

DOI: 10.5846/stxb201603080412

路嘉丽, 沈光, 王琮, 裴忠雪, 任蔓莉, 魏晨辉, 王文杰. 落叶松、水曲柳、樟子松和农田 17 种土壤指标差异及其综合比较研究. 生态学报, 2017, 37(10): - .

Lu J L, Shen G, Wang Q, Pei Z X, Ren M L, Wei C H, Wang W J. Larch, ash, Scots pine, and farmland-induced differences on 17 soil parameters and their comprehensive analyses. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): - .

落叶松、水曲柳、樟子松和农田 17 种土壤指标差异及其综合比较研究

路嘉丽¹, 沈光^{1,2}, 王琮¹, 裴忠雪¹, 任蔓莉¹, 魏晨辉¹, 王文杰^{1,*}

1 东北林业大学森林植物生态教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

2 黑龙江省科学院自然与生态研究所, 哈尔滨 150040

摘要: 东北地区以大森林和大农业为主要特色, 主要造林树种落叶松、水曲柳、樟子松及农田对土壤肥力、物理指标、盐碱度、碳截获等的影响差异是本文研究目的。本文选择秀水林场和帽儿山林场的 4 种植被类型进行 0—60cm 分层土壤采样, 对根系密度、土壤 pH、电导率、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、土壤真菌代谢产物(球囊霉素相关蛋白易提取球囊霉素 EEG、总提取球囊霉素 TG)、容重、比重、孔隙度、比表面积、SOC、有机碳矿化速率等 17 个指标进行研究。主要结论如下: 植被类型间的差异在不同土层之间表现一致的指标所占比例很大, 其中秀水林场 13 个指标, 帽儿山林场全部 17 个指标。尽管不同地点间土壤差异较大, 但也存在树种差异一致性。土壤物理性质(容重、比重、孔隙度、比表面积)维持方面, 两个林场均显示水曲柳综合得分最高, 说明其具有更好的土壤物理性质维持能力, 且多通过土壤容重下降来实现。土壤固碳能力得分最高的也是水曲柳, 并且两个研究地点结果类似, 主要与其高根系密度有关。综合土壤肥力维持能力(N、P、K 及其有效态及真菌代谢产物球囊霉素相关蛋白), 不同地点间植被类型差异排序不同。降低土壤盐碱能力(pH 和电导率)方面, 樟子松得分最高, 尽管不同地点不尽一致。不同植被类型对土壤影响尽管不同地点、不同土壤深度多不相同, 但总体上存在规律性, 特别是土壤物理性质维持和土壤固碳能力方面。进行造林绿化时应该根据造林目的进行树种选择, 提升土壤物理性质应该考虑种植更能够维持良好土壤物理性质的树种(如水曲柳、樟子松等), 而提升土壤碳截获则要考虑根系密度大的树种(如水曲柳)。相关研究结果对国家重大生态工程(三北防护林、退耕还林)工程生态功能评价以及后续管理、树种选择具有支撑作用。

关键词: 植被类型间差异; 土壤物理性质; 土壤肥力; 盐碱度; 碳截获

Larch, ash, Scots pine, and farmland-induced differences on 17 soil parameters and their comprehensive analyses

LU Jiali¹, SHEN Guang^{1,2}, WANG Qiong¹, PEI Zhongxue¹, REN Manli¹, WEI Chenhui¹, WANG Wenjie^{1,*}

1 Key Laboratory of Forest Plant Ecology Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, China

Abstract: The main characteristics of Northeast China are large forests and agriculture. The effect of the primary afforestation species (larch: *Larix gmelinii*, ash: *Fraxinus mandschurica*, Scots pine: *Pinus sylvestris* var. *mongolica*) and farmland on soil fertility, physical properties, salinity, and carbon sequestration were analyzed. In the present study, four vegetation types were selected from Xiushui Forest and Maoershan Forest Farms, and samples from 0 - 60 cm soils were collected for measuring 17 parameters, including root density, soil pH, electrical conductance (EC), alkali-hydrolyzed

基金项目: 黑龙江省杰出青年基金(JC201401); 中央高校创新团队与重大项目培育资金项目(2572014EA01); 国家自然科学基金(41373075)

收稿日期: 2016-03-08; **网络出版日期:** 2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wjwang225@163.com

nitrogen (AN), total nitrogen (TN), available phosphorus (AP), total phosphorus (TP), available potassium (AK), total potassium (TK), glomalin related soil protein (GRSP) (including easily extracted GRSP (EEG) and total GRSP (TG)), soil bulk density, soil specific gravity, soil porosity, soil specific surface area, soil organic carbon (SOC), and organic carbon mineralization rate. The main conclusions were as follows: inter-species differences between most of the measured indicators were consistent in different soil layers, including 13 indicators in the Xiushui Forest Farm and all 17 indicators in the Maoershan Forest Farm samples. Although there were considerable differences in soil between different locations, the inter-species differences were consistent. Through comprehensive analyses, standardized comprehensive scores of two forest farm-related indicators showed that ash had the highest scores regarding its ability to maintain the physical properties of soil. Therefore, ash had the greatest ability of all the trees and farmland to maintain the physical properties of soil, and depended primarily on decreased soil bulk density. Ash also showed the highest scores for soil carbon sequestration, with similar results at both locations, mainly related to its higher root density. The comprehensive soil fertility (N, P, K, and its effective state, and fungal metabolic product GRSP) indicated inter-species differences between the different locations. Scots pine had the highest scores for reducing the soil salinity (pH and EC). The effects of different vegetation types on the soil were not the same in different locations and soil depths, but there was a general regularity, especially regarding the soil physical properties and carbon sequestration. Therefore, the selection of tree species for afforestation should be planned depending on the particular purpose of afforestation. To improve the physical properties of soil, plant species with the ability to maintain the physical properties effectively (e.g., ash, Scots pine) should be considered; and to enhance soil carbon sequestration, plant species with large root densities (e.g., ash) should be considered. The findings in this paper will enhance the evaluation of the national ecological projects of the Three-North Shelterbelt Project and Returning Farmland to Forest Project, and forest management including tree species selections.

Key Words: differences among vegetation types; soil physical properties; soil fertilities; soil salinity; carbon sequestration

东北地区植被以大森林和大农业为特色,其中作为我国重要国有林区之一,造林树种很多,其中落叶松 (*Larix gmelinii*)、水曲柳 (*Fraxinus mandschurica*)、樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 是主要造林树种,它们不仅在造林效益方面占据重要地位,而且对于生态系统的结构和功能起到重要作用^[1,2]。落叶松作为速生造林树种,对于碳汇林的营造具有重要意义,近年来已有不少学者涉足这方面的研究^[3];水曲柳在生态系统中具有重要意义,人们对水曲柳做了大量研究并且发现水曲柳幼苗对 N (形态和浓度) 非常敏感^[4];樟子松适应性较强,生长迅速,是营造防风固沙林、农田防护林、水土保持林的主要树种,多年来在樟子松的研究中取得了不少的成果^[5]。国家重大生态工程——三北防护林工程和退耕还林工程的生态效益均涉及林地与农田土壤差异,而提升效益则多涉及树种间差异分析。不同类型人工林林分对林下土壤肥力的影响及作用机理一直是森林土壤学研究的重点领域之一^[6,7],但是很少有文章综合分析不同类型人工林和农田对肥力指标、物理指标、盐碱度、碳截获等多指标系统的综合影响,特别是不同树种或植被类型间的差异在不同深度土壤、不同地点间是否存在一致性的表现^[8-10]。如果存在一致性的差异,说明树种的差异具有普遍性,可以成为树种选择的一个依据;反之,如果不一致,则说明地点或者土壤本身在土壤各指标差异尚具有更大的决定性。对这些科学问题的理解,有助于分析我国森林相关生态工程的土壤相关生态效益评价及服务功能提升实践。

基于此,本文对 4 种植被类型的 17 个指标进行综合评价,探讨不同树种造林对土壤质量的改善程度,以期为进一步选择合理的造林树种和模式提供理论依据。预期回答以下 3 个问题:1) 不同植被间对土壤性质有多大的影响,有多少指标在不同深度上表现一致? 2) 土壤养分维持、土壤固碳、土壤物理性质维持以及降低土壤盐碱度方面,4 种植被类型间的差异如何? 不同地点是否一致? 3) 我们的发现有何启示?

1 研究地点、实验材料与实验方法

1.1 研究地点、材料与样品采集

本研究选择两个地点,主要是为了确定种间差异是否在不同地点间具有一致性。研究区选择两个地点:(1)秀水林场,位于小兴安岭南麓,属于伊春市带岭林业局。地理坐标为东经 128°59'38"—129°00'00",北纬 47°00'32"—47°03'17",属大陆性湿润季风气候,全年平均气温 1.4℃,无霜期 115 天左右,年降雨量在 676—724 mm,土壤类型属于森林暗棕壤^[11,13]。(2)帽儿山林场,位于长白山系张广才岭的西北部,属小岭余脉。地理坐标为东经 127°34'13"—127°34'48",北纬 45°15'58"—45°16'28",属大陆性湿润季风气候,全年平均气温 2.8℃,年降水量 723.8 mm,土壤类型属于暗棕壤^[12,13]。

选择地形平坦(坡度<5°),海拔比较一致的样地类型,以保证植被类型间差异是产生土壤各指标差异的主要原因。2013 年 8 月—9 月间在秀水林场和帽儿山林场选择毗邻的落叶松人工林、水曲柳人工林、樟子松人工林、农田 4 个植被类型(表 1),每个类型在两个地点各选 5 块样地 20m * 20m,每块样地选择 4 个点,开挖土壤剖面并分 0—20cm、20—40cm、40—60cm 3 个土层,100cm³环刀采样。每个样地的树木年龄,用生长锥至少采集 4 个树心、查年轮并求平均值作为林龄^[13]。

1.2 土壤相关 17 指标的测定方法

鉴于以往研究往往对少数土壤指标进行对比,缺乏可靠性和准确性。本研究选择土壤物理指标(容重、孔隙度、比重和比表面积)、土壤盐碱度(pH 和电导率 EC)、土壤养分(土壤碳氮磷及碱解氮、速效磷、速效钾、土壤真菌代谢产物——易提取及总球囊霉素相关蛋白 GRSP)、土壤有机质(有机碳及其矿化速率)与根系密度等 17 个指标进行研究。

参照鲍士旦的方法^[2,13,14,30],SOC 含量的测定采用重铬酸钾容量法—外加热法;全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;全磷含量采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定;速效磷含量采用碳酸氢钠法测定;全钾含量的测定方法是 NaOH 熔融—火焰光度法;速效 K 含量采用 NH₄OAC 浸提—火焰光度法测定;土壤 pH 采用 Sartorius PB 10 型精密酸度计测定,土壤电导率采用 DDS-307 电导率测定仪测定(采用 1 土:5 水的土壤溶液测定);比重采用比重瓶法进行测定;比表面积采用 CH₃COOK 简易吸附法进行测定^[27];有机碳矿化速率采用 Li-6400 测定^[8];测定公式如下:根系密度=根系干重/400cm³;土壤容重=风干土样重/体积(400cm³);孔隙度=(1-容重/比重)*100%^[26];球囊霉素相关土壤蛋白(包括 EEG 和 TG 含量)采用的是将 Wright 的方法稍加修改进行测定的^[23,29]。

1.3 多因素方差分析法确定植被类型间差异一致性及在不同深度的差异

以 4 种植被类型和 3 个土壤深度为固定因子(自变量),以 17 个土壤相关指标为因变量,进行多因素方差分析。4 个植被类型间存在差异显著($P < 0.05$),说明不同类型间具有显著不同的上述土壤相关指标,否则说明植被类型间的差异不明显。当植被类型间差异显著时,使用多重比较确认植被类型间差异的大小和发生在哪些植被类型间,使用不同字母法标示这种差异,这种标示方法也是 1.4 中数据标准化的基础。

类型与深度的交互作用分析(类型 * 深度)用于分析植被类型间差异是否在不同土壤深度表现一致;当类型 * 深度交互作用 $P < 0.05$ 时,说明类型间的差异在不同深度显著不同;反之,当类型 * 深度交互作用 $P > 0.05$ 时,说明类型间的差异在不同土壤深度基本一致(即差异不显著)。

1.4 数据标准化综合得分处理方法

植被类型间差异分析的难点在于不同指标的植被类型间差异不尽一致,如何能够综合这些指标获得更为可信的结果,一般来讲多是通过降维的方法,把数据归结为几类进行分析。本研究在逐个对植被类型间不同指标差异分析的基础上(如 1.3 所述),把 17 个指标分为土壤物理性质(容重、比重、孔隙度、比表面积)、土壤肥力(全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾和 EEG、TG)、盐碱度(土壤 pH 和电导率)及土壤固碳(土壤碳、有机碳矿化速率、根系密度)等 4 组。首先根据 1.3 结果将各个指标的数值按照从好到坏(比如肥力指标,

越高越好;物理性质:容重越低越好、孔隙度越高越好;降盐碱能力,pH 和电导率越低越好;固碳能力,根系密度越大,SOC 含量越高、有机碳分解速率越慢越好)的顺序排序并根据多重比较的结果使用顺序 a、b、c 字母法进行显著性差异标注:相同指标植被类型间差异显著使用不同字母标示($P<0.05$),而差异不显著使用相同字母标示($P>0.05$)。

数据标准化处理步骤:

1)首先将多重比较所标示的字母 a、b、c 分别用数字 3、2、1 进行转换,当某一指标有多个字母时取其算术平均值(如 ab,则取值为 $(3+2)/2=2.5$);

2)然后将 4 组指标类型的各个指标得分相加,相加所得和来代表这一功能(土壤物理性质维持、肥力维持、固碳能力和降盐碱化能力)的标准化得分;

3)上述标准化得分越高,说明该树种的土壤物理性质维持、土壤肥力维持、碳截获能力、降低土壤盐碱度能力越好。

上述数据处理均采用 SPSS17.0 软件进行,用 Excel 2007 绘制相关图表。

2 结果

2.1 3 个树种生长状态等基本情况差异

树种的密度范围在 540—1800 株/公顷之间,树高范围在 15.8—18m 之间,胸径范围在 19.3—24.6cm 之间,地径范围在 24.3—31.4cm 之间,树基部面积比范围在 0.6—1.3 之间,树龄在 35—50 年之间,其中农田多开荒自原始森林植被,开荒始于 1960—1970 年代(表 1)。

表 1 不同树种及样地的基本情况

Table 1 The basic conditions of different species and plots

林场 Forest farms	类型 Type	密度 Density/ (plants/hm ²)	树高 Tree height/mt	胸径 Diameter at breast height/cm	地径 Ground diameter/ cm	树基部 面积比 Base area ratio	年轮 Annual ring/a	海拔 Maltitude	样地面积 Sample area/hm ²	造林时间 Afforestation time/a	调查样 地个数 sample number/个
秀水	落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	540	17	22.2	29.3	0.72	36	228	20.2	1977	5
	水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	1800	16.3	23.1	29.5	0.71	50	234	0.7	1963	5
Xiushui	樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	1380	17	24.6	31.4	1.3	47	231	1.6	1966	5
	农田 farmland							227	2.3	1960s	6
帽儿山	落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	1140	18	20.8	26.1	0.67	36	321	2	1977	5
	水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	940	15.8	21.2	26.6	0.6	42	312	0.6	1971	5
Maoershan	樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	1085	16.2	19.3	24.3	0.78	41	316	0.8	1972	5
	农田 farmland							318	1.5	1970s	5

2.2 植被类型对 17 个指标影响的多因素方差分析:植被类型间比较及其不同土深差异

两个地点均表现 7—8 个指标存在显著的植被类型间差异;其中秀水林场植被类型间差异达到显著的指标有 8 个:根系密度、土壤 pH、土壤电导率、速效磷、TG、比重、容重、孔隙度;帽儿山林场植被类型间差异达到显著的指标有 7 个:根系密度、土壤 pH、SOC、全氮、速效磷、全磷、容重(表 2)。

不同深度间土壤各指标差异较大,秀水和帽儿山林场均发现 15 个指标具有显著的深度间差异;植被类型间的差异在不同土层之间表现一致的指标所占比例很大:秀水林场 13 个指标,帽儿山林场全部 17 个指标,这些指标均没有发现深度与类型间的显著交互作用(表 2)。

表 2 植被类型、土壤深度对 17 个指标的影响及交互作用

Table 2 The influence of vegetation types and soil depths to the 17 soil parameters and their interaction

因变量 Dependent variable	秀水林场 Xiushui Forest Farm						帽儿山林场 Maoershan Forest Farm					
	类型 Type		土层深 Soil depth		交互作用 Interaction		类型 Type		土层深 Soil depth		交互作用 Interaction	
	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.
根系密度 root density (g/cm ³)	51.53	0.000	63.18	0.000	19.2	0.000	35.0	0.000	21.9	0.000	4.83	0.001
土壤 pH soil pH	13.46	0.000	3.11	0.055	3.05	0.014	3.59	0.020	5.70	0.006	0.72	0.635
土壤电导率 EC(μS/cm)	4.58	0.007	3.85	0.029	0.80	0.575	1.41	0.252	0.95	0.393	1.60	0.167
有机碳 SOC (g/kg)	0.85	0.475	12.8	0.000	1.33	0.263	3.39	0.025	6.38	0.003	1.16	0.341
碱解氮 AN (mg/kg)	0.49	0.689	4.68	0.014	2.06	0.078	2.74	0.053	4.35	0.018	1.30	0.274
全氮 TN (g/kg)	1.01	0.400	20.8	0.000	0.92	0.492	8.04	0.000	15.7	0.000	2.00	0.084
速效磷 AP (mg/kg)	5.78	0.002	11.8	0.000	3.10	0.013	5.99	0.001	0.27	0.763	0.05	1.000
全磷 TP (g/kg)	1.93	0.140	3.55	0.037	0.95	0.470	7.41	0.000	15.5	0.000	0.94	0.473
速效钾 Ak (mg/kg)	1.44	0.243	8.25	0.001	1.09	0.385	0.48	0.698	43.9	0.000	0.84	0.545
全钾 TK (g/kg)	0.26	0.853	93.2	0.000	1.12	0.369	0.07	0.978	814	0.000	0.55	0.77
EEG (mg/kg)	0.98	0.413	90.2	0.000	0.63	0.706	1.74	0.171	79.9	0.000	0.88	0.514
TG (mg/kg)	2.98	0.042	58.4	0.000	1.14	0.356	1.05	0.378	16.0	0.000	1.67	0.15
比重 specific gravity	9.33	0.000	14.6	0.000	1.11	0.372	1.91	0.141	15.8	0.000	0.74	0.622
容重 bulk density (g/cm ³)	4.54	0.007	50.5	0.000	2.94	0.017	5.05	0.004	21.0	0.000	1.66	0.15
孔隙度 porosity (%)	10.81	0.000	68.0	0.000	1.45	0.218	0.31	0.817	49.0	0.000	1.61	0.165
比表面积 Specific surface area (m ² /g)	0.60	0.622	0.59	0.557	1.53	0.193	2.48	0.073	5.56	0.007	2.56	0.031
有机碳矿化速率 SOC mineralization (μmol m ⁻² s ⁻¹)	1.46	0.238	157	0.000	2.15	0.067	0.27	0.844	125	0.000	0.14	0.989
均值 mean value	6.59	0.24	39.09	0.04	2.62	0.27	4.76	0.26	72.99	0.07	1.37	0.41

2.3 4 个植被类型和 17 个指标的差异多重比较结果

(1) 植被类型差异对不同指标的影响方式及差异大小

土壤盐碱度的植被类型间差异主要表现在土壤 pH 和电导率。秀水林场: pH 由高到低依次为落叶松、农田、樟子松、水曲柳(表 3);水曲柳和农田的电导率显著高于樟子松和落叶松的 1.25 倍左右(表 3)。帽儿山林场: pH 由高到低依次为水曲柳、落叶松、农田、樟子松(表 3);电导率在不同树种及农田间没有差异(表 2、表 3)。

我们从全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、EEG、TG 等 8 个指标探究植被类型间土壤肥力维持能力的差异。秀水林场:农田的速效磷含量最高 9.47 mg.kg⁻¹,显著高于其它三个树种均值的 2.37 倍(表 3);TG 由高到低依次是落叶松、农田、樟子松、水曲柳(表 3);碱解氮、全氮、全磷、速效钾、全钾、EEG 6 个指标在不同树种间没有显著差异(表 2、表 3)。帽儿山林场:水曲柳的全氮含量显著高于其它三个类型均值的 2.07 倍左右(表 3);速效磷由高到低依次是水曲柳、农田、落叶松、樟子松(表 3);水曲柳的全磷含量显著高于其它三个类型均值的 1.7 倍左右(表 3);碱解氮、速效钾、全钾、EEG、TG 5 个指标在不同树种间没有差异(表 2、表 3)。

针对植被类型间对土壤物理性质影响,我们对比了容重、孔隙度、比重、比表面积 4 个指标(表 2、表 3)。秀水林场:容重由高到低依次是农田、落叶松、水曲柳、樟子松;水曲柳的孔隙度最高,是最低值落叶松的 1.7 倍左右;落叶松的比重显著低于其他三个类型;比表面积在不同树种间没有差异。帽儿山林场:容重由高到低依次是农田、樟子松、落叶松、水曲柳(表 3);比重、孔隙度、比表面积 3 个指标不同树种间没有差异。

土壤碳截获的植被类型间差异主要表现在根系密度、SOC、有机碳矿化速率。秀水林场:水曲柳的根系密度显著高于其它三个类型均值的 2.52 倍(表 3);SOC、有机碳矿化速率 2 个指标在不同树种间没有差异(表 2、表 3)。帽儿山林场:水曲柳的根系密度显著高于其它三个类型均值的 2.23 倍左右(表 3);SOC 含量由高到低依次是水曲柳、农田、落叶松、樟子松;有机碳矿化速率在不同树种间没有差异(表 2、表 3)。

表 3 树种类型差异对不同指标的影响方式及差异大小

Table 3 The pattern and magnitudes of vegetation-induced differences on various parameters

	秀水林场 Xiushui Forest Farm				帽儿山林场 Maoershan Forest Farm			
	落叶松 Larch	农田 Farmland	水曲柳 Ash	樟子松 Scots pine	落叶松 Larch	农田 Farmland	水曲柳 Ash	樟子松 Scots pine
在两个地点均具有显著植被类型间差异指标 Parameters with inter-species differences at two sites								
根系密度 root density (g/cm^3)	0.02b	0.01c	0.05a	0.02b	0.021b	0.01c	0.04a	0.018bc
容重 bulk density (g/cm^3)	1.29a	1.38a	1.25b	1.24b	1.51a	1.54a	1.37b	1.53a
速效磷 AP (mg/kg)	3.71b	9.47a	4.35b	3.91b	3.65b	3.66b	9.96a	3.24b
土壤 pH soil pH	6.52b	5.74a	5.52a	5.71a	5.54a	5.52a	5.85b	5.52a
至少在一个地点具有显著植被类型间差异 Parameters with inter-species differences at one site at least								
土壤电导率 EC ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	28.36a	33.8b	37.0b	27.9a	23.6a	27.9a	28.6a	27.7a
有机碳 SOC (g/kg)	24.70a	23.3a	20.2a	17.5a	10.4b	12.2b	19.1a	9.19b
全氮 TN (g/kg)	1.22a	1.08a	1.02a	0.90a	0.50b	0.56b	1.06a	0.48b
全磷 TP (g/kg)	0.47a	0.65a	0.50a	0.48a	0.40b	0.35b	0.64a	0.35b
TG (mg/g)	11.0a	9.90ab	8.49b	9.28b	6.87a	6.76a	7.68a	7.09a
比重 specific gravity	1.74b	2.11a	2.22a	2.17a	2.14a	2.21a	2.01a	2.27a
孔隙度 porosity (%)	24.8c	32.9b	41.4a	40.9a	26.7a	29.1a	29.2a	30.0a
两个地点均无植被类型间差异指标 Parameters without inter-species differences at two sites								
EEG (mg/g)	0.95a	0.94a	1.00a	1.06a	0.66a	0.73a	0.82a	0.71a
全钾 TK (g/kg)	66.7a	69.4a	68.6a	65.16a	93.3a	93.2a	91.9a	92.4a
速效钾 Ak (mg/kg)	92.3a	138a	76.5a	106a	137a	130a	129a	109a
碱解氮 AN (mg/kg)	69.1a	60.3a	76.8a	69.2a	36.4a	43.8a	59.2a	33.1a
比表面积 specific surface area (m^2/g)	33.3a	32.7a	36.2a	24.7a	30.8a	42.8a	33.1a	29.2a
有机碳矿化速率 SOC mineralization rate/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	0.63a	0.67a	0.64a	0.64a	0.69a	0.67a	0.67a	0.66a

(2) 两个林场综合比较

尽管不同土壤深度间具有更普遍的差异(17 指标中的 15 个),但是两个林场植被类型间差异均达到显著的指标有 7—8 个。在这 7—8 个指标中,两地点相同的指标有 4 个:根系密度、土壤 pH、速效磷、容重(表 3)。根系密度均表现为水曲柳>落叶松>樟子松>农田;pH 值在帽儿山水曲柳高于其它类型,而秀水林场水曲柳等显著低于落叶松;速效磷在秀水农田最高,而在帽儿山则是水曲柳最高;容重两地都表现为水曲柳显著低于农田及落叶松林。类型与深度的交互作用分析显示,大多数指标在 0—60cm 间类型间差异在不同土层之间表现一致(13—17 个指标)(没有显著的交互作用,见表 2)。

从盐碱度来说,两个林场差异均达到显著的指标是 pH,而土壤电导率在秀水林场差异显著,在帽儿山林场差异不显著。从土壤肥力维持能力来说,两个林场的植被类型间差异均达到显著的指标是速效磷,并且有 4 个指标(全钾、碱解氮、速效钾、EEG)在两个林场的植被类型间差异不显著,其它三个指标至少在一个地点存在显著植被类型间差异。从碳截获来说,两个林场均存在显著差异的是根系密度,而有机碳矿化速率在两个林场的植被类型间差异均不显著。从土壤物理性质来说,两个林场均存在植被类型间差异的是容重,而比表面积在两个林场的植被类型间差异均不显著。

2.4 土壤肥力维持能力标准化得分相关树种及农田间比较分析

土壤肥力维持能力方面:秀水林场肥力维持能力得分比较高的是农田和落叶松(26);帽儿山林场肥力维持能力得分比较高的是水曲柳(27)。由此可知,不同地点土壤肥力维持的植被类型间差异不一致,难以确定土壤肥力维持能力比较好树种。

秀水林场:土壤肥力维持能力得分比较高的是农田(26.5)和落叶松(26),而得分比较低的是水曲柳和樟

子松(25)(图 1)。对比表 3(不同树种对土壤肥力的影响),农田和落叶松的全氮、速效磷、全磷、速效钾、TG 多高于水曲柳、樟子松的相应值,相应平均值分别高出 20%、59.4%、12.7%、26.2%、17.3%。

帽儿山林场:土壤肥力维持能力得分最高的树种是水曲柳(27),得分比较低的树种是落叶松、农田、樟子松(23)(图 1)。对比表 3(不同树种对土壤肥力的影响),水曲柳的碱解氮、全氮、速效磷、全磷、速效钾、EEG、TG 多高于落叶松、农田、樟子松相应值,相应平均值分别高出 56.7%、107%、183%、74.6%、3%、17.8%、11.1%

2.5 土壤物理性质改良标准化得分相关树种及农田间比较分析

综合土壤物理指标来看,两个林场得分比较高的树种均是水曲柳,得分排序基本一致,总得分排序:水曲柳(22)、樟子松(21)、农田(19)、落叶松(18),因此,水曲柳具有维持更好的土壤物理性质的能力。其中秀水林场:土壤物理指标得分比较高的树种是水曲柳和樟子松(11),对比表 3(不同树种对土壤物理性质的影响),水曲柳和樟子松的比重、孔隙度多高于落叶松的相应值,相应平均值分别高出 24.3%、64.6%,相应的容重低 4%。帽儿山林场:土壤物理指标得分最高的树种是水曲柳 11,对比表 3(不同树种对土壤物理性质的影响),水曲柳的孔隙度高于土壤物理性质比较差的树种(落叶松、农田、樟子松)的 2%,相应的容重低 12%。

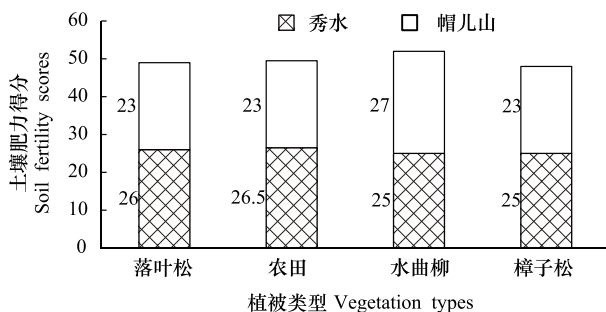


图 1 种间土壤肥力维持能力综合比较分析

Fig.1 Interspecies comparison on the comprehensive scores for soil fertility sustainability

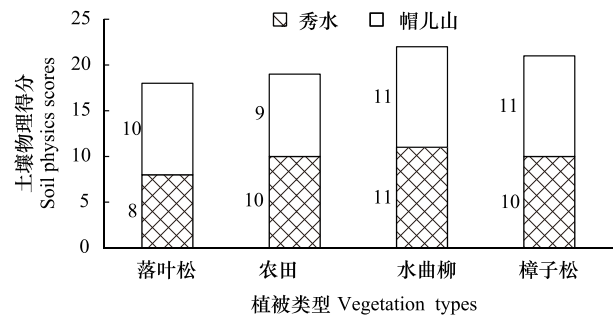


图 2 种间土壤物理性质综合比较分析

Fig.2 Interspecies comparison on the comprehensive scores for soil physical improvements

2.6 土壤固碳能力标准化得分相关树种及农田间比较分析

综合土壤固碳指标可知(图 3),两个林场土壤固碳能力最好的树种都是水曲柳(总得分 14),而且得分高低排序一致:水曲柳、落叶松、樟子松、农田,而且不同树种土壤固碳能力的差异主要发生在根系密度(表 3)。具体表现如下:

秀水林场:土壤固碳指标得分最高的树种是水曲柳(7),而得分最低的类型是农田(5)。水曲柳的得分是农田的 1.4 倍左右(图 3)。对比表 3(不同树种对土壤固碳能力的影响),水曲柳的根系密度高于农田的 270%,而农田的 SOC、有机碳矿化速率高于水曲柳相应值的 15%、5%。帽儿山林场:土壤固碳指标得分最高的树种是水曲柳(7),得分最低的类型是农田(4)。对比表 3(不同树种对土壤固碳能力的影响),水曲柳的根系密度、SOC 含量多高于农田的相应值,相应平均值分别高出 195%、56.9%。可见,不同树种土壤固碳能力的差异主要发生在根系密度,其次是 SOC,而有机碳矿化速率差异很小。

2.7 土壤降盐碱度标准化得分相关树种及农田间比较分析

综合土壤盐碱度指标可知,两个林场降盐碱度得分最高的树种是樟子松(7),最低的树种是水曲柳(5),农田和落叶松居中。具体来看:秀水林场:降盐碱度得分最高的是樟子松(4),而落叶松、农田、水曲柳得分均为 3(图 4)。对比表 3(不同树种对土壤盐碱度指标的影响),樟子松土壤 pH、土壤电导率多低于其它三个植被类型相应平均值的 4%和 18.4%。帽儿山林场:降盐碱度综合得分最低的是水曲柳(2),而其它植被得分都是 3(图 4)。对比表 3(不同树种对土壤盐碱度指标的影响),水曲柳的土壤 pH、土壤电导率高于土壤盐碱度比较差的樟子松、落叶松、农田相应值,相应平均值分别高出 5.9%、8.3%。综合上述结果说明,樟子松具有较高的降盐碱能力,而水曲柳表现较差。

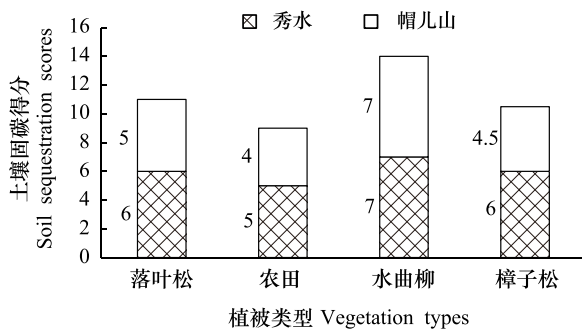


图3 种间土壤固碳能力综合比较分析

Fig.3 Interspecies comparisons on the comprehensive scores of soil carbon sequestration capacity

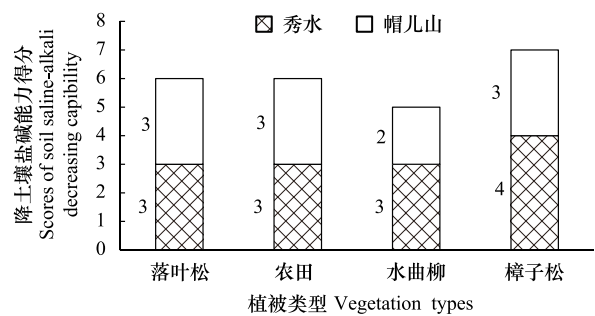


图4 种间降盐碱综合得分的比较分析

Fig.4 Interspecies comparison on comprehensive scores of soil saline-alkali declining capacity

3 讨论

3.1 植被类型间差异及其在不同深度上一致性分析:统计检验与意义

造林树种与其它作物如草本和农作物不一样,树木根系较深,其具体影响的深度也可能存在树种的差异^[15-16]。由于不同学者对土壤研究尺度大小不同,土壤本身不同土层也存在明显差异,难以获得准确的信息,致使同一地区的研究结果常常存在较大差异^[17-18]。因此,在采取土壤样品时分土层分析具有十分重要的意义。我们前期对落叶松的研究发现,土地利用对表层和深层影响差异明显,甚至趋势相反,需要同时考虑表层和深层土壤碳和氮等指标变化^[6,10,11,30]。李龙等研究认为不同土层土壤 SOC 含量与 SOC 密度均随土层深度的增加而明显下降^[18]。本研究也确认土壤深度差异对各种土壤指标的影响,两个地点均表现 15 个指标存在显著的土壤深度间的差异(图 3)。在如此大的土壤层次间差异存在的情况下,植被类型间差异是否可以测定出来?我们的结果也给出了肯定的答案。

17 个指标中,两个地点均显示出植被类型间差异的指标有一半左右(7—8 个指标),而且有 4 个指标(根系密度、容重、土壤 pH、速效磷)在两个地点均存在显著的植被类型间差异,其中根系密度和容重植被类型间差异在两个地点间排序基本一致,水曲柳根系密度最高,土壤容重最低(表 3)。此外,植被间植被类型间差异两个地点一致的还包括 EEG、全钾、速效钾、碱解氮、土壤比表面积和有机碳矿化速率等 6 个指标,这几个指标 4 种植被类型间基本一致($P>0.05$)(表 3)。目前植被类型间差异对土壤的影响存在较大的差别^[11],本研究的结果也证明了这一点。土壤相关指标多大程度上决定于植被,特别是在不同地点间表现一致的植被类型间差异,确实不易甄别。我们的研究确认,如果植被对土壤相关指标存在普遍的显著影响的话,在我们测定的 17 个指标中,最可能是根系密度和土壤容重。

植被类型间差异在不同深度是否一致,基于植被类型与深度的交互作用分析,我们从统计学给出了可能答案。树种类型间的差异在不同土层之间表现一致(类型 * 深度, $P>0.05$)的指标占所测定的指标比例很大 76%—100%:秀水 13 个指标和帽儿山全部测定指标(17 个)(表 2)。我们的发现说明,在本文研究区域,采样确定某些指标的植被类型间差异时,如电导率、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾、EEG、TG、比重、孔隙度、比表面积、SOC、有机碳矿化速率,采样 0—20cm、20—40cm 和 40—60cm 土壤样品中全部采样或者只采集部分深度样品,从统计学角度看,所得到的植被类型间差异是一致的。前期对落叶松林生长发育对土壤不同层次土壤影响通过多因素协方差分析进行了统计分析^[10],本文进一步从统计学角度进行阐述了种间差异在不同土深的一致性,是对前人研究的一个补充。

3.2 植被类型间差异综合评价及启示

土壤养分含量状况是土壤肥力的重要标志^[5],而森林土壤碳截获是森林碳汇功能的主要组成^[6,21]。安静

等对东北不同地区农田、皆伐迹地和人工林的研究也发现地点间肥力相关指标很大的差异,可以掩盖相关的土地利用类型间的差异^[6,12,31]。综合土壤肥力维持能力指标来看,不同地点植被类型间差异并不一致,难以确定土壤肥力维持能力比较好树种,甚至并不比附近农田高。两个林场土壤固碳能力最好的树种都是水曲柳,而且得分高低排序一致,主要发生在根系密度。鉴于土壤肥力及土壤碳截获的重要性,对这些种间差异的分析有助于评价造林,特别是不同树种及林分-农田差异的生态功能具有科学意义。

土壤物理性质不仅决定了土壤中水、气、热和生物状况,而且对土壤蓄水保肥能力、土壤养分的利用和吸收具有重要的影响^[13,22]。本研究所在的区域松嫩平原土壤盐碱化趋势严重,生物改良措施已经成为战略需求^[25]。水曲柳对优良土壤物理性质具有更强的能力,得分最高,不同地点基本一致(图 2)。王新宇的研究指出:水曲柳纯林土壤物理性质表现出了优于其它林分的趋势,与我们的研究结果一致^[19]。在土壤降盐碱能力方面,樟子松林得分最高,而水曲柳得分最低,尽管不同地点不尽一致。魏晨辉等研究表明在松嫩平原盐碱地地区适合盐碱地造林的树种有榆树、樟子松等树种,不适合盐碱地造林的树种有水曲柳、黄檗等树种^[20],与我们的研究结果一致。可见,造林目的不同,在树种选择上应该不同,提升土壤物理性质和改良盐碱土可能具有相反的选择。

三北防护林工程已经实施近 40 多年,而退耕还林工程也实施 10 多年,这些工程均涉及农田和林分的比较以便准确评价生态功能的价值;后续生态服务提升最为简便和可操作的方法就是适宜树种的选择和应用。我们的研究选择不同地点、不同树种以及不同土壤深度对系列土壤相关指标进行了统计对比分析和综合评价分析,相关数据能够为这些生态工程的评价及后续管理提升提供了支撑。

此外,我们得出结论也存在一些不确定性。尽管我们尽量选择了相毗邻的 3 种林分和农田进行研究,在选择上也尽量选择已经完全郁闭的工艺成熟林进行对比研究,但是在一些具体指标上,如造林密度不同样地间差异较大(表 1),可能影响树种差异的可靠性。而且,植物的适用性和植物对土壤的改良性可能也存在差异^[24]。在之后研究中,需要更加注重这些因素对种间差异研究的可能影响。

4 结论

我们对不同地点 4 个植被类型的研究发现:不同地点土壤物理性质、固碳能力的植被类型间差异一致,而土壤肥力维持能力、盐碱度的植被类型间差异不一致。从土壤物理性质和固碳角度来说,秀水林场和帽儿山林场表现比较好的都是水曲柳,说明水曲柳的土壤物理性质和固碳能力比较好。

参考文献 (References):

- [1] SjömanH, Busse NielsenA. Selecting trees for urban paved sites in Scandinavia-A review of information on stress tolerance and its relation to the requirements of tree planners. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2010, 9(4): 281-293.
- [2] 王洪岩, 王文杰, 邱岭, 苏冬雪, 安静, 郑广宇, 祖元刚. 兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异. *生态学报*, 2012, 32(3): 833-843.
- [3] 马盈, 兰士波, 李红艳. 樟子松引种驯化和遗传改良研究现状. *黑龙江农业科学*, 2014, (6): 145-147.
- [4] RaoMA, Gianfreda L. Properties of acid phosphatase-tannic acid complexes formed in the presence of Fe and Mn. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(13): 1921-1926.
- [5] 霍常富. 光氮对水曲柳苗木生长、光合作用及碳氮代谢的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
- [6] 安静. 树种与管理方式对人工林土壤碳截获及肥力的影响硕士[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [7] AyresE, SteltzerH, BergS, Wallenstein M D, Simmons B L, Wall D H. Tree species traits influence soil physical, chemical, and biological properties in high elevation forests. *PLoS One*, 2009, 4(6): e5964.
- [8] 王红, 范志平, 邓东周, 陈德龙, 孙学凯, 高俊刚, 曾德慧. 不同环境因子对樟子松人工林土壤有机碳矿化的影响. *生态学杂志*, 2008, 27(9): 1469-1475.
- [9] 常顺利, 杨洪晓, 葛剑平. 净生态系统生产力研究进展与问题. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2005, 41(5): 517-521.
- [10] WangHM, WangWJ, Chen HF, Zhang ZH, Mao ZJ, Zu YG. Temporal changes of soil physic-chemical properties at different soil depths during larch afforestation by multivariate analysis of covariance. *Ecology and Evolution*, 2014, 4(7): 1039-1048.

- [11] 安静, 王文杰, 王洪岩, 苏冬雪, 邱岭, 祖元刚. 人工林和农田对东北地区土壤碳、氮含量及相关指标垂直分布的影响. 植物研究, 2012, 32(3): 331-338.
- [12] 陈喜全, 欧阳华. 帽儿山实验林场的土壤. 东北林业大学学报, 1986, (S1): 79-84.
- [13] Wang W J, Qiu L, Zu Y G, Su D X, An J, Wang H Y, Zheng G Y, Sun W, Chen X Q. Changes in soil organic carbon, nitrogen, pH and bulk density with the development of larch (*Larix gmelinii*) plantations in China. Global Change Biology, 2011, 17(8): 2657-2676.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Carrasco M S, Rad J C, González-Carcedo S. Immobilization of alkaline phosphatase by sorption on Na-sepiolite. Bioresource Technology, 1995, 51(2): 175-181.
- [16] Gu J C, Yu S Q, Sun Y, Wang Z Q, Guo D L. Influence of root structure on root survivorship: an analysis of 18 tree species using a minirhizotron method. Ecological Research, 2011, 26(4): 755-762.
- [17] Plante P M, Rivest D, Vézina A, Vanasse A. Root distribution of different mature tree species growing on contrasting textured soils in temperate windbreaks. Plant and Soil, 2014, 380(1/2): 429-439.
- [18] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 郭月峰, Habura B, 常伟东. 半干旱区不同土层深度土壤有机碳变化. 水土保持通报, 2014, 34(4): 118-122.
- [19] 王新宇. 水曲柳落叶松人工林近自然化培育对林地土壤理化性质的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- [20] 魏晨辉, 沈光, 裴忠雪, 任蔓莉, 路嘉丽, 王琼, 王文杰. 松嫩平原盐碱地不同植物种植对土壤理化性质、肥力指标与细根生长的影响及在不同土壤深度的表现差异. 北京: 中国科技论文在线, [2014-05-06]. <http://www.paper.edu.cn/html/releasepaper/2014/05/66/>.
- [21] 侯雪莹, 韩晓增, 王树起, 宋春. 不同土地利用和管理方式对黑土肥力的影响. 水土保持学报, 2008, 22(6): 99-103.
- [22] 裴忠雪, 武燕, 王琼, 仲召亮, 任蔓莉, 魏晨辉, 路嘉丽, 王文杰. 松嫩平原土壤物理性质与其它土壤肥力相关指标相关关系研究. 北京: 中国科技论文在线, [2014-04-25]. <http://www.paper.edu.cn/html/releasepaper/2014/04/349/>.
- [23] Wang Q, Wang W J, He X Y, Zhang W T, Song K S, Han S J. Role and variation of the amount and composition of glomalin in soil properties in farmland and adjacent plantations with reference to a primary forest in north-eastern China. PLoS One, 2015, 10(10): e0139623.
- [24] Augusto L, Ranger J. Impact of tree species on soil solutions in acidic conditions. Annals of Forest Science, 2001, 58(1): 47-58.
- [25] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明. 东北地区盐碱土特征及其农业生物治理. 土壤, 2006, 38(3): 256-262.
- [26] 依艳丽. 土壤物理研究法. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- [27] 依艳丽. 土壤比表面的研究. 辽宁农业科学, 1986, (6): 9-12.
- [28] Rillig M C. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem process. Ecology Letters, 2004, 7(8): 740-754.
- [29] Wang Q, Wu Y, Wang W J, Zhong Z L, Pei Z X, Ren J, Wang H M, Zu Y G. Spatial variations in concentration, compositions of glomalin related soil protein in Poplar plantations in northeastern China, and possible relations with soil physicochemical properties. The Scientific World Journal, 2014, 2014: Article ID 160403.
- [30] Wang W J, Wang H M, Zu Y G. Temporal changes in SOM, N, P, K, and their stoichiometric ratios during reforestation in China and interactions with soil depths: importance of deep-layer soil and management implications. Forest Ecology and Management, 2014, 325: 8-17.
- [31] 安静, 王文杰, 王洪岩, 苏冬雪, 邱岭, 祖元刚. 人工林皆伐对土壤碳及相关理化性质的影响. 东北林业大学学报, 2012, 40(9): 57-62, 66-66.