

植被恢复对高寒沙区土壤性质的影响

李少华¹, 王学全^{1*}, 高琪², 包岩峰¹, 尹书乐¹

(1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 2. 内蒙古农业大学生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: [目的]明确高寒沙区不同植被类型对土壤性质改良效果的差异,探讨各植被区沙地土壤恢复过程的异质性和人工林木的可开发利用潜力。[方法]以沙珠玉治沙试验林场内不同生长年限的人工植被为研究对象,分析高寒沙区6种植被类型区(乌柳、青杨、赖草、柠条、沙棘、柽柳)以及3个对照区(农田、流动沙丘、丘间沙地)土壤的机械组成、pH值、有机质及全N、全P、全K等理化性质指标。[结果](1)植被恢复生长51年后,从黏粒和粉砂粒增加的比例角度分析,土壤质地改良顺序为沙棘(206.3%)>柠条(108.5%)>青杨(70.5%)>乌柳(56.8%)>赖草(54.1%)>柽柳(42.3%);从全N、全P和全K增加的比例角度分析,土壤养分改良顺序为青杨(198.2%)>柠条(166.7%)>沙棘(155.3%)>乌柳(82.6%)>赖草(75.4%)>柽柳(53.9%),土壤全P含量偏低,平均 $0.42\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; (2)植被恢复生长51年后,柠条、沙棘、青杨、赖草、乌柳和柽柳林下0~30 cm土壤有机质含量依次为20.19、18.25、30.81、23.57、22.13和10.62 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,比流动沙丘或丘间沙地相应的提高了766.7%、702.4%、689.8%、517.4%、491.5%和343.9%。[结论]随着植被恢复年限的增加,土壤质地和养分状况得到显著改善,但土壤pH值的变异系数较小;各样地土层间有机质含量差距不断扩大,表聚性越来越明显,并且随深度增加各土层恢复效果存在滞后性。柠条和沙棘适宜在共和盆地推广种植,建议实施适当地抚育管理措施,以促进高寒沙区林场实现可持续经营发展。

关键词:高寒沙区;植被恢复;土壤改良;异质性;开发利用

中图分类号:S156

文献标识码:A

Influence of Soil Heterogeneity Based on Vegetation Recovery in Alpine Sandy Land

LI Shao-hua¹, WANG Xue-quan¹, GAO Qi², BAO Yan-feng¹, YIN Shu-le¹

(1. Institute of Desertification Studies Chinese Academy of Forestry, Beijing 100093, China;

2. College of Ecology and Environmental Science Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Objective] To determine the different effects of various vegetation types on soil improvement on alpine sandy land, and to discuss the heterogeneity of soil improvement and the potential of different artificial forest trees. [Method] Based on vegetation restoration of long term monitoring experiments at sandy field forest in Shazhuyu, a village of Alpine Sandy Land. 6 vegetation plots (*Salix cheilophila*, *Populus cathayana*, *Leymus secalinus*, *Caragana korshinskii*, *Hippophae rhamnoides*, *Tamarix chinensis*) and three control plots (farmland, flowing sand land, slacks dune) were selected to analyze the soil texture, pH value, soil organic matter and total N, total P and total K properties. [Result] (1) After 51 years of vegetation restoration, from the viewpoint of increased proportion of clay and silt, the soil texture improvement order was *Hippophae rhamnoides* (206.3%) > *Caragana korshinskii* (108.5%) > *Populus cathayana* (70.5%) > *Salix cheilophila* (56.8%) > *Leymus secalinus* (54.1%) > *Tamarisk*

收稿日期:2015-06-17

基金项目:国家“十二·五”科技支撑课题(2012BAD16B0105);林业公益性行业科研专项

作者简介:李少华(1992—),男,河南濮阳市人,在读硕士研究生,主要从事荒漠化防治方面研究. E-mail:2227401357@qq.com

* 通讯作者. E-mail:wxq@caf.ac.cn

chinensis (42.3%)。From the viewpoint of increased proportion of total N, total P and total K, the soil nutrient improvement order was *Populus cathayana* (198.2%) > *Caragana korshinskii* (166.7%) > *Hippophae rhamnoides* (155.3%) > *Salix cheilophila* (82.6%) > *Leymus secalinus* (75.4%) > *Tamarix chinensis* (53.9%)。The soil total P contents was low, the average was only $0.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。(2) After 51 years of vegetation restoration, the 0~30 cm soil organic matter contents of understory *Caragana korshinskii*, *Populus cathayana*, *Hippophae rhamnoides*, *Leymus secalinus*, *Salix cheilophila*, *Tamarix chinensis* were 20.19, 18.25, 30.81, 23.57, 22.13 and $10.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, which increased order by 766.7%, 702.4%, 689.8%, 517.4%, 491.5% and 343.9% compared with the mobile sand dunes or interdune sandy corresponding. [Conclusion] With the increase of vegetation restoration time, the soil texture had been greatly improved, the soil nutrients content increased significantly, but the variability of surface soil pH was very little. With the increase of the recovery time, the difference in organic matter content of each soil layers difference was increasing, the accumulation of organic substance was becoming more and more obvious, and there was a time lag in the soil improvement effect with depth increasing. *Caragana korshinskii* and *Hippophae rhamnoides* was more suitable on planting in Alpine Sandy Land, and could take appropriately forestry management measures to achieve sustainable development in this area.

Keywords: alpine sandy land; vegetation restoration; soil improvement; heterogeneity; exploitation

共和盆地位于我国青藏高原东北部,三江源自然保护区的腹地,属于高寒干旱草原与荒漠的过渡区域,这里生态环境脆弱,土地贫瘠,土壤风蚀退化严重,流沙经常阻断公路交通,极大限制了当地公民生产生活水平的提高和社会经济的可持续发展^[1]。因此,逆转沙化进程,恢复沙区植被,改良退化土壤,成为该区生态环境建设的重点内容^[2]。盆地内的沙珠玉地区,建有国家林业局青海共和荒漠生态系统定位监测研究站,站内的试验区林场已筛选出多种耐寒抗旱植物,在高寒沙地治理和生态系统修复的研究中具有较好的示范推广性。高寒沙区植被生长发育过程中,地表群落结构逐渐演替变化,改善了局部的生态环境,影响了沙地土壤演替的方向和速度^[3]。因此,研究高寒沙区不同人工植被恢复过程中土壤的异质性,对准确评估该区域植被恢复的生态效应具有重要的理论价值与实践意义。

目前,关于植物固沙过程中土壤变化的研究主要集中在腾格里沙漠^[4]、科尔沁沙地^[5-6]及荒漠草原^[7]等地区,在高寒沙区开展的工作较少,并且缺少系统性研究。齐雁冰等^[8]和刘君梅等^[9]分别在高寒沙区对人工植被恢复过程中土壤理化性状进行研究,但均没有考虑不同植被类型的差异性;于洋等^[10]以不同生长年限的人工乌柳林为研究对象,研究了高寒沙地植被恢复对土壤的改良作用,但没有与其它人工植被区土壤对比,全面分析沙地土壤改良过程中的异质性;李清雪等^[11-12]研究了高寒沙区不同林龄柠条和乌柳人工林对土壤养分含量以及植

物群落的影响,但没有取沙地土样作为对照;田丽慧等^[13]从土壤质地的角度分析了高寒沙区柠条和乌柳2种植物恢复与土壤的相互作用,但没考虑到土壤养分状况。鉴于此,本文采用恢复生态学中常用的研究方法,认为不同植被类型区原始土壤特性一样^[14],并且以沙地和农田土壤为对照;通过野外采样和室内分析,测定了恢复51、30、12 a的6种植物类型区土壤的pH值、机械组成、有机质及全N、全P、全K含量,分析了不同植被对沙地土壤的改良效果,研究了基于植被恢复情景下的高寒沙区土壤异质性、流沙固定和土壤恢复的生态效应,初步探讨了沙地土壤演变过程和林木的可开发利用潜力,以期能为采取合理地人工林抚育管理措施提供数据支持,最终实现高寒沙区林场的可持续经营发展。

1 研究区概况

国家林业局共和荒漠生态定位观测站的沙珠玉治沙试验林场始建于1958年,通过围封 858 hm^2 沙地作为治沙示范区,主要进行抗逆植物选种及沙区植被重建等方面的研究^[2]。本次采样点位于 $36^{\circ}14' \sim 36^{\circ}16' \text{ N}$, $100^{\circ}13' \sim 100^{\circ}16' \text{ E}$,海拔2 879~2 891 m,微地貌主要有沙丘、丘间地和古河床。该区年均气温 2.4° C ,无霜期平均91 d,年均降水量246.3 mm,主要集中在7、8月;风沙活动剧烈,沙尘暴频繁,主要集中在每年的3、4月,风沙活动已成为制约该地植被恢复的限制因子之一^[15]。经过近60年的造林试验,人工植物逐渐恢复,林场内植被以耐寒和

抗旱生植物为主^[13],主要有柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、乌柳(*Salix cheilophila* Schneid.)、青杨(*Populus cathayana* Rehd.)、沙柳(*Salix psammophila* C. Wang et Ch. Y. Yang)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.)、白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)和赖草(*Leymus secalinus* Tzvel.)。

2 研究方法

2.1 样地布设与调查

野外试验设在不同种植年限和种类的植被区,以丘间地和沙丘的沙土及农田土为对照,共设置21块样地,面积为5 m×5 m。样地中各种植物的生长状况见表1。于2015年4月进行土壤调查,取样深度为0~5、5~15、15~30 cm三层,共采集63份土样。取样方法为:在各样地距中心4个方位2 m处取土壤样品,并按层混为1个样品,充分混合均匀取约1 kg用作实验室分析,各取3组重复用于统计分析,使用GPS定位样地海拔和经纬度。

2.2 试验分析与方法

室内试验在国家林业局森林生态环境重点实验室完成,土壤机械组成采用比重计法测定^[16],径级按国际制土壤径级分类标准划分,即砂粒(2.0~0.02 mm)、粉砂粒(0.02~0.002 mm)和黏粒(0~0.002 mm)。土壤酸碱性采用pH酸度计法测定;有机质采用重铬酸钾-外加加热法测定;全N采用凯氏定氮法测定;全P、全K采用ICP等离子发射光谱仪测定^[17]。

2.3 数据处理与作图

采用Microsoft Excel 2007进行数据处理和图表绘制,采用SPSS19.0统计软件中的单因素方差分析(One-Way ANOVA)程序进行统计分析,最小显著差数法进行多因子比较。

3 结果与分析

3.1 不同植被类型区0~5 cm土壤质地及pH变化特征

从表1可以看出:土壤质地与植被恢复之间具有明显的关联性,各微地貌间差异显著。与流动沙地和丘间沙地0~5 cm土层相比,经过几十年的植被恢复,各样地土壤机械组成变化显著,虽然土壤径级组成仍以砂粒为主,但是黏粒和粉砂粒含量已显著增加,砂粒含量显著减少($P < 0.05$),并且在相同种植年限的各样地间砂粒含量差异极显著($P < 0.01$),说明各植物对土壤质地恢复的影响显著;以丘

间沙地或流动沙丘土壤为参照基准,从黏粒和粉砂粒增加的比例角度分析,各样地林下土壤质地改良效果为沙棘(206.3%)>柠条(108.5%)>青杨(70.5%)>乌柳(56.8%)>赖草(54.1%)>怪柳(42.3%)。51年生的青杨、乌柳和沙棘林下表层土壤质地已恢复至农田土壤水平,说明合理的人为干扰活动可以促进表层土壤质地改良,加速沙成壤的恢复进程。

本次调查的各样点土壤pH值为8.35~8.83,平均值高达8.52,表明该地区土壤碱性较强;同一植被恢复区土壤pH值随着种植年限的增加呈降低的趋势,但不同植被类型区土壤pH值的变异系数较小,可能与沙地本身有较高的pH值有关,进而说明在植被恢复过程中对土壤的酸碱性影响不太明显。本次采集土样的pH值均低于沙丘沙地,青杨林区pH值最低,可能因该样地为阔叶落叶林,产生的枯落物多,植物根系较深,形成较多的有机酸,最终导致pH值相对较低。

3.2 不同植被类型区0~5 cm土壤养分含量变化特征

从图1可以看出:在植被恢复过程中,大幅提高了土壤中全N、全P、全K的含量,土壤肥力得到恢复,不同植物对土壤养分含量的影响差异显著;除怪柳和赖草区外,30年生林地0~5 cm土层均已恢复至良好水平;51年生青杨和柠条林下表层土壤养分已恢复至农田水平;从全N、全P及全K养分含量总和增加的比例角度分析,土壤养分改良效果为:青杨(198.2%)>柠条(166.7%)>沙棘(155.3%)>乌柳(82.6%)>赖草(75.4%)>怪柳(53.9%)。

与丘间沙地或流动沙丘土壤相比,随着种植年限的增加,51年生的各植被类型区土壤全N、全P、全K含量在0~5 cm土层显著增加,平均增加约12、2.5倍,其中,柠条全N含量增加约23倍,增加幅度最大。各样地土壤全N含量均显著增加,与农田土壤相比,除了赖草区,其余植被区土壤全N含量均已恢复至农田水平。土壤全P含量均偏低,整体上变化不大,所有土样均值仅为 $0.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,并且增加缓慢,随植被种类的变化不显著,说明植被恢复对土壤全P养分改善作用不显著,与农田土壤相比,仅乌柳区土壤全P恢复至农田水平。土壤全K含量普遍较高,可能与共和盆地西北部的查卡盐湖有关,间接说明该区域土壤中全K含量的增加在改善土壤肥力中没有氮和磷重要,与农田土壤相比,除怪柳和赖草区,其余植被区土壤全K含量均恢复至良好水平。

表1 不同植被样地表层(0~5 cm)土壤机械组成和pH值

植被类型	种植时间(年)	平均冠幅/(m×m) (或盖度/%)	不同粒径组成/%			土样 pH 值
			黏粒 0~0.002 mm	粉砂粒 0.002~0.02 mm	砂粒 0.02~2 mm	
农田 土壤			22.10 ± 1.58A	26.73 ± 2.11A	51.17 ± 2.02E	8.51 ± 0.02A
乌柳 丘间地	1964	2.54 × 2.36Ca	20.45 ± 1.12Aa	25.94 ± 2.13Aa	53.61 ± 1.57Dc	8.38 ± 0.01Aa
	1985	1.92 × 1.67Cb	14.44 ± 0.79Bb	17.91 ± 0.93Ab	67.65 ± 1.23Cb	8.45 ± 0.01Aa
	2003	0.83 × 0.68Bc	12.38 ± 1.23Ab	15.42 ± 1.17Ab	72.20 ± 3.25Da	8.53 ± 0.02Aa
青杨 丘间地	1964	5.48 × 4.29Aa	23.36 ± 1.77Aa	18.56 ± 1.42Ca	58.08 ± 1.58Cc	8.35 ± 0.01Aa
	1985	4.75 × 3.67Ab	16.67 ± 1.40Ab	16.09 ± 1.12Ab	67.24 ± 2.88Cb	8.42 ± 0.03Aa
	2003	3.56 × 3.10Ac	11.78 ± 0.58Ac	12.81 ± 1.71Ac	75.41 ± 2.34Da	8.47 ± 0.01Aa
赖草 丘间地	1964	(78.3 ± 3.4a)	19.61 ± 1.51Aa	20.03 ± 0.99Ca	60.36 ± 2.71Cc	8.46 ± 0.02Aa
	1985	(64.5 ± 6.2b)	14.79 ± 0.54Bb	13.02 ± 1.24Bb	72.19 ± 1.41Bb	8.49 ± 0.01Aa
	2003	(40.1 ± 2.8c)	10.82 ± 1.11Bc	11.95 ± 0.74Bc	77.23 ± 3.30Ca	8.58 ± 0.02Aa
柠条 沙丘	1964	3.40 × 3.16Ba	15.55 ± 1.67Ba	17.38 ± 0.87Ca	67.07 ± 2.11Bc	8.47 ± 0.03Aa
	1985	2.86 × 2.58Bb	9.73 ± 0.37Cb	15.20 ± 1.07Ab	75.07 ± 1.32Bb	8.55 ± 0.01Aa
	2003	1.05 × 0.93Bc	6.86 ± 0.25Dc	8.93 ± 0.61Cc	84.21 ± 3.09Ba	8.61 ± 0.04Aa
沙棘 沙丘	1964	3.34 × 3.05Ba	20.71 ± 1.19Aa	21.96 ± 1.76Ba	57.33 ± 1.65Cc	8.49 ± 0.02Aa
	1985	2.79 × 2.40Bb	13.75 ± 1.01Bb	8.16 ± 0.49Cb	78.09 ± 1.23Bb	8.54 ± 0.01Aa
	2003	0.92 × 0.85Bc	7.64 ± 0.51Cc	6.29 ± 0.62Cb	86.07 ± 3.02Ba	8.60 ± 0.02Aa
怪柳 沙丘	1964	2.35 × 2.18Ca	8.33 ± 0.67Ca	12.59 ± 0.22Da	79.08 ± 1.88Ab	8.52 ± 0.02Aa
	1985	1.71 × 1.39Db	3.56 ± 0.29Db	5.87 ± 0.37Db	90.57 ± 4.02Aa	8.57 ± 0.01Aa
	2003	0.63 × 0.52Cc	2.95 ± 0.14Db	3.27 ± 0.31Db	93.78 ± 2.93Aa	8.64 ± 0.02Aa
丘间地 沙地			3.02 ± 0.34D	3.51 ± 0.72D	93.47 ± 3.27A	8.63 ± 0.03Aa
沙丘 沙地			1.91 ± 0.23E	2.27 ± 0.71E	95.82 ± 3.12A	8.81 ± 0.05A

注:同列不同大写字母表示同一种植年份不同取样地间差异显著,同列不同小写字母表示同一取样地不同种植年份间差异显著($P < 0.05$)。

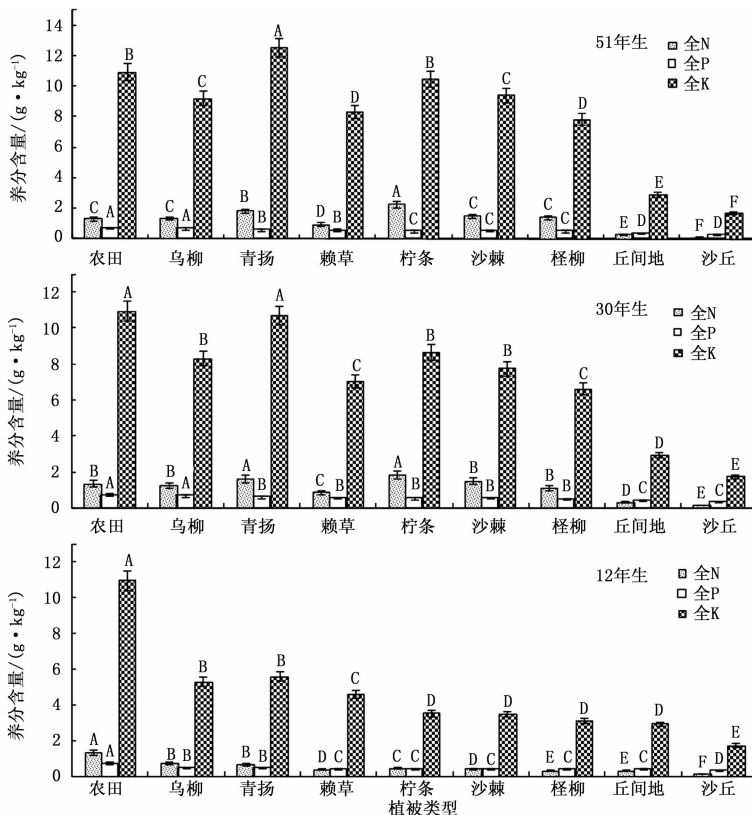


图1 不同植被样地表层土壤养分(全N、全P、全K)含量的变化特征
(不同大写字母表示不同样地同一养分元素之间差异显著($P < 0.05$))

3.3 不同植被类型区 0~30 cm 土壤有机质含量的变化特征

图2显示:植被类型和土层深度对土壤有机质含量的影响显著($P < 0.05$),随着恢复时间的增加,不同植被样地各土层间有机质含量差距不断扩大,并且表聚性越来越明显。除了流动沙地和丘间沙地外,其余均在 0~5 cm 土层有机质含量达到峰值,其中,青杨、乌柳和柠条林下 0~30 cm 土层有机质含量平均值依次为 30.81、22.13 和 20.19 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,

分别是农田土壤的1.6、1.2和1.1倍。与流动沙地和丘间沙地相比,51年生各样地 0~5 cm 土层有机质含量平均增加约 11 倍;5~15 cm 土层有机质含量平均增加约 4.5 倍;15~30 cm 土层有机质增加约 2.5 倍;51年生柠条、沙棘、青杨、赖草、乌柳和柽柳区 0~30 cm 土壤有机质含量依次为 20.19、18.25、30.81、23.57、22.13 和 10.62 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,比流动沙丘或丘间沙地相应的提高766.7%、702.4%、689.8%、517.4%、491.5%和343.9%。

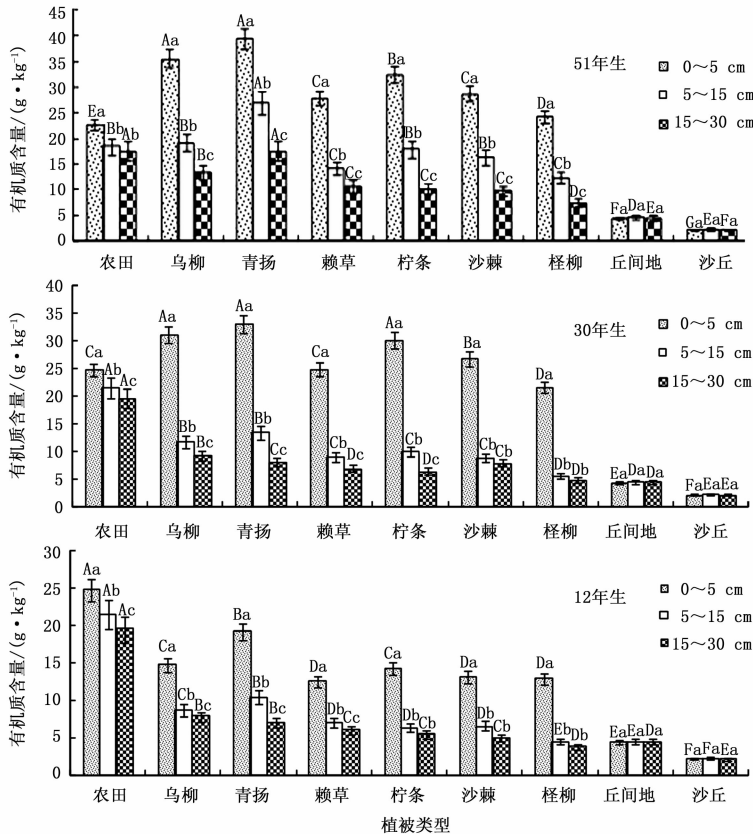


图2 不同植被样地土壤有机质的变化特征(不同大写字母表示不同样地同一土层之间差异显著,不同小写字母表示同样地不同土层之间差异显著($P < 0.05$))

3.4 植被恢复过程中土壤 pH 值、有机质、全 N、全 P、全 K 之间的相关性

对高寒沙区林场内 9 种样地 0~5 cm 土壤的化学性质进行相关性分析,结果(表 2)表明:土壤 pH 值与土壤有机质、全 N、全 P 含量呈负相关关系,但差异不显著;经回归分析,除全 P 含量与林龄不相关外,其他各指标均与林龄显著正相关。在植被恢复过程中,土壤有机质与全 N 含量的相关系数大于 0.95,极显著正相关;土壤有机质与全 P、全 K 含量显著正相关,但相关系数较小,分别为 0.526 和

0.498;其余指标间相关性不显著。

表 2 不同植被土壤化学性质的相关系数

项目	pH 值	有机质	全 N	全 P	全 K
pH 值	1				
有机质	-0.102	1			
全 N	-0.173	0.963 **	1		
全 P	-0.178	0.526 *	-0.029	1	
全 K	-0.277	0.498 *	-0.018	0.181	1

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平极显著相关。

4 讨论

4.1 高寒沙地植被恢复区土壤异质性的变化规律

高寒沙区植被恢复可以显著改良土壤理化性质,加速沙成壤的进程,并且不同植被类型对沙地土壤改良效果存在差异,进而导致各人工林地土壤间异质性的普遍存在。随着植被盖度的提高,近地表风速下降,风积物质开始沉降在土壤表层,黏粒和粉砂粒含量增多,砂粒含量减少,进而改变土壤理化性质的变化方向^[8,18]。本次研究结果显示,柠条、青杨和沙棘改良土壤的效果优于乌柳、柽柳和赖草;可能因为柠条灌丛堆效应明显,使沙尘中的微小颗粒易于沉积,并且根部的根瘤菌具有固氮作用,可以提高土壤有机质含量,导致沙地土壤恢复较快^[6];青杨为阔叶落叶树种,形成的枯落物较多,凋落物作为土壤的外源有机物质,进入土壤后可以显著改良土壤理化性质,并且形成林下草本植物群落,复合林草结构可以显著改良土壤^[19];沙棘为该地的乡土树种,适应性较强,生长旺盛^[20]。土壤 pH 值的变化可以显著影响植被对土壤中 N、P、K 的吸收利用^[21],不同深度和植被类型区的土壤 pH 值不同,随林龄的增加呈现逐渐减小的趋势,但差异不显著,且变异系数相对较小,表明植被恢复过程对土壤的酸碱性影响相对较小。

土壤有机质、全 N、全 P 和全 K 是衡量土壤肥力及生产力水平的重要指标^[22],恢复年限、土层深度和微地貌特征(沙丘、丘间地、古河床)对土壤性质改良效果差异显著,植被生长 30 年后,对土壤养分的改良效果在垂直深度上存在滞后性,植物根系对土壤恢复的影响不显著。以沙地土壤为对照,0~5 cm 土层的养分指标在各植被土样间均存在显著差异,5~30 cm 土层壤养分改良较慢。以农田土壤为对照,0~5 cm 层土壤恢复至良好水平需要近 30 年的时间,5~30 cm 层土壤的改良过程更加漫长;各植被类型土壤中全 P 含量均处于缺乏水平,在以后的林业经营活动中,可以适当追加磷肥,以促进植被恢复生长。

4.2 高寒沙地人工林可开发利用的潜力探析

在我国典型高寒沙区—沙珠玉治沙试验林场,经过 51 年人工种植恢复后的青杨、沙棘和柠条长势良好,0~5 cm 层土壤理化性质状况已恢复至农田水平,因此在不破坏土壤结构的前提下,可以对植物的地上部分进行适当开发利用,使其在起到防风固

沙作用的同时带来部分经济收益。青杨为乔木树种,在水源充足的地方才可以造林,导致其在寒区和旱区的推广区域受到极大限制。沙棘生长在高寒沙区,具有极丰富的营养价值^[20],可以结合地域特色和区域资源优势,进行适当的开发利用,如饮料、保健品等。柠条萌蘖力很强,平茬可以促进生长且饲用价值较高^[23],该区域植物生长季为 5 月初至 9 月底,大风日数集中在 3、4 月份,可以选在 4 月底对柠条林进行间隔平茬,以保证生态作用和饲用开发双赢。将枝条加工成饲料饲喂牲畜,缓解当地草场的压力,发展沙区畜牧业,形成当地冬春季饲料储备库。最重要的是,通过开发利用柠条和沙棘林,因地制宜地发展了沙产业,优化林场资源配置,促进高寒沙区林场实现可持续经营发展。

5 结论

(1) 植被恢复年限、土层深度变化和微地貌类型(沙丘、丘间地、古河床)对土壤性质影响显著,各植物对土壤质地和养分的改良效果不同,进而导致土壤异质性。

(2) 各植被类型随着恢复时间的增加,不同深度土壤有机质含量的差距不断扩大,表聚性越来越明显,并且随着土层深度的增加恢复效果存在滞后性。

(3) 柠条和沙棘林适宜在高寒沙区大面积推广种植,建议实施适当抚育管理措施,以实现在生态、经济和社会等方面均取得较好的效益。

参考文献:

- [1] 董光荣,高尚玉,金炯,等. 青海共和盆地土地沙漠化与防治途径[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [2] 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.
- [3] 杨洪晓,卢琦,吴波,等. 青海共和盆地沙化土地生态修复效果的研究[J]. 中国水土保持科学,2006,4(2):7-12.
- [4] Gao Y, Liu L, Jia R, et al. Evapotranspiration over artificially planted shrub communities in the shifting sand dune area of the Tengger Desert, north central China[J]. *Ecohydrology*, 2016, 9(2): 290-299.
- [5] 蒋德明,曹成有,李雪华,等. 科尔沁沙地植被恢复及其对土壤的改良效应[J]. 生态环境,2008,17(3):1135-1139.
- [6] Musa A, Deming J, Cunyang N. The applicable density of sand-fixing shrub plantation in Horqin Sand Land of Northeastern China[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 64:250-254.
- [7] 李文斌,李新平. 陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征[J]. 生态学报,2012,32(22):6991-6999.

- [8] 齐雁冰, 常庆瑞. 高寒地区人工植被恢复对风沙土区土壤效应影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 40-43.
- [9] 刘君梅, 王学全, 刘丽颖, 等. 高寒沙区植被恢复过程中表层土壤因子的变化规律[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(8): 47-49.
- [10] 于洋, 贾志清, 朱雅娟, 等. 高寒沙地植被恢复区乌柳人工防护林对土壤的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(11): 9-15.
- [11] 李清雪. 共和盆地沙漠化土地典型人工植被的土壤改良效应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [12] 李清雪, 朱雅娟, 贾志清, 等. 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[J]. 林业科学研究, 2014, 27(5): 677-682.
- [13] 田丽慧, 张登山, 彭继平, 等. 高寒沙地人工植被恢复区地表沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 32-39.
- [14] Burke I C, Lauenroth W K, Riggle R, *et al.* Spatial variability of 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.
- [15] Jia Z, Zhu Y, Liu L. Different water use strategies of juvenile and adult *Caragana* intermediate plantations in the Gonghe Basin, Tibet Plateau[J]. *Plos one*, 2012, 7(9): e45902-e45908.
- [16] 陈丽琼. 比重计法测定土壤颗粒组成的研究[J]. 环境科学导刊, 2010, 29(4): 97-99.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析第三版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [18] 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.
- [19] Miyasaka T, Okuro T, Miyamori E, *et al.* Effects of different restoration measures and sand dune topography on short and long term vegetation restoration in northeast China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2014, 111: 1-6.
- [20] 徐永昶. 祁连山区西藏沙棘和肋果沙棘果实调查分析[J]. 国际沙棘研究与开发, 2012, 9(4): 7-10.
- [21] Zuo X, Zhao X, Zhao H, *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(1-2): 153-167.
- [22] Liu R, Zhu F, Steinberger Y. Effectiveness of afforested shrub plantation on ground-active arthropod communities and trophic structure in desertified regions[J]. *Catena*, 2015, 125: 1-9.
- [23] Sun F, Xing Z. Research on Advantage and New use of korshinsk Peashrub Resources [J]. *Agricultural science & Technology*, 2014, 15(4): 709-712.

(责任编辑:詹春梅)