

湘西武陵石漠化不同造林修复模式土壤理化特性分析

李贵¹, 陈瑞¹, 吴敏¹, 刘振华¹, 童方平^{1*}, 刘森², 邓莞礼²

(1.湖南省林业科学院, 长沙 410004; 2.中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要:【目的】为检测湘西武陵石漠化造林成效, 选择出石漠化最佳造林配置修复模式。【方法】以桑植县石漠化 6 个不同修复模式林地为研究对象, 分析各修复模式土壤理化特性及差异, 并进行土壤质量综合评价。【结果】石漠化不同植被修复模式土壤理化特性差异明显, 5 种造林修复模式的土壤毛管孔隙度、容重、速效 P、速效 K 及有机质含量与对照模式(荒山荒地)之间均存在显著性差异, 其他理化指标在部分模式与对照之间也存在显著差异。土壤容重与其他理化指标均呈负相关, 土壤全 N、全 P、全 K、碱解 N、有机质及其他 3 个物理指标间均呈正相关。主成分分析权重系数均超过 0.8 的指标有全 N、全 K、速效 K、有机质、总孔隙度、容重、含水率、毛管孔隙度, 表明这些指标可以作为研究区土壤理化特性的主要表征指标。土壤质量综合评分结果表明, 6 个植被修复模式得分排序为: 5 针+5 阔>3 针+7 阔>针叶林>7 针+3 阔>阔叶林>CK(荒山荒地)。【结论】植树造林有利于改善石漠化区土壤质量, 通过近 30 年的植物修复, 石漠化土壤养分水平得到了显著提高, 除碱解 N、全 P 含量尚处于较低水平外, 其他养分指标均恢复到中上及以上水平。

关键词:桑植县; 石漠化; 修复模式; 土壤理化

Analysis of Soil Physicochemical Characteristics of Different Afforestation Modes in Rocky Desertification of western Hunan Wuling, China

LI Gui¹, CHEN Rui¹, WU Min¹, LIU Zhenhua¹, TONG Fangping¹, LIU Sen², DENG Yuanli²

(1.Hunan Forestry Academy, Changsha Hunan, Changsha 410004; 2.Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004)

Abstract: 【Objective】The aim of this study was to test the effectiveness of afforestation for rocky desertification in Wuling, selected the best plant configuration restoration mode of rocky desertification area of western Hunan, China. 【Method】In Sangzhi county, took the forest land of different restoration modes of rocky desertification in Sangzhi County as the research object, compared the soil physiochemical properties and differences of each restoration mode, and comprehensive evaluation of soil quality of each mode. 【Result】in the study area, the soil physiochemical properties of rocky desertification forest land in different restoration modes were significantly different. There were significant differences in soil bulk density, capillary porosity, organic matter, available P and available K content between the five afforestation restoration modes and the control mode. There were also significant differences in other physical and chemical indicators between some models and the control. Soil bulk density was negatively correlated with other physiochemical indicators, indicating that the greater the soil bulk density, the lower the various nutrient contents. The soil water content, total porosity, capillary porosity and organic matter, total N, alkali-hydrolyzable N, total P and total K content of rocky desertification forest land were positively correlated with each other. Principal component analysis showed that the weight coefficients of bulk density, water content, total porosity, capillary porosity, total N, total K, available K and organic matter content of rocky desertification forest land were larger than 0.8, indicating that these indexes were the main indexes to characterize the physiochemical properties of soil in rocky desertification forest land. The comprehensive evaluation of soil quality of each mode was comprehensively scored, and the mode score was order as 5 coniferous+ 5 broad-leaved > 3 coniferous + 7 broad-leaved > coniferous forest > 7 coniferous + 3 broad-leaved > broad-leaved forest > CK(barren hills and wasteland). 【Conclusion】Our results demonstrated that afforestation was beneficial to improve the soil quality in rocky desertification area, through nearly 30 years of phytoremediation, the nutrient level of rocky desertification soil has been significantly improved. Except that the contents of alkali-hydrolyzable N and total P were still keep a low level, other nutrient indicators have risen to the upper-middle and above levels.

Key words: Sangzhi county; rocky desertification; restoration mode; soil physiochemical.

喀斯特地区的石漠化问题是全球范围内的重大生态、经济和环境问题^[1]。湖南是我国的石漠化大省,

岩溶石漠化面积达5.4万hm²，湘西石漠化区是我省主要的石漠化地区，人地矛盾日益突出，贫困人口相对集中，石漠化治理已成为当地社会发展的重要内容之一^[2]，“绿水青山就是金山银山”，湘西石漠化地区是绿色湖南、乡村振兴建设的重点区域之一。目前石漠化生态治理存在一系列问题，其中石漠化适生树种选择、生态治理指标、生物多样性、群落特征、森林服务多功能及可持续性评估等是石漠化生态修复的热点内容，石漠化生态治理已成为当今经济社会建设中的主要内容^[3-4]。

在石漠化森林生态系统的演变过程中，土壤理化特性具有重要的指示作用，是反应土壤综合质量的主要表征指标^[5-6]，在林业实际生产中常通过土壤容重、孔隙度、有机质、氮、磷、钾养分含量等土壤理化指标来评价土壤质量情况^[7]，并对土壤养分进行综合分析来衡量土壤质量水平^[8-11]。近年来，石漠化生态修复多采用人工植树造林来增加植被覆盖率，涵养水源，固持水土，减少侵蚀，从而达到植被恢复及生态修复的目的，然而由于石漠化土壤干旱贫瘠的特点，需要考虑选择适生树种及配置模式，否则会导致造林成活率低、植物生长受阻、修复效果不理想等一系列问题^[12-14]。一些研究报道了石漠化造成土壤理化性质恶化、养分降低，影响了植物的生长发育^[15-16]。在湘西桑植石漠化生态修复区内，近30年来营建了多种植被配置模式的石漠化生态修复林，为检验造林修复效果，寻找最佳植被修复模式，本研究在前期研究的基础上，选择6个植被修复模式，比较不同修复模式的土壤理化计量特征，探索植树对石漠化土壤理化特性的影响，为我国南方石漠化生态修复提供理论参考及实践依据。

1 研究区概况

研究区位于湘西典型石漠化区的桑植县，属中亚内陆季风气候，年平均温度为 15~17℃，最高温度 39℃，最低温度 3℃；年平均降雨量 900~2000 毫米之间，无霜期 260~330 天，春夏多雨，秋季干旱。调查区母岩为石灰岩，土层较浅薄，大都在 10~30 厘米，原生植被基本上被破坏，现以次生林为主，其中常见乔木主要以马尾松（*Pinus massoniana*）、柏木（*Cupressus funebris*）、杉木（*Cunninghamia lanceolata*）为主，灌木层以川莓（*Rubus setchuenensis*）、野蔷薇（*Rose multiflora*）、薄叶鼠李（*Rhamnus leptophylla*）、球核荚蒾（*Viburnum propinquum*）等刺灌木为主，草本层主要有堇菜（*Viola verecunda*）、五节芒（*Miscanthus floridulus*）、柄状苔草（*Carex pediformis*）等常见种类。研究区设置 6 个植被修复模式，含 1 个对照模式 CK（荒山荒地），优势植物为丝茅（*Imperata koenigii*）；5 个造林修复模式，优势树种主要有马尾松、柏木、杉木、枫香（*Liquidambar formosana*）、合欢（*Albizia julibrissin*）、马褂木（*Liriodendron chinense*）、朴树（*Celtis sinensis*）、板栗（*Castanea mollissima*）、樟树（*Cinnamomum bodinieri*）、麻栎（*Quercus acutissima*）、刺楸（*Kalopanax septemlobus*）等，5 个造林修复模式均为天然次生林，郁闭度为 0.8 以上。不同修复模式基本信息见表 1。

表 1 不同修复模式石漠化林地基本信息
Tab.1 Basic information of different restoration modes

模式 号mode No.	修复模式 mode	优势植物Dominant plants	小地名 place name	土壤类型soil type	样地数sampling sites
CK	荒山荒地	丝茅	乔之湾	黄壤、黄色石灰土	3
10C	针叶林	马尾松、杉木、柏木	长裕	黄壤、黄色石灰土	3
7C3B	7针+3阔	柏木、马尾松、枫香、合欢	洪家关	黄壤、黄色石灰土	3
5C5B	5针+5阔	柏木、杉木、马褂木、泡桐	高家湾	黄壤、黄色石灰土	3
3C7B	3针+7阔	马尾松、樟树、朴树、板栗	丝茅岗	黄壤、黄色石灰土	3
10B	阔叶林	马褂木、樟树、麻栎、刺楸	杨家湾	黄壤、黄色石灰土	3

2 研究方法

2.1 样地设置

在研究区的7针3阔混交林、5针5阔混交林、3针7阔混交林、针叶林、阔叶林和荒山荒地（对照）等石漠化不同修复模式的代表性地段内，选择坡向、坡度、土壤等立地因子基本一致的地块，设置20m×30m样地，在样地内沿对角线布设 3 个土壤采样点，10cm土层处分别采集土壤环刀样品装入自封袋，作为土壤物理性质测试用，同时采集0~20 cm混合土样300g，供土壤化学性质测试用，3 次重复。土壤养分相关分级标准见表2。

表 2 全国土壤养分含量分级标准表
Tab.2 National soil nutrient content classification standard

级别level 指标Indicator	极高extremely high	高 high	中上 upper middle	中 medium	低 low	极低 extremely low
有机质 (g·kg ⁻¹)	> 40.00	30.00~40.00	20.00~30.00	10.00~20.00	6.00~10.00	< 6.00
全N (g·kg ⁻¹)	> 2.00	1.50~2.00	1.00~1.50	0.75~1.00	0.50~0.75	< 0.50
碱解N (mg·kg ⁻¹)	> 150.0	120.0~150.0	90.0~120.0	60.0~90.0	30.0~60.0	< 30.0
全P (g·kg ⁻¹)	> 2.00	1.50~2.00	1.00~1.50	0.75~1.00	0.50~0.75	< 0.50
速效P (mg·kg ⁻¹)	> 40.00	20.00~40.00	10.00~20.00	5.00~10.00	3.00~5.00	< 3.00
全K (g·kg ⁻¹)	> 20.00	15.00~20.00	10.00~15.00	5.00~10.00	3.00~5.00	< 3.00
速效K (mg·kg ⁻¹)	> 200.0	150.0~200.0	100.0~150.0	50.0~100.0	30.0~50.0	< 30.0

2 研究方法

- 2.2.1 土壤物理性质测定 土壤容重、土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度、土壤含水率测定采用环刀法，测试方法参照行业标准《NY/T 1121-2006》^[17]。
- 2.2.2 土壤化学性质测定 pH 值采用电位法测定；有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定；全K、速效K含量采用火焰光度计法测定；全P、速效P采用钼锑抗比色法测定；土壤全N采用蒸馏定氮法测定；碱解N采用碱解扩散法测定。以上测试参照土壤农化分析^[18]。
- 2.2.3 数据处理 采用Excel 2007进行数据统计，利用SPSS 19.0 软件进行方差分析、多重比较及主成分分析等。

3 结果与分析

3.1 不同修复模式林地土壤物理特性

方差分析结果表明(图1)：石漠化不同植被修复模式土壤物理特性存在一定的差异。CK模式（荒山荒地）的土壤容重最大，达到1.516g/cm³，均显著大于其他5个造林修复模式土壤的，且其他修复模式之间土壤容重差异不显著，各修复模式的土壤容重数值位于1.362 g/cm³~1.394 g/cm³(图1-A)；CK的土壤含水率最小，只有19.02%，且均显著小于其他5种修复模式林地的，5种修复模式中只有5C5B模式点土壤含水率与其他4模式间存在显著差异(图1-B)；CK的土壤总孔隙度最小，只有40.46%，且均显著小于其他5种修复模式林地的，5种修复模式土壤总孔隙度值位于44.09%~46.18 %之间，但5个修复模式间土壤总孔隙度差异不显著(图1-C)；CK的土壤毛管孔隙度最小，只有37.01%，且均显著小于其他5种修复模式林地的，5种修复模式土壤毛管孔隙度值位于41.31%~42.05%之间、但5个修复模式间土壤总孔隙度差异不显著(图1-D)。分析结果说明经过多年的植物生长修复，石漠化林地土壤得到一定程度的修复，土壤物理性质得到一定的改善，土壤板结得到一定程度的缓解。

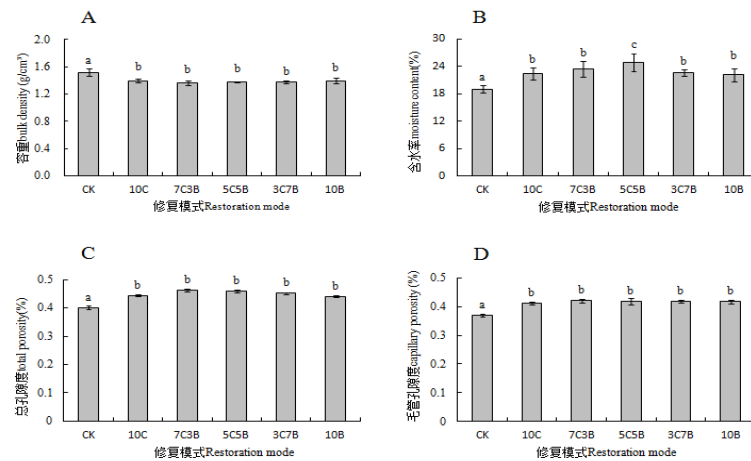


图1 不同修复模式石漠化林地土壤物理特性

Fig.1 Comparisons of soil physical properties of different restoration mode

注: 具有相同字母表示无显著差异, 无相同字母表示具有显著差异, 下同。The same letter indicates no significant difference, while not having the same letter indicates significant difference, the same below.

3.2 不同植被修复模式土壤化学特性

方差分析表明 (图2): 石漠化不同植被修复模式土壤化学特性存在明显的差异, 各模式间只有土壤pH值没有显著差异 (图2-I), 其他指标则存在一定的显著差异。除10B模式土壤有效P含量与CK模式差异不显著 (图2-E), 其他5个造林修复模式土壤全N、碱解N、全P、全K、速效K、有机质、有效Ca含量与CK模式都存在显著差异性, 其中各模式间土壤化学指标均存在显著差异的有全P含量 (图2-B), 个别除外, 各模式间的全K、碱解N、速效K含量均存在显著差异 (图2- C、F); 而5个修复模式两两之间的全N、有机质、有效Ca含量只有部分有显著差异 (图2- A、D、G、H)。

对照土壤养分分级标准, 发现研经过近30年造林植被恢复, 各植被修复模式除土壤全P、碱解N尚处于较低水平, 其他养分均达到中上及以上水平。

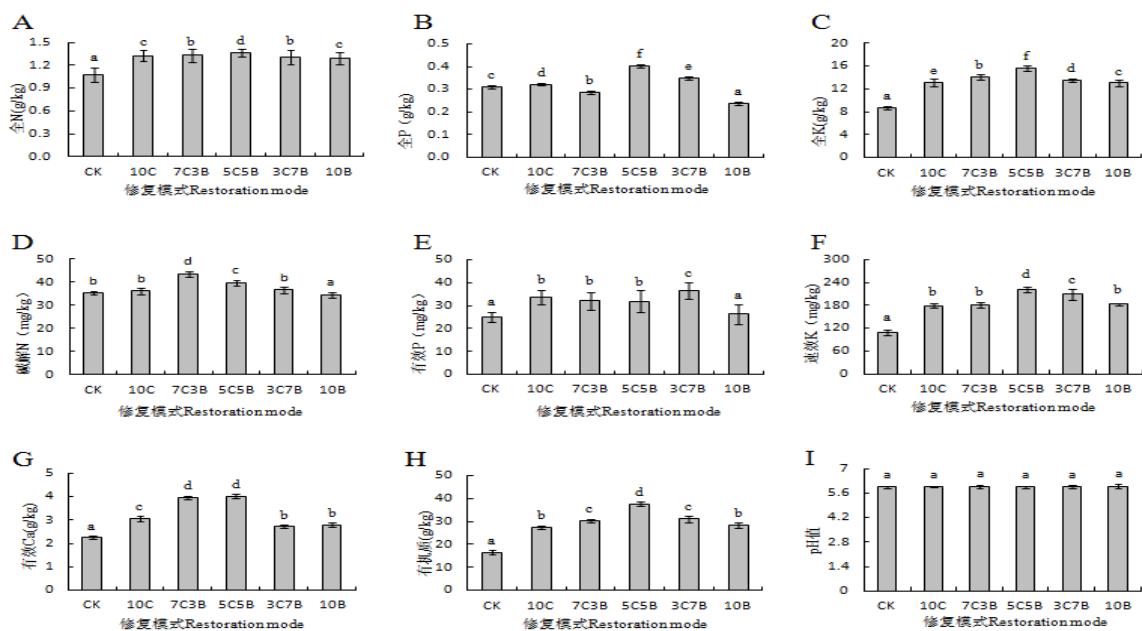


图2 不同修复模式石漠化林地土壤化学特性

Fig.2 Comparisons of soil chemical properties of different restoration mode

3.3 石漠化林地土壤理化性质相关性

相关性分析结果表明(表3)，石漠化土壤容重与其他理化计量指标均呈负相关，表明土壤容重越小，土壤各养分质量越高。土壤全N、全P、全K、碱解N、有机质及其他3个物理指标（含水量、总孔隙度、毛管孔隙度）间均呈正相关，表明这些指标具有相似的变化规律，几个指标间相互关联相互影响。由此可见，容重较轻的疏松表层土壤有利于土壤养分积累与循环，而表层板结致密则会影响养分淋溶与迁移。

表3 石漠化林地土壤理化性质的相关性

Tab.3 Correlation of soil physical-chemical factors rocky desertification forest land

因素Factor	容重bulk density	含水率water content	总孔隙度total porosity	毛管孔隙度capillary porosity	全N atotal N	全P total P	全K total K	碱解N Alkaline hydrolysis N	速效P available P	速效K available K	有效Ca available Ca	有机质 organic matter	pH
容重	1												
含水率	-0.911	1											
总孔隙度	-0.982	0.958	1										
毛管孔隙度	-0.981	0.891	0.948	1									
全N	-0.971	0.958	0.965	0.968	1								
全P	-0.164	0.427	0.279	0.100	0.273	1							
全K	-0.936	0.994	0.965	0.931	0.979	0.374	1						
碱解N	-0.542	0.597	0.650	0.400	0.465	0.259	0.533	1					
速效P	-0.727	0.620	0.709	0.657	0.690	0.537	0.636	0.365	1				
速效K	-0.886	0.925	0.896	0.914	0.933	0.443	0.950	0.324	0.701	1			
有效Ca	-0.726	0.871	0.824	0.643	0.754	0.360	0.822	0.857	0.393	0.624	1		
有机质	-0.878	0.979	0.923	0.885	0.935	0.478	0.982	0.481	0.623	0.973	0.775	1	
pH值	-0.453	0.438	0.441	0.514	0.450	-0.527	0.455	0.279	-0.279	0.291	0.484	0.376	1

3.4 不同修复模式土壤质量评价

基于13个土壤理化指标的主成分分析得到3个主成分（表4），其中F1、F2、F3的贡献率分别为71.953%、14.498%、8.546%，贡献率累计达94.997%，说明这3个主成分保留了土壤质量评价指标的绝大部分信息，可以作为本次土壤质量综合评价的依据。主成分 F1 占比最大，其中毛管孔隙度、速效K、容重、全N、全K、含水率、总孔隙度、有机质含量的权重系数均超过了0.8，表明主成分 F1 主要反映以上指标的土壤理化性质，同理，F2、F3主要反映碱解N、有效Ca以及全P的权重特性。

表4 石漠化林地土壤质量主成分因子矩阵

Tab.4 Principal component factor matrix of rocky desertification forest land						
因子Factor	因子矩阵 Factor Matrix			得分矩阵 Score Matrix		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
容重	-0.927	-0.303	0.057	-0.150	0.065	0.060
含水率	0.860	0.484	0.065	0.071	0.094	0.012
总孔隙度	0.885	0.447	0.008	0.091	0.057	-0.020
毛管孔隙度	0.969	0.172	-0.138	0.204	-0.177	-0.108
全N	0.950	0.288	-0.012	0.159	-0.082	-0.037
全P	0.216	0.280	0.872	-0.065	0.161	0.463
全K	0.909	0.397	0.029	0.112	0.013	-0.011
碱解N	0.222	0.925	0.057	-0.232	0.620	0.043
有效P	0.704	0.070	0.577	0.139	-0.154	0.281
速效K	0.955	0.151	0.159	0.196	-0.181	0.051
有效Ca	0.524	0.840	-0.016	-0.124	0.461	-0.010
有机质	0.890	0.361	0.122	0.115	-0.005	0.038
pH值	0.370	0.316	-0.859	0.032	0.100	-0.465
方差贡献率/%	71.953	14.498	8.546			
累计贡献率/%	71.953	86.451	94.997			

根据因子得分系数，得到3个主成分得分函数：

$$F_1 = -0.150X_1 + 0.071X_2 + 0.091X_3 + 0.204X_4 + 0.159X_5 - 0.065X_6 + 0.112X_7 - 0.232X_8 + 0.139X_9 + 0.196X_{10} - 0.124X_{11} + 0.115X_{12} + 0.032X_{13} \quad (1)$$

$$F_2 = 0.065X_1 + 0.094X_2 + 0.057X_3 - 0.177X_4 - 0.082X_5 + 0.161X_6 + 0.013X_7 + 0.620X_8 - 0.154X_9 - 0.181X_{10} + 0.461X_{11} - 0.005X_{12} + 0.100X_{13} \quad (2)$$

$$F_3 = 0.160X_1 + 0.012X_2 - 0.020X_3 - 0.108X_4 + 0.037X_5 + 0.463X_6 - 0.011X_7 + 0.043X_8 + 0.281X_9 + 0.051X_{10} - 0.010X_{11} + 0.038X_{12} - 0.465X_{13} \quad (3)$$

式中 $X_1 \sim X_{13}$ 分别代表土壤容重、含水率、总孔隙度、毛管孔隙度、全N、全P、全K、碱解N、有效P、速效K、有效Ca、有机质及pH值。根据得分函数，计算各修复模式相关主成分分值，并利用贡献率进行加权求和，计算出不同植被修复模式土壤质量综合评分（见表5）。

表5 石漠化不同修复模式林地土壤质量得分

Tab.5 Soil comprehensive fertility scores of different restoration mode						
模式号M ode No.	修复模式Mode	F1	F2	F3	综合得分 Score	综合排名 r anking
CK	荒山荒地	15.1521	0.2272	0.31847	15.70	6
10C	针叶林	26.9528	-1.5978	1.58564	26.94	3
7C3B	7针+3阔	26.0236	-0.8551	1.58714	26.93	4
5C5B	5针+5阔	33.3313	-2.2667	1.77950	32.84	1
3C7B	3针+7阔	31.6889	-2.4142	1.79414	31.07	2
10B	阔叶林	27.2238	-1.7289	1.42385	26.92	5

由表 5 可知，5针+5阔修复模式林地的土壤质量得分最高，得分值为32.84，其次为3针+7阔混交林模式林地的，针叶林模式林地的排名第3，7针+3阔模式林地的排名第4，阔叶林模式林地的排在第5，荒山荒地排名最后，得分值仅为15.70。分析结果表明，植树造林有利于改善石漠化土壤物理性能，提高土壤养分水平，且针阔混交造林模式普遍优于针叶林、阔叶林模式。

4 讨论

4.1 不同树种配置模式对石漠化土壤理化特性的影响

不同树种配置模式对石漠化土壤理化特性产生不同的影响^[19], 本研究发现近30年的植被恢复后, 研究区石漠化土壤养分水平得到显著提高, 土壤质量得到了一定的改善, 植物群落逐渐向正向演替, 除全P含量、碱解N尚处于较低水平外, 其他土壤理化指标均达到中上及以上水平。在6种修复模式中, 荒山荒地模式养分含量低于其他5个造林修复模式, 这表明植树造林后土壤养分得到了改善, 这一点与高风、伏文兵等^[20-22]学者的研究结论一致。

主成分分析权重系数均超过0.8的指标有全N、全K、速效K、有机质、总孔隙度、容重、含水率、毛管孔隙度, 表明这些指标可以作为石漠化研究区土壤理化特性的主要表征指标。土壤质量综合评分结果表明, 6个植被修复模式得分排序为: 5针+5阔 > 3针+7阔 > 针叶林 > 7针+3阔 > 阔叶林 > 荒山荒地, 对照荒山荒地模式得分低于所有造林修复模式, 说明造林修复比长期撂荒更有利于改善土壤质量, 促进石漠化土壤的修复, 这一点与盛茂银等学者^[23-24]研究结论一致。

4.2 石漠化时空演变对土壤环境因子的影响

土壤容重和持水状况、有机质及氮含量等理化指标是石漠化区时空演变过程中的重要因子^[27-28], 在植树造林一定时间后, 植被的演替使得土壤理化特性产生一系列的变化, 随着林分的生长, 由于土壤-植被的相互作用, 土壤养分不断积累、物理性能不断改善, 石漠化土壤理化特性总体得到一定程度的改善, 使得植物群落向正向演替发展, 而砍伐开垦则会导致植物群落的逆向演替从而导致土壤养分流失、土壤板结乃至土壤退化, 可见人类活动是土壤理化特性的一个重要影响因子。

荒山荒地优势植物主要为丝茅草等禾本科草本植物, 而草本植物根系密集, 土壤致密板结、通透性差, 土壤容重大, 不利于土壤养分的淋溶及输入, 导致氮、磷及有机质等土壤养分含量相对较低, 这与李渊等学者^[16]的研究结论一致。造林修复模式中只有7C3B模式(7针+3阔)的得分略低于10C针叶林, 其他2个造林修复模式5C5B(5针+5阔)和3C7B(3针+7阔)的土壤质量综合得分均高于10C(针叶林)、10B(阔叶林)模式, 说明针阔混交造林普遍比针叶林、阔叶林更适合石漠化植被恢复, 这与杨同珂等^[25-26]学者的研究结论一致, 但针阔树种的针阔组成、具体比例及影响机理有待于进一步研究。

5 结论

石漠化造林修复通过对地上植被组成与结构的调控, 改变了凋落物种类与数量, 改善了土壤理化性质, 促进了石漠化植物群落的恢复。在石漠化植树造林实际生产中除了考虑修复模式搭配的林木多样性, 还要结合所选植物的干旱瘠薄生境的适应性, 以及植物多功能生态服务, 遵循适地适树、分类施策的原则, 引导植物群落的正向演替及森林生态系统的可持续发展。

参 考 文 献

- [1] REYNOLDS J F, SMITH D S, LAMBIN E F, et al. Global desertification: building a science for dryland development[J]. Science, 2007, 316(5826): 847-851.
- [2] 蒋勇军, 刘秀明, 何师意, 等. 喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7092-7097.
- [3] 李贵, 童琪, 刘振华, 等. 桑植石漠化林地植物多样性及群落数量特征分析[J]. 湖南林业科技, 2021, 48(01): 37-43.
- [4] 杨丹丽, 喻阳华, 秦仕忆, 等. 石漠化区不同利用类型土地养分的含量及其生态化学计量特征[J]. 西南农业学报, 2018, 31(09): 1875-1881.
- [5] 谭玉兰, 杨丰, 陈超, 等. 喀斯特山区土地利用方式对土壤质量的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(5): 1133-1138.
- [6] 刘娜, 喻理飞, 赵庆, 等. 喀斯特高原石漠化区次生林叶片—枯落物—土壤连续体碳氮磷生态化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(3): 681-688.
- [7] 孙建, 刘子琦, 朱大运, 等. 石漠化治理区不同生态恢复模式土壤质量评价[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 222-228.

- [8] 李春情,屈用函,农全东,等.基于主成分和聚类分析的云南文山典型石漠化区土壤肥力分析[J].中国农学通报,2024,40(01):66-72.
- [9] SHENG M Y, XIONG K N, WANG L J, et al. Response of soil physical and chemical properties to Rocky desertification succession in South China Karst[J]. Carbonates and Evaporites, 2018, 33(1): 15-28.
- [10] 侯自航,王忠诚.湘西慈利县不同石漠化程度下土壤理化性质特征[J].中南林业科技大学学报,2021,41(12):98-110.
- [11] 刘彦伶,李渝,张萌,等.基于文献计量的贵州喀斯特地区石漠化等级土壤养分状况分析[J].中国土壤与肥料, 2019(2): 171-180.
- [12] WEI T X, SHI X, ZHU J Z, et al. Evaluating the health status of *Robinia pseudoacacia* L. by the root exudates[J]. Bangladesh Journal of Botany, 2015, 44(3): 379-384.
- [13] DONG Z, WEI T X, ZHU Q K. Root exudates in *Hippophae hamnoides* of different growth states detected by GC-MS[J]. Asian Journal of Chemistry, 2013, 25(18): 10076-10078.
- [14] 吴平,薛建辉.典型喀斯特地区3种人工林对土壤理化和微生物特性的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2015, 39(05):67-72.
- [15] 郑武扬,王艳霞,王月江,等.喀斯特石漠化区不同植被治理模式对土壤质量的影响[J].西部林业科学,2020,49(4):41-47.
- [16] 李渊,刘子琦.石漠化区不同土地类型土壤侵蚀与理化性质特征[J].森林与环境学报,2019,39(5):515-523.
- [17] 张万儒,杨光滢,溥星南,等.森林土壤水化学分析:LY/T 1275-1999[S].北京:国家林业局, 1999.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析 3 版[M].北京:中国农业出版社,2008.
- [19] 黄文庆,万福绪,蒋丹丹.苏北石灰岩山地不同造林模式对土壤理化性质的影响[J].安徽农业科学,2014,42(9):2665-2666,2705.
- [20] 伏文兵,严友进,王凯,等.喀斯特石漠化区治理措施对土壤质量演变的影响[J].水土保持研究,2021,28(2):27-32.
- [21] 高风,文仕知,韦钰星,等.桂西北石漠化区不同植被恢复类型对土壤理化性质、酶活与真菌群落多样性的影响[J].浙江农业学报,2023,35(10):2425-2435.
- [22] 邵水仙,董智,李红丽,等.不同造林模式对退化石灰岩山地土壤理化性质及水文效应的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):263-267.
- [23] 盛茂银,熊康宁,崔高仰,等.贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J].生态学报,2015,35(02):434-448.
- [24] 李贵,陈瑞,刘振华,等.不同修复模式石漠化林地土壤理化性质分析[J].湖南林业科技,2022,49(02):1-7.
- [25] 杨同珂,朱超,郑云龙,等.鲁中南石灰岩山地不同造林模式对土壤理化性质的影响[J].山东林业科技,2013,43(4):52-53, 15.
- [26] 温培才,王霖娇,盛茂银.西南喀斯特高原峡谷石漠化生态系统植物群落特征及其与土壤理化性质的关系[J].四川农业大学学报,2018,36(2):175-184.
- [27] 陈双双,朱宁华,周光益,等.不同等级石漠化环境下人工乔木林的植被与土壤物理特征[J].生态环境学报,2022,31(1): 52-61.
- [28] 董妍妍.武陵山石漠化地区人工混交林土壤性质空间异质性[D].长沙:中南林业科技大学,2021.