

# 影响黄柳地上生物量的关键土壤因子探究<sup>\*</sup>

苏华<sup>1</sup> 张彦<sup>2</sup> 胡海笑<sup>1,3</sup> 李永庚<sup>1</sup>

(1. 植被与环境变化国家重点实验室, 中国科学院植物研究所, 北京 100093;

2. 北京师范大学第二附属中学, 北京 100088; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**提 要:** 黄柳在浑善达克沙地多数生境均有分布, 但何种土壤因子决定其生物量变化尚不清楚。本研究于丘间凹地、半固定沙丘和固定沙丘调查, 运用相关分析和多元回归分析探究黄柳地上生物量与土壤因子的关系。丘间凹地的黄柳植株最高( ~ 2.2m), 枝条数最多( ~ 17.9), 比叶面积最大( ~ 113.9cm<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>), 地上生物量最高( ~ 2533g/株), 半固定沙丘次之。在土壤含水量、pH 值、有机质、氮、磷和钾含量等因子中, 土壤含水量是影响黄柳地上生物量的关键因子。

**关键词:** 生物量; 黄柳; 生境调查; 土壤水分; 浑善达克沙地

**中图分类号:** Q945.79

**文献标识码:** A

黄柳(*Salix gordejewii*) 杨柳科多年生灌木, 广泛分布于浑善达克沙地和科尔沁沙地。因其具有防风固沙<sup>[1-3]</sup>、保持水土<sup>[4]</sup>、调节气候<sup>[5]</sup>及改良土壤<sup>[6-8]</sup>等重要的生态作用, 在我国北方沙区的植被恢复工作中具有极其重要的生态学地位, 对沙地的生态环境保护和建设起着十分关键的作用<sup>[9]</sup>。

黄柳种群的自然演替具有“生于湿地, 长于沙丘, 死于草地”的特点<sup>[10]</sup>。已有学者从黄柳的生态适应性出发对不同生境内黄柳的形态结构和生理特性进行了研究, 结果发现: 半固定沙丘上的黄柳根系最发达<sup>[11]</sup>; 半固定沙丘上的黄柳株丛高大, 以较少的分枝、较长且宽的叶片进行旺盛的营养生长, 实现其对生境中水热条件和养分资源的充分利用<sup>[12]</sup>, 而固定沙丘的情况明显变差<sup>[11]</sup>, 株丛低矮, 分枝较多, 叶片较短而狭<sup>[12]</sup>; 与丘间低地上的黄柳相比, 固定沙丘上的黄柳的脯氨酸和可溶性糖含量较高, 水势和光补偿点则较低<sup>[13]</sup>。然而, 不同生境内黄柳的生物量变化是否受土壤条件影响? 影响其生物量变化的关键土壤因子为何? 至今尚不清楚。为此, 本研究在浑善达克沙地选择典型生境(丘间凹地、半固定沙丘、固定沙丘), 对黄柳的生物量特征进行了研究, 并探讨其与土壤因子的关系, 以期确定影响黄柳生物量变化的关键因子, 为沙地植被的恢复与重建提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究在位于浑善达克沙地腹地的中国科学院植物研究所浑善达克沙地生态研究站(42°54'N, 116°0'E)开展。研究区海拔约1300m, 属温带大陆性气候。来自正蓝旗气象站的气象数据显示, 当地年平均气温约1.7℃, 7月和1月分别为一年中最暖和和最冷的月份, 平均气温分别为14.7℃和-23.4℃。无霜期100-110d。年均降水量约为365mm, 主要集中在植物生长旺盛的7-8月。年均潜在蒸发量约为2700mm。土壤以栗钙土为主, 局部地段有盐碱土和沼泽土等<sup>[14]</sup>。

研究区固定沙丘、半固定沙丘、流动沙丘、丘间凹地和低湿地镶嵌分布, 固定平沙地分布其间。流动沙丘分布面积约占沙丘总面积的1/3。半固定沙丘形态以垄状和堆状沙丘为主, 植物类型以草本为主, 黄

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2014-9-17; 修回日期: 2014-11-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31400338); 中国科学院战略先导科技专项(XDA05070102); 北京青少年科技后备人才早期培养计划资助。

作者简介: 苏华(1981-), 女, 山东莱芜人, 博士, 研究方向为恢复生态学和植物生理学。Email: suhua7666@163.com

通讯作者: 李永庚。Email: liyongeng@ibcas.ac.cn

柳、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛较为普遍。固定沙丘形态多为沙垄、沙垄-梁窝状沙丘和灌丛状沙丘,在主风的影响下多成西北-东南方向排列,植物类型以草本为主,有一定比例的乔木和灌木,乔木以榆树(*Ulmus pumila*)为优势种,灌木以黄柳、小红柳(*Salix microstachya*)、小叶锦鸡儿、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)等为优势。

## 1.2 研究对象

黄柳<sup>[15]</sup>多年生灌木,一般高1-2m,最高可达3m以上,沙丘顶端有时也不足80cm<sup>[16]</sup>。植株以丛生为主,丛幅一般3-5m,固定沙丘上常以密集单株生长为主。老枝呈灰白色,当年生枝条呈黄色,有光泽,细长柔韧无毛。叶线形,一般长2-8cm,宽0.2-0.5cm,两端渐尖,边缘具腺齿,正面深绿色,叶背面苍白色。托叶线形,花序先叶开放,无梗。花期4月,果期5月。

在浑善达克沙地,黄柳多生长在流动或半流动沙丘的背风坡,居沙丘的中上部,以10-30m高处较普遍<sup>[16]</sup>。一般情况下,垂直分布越高群落越单纯,黄柳的丛株状态基本消失,以单株密集为主,常呈片状分布;垂直分布越低,纯林面积越小,黄柳以丛状混生为主。在固定沙丘或丘间凹地多与小红柳或小叶锦鸡儿等混生。

## 1.3 研究方法

研究地点位于四万亩围封样地内,该样地自2001年围封至今,全年禁牧,秋季打草<sup>[17]</sup>。于2013年8月植物旺盛生长季节,选取三种典型生境(图1):丘间凹地(LL)、半固定沙丘(SF)和固定沙丘(FD)。每种生境中选择5株年龄一致(2-3年生)、无病虫害的黄柳个体进行标记。调查黄柳植株下层草本植物群落,测定土壤含水量。对标记黄柳植株的株高、枝条数和比叶面积(叶片面积与干重之比)进行调查后,将地上部分从距地面4cm处刈割,分段切割为10-50cm的小段,带回实验室,置于烘箱内105℃杀青15min后65℃烘干至恒重,

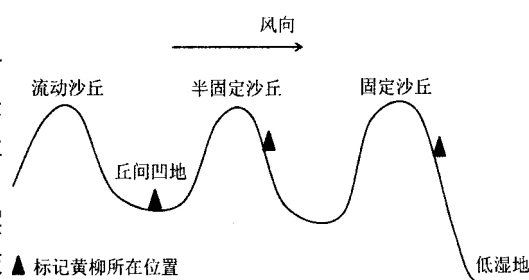


图1 黄柳采样点布设示意图

Figure 1 Location of sampled *Salix gordejewii*

用百分之一天平称重,获得地上生物量。用土钻采集土壤样品(距地表0-20cm)带回实验室,风干、研磨、过筛,备用。重复5次。

植物群落调查参照《陆地生物群落调查观测与分析》<sup>[18]</sup>中所记载的方法,记录植物盖度和优势植物种,将地上部分带回实验室烘干、称重,获得草本植物地上生物量。

土壤理化性状依据《土壤理化分析与剖面描述》<sup>[19]</sup>中所记载的方法完成:pH值用电位法测定<sup>[19]</sup>;土壤含水量用土域反射(TDR)土壤水分测定仪即时测定;有机质含量用重铬酸钾氧化外加热法测定<sup>[19]</sup>;全氮含量用凯氏定氮法测定<sup>[19]</sup>;全磷含量用 $\text{HClO}_4-\text{H}_2\text{SO}_4$ 法测定<sup>[19]</sup>;全钾含量用火焰光度法测定<sup>[19]</sup>。

## 1.4 数据处理

用SPSS V. 18.0对数据进行统计处理,计算数据的平均值和标准差,采用最小显著差数法(LSD)进行均值间的差异显著性检验。对黄柳地上生物量( $Y$ )、pH值( $X_1$ )、土壤含水量( $X_2$ )、土壤有机质含量( $X_3$ )、土壤全氮含量( $X_4$ )、土壤全磷含量( $X_5$ )和土壤全钾含量( $X_6$ )数据进行相关分析和多元回归分析。所有图表用Excel 2010完成。

# 2 结果与分析

## 2.1 浑善达克沙地不同生境内的植被状况

浑善达克沙地不同生境内的植被状况差异显著(表1)。黄柳在固定沙丘与小叶锦鸡儿伴生,在丘间凹地与华蔓草蓼子(*Ribes fasciculatum*)、山刺玫(*Rosa davurica*)等伴生,而在半固定沙丘则呈单一分布。丘间凹地的黄柳长势最好,植株最高,达到2m以上;枝条数最多,平均值达到 $17.9 \pm 0.9$ 枝;比叶面积最大,达到 $113.9 \pm 4.8 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ 。地上生物量也最高,达到 $2533.0 \pm 281.7 \text{ g}$ ,分别为半固定沙丘和固定沙丘黄柳地上生物量的6.4倍和17.1倍。半固定沙丘次之,固定沙丘的黄柳长势最差。固定沙丘的黄柳植株比半固定沙丘矮0.4m左右,枝条数相当,比叶面积约小10.7%。黄柳下层草本植物群落的盖度以丘间凹地为最高,达到 $80 \pm 10\%$ ,以羊草(*Leymus chinensis*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、针茅(*Stipa capillata*)、灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)等为优势种,群落地上生物量可达 $170.2 \pm 2.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ;半固定沙丘的植被盖度最

低, 仅为  $25 \pm 5\%$ , 以沙蓬 (*Agriophyllum squarrosum*) 和猪毛菜 (*Salsola collina*) 等固沙先锋植物为优势种, 群落地上生物量仅为  $17.8 \pm 0.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 固定沙丘居中, 盖度为  $50\%$  左右, 以冷蒿 (*Artemisia frigida*)、针茅、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*) 等为优势种, 地上生物量为  $71.0 \pm 0.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

表 1 浑善达克沙地不同生境植被调查。

Table 1 Plants investigation of different habitats in Hunshandake Sandy Land

生境	黄柳				下层草本植物群落		
	株高 (m)	枝条数	比叶面积 ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	地上生物量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	盖度 (%)	地上生物量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	优势物种 伴生灌木
固定沙丘	$1.4 \pm 0.4\text{c}$	$12.0 \pm 0.4\text{b}$	$93.8 \pm 3.3\text{c}$	$148.5 \pm 30.2\text{c}$	$45 \pm 15\text{b}$	$21.0 \pm 0.9\text{b}$	冷蒿、针茅、糙隐子草、蒿蓄 小叶锦鸡儿
半固定沙丘	$1.8 \pm 0.2\text{b}$	$11.9 \pm 0.3\text{c}$	$105.0 \pm 2.3\text{b}$	$396.1 \pm 160.3\text{b}$	$25 \pm 5\text{c}$	$17.8 \pm 0.8\text{c}$	沙米、猪毛菜 无
丘间凹地	$2.2 \pm 0.5\text{a}$	$17.9 \pm 0.9\text{a}$	$113.9 \pm 4.8\text{a}$	$2533.0 \pm 281.7\text{a}$	$80 \pm 10\text{a}$	$70.2 \pm 2.2\text{a}$	羊草、鹅绒委陵菜、金莲花、地榆 小红柳、柴桦

注: 不同的小写字母代表差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2.2 不同生境内的土壤条件分析

沙地土壤呈弱碱性, pH 值在  $7.0 - 9.0$  之间 (图 2A)。丘间凹地碱性最强, pH 为  $8.7$ , 显著高于半固定沙丘和固定沙丘。固定沙丘和半固定沙丘 pH 差异不显著, 分别为  $7.5$  和  $7.4$ 。不同生境内的土壤含水量差异明显 (图 2B), 丘间凹地最高, 达  $26\%$ , 比半固定沙丘和固定沙丘高出约  $10\%$ 。丘间凹地与沙丘的土壤养分含量差异显著 (图 2C - F)。丘间凹地的土壤有机碳含量可达  $27.48 \pm 4.98 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 分别是固定沙丘和半固定沙丘  $6.8$  倍和  $1.8$  倍 (图 2C)。丘间凹地的全氮含量为  $2.25 \pm 0.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 而固定沙丘和半固定沙丘仅为  $0.23 \pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $1.21 \pm 0.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (图 2D); 丘间凹地的全磷含量  $0.44 \pm 0.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 而固定沙丘和半固定沙丘仅为  $0.12 \pm 0.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.29 \pm 0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (图 2E)。与氮磷相反的是, 土壤全钾含量以固定沙丘为最多, 达  $28.93 \pm 0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 半固定沙丘和丘间凹地差异不显著, 均在  $26.5 - 27.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间 (图 2F)。

## 2.3 黄柳地上生物量与土壤因子的相关性分析

从黄柳地上生物量 ( $Y$ ) 与土壤因子间的相关性分析 (表 2) 可以看出,  $Y$  除与土壤全钾含量 ( $X_6$ ) 无关以外, 与 pH 值 ( $X_1$ )、土壤水分含量 ( $X_2$ )、有机质含量 ( $X_3$ )、全氮含量 ( $X_4$ ) 和全磷含量 ( $X_5$ ) 等其他几个土壤因子均有显著的相关关系。而且, 各土壤因子间也具有显著的相互影响作用, 其中  $X_4$  和  $X_5$  的相关系数最高, 达到了  $0.889$ , 其次是  $X_1$  和  $X_2$ , 其相关系数达到  $0.880$ 。

为了控制土壤因子间的相互作用, 进一步进行偏相关分析 (表 3) 发现,  $Y$  与  $X_2$  的关系最为密切, 其相关系数为  $0.551$ , 且达到显著水平;  $Y$  与其他土壤因子的相关关系不显著。因此, 其他土壤因子均通过影响土壤含水量来影响黄柳生物量。

## 2.4 黄柳地上生物量与土壤因子的多元回归分析

以  $X_1 - X_6$  为自变量, 以  $Y$  为因变量, 进行多元回归分析, 逐步舍去所有回归系数不显著的变量 (表 4), 得到最佳回归方程:  $Y = -1050.83 + 135.91X_2$  ( $P < 0.05$ ,  $R^2 = 0.779$ ,  $F = 98.865$ )。该回归方程说明, 仅  $X_2$  对  $Y$  有贡献, 且在本研究范围内,  $Y$  与  $X_2$  呈线性增长关系。当其他因素维持在平均水平时, 土壤水

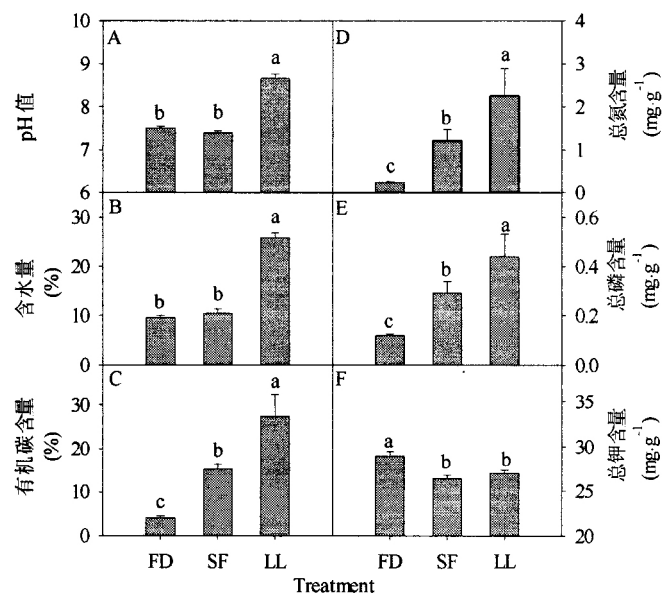


图 2 浑善达克沙地固定沙丘 (FD)、半固定沙丘 (SF) 和丘间凹地 (LL) 三种生境内土壤的 pH 值 (A)、含水量 (B)、有机碳含量 (C)、全氮含量 (D)、全磷含量 (E) 和全钾含量 (F)  
Figure 2 Soil pH value (A), water content (B), total carbon content (C), total nitrogen content (D), total phosphorus content (E), soil total potassium content (F) of fixed dunes (FD), semi-fixed dunes (SF) and lowlands (LL) in Hunshandake Sandy Land  
注: 不同的小写字母代表差异显著 ( $P < 0.05$ )。

分含量每增加 1 个单位(1%) ,黄柳地上生物量可提高 135.91g。多元回归分析的结果与偏相关分析的结果是一致的。

表 2 黄柳地上生物量(Y)与土壤因子间的 pearson 相关性分析

Table 2 Pearson correlation analysis among the aboveground biomass of *Salix gordejii* and soil factors

	Y	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>
Y	1						
X <sub>1</sub>	0.814*	1					
X <sub>2</sub>	0.883*	0.880*	1				
X <sub>3</sub>	0.529*	0.734*	0.615*	1			
X <sub>4</sub>	0.466*	0.367*	0.464*	0.476*	1		
X <sub>5</sub>	0.441*	0.401*	0.422*	0.499*	0.889*	1	
X <sub>6</sub>	-0.096	-0.108	-0.208	-0.436*	-0.499*	-0.498*	1

注: X<sub>1</sub>: 土壤 pH 值; X<sub>2</sub>: 土壤含水量; X<sub>3</sub>: 土壤全碳含量; X<sub>4</sub>: 土壤全氮含量;

X<sub>5</sub>: 土壤全磷含量; X<sub>6</sub>: 土壤全钾含量; \* 代表 P < 0.05。

表 3 黄柳地上生物量(Y)与土壤因子间的偏相关分析

Table 3 Partial correlation analysis among the aboveground biomass (Y) of *Salix gordejii* and soil factors

因子	Y	P 值
X <sub>1</sub>	0.156	0.457
X <sub>2</sub>	0.551	0.004
X <sub>3</sub>	-0.106	0.613
X <sub>4</sub>	0.088	0.677
X <sub>5</sub>	0.083	0.694
X <sub>6</sub>	0.204	0.329

注: X<sub>1</sub> - X<sub>6</sub> 同表 2。

表 4 黄柳地上生物量与土壤因子间的多元逐步回归分析

Table 4 Multiple regression analysis among the aboveground biomass of *Salix gordejii* (Y) and soil factors

模型	变量	非标准 化系数	标准 系数	t	P 值
1	X <sub>1</sub>	404.49	0.20	0.76	0.46
	X <sub>2</sub>	108.50	0.70	3.17	0.00
	X <sub>3</sub>	-7.90	-0.09	-0.51	0.61
	X <sub>4</sub>	76.95	0.09	0.42	0.68
	X <sub>5</sub>	458.17	0.08	0.40	0.69
	X <sub>6</sub>	89.91	0.12	1.00	0.33
2	X <sub>1</sub>	466.86	0.23	0.93	0.36
	X <sub>2</sub>	104.67	0.68	3.24	0.00
	X <sub>3</sub>	-8.27	-0.09	-0.55	0.59
	X <sub>4</sub>	137.94	0.16	1.42	0.17
	X <sub>6</sub>	82.95	0.11	0.96	0.35
3	X <sub>1</sub>	288.63	0.14	0.77	0.45
	X <sub>2</sub>	110.01	0.71	3.63	0.00
	X <sub>3</sub>	129.27	0.15	1.37	0.18
	X <sub>6</sub>	105.93	0.15	1.41	0.17
4	X <sub>2</sub>	130.05	0.84	8.56	0.00
	X <sub>3</sub>	127.29	0.15	1.36	0.18
	X <sub>6</sub>	113.47	0.16	1.54	0.14
5	X <sub>2</sub>	138.84	0.90	9.94	0.00
	X <sub>6</sub>	66.90	0.09	1.01	0.32
6	X <sub>2</sub>	135.91	0.88	9.94	0.00

注: X<sub>1</sub> - X<sub>6</sub> 同表 2。

### 3 讨论

黄柳适应沙区气候,在沙地植被恢复与重建工作中具有重要地位。黄柳在降雨量不到 200mm 的年份仍能生长,在沙面 60℃ 高温下亦无灼伤,能耐 -40℃ 低温,是我国北方沙地理想的固沙树种<sup>[9-20]</sup>。本研究通过对浑善达克沙地固定沙丘、半固定沙丘和丘间凹地三种典型生境中的黄柳进行研究,发现不同生境中的黄柳长势差异显著(表 1),丘间凹地的黄柳地上生物量最高,单株重可达 2533g,这与其株高最大、分枝数最多和比叶面积最大有关(表 1);其次为半固定沙丘,单株重为 396.1g,固定沙丘最低,单株重仅为 148.5g。任安芝等<sup>[11]</sup>通过研究科尔沁沙地黄柳人工林中的黄柳根系认为黄柳旺盛生长于半固定沙丘而衰退于固定沙丘,这与本文研究结果一致。

黄柳适应沙地环境,枝条被沙埋后能迅速生出不定根和不定芽,利用水平根吸收沙层中的凝结水和大气降水生活,从而使得其能在半流动沙丘上旺盛生长,有时甚至能形成纯群落,但随着沙丘的固定其优势地位会随着其他植物的竞争而减弱<sup>[10]</sup>。本研究结果证实了上述观点。固定沙丘上黄柳下层植物群落盖度较之半固定沙丘有显著提高,且植物物种种类更加丰富(表 1),这势必会与黄柳的生长形成竞争关系。任安芝等<sup>[11]</sup>和梁宇等<sup>[12]</sup>研究发现丘间低地的黄柳在地表 40cm 以下无直径大于 5 mm 的粗根分布,而半固定沙丘上黄柳的根系无论从数量上还是从分布深度上都占有显著的优势,从而认为丘间低地的黄柳生长差于半固定沙丘,这与本研究发现的丘间凹地的黄柳长势强于半固定沙丘不符,造成这一结果的原因可能是其对生境的选择尤其是丘间低地与本研究中所选的丘间凹地差异较大。任安芝等<sup>[11]</sup>和梁宇等<sup>[12]</sup>等文中的丘间低地以差巴嘎蒿(*Artemisia halodron*)、木岩黄芪(*Hedysarum fruticosum* var. *lignosum*)和地梢瓜(*Cynanchum thesioides*)等为优势种,而文中丘间凹地位于流动沙丘落坡底部(图 1),以羊草、黑沙蒿和灰绿藜等为优势(表 1)。

浑善达克沙地生境类型多样,不同生境中土壤条件差异显著。崔秀萍等<sup>[21]</sup>等研究发现浑善达克沙地黄柳的根系主要呈水平分布,水平根非常发达,且主要集中在地下 10 - 30 cm 土层中,因此可推断表层土壤的水分和养分状况对黄柳的生长具有决定作用。丘间凹地的水分条件和养分资源显著优于固定沙丘和半固定沙丘(图 2),资源优越的土壤环境使得黄柳能够进行旺盛的营养生长(表 1),在形态学上表现出植株高而壮、叶片薄而大等特点<sup>[13-22]</sup>,在生理学上表现出高光合速率、高蒸腾速率等特点<sup>[13-23]</sup>。本研究通过

相关分析和多元回归分析,明确了土壤水分含量是影响黄柳地上生物量的关键因子(表 3 和表 4),验证了前人通过研究黄柳的生态适应性所得出的“黄柳的长势变化主要与沙地的水分状况及其生物学特性有关”<sup>[13 24 25]</sup>的推测。

在干旱、半干旱地区,水分是影响植物生存和生长发育的关键因子<sup>[26]</sup>。张继义等<sup>[27]</sup>用有限面积法野外实地测定了科尔沁沙地几种常见乔灌木树种所能耐受的极端临界土壤含水量,发现黄柳所能耐受的最低临界土壤含水量是 1.89%。周海燕等<sup>[28]</sup>通过对黄柳进行土壤水分过程饱和和处理发现过多的水分使黄柳叶片束缚水比例升高,导致生长衰退。因此,尽管本研究发现土壤水分是影响黄柳地上生物量的关键因子(表 3 和表 4),且土壤含水量与黄柳地上生物量呈线性关系,但是,土壤含水量对黄柳地上生物量的影响应该存在一个上限阈值,即如果土壤水分含量过高也会导致黄柳的生长衰退。

## 4 结论

黄柳能在浑善达克沙地的固定沙丘、半固定沙丘和丘间凹地等生境中生长,且在丘间凹地长势最好,表现为长得高、分枝多、叶片薄而大、地上生物量高,其次为半固定沙丘,在固定沙丘上长势最差。土壤含水量是决定黄柳地上生物量的关键因子。在沙区植被恢复与重建过程中,应充分考虑土壤含水量的关键作用,选择适宜生境对黄柳进行自然恢复;人工培育黄柳林时要注意水分调控,促进植被生长。

## 参考文献

- [1]李爽,纪晓林,黄选瑞,等. 冀北沙漠化土地黄柳生物沙障防风阻沙与土壤改良效益分析[J]. 河北农业大学学报,2010,33(1): 12-16-26.
- [2]武俊瑛,高永. 浑善达克沙地公路机械沙障防风固沙效益分析[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(12): 161-166.
- [3]张瑞麟,刘果厚,崔秀萍. 浑善达克沙地黄柳活沙障防风固沙效益的研究[J]. 中国沙漠,2006,25(5): 717-721.
- [4]黄刚,赵学勇,张铜会,等. 科尔沁沙地 3 种灌木根际土壤 pH 值及其养分状况[J]. 林业科学,2007,43(8): 138-142.
- [5]Liu R, Zhao H, Zhao X, et al. Facilitative effects of shrubs in shifting sand on soil macro-faunal community in Horqin Sand Land of Inner Mongolia, Northern China[J]. European Journal of Soil Biology, 2011, 47(5): 316-321.
- [6]Huang G, Zhao X Y, Li Y Q, et al. Restoration of shrub communities elevates organic carbon in arid soils of northwestern China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 47: 123-132.
- [7]Su Y Z, Zhao H L, Li Y L, et al. Influencing mechanisms of several shrubs on soil chemical properties in semiarid Horqin Sandy Land, China[J]. Arid Land Research and Management, 2004, 18(3): 251-263.
- [8]Zhao H L, Zhou R L, Su Y Z, et al. Shrub facilitation of desert land restoration in the Horqin Sand Land of Inner Mongolia[J]. Ecological Engineering, 2007, 31(1): 1-8.
- [9]刘新民,赵哈林,赵爱芬. 科尔沁沙地风沙环境与植被[M]. 北京: 科学出版社,1996.
- [10]刘慎谔,章古台的天然固沙与人工固沙造林. 于拔,刘慎谔文集[M]. 北京: 科学出版社,1985: 136-144.
- [11]任安芝,高玉葆,王金龙. 不同沙地生境下黄柳(*Salix gordejewii*)的根系分布和冠层结构特征[J]. 生态学报,2001,21(3): 399-404.
- [12]梁宇,高玉葆,任安芝,等. 不同沙地生境下黄柳(*Salix gordejewii*)种群若干数量特征的比较研究[J]. 生态学报,2000,20(1): 80.
- [13]Su H, Li Y, Lan Z, et al. Leaf-level plasticity of *Salix gordejewii* in fixed dunes compared with lowlands in Hunshandake Sandland, North China[J]. Journal of Plant Research, 2009, 122(6): 611-622.
- [14]徐文铎. 中国沙地森林生态系统[M]. 北京: 中国林业出版社,1998.
- [15]中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社,1984.
- [16]林品一,陈秀英. 浑善达克沙地小黄柳的生长状况与小红柳的演替规律[J]. 内蒙古林业调查设计,1996(2): 50-53.
- [17]Normile D. Getting at the roots of killer dust storms[J]. Science, 2007, 317: 314-316.
- [18]董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社出版,1997.
- [19]刘光菴. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社,1996.
- [20]佟德艳,杨文华,吕伟,等. 浑善达克沙地黄柳的繁殖更新与综合效益分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2005,26(4): 10-13.
- [21]崔秀萍,刘果厚,张存厚. 浑善达克沙地黄柳人工林根系分布及生物量研究[J]. 中国沙漠,2011,31(2): 447-450.
- [22]崔秀萍,刘果厚,张瑞麟. 浑善达克沙地不同生境下黄柳叶片解剖结构的比较[J]. 生态学报,2006,26(6): 1842-1847.
- [23]李红丽,董智,丁国栋,等. 浑善达克沙地植物蒸腾特征的研究[J]. 干旱区资源与环境,2003,17(5): 135-140.
- [24]白文明,李凌浩,宋世环. 内蒙古多伦农牧交错区固定沙丘植被群落特征分析[J]. 草地学报,2003,11(3): 223-227.
- [25]崔秀萍,刘果厚. 黄柳叶片对水分亏缺的生理响应[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(3): 181-187.
- [26]姜汉桥,段昌群,杨树华. 植物生态学[M]. 北京: 高等教育出版社,2004: 115-122.
- [27]张继义,付丹,魏珍珍,等. 科尔沁沙地几种乔灌木树种耐受极端土壤水分条件与生存能力野外实地测定[J]. 生态学报,2006,26(2): 467-474.

[28]周海燕,赵爱芬. 不同季节黄柳气孔导度和水分状况的变化特征[J]. 中国沙漠,1999,19(S1): 69-71.

## Exploration of the key soil factor which influences the aboveground biomass of *Salix gordejvii* shrub

SU Hua<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, HU Haixiao<sup>1,3</sup>, LI Yonggeng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, the Chinese Academy of Science, Beijing 100093, China;

2. The Second High School Attached to Beijing Normal University, Beijing 100088, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** *Salix gordejvii* widely distributes in most of the habitats of Hunshandake Sandy Land. However, it remains unclear that which soil factor determines its biomass changes. We investigated representative *S. gordejvii* mature individuals growing in three habitats, i. e. lowland, semi-fixed dune and fixed dune, and explored the relationships between the aboveground biomass of *S. gordejvii* and the several soil factors, e. g. soil pH values, water contents, organic matter contents, total nitrogen contents, total phosphorus contents and total potassium contents. *S. gordejvii* living in lowland is the best, with the largest height ( $\sim 2.2\text{m}$ ), the most shoots ( $\sim 17.9$ ), the largest specific leaf area ( $\sim 113.9\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) and the highest aboveground biomass ( $\sim 2533\text{g}$  per plant). Next is that growing in semi-fixed dune. Soil water content should be the key factor influencing the aboveground biomass of *S. gordejvii* in Hunshandake Sandy Land.

**Key words:** vegetation restoration; *Salix gordejvii*; habitat investigation; soil water; sandy land