发展(朱忠南和季学生, 2002)。

基于此可确定,有机产品含有更高的安全性。但对于有机产品的营养品质状况长期以来受到广泛关注和争论(Lairon, 2010; Dangour et al., 2009; Kirchmann

et al., 2009)。近年来, 研究者们越来越重视有机作物的营养品质评估(Röhlig and Engel, 2010)。

谷物在食品金字塔的顶端, 作为人们日常饮食的重要部分, 是蛋白质、糖类物质和矿质元素等营养物质的重要来源, 谷类物质是满足人类营养需求的必需食品(Ciolek et al., 2012)。小麦和玉米作为三大谷物的重要部分, 在人们日常饮食中占重要比重, 研究其营养品质具有重要意义。

1.2 有机与常规谷物营养品质差异的研究现状

目前关于有机作物与常规作物营养品质的差异研究数量有限, 尤其是关于有机谷物与常规谷物的对比研究数量更少, 并且结论也不一致(Vrček et al., 2014)。据研究统计, 从 1977 年到 2011 年, 关于有机作物与常规作物营养品质差异性研究的文献只有 343 篇, 谷物仅有 61 篇(Barański et al., 2014)。

有机作物与常规作物的生产方式的主要区别是作物轮作的设计、肥料、作物保护方式及作物的品种选择(Barański et al., 2014; Rempelos et al., 2013; Cooper et al., 2011; Bueren et al., 2011)。关于有机谷物和常规谷物营养品质的研究主要分成三类, 1) 大田试验, 即试验样品来自于相邻地块的有机和传统农场; 2) 关联性研究, 即有机和无机样品是从消费者可以购买的零售地点获得; 3) 控制区试验, 即根据选定的变量挑选相应的有机农场和传统农场来获取样品(Barański et al., 2014; Dangour et al., 2009)。

有机产品的营养品质和安全性研究长期以来受到广泛关注和争论(Dangour et al., 2009; Lairon, 2010), 主要是由于不同研究所采用研究方法的不同, 产生了多样的结果(Vrček et al., 2014)。

1.2.1 蛋白质和氨基酸

蛋白质是生命活动的主要承担者, 由 20 多种氨基酸以不同比例组合而成的, 氨基酸是构成蛋白质的基本组成单位, 其中有 8 种是人体不能合成或者合成的速度远不适应机体的需要, 必须有食物蛋白供给的必需氨基酸(虞晓凡, 2015)。

作物中蛋白质含量受多种因素的影响, 如基因、环境、肥料等(Zörb et al., 2009)。目前大部分研究表明, 有机谷物中蛋白质的含量要低于常规谷物(Vrček et al., 2014; Zörb et al., 2009)。这是由于有机肥中的 N 大多是有机氮复合物, 如氨基

酸、氨基糖等，相比常规种植施用的速效氮肥，释放缓慢，所以蛋白质含量较低(Mäder et al., 2007)。但也有研究表明，有机谷物，尤其是小麦，蛋白质含量与常规谷物蛋白质含量相差不多，甚至某些品种的有机小麦蛋白质含量要高于常规谷物的蛋白质含量(Mäder et al., 2007; Shier et al., 1984)。

蛋白质品质的评价标准除了蛋白质含量外，还包括蛋白质的消化率、人体必需氨基酸的含量等，这些也是衡量蛋白质品质的重要指标(张宝军和蒋纪芸，1995)。Vrček 等(2014)对 2008 年和 2009 年种植的有机和常规小麦蛋白质消化率进行研究，发现有机小麦蛋白质的消化率分别比常规小麦高出 83.4%和 84.1%，尽管有机小麦蛋白质含量要低于常规小麦。Carillo 等(2012)发现有机土豆粉中丙氨酸、谷氨酸、精氨酸、天冬氨酸、天冬酰胺等多种氨基酸含量要高于常规土豆粉，且氨基酸总量要比常规土豆粉高出 25.7%。Mäder 等(2007)基于 21 年的大田实验，分析 18 种氨基酸含量，结果显示有机作物氨基酸含量与无机作物无显著差异。但也有其他研究表明，有机谷物蛋白质含量虽然低于常规谷物，但蛋白质质量要过于常规谷物蛋白质(Williamson, 2010; Zörb et al., 2009)。

1.2.2 矿质元素

矿质元素分为大量元素(人体需求量很大的元素，如 Ca, Mg)和微量元素(在人体中存在量极少的元素，如 Cu, Fe, Zn)(Martínez-Ballesta et al., 2011)。人体中所有代谢活动都需要矿质元素的参与，某些矿质元素的缺乏，会导致多种慢性疾病(Welch and Graham, 2004)。谷物中矿质元素的含量受多种因素的影响，如作物种类，土壤特性，气候条件及耕种方式等(Shi et al., 2010; Zacccone et al., 2010)。谷类作物，如小麦，极易缺乏微量元素，尤其是 Fe 和 Zn(Shi et al., 2010)。Zn 是多种酶和蛋白质的必要成分，参与多种代谢过程及基因的转录和翻译(Vallee, 1988)。而谷物作物人们日常饮食的重要部分，是人体中 Zn 的主要来源(Gibson et al., 2001)。缺 Zn 现象在全世界，尤其是发展中国家，较为严重，因此如何提高谷物中 Zn 元素含量受到广泛关注(Graham et al., 2000; Frossard et al., 2000)。因此，采取适当的方式提高谷物中微量元素的含量，并降低有害元素(如 Pb, Cd, Hg)的含量，是非常重要的(Vrček et al., 2014)。

由于不同研究所采用的方法不同，矿质元素的含量也出现不同的结果。如 Ryan 等(2004)采集多年大田试验的小麦样本研究发现，有机小麦的 Zn、Cu 元

素含量要显著高于常规小麦, N、K、Mg、Ca、S、Fe 元素含量无明显区别, Mn、P 元素含量要少于常规小麦。而 Ciolek 等(2012)则发现, 有机小麦的某些矿物质如 Mg、Ca、Fe、Zn 元素的含量要显著高于常规小麦, 当然, Ca、Mg 元素的含量受耕种方式的影响, 而有机大麦和有机燕麦中 Fe、Zn 含量要低于常规大麦和常规燕麦, 说明谷物种类也会影响微量元素的含量。

某些元素对生物体有毒性而没有生物功能, 这些元素称为毒性元素, 如铝、砷、铅、镉等元素。还有一部分元素在一定范围内对人体有益, 超过一定范围时, 则会对人体造成危害, 如铜、锰、钼元素。如表 1.2 所示为成人每天需要摄取的营养物质质量以满足身体需要 (FAO/WHO, 2000)。根据中国微量元素科学学会在 2005 年组织的研究会专家组规定人体头发 13 种元素正常参考值范围 H/ZWY04-2005, 人体中 Pb、Cd、As、Hg 元素含量正常范围为: Pb 元素含量小于 10 ug/g, Cd 元素含量小于 0.5 ug/g, As 元素含量小于 1.1 ug/g, Hg 元素含量小于 0.7 ug/g。

1.2.3 其他营养物质

研究发现, 有机作物的干物质和矿质元素含量更高, 且抗氧化物质, 如酚类、水杨酸等含量也要高于常规作物, 若利用合理的施肥方式, 可以使有机作物的蛋白质含量超过常规作物, 且将赖氨酸含量提高 25%-30%(Lairon, 2010)。另有研究发现有机作物的抗氧化物质, 如多酚要明显高于常规作物, 其中酚醛树脂、二苯乙烯、黄酮、黄酮醇、黄烷酮类和花青素要比常规作物分别高 19%, 28%, 26%, 50%, 69%和 51%, 而重金属如 Cd、Pb 的含量要明显低于常规作物 (Barański et al., 2014)。

迄今为止, 由于受研究数量和研究数据质量的限制, 关于有机作物与常规作物营养品质差异的研究结论不一, 但总体来说, 有机作物的营养品质要更高 (Vrček et al., 2014), 并且在某些营养物质的含量差别是巨大的 (Barański et al., 2014)。

目前大部分与谷物营养品质的研究都是基于关联性研究和控制区试验, 缺乏长期的大田试验 (Mäder et al., 2007), 但是影响谷物营养品质的因素很多, 除了耕种方式外, 还包括品种、季节、生长环境、土壤质量状况、播种和收获时间等 (Smith-Spangler et al., 2012; Dangour et al., 2009), 而关联性研究和控制区试验, 都无法

排除这些因素的影响,因此本研究决定同时采用长期的大田试验和控制区试验来获取试验样品。

表 1.2 年龄在 25-50 岁之间的男人和女人营养素建议摄取量

Table 1.2 Recommended nutrient intakes for males and females between the ages of 25 and 50 years (data from FAO/WHO 2000)

营养物质	评定	男人	女人
能量 (kcal)	AEA ^a	2900	2200
蛋白质 (g)	AEA	63	50
维生素 A (ug)	RDA ^b	1000	800
维生素 C (mg)	RDA	90	60
维生素 D (ug)	RDA	5	5
维生素 E (mg)	RDA	10	8
维生素 K (ug)	RDA	80	65
维生素 B ₆ (mg)	RDA	2	1.6
维生素 B ₁₂ (ug)	RDA	2	2
核黄素 (mg)	RDA	1.7	1.3
烟酸 (mg)	RDA	19	15
硫胺素 (mg)	RDA	1.5	1.1
泛酸 (mg·d ⁻¹)	ESADDI ^c	4-7	4-7
生物素 (ug·d ⁻¹)	ESADDI	30-100	30-100
叶酸 (ug)	RDA	200	180
Ca (mg)	RDA	800	800
P (mg)	RDA	800	800
Mg (mg)	RDA	350	280
Na (mg)	MR ^d	500	500
K (mg)	MR	2000	2000
Cl (mg)	MR	750	750
Fe (mg)	RDA	10	15
Zn (mg)	RDA	15	12
Cu (mg)	ESADDI	1.5-3.0	1.5-3.0
Se (ug)	RDA	70	55
I (ug)	RDA	150	150
Mn (mg)	ESADDI	2-5	2-5
Mo (ug)	ESADDI	75-250	75-250
Cr (ug)	ESADDI	50-200	50-200
F (mg)	ESADDI	1.5-4.0	1.5-4.0

1.3 有机肥和化肥配施的研究现状

1.3.1 化肥对环境的影响

根据 FAO 报告统计,2014 年全球化肥使用量为 1.869 亿吨(FAO, 2015)。过

量施用化肥,尤其是 N 肥,容易加重土壤酸化现象。近几十年来,我国的化肥施用量急剧增加。美国等发达国家的化肥利用率超过 50%,而我国的仅为三分之一左右(郝学宁 等,2000)。其余的化肥或进入空气圈,成为造成温室效应的气体之一,或随土壤淋溶进入水中,导致水体富营养化(张俊清 等,2004; Byrnes, 1990)。

施用适量的化肥能够提高土壤肥力,创造最适宜的营养环境,改善土壤形状,提高农产品质量,但过量施用化肥,将会导致土壤板结、耕地质量下降、生产力降低,据调查,由于化肥的长期及过量施用,东北三江平原的土壤有机质含量从 10%-11.5%,下降到 3%-5%(黄国勤 等,2004)。另外,过量施用化肥还会导致土壤侵蚀、土壤有机质流失等,美国每年仅与土壤侵蚀有关的公共和环境健康损失就超过 450 亿美元(Pimentel et al., 1995)。

1.3.2 有机肥的利用

有机肥是我国传统农业生产中的重要肥料来源之一,是指用作物秸秆、家禽粪便等为原料,利用堆肥方式制成的有机肥料(郭立月,2015)。有机肥含有作物生长需要的 N、P、K 等矿质元素及其他营养物质(樊小林和廖宗文,1998)。以家禽粪便为例,家禽粪便中含多种无机成分及 Ga、Mg、S 等微量元素,养分利用率较高,氮以有机形态为主,主要为蛋白质、氨基酸、核酸等,均能被植物吸收利用,因此,有机肥是我国传统农业生产中,用来提高土壤肥力并增加农作物产量的重要肥料之一(李占,2013)。

牛粪经腐熟之后,含有大量植物生长所需的营养物质和微量元素,对作物的营养供给起到非常重要的作用。施入腐熟牛粪后,土壤中能够形成微生物群落、有机物质及其分解产物,如生长素、泛酸、维生素、叶酸等植物生长活性物质,能够促进作物的生长,增强植物的抗逆性(李占,2013)。有机肥中的有机质在分解的过程中能够形成腐殖质,促进形成土壤团粒结构,提高了土壤保水肥性能,改善土壤的理化性质(姜益娟和郑德明,1999; 韩太日 等,1999)。有机肥除了能够增加土壤微生物(如氨化菌、固氮菌、硝化菌等)的数量外,还能够为土壤微生物提供大量养分,促进其反硝化和活动(Mandal et al., 2007)。

1.3.3 有机肥化肥配施的研究现状

有机肥能够提高土壤有机质含量和土壤供肥容量,改善土壤理化性质和养分库容,但有机肥发挥肥效较慢,难以快速满足作物生长发育的需求,化肥能够在

较短时间内快速增加土壤速效养分含量(唐继伟 等, 2006; 白成云和刘金城, 1999)。因此, 二者配施的时, 能发挥两者长处, 优于化肥或者有机肥的单独使用。研究表明, 有机肥化肥的配施, 能够提高土壤全氮、全磷及速效磷的含量(陈欣和宇万太, 1997; 刘杏兰和高宗, 1996)。

土壤微生物是土壤生态系统中最活跃的部分, 是保证土壤质量的重要部分, 是土壤生命力的象征。土壤微生物参与土壤养分的转化与循环、有机质的分解及能量流动环节, 因此在维持生态系统服务功能方面, 土壤微生物也发挥着重要作用, 可以将土壤微生物称为土壤环境污染物的“净化器”, 土壤养分元素循环的“转化器”, 以及陆地生态系统的“调节器”(Lin et al., 2004; Smith et al., 1990)。

化肥对微生物的影响主要通过无机氮肥, 短期施用无机氮肥时, 土壤微生物的生长受到氮素营养的刺激, 但长期施用无机氮肥, 会使土壤微生物的活性减弱。有机肥则不同, 长期施用有机肥, 能够提高土壤微生物的数量(张英 等, 2001; 李娟 等, 2008)。而有机肥化肥配施时, 土壤微生物能够得到充足的 C 源和 N 源, 生物活性受到很大刺激, 利于土壤微生物量的提高(Mandal et al., 2007)。

1.4 研究方案与研究目的

1.4.1 研究方案

本研究采用两种试验方案:

- (1) 采用控制区试验的方法, 挑选有机农场和常规农场的小麦玉米样品, 比较籽粒的营养品质差异;
- (2) 采用大田试验的方法, 以施肥方式作为变量, 研究籽粒的营养品质差异

1.4.2 研究目的

- (1) 对比分析有机与常规谷物营养品质差异。
- (2) 探索施肥方式对有机与常规谷物营养品质差异的影响。

第2章 有机与常规谷物营养品质差异

2.1 试验区基本情况

试验地点位于山东省山东农业大学农业生态系统研究定位站(35°26'34"N, 117°49'13"E)。该地处于中纬度区,地属沂蒙山区腹地,海拔 200-400 m,属于温带季风区大陆性气候,年平均气温为 13.2℃。降雨量受到季风影响,为山东省最丰沛地区之一,主要集中在夏秋季节,冬夏降水差异较大,年平均降雨量为 725.0 mm。全年无霜期 188.8-212.0 d,全年日照时数为 2539-2490 h,雨热同期,光照充足,为农作物的生长提供较长生育期,利于作物生长。该地土壤类型为棕壤土,农耕历史悠久,传统的农业生态系统耕作制度为一年两熟,主要的粮食作物是小麦与玉米,经济作物是大蒜与花生,常见的种植模式为冬小麦-夏玉米轮作和大蒜-花生轮作体系(虞晓凡, 2015; 郭立月, 2015; 李占, 2013)。

2.2 实验设计与处理

对比有机与常规谷物的营养品质状况。谷物主要是指小麦、玉米、水稻,还包括高粱、荞麦等,本研究选取北方广泛种植的有代表性的谷物,冬小麦和夏玉米,研究有机与常规种植模式下,冬小麦、夏玉米籽粒营养品质状况。采用控制区实验的方法,即挑选有代表性的有机农场与常规农场,两个农场地理条件相近、环境条件相似,各自采用有机种植方式和常规种植方式。

有机谷物样品来自于山东省临沂市平邑县弘毅生态农场院内样地,该样地自 2006 年 7 月开始实行有机种植模式,采用“六不用”生产模式,即不用农药、化肥、除草剂、农膜、添加剂、转基因。因此所取样品完全符合国际上有机谷物的规定标准。

常规谷物样品来自于山东省临沂市平邑县蒋家庄农户田地,该地地理条件和环境条件与有机农场相似,但长期施用传统方式种植作物,即施用化肥、农药,因此所取样品完全可以作物常规谷物样品。

冬小麦品种为良星 99,夏玉米品种为郑单 958。良星 99 为山东农业大学培育的优良品种,有较强的抗寒性能,并且分蘖能力强,成穗率高,有良好的丰产

性能(王成超 等, 2008), 郑单 958 由河南省农科院作物所培育而成, 具有优质、多抗、高产且稳产的特性(刘文成 等, 2003)。该冬小麦、夏玉米品种在此试验地区广泛种植多年, 为当地常用品种。

谷物样品的取样采取随机原则, 分别在有机农场和常规农场设置 3 个重复, 确保有机与常规冬小麦、夏玉米为相同的品种(冬小麦为良星 99, 夏玉米为郑单 958), 并确保同一天取样。冬小麦样方面积为 $1\text{ m} \times 1.2\text{ m}$, 将样方内的小麦全部取出, 脱粒风干。夏玉米随机选取连续的 15 株, 取穗, 脱粒风干。冬小麦(良星 99)、夏玉米(郑单 958)籽粒样品放在 80°C 的烘箱中烘干至恒重, 粉碎机粉碎, 过 60 目筛, 用以测定各指标。

2.3 测定指标

2.3.1 测试仪器

分析天平(量感 0.0001, 德国 Sartorius)、万能粉碎机、722 型分光光度计、水浴锅、消煮炉、Mars6 高通量密闭微波消煮系统(微波消解仪, 美国 CEM 公司)、ICP-AES 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 Thermo 公司)、ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司)等。

2.3.2 测定项目及方法

- (1) 游离氨基酸含量——茚三酮显色法(王学奎, 2008)。
- (2) 矿质元素含量——ICP-AES 电感耦合等离子发射光谱法。
- (3) 重金属元素含量——ICP-MS 电感耦合等离子体质谱法。

2.4 数据处理与分析

用 Microsoft Excel 2016 处理数据, 采用 IBM SPSS statistics 20.0 软件中的 One-way ANOVA 进行方差分析, 采用 LSD 检验方法比较各处理间的差异。制图采用 SigmaPlot 12.5 软件, 图表中数据均为各处理的平均数 \pm 标准误差。

2.5 结果与分析

2.5.1 有机与常规谷物 16 种氨基酸含量差异

图 2.1 为有机与常规冬小麦、夏玉米 16 种氨基酸含量, 有机谷物 16 种氨基

酸的总量要高于常规谷物。有机冬小麦 16 种氨基酸总量要比常规冬小麦高 14.2%，差异显著 ($P < 0.05$)。有机冬小麦甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸和脯氨酸含量分别显著高于常规冬小麦 ($P < 0.05$)，天冬氨酸、丝氨酸、谷氨酸和亮氨酸含量分别极显著高于常规冬小麦 ($P < 0.01$)。有机夏玉米 16 种氨基酸的总量比常规夏玉米高 7.3%，差异显著 ($P < 0.05$)，其中 14 种氨基酸的含量要高于常规夏玉米，并且有 5 种氨基酸含量差异显著 ($P < 0.05$)，分别为谷氨酸、丙氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、脯氨酸。

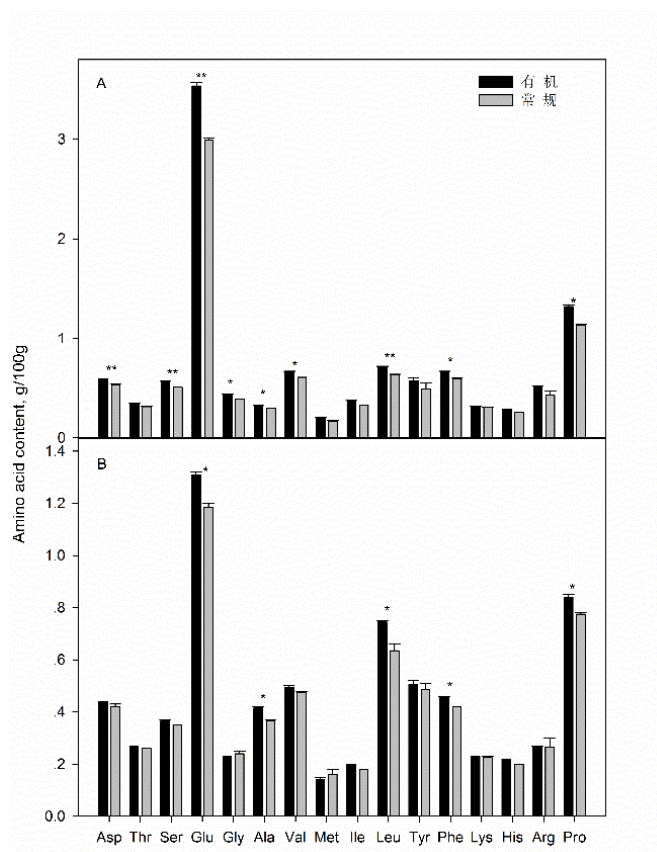


图 2.1 有机与常规冬小麦 (A)、夏玉米 (B) 16 种氨基酸含量

Figure 2.1 Composition of amino acids in organic and conventional winter wheat (A) and summer maize (B)

数据为平均值±标准误，n=3。不同的注脚符号表示差异显著，LSD 检验，“***”代表极显著相关 ($P < 0.01$)；“**”代表显著相关 ($P < 0.05$)。

Values were reported as means ± standard deviations, n=3. The different footnote symbols in the same graph represent significant differences, LSD test, ** extremely striking contrast ($P < 0.01$); * significant difference ($P < 0.05$).

图 2.2 为有机与常规冬小麦、夏玉米 16 种氨基酸含量的差异。从图中可以看出，有机冬小麦 16 种氨基酸的含量分别高于常规冬小麦，差异由高至低分别为：甲硫氨酸>精氨酸>谷氨酸>脯氨酸=酪氨酸>异亮氨酸>亮氨酸>组氨酸=苯丙氨酸=甘氨酸>丝氨酸>天冬氨酸=苏氨酸>缬氨酸>丙氨酸>赖氨酸。有机冬小麦甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸和脯氨酸含量分别比常规冬小麦显著高 12%、8%、9%、12%和 16%。有机冬小麦中天冬氨酸、丝氨酸、谷氨酸和亮氨酸含量分别比常规冬小麦极显著高 10%、11%、18%、13%。赖氨酸和苏氨酸是小麦的限制性氨基酸，有机冬小麦的含量比常规冬小麦分别高 3%、10%。

有机夏玉米谷氨酸、丙氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、脯氨酸含量分别比常规夏玉米显著高 11%、14%、17%、8%、8%。有机夏玉米甲硫氨酸和甘氨酸含量比常规夏玉米低 13%和 4%。有机夏玉米赖氨酸、苏氨酸含量分别比常规夏玉米高 2%、4%。

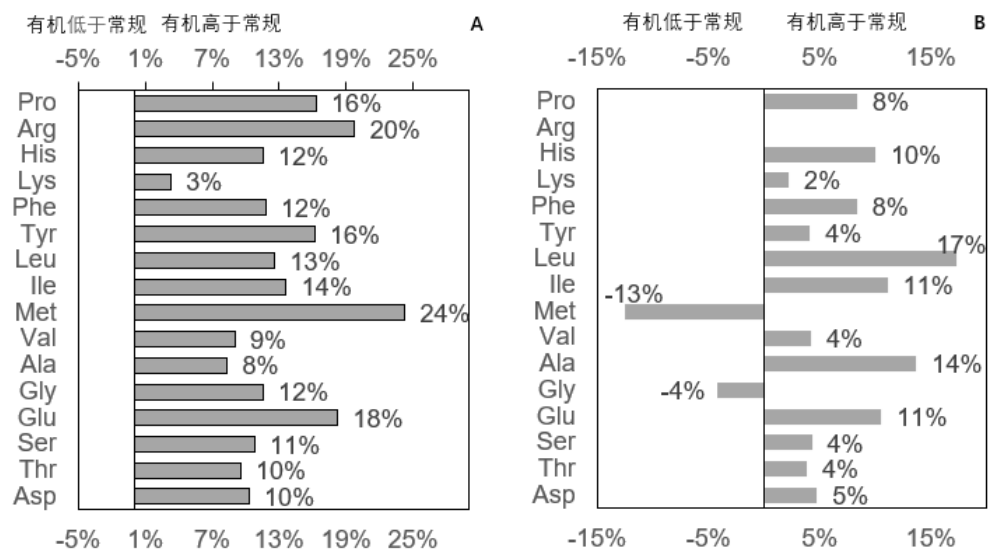


图 2.2 有机与常规冬小麦(A)、夏玉米 (B) 氨基酸含量差异

Figure 2.2 The difference of amino acid content in organic and conventional winter wheat (A) and summer maize (B)

2.5.2 有机与常规谷物籽粒矿质元素含量差异

2.5.2.1 有机和常规冬小麦籽粒矿质元素含量差异

图 2.3 显示了有机和常规冬小麦籽粒中矿质元素的含量。由图可以看出，有机和常规冬小麦籽粒中矿质元素含量的总体趋势为： $P > K > Mg > S > Na > Ca > Fe > Al > B > Mo > Co$ 。有机冬小麦籽粒 S、K、Mo 元素含量极显著高于常规冬

小麦 ($P<0.01$)，常规冬小麦籽粒 Al、Fe、Co 元素含量极显著高于有机冬小麦 ($P<0.01$)。

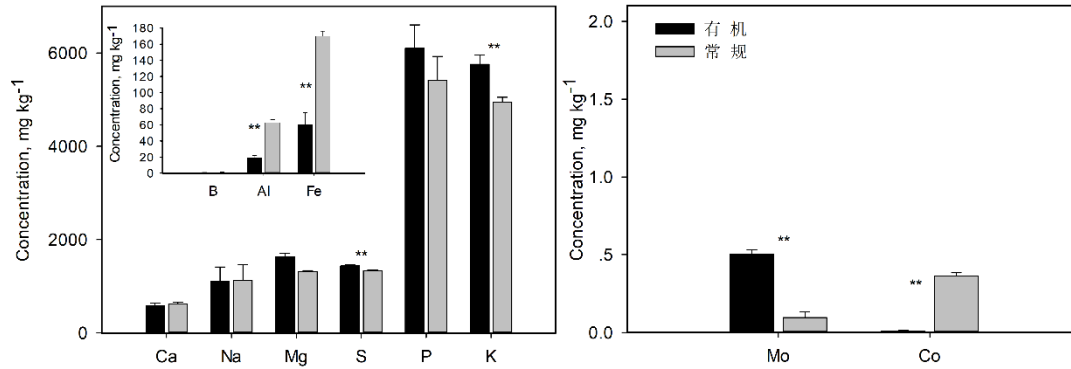


图 2.3 有机和常规冬小麦籽粒中矿质元素含量

Figure 2.3 Contents of mineral elements in organic and conventional winter wheat

数据为平均值±标准误，n=3。不同的注脚符号表示差异显著，LSD 检验，“***”代表极显著相关 ($P<0.01$)；“**”代表显著相关 ($P<0.05$)。

Values were reported as means ± standard deviations, n=3. The different footnote symbols in the same graph represent significant differences, LSD test, ** extremely striking contrast ($P < 0.01$); * significant difference ($P < 0.05$).

图 2.4 可以看出有机与常规冬小麦籽粒矿质元素含量的差异，有机冬小麦籽粒 Mo、K、P、S、Mg 元素含量分别比常规冬小麦高 430%、16%、13%、8%、24%。而 Co、Na、Ca、Fe、Al、B 元素含量在常规冬小麦籽粒中较高，有机冬小麦籽粒 Al、Fe、Co 元素含量比常规冬小麦低 69%、64%和 98%。

2.5.2.2 有机和常规夏玉米籽粒矿质元素含量差异

图 2.5 显示了有机和常规夏玉米籽粒中矿质元素的含量。由图可以看出，有机和常规夏玉米籽粒中矿质元素含量的总体趋势为： $S>K>P>Mg>Na>Ca>Fe>Al>B>Mo>Co$ 。除 S、K、P、Mg 元素外，其他元素含量趋势与冬小麦相同。有机夏玉米籽粒 Mo 元素含量极显著高于常规夏玉米 ($P<0.01$)，常规夏玉米籽粒 Mg、Al、Fe、Co 元素含量高于有机夏玉米，其中 Mg 元素含量差异显著 ($P<0.05$)，Al、Fe、Co 元素含量差异极显著 ($P<0.01$)。

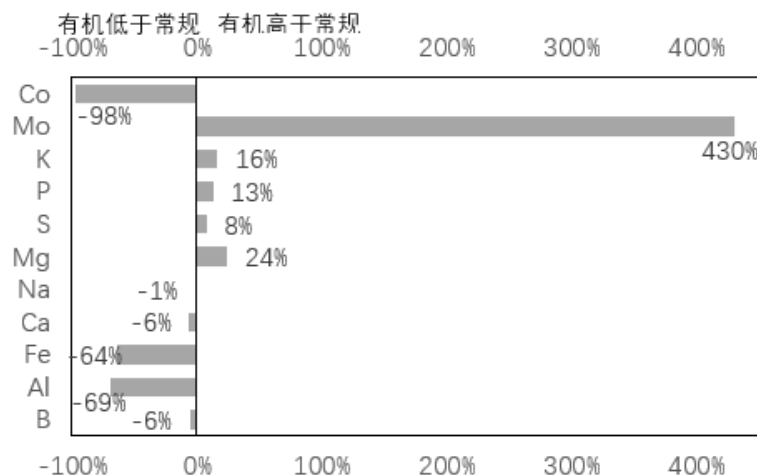


图 2.4 有机与常规冬小麦籽粒中矿质元素含量差异

Figure 2.4 The difference of mineral element contents in organic and conventional winter wheat

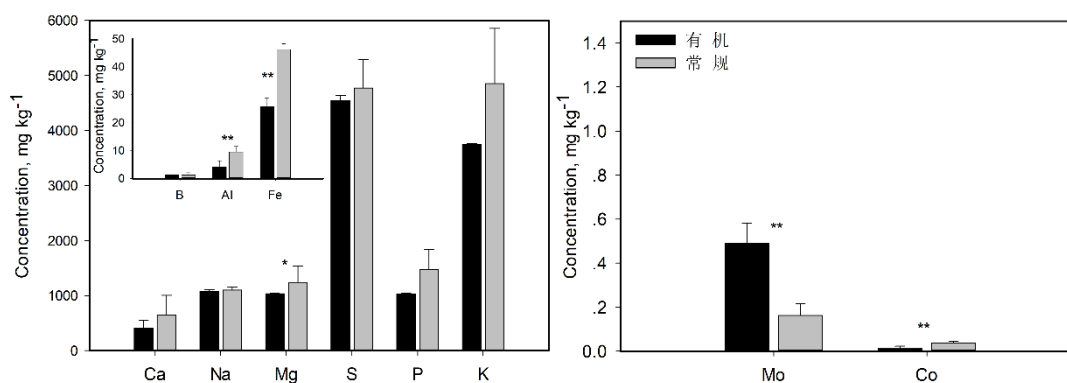


图 2.5 有机和常规种植的夏玉米籽粒中的矿质元素含量

Figure 2.5 Contents of mineral elements in organic and conventional summer maize.

数据为平均值±标准误, n=3。不同的注脚符号表示差异显著, LSD 检验, “***”代表极显著相关 ($P < 0.01$); “**”代表显著相关 ($P < 0.05$)。

Values were reported as means \pm standard deviations, n=3. The different footnote symbols in the same graph represent significant differences, LSD test, ** extremely striking contrast ($P < 0.01$); * significant difference ($P < 0.05$).

图 2.6 显示了有机与常规夏玉米籽粒矿质元素含量的差异,有机夏玉米 Mo、B 元素含量分别比常规夏玉米高 202%、23%。而 Co、K、P、S、Mg、Na、Ca、

Fe、Al 元素含量在常规夏玉米中较高，有机夏玉米 Mg、Al、Fe、Co 元素含量比常规夏玉米低 17%、55%、44%、67%。

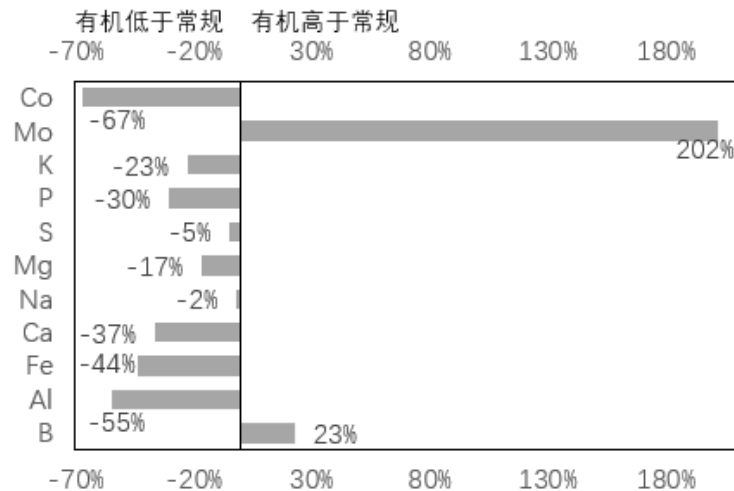


图 2.6 有机与常规夏玉米籽粒中矿质元素含量差异

Figure 2.6 The difference of mineral element contents in organic and conventional summer maize

2.5.3 有机与常规谷物籽粒重金属元素含量差异

2.5.3.1 有机和常规冬小麦籽粒重金属元素含量差异

图 2.7 为有机与常规冬小麦籽粒中重金属元素含量，可以看出，有机冬小麦籽粒中七种重金属元素含量全部低于常规冬小麦，且 Mn 元素含量存在极显著差异 ($P < 0.01$)，常规冬小麦 Mn 元素含量比有机冬小麦高 235.5%。七种重金属元素中 As、Pb、Cr、Ni 元素更容易对人体造成伤害，常规冬小麦籽粒中 As、Pb、Cr、Ni 元素含量比有机冬小麦分别高 2%、387%、35%、65%。

表 2.1 为重金属单因子污染指数的分级标准。重金属污染的评价方法通常采用单因子污染指数法，计算公式为： $P_i = C_i / S_i$ (秦文淑 等, 2008)。其中 P_i 为重金属单因子污染指数， C_i 为该重金属的实测值， S_i 为重金属元素安全评价的标准值，根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中规定的 As、Pb、Cr、Ni 元素最高允许限量： $As \leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (谷物及其制品)， $Pb \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (谷物)， $Cr \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (谷物及其制品)， $Ni \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

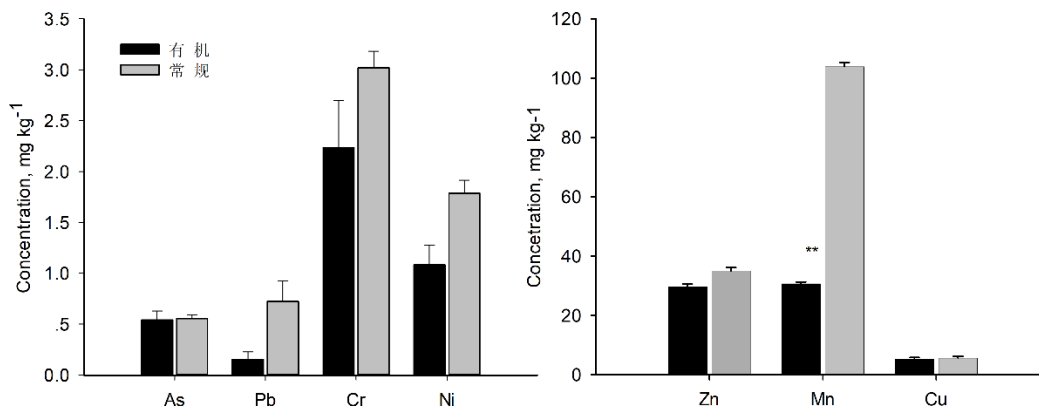


图 2.7 有机与常规冬小麦籽粒中重金属元素含量

Figure 2.7 Contents of heavy mental elements in organic and conventional winter wheat.

数据为平均值±标准误，n=3。不同的注脚符号表示差异显著，LSD 检验，“***”代表极显著相关 ($P<0.01$)；“**”代表显著相关 ($P<0.05$)。

Values were reported as means \pm standard deviations, n=3. The different footnote symbols in the same graph represent significant differences, LSD test, ** extremely striking contrast ($P < 0.01$); * significant difference ($P < 0.05$).

表 2.1 重金属单因子污染指数分级标准

Table 2.1 Single factor pollution index classification standard of heavy metals

污染指数 Pi	污染等级	等级
$Pi \leq 0.7$	优良	1
$Pi \leq 1.0$	安全	2
$1.0 < Pi \leq 2.0$	轻污染	3
$2.0 < Pi \leq 3.0$	中污染	4
$Pi > 3.0$	重污染	5

根据表 2.2，冬小麦四种金属的单因子污染指数，有机冬小麦 Pb 元素的 $Pi < 1.0$ ，处于安全级别；As、Ni 元素 Pi 稍稍大于 1.0，处于轻污染级别；Cr 元素 Pi 处于 2.0 和 3.0 之间，处于中污染级别。常规冬小麦籽粒中，As、Ni 元素 Pi 处于 1.0 和 2.0 之间，处于轻污染级别；Pb、Cr 元素 $Pi > 3.0$ ，处于重污染级别。

2.5.3.2 有机和常规夏玉米籽粒重金属元素含量差异

图 2.8 为有机与常规夏玉米籽粒中重金属元素含量，可以看出，除了 Pb 元

素外，其他六种重金属元素在有机夏玉米籽粒中含量均低于常规夏玉米，且 Mn 元素含量存在极显著差异 ($P<0.01$)，常规夏玉米 Mn 元素含量比有机夏玉米高 929.4%。常规夏玉米籽粒中 As、Cr、Ni 元素含量比有机夏玉米分别高 2%、2%、44%。

表 2.2 有机与常规冬小麦籽粒重金属单因子污染指数

Table 2.2 Single factor pollution index of heavy metals in organic and conventional seed of winter wheat

重金属元素	As	Pb	Cr	Ni
有机冬小麦 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.54	0.15	2.24	1.09
Pi	1.08	0.77	2.24	1.09
常规冬小麦 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.55	0.73	3.02	1.79
Pi	1.11	3.63	3.02	1.79

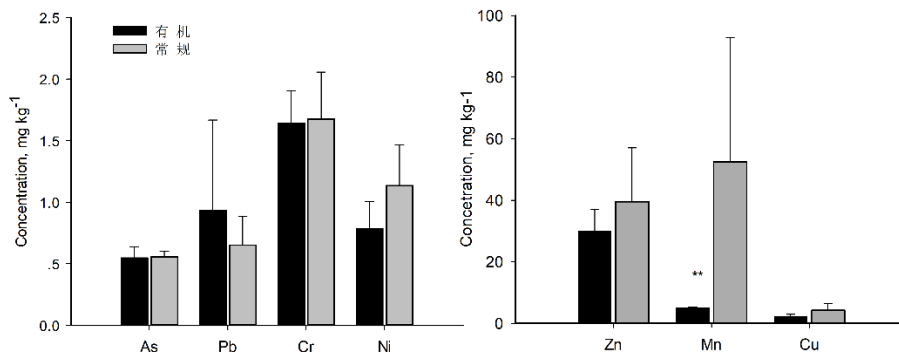


图 2.8 有机和常规种植的夏玉米籽粒中的重金属元素含量

Figure 2.8 Contents of heavy mental elements in organic and conventional summer maize.

数据为平均值±标准误，n=3。不同的注脚符号表示差异显著，LSD 检验，“***”代表极显著相关 ($P<0.01$)；“**”代表显著相关 ($P<0.05$)。

Values were reported as means ± standard deviations, n=3. The different footnote symbols in the same graph represent significant differences, LSD test, ** extremely striking contrast ($P < 0.01$); * significant difference ($P < 0.05$).

根据表 2.3，夏玉米四种金属的单因子污染指数，有机夏玉米 Ni 元素的 $P_i < 1.0$ ，处于安全级别；As、Cr 元素 $P_i > 1.0$ ，处于轻污染级别；Pi 元素 $P_i > 3.0$ ，处于重污染级别。常规夏玉米籽粒中，As、Cr、Ni 元素 P_i 处于 1.0 和 2.0 之间，

处于轻污染级别；Pb 元素 $P_i > 3.0$ ，处于重污染级别。

表 2.3 有机与常规夏玉米籽粒重金属单因子污染指数

Table 2.3 Single factor pollution index of heavy metals in organic and conventional seed of summer maize

重金属元素	As	Pb	Cr	Ni
有机夏玉米 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.55	0.93	1.64	0.79
Pi	1.09	4.67	1.64	0.79
常规夏玉米 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.56	0.65	1.68	1.14
Pi	1.11	3.25	1.68	1.14

2.5.4 有机与常规谷物籽粒中部分元素比值的差异

人体摄取元素，不仅与作物中元素的含量有关，与元素之间的比例也有很大关系。表 2.4 中可以看出，有机冬小麦 $w(\text{Zn})/w(\text{Cu})$ 比值小于常规冬小麦，有机夏玉米 $w(\text{Zn})/w(\text{Cu})$ 比值大于常规夏玉米。有机冬小麦 $w(\text{Ca})/w(\text{Mg})$ 和 $w(\text{Na})/w(\text{K})$ 的比值均小于常规冬小麦，有机夏玉米 $w(\text{Ca})/w(\text{Mg})$ 比值小于常规夏玉米， $w(\text{Na})/w(\text{K})$ 比值大于常规夏玉米。

表 2.4 有机与常规谷物 $w(\text{Ca})/w(\text{Mg})$ 、 $w(\text{Zn})/w(\text{Cu})$ 、 $w(\text{Na})/w(\text{K})$ 比值

Table 2.4 $w(\text{Ca})/w(\text{Mg})$ 、 $w(\text{Zn})/w(\text{Cu})$ 、 $w(\text{Na})/w(\text{K})$ ration in organic and conventional cereal

谷物种类	种植方式	$w(\text{Ca})/w(\text{Mg})$	$w(\text{Zn})/w(\text{Cu})$	$w(\text{Na})/w(\text{K})$
冬小麦	有机	0.35	5.67	0.01
	常规	0.47	6.33	0.03
夏玉米	有机	0.40	13.46	0.29
	常规	0.52	9.35	0.23

2.6 讨论

蛋白质营养品质包括蛋白质含量，蛋白质消化率，氨基酸的含量及比例等指标，因此氨基酸含量及比例是衡量蛋白质品质的一个重要标准(张宝军和蒋纪芸, 1995)。本研究结果显示有机谷物 16 种氨基酸总量高于常规谷物，有机冬小麦 16 种氨基酸总量比常规冬小麦显著高出 14.2%，有机夏玉米氨基酸总量比常规夏玉米显著高出 7.3%。有机冬小麦 16 种氨基酸含量全部分别高于常规冬小麦，且甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸和脯氨酸含量差异显著 ($P < 0.05$)，天冬氨酸、丝氨酸、谷氨酸和亮氨酸含量差异极显著 ($P < 0.01$)；有机夏玉米 14 种氨基酸

含量分别高于常规夏玉米，谷氨酸、丙氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、辅氨酸含量差异显著 ($P<0.05$)。有机谷物的限制性氨基酸，赖氨酸和苏氨酸含量高于常规谷物。

矿质元素是人体所必需的重要营养素，对维持人类正常生活、构成人体组织等方面有重要作用。冬小麦和夏玉米籽粒中矿质元素含量，除 S、K、P、Mg 元素外，其他元素含量趋势相同。有机冬小麦籽粒 Mo、K、P、S、Mg 元素含量高于常规冬小麦，且 S、K、Mo 元素含量差异极显著 ($P<0.01$)；有机冬小麦籽粒 Al、Fe、Co 元素含量极显著低于常规冬小麦 ($P<0.01$)。有机夏玉米籽粒 Mo、B 元素含量高于常规夏玉米，且 Mo 元素含量差异极显著 ($P<0.01$)；有机夏玉米籽粒 Al、Fe、Co 元素含量显著低于常规夏玉米 ($P<0.05$)，Mg 元素极显著低于常规夏玉米 ($P<0.01$)。

Mg 在细胞代谢和维持细胞离子平衡方面有重要作用，Mg 元素的缺乏易引起心脑血管疾病(Gomez-Becerra et al., 2010)，本研究结果显示有机冬小麦籽粒 Mg 元素含量高于常规冬小麦，有机夏玉米 Mg 元素含量则极显著低于常规夏玉米。Mo 对促进人体生长发育具有重要的作用，本研究中，有机谷物中 Mo 元素含量极显著高于常规谷物。Al 元素不是人体必需的营养元素，人体缺乏 Al 元素时不会产生健康问题，相反，当人体中 Al 元素积累到一定程度时，会导致人体铝中毒，损伤人体的骨骼、大脑以及胃(李恒达 等, 2006)。本研究显示有机谷物 Al 元素含量显著低于常规谷物。Fe 元素对人体血红细胞有重要作用，Co 元素能够促进红血球生长。

农作物中重金属的含量主要受土壤、水体以及空气中重金属含量的状况影响(袁庆虹和何作顺, 2009)。重金属进入作物主要通过两种方式，第一，叶片、果实等地上部分的吸收，尤其是空气中重金属污染较为严重时；第二，根系吸收土壤中的重金属元素，此方式为作物吸收重金属的主要途径(赵艺和赵保卫, 2008；张建新 等, 2007)。重金属在作物中积累，通过食物链进入人体而在人体内富集，并与酶、蛋白质等物质发生作用，从而影响人体功能，甚至威胁人类生命(袁庆虹和何作顺, 2009)。重金属毒害人体主要表现为损伤神经系统、造成人体记忆力减退、增加患癌几率等(虞晓凡, 2015)。本研究结果显示，有机谷物几乎所有重金属元素含量都要低于常规谷物，且 Mn 元素含量存在极显著差异 ($P<0.01$)。对人体有严重危害作用的 As、Pb、Cr、Ni 四种元素进行安全评价，有机谷物安全及轻污

染等级达到 75%，常规冬小麦、夏玉米重污染等级分别为 50%、25%。常规谷物中的重金属主要来源于化肥(王起超和麻壮伟, 2004)，有机肥中也存在部分重金属，尤其是家畜粪便，重金属主要来源于人工饲料和添加剂(王飞 等, 2013, 程旭艳 等, 2012)。

研究表明，人体内的 $w(\text{Zn})/w(\text{Cu})$ 比值过大时，容易造成人体内胆固醇代谢紊乱，从而导致冠心病、高血压等疾病(李政 等, 2011)。本研究结果显示，有机冬小麦 $w(\text{Zn})/w(\text{Cu})$ 比值小于常规冬小麦，有机夏玉米 $w(\text{Zn})/w(\text{Cu})$ 比值大于常规夏玉米，因此，有机冬小麦对改善高血压等病人体内的 $w(\text{Zn})/w(\text{Cu})$ 比值有一定作用。另外有研究表明，高血压患者血清的 $w(\text{Ca})/w(\text{Mg})$ 比值偏低， $w(\text{Na})/w(\text{K})$ 比值偏高(李睿, 2008)。本研究中，有机冬小麦的 $w(\text{Na})/w(\text{K})$ 比值偏低。

2.7 小结

(1) 氨基酸含量。有机谷物的氨基酸总量要高于常规谷物，且一半以上氨基酸含量要高于常规谷物。有机谷物的限制性氨基酸，赖氨酸和苏氨酸含量高于常规谷物。因此，从氨基酸水平上，有机谷物蛋白质营养品质要高于常规谷物。

(2) 有益元素。有机谷物中 Mo 元素含量极显著高于常规谷物 ($P < 0.01$)，Fe 和 Co 元素的含量则极显著低于常规谷物 ($P < 0.01$)。其他元素则根据作物种类的不同而出现不同的结果。

(3) 毒性元素。有机谷物几乎所有重金属元素含量都要低于常规谷物，尤其是有害元素 As、Pb、Cr、Ni，有机谷物中 Mn、Al 元素含量极显著低于常规谷物 ($P < 0.01$)。因此，有机谷物整体上比常规谷物更安全。

第 3 章 肥料配施对谷物营养品质含量的影响

3.1 试验区基本情况

试验地点位于山东省山东农业大学农业生态系统研究定位站 (35°26'34"N, 117°49'13"E)。该实验地点处于中纬度区, 地属沂蒙山区腹地, 海拔 200-400 m, 属于温带季风区大陆性气候, 年平均气温为 13.2 °C。降雨量受到季风影响, 为山东省最丰沛地区之一, 主要集中在夏秋季节, 冬夏降水差异较大, 年平均降雨量为 725.0 mm。全年无霜期 188.8-212.0 d, 全年日照时数为 2539-2490 h, 雨热同期, 光照充足, 为农作物的生长提供较长生育期, 利于作物生长。该地土壤类型为棕壤土, 农耕历史悠久, 传统的农业生态系统耕作制度为一年两熟, 主要的粮食作物是小麦与玉米, 经济作物是大蒜与花生, 常见的种植模式为冬小麦-夏玉米轮作和大蒜-花生轮作体系(虞晓凡, 2015; 郭立月, 2015; 李占, 2013)。

3.2 实验设计与处理

3.2.1 试验品种

谷物主要是指小麦、玉米、水稻, 还包括高粱、荞麦等, 本研究选取北方广泛种植的有代表性的谷物, 冬小麦和夏玉米进行研究。冬小麦品种为良星 99, 夏玉米品种为郑单 958。良星 99 为山东农业大学培育的优良品种, 有较强的抗寒性能, 并且分蘖能力强, 成穗率高, 有良好的丰产性能(王成超 等, 2008), 郑单 958 由河南省农科院作物所培育而成, 具有优质、多抗、高产且稳产的特性(刘文成 等, 2003)。该冬小麦、夏玉米品种在此试验地区广泛种植多年, 为当地常用品种。

3.2.2 有机肥与化肥配施试验

有机肥和化肥配施试验开始于 2009 年, 研究已发现不同梯度有机肥化肥配施对作物产量、土壤理化性质和生物活性等的影响(Guo et al., 2016), 本研究重点报道试验进行 8 年后作物营养成分是否发生实质变化。各处理都采用冬小麦(*Triticum aestivum* L.)-夏玉米(*Zea mays* L.)的轮作模式, 除了肥料配比的差异外, 其他管理方式相同(郭立月, 2015)。

试验初期根据当地农户的化肥使用量及作物种植的氮肥需求量,确定了每年的纯氮施入量,为 $375 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ 。确定磷肥和钾肥施入量的方法为:施肥前,测定牛粪中的氮、磷、钾元素含量,由总氮需求量确定牛粪施用量,进而计算出磷和钾的总施入量。每个处理的氮、磷、钾施入量相等,因此可根据牛粪和化肥中的氮磷钾含量,及二者的比例,来确定各处理化肥和牛粪的施入量。化肥中的氮磷钾分别由尿素 ($\text{N}=46.4\%$)、过磷酸钙 ($\text{P}_2\text{O}_5=12\%$) 和硫酸钾 ($\text{K}_2\text{O}=51\%$) 提供(郭立月, 2015)。

配比方法: 试验设置 5 个有机肥化肥配比处理, 每个处理氮磷钾肥施入量相等, 随机区组设计, 每个处理小区长宽为 $16 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$, 每个处理重复三次。各处理的配比如下:

100%: 100%有机肥

75%: 75%有机肥+25%化肥

50%: 50%有机肥+50%化肥

25%: 25%有机肥+75%化肥

0%: 100%化肥

施肥方式: 有机肥的施用方式是在小麦种植前一次性施入, 作为基肥。化肥的施用方式是: 氮肥在小麦季和玉米季按照 3: 2 的比例施用, 并且在小麦季和玉米季, 分别按照基追比 1: 1 的方式施入; 磷肥和钾肥则作为基肥, 按照 1: 1 的比例分别在小麦季和玉米季施入(郭立月, 2015)。具体施肥量见表 3.1。

3.2.3 样品采集

土壤样品: 2016 年 10 月 10 日, 利用五点取样法采集 0-20 cm 土样, 混匀装入自封袋, 风干后过筛, 用以测定土壤特性。

谷物样品: 成熟后, 每个处理选取三个有代表性的样方, 冬小麦每个样方的面积为 $1 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$, 并取出样方内的全部小麦, 脱粒风干。夏玉米随机选取连续的 15 株, 取穗, 脱粒风干。将籽粒放在 80°C 的烘箱中烘干, 后研磨成粉, 用以测定各指标。

3.3 测定指标

3.3.1 测试仪器

分析天平（量感 0.0001，德国 Sartorius）、万能粉碎机、凯氏定氮仪、滴定仪、水浴锅、消煮炉、Mars6 高通量密闭微波消煮系统（微波消解仪，美国 CEM 公司）、ICP-AES 电感耦合等离子体发射光谱仪（美国 Thermo 公司）、ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪（美国 Thermo 公司）等。

表 3.1 冬小麦-夏玉米各处理有机肥化肥的配施量

Table 3.1 Application rates of organic manure and chemical fertilizer in different treatments

肥料 (kg·ha ⁻¹)		100%	75%	50%	25%	0%
小麦季						
	有机肥（腐熟牛粪）	17772.5	13329.4	8886.3	4443.1	0
基肥	尿素	0	60.6	121.3	181.9	242.5
	过磷酸钙	0	96.3	192.5	288.2	385.1
	硫化钾	0	77.5	155.1	232.6	310.1
追肥	尿素	0	60.6	121.3	181.9	242.5
玉米季						
	尿素	0	40.4	80.8	121.3	161.7
基肥	过磷酸钙	0	96.3	192.3	288.8	385.1
	硫化钾	0	77.5	155.1	232.6	310.1
追肥	尿素	0	40.4	80.8	121.3	161.7

0%: 100%化肥; 25%: 25%有机肥+75%化肥; 50%: 50%有机肥+50%化肥; 75%: 75%有机肥+25%化肥; 100%: 100%有机肥。

0%, 100% chemical fertilizer; 25%, 25% organic fertilizer + 75% chemical fertilizer; 50%, 50% organic fertilizer + 50% chemical fertilizer; 75%, 75% organic fertilizer + 25% of chemical fertilizer; 100%, 100% organic fertilizer.

3.3.2 测定项目及方法

- (1) 全氮含量——凯氏定氮法（王学奎，2008）。
- (2) 矿质元素含量——ICP-AES 电感耦合等离子发射光谱法。
- (3) 重金属元素含量——ICP-MS 电感耦合等离子体质谱法。

3.4 数据处理与分析

用 Microsoft Excel 2016 处理数据，采用 IBM SPSS statistics 20.0 软件中的

One-way ANOVA 进行方差分析, 采用 LSD 检验方法比较各处理间的差异。制图采用 SigmaPlot 12.5 软件, 图表中数据均为各处理的平均数 \pm 标准误差。

3.5 结果与分析

3.5.1 不同肥料配比处理对土壤特性的影响

由图 3.1 可以看出, 土壤微生物 C、N, 土壤 pH, 土壤全 N (TN) 以及土壤有机质 (SOC) 的含量与有机肥的投入比例成正比。

土壤微生物 C 含量在 75% 处理中最高, 其次是 100% 处理, 在 0% 处理含量最低, 100% 处理土壤微生物 C 含量比 0% 处理显著高出 127.4% ($P < 0.05$), 所有处理之间土壤微生物 C 含量均存在显著差异 ($P < 0.05$); 同样的, 土壤微生物 N 含量在 75% 处理中最高, 其次是 100% 处理, 分别为 $35.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $34.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在 0% 处理含量最低, 100% 土壤微生物 N 含量比 0% 处理显著高出 351.3% ($P < 0.05$)。

100% 和 75% 处理土壤 pH 超过 7.0, 呈中性, 0% 处理土壤 pH 最低, 为 5.6, 与 100% 处理差异显著。

土壤全 N 含量在 100% 处理最高, 并与其他处理差异显著 ($P < 0.05$), 在 0% 处理中最低, 100% 处理土壤全 N 量比 0% 处理显著高出 46.2% ($P < 0.05$)。

土壤有机质含量同样在 100% 处理最高, 并与其他处理差异显著 ($P < 0.05$), 100% 处理土壤有机质比 0% 处理显著高出 76.5% ($P < 0.05$)。

3.5.2 不同肥料配比处理对谷物产量的影响

由表 3.2 可以看出, 冬小麦千粒重在 100% 处理中最高, 为 47.82 g, 在 0% 处理中最低, 为 41.58 g, 二者之间差异显著 ($P < 0.05$)。夏玉米千粒重在 75% 处理最高, 为 318.97 g, 并与其他处理差异显著 ($P < 0.05$)。说明有机肥施用比例较多时, 谷物籽粒相对饱满。冬小麦产量在 0% 处理时最高, 并与其他处理存在显著差异 ($P < 0.05$), 产量最低的是 75% 处理。夏玉米产量最高的同样是 0% 处理。

3.5.3 不同肥料配比处理对谷物蛋白质含量的影响

图 3.2 为不同肥料配比处理对冬小麦、夏玉米蛋白质含量的影响。由图可以看出, 在提供相同量 N 的情况下, 不同肥料配比处理谷物蛋白质含量仍存在差异。

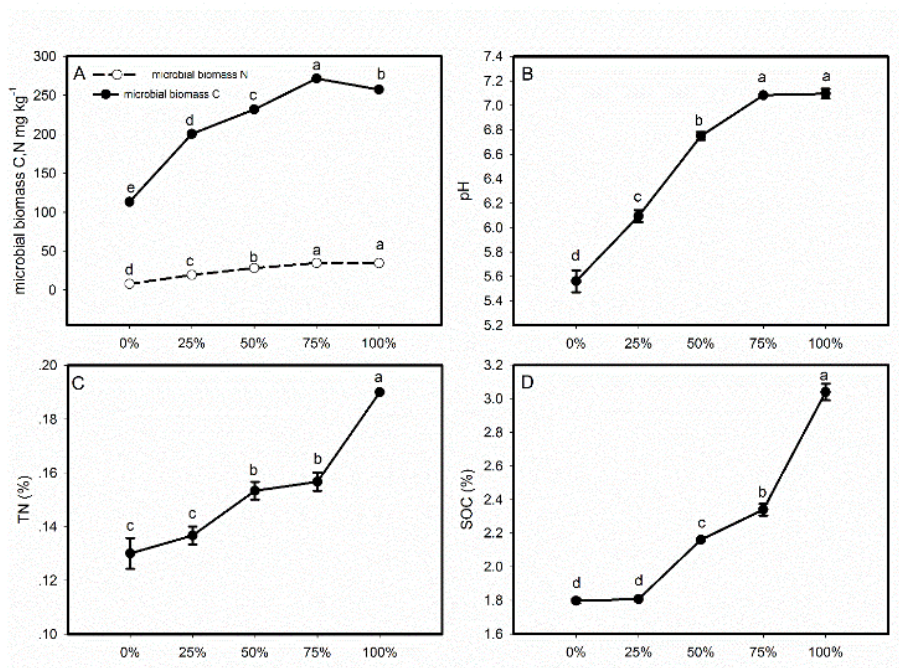


图 3.1 表层土土壤特性，土壤微生物 C、N (A)，土壤 pH (B)，土壤全氮 (TN) (C)，土壤有机质 (SOM) (D)

Figure 3.1 Soil properties in top soil as reflected in microbial biomass C and N (A), pH (B), total nitrogen (TN) (C) and soil organic matter (SOM) (D)

0%: 100%化肥; 25%: 25%有机肥+75%化肥; 50%: 50%有机肥+50%化肥; 75%: 75%有机肥+25%化肥; 100%: 100%有机肥。数据为平均值±标准误, n=3。不同的字母标志表示在 $P<0.05$ 的水平上差异显著。

0%, 100% chemical fertilizer; 25%, 25% organic fertilizer + 75% chemical fertilizer; 50%, 50% organic fertilizer + 50% chemical fertilizer; 75%, 75% organic fertilizer + 25% of chemical fertilizer; 100%, 100% organic fertilizer. Values were reported as means ± standard deviations, n=3. Bars in the same graph with different letters show significant differences at $P<0.05$.

冬小麦蛋白质含量在各处理中的排列顺序为: 0% > 50% > 100% > 75% > 25%。蛋白质含量在 0% 处理中最高, 为 10.7%, 与其他处理蛋白质含量存在显著差异 ($P<0.05$); 其次是 50% 处理, 为 9.3%, 蛋白质含量最低的是 25% 处理, 为 8.1%; 0% 处理的冬小麦蛋白质含量比 100% 处理高出 31.4%, 差异显著 ($P<0.05$)。

夏玉米蛋白质含量在各处理中的排列顺序为: 0% > 50% > 75% > 25% > 100%。同样在 0% 处理中最高——为 7.0%, 比 100% 处理高出 9.9%, 差异显著

($P<0.05$)。其次是 50%处理。随着化肥用量的增加,夏玉米蛋白质含量总体上呈现上升趋势。

表 3.2 不同肥料配比处理对冬小麦、夏玉米千粒重和产量的影响

Table 3.2 Thousand-seed weight, yield of winter wheat and summer maize in different fertilizer treatments

处理 Treatment	千粒重 Thousand-seed weight (g)		产量 Yield ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	
	小麦 Wheat	玉米 Corn	小麦 Wheat	玉米 Corn
100%	47.82±0.42a	279.76±3.53c	6078.71±832.09cd	6156.45±151.85d
75%	45.44±0.41bc	318.97±1.22a	5167.83±433.80d	8192.65±75.78ab
50%	46±0.60ab	299.23±4.19b	7942.17±6494.23b	7802.94±86.35bc
25%	47.82±0.21a	301.63±4.39b	7169.01±5413.49bc	7493.59±223.64c
0%	41.58±1.58d	302.47±7.16b	9924.23±7107.23a	8370.40±228.95a

0%: 100%化肥; 25%: 25%有机肥+75%化肥; 50%: 50%有机肥+50%化肥; 75%: 75%有机肥+25%化肥; 100%: 100%有机肥。结果均为平均值±标准误, $N=3$, 同一列不同处理标不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

0%, 100% chemical fertilizer; 25%, 25% organic fertilizer + 75% chemical fertilizer; 50%, 50% organic fertilizer + 50% chemical fertilizer; 75%, 75% organic fertilizer + 25% of chemical fertilizer; 100%, 100% organic fertilizer. Values were reported as means ± standard deviations, $n=3$. Bars in the same graph with different letters show significant differences at $P<0.05$.

3.5.4 不同肥料配比处理对谷物籽粒元素含量的影响

3.5.4.1 不同肥料配比处理对谷物籽粒矿质元素含量的影响

表 3.3 为不同肥料配施处理对冬小麦、夏玉米籽粒矿质元素含量的影响。由表可以看出, 冬小麦籽粒 B 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 50%>0%>75%>100%>25%; 夏玉米籽粒 B 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 100%>75%>0%>50%>25%。冬小麦籽粒 B 元素含量在 50%处理中最高, 并与其他处理存在显著差异 ($P<0.05$), 其次是 0%处理; 夏玉米籽粒 B 元素含量在 100%处理中最高, 其次是 75%处理。可以看出, 除去 25%处理, B 元素在冬小麦、夏玉米籽粒其他处理中的含量排列顺序是相反的。

冬小麦籽粒 A1 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 25%>0%>100%>75%>50%; 夏玉米籽粒 A1 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 50%>75%>100%>0%>25%。冬小麦籽粒 A1 元素在 25%处理中最高, 在 50%处理中最低;

夏玉米籽粒 Al 元素在 50%处理中最高，在 25%处理中最低。Al 元素在冬小麦、夏玉米各处理中的含量排列顺序是相反的。

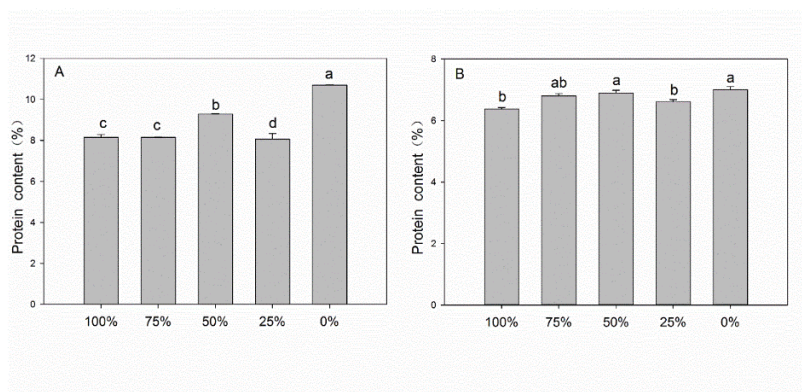


图 3.2 不同肥料配比处理对冬小麦 (A)、夏玉米 (B) 籽粒蛋白质含量的影响

Figure 3.2 Contents of protein of winter wheat (A) and summer maize (B) in different fertilizer treatments

0%: 100%化肥; 25%: 25%有机肥+75%化肥; 50%: 50%有机肥+50%化肥; 75%: 75%有机肥+25%化肥; 100%: 100%有机肥。数据为平均值±标准误, $n=3$ 。不同的字母标志表示在 $P < 0.05$ 的水平上差异显著。

0%, 100% chemical fertilizer; 25%, 25% organic fertilizer + 75% chemical fertilizer; 50%, 50% organic fertilizer + 50% chemical fertilizer; 75%, 75% organic fertilizer + 25% of chemical fertilizer; 100%, 100% organic fertilizer. Values were reported as means \pm standard deviations, $n=3$. Bars in the same graph with different letters show significant differences at $P < 0.05$.

冬小麦籽粒 Fe 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 25% > 0% > 100% > 75% > 50%; 夏玉米籽粒 Fe 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 0% > 75% > 100% > 50% > 25%。冬小麦籽粒 Fe 元素在 25%处理中最高, 夏玉米籽粒 Fe 元素在 25%处理中最低。

冬小麦籽粒 Ca 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 100% > 50% > 75% > 25% > 0%; 夏玉米籽粒 Ca 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 25% > 75% > 50% > 100% > 0%。冬小麦和夏玉米籽粒 Ca 元素含量都在 0%处理中最低。除去 0%处理, Ca 元素在冬小麦、夏玉米籽粒其他处理中含量排列顺序是相反的。

冬小麦籽粒 Na 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 75% > 25% > 100% > 50% > 0%; 夏玉米籽粒 Na 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 25% > 75% > 0% > 50% > 100%。冬小麦籽粒 Na 元素含量在 75%处理中最高, 其次是 25%处

理, 在 0%处理中最低; 夏玉米籽粒 Na 元素含量在 25%处理中最高, 其次是 75%处理。

冬小麦籽粒 Mg 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 75%>50%>25%>100%>0%; 夏玉米籽粒 Mg 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 50%>75%>25%>100%>0%。冬小麦、夏玉米籽粒 Mg 元素含量在各处理中的变化趋势大体上相同, 都在 0%处理中含量最低。

冬小麦籽粒 S 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 50%>75%>25%>100%>0%; 夏玉米籽粒 S 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 25%>0%>75%>100%>50%。冬小麦籽粒 S 元素含量在 50%处理中最高, 在 0%处理中最低。夏玉米籽粒 S 元素含量在 25%处理中最高, 在 50%处理中最低。

冬小麦籽粒 P 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 75%>50%>25%>100%>0%; 夏玉米籽粒 P 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 25%>75%>50%>100%>0%。冬小麦、夏玉米籽粒 P 元素含量都在 0%处理中最低, 其次是 100%处理。

冬小麦籽粒 K 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 75%>25%>50%>100%>0%; 夏玉米籽粒 K 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 25%>100%>75%>50%>0%。冬小麦、夏玉米籽粒 K 元素含量都在 0%处理中最低。

图 3.3 为不同肥料配比处理对冬小麦、夏玉米籽粒 Mo、Co 元素含量的影响。由图可以看出, 谷物籽粒 Mo 元素的含量几乎与有机肥施用量成正比, 100%处理的冬小麦 Mo 元素含量比 0%处理极显著高出 320.0% ($P<0.01$), 夏玉米 Mo 元素含量比 0%处理极显著高出 212.5% ($P<0.01$)。冬小麦籽粒 Co 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 0%>25%>50%>100%>75%; 夏玉米籽粒 Co 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 25%>0%=50%>75%>100%。谷物籽粒 Co 元素含量几乎与有机肥施用量呈反比。

3.5.4.2 不同肥料配比处理对谷物籽粒重金属元素含量的影响

由表 3.4 可以看出, 冬小麦籽粒 Mn 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 50%>25%>75%>100%>0%; 夏玉米籽粒 Mn 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 0%>25%>75%>100%>50%。冬小麦籽粒 Mn 元素含量在 50%处理中最高, 在 0%处理中最低; 夏玉米籽粒 Mn 元素含量在 0%处理中最高, 在 50%处理

中最低，其他处理 Mn 元素含量排列顺序相同。

表 3.3 不同肥料配比处理对冬小麦、夏玉米籽粒矿质元素含量的影响

Table 3.3 Mineral elements contents of winter wheat and summer maize in different fertilizer treatments

元素 (mg·kg ⁻¹)	谷物	0%	25%	50%	75%	100%
B	小麦	0.69±0.31b	0.14±0.08b	1.81±0.65a	0.68±0.16b	0.45±0.13b
	玉米	1.94±0.32a	1.65±0.13a	1.88±0.21a	1.96±0.30a	2.48±0.44a
Al	小麦	12.51±4.71a	14.43±5.64a	4.67±2.06a	6.73±1.21a	6.91±1.94a
	玉米	1.35±1.03bc	0.41±0.13c	4.27±1.27a	3.59±1.55ab	2.74±0.50abc
Fe	小麦	44.61±5.84a	45.68±1.43a	36.65±3.44a	37.26±4.13a	37.31±3.56a
	玉米	32.10±1.36a	23.55±1.64b	29.31±0.51a	30.31±0.92a	30.11±2.71a
Ca	小麦	408.6±145.4b	623.7±57.3ab	717.3±59.5a	684.0±97.5ab	726.7±128.4a
	玉米	257.8±56.9a	490.6±73.2a	349.5±130.1a	420.7±148.4a	348.9±83.7a
Na	小麦	980.1±43.4a	1114.0±89.7a	1098.1±71.4a	1211.0±108.1a	1103.1±144.6a
	玉米	1100.4±37.6a	1145.4±23.9a	1035.1±25.1a	1109.3±25.4a	1032.0±104.3a
Mg	小麦	907.6±150.0b	1325.6±28.9a	1449.7±105.7a	1463.7±176.2a	1293.4±255.6ab
	玉米	732.8±23.5c	1004.7±9.3a	911.9±13.8b	928.4±17.7b	916.6±8.0b
S	小麦	1082.4±188.55a	1241.8±10.2a	1433.8±85.0a	1313.9±128.7a	1138.6±213.3a
	玉米	1038.6±7.4b	1062.6±1.8a	988.2±5.9d	1006.8±2.7c	996.8±4.6cd
P	小麦	3857.5±347.9b	5312.1±130.9a	5692.4±337.6a	5869.2±592.9a	532.8±518.3a
	玉米	3659.9±112.7c	4683.9±22.5a	4056.1±52.7b	4202.8±108.4b	3984.3±106.8b
K	小麦	3666.1±422.3b	4843.9±213.1ab	4686.6±309.9ab	5000.9±525.5a	4429.1±513.9ab
	玉米	3138.5±56.5d	4098.2±36.6a	3404.8±16.2c	3556.3±35.1b	3600.9±11.0b

0%: 100%化肥; 25%: 25%有机肥+75%化肥; 50%: 50%有机肥+50%化肥; 75%: 75%有机肥+25%化肥; 100%: 100%有机肥。数据为平均值±标准误, n=3。不同的字母标志表示在 $P<0.05$ 的水平上差异显著。

0%, 100% chemical fertilizer; 25%, 25% organic fertilizer + 75% chemical fertilizer; 50%, 50% organic fertilizer + 50% chemical fertilizer; 75%, 75% organic fertilizer + 25% of chemical fertilizer; 100%, 100% organic fertilizer. Values were reported as means ± standard deviations, n=3. Bars in the same graph with different letters show significant differences at $P < 0.05$.

冬小麦籽粒 Zn 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 50%>75%>100%>25%>0%; 夏玉米籽粒 Zn 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为: 100%>25%>

0%>75%>50%。冬小麦籽粒 Zn 元素含量在 0%处理中最低，夏玉米籽粒 Zn 元素含量在 100%处理中最高。

冬小麦籽粒 Cu 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为：25%>100%>50%>75%>0%；夏玉米籽粒 Cu 元素含量在 5 个处理中的排列顺序为：25%>75%>100%>50%>0%。冬小麦、夏玉米籽粒 Cu 元素含量都在 25%处理中最高，在 0%处理中最低。

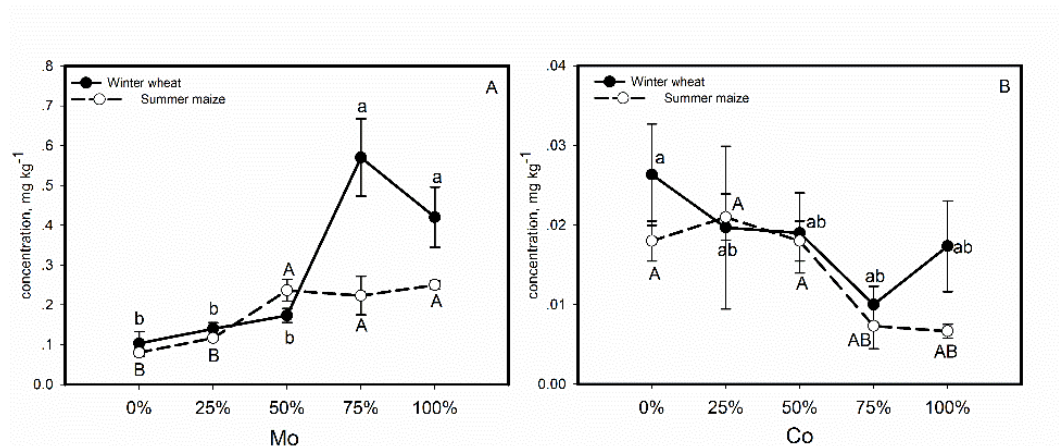


图 3.3 不同肥料配比处理对冬小麦、夏玉米籽粒 Mo (A)，Co (B) 元素含量的影响

Figure 3.3 Contents of Mo (A), Co (B) elements of winter wheat and summer maize in different fertilization treatments

0%: 100%化肥；25%: 25%有机肥+75%化肥；50%: 50%有机肥+50%化肥；75%: 75%有机肥+25%化肥；100%: 100%有机肥。数据为平均值±标准误，n=3。不同的字母标志表示在 $P<0.05$ 的水平上差异显著。

0%, 100% chemical fertilizer; 25%, 25% organic fertilizer + 75% chemical fertilizer; 50%, 50% organic fertilizer + 50% chemical fertilizer; 75%, 75% organic fertilizer + 25% of chemical fertilizer; 100%, 100% organic fertilizer. Values were reported as means \pm standard deviations, n=3. Bars in the same graph with different letters show significant differences at $P<0.05$.

图 3.4 为不同肥料配比处理对冬小麦、夏玉米籽粒 Pb、Cr、As、Ni 元素含量的影响。由图可以看出，冬小麦籽粒 Pb 元素含量在 50%处理中最高，为 0.89 mg·kg⁻¹，在 100%处理中最低，为 0.32 mg·kg⁻¹；夏玉米籽粒 Pb 元素含量则在 100%处理中最高，为 2.33 mg·kg⁻¹，在 0%处理时最低。夏玉米籽粒 Pb 元素含量整体上随着有机肥施用比例的减少而降低。

谷物籽粒中 Cr，As，Ni 元素含量总体上随着有机肥施用比例的减少，即化

肥施用比例的增加而升高。

冬小麦籽粒 Cr 元素含量在 25%处理中最高, 在 100%处理中最低, 为 $1.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 二者之间差异显著 ($P < 0.05$); 夏玉米籽粒 Cr 元素含量在 50%处理中最高, 在 100%处理中最低, 为 $0.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 二者之间差异显著 ($P < 0.05$)。0%处理冬小麦籽粒 Cr 元素比 100%处理高 59.4%, 差异显著 ($P < 0.05$); 0%处理夏玉米籽粒 Cr 元素比 100%处理高 63.5%。

夏玉米籽粒 As 元素含量在 50%处理中最高, 其次是 0%处理, 二者差异不显著, 在 100%处理中最低, 0%处理夏玉米 As 元素含量比 100%处理高 76%。

冬小麦籽粒 Ni 元素含量在 0%处理中最高, 在 100%处理中最低; 夏玉米籽粒 Ni 元素含量同样在 0%处理中最高, 在 100%处理中最低, 且二者之间差异显著 ($P < 0.05$)。0%处理冬小麦籽粒 Ni 元素含量比 100%处理高 54.7%, 夏玉米籽粒 Ni 元素含量比 100%处理显著高 205.6% ($P < 0.05$)。

表 3.4 不同肥料配比处理对冬小麦、夏玉米籽粒重金属元素含量的影响

Table 3.4 Heavy elements contents of winter wheat and summer corn in different fertilization treatments

重金属 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	谷物	0%	25%	50%	75%	100%
Mn	小麦	25.03±19.90a	45.39±0.34a	46.03±2.80a	42.04±4.07a	38.04±4.44a
	玉米	5.00±0.33a	5.37±0.07a	3.68±0.07b	4.15±0.19b	3.83±0.05b
Zn	小麦	24.02±5.79b	29.74±2.00ab	37.62±21.73a	35.78±3.54ab	33.30±4.64ab
	玉米	30.39±8.12a	31.68±2.44a	25.00±3.13a	26.83±2.79a	37.12±6.01a
Cu	小麦	3.57±1.04a	5.07±0.76a	4.33±0.77a	3.91±0.53a	4.43±0.89a
	玉米	1.38±0.57a	2.88±0.41a	2.24±0.52a	2.51±0.88a	2.30±0.71a

0%: 100%化肥; 25%: 25%有机肥+75%化肥; 50%: 50%有机肥+50%化肥; 75%: 75%有机肥+25%化肥; 100%: 100%有机肥。数据为平均值±标准误, $n=3$ 。不同的字母标志表示在 $P < 0.05$ 的水平上差异显著。

0%, 100% chemical fertilizer; 25%, 25% organic fertilizer + 75% chemical fertilizer; 50%, 50% organic fertilizer + 50% chemical fertilizer; 75%, 75% organic fertilizer + 25% of chemical fertilizer; 100%, 100% organic fertilizer. Values were reported as means ± standard deviations, $n=3$. Bars in the same graph with different letters show significant differences at $P < 0.05$.

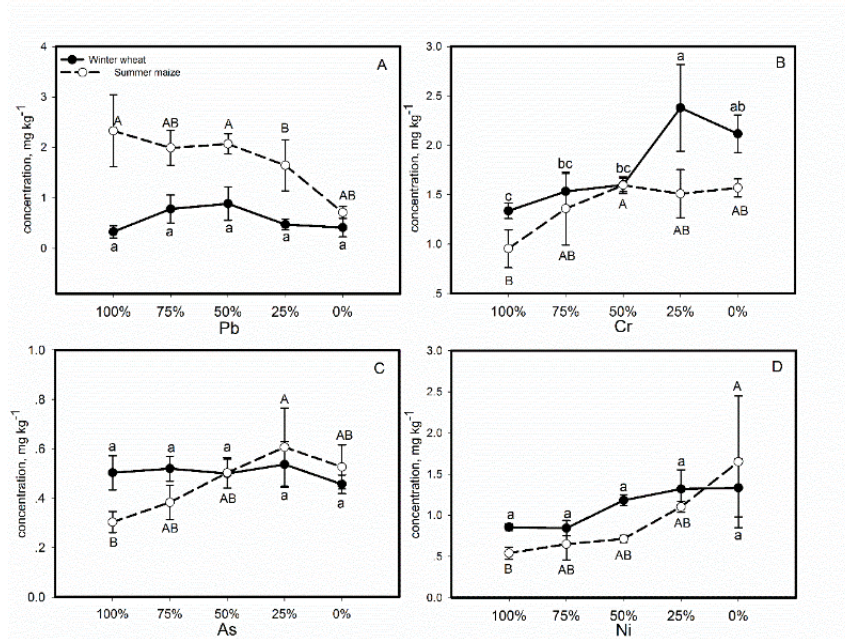


图 3.4 不同肥料配比处理对冬小麦、夏玉米籽粒 Pb (A), Cr (B), As (C), Ni (D)元素含量的影响

Figure 3.4 Contents of Pb (A), Cr (B), As (C), Ni (D) elements of winter wheat and summer maize in different fertilization treatments

0%: 100%化肥; 25%: 25%有机肥+75%化肥; 50%: 50%有机肥+50%化肥; 75%: 75%有机肥+25%化肥; 100%: 100%有机肥。数据为平均值±标准误, n=3。不同的字母标志表示在 $P<0.05$ 的水平上差异显著。

0%, 100% chemical fertilizer; 25%, 25% organic fertilizer + 75% chemical fertilizer; 50%, 50% organic fertilizer + 50% chemical fertilizer; 75%, 75% organic fertilizer + 25% of chemical fertilizer; 100%, 100% organic fertilizer. Values were reported as means \pm standard deviations, n=3. Bars in the same graph with different letters show significant differences at $P<0.05$.

3.5.4.3 不同肥料配比处理对谷物籽粒重金属单因子污染指数的影响

表 3.5 为重金属单因子污染指数的分级标准。重金属污染的评价方法通常采用单因子污染指数法, 计算公式为: $P_i = C_i / S_i$ (秦文淑 等, 2008)。其中 P_i 为重金属单因子污染指数, C_i 为该重金属的实测值, S_i 为重金属元素安全评价的标准值, 根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中规定的 As、Pb、Cr、Ni 元素最高允许限量: $As \leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (谷物及其制品), $Pb \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (谷物), $Cr \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (谷物及其制品), $Ni \leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 3.5 重金属单因子污染指数分级标准

Table 3.5 Single factor pollution index classification standard of heavy metals

污染指数 P_i	污染等级	等级
$P_i \leq 0.7$	优良	1
$P_i \leq 1.0$	安全	2
$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻污染	3
$2.0 < P_i \leq 3.0$	中污染	4
$P_i > 3.0$	重污染	5

表 3.6 为冬小麦、夏玉米四种金属的单因子污染指数,可以看出,冬小麦籽粒中 As 元素在 0%、50%、100%处理中 $P_i \leq 1.0$,处于安全级别;在 25%和 75%处理中 P_i 处于 1.0 和 2.0 之间,处于轻污染级别。夏玉米籽粒 As 元素在 75%、100%处理中 $P_i \leq 1.0$,处于安全级别;在 0%、25%、50%处理中 P_i 处于 1.0 和 2.0 之间,处于轻污染级别。

表 3.6 不同肥料配比处理冬小麦、夏玉米籽粒重金属单因子污染指数

Table 3.6 Single factor pollution index of heavy metals in winter wheat and summer maize in different fertilization treatments

作物种类	处理	As	Pb	Cr	Ni
小麦	0%	0.9	2.05	2.12	1.33
	25%	1.08	2.35	2.38	1.32
	50%	1	4.45	1.6	1.19
	75%	1.04	3.9	1.53	0.84
	100%	1	1.6	1.33	0.86
玉米	0%	1.06	8.2	1.57	1.65
	25%	1.22	3.55	1.51	1.1
	50%	1	10.35	1.6	0.71
	75%	0.76	9.95	1.36	0.65
	100%	0.6	11.65	0.96	0.54

冬小麦籽粒 Pb 元素在 100%处理中 P_i 处于 1.0 和 2.0 之间,处于轻污染级别;在 0%, 25%处理中 P_i 处于 2.0 和 3.0 之间,处于中污染级别;在 50%、75%处理中 $P_i > 3.0$,处于重污染级别。夏玉米籽粒 Pb 元素在各处理中 P_i 都大于 3.0,处于重污染级别。

冬小麦籽粒 Cr 元素在 50%、75%、100%处理 P_i 中处于 1.0 和 2.0 之间,处

于轻污染级别；在 0%、25%处理中 P_i 处于 2.0 和 3.0 之间，处于中污染级别。夏玉米籽粒 Cr 元素在 100%处理中 $P_i \leq 1.0$ ，处于安全级别；在 0%、25%、50%、75%处理中 P_i 处于 1.0 和 2.0 之间，处于轻污染级别。

冬小麦籽粒 Ni 元素在 75%、100%处理中 $P_i \leq 1.0$ ，处于安全级别；在 0%、25%、50%处理中 P_i 处于 1.0 和 2.0 之间，处于轻污染级别。夏玉米籽粒 Ni 元素 50%、75%、100%处理 $P_i \leq 1.0$ ，处于安全级别；在 0%、25%处理中 P_i 处于 1.0 和 2.0 之间，处于轻污染级别。

3.6 讨论

土壤微生物 C、N 量，土壤 pH，土壤全 N 量以及土壤有机质含量在一定程度上反映了土壤质量状况(Riley et al., 2008)。本研究结果显示，在投入等量 N、P、K 肥的情况下，土壤微生物 C、N 含量，土壤 pH，土壤全 N 量以及土壤有机质含量基本上随着有机肥施用比例的增加而升高，即土壤微生物 C、N，土壤 PH，土壤全 N (TN) 以及土壤有机质 (SOC) 的含量与有机肥的投入比例成正比。100%处理土壤微生物 C、N 量，土壤全 N 量，土壤有机质含量分别比 0%显著高出 127.4%，351.3%，46.2%，76.5%。结果表明有机肥能够提高土壤质量，提高土壤有机质含量和土壤供肥容量，改善土壤理化性质和养分库容，增加土壤微生物（如氨化菌、固氮菌、硝化菌等）的数量。本研究结果与目前大部分研究结果相符(Tejada et al., 2008; Tejada and Gonzalez, 2008)。

本研究结果表明，有机肥化肥的配施对谷物千粒重及产量均有影响。冬小麦千粒重在 100%处理中最高，在 0%处理中最低；夏玉米千粒重在 75%处理最高。说明有机肥施用比例较高时，谷物籽粒相对饱满。

蛋白质是生命的基础物质。作物中蛋白质的含量能够反应植物吸收和利用土壤中氮素的能力(虞晓凡, 2015)。作物中蛋白质含量受多种因素的影响，如基因、环境、肥料等(Zörb et al., 2009)。本研究发现，冬小麦蛋白质含量在 0%处理中最高，比 100%处理高出 31.4%，差异显著 ($P < 0.05$)；夏玉米蛋白质含量同样在 0%处理中最高，比 100%处理高出 9.9%，差异显著 ($P < 0.05$)，且随着化肥用量的增加，夏玉米蛋白质含量总体上呈现上升趋势。即在严格控制施入相等 N 肥的情况下，施用化肥时，谷物籽粒的蛋白质含量高于施用有机肥，这与目前大部分研究结果一致(Mazzoncini et al., 2015; Zörb et al., 2009; Mäder et al., 2007)。原

因是有机肥中的 N 多为有机氮复合物形式,如氨基酸、氨基糖等,释放缓慢,但常规种植施用的 N 肥是速效氮,从作物抽穗期开始提供 N 元素,所以能够大量提高蛋白质含量(Zörb et al., 2009; Mäder et al., 2007)。但也有结果表明有机小麦中的蛋白质含量更高(Worthington, 1998)。本研究还发现,50%处理时谷物蛋白质含量仅次于 0%处理,即化肥和有机肥等量配施时,作物合成蛋白质的效果仅次于施用化肥。

谷物中矿质元素的含量受多种因素的影响,如作物种类,土壤特性,气候条件及耕种方式等。本研究发现冬小麦和夏玉米籽粒中 B、Ca、Al、Fe、S 元素含量在各处理中的排列顺序几乎是相反的,冬小麦籽粒元素含量最多的处理,夏玉米籽粒元素含量则在该处理最低。原因是有机肥是在小麦季之前施入,先提供给小麦元素,有机肥养分释放较慢,化肥释放较快,所以冬小麦先吸收化肥提供的养分,夏玉米主要吸收后期有机肥释放的养分。另外,冬小麦籽粒 Ca、Mg、P、S、K 元素和夏玉米籽粒的 Ca、Mg、P、K 元素都在 0%处理时含量最低,说明过量施用化肥不仅降低了土壤质量,还会影响作物对矿质元素的吸收。Mg 在细胞代谢和维持细胞离子平衡方面有重要作用(Gomez-Becerra et al., 2010),Mg 元素的缺乏易引起心脑血管疾病。

Mo 元素对促进人体生长发育具有重要的作用,Co 元素是维他命 B12 的关键组分,能够促进红血球生长,神经系统和血液的生产都需要 Co 元素,Co 元素缺乏容易导致贫血和痴呆。本研究发现,谷物籽粒 Mo 元素的含量几乎与有机肥施用量成正比,而 Co 元素含量几乎与有机肥施用量呈反比。100%处理的冬小麦 Mo 元素含量比 0%处理极显著高出 320.0% ($P<0.01$),夏玉米 Mo 元素含量比 0%处理极显著高出 212.5% ($P<0.01$)。说明有机肥的施用利于谷物对 Mo 元素的吸收,而不利于 Co 元素的吸收。

Zn 是多种酶和蛋白质的必要成分,参与多种代谢过程及基因的转录和翻译(Vallee, 1988)。而谷物作为人们日常饮食的重要部分,是人体中 Zn 的主要来源(Gibson et al., 2001)。缺 Zn 现象在全世界,尤其是发展中国家,较为严重,因此如何提高谷物中 Zn 元素含量受到广泛关注(Graham et al., 2000; Frossard et al., 2000)。冬小麦籽粒 Zn 元素含量在 0%处理中最低,夏玉米籽粒 Zn 元素含量在 100%处理中最高,说明有机肥利于作物吸收 Zn 元素,化肥的作用则相反。Cu 元素能够帮助人体生成红血球、连接组织和血红蛋白的生成,有助于中枢神经系统。

冬小麦、夏玉米籽粒 Cu 元素含量都在 25%处理中最高, 在 0%处理中最低, 说明化肥的施用不利于作物吸收 Cu 元素。

重金属在作物中积累, 通过食物链进入人体而在人体内富集, 并与酶、蛋白质等物质发生作用, 从而影响人体功能, 甚至威胁人类生命(袁庆虹和何作顺, 2009)。重金属毒害人体主要表现为损伤神经系统、造成人体记忆力减退、增加患癌几率等(虞晓凡, 2015)。谷物籽粒中 Cr, As, Ni 元素含量总体上随着有机肥施用比例的减少, 即化肥施用比例的增加而升高。0%处理中冬小麦 Cr, Ni 元素含量分别比 100%有机肥处理高 59.4%, 54.7%, 且 Cr 元素含量差异显著($P<0.05$)。夏玉米 Cr, As, Ni 元素的含量分别比 100%处理高 63.5%, 76%, 205.6%, 且 Ni 元素含量差异显著 ($P<0.05$)。

冬小麦籽粒在 100%处理时 As、Ni 元素含量处于安全级别, Pb、Cr 元素含量处于轻污染级别; 夏玉米籽粒在 100%处理时 As、Cr、Ni 元素含量处于安全级别。说明施用有机肥时谷物籽粒 As、Ni 元素含量处于安全级别。冬小麦籽粒在 0%处理时 As 元素含量处于安全级别, Ni 元素含量处于轻污染级别, Pb、Cr 元素含量处于中污染级别; 夏玉米籽粒在 0%处理时 As、Cr、Ni 元素含量处于轻污染级别, Pb 元素含量处于重污染级别。说明施用化肥时, 谷物籽粒的 Ni、Pb、Cr 元素含量都超过安全标准, 处于污染级别。

3.7 小结

(1) 在投入等量 N、P、K 肥的情况下, 土壤微生物 C、N 含量, 土壤 pH, 土壤全 N 量以及土壤有机质含量基本上随着有机肥施用比例的增加而升高, 表明有机肥能够提高土壤质量, 提高土壤有机质含量, 改善土壤理化性质, 增加土壤微生物数量。

(2) 在严格控制施入相等 N 肥的情况下, 施入化肥时, 冬小麦蛋白质含量比施入有机肥时显著高出 31.4%; 夏玉米蛋白质含量比施入有机肥时显著高出 9.9%, 且随着化肥用量的增加, 夏玉米蛋白质含量总体上呈现上升趋势。

(3) 冬小麦籽粒 Ca、Mg、P、S、K、Zn、Cu 元素和夏玉米籽粒的 Ca、Mg、P、K、Cu 元素都在 0%处理时含量最低, 且谷物籽粒 Mo 元素的含量几乎与有机肥施用量成正比, 说明过量施用化肥不仅降低了土壤质量, 还会影响作物对矿质元素的吸收。

(4) 谷物籽粒中 Cr, As, Ni 元素含量总体上随着有机肥施用比例的减少而升高。施用有机肥时谷物籽粒在 As、Ni 元素含量处于安全级别, 施用化肥时, 谷物籽粒的 Ni、Pb、Cr 含量都超过安全标准, 处于污染级别。

第4章 结论与展望

4.1 结论

谷物在人们日常饮食中占有极高比重，是人体内某些营养物质的重要来源，因此谷物的营养品质状况与人类健康直接相关。绿色革命以来，人们过于重视作物产量而忽视营养品质，导致谷物营养品质下降问题严重。近年来，人们越来越重视谷物的营养品质，开始探索新的途径提高其营养状况，有机种植方式进入人们视野。本研究采用控制区试验和大田试验两种研究方式，探索有机谷物与常规谷物营养成分差异状况，以及不同肥料配施对谷物营养品质的影响，得出以下几点结论：

(1) 当投入等量 N、P、K 肥时，土壤微生物 C、N，土壤 pH，土壤全 N (TN) 以及土壤有机质 (SOC) 的含量随着有机肥投入比例的增加而升高。施用有机肥时，土壤微生物 C、N 量，土壤全 N 量，土壤有机质含量分别比施用化肥时，显著高出 127.4%，351.3%，46.2%，76.5%。表明有机种植方式能够提高土壤质量，提高土壤有机质含量，改善土壤理化性质，增加土壤微生物数量。

(2) 各处理施用相同量的氮肥，施用 0% 有机肥，即 100% 化肥时，谷物籽粒的蛋白质含量高于施用 100% 有机肥。且夏玉米蛋白质含量总体上随着化肥用量的增加呈现上升趋势。从氨基酸角度，有机谷物的限制性氨基酸含量高于常规谷物。且有机冬小麦 16 种氨基酸总量比常规冬小麦显著高出 14.2%，有机夏玉米氨基酸总量比常规夏玉米显著高出 7.3%。因此，从蛋白质含量上看，常规谷物蛋白质含量要高于有机谷物；从氨基酸含量上，有机谷物蛋白质营养品质要高于常规谷物。

(3) 有机冬小麦籽粒 S、K、Mo 元素含量极显著高于常规冬小麦 ($P < 0.01$)；有机夏玉米籽粒 Mo 元素含量极显著高于常规夏玉米 ($P < 0.01$)。控制肥料施入比例时，谷物籽粒 Mo 元素的含量几乎与有机肥施用量成正比，且冬小麦、夏玉米籽粒 Ca、Mg、P、K、Cu 元素都在 0% 有机肥时含量最低。表明化肥的施用将会影响作物对某些矿质元素，尤其是 Mo 元素的吸收。

(4) 常规谷物籽粒的有害元素 As、Pb、Cr、Ni 含量都要高于有机谷物，Mn、Al 元素含量极显著高于有机谷物 ($P < 0.01$)。控制肥料施入比例时，Cr，

As, Ni 元素含量总体上随着化肥施用比例的增加而升高。施用 100%有机肥处理, 谷物籽粒在 As、Ni 元素含量处于安全级别, 施用 0%有机肥, 即 100%化肥处理, 谷物籽粒的 Ni、Pb、Cr 含量都超过安全标准, 处于污染级别。因此, 常规谷物含有更多。

4.2 展望

目前关于有机作物与常规作物营养品质差异研究数量有限, 尤其是关于有机谷物与常规谷物的对比研究数量更少, 由于不同研究所采用研究方法不同, 研究的作物品种也有差异, 因此产生了多样的结果, 使有机与常规作物营养品质的结论也不一致。大部分与谷物营养品质的研究都是基于关联性研究和控制区试验, 缺乏长期的大田试验, 本研究虽然采用大田试验的方式研究肥料对谷物营养品质的影响, 但缺乏长期的追踪, 仅通过一年的数据得出结论, 难以排除年份的影响。

影响谷物营养品质的因素很多, 除了耕种方式外, 还包括品种、季节、生长环境、土壤质量状况、播种和收获时间等。本研究的大田试验虽控制除肥料配比的差异外, 其余各条件都相同, 但大田试验无法做到精确控制各试验因素。

作物营养品质除了蛋白质品质, 矿质元素含量外, 还包括植物次生代谢物质, 如抗氧化物质含量及可溶性糖等其他指标, 并且蛋白质的品质除了蛋白质含量和氨基酸含量外, 还包括蛋白质消化率、支链蛋白量等其他指标, 本研究需要进一步深入探索谷物的营养指标, 更加全面的评价有机谷物的营养品质状况。

参考文献

- 白成云, 刘金城. 有机肥养分在农田中的生态效应分析[J]. 山西农业科学, 1999, 2: 33-36.
- 陈欣, 宇万太. 磷肥低量施用制度下土壤磷库的发展变化:II.土壤有效磷及土壤无机磷组成[J]. 土壤学报, 1997, 1: 81-88.
- 程旭艳, 王定美, 乔玉辉等. 中国商品有机肥重金属分析[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(2): 72-76.
- 戴小枫, 程高祥, 刘继芬. 第一次绿色革命与 CGIAR 系统的贡献[J]. 世界农业, 1997, 12: 35-36.
- 樊小林, 廖宗文. 控释肥料与平衡施肥和提高肥料利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(3): 219-23.
- 郭立月. 沂蒙山区环境友好型冬小麦-夏玉米害虫防控与肥料配施技术效益研究[D]. 北京. 中国科学院大学, 2015.
- 韩太日, 梁运江, 刘文利等. 施用有机物料对草甸型水稻土理化性质的影响[J]. 延边大学农学学报, 1999, 3: 191-94.
- 郝学宁, 田种存, 刘雪莲等. 化肥污染与环境保护[J]. 青海农林科技, 2000, 3: 39-40.
- 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J]. 生态环境学报, 2004, 13(4): 656-60.
- 姜益娟, 郑德明. 连续施用棉籽饼和棉秆还田及化肥配施的培肥效应[J]. 干旱地区农业研究: 1999, 17(4): 16-21.
- 李恒达, 王月梅, 李磊. 微量元素铝与人体健康[J]. 世界元素医学, 2006, 2: 28-31.
- 李娟, 赵秉强, 李秀英等. 长期不同施肥制度下几种土壤微生物学特征变化[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 891-99.
- 李睿. 我国 66 种蔬菜矿质营养成分的综合评价[J]. 广东微量元素科学, 2008, 15(9): 8-16.
- 李占. 有机肥和化肥不同配施比例对冬小麦—夏玉米产量和品质的影响[D]. 山东. 山东农业大学, 2013.
- 李正明. 国际有机食品市场及我国有机食品的发展[J]. 国际贸易问题, 2002, 6: 28-31.
- 李政, 刘银燕, 陈滴, 杨锦竹. 紫皮洋葱和黄皮洋葱矿质元素的比较分析[J]. 特产研究, 2011, 33(4): 54-55.
- 刘文成, 马瑞霞, 王景顺等. 玉米品种郑单 958 超高产栽培研究[J]. 湖北农业科学, 2003, 1: 29-30.
- 刘杏兰, 高宗. 有机—无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究[J]. 土壤学报, 1996, 2: 138-47.

- 吕爱清, 罗天相, 刘沐生. 隐性饥饿的研究现状与应对策略[J]. 中国食物与营养, 2017, 23(6): 5-8.
- 秦文淑, 邹晓锦, 仇荣亮. 广州市蔬菜重金属污染现状及对人体健康风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1638-42.
- 唐继伟, 林治安, 许建新等. 有机肥与无机肥在提高土壤肥力中的作用[J]. 中国土壤与肥料, 2006, 3: 44-47.
- 王成超, 朱峰年, 吴清涛等. 小麦新品种良星 99 稻茬繁种高产栽培技术[J]. 山东农业科学, 2008, 4: 106-07.
- 王飞, 赵立欣, 沈玉君等. 华北地区畜禽粪便有机肥中重金属含量及溯源分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 202-08.
- 王起超, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J]. 生态与农村环境学报, 2004, 20(2): 62-64.
- 文杜娟, 陈风波. 第一次“绿色革命”的社会经济影响[J]. 新疆农垦经济, 2016, 4: 78-82.
- 谢磊. 帝斯曼致力解决全球隐性饥饿[J]. 食品工业科技, 2010, 2: 46-46.
- 徐友宁, 张江华, 柯海玲等. 某金矿区农田土壤重金属污染的人体健康风险[J]. 地质通报, 2014, 8: 1239-1252.
- 虞晓凡. 有机与常规种植模式下农产品品质与安全性评价[D]. 北京. 中国科学院大学, 2015.
- 袁庆虹, 何作顺. 重金属迁移及其对农作物影响的研究进展[J]. 职业与健康, 2009, 25(24): 2808-2810.
- 张宝军, 蒋纪芸. 小麦籽粒品质及其影响因素分析[J]. 麦类作物学报, 1995, 4: 29-31.
- 张建新, 纳明亮, 徐明岗. 土壤 Cu Zn Pb 污染对蔬菜根伸长的抑制及毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 945-949.
- 张俊清, 朱平, 张夫道. 有机肥和化肥配施对黑土有机氮形态组成及分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 245-249.
- 张英, 褚秋华, 邱多生等. 11 年连续肥料处理对水稻土碳、氮及微生物量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2001, 24(1): 112-114.
- 赵艺, 赵保卫. 土壤污染对植物根系生长影响的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(6): 13-15.
- 朱忠南, 季学生. 有机食品及其生产体系[J]. 上海农业学报, 2002, 18(2): 92-96.
- Amundson R, Berhe AA, Hopmans JW, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. Science, 2015, 348(6235): 1261071.
- Barański M, Średnicka-Tober D, Volakakis N, et al. Higher antioxidant and lower cadmium concentrations and lower incidence of pesticide residues in organically grown crops: a systematic literature review and meta-analyses[J]. British Journal of Nutrition, 2014, 112(5): 794-811.

- Betarbet R, Sherer TB, Mackenzie G, et al. Chronic systemic pesticide exposure reproduces features of Parkinson's disease[J]. *Nature Neuroscience*, 2000, 3 (12): 1301-1306.
- Bouchard MF, Chevrier J, Harley KG, et al. Prenatal Exposure to Organophosphate Pesticides and IQ in 7-Year-Old Children[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011, 119 (8): 1189.
- Braun JV, Kennedy E. Agricultural commercialization, economic development, and nutrition[M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1994, 161-163.
- Bueren ETLV, Jones SS, Tamm L, et al. The need to breed crop varieties suitable for organic farming, using wheat, tomato and broccoli as examples: A review[J]. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 2011, 58 (3): 193-205.
- Burchi F, Fanzo J, Frison E. The role of food and nutrition system approaches in tackling hidden hunger[J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2011, 8 (2): 358-373.
- Byrnes BH. Environmental effects of N fertilizer use — An overview[J]. *Fertilizer Research*, 1990, 26 (1-3): 209-215.
- Carillo P, Cacace D, De PS, et al. Organic vs. traditional potato powder[J]. *Food Chemistry*, 2012, 133 (4): 1264-1273.
- Ciolek A, Makarska E, Wesolowski M, et al. Content of selected nutrients in wheat, barley and oat grain from organic and conventional farming[J]. *Journal of Elementology*, 2012, 17 (2): 181-189.
- Cooper J, Sanderson R, Cakmak I, et al. Effect of organic and conventional crop rotation, fertilization, and crop protection practices on metal contents in wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59: 4715-4724.
- Dangour AD, Doddhia SK, Hayter A, et al. Nutritional quality of organic foods: a systematic review[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2009, 53 (1): 680-685.
- Davis DR, Epp MD, Riordan HD. Changes in USDA Food Composition Data for 43 Garden Crops, 1950 to 1999[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 2004, 23 (6): 669-682.
- Díaz JR, Cagigas ADL, Rodríguez R. Micronutrient deficiencies in developing and affluent countries[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2003, 57 Suppl 1: S70.
- FAO. World fertilizer trends and outlook to 2018[R]. 2015.
- FAO. The state of food insecurity in the world. Meeting the 2015 international hunger targets: Taking stock of uneven progress[R]. 2015.
- Freebairn DK. Did the Green Revolution Concentrate Incomes? A Quantitative Study of Research Reports[J]. *World Development*, 1995, 23 (23): 265-279.
- Frison EA, Smith IF, Johns T, et al. Agricultural biodiversity, nutrition, and health: making a difference to hunger and nutrition in the developing world[J]. *Food & Nutrition Bulletin*, 2006, 27 (2): 167-179.
- Frossard E, Bucher M, Mächler F, et al. Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*,

- 2000, 80 (7): 861–879.
- Gibson RS, Heath AL, Limbaga ML, et al. Are changes in food consumption patterns associated with lower biochemical zinc status among women from Dunedin, New Zealand[J]? British Journal of Nutrition, 2001, 86 (1): 71-80.
- Kennedy G L, Pedro M R, Seghieri C, et al. Dietary diversity score is a useful indicator of micronutrient intake in non-breast-feeding Filipino children[J]. Journal of Nutrition: 2007, 137 (2): 472-477.
- Godfray HCJ, Beddington JR, Crute IR, et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people[J]. Science, 2010, 327 (5967): 812-818.
- Gomez-Becerra HF, Erdem H, Yazici A, et al. Grain concentrations of protein and mineral nutrients in a large collection of spelt wheat grown under different environments[J]. Journal of Cereal Science, 2010, 52 (3): 342-349.
- Graham RD, Humphries JM, Kitchen JL. Nutritionally enhanced cereals: A sustainable foundation for a balanced diet[J]. Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition, 2000, 9 Suppl 1 (S 1): S91.
- Graham RD, Welch RM, Bouis HE. Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: principles, perspectives and knowledge gaps[J]. Advances in Agronomy, 2001, 70 (1): 77-142.
- Graham RD, Welch RM, Saunders DA, et al. Nutritious Subsistence Food Systems[J]. Advances in Agronomy, 2007, 92 (92): 1-74.
- Granero S, Domingo JL. Levels of metals in soils of Alcalá de Henares, Spain: human health risks[J]. Environment International, 2002, 28 (3): 159-164.
- Gruber K. Re-igniting the green revolution with wild crops[J]. Nature Plants, 2016, 2 (4): 16048.
- Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327 (5968): 1008-1010.
- Guo L, Wu G, Li Y, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat–maize rotation system in Eastern China[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 156 (156): 140-147.
- Haddad L. Improving human nutrition through agriculture: the role of international agricultural research[J]. Scn News, 2000, 20: 12-16.
- Howarthe B, Rossm W. Biofortification--A Sustainable Agricultural Strategy for Reducing Micronutrient Malnutrition in the Global South[J]. Crop Science, 2010, 50: S20-S32.
- Hussein H, Farag S, Kandil K, et al. Tolerance and uptake of heavy metals by Pseudomonads[J]. Process Biochemistry, 2005, 40: 955-961.
- Kennedy ET, Bouis HE. Linkages between agriculture and nutrition: implications for policy and research[J]. Social Sciences > Agricultural Economics, 1993, July: 1-9.
- Kirchmann H, Mattsson L, Eriksson J. Trace element concentration in wheat grain: results from the Swedish long-term soil fertility experiments and national monitoring program[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2009, 31 (5): 561-571.

- Lairon D. Nutritional quality and safety of organic food. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30 (1): 33-41.
- Lin XG, Yin R, Zhang HY, et al. Changes of soil microbiological properties caused by land use changing from rice-wheat rotation to vegetable cultivation[J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2004, 26 (2): 119-128.
- Mäder P, Hahn D, Dubois D, et al. Wheat quality in organic and conventional farming: results of a 21 year field experiment[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87 (10): 1826-1835.
- Mandal A, Patra AK, Singh D, et al. Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98 (18): 3585-3592.
- Mark MVD, Brouwer M, Kromhout H, et al. Is pesticide use related to parkinson disease? Some clues to heterogeneity in study results[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120 (3): 340-347.
- MarkMuller, AngieTagtow, Roberts S, et al. Aligning food systems policies to advance public health[J]. *Journal of Hunger & Environmental Nutrition*, 2009, 4 (3-4): 225.
- Martínez-Ballesta M, Dominguez-Perles R, Moreno D, et al. Minerals in plant food: effect of agricultural practices and role in human health[M]. Berlin: Springer Netherlands.
- Mazzoncini M, Antichi D, Silvestri N, et al. Organically vs conventionally grown winter wheat: Effects on grain yield, technological quality, and on phenolic composition and antioxidant properties of bran and refined flour[J]. *Food Chemistry*, 2015, 175: 445.
- Mozaffarian D, Ludwig DS. Dietary guidelines in the 21st century - a time for food[J]. *JAMA*, 2010, 304 (6): 681-682.
- Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits[J]. *Science*, 1995, 267 (5201): 1117-1123.
- Pinstrup-Andersen P. Introducing nutritional considerations into agricultural and rural development[J]. *Food & Nutrition Bulletin*, 1982, 4: 33-41.
- Pinstrup-Andersen P, Fao R, ESN, et al. Nutritional consequences of agricultural projects: conceptual relationships and assessment approaches[J]. *Haematologica*, 1981, 90 (12): 1720-1722.
- Rempelos L, Cooper J, Wilcockson S, et al. Quantitative proteomics to study the response of potato to contrasting fertilisation regimes[J]. *Molecular Breeding*, 2013, 31 (2): 363-378.
- Riley H, Pommeresche R, Eltun R, et al. Soil structure, organic matter and earthworm activity in a comparison of cropping systems with contrasting tillage, rotations, fertilizer levels and manure use[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2008, 124 (3-4): 275-284.
- Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. A safe operating space for humanity[J]. *Nature*, 2013, 461 (7263): 472-475.
- Röhlig RM, Engel K-H. Influence of the input system (conventional versus organic farming) on

- metabolite profiles of maize (*Zea mays*) kernels[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58 (5): 3022-3030.
- Ruel MT. Can food-based strategies help reduce vitamin A and iron deficiencies? A review of recent evidence[M]. International Food Policy Research Institute, 2001.
- Ryan MH, Derrick JW, Dann PR. Grain mineral concentrations and yield of wheat grown under organic and conventional management[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2004, 84 (3): 207–216.
- Shi R, Zhang Y, Chen X, et al. Influence of long-term nitrogen fertilization on micronutrient density in grain of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of Cereal Science, 2010, 51 (1): 165-170.
- Shier NW, Kelman J, Dunson JW. A Comparison of crude protein, moisture, ash and crop yield between organic and conventionally grown wheat[J]. Nutrition Reports International, 1984, 30 (1): 71-76.
- Smith-Spangler C, Brandeau ML, Hunter GE, et al. Are organic foods safer or healthier than conventional alternatives? A systematic review[J]. Annals of Internal Medicine, 2012, 157: 348-366.
- Smith JL, Paul EA, Bollag JM, et al. The significance of soil microbial biomass estimations[J]. Soil Biochemistry, 1990, 6: 357-396.
- Stewart PW, Edward L, Jacqueline R, et al. The Relationship between Prenatal PCB Exposure and Intelligence (IQ) in 9-Year-Old Children[J]. Environmental Health Perspectives, 2008, 116 (10): 1416-1422.
- Swaminathan MS. An evergreen revolution[J]. Biologist, 2000, 47 (2): 85.
- Tejada M, Gonzalez JL. Influence of two organic amendments on the soil physical properties, soil losses, sediments and runoff water quality[J]. Geoderma, 2008, 145 (3): 325-334.
- Tejada M, Gonzalez JL, Garcíamartínez AM, et al. Application of a green manure and green manure composted with beet vinasse on soil restoration: effects on soil properties[J]. Bioresource Technology, 2008, 99 (11): 4949-4957.
- Vallee BL. Zinc: biochemistry, physiology, toxicology and clinical pathology[J]. Biofactors, 1988, 1 (1): 31.
- Vrček IV, Čepo DV, Rašić D, et al. A comparison of the nutritional value and food safety of organically and conventionally produced wheat flours[J]. Food chemistry, 2014, 143 (2): 522-529.
- Weichenthal S, Moase C, Chan P. A Review of Pesticide Exposure and Cancer Incidence in the Agricultural Health Study Cohort[J]. Ciência & Saúde Coletiva, 2012, 118 (8): 255-270.
- Welch RM, Graham RD. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55 (396): 353-364.
- Williamson CS. Is organic food better for our health[J]? Nutrition Bulletin, 2010, 32 (2): 104-108.
- Worthington V. Effect of agricultural methods on nutritional quality: a comparison of organic with

- conventional crops[J]. *Alternative Therapies in Health and Medicine*, 1998, 4 (1): 58-69.
- Xiaojun GU. Pesticides and cancer[J]. *World Sci-tech R & D*, 2005, 8 (3): 420-443.
- Zacccone C, Di Caterina R, Rotunno T, et al. Soil-farming system-food-health: Effect of conventional and organic fertilizers on heavy metal (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) content in semolina samples[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 107 (2): 97-105.
- Zhang W, Jiang F, Ou J. Global pesticide consumption and pollution: with China as a focus[J]. *Proceedings of the International Academy of Ecology & Environmental Sciences*, 2011, 1 (2): 125-144.
- Zörb C, Niehaus K, Barsch A, et al. Levels of compounds and metabolites in wheat ears and grains in organic and conventional agriculture[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57 (20): 9555-9562.

致 谢

时光如梭，岁月匆匆，转眼间已经在植物所度过三年光阴，回首此间时光，心中倍觉充实，尤其值此论文即将完成之际，心中更是思绪万千，感慨良多。在此求学期间，不仅提高了自身的学术水平和科研能力，更收获了同学、同门的友谊与支持，收获了老师们的帮助和教导，收益良多，心中怀着太多感激。

首先，要感谢我的恩师蒋高明研究员。论文前期的试验设计与安排、后期的撰写与修改，都是在蒋老师的悉心指导下所完成的。硕士期间，有幸师从蒋老师，让我深感荣幸，无论是科研上，还是生活中，导师给予了我充分的帮助和提携，我的每一点进步都让我深刻地认识到导师的心血。蒋老师对事业的认真、热情，严谨的求学态度，平和的待人方式，乐观的人生态度，都深深地影响着我，并将指导我在今后的生活、工作中发奋努力，不断进取，谨向我的导师致以最真挚的感激！

感谢中国科学院植物研究所李彩虹老师、郭立月师兄、程达师姐和岑宇师姐，在前期的实验和论文的写作过程中给予的指导和帮助。

感谢植被与环境变化国家重点实验室闫志丹老师、朱小琴老师、张淑敏老师在仪器使用方面提供的帮助和指导。

感谢在实验过程中，同门给予的帮助，因为有他们的陪伴和帮助，使我在实验站期间，不仅科研上不再孤独，更使我生活中充满欢声笑语，不再感到孤寂。

感谢弘毅生态农场的工作人员和蒋家庄的农民朋友们，他们不仅在生活中给我提供帮助和照顾，更在实验过程中教导我如何管理作物，在灌溉、除草除虫、收获的过程中，给予指导，让我的试验进行的更加顺利。

感激我的父母家人，在我迷茫之际，为我排忧解难，他们的支持是我不断前进的动力。

在此三年间的研究学习，不仅仅使我完成学位论文，最重要的还是培养了我端正、刻苦、严谨的求学态度和科研态度，这些都将影响我的一生。

最后，在此向所有给予过我帮助和支持的老师、同门和亲人们，真挚的说一声：谢谢你们！

宋彦洁
2018 年 5 月
于北京香山

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

一. 作者简历

2011 年 9 月-2015 年 6 月, 在山东大学生命科学院获得学士学位。

2015 年 9 月-2018 年 6 月, 在中国科学院植物研究所攻读硕士学位。

二. 在学期间发表学术论文情况

Yu XF, Guo LY, Jiang GM, Song YJ, et al. Advances of organic products over conventional productions with respect to nutritional quality and food security[J]. Acta Ecologica Sinica: 2018, 38: 53-60.

Li CH, Song YJ, Guo LY, et al. Nitric oxide alleviates wheat yield reduction by protecting photosynthetic system from oxidation of ozone pollution[J]. Environmental Pollution: 2018, 236: 296-303.

Yanjie Song, Liyue Guo, Caihong Li, A. Mahmud Muminov, Gaoming Jiang. Green revolution calls for ecological agriculture[J]. Transylvanian Review. (接收)