

宫胁法造林对佛山市森林土壤质量的影响

郭雄飞¹,黎华寿¹,杨 玥²,丰雨洁¹,陈红跃^{2*}

(1. 华南农业大学 资源环境学院,广东 广州 510642;2. 华南农业大学 林学与风景园林学院,广东 广州 510642)

摘要:为了探讨不同造林方法对林地土壤质量的影响,以佛山市南海区的4种宫胁法造林地、1种传统法造林地和1种未经林分改造的林地为研究对象,对6种不同类型林地的土壤理化特性和生物学特性进行了比较分析。结果表明,除土壤自然含水量具显著性差异外,不同造林方法对土壤物理特性的影响差异不显著,相对而言,宫胁法2造林更有利于保持土壤物理特性最优化;就土壤化学特性而言,土壤有机质含量最高的为宫胁法2造林地,土壤全氮、有效氮、有效钾含量最高的为宫胁法3造林地,土壤全磷和有效磷含量最高的则为传统法造林地;就土壤生物学特性而言,各类型造林地中,宫胁法3造林地的土壤细菌、真菌和放线菌数量均表现最高,而宫胁法1和宫胁法4最低。宫胁法3和对照样地土壤酶活性均显著高于其他造林地,宫胁法2和宫胁法1造林地土壤酶活性则最低。主成分分析结果显示,不同造林方法的土壤质量综合指数为:宫胁法3>宫胁法1>宫胁法2>传统法>宫胁法4>对照,说明林分改造能有效的改良土壤质量,且宫胁法3造林改良效果最优,宜在林分改造实践中重点考虑。

关键词:宫胁法;造林方法;土壤质量;主成分分析

中图分类号:S714.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)06-0058-07

Effects of Miyawaki Forest Reconstruction Method on Forest Soil Quality in Foshan

GUO Xiong-fei¹, LI Hua-shou¹, YANG-Yue², FENG Yu-jie¹, CHEN Hong-yue^{2*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China;

2. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract:Four plots transformed with 4 types of Miyawaki Method, one with traditional method, and one without transformation in Nanhai district of Foshan were chosen to examine the effects of different afforestation methods on soil quality by measuring soil physicochemical and biological. The results showed that except for natural soil moisture, no significant effects of different afforestation methods were found on soil physical properties, while the Miyawaki Method 2 was more conducive to maintain the optimization of soil physical characteristics. As to the soil chemical properties, plantations land in which the soil organic matter content was the highest was the forestland transformed with Miyawaki Method 2, one in which the soil total nitrogen, available nitrogen and available potassium contents were the highest was the woodland transformed with Miyawaki Method 3, and one in which the soil total phosphorus and available phosphorus contents were the highest was the woodland transformed with the traditional method. As to the biological characteristics of the soil, the plantations in which the soil bacteria, fungi and actinomycetes number were the highest was the woodland transformed with Miyawaki Method 3, while those with Miyawaki method 1 and 4 were the lowest. The soil enzyme activity of the land transformed with Miyawaki Method 3 was significantly higher than those of other transformed plots, while those with Miyawaki Method 2 and Miyawaki

收稿日期:2016-01-07 修回日期:2016-03-17

基金项目:佛山市南海区农林技术推广中心资助项目(4400-h07145);香港嘉道理农场及植物园公司资助项目(4400-G05002)。

作者简介:郭雄飞,男,博士,研究方向:环境生态和森林培育。E-mail:516395612@qq.com

*通信作者:陈红跃,男,教授,研究方向:森林培育。E-mail:chenhongyuetz@126.com

Method 1 were the lowest. The results of principal component analysis showed that the order of comprehensive indexes of soil quality in the plantation lands transformed with different planting methods was Miyawaki Method 3>Miyawaki Method 1>Miyawaki Method 2>traditional method>Miyawaki Method 4>control, which illustrated that by comparison with the control plots, afforestation could improve the soil quality, and the improvement efficiency with Miyawaki Method 3 was the best and should be taken into serious consideration.

Key words: Miyawaki Method; afforestation method; soil quality; PCA

土壤质量可作为衡量土壤为植被生长发育提供良好环境条件能力的指示因子,是土壤理化特性和生物学特性的综合反映^[1]。造林作为一种备受关注的生态恢复手段,能够起到防风固沙、减缓水土流失、提高土地生产力、改善生态环境的作用^[2-5]。多研究造林与土壤特性变化的相互关系,关于不同造林方法对土壤特性的影响研究则涉及较少。宫胁法是根据群落演替理论进行快速植被恢复的造林方法,该种造林方法提倡用乡土树种营建森林^[6-8],比之传统的造林方法有建设成本低,人工管护少,能缩短郁闭成林时间,物种丰富、群落结构完整等优点。

为探讨宫胁法和目前广东常用的造林方法(传统法)对林地土壤的影响,参照宫胁法和传统法技术,在广东省佛山市南海区丹灶镇实施 5 种不同的方法造林,探讨了不同方法造林地土壤质量之间的相互关系,为造林方法的选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东省佛山市南海区($38^{\circ}39'N$, $104^{\circ}04'E$),年均气温 $22^{\circ}C$,7月平均气温 $28.8^{\circ}C$,1月平均气温 $13.3^{\circ}C$ 。年均降水量 1702 mm ;霜日少,无霜期长。该地地势平坦,西南部多为鱼塘,西北部有低丘、台地。经实地调查,研究区植被主要为潺槁木姜子(*Litsea glutinosa*)、银荷木(*Schima argentea*)、尾叶桉(*Eucalyptus uraphylla*)、仪花(*Lysidice rhodostegia*)、山黄麻(*Trema tomentosa*)、野漆树(*Toxicodendron succedaneum*)、阴香(*Cinnamomum burmanni*)、蒲桃(*Syzygium jambos*)等,总体上植被数量较少,群落结构不完整,需进行林分改造。本研究区域属于集中低丘地带,土壤类型为南方常见的山地酸性赤红壤,年降雨量大,水肥流动性强,且原生的植被稀少。故改造前土壤肥力无较大差异。改造后土壤质量结果基本能反应各种造林方法对土壤质量的影响。

1.3 研究方法

1.3.1 标准地的建立及调查

于 2010 年 11 月在佛山市南海区丹灶镇 4 个宫胁法试验区各设置 3 个

$10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的标准地,在传统法和对照区中均设置 3 个 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的标准地。以单个标准地为调查基本单位对各试验地进行调查,各改造林地基本情况和造林技术措施如表 1。于 2010 年 12 月分别在各标准地内按 S 形取样设 5 个取样点用土钻采集 0~20 cm 土层土壤样品 5 个及 1 个环刀样品,去除石块和植物根系,在同一样地 5 个取样点采集的土样在充分混匀制成混合土样,利用四分法收集 1 kg 左右作为该样地的供试土壤,每种造林方式均为 3 次重复,经去杂、风干、研磨、过筛后备用,用于土壤理化性质及生物性质的测定。

采样当天用烘干法测定土壤自然含水量,用环刀法测定土壤容重、毛管持水量、总孔隙度,用电位计法测定土壤 pH,用重铬酸钾容量法测定土壤有机质,用半微量凯氏法测定土壤全 N,用碱解扩散法测定土壤有效 N,用氢氧化钠碱熔融—钼蓝比色法测定土壤全磷(TP),用碳酸钠提取—钼蓝比色法测定土壤全 P,用氢氧化钠熔融—火焰光度法测定土壤全 K,用乙酸铵浸提—火焰光度法测定土壤有效钾,用高锰酸钾滴定法土壤过氧化氢酶活性,用脲酶活性用比色法测定脲酶活性,用磷酸苯二钠比色法测定土壤碱性磷酸酶活性。微生物数量采用稀释平板培养计数法测定,其中,土壤细菌培养基用牛肉膏蛋白胨琼脂,放线菌培养基用改良高氏 1 号琼脂,真菌的培养基用 PDA3。

在评价土壤质量的各类综合分析方法中,主成分分析法是使用的最为普遍的^[9,10]。本研究选取土壤理化性质因子(土壤容重、总孔隙度、自然含水量、有机质、全氮、全钾、有效氮、有效磷、有效钾)、土壤酶活性因子(脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶)、土壤微生物因子(细菌、真菌、放线菌)共 15 个因子作为主成分分析的综合评价指标。

1.3.2 数据处理 采用 SPSS18.0 和 Excel2007 进行数据统计和图形处理。采用单因素 ANOVA, LSD 分析检验不同造林方法对土壤物理、化学及生物学性状的影响。运用主成分分析计算不同造林方法的土壤质量指标。

表 1 改造林地标准地本底基本情况
Table 1 The basic situations in standard land

改造类型	代号	坡向	坡度/(°)	坡位	坡型	郁闭度	造林面积/ hm^2	造林密度/(株· hm^{-2})	造林措施
宫胁法 1	GX1	—	0	—	—	0.7	0.131	40 000	开穴整地, 施基肥, 不追肥
宫胁法 2	GX2	—	0	—	—	0.8	0.154	40 000	开穴整地, 不施基肥, 追肥
宫胁法 3	GX3	—	0	—	—	0.6	0.135	20 000	开穴整地, 施基肥, 不追肥
宫胁法 4	GX4	W	7	下	斜	0.6	0.135	20 000	开穴整地, 不施基肥, 追肥
传统法	CT	E30°S	6	中	斜	0.5	1.047	1 665	开穴整地, 施基肥并追肥
对照	CK	N10°W	6	下	斜	0.6	0.301		不进行林分改造

注: 坡向栏中, E30°S 表示东偏南 30°, 下同。对照为未改造的林地。

2 结果与分析

2.1 不同造林方法对土壤物理特性的影响

各林地改造类型的土壤容重为 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ~ $1.64 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 宫胁法 2 和宫胁法 4 的土壤容重最大, 其次为传统法和对照, 宫胁法 1 和宫胁法 3 的土壤容重最小。各改造类型林地的土壤自然含水量差异极显著 ($P < 0.05$), 宫胁法 1 和宫胁法 2 最大, 其次为宫胁法 3 和宫胁法 4, 传统法和对照最小。各类型改造林地中, 宫胁法 2 改造林地土壤容重和

土壤自然含水量均表现最高, 但土壤毛管持水量和毛管孔隙度则表现为宫胁法 3 最大, 宫胁法 2 最低; 总孔隙度最大的为宫胁法 1, 最小的为宫胁法 2; 非毛管孔隙度和土壤通气孔隙度均表现为对照样地最大, 宫胁法 4 最小(表 2)。总体看来, 不同造林方法对土壤不同的物理特性的影响有差异, 较之传统法和对照, 宫胁法造林能更显著的提高土壤自然含水量, 并且总体上, 与对照样地相比, 造林后土壤毛管孔隙度有所上升。

表 2 不同造林地土壤物理性质

Table 2 Soil physical properties in different afforestation lands

造林方法	土壤容重/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	土壤毛管持水量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	土壤通气孔隙度/%	自然含水量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$
GX1	$1.30 \pm 0.07\text{C}$	$264.99 \pm 4.98\text{A}$	$51.05 \pm 2.77\text{A}$	$34.39 \pm 2.45\text{A}$	$16.65 \pm 5.19\text{AB}$	$29.38 \pm 3.99\text{AB}$	$167.04 \pm 0.00\text{A}$
GX2	$1.64 \pm 0.12\text{A}$	$170.31 \pm 20.08\text{D}$	$37.97 \pm 4.64\text{C}$	$27.84 \pm 1.63\text{B}$	$10.13 \pm 3.71\text{BC}$	$23.33 \pm 5.73\text{BC}$	$189.07 \pm 0.00\text{B}$
GX3	$1.34 \pm 0.06\text{BC}$	$270.27 \pm 13.47\text{A}$	$49.28 \pm 2.24\text{AB}$	$36.34 \pm 2.76\text{A}$	$12.94 \pm 4.71\text{ABC}$	$28.80 \pm 3.14\text{AB}$	$152.40 \pm 0.00\text{C}$
GX4	$1.49 \pm 0.05\text{B}$	$236.50 \pm 7.67\text{B}$	$43.89 \pm 1.89\text{B}$	$35.14 \pm 0.76\text{A}$	$8.75 \pm 2.30\text{C}$	$19.71 \pm 2.70\text{C}$	$162.69 \pm 0.00\text{B}$
CT	$1.39 \pm 0.08\text{BC}$	$252.58 \pm 20.39\text{AB}$	$47.43 \pm 2.86\text{AB}$	$35.10 \pm 1.60\text{A}$	$12.33 \pm 2.94\text{ABC}$	$26.34 \pm 4.00\text{ABC}$	$151.41 \pm 0.00\text{D}$
CK	$1.39 \pm 0.10\text{BC}$	$210.30 \pm 9.60\text{C}$	$47.66 \pm 3.83\text{AB}$	$29.14 \pm 1.86\text{B}$	$18.52 \pm 5.40\text{A}$	$33.44 \pm 4.88\text{A}$	$102.55 \pm 0.00\text{E}$

注: 同一列中不同字母表示不同造林方法间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

2.2 不同造林方法对土壤化学特性的影响

不同类型造林地土壤化学性质(表 3)表明, 除宫胁法 3 与对照有效氮含量、宫胁法 4 和对照林地土壤酸性以及宫胁法 2 与宫胁法 3 有效磷含量无显著性差异外, 不同改造林地的土壤化学指标均具显著性差异。土壤有机质含量和 pH 值最高的均为宫胁法 2, 分别为 $19.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 5.22 , 最低的为宫胁法 1 和对照, 分别为 $6.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 4.51 。各林地土壤有效氮和有效钾含量最高的均为宫胁法 3, 为 $70.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $58.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最低的均为宫胁法 2, 为 $25.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $16.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。传统法改造林地的土壤全磷和有效磷含量在各改造林地中表现最高, 为 $0.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $8.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。全磷和有效磷含量最低的分别为宫胁法 1 和宫胁法 4, 为 $0.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。各林地土壤全氮含量最高的为宫胁法 3, 最低的为宫胁法 1, 分别为 $0.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 土壤

全钾含量最高的宫胁法 4, 最低的为宫胁法 2, 分别为 $6.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。综合分析表明, 宫胁法 3 造林地的土壤养分含量高于其他林地。

2.3 不同造林方法对土壤微生物数量的影响

6 种不同类型造林林地土壤细菌、真菌和放线菌 3 种微生物的数量(表 4)表明。土壤中 3 类微生物数量差异明显, 其数量大小均表现为细菌 > 放线菌 > 真菌; 不同类型造林地的土壤细菌、真菌和放线菌数量均表现出显著性差异, 从土壤细菌数量上看, 宫胁法 3 造林地显著高于其他类型林地, 为 $6.69 \times 10^5 \text{ CFU g}^{-1}$ 干土, 最小的为宫胁法 4, 为 $0.04 \times 10^5 \text{ CFU g}^{-1}$ 干土; 在土壤真菌数量上, 宫胁法 3 和传统法显著高于其他林地, 分别为 $1.55 \times 10^3 \text{ CFU g}^{-1}$ 干土和 $1.32 \times 10^3 \text{ CFU g}^{-1}$ 干土, 宫胁法 1 和宫胁法 4 最低, 均为 $0.08 \times 10^3 \text{ CFU g}^{-1}$ 干土; 土壤放线菌数量与真菌数量分布规律基本一致, 也表现为宫胁法 3 和传统法高于其他林地, 分别为 2.49×10^4

表3 不同造林地土壤化学性质

Table 3 Soil chemical properties in different afforestation lands

造林方法	有机质 /(g · kg ⁻¹)	全N /(g · kg ⁻¹)	全P /(g · kg ⁻¹)	全K /(g · kg ⁻¹)	有效N /(mg · kg ⁻¹)	有效P /(mg · kg ⁻¹)	有效K /(mg · kg ⁻¹)	pH
GX1	6.06±0.09E	0.36±0.00F	0.14±0.00F	5.73±0.05B	29.52±0.12D	2.27±0.11C	45.59±0.10B	5.19±0.00B
GX2	19.39±0.04F	0.37±0.01E	0.16±0.00E	2.47±0.02F	25.94±0.25E	2.65±0.00B	16.94±0.20F	5.22±0.01A
GX3	17.46±0.49A	0.91±0.02A	0.25±0.01B	4.47±0.05C	70.67±0.48A	2.65±0.00B	58.65±0.23A	4.72±0.00D
GX4	9.93±0.05D	0.55±0.00C	0.22±0.02C	6.67±0.06A	41.15±0.56C	0.92±0.02E	20.81±0.15E	4.51±0.00E
CT	11.64±0.03C	0.38±0.01D	0.26±0.04A	2.69±0.07E	59.04±0.45B	8.8±0.03A	27.45±0.45D	5.08±0.00C
CK	17.06±0.28B	0.81±0.01B	0.18±0.01D	3.75±0.02D	70.67±0.78A	2.08±0.00D	40.29±0.89C	4.51±0.00E

表4 不同造林地土壤微生物数量

Table 4 Soil microbial number in different afforestation lands

造林方法	细菌 /(10 ⁵ CFU g ⁻¹)	真菌 /(10 ³ CFU g ⁻¹)	放线菌 /(10 ⁴ CFU g ⁻¹)
GX1	0.14±0.08E	0.08±0.04E	0.10±0.05F
GX2	0.80±0.27B	0.16±0.08D	0.54±0.12D
GX3	6.69±1.42A	1.55±0.56A	2.49±0.89A
GX4	0.04±0.02F	0.08±0.02F	0.21±0.12E
CT	0.44±0.21D	1.32±0.38B	1.98±0.90B
CK	0.61±0.32C	0.65±0.25C	1.71±0.78C

CFU g⁻¹干土和 1.98×10⁴ CFU g⁻¹干土, 宫胁法 1 和宫胁法 4 最低, 分别为 0.1×10⁴ CFU g⁻¹干土和 0.21×10⁴ CFU g⁻¹干土。从上述结果可知, 各造林地中, 宫胁法 3 的土壤细菌、真菌和放线菌数量均表现最高, 而宫胁法 1 和宫胁法 4 最低。

2.4 不同造林方法对土壤酶活性的影响

6个不同类型造样地的土壤酶活性状况(图1、图2、图3), 各样地之间土壤酶活性有极显著差异($P<0.05$)。在脲酶活性上, 各样地土壤脲酶活性在 56.87~189.50 mg · kg⁻¹之间, 宫胁法 3、传统法和对照林地土壤脲酶活性显著高于其他林地, 宫胁法 2(56.87 mg · kg⁻¹)最低。在酸性磷酸酶活性上, 宫胁法 3 显著高于其他林地, 为 285.10 mg · kg⁻¹, 最小的是宫胁法 2, 为 67.43 mg · kg⁻¹。在过氧化氢酶上, 对照和宫胁法 3 林地显著高于其他林地, 分别为 1.87 mL · g⁻¹和 1.76 mL · g⁻¹, 活性较高, 宫胁法 2 和传统法林地过氧化氢酶活性最低, 分别为 0.75 mL · g⁻¹和 0.88 mL · g⁻¹。综上所述, 除对照林地土壤脲酶活性略低于传统法外, 宫胁法 3 和对照林地的土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性均最高; 除宫胁法 1 过氧化氢酶活性略高于传统法外, 宫胁法 2 和宫胁法 1 林地土壤酶活性在 6 个不同造林地中均最低。

2.5 不同造林方法的林地土壤质量的综合评价

各主成分的特征值和方差贡献率大小(表5)所示, 前 4 个主成分的特征值 >1 , 方差贡献率分别是 52.442%、20.692%、14.645% 和 8.147%, 累计贡

献率达 95.926%。土壤容重、总孔隙度、全氮、有效氮、有效钾、细菌、真菌、放线菌、脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶在主成分 1 上有较高因子负荷, 有机质和全钾在主成分 2 上有较高因子负荷, 有效磷在主成分 3 上有较高因子负荷, 自然含水量在主成分 4 上有较高因子负荷。

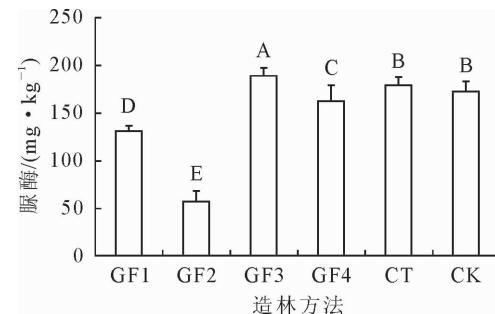


图1 不同造林地土壤脲酶活性

Fig. 1 Soil alkaline phosphatase activity of different forestlands

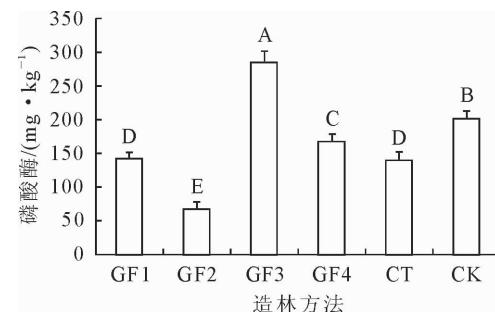


图2 不同造林地土壤磷酸酶活性

Fig. 2 Soil urease activity of different forestlands

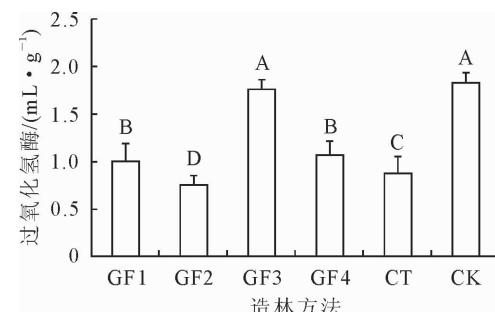


图3 不同造林地土壤过氧化氢酶活性

Fig. 3 Soil catalase activity of different forestlands

根据各变量在其主成分上的因子载荷和特征值可计算出前 4 个主成分对应的特征向量。初始因子载荷矩阵(表 6),各特征向量乘以标准化后的数据可计算出 PC1、PC2、PC3、PC4 的表达式:

$$\begin{aligned} F1 &= -0.25X_1 + 0.25X_2 - 0.25X_3 + 0.07X_4 \\ &+ 0.3X_5 + 0.02X_6 + 0.33X_7 + 0.03X_8 + 0.29X_9 + \\ &0.25X_{10} + 0.28X_{11} + 0.29X_{12} + 0.3X_{13} + \\ &0.34X_{14} + 0.31X_{15} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F2 &= 0.32X_1 - 0.33X_2 + 0.02X_3 + 0.49X_4 + \\ &0.06X_5 - 0.5X_6 + 0.14X_7 + 0.22X_8 - 0.16X_9 + \\ &0.15X_{10} + 0.25X_{11} + 0.3X_{12} - 0.14X_{13} - \\ &0.09X_{14} - 0.01X_{15} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F3 &= 0.24X_1 - 0.24X_2 + 0.3X_4 + 0.34X_5 + \\ &0.21X_6 - 0.05X_7 - 0.62X_8 + 0.05X_9 + 0.18X_{10} - \\ &0.25X_{11} - 0.15X_{12} - 0.18X_{13} + 0.15X_{14} + \\ &0.27X_{15} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F4 &= -0.08X_1 + 0.07X_2 + 0.63X_3 - 0.02X_4 \\ &- 0.08X_5 + 0.05X_6 - 0.24X_7 + 0.01X_8 + 0.32X_9 \\ &+ 0.55X_{10} + 0.2X_{11} + 0.04X_{12} - 0.17X_{13} + \\ &0.11X_{14} - 0.19X_{15} \end{aligned}$$

表 5 主成分分析结果

Table 5 Results of principal component analysis

土壤质量指标	主成份 1	主成份 2	主成份 3	主成份 4	
土壤容重	-0.701	0.566	0.363	-0.09	
总孔隙度	0.693	-0.584	-0.354	0.075	
自然含水量	-0.699	0.034	-0.002	0.700	
有机质	0.195	0.864	0.449	-0.02	
全氮	0.850	0.111	0.501	-0.09	
全钾	0.049	-0.881	0.318	0.053	
有效氮	0.921	0.246	-0.079	-0.270	
有效磷	0.078	0.392	-0.914	0.015	
有效钾	0.817	-0.282	0.068	0.353	
细菌	0.694	0.258	0.270	0.611	
真菌	0.777	0.433	-0.372	0.225	
放线菌	0.823	0.521	-0.221	0.039	
脲酶	0.836	-0.252	-0.263	-0.190	
磷酸酶	0.940	-0.156	0.219	0.121	
过氧化氢酶	0.881	-0.010	0.403	-0.210	

表 6 初始因子载荷矩阵

Table 6 Component matrix

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
因子 1	7.866	52.442	52.442
因子 2	3.104	20.692	73.134
因子 3	2.197	14.645	87.779
因子 4	1.222	8.147	95.926

将标准化的数据分别代入上述 4 个主成分表达式中,得到不同造林地土壤在 4 个主成分上的得分。再根据 $F = \sum b_i F_i = a_1 F_1 + a_2 F_2 + \dots + a_j F_j$, 其

中, F 为综合主成分得分, $F_1, F_2 \dots F_j$ 为各主成分分值, $a_1, a_2 \dots a_j$ 为各主成分特征值与所提取的主成分特征值总和之比, 得到: $F = -0.038X_1 + 0.035X_2 - 0.079X_3 + 0.188X_4 + 0.222X_5 - 0.061X_6 + 0.183X_7 - 0.03X_8 + 0.159X_9 + 0.243X_{10} + 0.186X_{11} + 0.204X_{12} + 0.092X_{13} + 0.199X_{14} + 0.193X_{15}$ 。

X_1 表示土壤容重, X_2 表示总孔隙度, X_3 表示自然含水量, X_4 表示有机质, X_5 表示全氮, X_6 表示全钾, X_7 表示有效氮, X_8 表示有效磷, X_9 表示有效钾, X_{10} 表示脲酶, X_{11} 表示磷酸酶, X_{12} 表示过氧化氢酶, X_{13} 表示细菌, X_{14} 表示真菌, X_{15} 表示放线菌。

由此求得各综合主成分值(表 7)可知, 不同林分改造类型土壤综合质量优劣排序为: 宫胁法 3 (0.05) > 宫胁法 1 (0.04) > 宫胁法 2 (0.12) > 传统法 (-0.04) > 宫胁法 4 (-0.02) > 对照 (-0.15)。

表 7 主成分分值

Table 7 Scores of principal components

造林方法	Z1	Z2	Z3	Z4	Z	排名
GX1	0	-2.69	-0.57	0.64	0.05	2
GX2	-3.87	2.17	0.9	0.45	0.04	3
GX3	4.04	0.59	0.79	1.41	0.12	1
GX4	-1.45	-1.44	0.92	-0.49	-0.04	5
CT	0.23	1.04	-2.79	-0.23	-0.02	4
CK	2.17	0.32	0.75	-1.79	-0.15	6

3 结论与讨论

3.1 不同造林方法林地土壤物理特性

土壤物理特性是反映土壤综合质量的重要因素,且土壤物理性质的优劣由土壤容重、土壤孔隙度、土壤毛管含水量、土壤自然含水量等因素共同决定。其中,土壤容重可作为反映土壤空隙大小和紧实度的重要指示因子^[11]。土壤含水量是植物生长发育的重要环境因子^[12]。不同林地利用方式可影响土壤容重的大小^[13-15]。本研究不同造林地中,除土壤自然含水量差异显著外,土壤容重、土壤毛管持水量、土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度和土壤通气孔隙度均无显著性差异。由宫胁法 2 改造的林地土壤容重和土壤自然含水量均较高,说明其在保持土壤紧实结构和土壤含水量上表现最优,但在土壤毛管持水量和土壤孔隙度上宫胁法 2 则表现较低,宫胁法 3 表现最高。总体上,宫胁法 2 造林更有利保持土壤物理特性最优化,可能与宫胁法的造林密度与施肥模式有关,宫胁法 2 林分郁闭度大,植被生长状况良好,对土壤水土保持效应更优,更有利维持

土壤空隙结构和保持土壤含水量。

3.2 不同造林方法林地土壤化学特性

评价土壤综合质量的基本化学性质因子有:有机质、全N、全P、全K、有效N、有效P、有效钾、pH等。土壤有机质含量决定着土壤的结实度、持水能力、营养保持能力、脆弱性等土壤功能^[16],是土壤质量评价中的一个重要的参数^[17]。土壤养分与地上植被的生长发育状况有着密切的联系^[18]。退耕后用林草进行植被恢复可以增加土壤全氮和有机质含量^[19]。本研究不同改造类型的林地土壤化学特性差异显著,其中,土壤有机质含量最高的为宫胁法2改造的林地,土壤全氮、有效氮、有效钾含量最高的为宫胁法3改造的林地,土壤全磷和有效磷含量最高的则为传统法改造林地。综合考虑,宫胁法3造林地土壤养分含量最高,表明宫胁法3造林更有利于改善土壤肥力,可能原因是宫胁法2与宫胁法3样地造林密度大,植被丰富,林地表层凋落物含量丰富,微生物分解后进入土壤,丰富了土壤养分。

3.3 不同造林方法林地土壤生物学特性

土壤的生物学特性能灵敏地反映出土壤质量和健康程度的变化情况^[20]。而土壤酶活性和土壤微生物均可作为反映土壤生物学特性的重要因子^[21-22]。土壤酶在土壤生化反应过程中扮演重要作用^[23],与土壤肥力关系密切。土壤微生物是衡量土壤综合质量的关键指标^[24-25]。相比土壤养分,土壤酶活性和土壤微生物数量用于评价土壤养分更为合理^[26]。本研究各类型造林地中,宫胁法3造林地的土壤细菌、真菌和放线菌数量均表现最高,而宫胁法1和宫胁法4最低。就土壤酶活性而言,宫胁法3和对照样地均显著高于其他造林样地,宫胁法2和宫胁法1最低。本研究土壤酶活性和土壤微生物数量之间相关性不明显,可能与调查地造林年限过短及过多的人为干扰有关。

3.4 不同造林方法林地土壤质量综合评价

应用主成分分析法探讨了宫胁法与传统法造林对林地土壤质量的影响。无论是宫胁法还是传统法造林,经林分改造后的林地土壤质量均高于未经林分改造的对照林地的土壤质量,说明林分改造有助于改良林地土壤质量。对比传统法和宫胁法2种造林方法,除宫胁法4土壤综合质量得分略小于传统法外,其他3种宫胁法改造的林地土壤质量均优于传统法,说明宫胁法造林对土壤质量的改良效果优于传统法。对比4种宫胁法的土壤改良效果,以宫胁法3的最优,其次为宫胁法2与宫胁法1,据此,宫胁法3和宫胁法2为该地进行林分改造的主要推荐方法。可为林分改造工作提供参考依据。

本研究宫胁法3对土壤的改良效果最优,而4种宫胁法造林所采取的造林密度和施肥方式有所差异,说明在造林实践过程中,需因地制宜的设置合理的造林密度和施肥方式。因造林年限较短,加之林地所受的人为干预较大,缺乏长期的定量观测,因此,欲更科学合理的探讨造林方法对林地土壤质量的影响,还需在尽可能排除外界干扰的情况下,进行长期定点、定位观测,并获得充足有效的实验数据。

参考文献:

- [1] 郭永红,张义华,张宏霞,等.天水市退耕还林(草)不同造林模式对土壤养分的影响[J].安徽农业科学,2010,38(30):16980-16983.
- [2] 胡亚林,曾德慧,范志平,等.半干旱区沙质退化草地造林对土壤质量的影响[J].应用生态学报,2007,18(11):2391-2397.
HU Y L, ZENG D H, FAN Z P, et al. Effects of degraded sandy grassland afforestation on soil quality in semi-arid area of Northern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11):2391- 2397. (in Chinese)
- [3] BERTHRONG S T, JOBBAGY E G, JACKSON R B. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation[J]. Ecol. Appl., 2009, 19(8): 2228-2241.
- [4] CHEN C R, CONDRON L M, XU Z H. Impacts of grassland afforestation with coniferous trees on soil phosphorus dynamics and associated microbial processes:a review[J]. Forest Ecology and Management,2008,255(3):396-409.
- [5] MAESTRE F T, JORDI C. Are Pinus halepensis plantations useful as a restoration tool in semiarid Mediterranean areas? [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 198(1/3): 303-317.
- [6] MIYAWAKI A, GOLLEY F B. Forest reconstruction as ecological engineering[J]. Ecological Engineering,1993,2(4):333-345.
- [7] 王仁卿,藤原一绘,尤海梅.森林植被恢复的理论和实践:用乡土树种重建当地森林—宫胁森林重建法介绍[J].植物生态学报,2002,26(Supp. 1):133-139.
- [8] MIYAWAKI A. Restoration of urban green environments based on the theories of vegetation ecology[J]. Ecological Engineering,1998, 11(1/4):157-165.
- [9] 江春玉,李忠佩,张怡,等.基于养分含量和生化性状的南京城郊设施蔬菜土壤质量评价[J].江苏农业学报,2014,30(2):296-303.
JIANG C Y, LI Z P, ZHANG Y, et al. Quality assessment of greenhouse vegetable soils in suburbs of Nanjing city based on analyses of nutrient content and biochemical properties[J]. Jiangsu J. of Agr. Sci. ,2014,30(2):296-303. (in Chinese)
- [10] 陈吉,赵炳梓,张佳宝,等.主成分分析方法在长期施肥土壤质量评价中的应用[J].土壤,2010,42(3):415-420.
CHEN J, ZHAO B Z, ZHANG J B, et al. Application of principal component analysis in evaluation of soil quality under different long-term fertilization[J]. Soils, 2010, 42 (3): 415-420. (in Chinese)

- [11] 赵泽松,黄琰,马春梅,等.耕作方式对大豆田土壤水分及容重的影响[J].农机化研究,2010,30(7):181-184.
- [12] 王昕,孙永林,刘西平.土壤含水量对刺槐光合能力和碳水化合物分配的影响[J].西北林学院学报,2015,30(1):20-25.
WANG X,SUN Y L ,LIU X P . Effects of soil water contents on leaf photosynthesis and carbohydrate partitioning in *Robinia pseudoacacia*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(1):20-25. (in Chinese)
- [13] BRONSON K F,ZOBECK T M,CHUA T T,et al. Carbon and nitrogen pools of southern high plains cropland and grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal,2004,68(5):1695.
- [14] MURTY D,KIRSCHBAUM M U F,MCMURTRIE R E,et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? a review of the literature[J]. Global Change Biology,2002,8(2):105-123.
- [15] 王洪杰,李宪文,史学正,等.不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J].水土保持学报,2003,17(2):44-46.
WANG H J,LI X W,SHI X Z,et al. Distribution of soil nutrient under different land use and relationship between soil nutrient and soil granule composition[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2003,17(2):44-46. (in Chinese)
- [16] DUMANSKI J,PIERIB C. Land quality indicators: research plan[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2000,81(2):93-102.
- [17] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价[J].生态学报,2006,26(3):901-913.
LIU Z F ,FU B J,LIU G H,et al. Soil quality;concept,indicators and its assessment[J]. Acta Ecologica Sinica,2006,26(3):901-913. (in Chinese)
- [18] 梁剑.四川洪雅几种退耕还林模式土壤改良效果的研究[D].成都:四川农业大学,2005.
- [19] 董丽娜,罗文林,韩凤鹏,等.植被恢复过程中土壤养分的变化[J].安徽农业科学,2008,36(15):6407-6409.
DONG Lina,LUO W L,HAN F P,et al. Influence of the vegetation restoration process on nutrient in Zhifanggou Water-
- shed[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2008, 36 (15): 6407-6409. (in Chinese)
- [20] 魏婉.不同植被恢复模式对土壤质量的影响[D].南京:南京林业大学,2010.
- [21] 刘世梁,傅伯杰,刘国华,等.我国土壤质量及其评价研究的进展[J].土壤通报,2006,37(1):131-134.
LIU S L,FU B J,LIU G H ,et al. Research review of quantitative evaluation of soil quality in China[J]. Chinese Journal of Soil Science,2006,37(1):131-134. (in Chinese)
- [22] 王倩,安贵阳,李世芳,等.不同覆盖模式对旱地苹果园土壤养分、微生物和酶活性的影响[J].西北农业学报,2015,24(7):69-74.
WANG Q,AN G Y,LI S F,et al. Soil nutrients ,enzyme activities and microbes in non-irrigation apple orchard under different mulching managements[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica,2015,24(7):69-74. (in Chinese)
- [23] 吕瑞恒,梁继业,于军,等.和田河上游灰杨不同林型土壤理化性质及酶活性分析[J].西北林学院学报,2015,30(2):27-32.
LYU R H,LIANG J Y,YU J,et al. Physicochemical properties and enzymatic activities of different *Populus pruinosa* forest types in the up reaches of Hotan River[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(2):27-32. (in Chinese)
- [24] STENBERG B. Monitoring soil quality of arable land: microbiological indicators[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science,1999,49(1):1-24.
- [25] JORDAN D,KREMER R J,BERGFIELD W A,et al. Evaluation of microbial methods as potential indicators of soil quality in historical agricultural fields[J]. Biology and Fertility of Soils,1995,19(4):297-302.
- [26] 郭萍,文庭池,董玲玲,等.施肥对土壤养分含量、微生物数量和酶活性的影响[J].农业现代化研究,2011,32(3):362-366.
GUO P,WEN T C,DONG L L,et al. Effect of fertilizer to content of soil nutrient,amount of soil microorganism and soil enzyme activities[J]. Research of Agricultural Modernization,2011,32(3):362-366. (in Chinese)

(上接第 57 页)

- [25] 王俊峰,郑小贤.福建三明常绿阔叶次生林物种多样性及群落演替[J].西北林学院学报,2015,30(5): 39-45.
WANG J F,ZHENG X X. Species diversity and community succession of evergreen broad-leaved secondary forests in Sanming [J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(5): 39-45. (in Chinese)
- [26] DOWNING A L,BROWN B L,LEIBOLD M A. Multiple diversity stability mechanisms enhance population and community stability in aquatic food webs [J]. Ecology,2014,95(1):173-184.
- [27] 陈璟.莽山自然保护区南方铁杉种群物种多样性和稳定性研究[J].中国农学通报,2010,26(12): 81-85.
CHENG J. The species diversity and stability of *Tsuga tchekiangensis* communityin Mang Mountain Nature Reserve [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(12): 81-85. (in Chinese)
- [28] MOUGI A,KONDOH M. Diversity of interaction types and ecological community stability[J]. Science,2012,337(6092):349-351.