

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.03.019

# 喀斯特区不同植被恢复措施土壤质量评价

董茜<sup>1,2</sup>, 王根柱<sup>1,2</sup>, 庞丹波<sup>3,4</sup>, 董亮<sup>1,2</sup>, 张梅<sup>5</sup>,  
刘玉国<sup>6</sup>, 万龙<sup>1,2</sup>, 周金星<sup>1,2\*</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 林业生态工程教育部工程研究中心, 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083;  
2. 北京林业大学云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083; 3. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部  
共建国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,  
宁夏 银川 750021; 5. 云南省建水县林业和草原科技推广站, 云南 建水 654300;  
6. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091)

**摘要:** [目的] 本研究旨在评价滇东南喀斯特区不同植被恢复措施的土壤质量, 以为石漠化治理和植被生态恢复提供依据。[方法] 以云南省建水县不同植被恢复措施为研究对象, 基于聚类分析及主成分分析法建立最小数据集, 利用全量及最小数据集土壤质量指数进行土壤质量评价。[结果] 显示: (1) 不同植被恢复措施的土壤理化性质差异显著 ( $p < 0.05$ ), 随土层深度增加而降低 (土壤密度除外); 车桑子灌木林有机碳、速效钾含量显著高于其他恢复措施; 云南松针叶林总孔隙度及速效钾含量低于其他恢复措施。(2) 基于主成分分析法的最小数据集适合作为喀斯特区最小数据集提取方法; 最小数据集由有机碳、全氮、氨态氮、总孔隙度、非毛管孔隙度、全镁组成。(3) 5种恢复措施土壤质量排序为: 马尾松针叶林 > 车桑子灌木林 > 天然次生林 > 直杆蓝桉阔叶林 > 云南松针叶林。[结论] 喀斯特区进行人工林恢复时可优先选择马尾松针叶林进行种植。

**关键词:** 喀斯特; 植被恢复; 土壤质量; 聚类分析; 主成分分析; 最小数据集

**中图分类号:** S714.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2022)03-0169-10

人地矛盾冲突导致超量砍伐森林, 使得生态系统退化、土地荒漠化速度加快、土壤肥力降低<sup>[1-2]</sup>。土壤质量与植被类型密切相关, 一方面, 林木生长吸收土壤中的养分, 土壤理化性质影响植物的生长; 另一方面, 植物凋落物经过分解将养分归还土壤, 改善土壤质量<sup>[3]</sup>。不同植被恢复措施对土壤养分状况的影响程度不同<sup>[4]</sup>, 土壤质量优劣综合体现于土壤生产性能、持水保水性能等方面<sup>[5]</sup>。我国滇东南喀斯特类型主要为断陷盆地, 气候季节性干旱严重, 土壤瘠薄, 石漠化现象严重, 土壤具有低磷高钙的特征。自 2008 年以来, 滇东南实施了大面

积的石漠化综合治理工程, 探究不同恢复措施下的土壤质量对评判植被恢复成功与否具有重要意义。

提取合适的评价指标是土壤质量评价过程的重要环节<sup>[6]</sup>, 最小数据集法被广泛应用于土壤质量评价与检测工作<sup>[7-10]</sup>。杨文娜等<sup>[11]</sup>在贵州印江典型喀斯特区利用 2 种方法对不同土地利用方式土壤进行质量评价, 得出主成分分析法及模糊评价法均能较准确评价土壤质量。孙建等<sup>[12]</sup>探讨石漠化区 4 种生态恢复模式对土壤质量的改善, 表明金银花 (*Lonicera japonica* Thunb.) 和花椒

收稿日期: 2021-09-07 修回日期: 2021-10-22

基金项目: 云南省重点研发计划课题“石漠化区生态产业复合系统构建技术研究”(2019BC001-03); 国家自然科学基金“喀斯特断陷盆地石漠化区水分差异对植物影响”(31870707); 国家重点研发计划项目“断陷盆地石漠化区植被恢复与功能提升”(2016YFC0502504)

作者简介: 董茜, 女, 在读硕士研究生。主要研究方向: 生态修复工程、石漠化防治。电话: 18730277926。E-mail: dongqianwedo@163.com

\* 通讯作者: 周金星, 男, 教授、博导。主要研究方向: 水土保持与荒漠化防治、生态修复工程与石漠化防治。电话: 13331012156。E-mail: Zjx9277@126.com

(*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.) 对当地植被恢复有积极作用。尽管先前的研究探索了各种评估土壤质量的指标和方法,但在特殊地质背景下的岩溶生态脆弱区土壤质量评价仍较薄弱。本文以滇东南喀斯特区石漠化治理工程中常用的5种植被恢复措施为研究对象,深入了解不同植被恢复措施对土壤理化性质、全钙及全镁的影响;建立最小数据集土壤质量综合评价体系,并确定哪种植被恢复措施下土壤质量效果最优,为喀斯特区植被恢复提供理论指导。

## 1 研究区概况

研究区位于云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站(102°47'7"~102°57'18" E, 23°40'49"~23°44'9" N),该地区属亚热带季风气候。年平均气温约19.8℃,年平均降水量约805 mm,有明显的旱季(11月至次年4月)和雨季(5—10月)。该地区具有典型的喀斯特地貌特征,属于喀斯特地堑盆地。土壤主要为石灰质土壤,由石灰岩基底发育而成,呈红色<sup>[13]</sup>。由于严重的人为干扰,区内土壤和植被退化,形成大面积荒地。自1996年以来,由于退耕还林工程的实施,该地区大量的人工林用于恢复退化的生态系统。该地区亚热带原始森林大部分被人类破坏,出现了天然次生林。研究区主要造林树种为云南松(*Pinus*

*yunnanensis* Franch.)、车桑子(*Dodonaea viscosa* (L.) Jacq.)、女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.)、白枪杆(*Fraxinus malacophylla* Hemsl.)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Blume)、直杆蓝桉(*Eucalyptus globulus* subsp. *maidenii* (F. Mueller) Kirkpatrick)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、清香木(*Pistacia weinmannifolia* J. Poisson ex Franchet)等<sup>[14]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集

于2016年6月,分别选取不同类型林分,包括天然阔叶次生林及人工林。人工林中乔木选取了云南松及马尾松针叶林、直杆蓝桉阔叶林,同时选取了车桑子灌木林,样地基本情况见表1。根据不同林分类型的树种恢复效果进行对比,结果更具代表性。样地大小为20 m × 20 m,每种植被类型3个重复,共选取15个样地进行每木检尺并采样。于2016年8月从每个样地中随机挖取3个土壤剖面,移除凋落物层,采集0~10、10~20、20~30 cm 3层的土壤样本。将3个剖面的同一土壤层中的样品合并,并通过2 mm与0.15 mm孔径网筛进行筛分,进行土壤化学性质及金属元素测定;同时分3层取土壤环刀并称质量,带回实验室进行物理性质测定。

表1 不同恢复措施样地基本情况

Table 1 Basic information of different recovery measures

植被恢复类型 Type of vegetation restoration	林分起源 Stand origin	海拔 Altitude/ m	坡度 Slope/ (°)	坡位 Slope position	植被覆盖率 Vegetation cover rate/ %	胸径 Breast diameter/ cm	树高 Tree height/ m	乔木层主要树种 Main tree species in the arbor layer	恢复年限 Recovery years/a
N	天然林	1 396~1 420	10~12	下坡	75	1.0~17.0	1.4~7.5	铁橡栎 <i>Quercus cocciferoides</i> 清香木 <i>Pistacia weinmannifolia</i> 黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	—
Y	人工林	1 555~1 562	15	下坡	80	1.0~17.0	0.6~8.5	云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	16
M	人工林	1 480~1 494	11	下坡	85	0.7~11.8	0.6~5.9	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	15
E	人工林	1 500~1 515	11	下坡	65	1.0~12.1	1.5~9.9	直杆蓝桉 <i>Eucalyptus globulus</i> subsp. <i>maidenii</i>	16
D	人工林	1 386~1 395	15	下坡	70	0.9~3.0	1.2~4.0	车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i>	15

注:表中N代表天然次生林, Y代表云南松针叶林, M代表马尾松针叶林, E代表直杆蓝桉阔叶林, D代表车桑子灌木林; 图1、2、3同此。

Notes: In the table, N stands for Natural secondary forest, Y stands for *Pinus yunnanensis* Franch. pure forest, M stands for *Pinus massoniana* Lamb. pure forest, E stands for *Eucalyptus globulus* subsp. *maidenii* (F. Mueller) Kirkpatrick pure forest, D stands for *Dodonaea viscosa* (L.) Jacq. shrub forest; Figures 1, 2 and 3 are the same.

### 2.2 土壤理化性质及金属元素测定

测定指标包括基础理化性质:土壤密度、总孔

隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、毛管持水量、饱和含水量、pH值、有机碳、全氮、全磷、氨态

氮、硝态氮、有效磷、速效钾,其参照土壤农化分析方法进行测定<sup>[15]</sup>。研究区属于岩溶区,母岩多为石灰岩及白云岩,而石灰岩主要由  $\text{CaCO}_3$  组成,白云岩主要由方解石组成,富含钙、镁元素,全钙、全镁对于植物生长发育有较大影响<sup>[16]</sup>。全钙及全镁采用  $\text{HNO}_3\text{-HF-HCl}$  微波消解法并采用电感耦合等离子体质谱仪测定<sup>[17]</sup>。

### 2.3 基于主成分分析法的最小数据集构建

选取不同植被恢复措施 0~20 cm 表层<sup>[18]</sup> 土壤指标,利用 SPSS 对其理化性质及全钙、全镁进行因子分析并计算指标 Norm 值<sup>[6]</sup>。Norm 值 ( $N_{ik}$ ) 计算公式如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^k (u_{ik}^2 \cdot \lambda_k)}$$

式中:  $N_{ik}$  是第  $i$  个指标在特征值  $\geq 1$  的前  $k$  个主成分上的综合载荷<sup>[6]</sup>;  $u_{ik}$  是第  $i$  个指标在第  $k$  个主成分上的载荷<sup>[6]</sup>;  $\lambda_k$  是第  $k$  个主成分的特征值<sup>[6]</sup>。

### 2.4 基于聚类分析法的最小数据集构建

在 R 语言中采用 Ward 法 (欧氏距离) 进行聚类分析,将指标分为表征不同土壤质量特征的组别,组内相关性较高的可代替,结合参考文献<sup>[15]</sup> 及野外调查数据,剔除冗余指标。

### 2.5 土壤隶属函数法评定土壤质量

利用“S”型函数、反“S”型函数及抛物线函数,进行土壤质量指数计算。

土壤有机碳、全氮、氨态氮、硝态氮、全磷、有效磷、速效钾、毛管孔隙度、总孔隙度、毛管持水量、饱和含水量在一定范围内与评价指标及土壤质量成正相关,采用“S”型函数进行计算。

$$u(x) = \begin{cases} 1, x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a}, a < x < b \\ 0, x \leq a \end{cases}$$

土壤全钙、全镁、非毛管孔隙度在一定范围内与评价指标成负相关,采用反“S”型函数进行计算。

$$u(x) = \begin{cases} 1, x \leq a \\ \frac{x-b}{a-b}, a < x < b \\ 0, x \geq b \end{cases}$$

土壤 pH 值、密度的指标值具有最佳适宜范围,偏离程度越大则对土壤功能影响越小<sup>[6]</sup>,故采用抛物线函数进行计算。

$$u(x) = \begin{cases} 1, b_1 \geq x \geq b_2 \\ \frac{x-a_1}{b_1-a_1}, a_1 < x < b_2 \\ \frac{x-a_2}{b_2-a_2}, a_2 > x > b_1 \\ 0, x \leq a_1 \text{ 或 } x \geq a_2 \end{cases}$$

式中:  $u(x)$  为隶属函数,  $x$  为指标实际值,  $a$  为指标阈值下限,  $b$  为指标阈值上限<sup>[6]</sup>;  $a_1$  指标临界值下限,  $a_2$  指标临界值上限,  $b_1$  最适宜值上界点,  $b_2$  最适宜值下界点<sup>[6]</sup>。

采用主成分分析法中的权重进行土壤质量指数 (SQI) 计算:

$$SQI = \sum_{i=1}^n w_i N_i$$

式中:  $w_i$  是第  $i$  个指标的权重,  $N_i$  为第  $i$  个指标的隶属值<sup>[19]</sup>。

## 3 结果分析

### 3.1 不同植被恢复措施土壤质量特征

图 1 表明: 毛管持水量、饱和含水量排序为: 车桑子灌木林 > 马尾松针叶林 > 天然次生林 > 直杆蓝桉阔叶林 > 云南松针叶林。车桑子灌木林土壤饱和含水量显著高于其他植被恢复模式,其保水持水效果最佳,云南松针叶林则较差 ( $p < 0.05$ )。除土壤密度外,其他指标均随土层深度增加呈降低趋势。

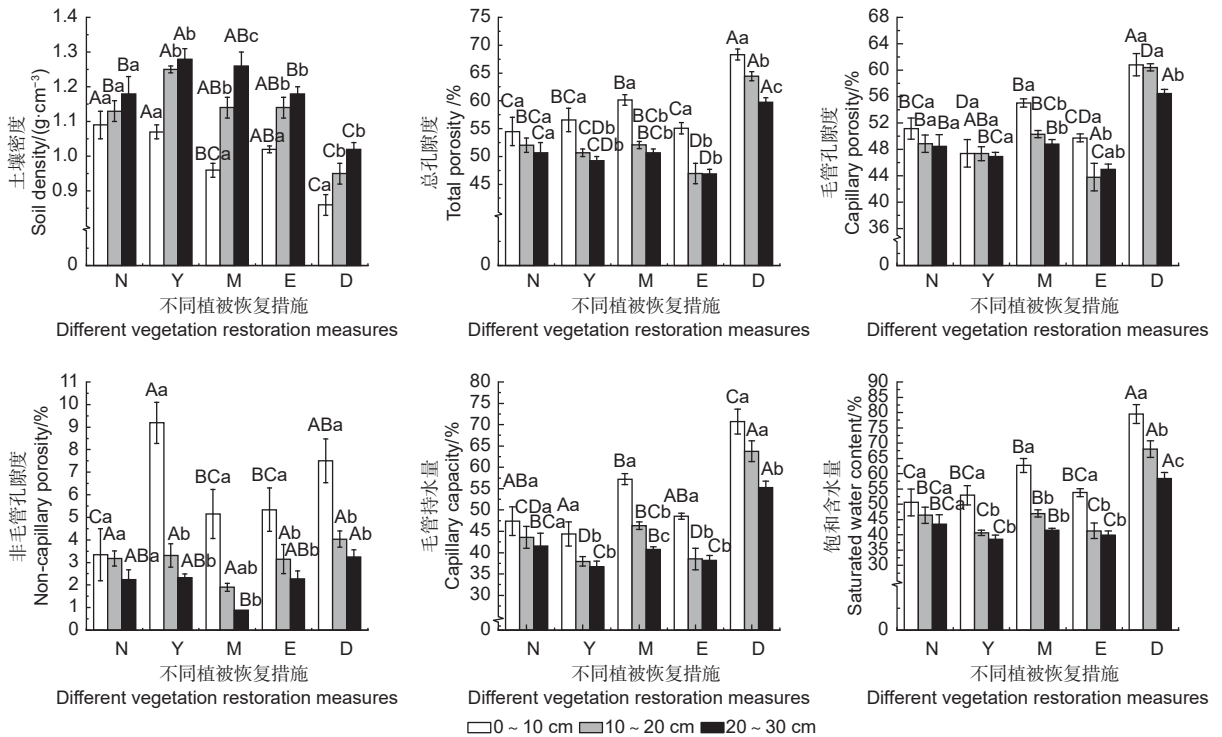
图 2 表明: pH 值在 5.43~7.1 间浮动,马尾松针叶林及车桑子灌木林土壤偏酸性。土壤有机碳、全氮、氨态氮、硝态氮、全磷整体呈随土壤深度增加而降低趋势 (车桑子灌木林氨态氮除外); 有效磷及速效钾呈不规则浮动,车桑子灌木林速效钾显著高于其他恢复措施 ( $p < 0.05$ )。图 3 表明,全钙在不同恢复措施间无显著差异,天然林及直杆蓝桉阔叶林全镁含量显著高于其他恢复措施 ( $p < 0.05$ )。

### 3.2 全量数据集土壤质量评价结果

利用土壤理化性质及全钙、全镁等 16 个指标对土壤质量指数进行计算,得出 5 种植被恢复措施的土壤质量指数顺序为: 车桑子灌木林 (0.496) > 马尾松针叶林 (0.475) > 云南松针叶林 (0.460) > 天然次生林 (0.440) > 直杆蓝桉阔叶林 (0.395)。

### 3.3 喀斯特区恢复林地最小数据集建立

3.3.1 基于主成分分析最小数据集建立 利用主成分分析法对全量数据集进行因子分析,按照累积



注：不同大写字母表示不同恢复措施同一土层间差异显著 ( $p < 0.05$ )；不同小写字母表示同一恢复措施不同土层间差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

Notes: Different capital letters indicate significant difference between different restoration measures and the same soil layer ( $p < 0.05$ ); Different lowercase letters indicate significant difference between different soil layers of the same restoration measures ( $p < 0.05$ ). The same below.

图 1 不同植被恢复措施土壤物理性质

Fig. 1 Soil physical properties of different vegetation restoration measures

方差贡献率  $\geq 80\%$  的原则<sup>[20]</sup>, 提取了前 4 个公因子。根据因子载荷分为 4 组 (表 2), 其中, 第 1 组土壤有机碳与 pH 值、硝态氮、有效磷、速效钾、土壤密度及全钙显著相关 (表 3), 选取土壤有机碳进入最小数据集; 总孔隙度与毛管孔隙度、毛管持水量、饱和含水量高度相关 (表 3), 选取总孔隙度进入最小数据集。第 2 组氨态氮与全磷显著相关, 选取氨态氮进入最小数据集; 全镁直接进入最小数据集 (表 3)。第 3 组全氮直接进入最小数据集。第 4 组非毛管孔隙度直接进入最小数据集。基于主成分分析法提取的最小数据集包括土壤有机碳、氨态氮、全镁、全氮、总孔隙度、非毛管孔隙度。根据选取出的 6 个指标计算土壤质量指数, 不同植被恢复措施排名为: 马尾松针叶林 (0.202) > 车桑子灌木林 (0.199) > 天然次生林 (0.191) > 直杆蓝桉阔叶林 (0.183) > 云南松针叶林 (0.149)。

**3.3.2 基于聚类分析最小数据集建立** 基于聚类分析法中 Ward 法 (欧氏距离) 聚类, 对评价指标进行分类。图 4 表明: 在聚合水平 0~3.5 之间, 指标可明显划分为 4 类。第一类土壤密度与毛管孔

隙度、总孔隙度、毛管持水量存在相关性, 合适的土壤密度有助于植物生长, 是最常用的物理指标<sup>[21]</sup>, 选取土壤密度进入最小数据集。全磷及有效磷中, 对于短期土壤质量有明显变化的为有效磷<sup>[22]</sup>, 且其属于强变异, 故选取有效磷进入最小数据集。非毛管孔隙度、全镁与组内其他因子无明显相关性, 其中, 非毛管孔隙度与土壤密度评价效果重叠, 故将其剔除, 全镁进入最小数据集。第二类速效钾与全钙均进入最小数据集。第三类全氮与氨态氮存在相关性 (表 3), 全氮、硝态氮及氨态氮在植物生长发育过程中, 起作用较大的为硝态氮及氨态氮<sup>[23]</sup>, 在 pH 值较低和氮限制下, 植物对于氨态氮吸收更好<sup>[20]</sup>, 选取氨态氮、pH 值进入最小数据集。第四类有机碳与饱和含水量高度相关 (表 3), 碳含量处在合理范围内, 可以对饱和含水量进行有效调控<sup>[24]</sup>, 选取有机碳进入最小数据集。基于聚类分析法提取的最小数据集包括土壤密度、有效磷、全镁、速效钾、全钙、氨态氮、pH 值、有机碳。根据选取出的 8 个指标计算的土壤质量指数排序为: 车桑子灌木林 (0.292) > 直杆蓝桉阔叶林

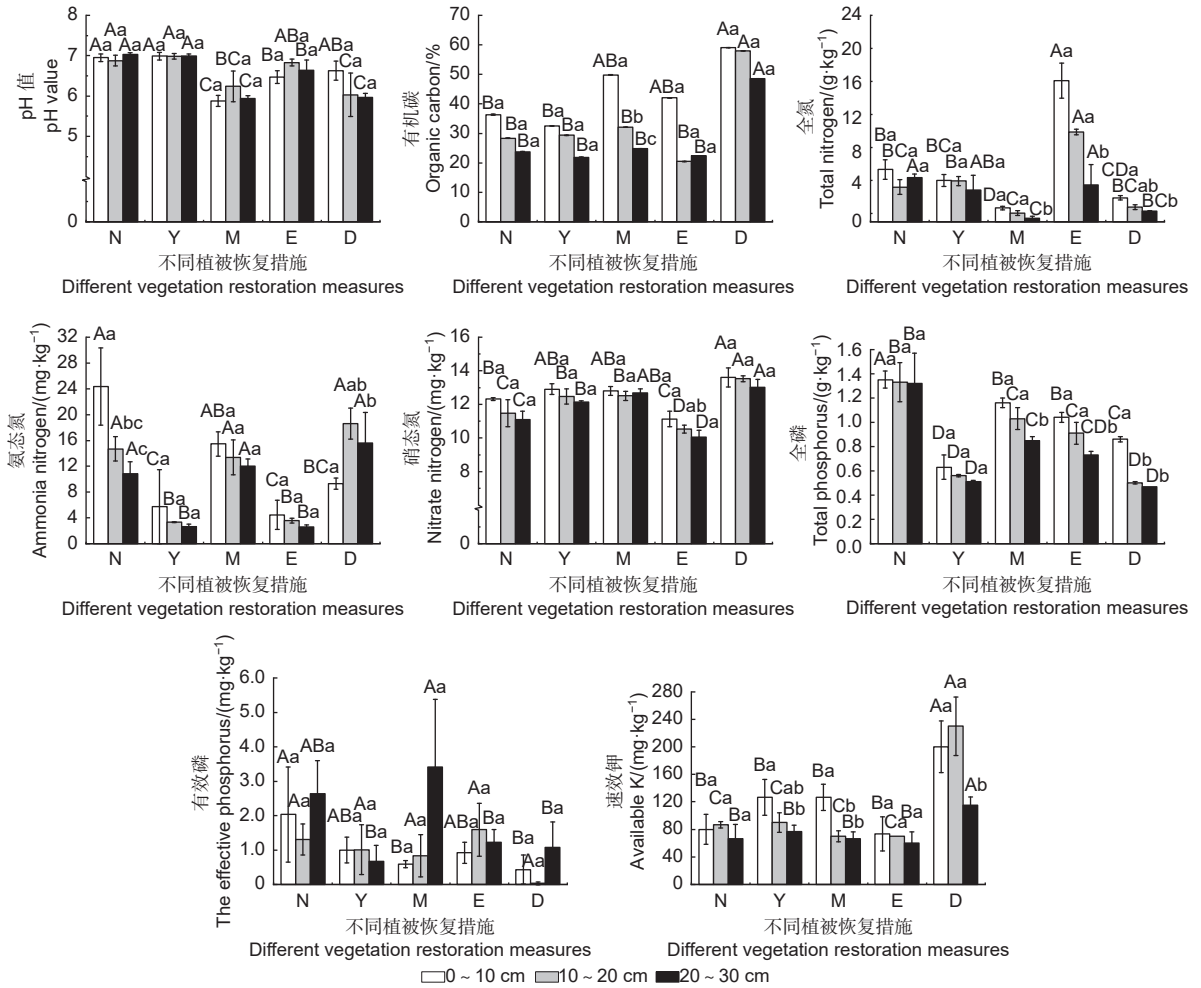
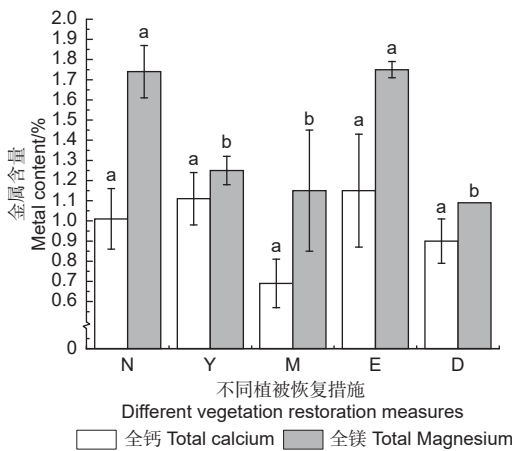


图 2 不同植被恢复措施土壤化学性质

Fig. 2 Chemical properties of different vegetation restoration measures



注: 不同字母表示不同恢复措施间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

Notes: Different letters indicate significant difference between different recovery measures ( $p < 0.05$ ).

图 3 不同植被恢复措施全钙及全镁差异

Fig. 3 Differences of total calcium and total magnesium among different vegetation restoration measures

(0.259) > 马尾松针叶林 (0.226) > 云南松针叶林 (0.216) > 天然次生林 (0.211)。

**3.3.3 最小数据集合理性验证** 将全量数据集土壤质量指数与最小数据集土壤质量指数作散点图进行回归分析, 从拟合效果看 (图 5), 全量数据集-土壤质量指数与主成分分析-土壤质量指数的相关系数为 0.843 5, 全量数据集-土壤质量指数与聚类分析-土壤质量指数的相关系数为 0.767 9。滇东南喀斯特区主成分分析法更适用于提取最小数据集指标进行土壤质量评价。

## 4 讨论

### 4.1 不同植被恢复措施土壤理化性质

森林土壤是植被类型、气候因子以及人为干扰等因素综合作用的结果。喀斯特断陷盆地区由于季节性干旱的影响, 树种选择不同造成了土壤理化性质的差异。车桑子由于喜光、耐旱、耐瘠薄的特

表 2 主成分因子载荷矩阵及因子权重

Table 2 Principal Component Factor Load Matrix and Factor Weight of Soil Physicochemical Properties

指标 Index	分组 Grouping	成分 Component				Norm值 Norm value
		PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	
Z <sub>1</sub> (pH值)	1	-0.585	-0.200	0.276	0.555	2.32
Z <sub>2</sub> (有机碳)	1	0.883	0.087	0.228	0.042	6.31
Z <sub>3</sub> (全氮)	3	-0.429	0.220	0.761	-0.307	2.45
Z <sub>4</sub> (氨态氮)	2	0.420	0.589	-0.411	0.324	2.47
Z <sub>5</sub> (硝态氮)	1	0.731	-0.367	-0.260	0.335	4.67
Z <sub>6</sub> (全磷)	2	-0.240	0.831	-0.072	0.262	2.08
Z <sub>7</sub> (有效磷)	1	-0.580	0.300	-0.177	0.245	2.94
Z <sub>8</sub> (速效钾)	1	0.784	-0.279	-0.083	-0.127	5.09
Z <sub>9</sub> (土壤密度)	1	-0.879	-0.226	-0.291	0.014	6.40
Z <sub>10</sub> (毛管孔隙度)	1	0.913	0.208	-0.088	-0.131	6.75
Z <sub>11</sub> (总孔隙度)	1	0.969	0.051	0.116	0.086	7.51
Z <sub>12</sub> (非毛管孔隙度)	4	0.280	-0.395	0.537	0.566	1.43
Z <sub>13</sub> (毛管持水量)	1	0.939	0.177	0.063	-0.074	7.10
Z <sub>14</sub> (饱和含水量)	1	0.953	0.096	0.171	0.043	7.30
Z <sub>15</sub> (全钙)	1	-0.675	-0.320	-0.050	0.025	3.87
Z <sub>16</sub> (全镁)	2	-0.384	0.715	0.307	0.065	2.51
特征值		7.967	2.343	1.511	1.123	
方差贡献率/%		49.796	14.644	9.444	7.020	
累积方差贡献率/%		49.796	64.440	73.884	80.903	

表 3 土壤理化性质及全钙全镁相关性矩阵

Table 3 Physical and chemical properties and correlation matrix of total calcium and total magnesium

	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>	Z <sub>7</sub>	Z <sub>8</sub>	Z <sub>9</sub>	Z <sub>10</sub>	Z <sub>11</sub>	Z <sub>12</sub>	Z <sub>13</sub>	Z <sub>14</sub>	Z <sub>15</sub>
Z <sub>2</sub>	-0.397*														
Z <sub>3</sub>	0.270	-0.232													
Z <sub>4</sub>	-0.227	0.354	-0.405*												
Z <sub>5</sub>	-0.241	0.555**	-0.648**	0.274											
Z <sub>6</sub>	0.032	-0.137	0.099	0.416*	-0.416*										
Z <sub>7</sub>	0.320	-0.586**	0.153	-0.068	-0.351	0.374*									
Z <sub>8</sub>	-0.411*	0.602**	-0.404*	0.168	0.638**	-0.493**	-0.423*								
Z <sub>9</sub>	0.444*	-0.812**	0.113	-0.359	-0.472**	0.049	0.432*	-0.585**							
Z <sub>10</sub>	-0.465**	0.787**	-0.353	0.474**	0.554**	-0.091	-0.428*	0.702**	-0.813**						
Z <sub>11</sub>	-0.369*	0.876**	-0.340	0.392*	0.671**	-0.174	-0.506**	0.744**	-0.885**	0.929**					
Z <sub>12</sub>	0.192	0.352	-0.014	-0.155	0.393**	-0.237	-0.271	0.211	-0.309	-0.051	0.323				
Z <sub>13</sub>	-0.440*	0.823**	-0.296	0.408*	0.548**	-0.102	-0.448*	0.692**	-0.917**	0.963**	0.954**	0.112			
Z <sub>14</sub>	-0.380*	0.858**	-0.282	0.360	0.600**	-0.140	-0.480**	0.700**	-0.941**	0.911**	0.976**	0.304	0.980**		
Z <sub>15</sub>	0.572**	-0.604**	0.114	-0.449*	-0.463**	-0.083	0.314	-0.353	0.629**	-0.567**	-0.607**	-0.188	-0.584**	-0.594**	
Z <sub>16</sub>	0.144	-0.186	0.499**	0.159	-0.535**	0.581**	0.417*	-0.399*	0.115	-0.238	-0.294	-0.185	-0.247	-0.270	0.084

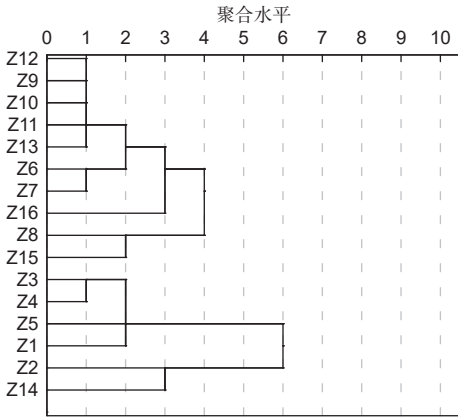


图4 不同植被恢复措施土壤质量评价指标聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of soil quality evaluation indicators for different vegetation restoration models

性,能在石灰岩裸露的荒山生长,是喀斯特区较干旱区域大面积恢复的植被树种。车桑子灌木林土壤密度与其他恢复措施存在显著差异,主要因为车桑子灌木林根系较浅,对于浅层土壤物理性质影响较大,表层土壤改良效果明显,土壤密度比其他植被恢复措施有显著降低<sup>[25]</sup>,但深层土壤受到根系扰动较少,不易改变其物理性质<sup>[26]</sup>,亟需发展改良深层土壤物理性质的植被恢复措施。车桑子灌木林土壤有机碳、氨态氮、硝态氮、速效钾等指标均处于优势地位,其土壤短期恢复效果较佳,故车桑子作为先锋恢复树种,对土壤改良有良好作用,但是后期车桑子林恢复措施显著降低生态系统植物多样性,

需进行物种替代。化学性质是反映不同植被恢复措施改良土壤状态的重要因素<sup>[27]</sup>,分析土壤化学性质有助于了解土壤因子与群落类型之间的关系<sup>[28]</sup>。喀斯特断陷盆地不同植被恢复措施间化学性质存在显著性差异。马尾松针叶林及车桑子灌木林偏酸性,同等环境条件下针叶林土壤酸性更强,将限制细菌活动,分解缓慢,易形成粗腐殖质。不同植被恢复措施因其群落结构、凋落物种类及分解速率存在较大差异,从而导致有机质含量不同<sup>[29]</sup>。土壤有机碳表现为车桑子灌木林>马尾松针叶林>天然次生林>直杆蓝桉阔叶林>云南松针叶林,阔叶林与针叶林间无明显规律性,这与耿玉清等<sup>[30]</sup>研究不同类型对土壤有机碳影响的结果类似。从土壤全氮、全磷等养分含量看,直杆蓝桉阔叶林全氮含量位居首位,硝态氮及氨态氮含量却缺乏。不同植被恢复措施土壤化学性质仍显现出喀斯特区低磷高钙的特点,全磷及有效磷整体处于较低状态,且植被恢复后,磷元素变化幅度不大,这是因为亚热带酸性土壤中,磷易于形成不溶性磷化合物<sup>[3]</sup>,因而,断陷盆地喀斯特区磷限制性仍是植被恢复需解决的重要瓶颈问题。森林土壤全镁在不同植被恢复措施间存在显著差异,说明其含量与林分类型密切相关。全镁在天然林及直干蓝桉阔叶林中含量较高,阔叶林林下调落物层丰富,有利于土壤阳离子交换吸附,造成土壤碱性金属相对累积<sup>[3]</sup>。

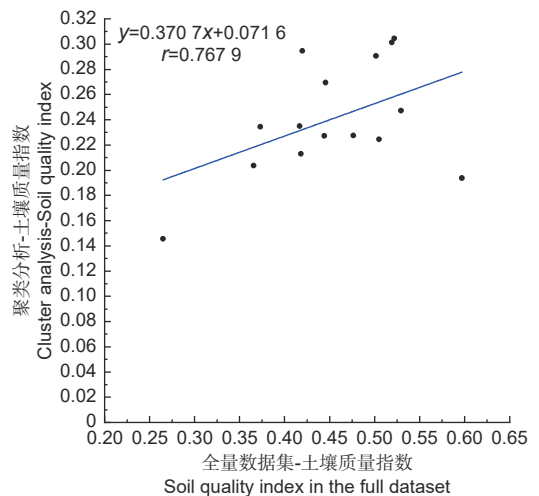
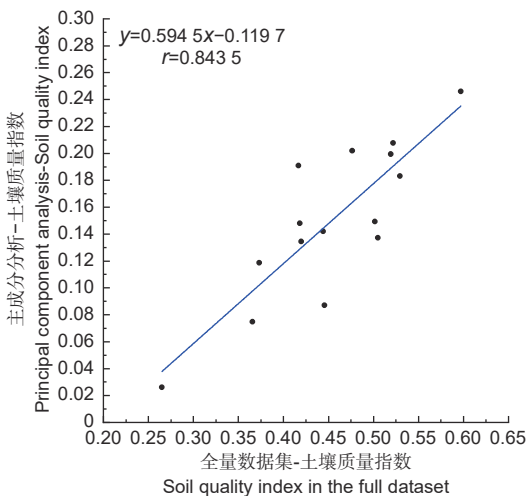


图5 最小数据集与全量数据集的相关性

Fig. 5 The correlation between the smallest data set and the full data set

#### 4.2 不同植被恢复措施土壤质量评价

采用全量数据集及最小数据集法,结合土壤质量指数对云南省喀斯特区不同植被恢复措施下土

壤质量进行综合评价,最小数据集得出的评价指标与全量评价指数相关系数达显著相关,且基于主成分分析法的最小数据集提取方法相关性达

0.8435。说明最小数据集评价指标体系均有较好代表性, 适宜于喀斯特岩溶区土壤质量评价。喀斯特断陷盆地进行土壤质量评价时从 16 个指标减少为 6 个指标, 分别为有机碳、全氮、氨态氮、总孔隙度、非毛管孔隙度、全镁, 大幅减少了工作量, 省时省力。

评价结果表明: 车桑子灌木林、马尾松及云南松针叶林恢复效果较好。天然林氨态氮、全磷及有效磷含量占明显优势, 其群落功能复杂, 凋落物分解加快, 养分循环与富集功能更强<sup>[31]</sup>, 根据全国第二次土壤普查养分分级标准<sup>[6]</sup>, 天然林全磷含量为一级, 有效磷含量虽位于几种恢复措施首位, 但仍处于第 6 级, 磷元素利用效率低, 施用适量磷肥有助于植被更好的恢复; 人工林中马尾松针叶林土壤有效磷含量较高, 可以尝试与马尾松林混交措施来达到更好的恢复效果。云南松林硝态氮及速效钾含量较高, 林内枯枝落叶层能有效增加地表的粗糙度, 凋落物腐烂可以增加土壤氮、钾含量, 起到保水保肥效果等, 从而增强了植物群落改良土壤的能力<sup>[32]</sup>; 但其有机碳含量处于较低水平, 可能由于其枯落物含不易分解化合物, 从而分解周期较长, 导致云南松针叶林土壤有机碳返还量减少<sup>[33]</sup>。车桑子对于土壤短期恢复效果较好, 但叶超等<sup>[34]</sup>研究发现, 车桑子密度较大时, 本土植物物种丰富度和多样性相对较低, 群落结构简单且稳定性较差, 呈现退化趋势, 车桑子可作为当地恢复先锋物种, 长期生态修复需考虑混交种植措施。直杆蓝桉阔叶林对于土壤恢复效果较差, 其氨态氮、硝态氮、速效钾均处于最低水平。有研究发现, 与邻近群落相比, 直杆蓝桉阔叶林表现出对土壤养分的持续耗竭, 易造成生态系统土壤养分贫瘠化<sup>[35]</sup>。侯晓龙等<sup>[36]</sup>发现, 种植桉树会导致土壤表层结皮、生境条件变差, 群落层次单一致使物种多样性下降。直杆蓝桉阔叶林全钙、全镁含量较高, 岩溶区钙元素迁移及富集作用较强<sup>[37]</sup>, 石灰岩发育的土壤上进行人工植被恢复过程中应注意考虑母岩淋溶作用。在滇东南喀斯特区优先选择马尾松针叶林进行种植, 避免直杆蓝桉阔叶林单一种植。

## 5 结论

(1) 研究区植被恢复对表层土壤改良作用较大, 深层土壤受到扰动较小。马尾松针叶林及车桑子灌木林土壤偏酸性。车桑子灌木林土壤有机碳、

速效钾含量显著高于其他措施, 云南松针叶林土壤总孔隙度及速效钾含量低于其他植被恢复措施。

(2) 滇东南喀斯特岩溶区基于主成分分析提取的最小数据集由有机碳、全氮、氨态氮、总孔隙度、非毛管孔隙度、全镁组成, 与全量数据集得出的土壤质量指数相关性达 0.8435, 可反应该区域土壤质量状况。

(3) 根据选取出的 6 个指标计算土壤质量指数, 不同植被恢复措施排名为: 马尾松针叶林 (0.202) > 车桑子灌木林 (0.199) > 天然次生林 (0.191) > 直杆蓝桉阔叶林 (0.183) > 云南松针叶林 (0.149)。喀斯特岩溶区植被恢复措施中, 马尾松及车桑子恢复效果比天然林好; 直杆蓝桉及云南松恢复效果较差。喀斯特区进行人工林恢复时可优先选择马尾松针叶林进行种植; 若采取车桑子长期生态修复, 宜采取混交种植方式。

## 参考文献:

- [1] Lu X Q, Toda H, Ding F J, et al. Effect of vegetation types on chemical and biological properties of soils of karst ecosystems[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 61(3): 49-57.
- [2] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth Science Reviews*, 2014, 132(3): 1-12.
- [3] 王晓荣, 胡文杰, 庞宏东, 等. 湖北省主要森林类型土壤理化性质及土壤质量[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(11): 156-166.
- [4] 金慧芳. 耕作措施对红壤坡耕地耕层物理性能影响及调控研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [5] Fu B J, Liu S L, Chen L D, et al. Soil quality regime in relation to land cover and slope position across a highly modified slope landscape[J]. *Ecological Research*, 2010, 19(1): 111-118.
- [6] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及PCA分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(7): 155-164.
- [7] 李 鑫, 张文菊, 邬 磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(14): 3043-3056.
- [8] 邓绍欢, 曾令涛, 关 强, 等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1326-1333.
- [9] 乔云发, 钟 鑫, 苗淑杰, 等. 基于最小数据集的东北风沙土农田耕层土壤质量评价指标[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 132-138.
- [10] Tian K, Zhang B, Zhang H, et al. Evaluation of soil quality in major grain-producing region of the North China Plain: Integrating minimum data set and established critical limits[J]. *Ecology*



- gical Indicators, 2020, 117(6): 1-10.
- [11] 杨文娜, 任嘉欣, 李忠意, 等. 主成分分析法和模糊综合评价法判断喀斯特土壤的肥力水平[J]. 西南农业学报, 2019, 32(6): 1307-1313.
- [12] 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.
- [13] Pang D B, Cao J H, Dan X Q, et al. Recovery approach affects soil quality in fragile karst ecosystems of southwest China: Implications for vegetation restoration[J]. Ecological Engineering, 2018, 123(9): 151-160.
- [14] 孙永磊, 周金星, 庞丹波, 等. 喀斯特断陷盆地不同植被恢复模式土壤水分动态变化[J]. 林业科学研究, 2018, 31(4): 104-112.
- [15] 陈正发, 史东梅, 金慧芳, 等. 基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 256-267.
- [16] 胡琪娟, 盛茂银, 殷 婕, 等. 西南喀斯特石漠化环境适生植物构树细根、根际土壤化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2020, 44(9): 962-972.
- [17] 倪 幸, 黄其颖, 叶正钱. 竹炭施用对土壤镉形态转化和小麦镉积累的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(4): 818-824.
- [18] 张青青, 周再知, 黄桂华, 等. 间伐强度对柚木林土壤质量及生长的影响[J]. 林业科学研究, 2021, 34(3): 127-134.
- [19] 邵国栋, 艾娟娟, 孙启武, 等. 昆崙山不同林分类型土壤质量状况及评价[J]. 林业科学研究, 2018, 31(6): 175-184.
- [20] 陈洪海, 迟国泰. 基于主要信息含量的指标筛选方法[J]. 系统工程学报, 2016, 31(2): 268-273.
- [21] 李 荣, 侯贤清, 吴鹏年, 等. 秸秆还田配施氮肥对土壤性状与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 289-298.
- [22] Caicedo J R, Steen N P, Arce O, et al. Effect of total ammonia nitrogen concentration and pH on growth rates of duckweed (*Spirodela polyrrhiza*)[J]. Water Research, 2000, 34(15): 3829-3835.
- [23] 吴春生, 刘高焕, 黄 翀, 等. 基于MDS和模糊逻辑的黄河三角洲土壤质量评估[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1275-1286.
- [24] 丁文斌, 蒋 平, 史东梅, 等. 紫色土坡耕地耕层蓄水保土及耕性特征研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 24-29, 37.
- [25] 卢翠玲, 张俊华, 丁亚鹏, 等. 基于模糊数学法的河南黄泛区土壤质量综合评价——以开封和周口为例[J]. 河南大学学报:自然科学版, 2018, 48(6): 660-668.
- [26] 关共凑, 魏兴璇. 鼎湖山三种森林类型土壤养分特征及其相关性分析研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(3): 139-144.
- [27] 范周周. 云南建水岩溶区植被根际微生物及其溶蚀效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [28] 和丽萍, 李贵祥, 孟广涛, 等. 高黎贡山不同森林类型土壤肥力状况研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 116-121.
- [29] 黄宗胜, 符裕红, 喻理飞. 喀斯特森林植被自然恢复中凋落物现存量及其碳库特征演化[J]. 林业科学研究, 2013, 26(1): 8-14.
- [30] 耿玉清, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京山地针叶林与阔叶林土壤活性有机碳库的研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 19-24.
- [31] 冯 广, 艾训儒, 臧润国, 等. 鄂西南亚热带常绿阔叶混交林不同群落类型土壤特征分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1173-1184.
- [32] Herlina H, Ravi P, Anggoro S E W, et al. Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 180(1-3): 361-374.
- [33] Derenne S, Largeau C. A Review of Some Important Families of Refractory Macromolecules: Composition, Origin, and Fate in Soils and Sediments[J]. Soil Science, 2001, 166(11): 833-847.
- [34] 叶 超, 安明志, 张 楠, 等. 贵州北盘江喀斯特地区车桑子造林对乡土植物物种多样性的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(2): 310-318.
- [35] 夏体渊, 段昌群, 张彩仙, 等. 桉树人工林与邻近区域群落土壤肥力研究[J]. 云南大学学报:自然科学版, 2010, 32(1): 118-123.
- [36] 侯晓龙, 刘明新, 蔡丽平, 等. 安溪崩岗侵蚀区不同植被配置模式与恢复效果研究[J]. 亚热带水土保持, 2010, 22(1): 5-10.
- [37] 杨 慧, 陈家瑞, 梁建宏, 等. 桂林丫吉岩溶区土壤有机碳和pH值与钙形态分布的关系初探[J]. 地质论评, 2017, 63(4): 1117-1126.

# Soil Quality Evaluation of Different Vegetation Restoration Measures in Karst Area

DONG Qian<sup>1,2</sup>, WANG Gen-zhu<sup>1,2</sup>, PANG Dan-bo<sup>3,4</sup>, DONG Liang<sup>1,2</sup>, ZHANG Mei<sup>5</sup>,  
LIU Yu-guo<sup>6</sup>, WAN long<sup>1,2</sup>, ZHOU Jin-xing<sup>1,2</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Engineering Research Center, Ministry of Forestry Ecological Engineering, Key Laboratory, State Forestry Administration for Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China; 2. National Location Observation Research Station of Jianshui Desert Ecosystem in Yunnan, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 4. Key Laboratory of Northwest Degraded Ecosystem Restoration and Reconstruction of the Ministry of Education of Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 5. Forestry and Grassland Science and Technology Extension Station of Jianshui County, Yunnan Province, Jianshui 654300, Yunnan, China; 6. Institute of Desertification, Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China)

**Abstract:** [Objective] To evaluate the soil quality of different vegetation restoration measures in karst region of southeast Yunnan for providing basics for the control of rocky desertification and ecological restoration of vegetation. [Method] In this paper, different vegetation restoration measures in Jianshui County of Yunnan Province were carried out. The minimum data sets were established by cluster analysis and principal component analysis. The soil quality indexes of the full and minimum data set were used to evaluate soil quality. [Result] The results showed that: (1) There were significant differences in soil physical and chemical properties among different vegetation restoration measures ( $P < 0.05$ ), which decreased with the increase of soil depth. The contents of organic carbon and available potassium in *Dodonaea viscosa* forest were significantly higher than those through other restoration measures. The total porosity and available potassium content of *Pinus yunnanensis* Franch. pure forest were lower than those through other restoration measures. (2) Quality evaluation of the minimum dataset using principal component analysis was suitable for the extraction of karst area. The minimum data set consisted of organic carbon, total nitrogen, ammonium nitrogen, total porosity, non-capillary porosity and total magnesium. (3) The soil quality of the five restoration measures was ranked as: *Pinus massoniana* pure forest > *Dodonaea viscosa* shrub forest > Natural secondary forests > *Eucalyptus maideni* pure forest > *Pinus yunnanensis* pure forest. [Conclusion] *Pinus massoniana* Lamb. are preferred species for plantation restoration in karst areas.

**Keywords:** Karst; vegetation restoration; soil quality; cluster analysis; principal component analysis; minimum data set

(责任编辑: 徐玉秀)