

沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林土壤养分特性 及植物群落特征

李清雪¹, 朱雅娟^{1,2}, 贾志清^{1,2*}, 王永胜¹, 于洋¹

(1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 2. 青海共和荒漠生态系统定位观测研究站, 青海 共和 813005)

摘要:以青海共和盆地沙丘上 12 年生的中间锦鸡儿人工林为研究对象,并以流动沙丘为对照,探讨在沙丘上建立中间锦鸡儿人工林后,沙丘部位对土壤养分含量以及植物群落的影响。在中间锦鸡儿人工林内沙丘的迎风坡中部、坡顶、背风坡中部和流动沙丘采集土壤样品,深度为 0~5,5~10,10~20 和 20~50 cm。结果表明:与流动沙丘相比,沙丘 3 个部位中间锦鸡儿人工林 0~20 cm 的有机质、0~50 cm 的全氮和全磷含量得到显著提高。迎风坡中间锦鸡儿人工林 0~5 cm 深度的土壤有机质和全氮、0~20 cm 深度的全磷含量显著高于坡顶和背风坡。在沙丘上建立中间锦鸡儿人工林后,草本植物种类、数量和植被盖度增加,迎风坡草本植物盖度明显高于坡顶和背风坡。

关键词:中间锦鸡儿人工林;沙丘部位;土壤养分;植物群落

中图分类号:S793

文献标识码:A

Effects of Sand Dune Slopes on Soil Nutrients and Plant Community for *Caragana intermedia* Plantation

LI Qing-xue¹, ZHU Ya-juan^{1,2}, JIA Zhi-qing^{1,2}, WANG Yong-sheng¹, YU Yang¹

(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Qinghai Gonghe Desert Ecosystem Research Station, Gonghe 813005, Qinghai, China)

Abstract: This study was to determine how the soil nutrients and plant community were affected by slopes of sand dunes 12 years after *Caragana intermedia* plantation was established on the alpine sandy land of Gonghe Basin on Qinghai-Tibet Plateau. The moving sand dune in the vicinity of experiment site was chosen as a control. The soil samples were collected for four replicates from five depths (0~5, 5~10, 10~20, 20~30 cm and 30~50 cm) on windward slopes, tops of slopes and leeward slopes. The results showed that the soil organic matter content at 0~20 cm, total nitrogen and total phosphorus content at 0~50 cm for all sand dunes slopes of *C. intermedia* plantation were significantly higher than that of the moving sand dune. The soil organic matter and total nitrogen contents at 0~5 cm and total phosphorus content at 0~20 cm for windward slopes were significantly higher than that at the top of slopes and leeward slopes. The establishment of *C. intermedia* plantation on sand dunes facilitated the colonization and development of herbaceous species. The coverage and species of herbaceous increased, especially for windward slopes.

Key words: *Caragana intermedia* plantation; sand dunes slopes; soil nutrients; plant community

收稿日期:2013-09-09

基金项目:林业公益性行业科研专项经费项目“高寒沙地防护林生态服务功能研究(201204203)”、“十二·五”农村领域国家科技计划课题“优良固沙植物材料筛选及其配套技术研究(2012BAD16B0102)”

作者简介:李清雪(1984—),女,博士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。

* 通讯作者:博士,研究员,主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail:jiazq@caf.ac.cn

土地沙漠化是发生在干旱、半干旱地区的一种土地退化类型。沙漠化过程中风蚀和沙丘的移动导致土壤粗化贫瘠,生产力降低,使人类生存环境恶化,阻碍社会经济的发展。在沙漠化土地上进行植被恢复是防治土地沙漠化最有效的措施之一^[1]。灌木是干旱、半干旱生态系统的主要植被类型之一。灌木不仅可以降低风速,减少输沙率,削弱风力对土壤的侵蚀,还可以截获较多的风蚀土壤细颗粒、降尘和凋落物,从而改良土壤特性,促进土壤肥力恢复^[2]。灌木物种在群落中形成的“肥岛”效应使大量的养分、黏粒在风蚀环境下聚集在灌木冠幅范围内^[3]。很多学者已经对干旱、半干旱地区灌木改良土壤特性及其导致的土壤空间异质性做了大量研究。例如,在科尔沁沙地,随着小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)人工固沙林的建立和生长,土壤持水能力得到改善,土壤有机碳和全氮增加^[4]。在内蒙古高原的草原—沙漠过渡带,藏锦鸡儿(*Caragana tibetica* Kom)灌丛堆具有“肥岛”效应,并且“肥岛”效应随着灌丛堆的发展而更加明显^[5]。在准格尔盆地南缘,梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge)灌丛能有效的截获风蚀物质,使灌丛下土壤的结构及肥力得到改善^[3]。地形条件也是影响土壤特性空间异质性的一个主要因子^[6]。地形可以通过影响土壤水分、土壤温度和气流等环境因子进而影响土壤特性^[7],但是有关地形对土壤养分及植物群落影响的研究还相对较少。

青藏高原的共和盆地是受土地沙漠化影响最严重的区域之一,沙漠化土地面积为 $126.6987 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占盆地总面积的91.9%。从1959年到2004年,共和盆地沙漠化土地面积年均增长速率为7.9%^[8]。植被重建是该区域防治土地沙漠化最有效的措施之一。中间锦鸡儿(*C. intermedia* Kuang et H. C. Fu)为豆科锦鸡儿属灌木,是共和盆地流动沙丘植被恢复的主要物种。许多学者已经对共和盆地这种干旱、大风、寒冷、生长期短的特殊生境进行了大量的研究。例如,对共和盆地土地沙漠化及影响因子的研究^[8],对高寒沙区生态恢复影响植物物种多样性^[9]及对共和盆地中间锦鸡儿人工林水分利用策略的研究^[10];但是,有关沙漠化土地植被恢复后,地形对土壤特性及植物群落影响的研究还鲜有报道。本文将对共和盆地沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林的土壤特性及植物群落进行研究,充分了解

不同坡位土壤养分特性和植物群落的变化规律,为后期沙丘不同部位植被恢复的合理调控和配置模式提供参考。

1 研究区概况

本研究在国家林业局青海共和荒漠生态系统定位观测站进行,位于青藏高原东北部的青海省海南州共和县沙珠玉乡(100°16'E,36°16'N),海拔2 871 m。该区具有显著的高原大陆性气候特征,年均气温2.4℃,年均降水量246.3 mm,年均潜在蒸发量1 716.7 mm,无霜期年平均91 d,太阳总辐射6 631.69 MJ·m⁻²·a⁻¹;全年平均大风日数为50.6 d,最多可达97 d,沙尘暴平均为20.7 d;风向主要为西、西北风,平均风速2.7 m·s⁻¹,最大风速可达40 m·s⁻¹。本区的地带性土壤类型为栗钙土和棕钙土,非地带性土壤类型主要有风沙土、草甸土和沼泽土等。研究区主要沙丘类型为新月形沙丘和新月形沙丘链,沙丘高度一般3~18 m。研究区内以人工固沙植被为主:主要物种有乔木青杨(*Populus cathayana* Rehd.)、小叶杨(*P. simonii* Carr.);灌木主要为中间锦鸡儿、柠条锦鸡儿(*C. korshinskii* Kom.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、乌柳(*Salix cheilophila* Schneid.)和沙柳(*S. psammophila* C. Wang et C. Y. Yang)等^[10]。

2 研究方法

2.1 样地设置、样品采集及植被调查

2012年6月下旬,以12年生中间锦鸡儿人工林为研究对象,人工林的面积约为30 000 m²。在中间锦鸡儿人工林内选择4个形态相似的沙丘为试验样地(4个重复),并选择中间锦鸡儿人工林附近的流动沙丘为对照。沙丘走向为东北—西南向,沙丘高约6 m,沙丘长约90 m。中间锦鸡儿人工林带垂直于沙丘走向,株距1.0 m,行距2.5 m。对4个沙丘的3个部位(迎风坡中部、坡顶和背风坡中部)分别随机选择5株中间锦鸡儿进行测量,共测量60株中间锦鸡儿,每个沙丘部位测量20株中间锦鸡儿。测定指标包括:灌丛最高枝条高度;冠幅,分别在东西向和南北向测量灌丛的最大直径;株丛径,以地面为基准,同样按东西和南北2个方向测量地面上出现枝条区域的最大直径。沙丘不同部位中间锦鸡儿的形态特征见表1。

表 1 沙丘不同部位中间锦鸡儿的形态特征

沙丘部位	株高/cm	冠幅/cm		株丛径/cm	
		东西	南北	东西	南北
迎风坡	121.9 ± 6.0	105.6 ± 6.9	152.2 ± 7.1	35.2 ± 3.8	22.7 ± 1.9
坡顶	117.0 ± 8.6	132.2 ± 22.0	161.9 ± 13.0	28.5 ± 3.0	22.0 ± 2.2
背风坡	117.8 ± 3.3	104.4 ± 10.3	134.9 ± 7.4	24.4 ± 1.0	18.3 ± 1.1

注:表中的数据为 20 株中间锦鸡儿的平均值 ± 标准差。

土壤样品的采集:分别在中间锦鸡儿人工林内 4 个沙丘的迎风坡中部、坡顶和背风坡中部等距设置 4 个取样点,每个取样点都位于两行中间锦鸡儿林带的中间位置。用剖面法采集 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 和 30 ~ 50 cm 深度的土壤样品。将中间锦鸡儿人工林内同一沙丘同一部位 4 个取样点同一深度的 4 个土壤样品均匀混合为 1 个土壤样品。将流动沙丘迎风坡中部、坡顶和背风坡中部同一土壤深度的 3 个样品均匀混合为 1 个土壤样品,同样取 4 个重复。将土壤样品用自封袋带回室内自然风干,测定土壤养分。

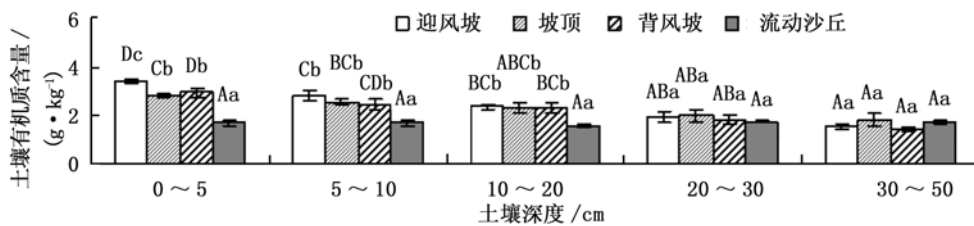
在每个土壤取样点的附近设置 1 个 1 m × 1 m 的样方,即在中间锦鸡儿人工林内 4 个沙丘的 3 个不同部位分别设置 4 个样方,共 48 个样方,调查沙丘不同部位的草本层植被情况。记录植物种类组成、数量、植株高度和植株盖度。流动沙丘无植被。

2.2 土壤样品的实验室分析

土壤样品去除残留的枯落物后,经研磨后过 100 目筛。采用重铬酸钾浓硫酸消解硫酸亚铁滴定法测定土壤有机质含量;采用凯氏定氮法测定全氮含量;采用钼锑抗比色法测定全磷含量;采用原子吸收法测定全钾含量^[11]。

表 2 沙丘部位、土壤深度及其相互作用对中间锦鸡儿人工林土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量的影响

变异来源	沙丘部位		土壤深度		沙丘部位 × 土壤深度	
	F	P	F	P	F	P
土壤有机质	18.084	< 0.001	25.591	< 0.001	3.735	< 0.001
全氮	107.997	< 0.001	9.762	< 0.001	1.949	0.046
全磷	59.315	< 0.001	2.021	0.103	1.245	0.275
全钾	4.660	0.055	0.914	0.462	0.711	0.735



不同大写字母表示同一沙丘部位不同土壤深度之间的土壤养分含量差异显著,不同小写字母表示不同沙丘部位相同土壤深度之间的土壤养分含量差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林的土壤有机质含量

2.3 数据处理

采用 SPSS 17.0 统计分析软件进行数据处理与分析。用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 和多重比较分析不同数据组间的差异 ($\alpha = 0.05$)。用双因素方差分析法 (two-way ANOVA) 分析沙丘部位、土壤深度及其相互作用对土壤养分的影响。

3 结果与分析

3.1 沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林的土壤养分含量

沙丘部位、土壤深度及其相互作用对土壤有机质含量的影响极显著 ($p < 0.001$) (表 2)。迎风坡中间锦鸡儿人工林表层 (0 ~ 5 cm) 土壤有机质含量显著高于坡顶和背风坡,坡顶和背风坡又显著高于流动沙丘 ($p < 0.001$) (图 1)。在 5 ~ 10、10 ~ 20 cm,沙丘不同部位之间的土壤有机质含量无显著差异 ($p > 0.05$),但都显著高于流动沙丘 ($p < 0.05$)。在 20 cm 土层以下,沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林和流动沙丘的土壤有机质含量的差异不显著 ($p > 0.05$)。沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林的土壤有机质含量都随着土壤深度的增加而极显著 ($p < 0.05$) 降低。流动沙丘不同土层之间的土壤有机质含量的差异不显著 ($p > 0.05$)。

沙丘部位和土壤深度对全氮含量的影响极显著 ($p < 0.001$), 二者的相互作用对其影响显著 ($p < 0.05$) (表2)。迎风坡中间锦鸡儿人工林表层 (0 ~ 5 cm) 全氮含量显著高于坡顶和背风坡, 坡顶和背风坡又极显著高于流动沙丘 ($p < 0.001$) (图2)。在

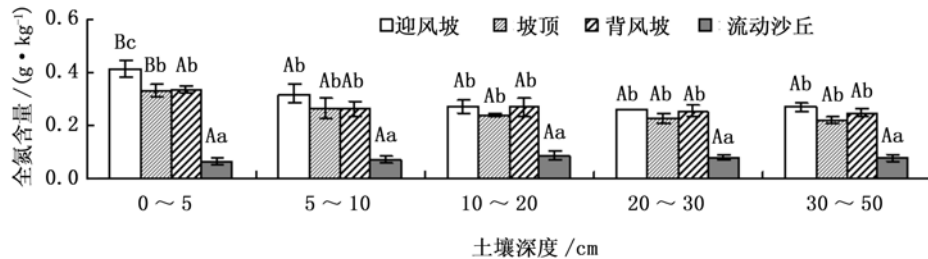


图2 沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林土壤的全氮含量

从表2可知:沙丘部位对全磷含量影响极显著, 土壤深度及其相互作用对全磷含量影响不显著。图3显示:迎风坡中间锦鸡儿人工林0~5、5~10、10~20 cm 深度土壤的全磷含量显著高于坡顶和背风坡, 坡顶和背风坡又极显著高于流动沙丘 ($p <$

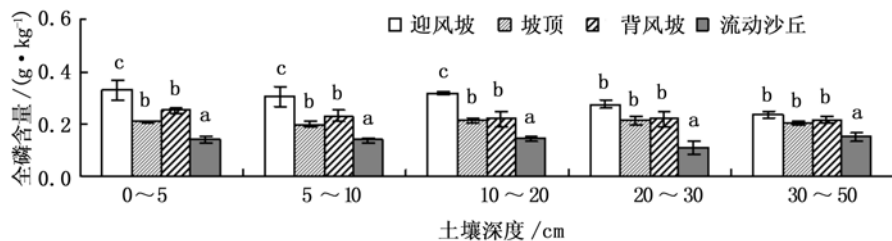


图3 沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林土壤的全磷含量

从表2可知:沙丘部位、土壤深度及其相互作用对全钾含量的影响不显著 ($p > 0.05$)。图4表明:在0~5 cm, 迎风坡的全钾含量稍高于坡顶、背风坡和

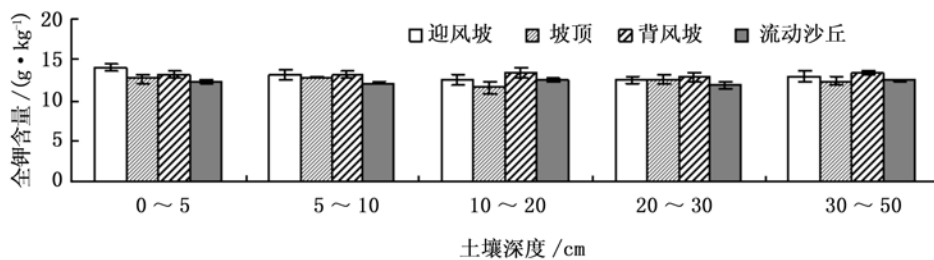


图4 沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林土壤的全钾含量

3.2 沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林群落的植物种类

在沙丘上建立中间锦鸡儿人工林后, 主要增加了以下1年生和多年生草本植物: 碱蓬 (*Suaeda glauca* (Bunge) Bunge)、赖草 (*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.)、大籽蒿 (*Artemisia sieversiana* Ehrhart ex Willd.) 和沙蒿 (*Artemisia desertorum* Spreng.) 等。从表3可

5 cm 以下深度, 沙丘不同部位之间的全氮含量无显著差异 ($p > 0.05$), 但都极显著高于流动沙丘 ($p < 0.001$)。中间锦鸡儿人工林迎风坡和坡顶表层 (0 ~ 5 cm) 的全氮含量显著高于深层土壤 ($p < 0.05$)。

0.001)。在土层20 cm 以下, 沙丘不同部位的全磷含量无显著差异 ($p > 0.05$), 但都极显著高于流动沙丘 ($p < 0.001$)。沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林和流动沙丘不同深度土壤的全磷含量无显著差异 ($p > 0.05$)。

流动沙丘。沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林和流动沙丘不同深度土壤的全钾含量差异不显著 ($p > 0.05$)。

知:迎风坡和背风坡的多年生赖草和1年生大籽蒿的重要值都很高, 是这两个部位的优势种。坡顶的1年生碱蓬的重要值最高, 是坡顶的优势种。迎风坡和背风坡草本物种数量为11种, 坡顶草本物种数量为9种。迎风坡、坡顶和背风坡的草本植物密度分别为193.3、132.6、152.2株·m⁻²; 植被盖度分别为30.3%、14.7%和18.8%。

表3 沙丘不同部位中间锦鸡儿人工群落植物种类组成

种名	生活型	迎风坡				坡顶				背风坡			
		数量/株	高度/cm	频度/%	重要值	数量/株	高度/cm	频度/%	重要值	数量/株	高度/cm	频度/%	重要值
碱蓬	AF	49.8	8.0	90	17.1	107.0	7.9	100	48.2	39.7	9.0	80	18.5
赖草	PG	75.2	46.4	100	29.4	12.6	29.6	70	11.5	58.2	47.2	100	29.8
大籽蒿	AF	54.4	25.1	80	22.8	2.7	18.7	30	5.1	33.7	22.7	70	26.1
青海猪毛菜	AF	6.8	8.6	80	8.6	5.4	10.2	60	7.5	13.8	11.4	50	8.3
沙蒿	PS	2.9	32.2	50	6.1	1.3	31.2	50	14.9	0.1	36.0	10	1.4
小车前	AF	1.2	8.7	30	2.1	1.7	5.7	60	5.5	0.1	8.0	10	1.0
鹤虱	AF	0.9	11.7	30	2.1	0.8	11.5	20	2.1	4.8	18.0	40	5.2
阿尔泰狗娃花	PF	0.8	37.5	40	7.4	0.4	23.7	30	4.3				
甘草	PL	0.2	32.0	10	2.8								
苦菜	PF									1.5	34.5	20	3.7
田旋花	PF	0.9	17.0	10	0.8								
独行菜	AF	0.2	16.0	10	0.7								
狗尾草	AG					0.7	8.0	10	1.0	0.1	6.0	10	0.8
芨芨草	PG									0.1	119.0	10	2.6
多裂骆驼蓬	PF									0.1	28.0	10	2.6
总个体数/株		193.3				132.6				152.2			
种数/种		11				9				11			
盖度/%		30.3				14.7				18.8			

注:AF: 1年生杂草; AG: 1年生禾草; PF: 多年生杂草; PG: 多年生禾草; PL: 多年生豆科; PS: 多年生灌木。

碱蓬(*Suaeda glauca* (Bunge) Bunge); 赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.); 大籽蒿(*Artemisia sieversiana* Ehrhart ex Willd.); 青海猪毛菜(*Salsola chinghaiensis* A. J. Li); 沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng.); 小车前(*Plantago minuta* Pall.); 鹤虱(*Lappula myosotis* Moench); 阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus* (Willd.) Novopokr.); 甘草(*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.); 苦菜(*Sonchus arvensis* Linn.); 田旋花(*Convolvulus arvensis* Linn.); 独行菜(*Lepidium apetalum* Willdenow); 狗尾草(*Setaria viridis* (Linn.) Beauv.); 芨芨草(*Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski); 多裂骆驼蓬(*Peganum multisectum* (Maxim.) Bohr.)

4 讨论与结论

有机质和氮、磷、钾元素是土壤养分循环的核心^[4]。它们在土壤中含量的丰缺是衡量土壤质量的重要指标。流动沙丘的固定过程实质是植被恢复和土壤肥力增加的过程^[12]。植被恢复不仅可以在短期内固定流动沙面,而且可以明显提高土壤中的碳、氮、磷等养分的含量^[13]。本研究的结果表明,与流动沙丘相比,沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林0~20 cm土层的土壤有机质,0~50 cm土层的全氮和全磷都得到明显提高,尤其是全氮含量增加的幅度较大。中间锦鸡儿人工林迎风坡、坡顶和背风坡植被盖度分别提高了30.3%、14.7%和18.8%。这可能是因为随着人工林在流动沙丘上的建立,沙丘上的草本层也逐渐得到恢复。灌木和草本层的枯枝落叶及根系脱落、腐烂、分解促进沙丘上土壤养分水平的提高^[2]。另外,随着中间锦鸡儿人工林的生长,冠层截获越来越多的土壤风蚀物质和大气降尘,通过降雨和树干径流等方式进入土壤,也可以促进土壤养分水平的提高^[14]。土壤全氮含量大幅增加,可能是因为中间锦鸡儿是豆科灌木,根部大量的根瘤菌具有高固氮活性,可以固定空气中的游离态氮^[15],能够明显提高土壤氮素水平。这与其他半干旱区的

相关研究结果一致。在山西西北部的黄土高原和科尔沁沙地,随着小叶锦鸡儿的生长,土壤有机碳和全氮含量均逐渐增加^[3,14]。

在沙漠化土地进行人工植被恢复可以大幅降低风速和减少输沙率^[13]。沙丘土壤受到风蚀和沉积过程以及植物的拦截作用会导致土壤养分资源的再分配^[2]。本研究所选取的中间锦鸡儿人工林起初是建立在相对均一、经沙障固定后的沙丘之上,植被建设采用同样的配置和种植技术。研究结果表明,迎风坡0~5 cm深度的土壤有机质和全氮,0~20 cm深度的全磷显著高于坡顶和背风坡。这可能是因为风沙流经过迎风坡时,迎风坡的灌木降低了风速,截获较多的土壤风蚀物质、降尘和凋落物,使这些物质聚集在灌丛附近^[16],通过微生物活动回归土壤。风沙流通过迎风坡后,风速降低,携带的沙物质和凋落物相应减少,从而使坡顶和背风坡中间锦鸡儿截获的沙物质相对较少。这还需要对风速和输沙率的进一步研究来证明。另外,灌木还能拦截和贮藏一部分草本植物的种子,有利于草本植物的入侵和定居^[12]。有学者的研结果表明,土壤养分的增加能够提高草本植物群落的生产力^[17]。建立中间锦鸡儿人工林后,随着流动沙丘的进一步固定和沙丘土壤环境的改善,1年生和多年生草本植物增加。草本植物在沙丘上的发展是净初级生产力的重要组成部

分,其快速的生长和死亡是土壤养分输入的一个重要途径^[18-19]。迎风坡的草本植被盖度(30.3%)远大于坡顶(14.7%)和背风坡(18.8%),当这些草本植物死亡腐烂分解后又增加了沙丘迎风坡的土壤养分。这样长期的循环过程,可能会使迎风坡的土壤环境条件越来越好,从而更有利于草本植物群落的发展。本研究的结果与其他地区相关研究的结果一致,科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工林迎风坡土壤全碳、全氮和速效磷含量也高于坡顶和背风坡^[14,20]。

沙丘3个部位中间锦鸡儿人工林的土壤有机质含量随土壤深度的增加而显著降低,迎风坡和坡顶表层(0~5 cm)的全氮显著高于深层土壤。说明土壤有机质和全氮的分布有很强的表聚性。这可能是因为表层土壤受凋落物的影响较大^[21];另外,灌丛根系对土壤中矿质营养元素的富集作用,使养分能够从深层向表层土壤聚集^[22]。其他学者对科尔沁沙地的研究也表明,当地25年生小叶锦鸡儿人工林表层(0~5 cm)的土壤有机碳、全氮含量显著比深层土壤的高^[20]。

综上所述,在共和盆地流动沙丘上种植中间锦鸡儿人工林后,提高了土壤养分水平,增加了草本植物种类、数量和植被盖度。建议后期在流动沙丘进行植被建设时,可以适当的降低迎风坡造林密度,增加坡顶和背风坡的造林密度,从而能够更好地改善坡顶和背风坡的土壤养分水平和林下植被状况。

参考文献:

- [1] Su Y Z, Zhang T H, Li Y L, et al. Changes in soil properties after establishment of *Artemisia halodendron* and *Caragana microphylla* on shifting sand dunes in semiarid Horqin Sandy land, northern China [J]. *Environmental Management*, 2005, 36(2): 272-281.
- [2] Burke I C, Lauenroth W K, Riggle R, et al. Spatial variability in soil properties in the shortgrass steppe: the relative importance of topography, grazing, microsite, and plant species in controlling spatial patterns [J]. *Ecosystems*, 1999, 2(5): 422-438.
- [3] Yang Z P, Zhang Q, Wang Y L, et al. Spatial and temporal variability of soil properties under *Caragana microphylla* shrubs in the northwestern Shanxi Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(6): 538-544.
- [4] Su Y Z, Zhao H L. Soil properties and plant species in an age sequence of *Caragana microphylla* plantations in the Horqin Sandy Land, North China [J]. *Ecological Engineering*, 2003, 20(3): 223-235.
- [5] Zhang P J, Yang J, Zhao L Q, et al. Effect of *Caragana tibetica* nebkhas on sand entrapment and fertile islands in steppe-desert ecotones on the Inner Mongolia Plateau, China [J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1-2): 79-90.
- [6] Seibert J, Stendahl J, Sirensen R. Topographical influences on soil properties in boreal forests [J]. *Geoderma*, 2007, 141(1-2): 139-148.
- [7] 李林海, 郜二虎, 梦梦, 等. 黄土高原小流域不同地形下土壤有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 179-187.
- [8] 张登山, 高尚玉, 石蒙沂, 等. 青海高原土地沙漠化及其防治[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 39-72.
- [9] 魏占雄. 高寒沙区生态恢复对植物多样性的影响[J]. *草地生态*, 2009(7): 36-51.
- [10] Jia Z Q, Zhu Y J, Liu L Y. Different water use strategies of juvenile and adult *Caragana intermedia* plantations in the Gonghe Basin, Tibet Plateau [J]. *PLoS One*, 2012, 7(9): e45902.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978.
- [12] Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H L, et al. Spatial heterogeneity of soil properties and vegetation-soil relationships following vegetation restoration of mobile dunes in Horqin Sandy Land, Northern China [J]. *Plant and Soil*, 2009, 318: 153-167.
- [13] 蒋德明, 曹成有, 押田敏雄, 等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工林防风固沙及改良土壤效应研究[J]. *干旱区研究*, 2008, 25(5): 653-658.
- [14] Cao C Y, Jiang S Y, Zhang Y, et al. Spatial variability of soil nutrients and microbiological properties after the establishment of leguminous shrub *Caragana microphylla* Lam. plantation on sand dune in the Horqin Sandy Land of Northeast China [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1467-1475.
- [15] Gao L F, Hu Z A, Wang H X. Genetic diversity of rhizobia isolated from *Caragana intermedia* in Maowusu sandland, north of China [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2002, 35(4): 347-352.
- [16] 赵哈林, 苏永中, 张华, 等. 灌丛对流动沙地土壤特性和草本植物的影响[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(3): 385-390.
- [17] Di Tommaso A, Aarssen L W. Resource manipulations in natural vegetation: A review [J]. *Vegetation*, 1989, 84: 9-29.
- [18] Chen B M, Wang G X, Cheng D L, et al. Vegetation change and soil nutrient distribution along an Oasis-Desert transitional zone in Northwestern China [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, 49(11): 1537-1547.
- [19] Cao C Y, Jiang D M, Teng X H, et al. Soil chemical and microbiological properties along a chronosequence of *Caragana microphylla* lam. plantations in the Horqin Sandy land of northeast China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40: 78-85.
- [20] Dong X W, Zhang X K, Bao X L, et al. Spatial distribution of soil nutrients after the establishment of sand-fixing shrubs on sand dune [J]. *Plant Soil and Environment*, 2009, 55(7): 288-294.
- [21] 董锡文, 张晓珂, 姜思维, 等. 科尔沁沙地固定沙丘土壤氮素空间分布特征研究[J]. *土壤*, 2010, 42(1): 76-81.
- [22] 任雪, 褚贵新, 宋日权, 等. 准格尔盆地南缘绿洲—荒漠过渡带梭梭“肥岛”效应特征[J]. *土壤通报*, 2010, 41(1): 100-104.