

# 内蒙古敖汉旗不同类型防护林的土壤养分特征

朱雅娟<sup>1</sup>,李清雪<sup>1</sup>,贾志清<sup>1\*</sup>,于 洋<sup>1</sup>,李晓明<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所,北京 100091;2. 敖汉旗林业局,内蒙古 敖汉旗 024300)

**摘 要:**在内蒙古敖汉旗选择 3 种防护林,比较 4 个深度(0~10、10~20、20~40 cm 和 40~60 cm)的土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量。结果表明,杨树×樟子松林的有机质含量最高,柠条和沙棘 2 种灌木林次之。杨树×樟子松林的碱解氮含量最高,沙棘林次之。杨树×樟子松林的速效磷含量最高,沙棘林次之。杨树×樟子松林的速效钾含量最高,柠条林和沙棘林次之。因此,杨树×樟子松林的土壤养分条件较好,沙棘林次之。这 2 种防护林可以作为科尔沁沙地的优化防护林类型。

**关键词:**防护林;土壤有机质;碱解氮;速效磷;速效钾

**中图分类号:**S718      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2014)04-0015-06

## Soil Nutrient Characteristics of Different Types of Shelterbelt in Aohan Banner, Inner Mongolia

ZHU Ya-juan<sup>1</sup>, LI Qing-xue<sup>1</sup>, JIA Zhi-qing<sup>1\*</sup>, YU Yang<sup>1</sup>, LI Xiao-ming<sup>2</sup>

(1. Institute of Desertification Studies, CAF, Beijing 100091, China;

2. Forestry Bureau of Aohan Banner, Aohan Banner, Inner Mongolia 024300, China)

**Abstract:** Soil nutrient conditions were examined in different shelterbelts to give theoretical basis for plantation management in semi-arid area. Three types of shelterbelt (mixed forests of poplar and pin, *Hippophae rhamnoides*, and *Caragana microphylla*) were selected to compare soil nutritional indices, such as soil water content, soil organic matter, available nitrogen, phosphorus and potassium in four different soil depths, 0—10, 10—20, 20—40 and 40—60 cm in Aohan Banner of Inner Mongolia. The results indicated that soils of mixed shelterbelt of poplar and pine contained the highest contents of organic mater, available nitrogen, phosphorus, potassium, and moisture, followed by those of *H. rhamnoides* and *C. microphylla*.

**Key words:** shelterbelt; soil organic matter; available nitrogen; available phosphorus; available potassium

土地荒漠化是目前我国面临的主要环境问题之一。它是发生在干旱、半干旱和亚湿润干旱区的一种土地退化类型<sup>[1]</sup>。为了减少土地荒漠化带来的危害,我国北方大部分荒漠化土地上都建立了防护林。防护林除了具有防风固沙、固碳、调节小气候等功能外,还可以改良土壤特性,促进土壤肥力恢复<sup>[2]</sup>。

敖汉旗地处努鲁尔虎山脉北麓,科尔沁沙地南

缘,总面积 8 316 km<sup>2</sup>。该旗地处科尔沁沙地和燕山山脉向松辽平原过渡地带,北部为浅沙坨沼区占全旗总面积的 32%。气候干旱,多风沙,生态环境十分脆弱。独特的地理位置和生态特点使之成为松辽平原的水源地和京津地区重要的生态屏障。全旗林地面积达 3 528 km<sup>2</sup>,占总土地面积的 42.42%,是“全国人工造林第一县”。该旗的主要固沙造林树种包括:杨树(赤峰杨 *Populus × xiaozhuanica* cv.

收稿日期:2013-10-21 修回日期:2013-11-14  
基金项目:“十二五”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);科技部农业科技成果转化项目(2011GB24320002)。  
作者简介:朱雅娟,女,博士,副研究员,研究方向:荒漠植物生态学。E-mail: zhuyj@caf.ac.cn  
\*通信作者:贾志清,女,博士,研究员,研究方向:荒漠化防治。E-mail: jiazq@caf.ac.cn

‘*chifengensis*’), 樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*), 柠条 (小叶锦鸡儿 *Caragana microphylla*), 沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 和山杏 (*Armeniaca sibirica*) 等。该旗被列为环北京生态环境重点治理县以后,经过多年的综合治理,生态环境得到较大改善。然而,受气候干旱以及不合理的土地利用等人类活动的影响,当地的部分防护林已经发生退化。根据当地林业局 2010 年春季的调查数据,林地总枯死面积达 285.33 km<sup>2</sup>[3]。因此,优化防护林类型是当地林业生态建设面临的一个迫切问题。

有学者研究在敖汉旗不同配置杨树固沙林的带间植被修复[4],行带式固沙林带间植被修复过程[5],人工黄柳林的平茬复壮技术[6]以及不同类型防护林的土壤物理性质[3]等,但是对防护林土壤养分的研究较少。本研究以内蒙古敖汉旗 3 种不同类型的防护林为对象,通过测定土壤含水量以及有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量,比较它们的土壤养分特征。以选出林下土壤养分条件较好的防护林类型,为科尔沁沙地等半干旱地区防护林的营造和可持续经营提供参考。

表 1 敖汉旗 3 种不同类型防护林的群落特征

Table 1 Community characteristics of three different types of shelterbelt in Aohan Banner

类型	经纬度	海拔/m	造林方式	株行距 /(m×m)	密度 /(株·hm <sup>-2</sup> )	株高 /cm	盖度 /%	林下植被
杨树×樟子松林	N42°34.304' E120°27.401'	422.0	移栽,2 行杨树,1 行樟子松	2.0×5.0	933	503	35	冷蒿,狗尾草( <i>Setaria viridis</i> )
				2.5×5.0		322		
柠条林	N42°28.268' E119°42.805'	520.3	直播,4 行 1 带,带间距 4 m	2.0×2.0	2 500	178	40	冷蒿,虎尾草
沙棘林	N42°22.929' E119°55.396'	533.8	移栽,4 行 1 带,带间距 3.5 m	1.5×2.0	3 333	311	40	赖草( <i>Leymus secalinus</i> )

2013 年 5 月,分别在不同类型的防护林中用土钻采集土壤样品,采样深度为 0~10、10~20、20~40 cm 和 40~60 cm。杨树×樟子松林分别在杨树林带和樟子松林带内采集土壤。在不同类型防护林中央部位的林带内,以 1 棵树为中心,分别在东西南北 4 个方向 1/2 株距处采集土壤,混合作为 1 份样品。采样点之间互相间隔 5 个林带。每个类型的防护林中采集 3 份土壤作为重复,样品共计 60 份。土壤用自封袋带回实验室,自然风干后,一部分土壤样品过 2 mm 的筛,分析有机质含量;一部分土壤样品过 0.5 mm 的筛,分析土壤碱解氮,速效磷和速效钾含量。所有养分含量的测定均在中国农业科学院的土壤实验室完成。有机质含量用重铬酸钾—硫酸加热消解法测定。碱解氮含量用碱解扩散法测定。速效磷含量用碳酸氢钠法测定。速效钾含量用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提,火焰光度法测定。杨树×樟子松林

1 材料与方法

1.1 试验地概况

赤峰市敖汉旗是典型农牧交错带,气候属温带半干旱大陆性气候,年平均降水量 310~460 mm,年蒸发量 2 350~3 449 mm。年平均气温 5~7℃,最高气温为 39.7℃,最低气温为-31℃。光能资源丰富,日照充足,≥10℃ 有效积温为 2 600~3 200℃,无霜期为 130~150 d。土壤以褐土、栗钙土和风沙土为主,其中栗钙土和风沙土占全旗总面积的 52.6%。

1.2 方法

在敖汉旗选择 3 个不同类型的防护林,分别是杨树×樟子松林,大果沙棘林和柠条林,以荒地对照。3 种类型防护林均栽植在平坦的沙质土壤上。造林年代均为 2005 年,林龄为 8 a。杨树×樟子松林的混交方式为每 2 行杨树间隔 1 行樟子松。荒地处于柠条林附近,主要植物是冷蒿 (*Artemisia frigida*) 和虎尾草 (*Chloris virgata*)。不同类型防护林的群落特征见表 1。

的土壤养分含量按照 2:1 的混交比例求平均值。用 SPSS17.0 软件分析数据。通过双因素方差分析法,分析防护林类型和土壤深度对土壤含水量,有机质含量,碱解氮含量,速效磷含量和速效钾含量的影响。如果影响显著,再用 Duncan 多重比较法分析不同防护林类型或者不同土壤深度之间的差异是否显著( $p<0.05$ )。用 Excel 2003 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同类型防护林的土壤有机质含量

防护林类型对土壤有机质含量的影响达到极显著水平( $p<0.01$ ) (表 2)。如图 1 所示,在 0~10 cm,3 种防护林的土壤有机质含量均显著高于对照( $p<0.05$ )。在 10~20、20~40、40~60 cm,杨树×樟子松林的土壤有机质含量显著高于对照。而且,在 10~20、40~60 cm,杨树×樟子松林的土壤有机



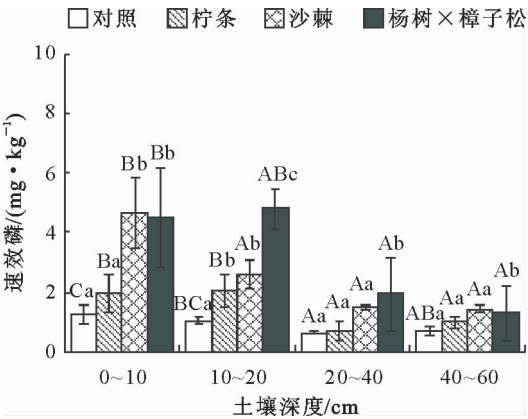


图3 不同类型防护林的土壤速效磷含量  
Fig. 3 Soil available phosphorus content in different types of shelterbelt

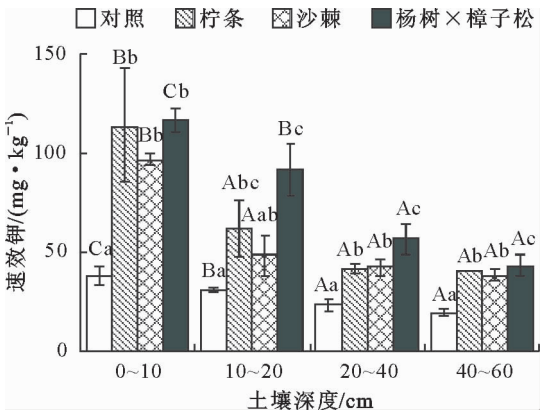


图4 不同类型防护林的土壤速效钾含量  
Fig. 4 Soil available potassium content in different types of shelterbelt

3 结论与讨论

荒漠化土地的修复过程实际上是植被的恢复以及伴随的土壤恢复的过程。在此过程中,受到植物生长的影响,风沙土逐渐固定,其理化性质逐渐得到改善。本研究结果表明,防护林类型影响土壤养分状况,包括有机质,碱解氮,速效磷和速效钾。

有机质是土壤碳库的主要组成部分,在土壤碳循环中起重要作用。土地利用的变化会影响土壤有机碳的储量和分布<sup>[7]</sup>。本研究结果表明:杨树×樟子松林的有机质含量最高,为 8.02~10.65 g · kg<sup>-1</sup>;柠条和沙棘 2 种灌木林的有机质含量其次,含量分别为 5.58~7.84 g · kg<sup>-1</sup> 和 4.50~7.90 g · kg<sup>-1</sup>。土壤有机质主要来源于枯落物分解。杨树和樟子松均为乔木,株高分别达到 5.03 m 和 3.22 m,产生的枯落物较多;而柠条和沙棘为灌木,株高分别为 1.78 m 和 3.11 m,产生的枯落物较少。因此,杨树×樟子松林的土壤有机质含量高。这 3 种防护林的土壤有机质含量均显著高于荒地(3.19~5.26 g · kg<sup>-1</sup>),因为荒地上生长的草本植物冷蒿和狗尾草产生的枯落物最少。它们也高于科尔沁沙地潜在荒漠化土地的平均有机碳含量(6.32 g · kg<sup>-1</sup>)<sup>[8]</sup>。前人的研究表明,当地 10 年生杨树林的土壤有机质含量为 10 g · kg<sup>-1</sup> 左右<sup>[5]</sup>,与本研究杨树林带的结果类似。在科尔沁沙地,奈曼旗的 6 年生小叶锦鸡儿灌丛下 0~5 cm 和 5~20 cm 的土壤有机碳含量分别为 1.8 g · kg<sup>-1</sup> 和 0.5 g · kg<sup>-1</sup><sup>[9]</sup>。翁牛特旗的沙丘迎风坡 25 年生小叶锦鸡儿灌丛下 0~5、5~10、10~20 cm 和 20~40 cm 的平均土壤有机碳含量分别为 6.36、3.10、1.16 g · kg<sup>-1</sup> 和 0.65 g · kg<sup>-1</sup><sup>[10]</sup>。然而,翁牛特旗的沙丘迎风坡 26 年生小叶锦鸡儿灌丛下 0~5、5~10 cm 和 10~20

cm 的平均土壤有机碳含量分别为 1.62、1.25 g · kg<sup>-1</sup> 和 0.42 g · kg<sup>-1</sup><sup>[11]</sup>。前人的研究表明,科尔沁沙地小叶锦鸡儿 1 a 的最终凋落物分解速率为 28.5%<sup>[12]</sup>。由于土壤碳的主要来源是植物的根系<sup>[13]</sup>,因此需要进一步研究根系对不同类型防护林土壤有机质的影响。另外,土壤微生物也对土壤碳库有一定的贡献。例如,科尔沁沙地 20 年生小叶杨(*Populus simonii*)林和樟子松林的土壤微生物碳含量分别大约为 0.8、0.6 g · kg<sup>-1</sup><sup>[14]</sup>。毛乌素沙地东南缘新疆杨(*P. bolleana*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)提高土壤微生物数量的效果最好<sup>[15]</sup>。与流沙相比,榆林沙区的樟子松也能够有效提高土壤微生物数量<sup>[16]</sup>。

土壤中的氮元素包括无机氮和有机氮。其中,碱解氮是植物能够利用的部分,包括无机态的硝态氮和铵态氮,以及易水解的有机氮(氨基酸,酰胺和易水解的蛋白质)。本研究结果表明:在表层 0~10 cm 土壤,杨树×樟子松林的碱解氮含量最高,为 59.70 mg · kg<sup>-1</sup>;沙棘林的碱解氮含量其次,为 59.10 mg · kg<sup>-1</sup>。在 10~20 cm 土壤,沙棘林的碱解氮含量最高,为 52.23 mg · kg<sup>-1</sup>。在 20~40 cm 土壤,沙棘林和杨树×樟子松林的碱解氮含量较高,分别为 42.48 mg · kg<sup>-1</sup> 和 37.00 mg · kg<sup>-1</sup>,均显著高于荒地(15.01 mg · kg<sup>-1</sup>),也高于科尔沁沙地潜在荒漠化土地的平均碱解氮含量(20.63 mg · kg<sup>-1</sup>)<sup>[8]</sup>。这可能是固氮植物沙棘根系的根瘤数量比柠条多<sup>[17]</sup>,因此能够明显增加土壤氮含量。前人的研究表明,当地 10 年生杨树林的土壤速效氮含量仅为 2.5 mg · kg<sup>-1</sup> 左右<sup>[5]</sup>,低于本研究杨树×樟子松林土壤碱解氮的测定结果。这可能是由于碱解氮除了速效氮之外还包括易水解的有机氮。研究表明,科尔沁沙地不同生境内土壤无机氮均主要以硝

态氮形式存在,铵态氮含量比硝态氮低 58.2%~79.7%<sup>[18]</sup>。当地 6 年生小叶锦鸡儿灌丛下 0~5 cm 和 5~20 cm 的土壤全氮含量分别大约为 0.22 g·kg<sup>-1</sup>和 0.12 g·kg<sup>-1</sup><sup>[9]</sup>。翁牛特旗的沙丘迎风坡 25 年生小叶锦鸡儿灌丛下 0~5、5~10、10~20 cm 和 20~40 cm 的平均土壤全氮含量分别为 0.75、0.35、0.15 g·kg<sup>-1</sup>和 0.11 g·kg<sup>-1</sup><sup>[10]</sup>。然而,翁牛特旗的沙丘迎风坡 26 年生小叶锦鸡儿灌丛下 0~5、5~10 cm 和 10~20 cm 的平均土壤全氮含量分别为 75、48 mg·kg<sup>-1</sup>和 15 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[11]</sup>。

土壤中的速效磷是植物根系能够直接吸收利用的形式,包括水溶性磷,部分吸附态磷和有机磷。本研究中,在 0~10 cm 土壤,沙棘林的速效磷含量最高,为 4.69 mg·kg<sup>-1</sup>;杨树×樟子松林的速效磷含量其次,为 4.49 mg·kg<sup>-1</sup>。这与科尔沁沙地潜在荒漠化土地的平均速效磷含量(7.00 mg·kg<sup>-1</sup>)类似<sup>[8]</sup>。前人的研究表明,当地 10 年生杨树林的土壤速效磷含量为 6 mg·kg<sup>-1</sup>左右<sup>[5]</sup>,与本研究杨树×樟子松林的结果类似。在 10~20 cm 土壤,杨树×樟子松林的速效磷含量最高,为 4.82 mg·kg<sup>-1</sup>;沙棘林的速效磷含量其次,为 2.62 mg·kg<sup>-1</sup>。在 20~40 cm 土壤,杨树×樟子松林的速效磷含量最高,为 1.95 mg·kg<sup>-1</sup>。不同深度柠条林的土壤速效磷含量为 0.71~2.06 mg·kg<sup>-1</sup>,均与荒地(0.65~1.25 mg·kg<sup>-1</sup>)类似。前人的研究表明:科尔沁沙地(翁牛特旗)的沙丘迎风坡 26 年生小叶锦鸡儿灌丛下 0~5、5~10 和 10~20 cm 的土壤平均速效磷含量分别仅为 0.18、0.15、0.08 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[11]</sup>。

土壤速效钾是水溶性钾,包括土壤溶液中的钾和一部分被土壤胶体吸附的可交换态钾。本研究的结果表明:杨树×樟子松林的速效钾含量最高,为 43.33~116.67 mg·kg<sup>-1</sup>;柠条林其次,为 40.00~113.33 mg·kg<sup>-1</sup>;均显著高于荒地(19.60~37.93 mg·kg<sup>-1</sup>)。沙棘林各层(0~10 cm、20~40 cm 和 40~60 cm)土壤的速效钾含量(38.33~96.67 mg·kg<sup>-1</sup>)均显著高于荒地。这 3 种防护林的土壤速效钾含量均大于或接近科尔沁沙地潜在荒漠化土地的平均速效钾含量(86.67 mg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[8]</sup>。在科尔沁沙地(翁牛特旗),沙丘迎风坡 26 年生小叶锦鸡儿灌丛下 0~5、5~10 和 10~20 cm 的土壤速效钾含量分别仅为 0.30、0.22 mg·kg<sup>-1</sup>和 0.16 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[11]</sup>。

总之,与荒地相比,敖汉旗 3 种不同类型的防护林的土壤养分条件都较好。其中,杨树×樟子松林的土壤养分条件最好,有机质、碱解氮、速效磷和速效钾最多。沙棘林的土壤养分条件次之,其有机质、

碱解氮、速效磷和速效钾较多。因此,从土壤养分平衡角度来看,这 2 种防护林可以作为科尔沁沙地的优化防护林类型。

参考文献:

[1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers, formally approved at the 10<sup>th</sup> Session of Working Group of the International Panel on Climate Change [R]. Geneva: IPCC, 2007.

[2] 慈龙骏. 中国的荒漠化及其防治[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.

[3] 李艳茹, 孙虎, 李冬惠, 等. 内蒙古敖汉旗人工林地土壤特性分析[J]. 江西农业学报, 2011, 23 (11): 124-127.

LI Y R, SUN H, LI D H, *et al.* Analysis of soil characteristics of artificial forest land in Aohan County of Inner Mongolia [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2011, 23 (11): 124-127. (in Chinese)

[4] 姜丽娜, 杨文斌, 姚云峰, 等. 不同配置的行带式杨树固沙林与带间植被修复的关系[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9 (2): 99-92.

JIANG L N, YANG W B, YAO Y, *et al.* Relationship between sand-fixing forest of *Populus* under different belts distribution pattern and their undergrowth the vegetation recovery [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9 (2): 99-92. (in Chinese)

[5] 杨文斌, 郭建英, 胡小龙, 等. 低覆盖度行带式固沙林带间植被修复过程及其促进沙地逆转效果分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32 (5): 1291-1295.

YANG W B, GUO J Y, HU X L, *et al.* Vegetation restoration process and sand-reversal effect of low coverage sand-fixing forest belts [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32 (5): 1291-1295. (in Chinese)

[6] 胡小龙, 薛博, 袁立敏, 等. 科尔沁沙地人工黄柳林平茬复壮技术研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26 (5): 135-139.

HU X L, XU B, YUAN L M, *et al.* Techniques of stumping and rejuvenating of *Salix gordejewii* plantation in Kerqin Sandy Land [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26 (5): 135-139. (in Chinese)

[7] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 等. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31 (18): 5358-5371.

CHEN Z, LV C H, FAN L, *et al.* Effects of land use change on soil organic carbon: a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5358-5371. (in Chinese)

[8] ZUO X, ZHAO H, ZHAO X, *et al.* Vegetation pattern variation, soil degradation and their relationship along a grassland desertification gradient in Horqin Sandy Land, northern China [J]. Environmental Geology, 2009, 58: 1227-1237.

[9] SU Y, ZHANG TH, LI YL, *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.

[10] 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.

[11] CAO C, JIANG S, YING Z, *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: 1467-1475.

[12] 曲浩, 赵学勇, 赵哈林, 等. 科尔沁沙地 3 种灌木凋落物分解速率及其与关键气象因子的关系[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 844-849.

QU H, ZHAO X Y, ZHAO H L, *et al.* Litter decomposition rates of three shrub species in Horqin Sandy Land and their relationship with key meteorological factors [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(4): 844-849. (in Chinese)

[13] RASSE D P, RUMPEL C, DIGNACI M F. Is soil carbon mostly root carbon mechanisms for a specific stabilization [J]. Plant and Soil, 2005, 269:341-356.

[14] 王少昆, 赵学勇, 张铜会, 等. 造林对沙地土壤微生物的数量、生物量碳及酶活性的影响[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 529-535.

WANG S K, ZHAO X Y, ZHANG T H, *et al.* Effects of afforestation on the abundance, biomass carbon and enzymatic activities of soil microorganism in sandy dunes [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(2): 529-535. (in Chinese)

[15] 孙文艳, 廖超英, 李晓明, 等. 毛乌素沙地东南部人工林土壤生物学特性[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 28-33.

SUN W Y, LIAO C Y, LI X M, *et al.* Soil biological properties of different forest plantations on the southeast of the Mu Us Sandy Land [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(3): 28-33. (in Chinese)

[16] 李陆平, 廖超英, 李晓明, 等. 毛乌素沙地樟子松人工林对土壤微生物及酶活性的影响[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(3): 12-16.

LI L P, LIAO C Y, LI X M, *et al.* Effects on soil microorganism and enzyme activities of artificial *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Mu Us Sand Land [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(3): 12-16. (in Chinese)

[17] 白建军, 史清亮. 柠条与沙棘共生固氮菌资源特性对比分析[J]. 山西农业科学, 2008, 36(9): 49-52.

[18] 李玉强, 赵哈林, 李玉霖, 等. 科尔沁沙地不同生境土壤氮矿化/硝化作用研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 438-444.

LI Y Q, ZHAO H L, LI Y L, *et al.* Soil nitrogen mineralization and nitrification in different habitats, Horqin Sandy Land [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(3): 438-444. (in Chinese)

(上接第 14 页)

[26] 段爱国, 张建国, 何彩云, 等. 干旱胁迫下金沙江干热河谷主要造林树种盆植苗的蒸腾耗水特性[J]. 林业科学研究, 2008, 21(4): 436-445.

DUAN A G, ZHANG J G, HE C Y, *et al.* Studies on transpiration of seedlings of the main tree species under the condition of drought stress in the dry hot river valleys of the Jinsha River [J]. Forestry Research, 2008, 21(4): 436-445. (in Chinese)

[27] 邱权, 潘听, 何茜, 等. 华南地区 3 种苗木生长旺盛时期光合特性及蒸腾耗水日变化规律的比较[J]. 华南农业大学学报: 自然科学版, 2012, 33(4): 524-528.

QIU Q, PAN X, HE Q, *et al.* Comparison of daily variations in photosynthesis and water-consumption of seedlings in vigorous growth period of three tree species from South China [J]. Journal of South China Agricultural University: Natural Science Edition, 2012, 33(4): 524-528. (in Chinese)

[28] 郭卫华, 李波, 张新时, 王仁卿. 水分胁迫对沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)蒸腾作用影响的比较[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4132-4140.

GUO W H, LI B, ZHANG X S, *et al.* The impact of water stress on transpiration indices in *Hippophae rhamnoides* and *Caragana intermedia* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4132-4140. (in Chinese)

[29] 朱栗琼, 招礼军. 擎天树茎叶解剖结构及其环境适应性[J]. 中国农学通报, 2012, 28(1): 98-102

[30] TOORCHI M, SHASHIDHAR H E, HITTALMANI S, *et al.* Rice root morphology under contrasting moisture regimes and contribution of molecular marker heterozygosity [J]. Euphytica, 2002, 126(2): 251-257.

[31] 王秋菊, 李明贤, 赵宏亮, 等. 控水灌溉对水稻根系生长影响的试验研究[J]. 中国农学通报, 2008, 24(8): 206-208.

[32] 陈世苹, 白永飞, 韩兴国, 等. 沿土壤水分梯度黄囊苔草碳同位素组成及其适应策略的变化[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 515-522

CHEN S P, BAI Y F, HAN X G, *et al.* Variations in foliar carbon isotope composition and adaptive strategies of *Carex korshinskyi* along a soil moisture gradient [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(4): 515-522. (in Chinese)