

毛乌素沙地土壤理化性质对中国沙棘人工林生长的影响

曹子林^{1,2}, 肖智勇³, 高 辉², 代光辉¹, 李甜江⁴, 李根前^{2*}

(1. 北京林业大学, 北京 100083; 2. 西南林业大学, 云南 昆明 650224;
3. 江西省宜春市林业科学研究所, 江西 宜春 336000; 4. 云南省林业科学研究院, 云南 昆明 650204)

摘 要: 为了解土壤理化性质对中国沙棘生长及生产力的影响, 对毛乌素沙地丘间地和迎风坡中国沙棘人工林进行研究。差异性检验结果表明, 丘间地的土壤含水率、有机质、全 N、速效 N 及全 P 含量均极显著或显著高于迎风坡; 丘间地的树高、地径、冠幅以及地上生物量、林分生产力均极显著高于迎风坡。相关分析表明, 树高、地上生物量与土壤含水率、速效 N、全 P 含量呈极显著或显著正相关关系; 树高与有机质含量呈显著正相关关系。土壤含水率与有机质、速效 N、全 P 含量呈极显著正相关关系; 有机质与速效 N 呈极显著正相关关系, 速效 N 与全 P 呈显著正相关关系。逐步回归分析表明, 土壤含水率在生长量及地上生物量积累中起重要作用, 是决定林地质量和生产力的主导因子。通径分析表明, 土壤含水率对树高、地上生物量的直接作用最大, 起的间接作用较大。

关键词: 中国沙棘; 毛乌素沙地; 丘间地; 迎风坡; 土壤理化性质; 生长

中图分类号: S718.516 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2015)02-0022-05

Influences of Soil Physico-chemical Properties in Mu Us Sandland on the Growth of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* Plantation

CAO Zi-lin^{1,2}, XIAO Zhi-yong³, GAO Hui², DAI Guang-hui¹, LI Tian-jiang⁴, LI Gen-qian^{2*}

(1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China;
3. Yichun Research Institute of Forestry, Yichun, Jiangxi 336000, China;
4. Yunnan Academy of Forestry, Kunming, Yunnan 650204, China)

Abstract: In order to know the influence of soil physico-chemical properties on the growth and productivity of the plantations of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis*, the plantations located in interdunes and in the windward slope in Mu Us sandland were selected to carry out the study. Difference significance test showed that the soil moisture, organic matter, total nitrogen, available nitrogen, total phosphorus in interdunes were very significantly or significantly higher than those in windward slope. The height, base diameter, crown width, aboveground biomass and stand productivity in interdunes were very significantly higher than those in windward slope. Pearson correction analysis demonstrated that the height and aboveground biomass had a very significantly or significantly positive correction with soil moisture, available nitrogen and total phosphorus. The height had a significantly positive correction with soil organic matter. Soil moisture had a very significantly positive correction with soil organic matter, available nitrogen and total phosphorus. Soil organic matter had a very significantly positive correction with available nitrogen, and available nitrogen had a significantly positive correction with total phosphorus. Stepwise regression analysis indicated that soil moisture played an important role in the accumulation of growth increment and aboveground biomass. Soil moisture was a dominant factor which determine stand quality and produc-

收稿日期: 2014-07-15 修回日期: 2014-08-28
基金项目: 国家自然科学基金(31070551); 云南省省级重点建设学科“森林培育学基金”(XKZ200906)。
作者简介: 曹子林, 男, 副教授, 博士研究生, 研究方向: 生态学。E-mail: fjcaozilin@qq.com
* 通信作者: 李根前, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 森林培育与森林生态。E-mail: 15825290016@163.com

tivity. Path analysis suggested that soil moisture had the greatest direct effect on height and aboveground biomass, and had a greater indirect effect.

Key words: *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis*; Mu Us sandland ; interdune; windward slope; soil physicochemical property; growth

中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis*)是胡颓子科沙棘属的一种落叶灌木或乔木,生长迅速、根系发达,根瘤共生体固氮能力较强,是我国北方干旱、半干旱地区优良的多用途树种;果实、叶片富含多种生物活性物质与营养成分,广泛用于医药、食品、添加剂、化妆品等工业生产^[1-5]。中国沙棘还是典型的克隆植物,能通过强大的串根萌蘖能力形成“独木成林”之奇观,可从丘间地扩散到沙丘坡面甚至沙丘顶部、从沟谷扩散到沟坡,并能通过林隙更新、林缘扩散来维持种群的稳定性和克隆的持久性,在干旱、半干旱地区植被恢复与保持中具有特殊的意义^[6-10]。中国沙棘的自然分布沿青藏高原东部和东北部边缘,经黄土高原直达大兴安岭的西南角,正好在我国3大植被区的过渡地带,为森林-草原、森林-草甸过渡带的重要成分,其中毛乌素沙地是其现代分布中心之一^[11-12]。毛乌素沙地位于鄂尔多斯高原的中部,属于荒漠草原地带,水分短缺、蒸散强烈、养分贫瘠是该地区的基本环境特征^[13-14]。研究表明,土壤水分、养分状况是影响植物生长、繁殖、生态系统净生产力等的重要因素^[15-16]。为探讨水分、养分状况对中国沙棘生长、繁殖的影响,以往学者就不同灌水强度及施肥量对中国沙棘展开了研究^[17-20]。然而,关于自然状态下沙地土壤理化性质对中国沙棘生长和繁殖的研究尚属空白。本文试图以毛乌素沙地丘间地与迎风坡2种立地类型的土壤理化性质差异分析为基础,探讨其对中国沙棘人工林生长的影响规律及其因果关系,期望揭示土壤理

化性质驱动林分生长的机制。

1 研究区概况与研究方法

1.1 自然概况

研究区位于陕西省靖边县,位于108°17′—109°20′E、37°29′—38°01′N之间。属于中温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温7.8℃,极端高温35℃,极端低温-28.5℃,≥10℃积温2 904.9℃;年均降水量394.5 mm,且集中在7、8、9月,相对湿度54%,年蒸发量2 361.6 mm;年均日照时数2 768.8 h,年均无霜期130 d;总体气候特征是四季分明、光照充足、降水贫乏,干旱和大风危害严重。自然地貌属于黄土高原和鄂尔多斯高原的过渡地带,土壤以风沙土为主;耕性良好但保水保肥能力较差,普遍缺乏有机质。地带性植被为干草原,以旱生植物为主,主要草本及灌木种类有沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)、沙柳(*Salix psammophila*)、柠条(*Caragana intermedia*)等,主要乔木树种有旱柳(*Salix matsudana*)、小叶杨(*Populus simonii*)等^[21]。

1.2 研究方法

样地选设:在全面踏查的基础上,选择具有代表性和典型性的地段设置样地。在造林、营林措施一致的情况下,在迎风坡和丘间地8年生中国沙棘人工林中各设置3块样地,样地面积为10 m×10 m,株行距均为1.5 m×1.5 m,样地概况见表1。

表1 样地基本概况
Table 1 The basic situations of sample plots

样地编号	地点	年龄/a	起源	株行距/m	地形	土壤类型
J1	靖边国道边	8	人工林	1.5×1.5	迎风坡	风沙土
J2	靖边国道边	8	人工林	1.5×1.5	迎风坡	风沙土
J3	靖边国道边	8	人工林	1.5×1.5	迎风坡	风沙土
J4	靖边国道边	8	人工林	1.5×1.5	丘间地	风沙土
J5	靖边国道边	8	人工林	1.5×1.5	丘间地	风沙土
J6	靖边国道边	8	人工林	1.5×1.5	丘间地	风沙土

样地调查及生物量测定:生长量调查采用“每木检尺法”,即逐株测定中国沙棘母株和子株的树高、地径和冠幅。地上生物量以及生产力的测定采用标准株收获法,即根据样地内每木检尺的结果分别确定母株和子株平均标准木,并分别称量其树干、枝条及叶片的鲜重;并取一定数量的样品带回实验室,在

80℃的烘箱内烘干至恒重,据此以及种群密度推算种群地上生物量,地上生物量除以林分年龄即得年均生产力。

土壤采集及理化性质测定:在每个样地的对角线方向上,用铁锹近等距地挖出3个深度达50 cm的土壤剖面。在30 cm处采用“环刀法”采集原状土

样品,用于测定土壤容重、土粒密度和孔隙度;在 30~50 cm 处采用铝盒采集非原状土样品,并采用烘箱法测定土壤含水率;在 0~50 cm 土层内采集混合样品,3 处的土壤充分混合后取 1.0 kg 装入布袋,用于有机质、全 N、速效 N、速效 P、全 P、全 K 及 pH 值等测定,测定方法参照文献^[22]。

数据分析:应用 SPSS 软件,以差异显著性检验分析了丘间地与迎风坡林地土壤理化性质、中国沙棘林分生长的差异;用 pearson 相关分析评价了土壤理化性质与林分生长的关系;用逐步回归分析筛选出影响生长的主导因子;并用通径分析方法分析

土壤理化性质主要指标的直接作用及间接作用^[23]。

2 结果与分析

2.1 丘间地与迎风坡林地土壤理化性质

从表 2 可知,土壤的物理性质中,丘间地土壤的含水率极显著地高于迎风坡,土壤容重、土粒密度、总孔隙度在丘间地与迎风坡之间差异不显著。土壤的化学性质中,丘间地有机质、全 N、速效 N 含量极显著地高于迎风坡,全 P 含量显著高于迎风坡,pH 值、全 K、速效 P、速效 K 等其余指标在丘间地与迎风坡之间差异不显著。

表 2 丘间地与迎风坡的土壤理化性质

Table 2 Soil physicochemical properties between interdune and windward slope

立地类型	土壤含水率 /%	土壤容重 /(g·cm ⁻³)	土粒密度 /(g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	有机质 /(g·kg ⁻¹)	pH 值	全 N /%	全 P /%	全 K /%	速效 N /(mg·kg ⁻¹)	速效 P /(mg·kg ⁻¹)	速效 K /(mg·kg ⁻¹)
丘间地	3.65**	1.53	2.64	41.81	1.94**	8.57	0.019**	0.021*	1.60	8.37**	3.30	62.67
迎风坡	2.48	1.54	2.63	41.47	1.53	8.67	0.013	0.018	1.59	4.33	3.60	60.00

注:*表示在 5%水平上显著相关,**表示在 1%水平上极显著相关。表 3、表 4 同。

2.2 丘间地与迎风坡人工林生长状况

由表 3 可以看出,丘间地人工林的树高、地径、冠幅生长量、地上生物量和年均生产力均极显著高于迎风坡人工林。其中,丘间地人工林的地上生物

量、年均生产力是迎风坡人工林的 4 倍以上。由此表明,丘间地的环境条件对中国沙棘的适宜性更高,更有利于中国沙棘生长和生物量积累。换言之,丘间地的土壤植被承载力显著高于迎风坡。

表 3 丘间地与迎风坡人工林生长及生产力

Table 3 Plantation growth and productivity between interdune and windward slope

立地类型	树高 /cm	地径 /mm	冠幅 /cm	地上生物量 /(kg·hm ⁻²)	年均生产力 /(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)
丘间地	143.14**	31.81**	96.56**	18 070.71**	2 258.84**
迎风坡	104.87	17.34	81.22	4 468.62	558.58

2.3 人工林生长与土壤理化性质的关系

2.3.1 土壤理化性质中单因素对人工林生长的影响 由表 4 分析可得,树高生长量与土壤含水率呈极显著正相关、与有机质、速效 N、全 P 含量呈显著正相关,地上生物量与土壤含水率、速效 N 及全 P 含量呈极显著正相关,树高生长量与地上生物量呈显著正相关。由此表明,立地质量及林地生产力随

着土壤含水率以及有机质、速效 N、全 P 含量的提高而上升,因此丘间地的立地质量及林地生产力高于迎风坡。土壤含水率与土壤有机质、速效 N、全 P 含量呈极显著正相关关系,速效 N 含量与有机质呈极显著正相关关系、与全 P 含量呈显著正相关关系。由此表明,土壤含水率以及有机质、速效 N、全 P 含量之间具有协同效应。

表 4 毛乌素沙地土壤理化性质与生长状况的相关分析

Table 4 Correlation analysis between soil physicochemical properties and productivity in Mu Us sandland

指标	树高	地上生物量	土壤含水率	有机质	全 N	速效 N	全 P
树高	1.000						
地上生物量	0.856*	1.000					
土壤含水率	0.923**	0.942**	1.000				
有机质	0.871*	0.766	0.893**	1.000			
全 N	0.455	0.763	0.569	0.211	1.000		
速效 N	0.853*	0.910**	0.927**	0.939**	0.475	1.000	
全 P	0.800*	0.905**	0.922**	0.697	0.769	0.781*	1.000

2.3.2 土壤理化性质中影响人工林生长的主导因素 由表 5 可看出,通过逐步回归,只有土壤含水率进入方程,它可分别解释树高、地上生物量变异的 85.2%、88.7%(决定系数 R²)。由此表明,土壤含

水率是影响立地质量和林地生产力的限制性因子。在毛乌素沙地,土壤含水率是决定林地质量及其生产力的主导因子。

2.3.3 人工林生长与土壤理化性质主要指标的通

径分析 由表 6 分析可知,3 个主要指标对树高、地上生物量的直接影响中,土壤含水率的直接作用最大,全 P 次之,速效 N 最小。通过分析各个间接通径系数可得,速效 N 通过土壤含水率对树高、地上

生物量的间接作用最大,全 P 通过土壤含水率对树高、地上生物量的间接作用次之,土壤含水率通过全 P、速效 N 通过全 P、土壤含水率通过速效 N、全 P 通过速效 N 的间接作用依次降低,甚至出现负值。

表 5 毛乌素沙地土壤含水率与林地生产力的逐步回归分析

Table 5 Stepwise regression analysis between soil physicochemical properties and forest productivity in Mu Us sandland

因变量	方 程	自变量	<i>t</i>	ρ	<i>r</i>
树 高	$Y=49.108 X1+22.805$	$X1$ —土壤含水率	4.809	0.009	0.923
地上生物量	$Y=9622.88X1-18347.05$	$X1$ —土壤含水率	5.592	0.005	0.942

表 6 树高、地上生物量与土壤理化性质主要指标的通径分析

Table 6 Path analysis of height, aboveground biomass and main indexes of soil physi-chemical properties

土壤理化 性 质	直接通 径系数	间接通径系数			壤理化 性 质	直接通 径系数	间接通径系数		
		土壤含水率	速效 N	全 P			土壤含水率	速效 N	全 P
土壤含水率	0.768		0.005	0.059	土壤含水率	0.674		—0.004	0.384
速效 N	0.005	0.712		0.050	速效 N	—0.004	0.625		0.326
全 P	0.064	0.708	0.004		全 P	0.417	0.621	0.003	

3 结 论 与 讨 论

在毛乌素沙地,常年盛行西北风,风大沙多,由于积沙作用,使地形不断抬升形成沙丘^[13],其中迎风坡和丘间地在土壤理化性质方面差异较大。丘间地四周有沙丘遮挡,风速小、光照时间短,水分散失较少,在面积较大的丘间地甚至会形成季节性积水;而迎风坡风沙肆虐、光照强烈,水分散失相当严重。而且迎风坡坡面水土流失将把水分和养分带到丘间地,坡面趋于干化和贫瘠化,而丘间地土壤则更加湿润和肥沃。因此,丘间地的土壤含水率、土壤有机质、全 N、速效 N 含量以及全 P 极显著或显著高于迎风坡。

土壤理化性质是林木生存、生长和发挥生态功能的基础。同时,林木的生长发育、凋落物量及其分解速率等都会影响土壤的发育,改变土壤的理化和生物学性质^[24],反过来对林木生存、生长产生影响,并最终导致林分生产力改变。土壤水分、养分状况是影响植物生长、繁殖、生态系统净生产力等的重要因素^[15-16]。丘间地的土壤水分、养分均较高,有利于中国沙棘的生长。因此,其树高、地径、冠幅生长量、种群地上生物量和生产力均显著高于迎风坡。中国沙棘生长好,其固氮能力强,而且通过凋落物归还的养分多,所以,对土壤理化性质改善作用更强^[2,25]。这也是丘间地沙棘人工林的林下土壤有机质、全 N、速效 N 含量以及全 P 极显著或显著高于迎风坡的原因之一。经分析,树高生长量、地上生物量与土壤水分、速效氮含量呈极显著或显著正相关关系;树高与有机质含量、年均生产力与全磷含量呈显著正相关关系。

中国沙棘种群的生长、生物量累积均与土壤含水率呈极显著正相关关系。从逐步回归的结果看,土壤含水率的贡献量为各生态因子中最高,并且土壤含水率对于树高、地上生物量的决定系数在 85% 以上。从通径分析的结果看,在直接作用中,土壤含水率对树高、地上生物量的起决定性作用;间接作用中,速效 N、全 P 通过土壤含水率起的作用也较大。由此可见,土壤含水率是决定中国沙棘种群生长的主导因子,这与毛乌素沙地其他相关研究结论一致^[15,26]。在毛乌素沙地,沙棘人工林土壤含水率与土壤有机质、速效氮、全磷含量呈极显著正相关关系,速效氮含量与有机质、全磷含量呈极显著或显著正相关关系。这与丘间地和迎风坡 2 种立地特点有关,迎风坡水土流失较严重,土壤较干旱、瘠薄;而丘间地则汇集了坡面的水土流失,土壤较湿润、肥沃。在土壤理化性质中,土壤含水率是决定中国沙棘生长、存活及繁殖的主导因子^[15]。因此,土壤含水率不仅影响中国沙棘林地质量及其生长、生产力,而且通过其固氮作用及凋落物养分归还影响土壤有机质、速效氮及全磷含量。只有当林地土壤水分充足时,林分生长好,土壤才会有比较丰富的有机质、速效氮及全磷,立地质量得以改善,沙棘种群表现为树高生长量和林地生产力较高;当林地土壤水分不足时,林分生长差,土壤有机质、速效氮、全磷缺乏,立地质量下降,沙棘种群表现为树高生长量和林地生产力较低。因此,干旱缺水必将导致林地土壤肥力和林地生产力下降。

综上所述,毛乌素沙地丘间地与迎风坡通过地形特征对土壤水分、养分起再分配作用而对中国沙棘生长产生影响。丘间地土壤水分、养分含量较高,

中国沙棘生长好,固氮能力强,养分归还多,林地质量高,而这又促进其生长。因此,丘间地中国沙棘生长量和生产力高于迎风坡林地。土壤含水率是决定中国沙棘种群生长的主导因子,在实际生产中,应将中国沙棘种植在丘间地等土壤含水率较高的地段,以利于其生长和提高林分生产力。

参考文献:

[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第 52 卷) [M]. 北京:科学出版社,1983:64-65.

[2] 李根前,唐德瑞,赵一庆. 沙棘的生物学与生态学特性[J]. 西北植物学报,2000, 22(5):892-897.
LI G Q,TANG D R,ZHAO Y Q. The biological property and ecological habit of *Hippopha*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalalia,2000,20(5):892-897. (in Chinese)

[3] 丁小林,秦利平. 沙棘中的营养成分与生物活性物质研究进展[J]. 中国食物与营养,2008(9):57-59.

[4] 赵汉章. 沙棘在我国干旱半干旱地区生态农林业建设中的重要性[J]. 防护林科技,1995(4):18-21.

[5] 李根前,唐德瑞,赵一庆. 沙棘属植物资源与开发利用[J]. 沙棘,2000,13(2):22-26.

[6] 高志义,张玉胜. 沙棘根系特性的观察与研究[J]. 北京林业大学学报,1989,11(4):53-59.
GAO Z Y, ZHANG Y S. The observation and investigation on the feature of root system of sea buckthorn[J]. Journal of Beijing Forestry University,1989,11(4):53-59. (in Chinese)

[7] 李根前,黄宝龙,唐德瑞,等. 毛乌素沙地中国沙棘无性系种群林缘扩散规律[J]. 南京林业大学学报,2001,25(2):9-13.
LI G Q, HUANG B L, TANG D R, *et al.* The edge dispersal clone population regulation of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* in the Mu US Sandland[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2001,25(2):9-13. (in Chinese)

[8] 徐德兵,李根前,贺斌,等. 克隆植物中国沙棘种群稳定性维持途径的探讨[J]. 国际沙棘研究与开发,2006,4(4):44-48.
XU D B, LI G Q, HE B, *et al.* A discussion on the population stability maintenance in clonal plant of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* [J]. The Global Sea Buckthorn Research and Development,2006,4(4):44-48. (in Chinese)

[9] 贺斌,李根前,徐德兵,等. 沙棘克隆生长及其生态学意义[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(3):54-59.
HE B, LI G Q, XU D B, *et al.* The clonal growth and its ecological significance of *Hippophae*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(3):54-59. (in Chinese)

[10] 吕荣森. 沙棘在中国西部生态环境建设中的作用[J]. 沙棘, 2003,16(1):3-7.

[11] 胡建忠.“三北”地区沙棘属植物的区域化种植开发探讨. I 沙棘属植物的分布及种植开发的区域化要求[J]. 水土保持研究,2006,13(1):4-7.
HU J Z. Strategic thought on regionalization of plantation and development of *Hippophae* in Three North Areas of China[J]. Research of Soil and Water Conservation,2006,13(1):4-7. (in Chinese)

[12] 李孙玲,李甜江,李根前,等. 毛乌素沙地中国沙棘存活及生长

对灌水和密度的响应[J]. 西北林学院学报,2011,26(3):107-111.
LI S L, LI T J, LI G Q, *et al.* The growth and survival of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* in response to irrigation intensity and initial density in Mu Us Sand-land [J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,26(3):107-111. (in Chinese)

[13] 北京大学地理系. 毛乌素沙区自然条件及其改良利用[M]. 北京:科学出版社,1983:171-210.

[14] 何维明,张新时. 沙地柏对毛乌素沙地 3 种生境中养分资源的反应[J]. 林业科学,2002,38(5):1-6.

[15] 代光辉,李根前,李甜江,等. 水分条件对中国沙棘生长及种群稳定性的影响[J]. 西北林学院学报,2011,26(2):1-8.
DAI G H, LI G Q, LI T J, *et al.* Effects of water conditions on the growth and population stability of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,26(2):1-8. (in Chinese)

[16] LARCHER W. Physiological plant ecology (third edition) [M]. Berlin:Springer-Verlag,1996:25-46.

[17] 李甜江,李根前,徐德兵,等. 中国沙棘克隆生长对灌水强度的响应[J]. 生态学报,2010,30(24):6952-6960.
LI T J, LI G Q, XU D B, *et al.* The clonal growth of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* in response to irrigation intensity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (24): 6952-6960. (in Chinese)

[18] 贺斌,赵粉侠,李根前,等. 毛乌素沙地中国沙棘克隆生长对土壤水分含量的响应[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2012,36(4):46-50.
HE B, ZHAO F X, LI G Q, *et al.* The response of clonal growth of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* to the availability of soil moisture in Mu Us sandland[J]. Journal of Nanjing Forestry University:Nat. Sci. Edi. ,2012,36(4):46-50. (in Chinese)

[19] 贺斌,李根前,高海银,等. 不同土壤水分条件下中国沙棘克隆生长的对比研究[J]. 云南大学学报:自然科学版, 2007,29 (1):101-107.
HE B, LI G Q, GAO H Y, *et al.* A comparative study on the clonal growth of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* at different soil moisture condition[J]. Journal of Yunnan University:Nat. Sci. Edi. , 2007,29 (1):101-107. (in Chinese)

[20] 贺斌. 毛乌素沙地中国沙棘克隆生长对氮磷配施的响应[D]. 昆明:西南林学院, 2007:1-75.

[21] 吴秀峰. 陕西省榆林地区农业区划[Z]. 榆林:榆林地区农业计划委员会,1987:2-16.

[22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000:146-336.

[23] 杜家菊,陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报,2010,45(2):4-6.

[24] 孙嘉,王海燕,丁国栋,等. 不同密度华北落叶松人工林土壤理化性质研究[J]. 林业资源管理,2011(1):62-66.

[25] 贾天会,杨丽华. 沙棘(*Hippophae*)对土壤肥力的影响及其根瘤固氮活性分析[J]. 土壤通报,1996,27(6):268-269.

[26] 李根前,赵粉霞,李秀寨,等. 毛乌素沙地中国沙棘种群数量动态研究[J]. 林业科学,2004,40(1):180-184.