

黄河三角洲长期人工刺槐林对土壤化学性质的影响

董海凤^{1,2}, 杜振宇², 刘春生^{1,3}, 刘方春², 马丙尧², 马海林²

(1. 山东农业大学 资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2. 山东省林业科学研究院,
山东 济南 250014; 3. 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东 泰安 271018)

摘要: 黄河三角洲土壤盐渍化严重, 是中国生态系统退化地带之一。为了探讨长期人工林对盐碱土壤改良效果, 合理利用大面积滨海盐渍土, 研究了刺槐纯林和刺槐混交林(刺槐×白蜡、刺槐×白榆、刺槐×臭椿)的林地土壤化学性质, 以及不同化学指标间的相关性, 并运用灰色关联分析方法对不同造林模式林地的土壤肥力进行了评价。结果表明, 滨海盐碱地营造刺槐林能有效抑制土壤返盐退化, 降低碱度, 改良土壤肥力。混交林压碱排盐的效果要优于纯林。不同造林模式下土壤化学性质差异显著, 各指标呈现不同的垂直变化趋势, 土壤交换性钙、镁未表现出“表聚”现象, 有效磷、有效硫规律性变化不明显; 各化学指标之间存在一定的相关性, 土壤酸碱度与全氮、交换性钙、交换性镁存在显著性负相关, 土壤有效硫与有效磷之间呈显著性负相关。灰色关联分析结果显示, 混交林改良土壤肥力的综合效应明显高于刺槐纯林, 其中刺槐×白蜡混交林改良土壤肥力的综合效应最好, 其次是刺槐×白榆和刺槐×臭椿。

关键词: 土壤化学性质; 人工刺槐林; 黄河三角洲

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0055-06

中图分类号: S714, S158.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.012

Effects of *Robinia Pseudoacacia* Plantations on Soil Chemical Properties in Yellow River Delta

DONG Hai-feng^{1,2}, DU Zhen-yu², LIU Chun-sheng^{1,3}, LIU Fang-chun², MA Bing-yao², MA Hai-lin²

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an,

Shandong 271018, China; 2. Shandong Academy of Forestry, Jinan, Shandong 250014, China;

3. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: Due to serious soil salinization, the Yellow River Delta has become one of degraded ecosystems in China. Effects of different plantations, including *Robinia pseudoacacia* pure forest & mixed forest, on soil chemical properties were studied in order to explore the relationships between plantation modes and soil chemical properties and thus rationally utilize the land resources of large scale saline region. Results showed that creating *R. pseudoacacia* in coastal saline effectively inhibited soil salinization and degradation, reduced alkalinity, and improved soil fertility. The effect of soil alkali salt discharge of mixed plantation was better than that of pure forest. Soil chemical properties were significantly different under different plantation modes. Soil exchangeable calcium and magnesium did not show phenomenon of accumulation in surface, but the effective sulfur and phosphorus did not change significantly. Moreover, there was a certain correlation between the chemical indicators. Soil pH value had significantly negative correlations with total nitrogen, exchangeable calcium and exchangeable magnesium and there was a significant negative correlation between soil available sulfur and available phosphorus. The integrated effect on soil properties in mixed plantation was higher than *Robinia pseudoacacia* pure forest. Moreover, the combined effects on soil fertility in different mixed modes were not the same. The mixed plantation of *R. pseudoacacia* and *Fraxinus velutina* performed the best effects on soil fertility, followed by the modes of *R. pseudoacacia*×*Ulmus pumila* & *R. pseudoacacia*×*Ailanthus*.

Keywords: soil chemical property; *Robinia pseudoacacia*; Yellow River Delta

收稿日期: 2013-04-17

修回日期: 2013-07-02

资助项目: 山东省科技发展计划项目“黄河三角洲人工刺槐林更新改造技术研究”(2010GNC10942); 山东省农业重大应用技术创新项目“黄河三角洲盐碱化土地高效利用模式配置研究”

作者简介: 董海凤(1986—), 女(汉族), 山东省济宁市人, 硕士研究生, 研究方向为植物营养机理与调控。E-mail: donghaifeng68@163.com。

通信作者: 刘春生(1955—), 男(汉族), 山东省临沂市人, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事植物营养学与肥料学的教学与科研工作。E-mail: csliu@sdau.edu.cn。

黄河三角洲位于渤海南部的黄河入海口沿岸地区,该地自然资源丰富,生态系统类型独特。但由于土壤盐渍化严重,导致生态环境脆弱,抗干扰能力弱,森林生态系统的自我调节和恢复能力较差。为此,20 世纪 80 年代初,该地区开始大规模造林,至今刺槐林保存面积仍然达 8 000 hm²,是中国现存面积最大的刺槐人工林^[1]。但目前刺槐人工林出现了大面积枯梢,甚至成片死亡,对黄河三角洲地区的防护林建设及盐碱化治理造成了巨大损失。到目前为止,国内众多学者对滨海盐碱地刺槐林土壤的水盐动态、养分特征、微生物特性等方面都进行了较为深入的研究^[1-7]。然而,对人工刺槐林地土壤不同化学性质之间相关性的研究和不同人工林改良土壤肥力综合效应研究较少。本文以 27 年生人工刺槐纯林和混交林为研究对象,取样测定了林地土壤的化学性质,对土壤肥力各指标进行了相关性研究,对比分析了不同植被模式对土壤肥力的影响,以期对滨海盐碱地造林及植被恢复提供依据。

1 试验地概况与研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于山东省东营市河口区,地处黄河三角洲东北部,属于暖温带大陆季风性气候。全年平均气温为 12.3℃,极端最高气温达 41.9℃,极端最低气温为-23.3℃,大于 0℃ 以上的积温 4 783.5℃,大于 10℃ 以上的积温 4 183℃。太阳辐射年总量 5 146~5 411 J/m²,年日照时数 2 571~2 865 h,平均 2 682 h,是中国日照较丰沛的地区之一。平均无霜期 210 d。年降水量 542.3~842 mm,其中约 63.9% 的降水集中于夏季,年蒸发量 1 962.1 mm,是降水量的 3.6 倍,春季是强烈的蒸发期,蒸发量占全年的 51.7%^[1,7-8]。

1.2 研究方法

选取该区有代表性的 4 种人工林(分别为刺槐纯林、刺槐×白蜡混交林、刺槐×白榆混交林和刺槐×臭椿混交林)作为研究对象,以未造林的荒地作为对照。试验林于 1985 年春季采用 1 a 苗营造,株行距为 2.5 m×3 m,各林分的林地相邻,林龄和立地条件基本相同,刺槐白蜡混交林为 3:1 行状混交模式,刺槐白榆混交林和刺槐臭椿混交林均为 1:1 行状混交。

在供试人工林地和荒地对照中分别设置 0.06 hm² 的标准地,对标准地林木进行每木检尺,测定胸径、树高和郁闭度。采用多点混合采样法,在每块标准地中用土钻取 0—20,20—40,40—60 cm 深度的土壤样

品。样品采集好后马上带回实验室,剔除植物残根、大于 2 mm 的石子等杂物,充分混合。风干,备实验分析用。

采用烘干残渣重量法测定土壤含盐量,电位法(水:土=5:1)测定 pH 值;土壤有机质采用重铬酸钾法测定;土壤样品中的全氮含量采用半微量开氏法测定,碱解氮采用碱解扩散法,有效磷采用 NaHCO₃ 溶液浸提后钼锑抗比色法测定,速效钾采用 NH₄OAc 浸提后火焰光度法测定,采用硫酸钡比浊法测定有效硫含量,1 mol/LNH₄OAc 浸提测定交换性钙镁^[9]。

1.3 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 18.0 进行相关的数据处理与统计分析,用 LSD 法进行差异性显著比较。

应用灰色系统理论的原理与方法^[10-12],对不同植被模式土壤肥力性质进行灰色关联分析及关联度排序^[12-13]。

(1) 数据标准化采用极差正规化法:

$$X_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (1)$$

式中: X_{ij} ——数据数列中数据(包含参考数列); $\min X_{ij}$, $\max X_{ij}$ ——同一类数据中最小值、最大值。

(2) 关联系数:

$$\xi_{ij}(tk) = \frac{\Delta_{\min} + \Delta_{\max} K}{\Delta_{ij}(tk) + \Delta_{\max} K} \quad (2)$$

式中: $\Delta_{\min} = \min_j \min_k |x_i(tk) - x_j(tk)|$; $\Delta_{\max} = \max_j \max_k |x_i(tk) - x_j(tk)|$; K ——常系数; $\xi_{ij}(tk)$ ——数据关联系数的集合($t, k = 1, 2, 3, \dots, N$); Δ_{\min} , Δ_{\max} ——同一类数据间所对应的最小和最大差值。

(3) 关联度:

$$r_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \xi_{ij}(tk) \quad (3)$$

式中: r_{ij} ——将各个时刻关联系数集中成为的一个平均值。

2 结果与分析

2.1 林分生长特征

各林分生长情况调查结果见表 1。由表 1 可以看出,相比纯林来说,造林 27 a 后混交林中刺槐的生长受到抑制,白蜡林木的平均胸径和树高均明显大于刺槐,分别高出 25.2% 和 38.5%;二者的保存率也存在显著差异,白蜡明显优于刺槐。白榆跟臭椿也显示出相似的规律,这是养分争夺的结果;另外,刺槐是高效固氮作物,可能有效促进白蜡、白榆、臭椿的生长。

表 1 不同造林模式下林分生长特征

模式	树种组成/%	保存率/%	郁闭度/%	平均胸径/cm	平均树高/m
R	100	68.5	0.74	17.63	10.49
RF	75/25	43.3/57.4	0.83	16.32/20.43	6.53/9.05
RU	50/50	59.6/70.4	0.82	16.43/18.71	7.49/9.42
RA	50/50	60.0/44.1	0.80	17.22/17.84	7.23/8.51

注:R,RF,RU 和 RA 分别指刺槐纯林、刺槐白蜡混交林、刺槐白榆混交林和刺槐臭椿混交林。“/”前后的数据分别为刺槐和另一混交树种相应系数。下同。

2.2 不同造林模式对土壤化学性质的影响

2.2.1 土壤盐分和 pH 值 盐分和 pH 值是表征盐渍化土壤基本性质的重要参数。由图 1—2 看出,与非林地的对照相比,不同造林模式林地土壤的 pH 值和含盐量均有显著下降,3 个土层的平均盐分含量均降低了 40% 以上,刺槐纯林、刺槐白蜡混交林、刺槐白榆混交林和刺槐臭椿混交林下降幅度分别为 43.06%,43.74%,48.52% 和 47.74%,林地土壤 pH 值也有一定程度的降低,但减轻幅度相对较小,分别为 0.19%,2.01%,1.39% 和 0.89%。以上结果表明,在黄河三角洲滨海盐碱地营造刺槐林能有效抑制土壤返盐退化,降低碱度,且混交林的压碱排盐效果优于纯林。

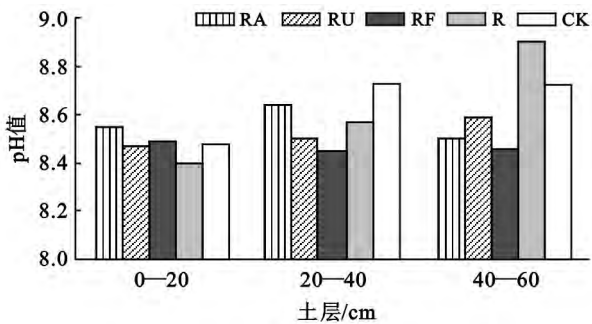


图 1 不同造林模式下不同剖面层次土壤 pH 值

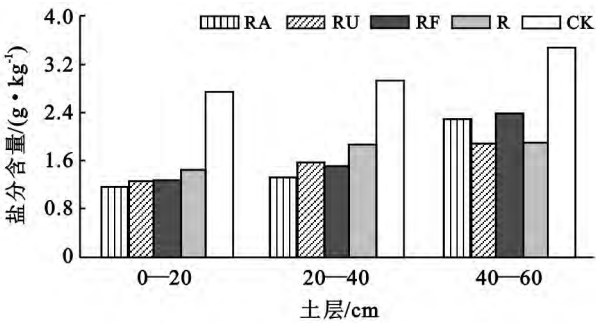


图 2 不同造林模式下不同剖面层次土壤的盐分含量

2.2.2 土壤有机质 土壤有机质是林地土壤养分的主要来源,能够促进微生物活动,维系土壤良好理化性质,是表征土壤肥力的重要指标^[2,13]。对不同造林模式林地土壤有机质含量的测定结果(图 3)表明,在

0—60 cm 土壤深度范围内,无论是荒地对照、刺槐纯林还是混交林地,土壤有机质含量均是随土层深度的增加呈明显降低趋势。与未造林荒地(CK)相比,各造林模式土壤剖面的有机质平均含量分别增加了 54.42%,79.85%,76.42% 和 52.97%。对比不同造林模式的同一深度土层,可以看出刺槐混交林的土壤有机质含量总体上要高于刺槐纯林,这与曹帮华、侯本栋等的研究结果一致^[2,4]。不同模式中,林地土壤的有机质平均含量从高到低依次为:刺槐×白蜡>刺槐×白榆>刺槐×臭椿>刺槐纯林。

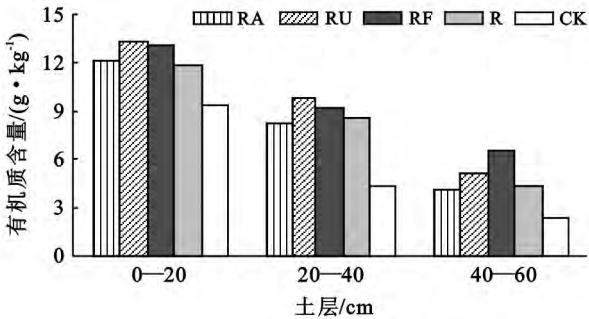


图 3 不同造林模式下不同剖面层次土壤有机质含量

2.2.3 土壤氮、磷、钾 分析结果表明(表 2),土壤全氮和速效碱解氮含量的变化趋势与有机质含量变化大致相同,上层普遍高于下层;荒地土壤剖面中的碱解氮含量存在很大差异,20—40 和 40—60 cm 土层的碱解氮远小于表层含量。与未造林对照相比,不同造林模式对林地土壤的碱解氮含量得到明显提升,以刺槐白蜡混交模式含量最高,较对照增加了 157.28%,其次为刺槐白榆混交林,而刺槐臭椿模式林地速效氮增加幅度量最小。与速效氮不同,不同模式的土壤全氮含量较对照提高程度相对较小,刺槐纯林、刺槐白蜡混交林、刺槐白榆混交林和刺槐臭椿混交林的增加幅度分别为 1.62%,5.09%,5.45% 和 3.56%。

土壤有效磷的变化较为复杂,在林地剖面层次上和不同模式之间均没有发现特定的规律,这与郝金标等^[6]在对盐碱地上 15 种林分类型有效磷含量变化的研究中结果基本一致^[14],他们的研究表明,不同林分类型土壤有效磷含量有的高于未造林地,有的低于未

造林地,变化较为复杂。产生这一现象的原因目前还不清楚,可能与树种有一定的关系。与对照模式相比,刺槐白蜡、刺槐白榆混交林土壤的有效磷含量明显增加,而刺槐臭椿混交林地有效磷含量却有所减少;与刺槐纯林相比,刺槐白蜡混交后显著提高了林地土壤的速效磷含量,而刺槐与白榆和臭椿混交后的土壤有效磷含量却有所下降,但没有表现出显著性差异。分析结果表明,不同树种与刺槐混交后对林地土壤磷素状况的影响不尽相同,原因还有待进一步探讨。

与碱解氮的垂直变化规律相似,土壤速效钾含量总体上也呈现出上层大于下层的变化趋势。营造不

同模式的刺槐人工林后,林地土壤的速效钾含量得到显著提高。与刺槐纯林相比,混交林模式的表层(0—20 cm)土壤速效钾含量显著性下降,而 20—40 和 40—60 cm 土层的速效钾含量则均有一定程度的增加,这是由于钾在土壤中被容易淋溶迁移,地表枯落物分解进入表层土壤的钾养分也会有一部分迁移到下层土壤中。不同造林模式林地土壤的平均速效钾含量也存在一定差异,刺槐纯林和刺槐白蜡混交林的含量明显高于刺槐白榆、刺槐臭椿混交林,原因可能是由于刺槐、白蜡在物质循环和能量转化时分解速度较快,而白榆、臭椿枯落物分解速度较慢^[15-16]。

表 2 不同造林模式下各层土壤养分含量

土层/ cm	模式	全氮/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	交换性钙/ (g · kg ⁻¹)	交换性镁/ (g · kg ⁻¹)	有效硫/ (mg · kg ⁻¹)
0—20	CK	0.759b	34.97c	4.51a	128.44d	12.17a	0.70a	175.05a
	R	0.763b	37.02b	4.29a	245.09a	11.05b	0.43b	25.28b
	RF	0.783a	46.00a	3.40b	154.36c	12.23a	0.41b	18.08c
	RU	0.776b	38.52b	2.74c	172.97b	12.69a	0.63a	31.08b
	RA	0.785a	34.11c	2.61c	161.69b	11.56b	0.38b	33.64b
20—40	CK	0.748c	3.78d	1.77e	48.38d	10.40d	0.30d	81.70b
	R	0.752b	23.84b	4.12b	106.26c	12.45b	0.27d	17.38c
	RF	0.777a	29.76a	6.84a	159.71a	13.06a	0.99a	19.70c
	RU	0.774a	29.76a	3.33c	130.48b	12.81a	0.87b	140.45a
	RA	0.760b	21.44c	2.86d	104.90c	11.30c	0.52c	140.91a
40—60	CK	0.720d	1.00d	2.95b	45.39c	10.89b	0.51c	32.48b
	R	0.741c	22.67b	3.31a	95.55b	12.16a	0.57c	25.97b
	RF	0.773b	23.96a	2.49c	145.73a	12.83a	1.11a	15.06c
	RU	0.791a	22.33b	3.59a	101.85b	12.26a	0.90b	198.50a
	RA	0.754c	21.19c	3.11b	154.12a	12.57a	1.05a	171.10a
平均	CK	0.742d	13.22e	3.08c	74.07c	11.15c	0.50c	96.41b
	R	0.752c	27.84c	3.91b	148.96a	11.89b	0.42c	22.88c
	RF	0.778a	33.24a	4.24a	153.27a	12.71a	0.84a	17.61c
	RU	0.780a	30.20b	3.22c	135.10b	12.58a	0.80a	123.34a
	RA	0.766b	25.58d	2.86d	140.24a	11.81b	0.65b	115.22a

注:同一土层内同一列中的不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。

2.2.4 土壤钙、镁、硫 从表 2 可以看出,在滨海盐碱地营造刺槐人工林 27 a 后,林地土壤交换性钙、镁和有效硫含量产生了一定程度的变化。与荒地对照相比,各混交林模式的土壤交换性钙、镁含量总体上有明显增加,而刺槐纯林模式较对照则没有表现出明显差异。各造林模式的土壤交换性钙、镁并没有出现“表聚”现象,在垂直分布上表现为下层高于上层,但未造林地的最大值均在表层。林地土壤交换性钙、镁含量均高于未造林地,最高值分别出现在 20—40 和 40—60 cm,这与氮、磷、钾养分在土层中的垂直递减规律具有明显差异。这可能与钙镁元素在土壤中移动性较差,以及林木根系对表层土壤钙镁吸收量相对较大有关。不同土地利用模式的土壤有效硫变化趋

势与其他养分元素明显不同,刺槐纯林和刺槐白蜡混交林土壤的平均有效硫含量较对照模式显著降低,而刺槐白榆和刺槐臭椿混交林较对照则有明显提高。非林地对照的土壤有效硫含量在剖面中表现出逐层降低的趋势,而刺槐白榆、刺槐臭椿混交林的土壤有效硫含量则随土层深度的增加而显著增加,刺槐纯林和刺槐白蜡混交林则没有呈现明显规律性。由此可见,在黄河三角洲滨海盐碱地营造不同刺槐人工林,长期立地条件下对土壤钙、镁、硫等中量元素产生了显著的影响作用,但影响规律因树种构成而呈现出复杂迥异的变化规律。

2.3 土壤化学性质的相关性分析

对林地土壤不同化学性质进行相关性分析,所用

数据为各造林模式林地 0—60 cm 土层各指标的平均数,经统计分析得到各项土壤化学性质指标间的相关性。土壤有机质是土壤养分的重要来源,由表 3 可以看出,在盐碱地上植树造林,土壤有机质与全氮、速效钾、交换性钙、镁含量之间存在极显著性负相关,特别是土壤速效氮与有机质之间达到极显著正相关。而土壤盐分则与有机质含量之间存在极显著负相关,说明了通过森林植被恢复措施增加碳汇,提高土壤有机碳贮量,可以有效降低林地土壤盐分,起到生物改良盐碱地的效用。林地土壤酸碱度除与养分氮呈现负

相关以外,还与交换性钙、镁含量存在显著性负相关,这是由于交换性钙、镁在土壤中的转化主要受土壤溶液酸碱度的控制,与其中的 OH^- 含量密切相关^[17]。土壤有效硫与有效磷之间呈显著性负相关,这可能是由于它们的有效形态均为阴离子,二者会在土壤胶体表面产生一定竞争吸附作用。出乎意料的是,土壤全氮和速效氮之间虽然具有较强相关性,相关系数达到 0.8 以上,但并未达到显著性水平,原因可能在于供试人工林立地时间较长,土壤吸附态氮不断被淋溶、固定和吸附,在土壤中发生了复杂的转化过程。

表 3 土壤肥力性质指标相关性分析

项 目	有机质	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾	交换性钙	交换性镁	有效硫	pH 值	盐分
有机质	1.000									
全 氮	0.886*	1.000								
碱解氮	0.989**	0.825	1.000							
有效磷	0.482	0.185	0.583	1.000						
速效钾	0.907*	0.680	0.944*	0.537	1.000					
交换性钙	0.958*	0.900*	0.937*	0.540	0.770	1.000				
交换性镁	0.694	0.923*	0.619	0.154	0.391	0.811	1.000			
有效硫	-0.248	0.084	-0.379	-0.937*	-0.435	-0.254	0.137	1.000		
pH 值	-0.837	-0.950*	-0.800	-0.389	-0.623	-0.911*	-0.952*	0.127	1.000	
盐 分	-0.918*	-0.775	-0.910*	-0.261	0.943*	-0.769	-0.474	0.116	0.632	1.000

注: * 表示显著性相关($p<0.05$); ** 表示极显著性相关($p<0.01$)。

2.4 土壤化学性质的关联分析

从不同土地利用模式的土壤化学性质分析来看,各个指标的变化趋势并不一致。为了定量评价不同造林模式的土壤肥力,选择土壤有机质(X_1)、全氮(X_2)、碱解氮(X_3)、有效磷(X_4)、速效钾(X_5)、交换性钙(X_6)、交换性镁(X_7)、有效硫(X_8)、盐分(X_9)、pH 值(X_{10})等 10 个化学指标进行灰色关联分析。首先对数据进行标准化处理,其中土壤盐分和 pH 值取倒数正相关处理,通过公式计算出各对应点的关联系数和关联度。各指标的关联系数和关联度如表 4 所示,由计算结果可知,不同造林模式的关联度由大到小依次为:刺槐白蜡混交模式>刺槐白榆混交模式>刺槐臭椿混交模式>刺槐纯林模式>荒地,关联度越大,说明子数列与母数列的发展趋势就越接近,也就表明土壤肥力越好^[12]。土壤化学性质相关性排序结果表明,在黄河三角洲滨海盐碱地营造人工刺槐林优化了土壤理化性质,提高了肥力,刺槐混交林的效果优于刺槐纯林,其中以刺槐白蜡混交林的土壤培肥效果最好。

很明显,滨海盐碱地上营造人工林显著降低了土壤盐分,有效降低土壤碱度,提高了土壤有机质和养分含量。与刺槐纯林相比,刺槐混交林的土壤综合理化

性质得到明显改善,主要原因可能在于刺槐与其他树种混交后改善了林分结构、促进了林地养分运转。不少林业科研成果和生产实践证明,混交林可以充分利用地力,培肥林地土壤,提高林分稳定性^[18]。许多研究者对不同树种混交后的生长效应和林地土壤性质进行了探讨,多数研究结果认为混交林较纯林在各方面均具有明显的优势,可增加土壤孔隙度,提高其贮水和渗水能力^[19],能促进土壤有机物质的转化,加速营养元素的循环速率,提高土壤肥力^[20-21];另外,混交林的空间结构也得到一定优化^[22],提高了对光热利用能力,促进林分生长,从而加速光合产物向林地的输送,从而促进土壤性能的改善。同一树种与其他不同树种混交后对林分生长和林地土壤的影响作用也不尽相同,目前的研究多见于一种混交林分别与组成树种间的对比,很少有对多种混交树种进行比较研究。本研究发现,刺槐分别与白蜡、白榆和臭椿混交后,土壤化学性质虽较刺槐纯林均得到一定程度的优化,混交林提高土壤肥力的效果也要明显优于刺槐纯林,但不同混交树种的影响作用存在明显差异,具体的作用机制尚不清楚,可能与不同树种的养分互补作用,凋落物分解^[23],以及林分结构变化差异等方面有较大关系。

表 4 土壤肥力性质指标关联系数 (X_{1-10}) 与关联度

模式	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	关联度
CK	0.333 3	0.333 3	0.333 3	0.371 9	0.333 0	0.333 3	0.382 0	0.662 5	0.333 3	0.333 3	0.375 0
R	0.610 7	0.401 4	0.653 1	0.672 5	0.902 0	0.486 5	0.333 3	0.344 8	0.716 8	0.360 0	0.548 1
RF	1.000 0	0.876 9	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.333 3	0.740 9	1.000 0	0.895 1
RU	0.921 7	1.000 0	0.769 9	0.403 3	0.685 5	0.865 3	0.832 3	1.000 0	1.000 0	0.620 2	0.809 8
RA	0.597 5	0.575 8	0.570 1	0.333 3	0.752 4	0.463 8	0.522 1	0.866 7	0.941 8	0.475 2	0.609 9

3 结 论

(1) 在黄河三角洲滨海盐碱地营造人工刺槐林, 生长 27 a 后能够有效抑制土壤返盐退化、降低碱度, 且混交林的压碱排盐效果优于纯林。

(2) 林地土壤有机质随着土层深度增加明显降低, 且混交林土壤有机质含量要高于纯林, 其中刺槐白蜡混交林最高。长期立地条件下, 混交林土壤各养分含量明显增加, 但不同养分呈现不同的变化规律, 同一养分也因混交树种不同呈现不同趋势。全氮、碱解氮、速效钾随土层深度增加而下降, 土壤交换性钙、镁并没有表现出“表聚”现象, 最高值分别出现在 20—40 和 40—60 cm 土层, 土壤有效磷、有效硫含量没有明显的规律性。

(3) 相关性分析表明, 人工刺槐林地土壤盐分、全氮、速效氮、速效钾、交换性钙、镁与土壤有机质之间的相关性达到了显著或极显著水平, 土壤酸碱度与全氮、交换性钙、交换性镁存在显著性负相关, 土壤有效硫与有效磷之间呈显著性负相关。关联分析结果表明, 刺槐混交林种植模式改良土壤肥力明显优于刺槐纯林, 且不同混交模式改良土壤肥力的能力有很大差距, 以刺槐白蜡混交模式最好。

[参 考 文 献]

- [1] 张建锋, 邢尚军. 环境胁迫下刺槐人工林地土壤退化特征研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1086-1091.
- [2] 曹帮华, 吴丽云. 滨海盐碱地刺槐白蜡混交林土壤酶与养分相关性研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 128-133.
- [3] 曹帮华, 吴丽云, 宋爱云, 等. 滨海盐碱地刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 混交林土壤水盐动态[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 939-945.
- [4] 侯本栋, 马风云. 不同树种的刺槐混交林对土壤化学性质及土壤酶活性影响的研究[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2007, 38(1): 53-57.
- [5] 马风云, 白世红, 侯本栋, 等. 黄河三角洲退化人工刺槐林地土壤特征[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 74-79.
- [6] 郝金标, 邢尚军, 宋玉民, 等. 黄河三角洲不同造林模式下土壤盐分和养分的变化特征[J]. 林业科学, 2007, 43(S1): 33-38.
- [7] 吴丽云, 曹帮华, 黄彦新, 等. 滨海盐碱地刺槐臭椿混交林土壤酶活性季节动态研究[J]. 林业科学研究, 2010, 23(6): 89-894.
- [8] 李贻学, 东野光亮, 李新举. 黄河三角洲盐渍土可持续利用对策[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 55-58.
- [9] 鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 267-270.
- [10] 李志辉, 漆良华, 柏方敏, 等. 马尾松飞播林土壤肥力研究[J]. 中南林学院学报, 2004, 24(5): 32-35.
- [11] 傅立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992: 185-211.
- [12] 王昭艳, 左长清, 曹文洪, 等. 红壤丘陵区不同植被恢复模式土壤理化性质相关分析[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 715-724.
- [13] 曹汉洋. 杉木、马尾松、木荷纯林及其混交林的土壤养分状况[J]. 南京林业大学学报, 1998, 22(2): 47-50.
- [14] 于雷, 潘文利. 北方沿海泥质海岸盐渍土改良措施及效应[J]. 防护林科技, 2003, 11(4): 1-4.
- [15] 张家武, 廖利平, 李锦芳, 等. 马尾松火力楠混交林凋落物动态及其对土壤养分的影响[J]. 应用生态学报, 1993, 4(4): 356-363.
- [16] 李昌华. 杉木人工林和阔叶杂木林土壤养分平衡因素差异的初步研究[J]. 土壤学报, 1981, 18(3): 255-261.
- [17] 袁可能. 植物营养的土壤化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 222-295.
- [18] 秦娟, 刘勇, 上官周平. 子午岭林区白桦—辽东栎混交林光合生理生态特征研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(11): 2331-2337.
- [19] 邓仕坚, 张家武, 陈楚莹, 等. 不同树种混交林及其纯林对土壤理化性质影响的研究[J]. 应用生态学报, 1994, 5(2): 126-132.
- [20] 杜国坚, 黄天平, 张庆荣. 杉木混交林土壤微生物及生化特征和肥力[J]. 浙江林学院学报, 1995, 12(4): 347-352.
- [21] 沈国舫, 贾黎明, 翟明普. 沙地杨树刺槐人工混交林的改良土壤功能及养分互补关系[J]. 林业科学, 1998, 34(5): 12-20.
- [22] 郑丽凤, 周新年, 江希钿. 松阔混交林林分空间结构分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2006, 14(4): 275-280.
- [23] 吴载璋. 楠木杉木混交林生长效应研究[J]. 福建林学院学报, 2005, 25(2): 142-146.