

植被恢复过程土壤基质改良对湘南紫色土抗蚀性的影响

范世才¹, 方晰^{1,2}, 王振鹏¹, 陈金磊¹

(1.中南林业科技大学生命科学与技术学院,长沙 410004;

2.湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站,湖南 会同 438107)

摘要:为评价植被恢复过程土壤基质改良对紫色土抗蚀性的影响,在湖南南部耒阳山地紫色土进行土壤基质改良试验,测定土壤基质未经处理(对照地)、表层与底层土置换(土层置换地)、表层与底层土置换并添加有机物改良剂(基质改良地)的紫色土 0—10,10—20 cm 土层 13 个抗蚀性评价指标,运用相关性分析和主成分分析方法筛选影响紫色土抗蚀性的主要指标,建立综合评价模型评价紫色土不同土壤基质处理后的抗蚀性。结果表明:(1)与对照地相比,基质改良地 0—10,10—20 cm 土层有机碳含量、抗蚀指数、 >0.25 mm 湿筛团聚体、 >0.5 mm 湿筛团聚体、 <0.002 mm 黏粒含量、湿筛团聚体平均重量直径、湿筛团聚体几何平均直径、结构性颗粒指数、团聚状况分别增加 69.19%~99.81%,9.72%~46.86%,41.69%~50.80%,47.26%~58.98%,73.82%~194.35%,47.96%~57.01%,49.06%~68.97%,74.23%~183.25%,14.62%~20.16%,土壤容重、湿筛团聚体分形维数、结构破坏率分别降低 10.53%~16.26%,4.64%~7.58%,39.22%~54.64%;(2)土壤容重、有机碳含量、湿筛团聚体含量及其稳定性是影响紫色土抗蚀性的主要因子;(3)与对照地相比,基质改良地 0—10,10—20 cm 土层抗蚀性综合指数分别提高 524.14%,146.99%,土层置换地分别提高 93.10%,42.17%,表明植被恢复过程中土壤基质改良不仅提高土壤有机碳含量,也显著提高土壤抗蚀性,可作为治理湖南南部紫色土水土流失的有效措施。

关键词: 湖南南部; 紫色土; 土壤基质改良; 抗蚀性; 抗蚀性综合指数; 主成分分析

中图分类号:S157.9

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)06-0022-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.004

Effect of Soil Matrix Improvement Measure on Erosion Resistance of Purple Soil During Vegetation Restoration in Southern Hunan Province, China

FAN Shicai¹, FANG Xi^{1,2}, WANG Zhenpeng¹, CHEN Jinlei¹

(1.School of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004; 2.Huitong National Field Station for Scientific Observation and Research of Chinese Fir Plantation Ecosystem in Hunan Province, Huitong, Hunan 438107)

Abstract: In order to evaluate the effect of soil matrix improvement on soil erosion resistance during vegetation restoration of purple soil, relevant experiments were carried out in the purple soil area of Leiyang in south Hunan Province, China. Three soil matrix types were chosen in our study, including the untreated purple soil matrix (control land), the purple soil of interchanging topsoil with subsoil (soil replacement land), and the one added organic improver based on the soil replacement land (soil matrix improved land). Thirteen erosion resistance evaluation indexes were determined, the important indexes were screened out and an evaluation model was established to study the change of erosion resistance of purple soil substrate after soil matrix improvement, using the correlation analysis and the principal component analysis. The results showed that: (1) Compared with the control land, the organic carbon content, erosion resistant index, >0.25 mm wet sieve aggregate content, >0.5 mm wet sieve aggregate content, <0.002 mm clay percentage content, mean weight diameter of wet sieve aggregate, geometric mean diameter of wet sieve aggregate, structural granular index and aggregation condition in 0—10 and 10—20 cm soil layer increased by 69.19%~99.81%, 9.72%~46.86%, 41.69%~50.80%, 47.26%~58.98%, 73.82%~194.35%, 47.96%~57.01%, 10.53%~16.26%, 4.64%~7.58%, 39.22%~54.64%; (2) Soil bulk density, organic carbon content, wet sieve aggregate content and its stability are the main factors affecting the erosion resistance of purple soil; (3) Compared with the control land, the comprehensive index of erosion resistance of purple soil substrate in 0—10 and 10—20 cm soil layer increased by 524.14% and 146.99% respectively, and the soil replacement land increased by 93.10% and 42.17% respectively, indicating that soil matrix improvement during vegetation restoration not only increased the organic carbon content of soil, but also significantly improved the erosion resistance of soil, which can be an effective measure to治理湖南南部紫色土水土流失.

收稿日期:2021-04-19

资助项目:国家自然科学基金项目(31971455,31670448)

第一作者:范世才(1997—),男,硕士研究生,主要从事生态系统生态学研究。E-mail:fscfzm@163.com

通信作者:方晰(1968—),女,博士,教授,主要从事生态系统生态学和恢复生态学研究。E-mail:fangxizhang@sina.com

49.06%~68.97%, 74.23%~183.25%, and 14.62%~20.16% in the soil matrix improved land, respectively. On the contrary, soil bulk density, fractal dimension of wet sieve aggregate and structural failure rate decreased by 10.53%~16.26%, 4.64%~7.58%, and 39.22%~54.64%, respectively. (2) Soil bulk density, organic carbon content and wet sieve aggregate content and stability were the main factors affecting the erosion resistance of purple soil. (3) Compared with the control land, the composite index of soil erosion resistance in 0—10 and 10—20 cm soil layer in the soil matrix improved land was significantly increased by 524.14% and 146.99%, respectively, and the one in the soil replacement land was increased by 93.10% and 42.17%, respectively. The results showed that the soil matrix improvement during vegetation restoration not only increased the organic carbon content of purple soil, but also significantly improved the soil erosion resistance, and this method can be used as an effective measure to control soil erosion in purple soil.

Keywords: Southern Hunan Province; purple soil; soil matrix improvement measure; soil erosion resistance; comprehensive index of soil erosion resistance; principal component analysis

土壤作为“万物之本,生命之源”,是人类与陆生生物赖以生存的根基。然而《水利部发布 2019 年水土流失动态监测结果》^[1]显示,2019 年中国水土流失面积为 $271.08 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中水力侵蚀面积达 $113.47 \times 10^4 \text{ km}^2$,占水土流失总面积的 41.86%,土壤水蚀、退化成为制约地区和国家发展的重大生态问题。土壤抗蚀性是土壤抵抗水分对其分散和悬浮的能力^[2],是表征土壤对侵蚀营力敏感性的重要指标^[3],与土壤理化性质密切相关^[4]。土壤抗蚀性取决于土粒之间的黏结力(胶结力)和土粒对水的亲和力^[5]。而土壤理化性质对土粒间的黏结力和土粒对水亲和力有重要影响。因此,改善土壤理化性质,其抗蚀能力也会相应增强。当前土壤抗蚀性研究重点仍集中在选取合理的抗蚀性评价指标体系,分析影响土壤抗蚀性的因素^[2],创建土壤抗蚀性评价模型^[6],探究土壤抗蚀性的空间差异^[7]以及创新土壤抗蚀性的研究方法^[8]。以农业、工业、生物措施为基础的土壤修复治理措施对土壤抗蚀性影响的研究^[9]报道也不断涌现,且研究^[10]表明,植被修复措施显著提高土壤抗蚀性,但土壤基质改良对其抗蚀性影响的研究却少见报道。

紫色土是热带、亚热带湿润地区由紫红色砂页岩风化形成的一种非地带性隐域岩性土壤。湖南南部紫色土山地面积为 $0.16 \times 10^4 \text{ km}^2$,是湖南省紫色土分布面积($1.32 \times 10^4 \text{ km}^2$)最大地区。受地理位置和气候共同影响,该地区水土流失严重,土层浅薄,有的甚至没有土壤发育层,基岩裸露,有机质含量低下,抗蚀、抗冲性差,石砾含量大,透水性差,蓄水保水能力弱^[11];再加上区域内不合理的开发,致使生态环境更为脆弱,成为湖南省水土流失和季节性干旱同步发生的重灾区,严重影响和制约区域经济和可持续发展的。尽管目前针对紫色土壤抗蚀性开展了一些研究工作,也取得一定的成果^[8,11-13],但关于湖南南部

紫色土抗蚀性的研究仍很少,也由于受地表要素空间异质性的影响,目前相关研究仍无法反映湖南南部紫色土抗蚀性的特征。本研究拟探究紫色土植被恢复过程土壤基质改良对土壤抗蚀性的影响,为湖南南部紫色土生态恢复与重建和水土资源保持与利用提供科学依据。

1 研究地概况

研究地设置在湖南南部耒阳太和圩乡紫色土呈网状集中分布的区域内,地处衡阳盆地与五岭山脉之间的过渡区($112^{\circ}38'—113^{\circ}13'E, 26^{\circ}08'—26^{\circ}43'N$),以丘陵山地为主,海拔为 60~200 m,属于亚热带季风性湿润气候区,光照充足,降水充沛,空气湿润,气候温和,年均日照时间 1 610 h,年均降水量为 1 325 mm,降雨主要集中于 4—7 月,年均蒸发量为 1 426.5 mm,相对湿度 80%左右,年均气温 18.0℃,夏季 7—8 月平均气温约为 34.7℃,1—2 月平均气温为 -0.5℃,极端高温为 38.0~40.5℃,极端低温为 -8.0℃,无霜期 285—287 天。土壤以紫色土、红壤等为主,分布有亚热带常绿阔叶林、针叶林等森林类型,林草覆盖率为 50%~70%。

2 研究方法

2.1 样地设置

2016 年 1—3 月,在研究地建立紫色土困难造林地植被恢复示范基地(设置 57 块固定样地,每块样地面积为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$)。人工挖穴整地时,对栽植穴(长宽深分别为 0.4 m,0.4 m,0.6 m)的土壤基质进行 3 种处理:(1)对照地,土壤基质不做任何处理;(2)表层、底层土置换地(简称土层置换地,下同),挖穴时,将表土层和底土层分开放在栽植穴两边,先回填表土层,再回填底土层,土壤基质不做额外处理;(3)土壤基质改良地(简称基质改良地,下同),挖穴时,将表土层和底土层分开放在栽植穴两边,先回填表土层后,

每 1 个栽植穴中添加 500 g 锯木屑、1 kg 充分发酵且无臭味的有机肥和 5 kg 本地红壤与表土层充分混匀,再回填底土层。

2.2 土壤样品采集与处理

在对照地、土层置换地和基质改良地分别随机选取 12 块样地,于 2019 年 5 月采集土壤样品。每块样地随机选取 3 个栽植穴(对照样地随机选取 3 个采样点)。每 1 个栽植穴或采样点按照 0—10,10—20 cm 土层分别采集土壤(为避免根系对土壤样品的影响,采集时尽量采集根部外围的土壤),把同一块样地 3 个栽植穴或采样点同一土层土壤等量混合为 1 个样品(即每种处理 12 个重复),室内自然风干后按测定指标要求进行处理;同时用 200 cm³ 环刀采集土壤样品测定土壤容重。

2.3 抗蚀性评价指标的选取

物理性质类:土壤容重(x_1);有机胶体类:有机碳含量(x_2);抗蚀指数类:抗蚀指数(x_3);团聚体类: >0.25 mm 干筛团聚体含量(x_4)、 >0.25 mm 湿筛团聚体含量(x_5)、 >0.5 mm 湿筛团聚体含量(x_6)、湿筛团聚体平均重量直径(MWD, x_7)、湿筛团聚体几何平均直径(GMD, x_8)、湿筛团聚体分形维数(D , x_9)、结构破坏率(x_{10});无机颗粒类: <0.002 mm 黏粒含量(x_{11})、结构性颗粒指数(x_{12});微团聚体类:团聚状况(x_{13})^[14]。

2.4 抗蚀性评价指标的测定与计算

(1)土壤容重采用环刀法,105 ℃烘干测定^[2];土壤有机碳(SOC)含量用重铬酸钾—浓硫酸氧化法测定^[2];土壤抗蚀指数采用土粒浸水法^[2];土壤大团聚体含量采用干、湿筛分法测定^[2];土壤机械组成采用 Malvern 激光粒度分析仪测定^[15];土壤微团聚体用吸管法测定^[5]。

(2)土壤抗蚀指数、结构破坏率^[5]、结构性颗粒指数^[14]、团聚状况^[14]、 D ^[14]、MWD^[14]和 GMD^[14]分别依据公式(1~7)计算:

$$\text{抗蚀指数}(\%) = \frac{\text{总土粒数} - \text{崩塌土粒数}}{\text{总土粒数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{结构破坏率}(\%) = \frac{>0.25 \text{ mm 干筛团聚体含量} - >0.25 \text{ mm 湿筛团聚体含量}}{>0.25 \text{ mm 干筛团聚体含量}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{结构性颗粒指数}(\%) = \frac{<0.002 \text{ mm 黏粒含量}}{0.002 \sim 0.05 \text{ mm 粉粒含量}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{团聚状况} = >0.05 \text{ mm 微团聚体分析值} - >0.05 \text{ mm 机械组成分析值} \quad (4)$$

$$\left[\frac{X_i}{X_{\max}} \right]^{3-D} = \frac{W_{(a < X_i)}}{W_T} \quad (5)$$

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n X_i \times W_i \quad (6)$$

$$\text{GMD} = \text{EXP} \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \times \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (7)$$

式中: X_i 为第 i 级湿筛团聚体的平均直径(mm); $X_{\max}$ 为最大粒级湿筛团聚体的平均直径(mm); $W_{(a < X_i)}$ 为小于 i 级粒径的土粒累积质量; W_T 为总供试土壤质量; W_i 为第 i 级湿筛团聚体的重量百分含量。

2.5 数据处理

采用 Excel 2019 软件统计各项抗蚀性评价指标的平均值、标准差和制作图,图表中数据均为平均值±标准差。用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)的 LSD 多重比较法检验分析不同土壤基质处理方式、不同土层各项抗蚀性评价指标的差异显著性($P < 0.05$),运用 Pearson 相关性分析各项抗蚀性评价指标的相关性。主成分分析(PCA)能够降低各指标间的多重共线性影响,真实反映土壤抗性的强弱,本研究选用 $x_1 \sim x_{13}$ 共 13 个土壤抗蚀性评价指标进行主成分分析,根据主成分个数提取原则(即主成分对应特征根 >1 的前 m 个主成分)提取主成分个数,筛选影响抗蚀性的主要因子。

3 结果与分析

3.1 不同处理方式土壤抗蚀性评价指标的差异

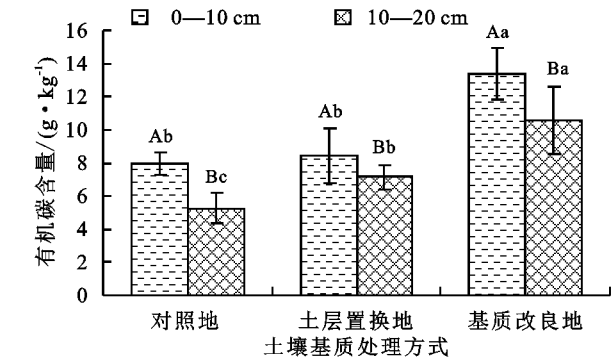
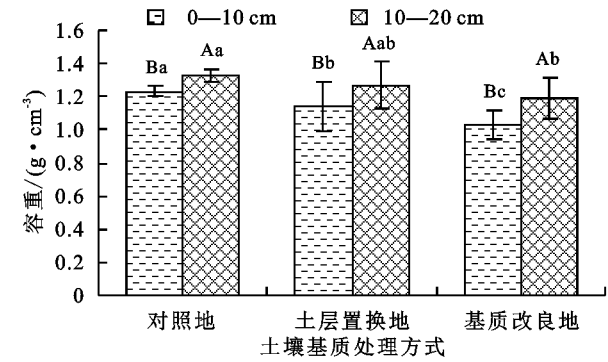
3.1.1 土壤容重和有机碳含量 从图 1 可以看出,0—10 cm 土层容重均显著低于 10—20 cm 土层($P < 0.05$);同一土层,对照地土壤容重最高,基质改良地最低;0—10 cm 土层,不同处理之间差异显著($P < 0.05$);10—20 cm 土层,基质改良地与对照地差异显著($P < 0.05$)。与对照地相比,土层置换地、基质改良地 0—10 cm 土层容重分别降低 7.32% 和 16.26%,10—20 cm 土层分别下降 4.51% 和 10.53%。

由图 1 可知,0—10 cm 土层 SOC 含量均显著高于 10—20 cm 土层($P < 0.05$);同一土层,基质改良地 SOC 含量最高,对照地最低;0—10 cm 土层,基质改良地与对照地、土层置换地差异显著($P < 0.05$);10—20 cm 土层,不同处理之间均差异显著($P < 0.05$)。土层置换地、基质改良地 0—10 cm 土层 SOC 含量比对照地分别增加 6.69% 和 69.19%,10—20 cm 土层分别增加 35.04% 和 99.81%。

3.1.2 土壤抗蚀指数 由图 2 可知,0—10 cm 土层抗蚀指数显著高于 10—20 cm 土层($P < 0.05$),同一土层,抗蚀指数从大到小依次为基质改良地、土层置换地、对照地。土层置换地、基质改良地 0—10 cm 土层分别比对照地提高 0.16%,9.72%,但不同处理间差异不显著($P > 0.05$);土层置换地、基质改良地 10—20 cm 土层

分别比对照地提高 30.18%,46.86%,土层置换地、基质

改良地与对照地差异显著($P<0.05$)。



注:不同大写字母表示相同土壤基质处理方式不同土层间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同土层不同土壤基质处理方式间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同土壤基质处理方式土壤容重和有机碳含量

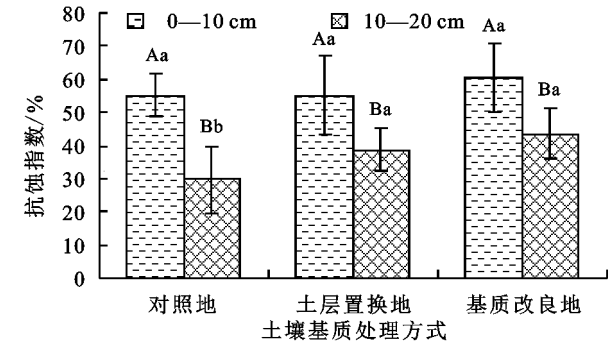


图 2 不同土壤基质处理方式土壤抗蚀指数

3.1.3 土壤团聚体特征 由表 1 可知,>0.25 mm 干筛团聚体含量从高到低依次为>5 mm 干筛团聚体(37.76%~46.25%),2~5 mm 干筛团聚体(20.75%~24.09%),1~2 mm 干筛团聚体(12.91%~15.92%),0.5~1 mm 干筛团聚体(5.56%~7.96%),0.25~0.5 mm 干筛团聚体(4.43%~5.63%)。除基质改良地 2~5 mm 干筛团聚体外,其余同一处理两土层间差异不显著($P>0.05$)。

从表 1 可以看出,>5 mm 干筛团聚体含量依次为基质改良地>土层置换地>对照地,且基质改良地与土层置换地、对照地差异显著($P<0.05$),土层

置换地、基质改良地 0—10 cm 土层比对照地分别提高 0.24%,15.23%,10—20 cm 土层分别提高 3.13%和 22.48%。2~5,1~2,0.5~1 mm 干筛团聚体含量均表现为对照地与土层置换地相近,高于基质改良地,0—10 cm 土层不同处理间差异不显著($P>0.05$),10—20 cm 土层,基质改良地与土层置换地、对照地差异显著($P<0.05$),基质改良地比对照地降低 13.86%(2~5 mm),17.88%(1~2 mm),30.15%(0.5~1 mm)。0—10 cm 土层 0.25~0.5 mm 干筛团聚体含量表现为对照地=土层置换地>基质改良地,且基质改良地与土层置换地、对照地差异显著($P<0.05$),基质改良地比对照地降低 20.32%;10—20 cm 土层表现为对照地>土层置换地>基质改良地,且基质改良地与对照地差异显著($P<0.05$),基质改良地比对照地降低 18.65%。<0.25,>0.25 mm 干筛团聚体含量在 3 种处理间差异不显著($P>0.05$),表明土壤基质改良提高>5 mm 干筛团聚体含量,降低 2~5,1~2,0.5~1,0.25~0.5 mm 干筛团聚体含量,土层置换对各粒径干筛团聚体含量没有显著影响。

表 1 不同土壤基质处理方式干筛团聚体百分含量 单位: %

土层深度/cm	土壤基质处理方式	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	>0.25 mm
0—10	对照地	38.21±4.85Ab	23.29±2.29Aa	15.92±2.65Aa	7.88±1.78Aa	5.56±1.16Aa	9.13±2.69Aa	90.87±2.69Aa
	土层置换地	38.30±5.10Ab	23.38±1.92Aa	15.90±2.63Aa	7.85±1.88Aa	5.56±1.15Aa	9.01±2.67Aa	90.99±2.67Aa
	基质改良地	44.03±5.31Aa	22.29±1.70Aa	13.98±1.55Aa	6.08±1.08Aa	4.43±1.43Ab	9.19±4.52Aa	90.81±4.52Aa
10—20	对照地	37.76±3.80Ab	24.09±1.92Aa	15.72±2.31Aa	7.96±1.91Aa	5.63±0.93Aa	8.84±2.49Aa	91.16±2.49Aa
	土层置换地	38.94±4.72Ab	23.74±1.83Aa	15.11±2.37Aa	7.45±2.20Aa	5.31±1.03Aab	9.45±3.50Aa	90.55±3.50Aa
	基质改良地	46.25±4.56Aa	20.75±1.93Bb	12.91±1.79Ab	5.56±0.73Ab	4.58±0.83Ab	9.95±4.56Aa	90.05±4.56Aa

注:不同大写字母表示相同土壤基质处理方式下不同土层之间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一土层不同土壤基质处理方式之间差异显著($P<0.05$)。下同。

从表 2 可以看出,研究区以>2 mm 湿筛团聚体为主(17.34%~36.52%)。对照地各粒径(除 0.5~1 mm 外)湿筛团聚体含量均表现为 0—10 cm 土层高于 10—20 cm 土层,不同土层间>2,1~2,>0.25,>0.5 mm 湿

筛团聚体含量差异显著($P<0.05$)。土层置换地各粒径(除 0.25~0.50 mm 外)湿筛团聚体含量均表现为 0—10 cm 土层高于 10—20 cm 土层,但不同土层间差异均不显著($P>0.05$)。基质改良地各粒径(除 0.25~0.5 mm

外)湿筛团聚体含量均表现为 0—10 cm 土层高于 10—20 cm 土层,且差异显著($P<0.05$)。

从表 2 还可看出, $>2,0.5\sim1$ mm 湿筛团聚体含量均表现为基质改良地 $>$ 土层置换地 $>$ 对照地,且基质改良地与土层置换地、对照地间差异显著($P<0.05$),土层置换地、基质改良地 >2 mm 湿筛团聚体含量比对照地分别增加 13.44%~6.95%和 78.37%~85.38%, $0.5\sim1$ mm 分别增加 2.23%~5.67%和 15.26%~31.52%。基质改良地 1~2 mm 湿筛团聚体含量最高,对照地最低,0—10 cm 土层,基质改良地与土层置换地、对照地间差异显著($P<0.05$),土层置换地、基质改良地比对照地分别提高 7.21%,31.35%,10—20 cm 土层,基质改良地与对照地差异显著($P<0.05$),土层置换地、基质改良地比对照地分别提高 8.32%,17.65%。0—10,10—20 cm

土层 $0.25\sim0.5$ mm 湿筛团聚体含量最高分别为基质改良地、土层置换地,对照地最低,且基质改良地、土层置换地(除 0—10 cm 土层外)与对照地差异显著($P<0.05$),土层置换地、基质改良地 0—10 cm 土层比对照地分别提高 6.83%,12.95%,10—20 cm 土层分别提高 18.87%和 17.76%。各土层的 $>0.25, >0.5$ mm湿筛团聚体含量均表现为基质改良地 $>$ 土层置换地 $>$ 对照地,且不同处理间差异显著($P<0.05$),0—10,10—20 cm 土层置换地 >0.25 mm 湿筛团聚体含量比对照地分别增加 6.76%,11.17%, >0.5 mm湿筛团聚体含量分别增加 6.74%,9.38%;基质改良地比对照地分别增加 50.80%,41.69%和 58.98%,47.26%,表明土层置换、土壤基质改良显著提高紫色土各粒径湿筛团聚体含量。

表 2 不同土壤基质处理方式湿筛团聚体百分含量 单位:%

土层深度/cm	土壤基质处理方式	>2 mm	1~2 mm	$0.5\sim1$ mm	$0.25\sim0.5$ mm	>0.25 mm	>0.5 mm
0—10	对照地	19.70±1.55Ab	10.40±0.78Ab	8.47±0.61Ab	8.34±0.71Ab	46.91±1.78Ac	38.57±2.09Ac
	土层置换地	21.07±3.24Ab	11.15±1.94Ab	8.95±1.00Ab	8.91±1.03Aab	50.08±3.43Ab	41.17±4.08Ab
	基质改良地	36.52±2.87Aa	13.66±2.22Aa	11.14±1.43Aa	9.42±1.10Aa	70.74±1.25Aa	61.32±1.77Aa
10—20	对照地	17.34±2.61Bb	9.01±0.97Bb	8.52±1.07Ab	8.11±1.05Ab	42.98±2.71Bc	34.87±3.24Bc
	土层置换地	19.67±3.97Ab	9.76±1.33Aab	8.71±1.03Ab	9.64±1.90Aa	47.78±3.88Ab	38.14±4.78Ab
	基质改良地	30.93±4.13Ba	10.60±1.09Ba	9.82±1.28Ba	9.55±0.87Aa	60.90±2.12Ba	51.35±2.23Ba

从表 3 可以看出,MWD 和 GMD 均表现为 0—10 cm 土层高于 10—20 cm 土层, D 和结构破坏率则相反。对照地、基质改良地湿筛团聚体稳定性指标在两土层间差异显著($P<0.05$)。

从表 3 还可看出,MWD、GMD 表现为基质改良地 $>$ 土层置换地 $>$ 对照地。基质改良地 MWD 与土层置换地、对照地差异显著($P<0.05$),0—10 cm 土层,土层置换地、基质改良地比对照地分别提高 5.61%,57.01%,10—20 cm 土层分别提高 9.18%,47.96%。不同处理间 GMD 差异显著($P<0.05$),

0—10 cm 土层,土层置换地、基质改良地分别比对照地提高 5.17%,68.97%,10—20 cm 土层分别提高 9.43%,49.06%。 D 、结构破坏率则表现为对照地 $>$ 土层置换地 $>$ 基质改良地,且不同处理间差异显著($P<0.05$),0—10,10—20 cm 土层,土层置换地 D 比对照地分别降低 0.72%,1.07%,基质改良地分别降低7.58%,4.64%;土层置换地结构破坏率比对照地分别降低7.05%和 10.81%,基质改良地分别降低 54.64%和 39.22%,表明土层置换、土壤基质改良可降低紫色土 D 和结构破坏率,提高 MWD 和 GMD。

表 3 不同土壤基质处理方式湿筛团聚体稳定性指标

土层深度/cm	土壤基质处理方式	MWD	GMD	D	结构破坏率/%
0—10	对照地	1.07±0.05Ab	0.58±0.03Ac	2.77±0.01Ba	48.37±1.78Ba
	土层置换地	1.13±0.11Ab	0.61±0.05Ab	2.75±0.03Ab	44.96±3.58Ab
	基质改良地	1.68±0.07Aa	0.98±0.04Aa	2.56±0.02Bc	21.94±3.81Bc
10—20	对照地	0.98±0.09Bb	0.53±0.04Bc	2.80±0.02Aa	52.83±3.10Aa
	土层置换地	1.07±0.13Ab	0.58±0.06Ab	2.77±0.03Ab	47.12±4.27Ab
	基质改良地	1.45±0.12Ba	0.79±0.06Ba	2.67±0.02Ac	32.11±5.78Ac

3.1.4 土壤机械组成及微团聚体特征 由表 4 可知,紫色土机械组成以 $0.002\sim0.05$ mm 粉粒为主(62.93%~67.1%),其次是 $0.05\sim2$ mm 砂粒(29.22%~35.83%), <0.002 mm 黏粒含量最低(1.24%~3.65%),表明紫色土收缩性和膨胀性较弱,持水保肥能力差,易发生水蚀。对照地除 $0.05\sim2$ mm 砂粒含量外,其他指标均为 0—10 cm 土层 $>$ 10—20 cm 土层,各指

标(除团聚状况外)两土层间差异显著($P<0.05$)。土层置换地 <0.002 mm 黏粒含量、结构性颗粒指数也表现为 0—10 cm 土层 $>$ 10—20 cm 土层,其他指标均为 10—20 cm 土层 $>$ 0—10 cm 土层,但两土层间差异不显著($P>0.05$)。基质改良地 $0.05\sim2$ mm 砂粒含量表现为 0—10 cm 土层 $>$ 10—20 cm 土层,其他指标均表现为 10—20 cm 土层 $>$ 0—10 cm 土

层,但两土层间差异不显著($P>0.05$)。

从表 4 可以看出,0.05~2 mm 砂粒含量为对照地>土层置换地>基质改良地,0—10 cm 土层,基质改良地与对照地差异显著($P<0.05$),土层置换地、基质改良地分别比对照地降低 2.05%,7.83%;10—20 cm 土层,不同处理间差异显著($P<0.05$),土层置换地、基质改良地分别比对照地降低 10.35%,18.45%。0—10,10—20 cm 土层,0.002~0.05 mm 粉粒含量最低分别为土层置换地、对照地,最高是基质改良地,0—10 cm 土层,不同处理间差异不显著($P>0.05$),基质改良地比对照地、土层置换地分别高 1.74%,2.48%;10—20 cm 土层,土层置换地、基质改良地与对照地差异显著($P<0.05$),土层置换地、基质改良地分别比对照地提高 4.72%,6.67%。<0.002 mm 黏粒含量、结构性颗粒

指数表现为基质改良地>土层置换地>对照地,0—10 cm 土层,基质改良地与对照地差异显著($P<0.05$),土层置换地和基质改良地<0.002 mm 黏粒含量比对照地分别提高 58.64%,73.82%,结构性颗粒指数分别提高 64.68%,74.23%;10—20 cm 土层,基质改良地与土层置换地、对照地间差异显著($P<0.05$),土层置换地、基质改良地<0.002 mm 黏粒含量比对照地分别提高 59.68%,194.35%,结构性颗粒指数分别提高 53.81%,183.25%。团聚状况表现为基质改良地>土层置换地>对照地,基质改良地与对照地差异显著($P<0.05$),土层置换地、基质改良地比对照地分别提高 2.42%~9.69%和 14.62%~20.16%,表明土壤基质改良改善了紫色土颗粒组成和微团聚体,提高结构性颗粒指数,改良团聚状况。

表 4 土壤机械组成与微团聚体特征状况

单位: %

土层 深度/cm	土壤基质 处理方式	砂粒 (0.05~2 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	黏粒 (<0.002 mm)	结构性 颗粒指数	团聚状况
0—10	对照地	32.68±1.91Ba	65.42±1.49Aa	1.91±0.65Ab	2.91±0.96Ab	33.93±4.94Ab
	土层置换地	32.01±3.53Aab	64.95±4.03Aa	3.03±1.86Aab	4.79±3.31Aab	34.75±6.98Aab
	基质改良地	30.12±1.89Ab	66.56±2.66Aa	3.32±1.44Aa	5.07±2.30Aa	38.89±4.23Aa
10—20	对照地	35.83±2.33Aa	62.93±2.28Bb	1.24±0.21Bb	1.97±0.36Bb	33.04±4.48Ab
	土层置换地	32.12±2.65Ab	65.90±2.72Aa	1.98±0.66Ab	3.03±1.05Ab	36.24±5.84Aab
	基质改良地	29.22±3.28Ac	67.13±4.04Aa	3.65±2.17Aa	5.58±3.48Aa	39.70±6.52Aa

3.2 土壤抗蚀性评价指标之间的相关性

从表 5 可以看出,土壤容重与 D 、结构破坏率呈极显著正相关($P<0.01$),与 SOC、抗蚀指数、>0.25,>0.5 mm 湿筛团聚体含量、MWD、GMD、团聚状况呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)负相关。SOC 与抗蚀指数、>0.25,>0.5 mm 湿筛团聚体含量、MWD、GMD、<0.002 mm 黏粒含量、结构性颗粒指数、团聚状况呈极显著正相关($P<0.01$),与 D 、结构破坏率呈极显著负相关($P<0.01$)。抗蚀指数与>0.25,>0.5 mm 湿筛团聚体含量、MWD、GMD 呈极显著正相关($P<0.01$),与 D 、结构破坏率

呈极显著负相关($P<0.01$)。>0.25 mm 干筛团聚体含量与结构破坏率呈显著正相关($P<0.05$),与团聚状况呈极显著负相关($P<0.01$)。>0.25,>0.5 mm 湿筛团聚体含量、MWD、GMD 间互呈极显著正相关($P<0.01$),与<0.002 mm 黏粒含量、结构性颗粒指数、团聚状况均呈极显著正相关($P<0.01$),与 D 、结构破坏率均呈极显著负相关($P<0.01$)。 D 与结构破坏率呈极显著正相关($P<0.01$), D 、结构破坏率与<0.002 mm 黏粒含量、结构性颗粒指数、团聚状况均呈极显著负相关($P<0.01$)。<0.002 mm 黏粒含量与结构性颗粒指数呈极显著正相关($P<0.01$)。

表 5 土壤抗蚀性评价指标之间的相关系数

项目	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}
x_1	1												
x_2	-0.71**	1											
x_3	-0.52**	0.54**	1										
x_4	-0.05	-0.04	0.12	1									
x_5	-0.57**	0.84**	0.41**	-0.02	1								
x_6	-0.57**	0.82**	0.39**	0.00	0.99**	1							
x_7	-0.53**	0.80**	0.32**	-0.11	0.97**	0.98**	1						
x_8	-0.55**	0.81**	0.36**	-0.08	0.99**	0.99**	0.99**	1					
x_9	0.57**	-0.83**	-0.43**	-0.01	-0.99**	-0.99**	-0.96**	-0.98**	1				
x_{10}	0.54**	-0.82**	-0.38**	0.24*	-0.98**	-0.96**	-0.97**	-0.97**	0.96**	1			
x_{11}	-0.21	0.43**	0.22	-0.01	0.44**	0.43**	0.43**	0.42**	-0.41**	-0.43**	1		
x_{12}	-0.18	0.39**	0.21	0.01	0.40**	0.39**	0.40**	0.39**	-0.38**	-0.39**	0.99**	1	
x_{13}	-0.28*	0.34**	0.01	-0.36**	0.35**	0.31**	0.35**	0.34**	-0.33**	-0.41**	-0.01	-0.07	1

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。

3.3 土壤抗蚀评价指标的主成分分析

从表 6 可以看出,第 1 主成分(F_1)方差贡献率最大,为 55.29%,对土壤抗蚀性影响明显;第 2 主成分(F_2)、第 3 主成分(F_3)方差贡献率分别为 16.98%、11.28%,对土壤抗蚀性影响较小;前 3 个主成分的累计贡献率达到 83.55%,占总信息量的绝大部分,说明用前 3 个主成分作为综合评价指标反映和评价土壤抗蚀性的信息可靠性在 83.55% 以上,满足主成分分析的要求。因此,前 3 个主成分能反映紫色土分布区不同土壤基质处理方式土壤抗蚀性的变异信息,可用所提取的 3 个主成分来衡量土壤抗蚀性的强弱。

表 6 土壤抗蚀性评价成分矩阵及主成分贡献率

指标	第 1 主成分 (F_1)	第 2 主成分 (F_2)	第 3 主成分 (F_3)
容重 x_1	-0.72	0.07	-0.24
有机碳含量 x_2	0.88	0.18	0.05
抗蚀指数 x_3	0.53	0.02	0.50
>0.25 mm 干筛团聚体含量 x_4	-0.01	-0.03	0.81
>0.25 mm 湿筛团聚体含量 x_5	0.95	0.23	-0.07
>0.5 mm 湿筛团聚体含量 x_6	0.95	0.22	-0.06
湿筛团聚体平均重量直径 x_7	0.92	0.25	-0.17
湿筛团聚体平均几何直径 x_8	0.94	0.23	-0.13
湿筛团聚体土壤分形维数 x_9	-0.96	-0.20	0.04
结构破坏率 x_{10}	-0.93	-0.23	0.24
<0.002 mm 黏粒含量 x_{11}	0.22	0.95	0.03
结构性颗粒指数 x_{12}	0.22	0.96	0.07
团聚状况 x_{13}	0.42	-0.21	-0.62
特征根	7.19	2.21	1.47
贡献率/%	55.29	16.98	11.28
累计贡献率/%	55.29	72.27	83.55

根据主成分矩阵中的载荷系数绝对值>0.7 的原则^[16]选择主控因素。从表 6 可以看出, F_1 与 x_1 、 x_2 、 x_5 、 x_6 、 x_7 、 x_8 、 x_9 、 x_{10} 相关性较大; F_2 与 x_{11} 、 x_{12} 相关性较大; F_3 与 x_4 相关性较大。其中, x_1 、 x_9 和 x_{10} 载荷系数为负, x_2 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 、 x_8 、 x_{11} 和 x_{12} 载荷系数为正,表明土壤容重、D、结构破坏率对紫色土抗蚀能力产生负面效果,而 SOC、>0.25 mm 干筛团聚体、>0.25 mm 湿筛团聚体、>0.5 mm 湿筛团聚体、MWD、GMD、<0.002 mm 黏粒、结构性颗粒指数对土壤抗蚀能力产生正面效果,而且湿筛团聚体类指标(湿筛团聚体含量与稳定性指标)载荷数最高。

依据表 7,将各项土壤抗蚀性评价指标进行标准化处理,得到 $F_1 \sim F_3$ 的线性表达式:

$$F_1 = -0.15Z_{x_1} + 0.13Z_{x_2} + 0.12Z_{x_3} + 0.05Z_{x_4} + 0.13Z_{x_5} + 0.13Z_{x_6} + 0.12Z_{x_7} + 0.13Z_{x_8} - 0.14Z_{x_9} - 0.12Z_{x_{10}} - 0.09Z_{x_{11}} - 0.09Z_{x_{12}} + 0.07Z_{x_{13}}$$

$$F_2 = 0.16Z_{x_1} - 0.03Z_{x_2} - 0.09Z_{x_3} - 0.06Z_{x_4} - 0.003Z_{x_5} - 0.01Z_{x_6} + 0.02Z_{x_7} + 0.001Z_{x_8} + 0.02Z_{x_9} - 0.01Z_{x_{10}} + 0.50Z_{x_{11}} + 0.51Z_{x_{12}} - 0.15Z_{x_{13}}$$
$$F_3 = -0.21Z_{x_1} + 0.08Z_{x_2} + 0.38Z_{x_3} + 0.57Z_{x_4} - 0.01Z_{x_5} + 0.001Z_{x_6} - 0.08Z_{x_7} - 0.05Z_{x_8} - 0.01Z_{x_9} + 0.13Z_{x_{10}} - 0.02Z_{x_{11}} + 0.01Z_{x_{12}} - 0.40Z_{x_{13}}$$

式中: $Z_{x_i}(i=1,2,3,\cdots,13)$ 为 x_i 标准化后的取值。

依据第 1,2,3 主成分占前 3 个主成分累积贡献率的权重,建立紫色土抗蚀性的综合评价指数(F)的计算模型为: $F=0.66 \times F_1 + 0.20 \times F_2 + 0.14 \times F_3$ 。

表 7 土壤抗蚀性评价主成分得分系数矩阵

指标	第 1 主成分 (F_1)	第 2 主成分 (F_2)	第 3 主成分 (F_3)
容重 x_1	-0.15	0.16	-0.21
有机碳含量 x_2	0.13	-0.03	0.08
抗蚀指数 x_3	0.12	-0.09	0.38
>0.25 mm 干筛团聚体含量 x_4	0.05	-0.06	0.57
>0.25 mm 湿筛团聚体含量 x_5	0.13	-0.003	-0.01
>0.5 mm 湿筛团聚体含量 x_6	0.13	-0.01	0.001
湿筛团聚体平均重量直径 x_7	0.12	0.02	-0.08
湿筛团聚体平均几何直径 x_8	0.13	0.001	-0.05
湿筛团聚体土壤分形维数 x_9	-0.14	0.02	-0.01
结构破坏率 x_{10}	-0.12	-0.01	0.13
<0.002 mm 黏粒含量 x_{11}	-0.09	0.50	-0.02
结构性颗粒指数 x_{12}	-0.09	0.51	0.01
团聚状况 x_{13}	0.07	-0.15	-0.40

抗蚀性综合评价指数(F)的计算结果(图 3)表明,土层置换地 0—10、10—20 cm 土层的 F 分别为 -0.02 和 -0.48,分别比对照地提高 93.10%、42.17%,基质改良地 0—10、10—20 cm 土层的 F 分别为 1.23 和 0.39,分别比对照地提高 524.14%、146.99%,表明土壤基质改良措施有效提高了紫色土土壤抗蚀性。

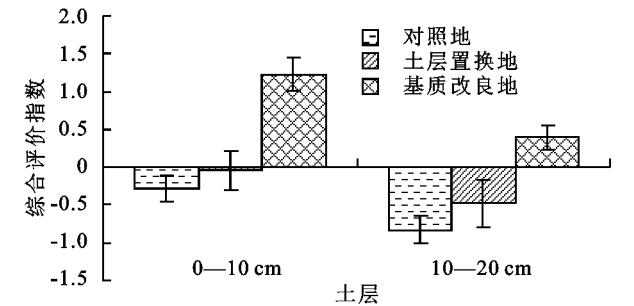


图 3 不同土壤基质处理方式各土层抗蚀性综合评价指数

4 讨论

土壤容重、SOC 含量是表征土壤抗侵蚀能力的重要指标^[17]。本研究中,基质改良地土壤容重最低,

SOC 含量最高,而对照地相反,土层置换地居中,与周冉冉等^[18]的研究结果基本一致。由于土壤基质改良过程中添加了有机肥、锯木屑等物质,增加 SOC 的输入量,使得基质改良地 SOC 含量显著高于对照地和土层置换地($P<0.05$)。此外,野外调查过程中发现,基质改良地植被生长、生物量明显优于对照地和土层置换地,地表凋落物丰富,SOC 来源增加,有助于 SOC 的积累;地表裸露面积减少,地表侵蚀减弱,土壤表层质量逐渐改善和稳定,容重下降。

本研究中,湿筛团聚体类指标载荷数最高,且与其他抗蚀性指标有较高相关性(表 5),表明湿筛团聚体对土壤抗蚀性影响大,可准确体现紫色土的抗蚀能力,与吕宸等^[14]、王针针等^[8]研究结果相似。本研究中,基质改良地湿筛团聚体含量与稳定性均高于土层置换地、对照地,可能是由于基质改良地增大 SOC 的输入量后,进一步提高紫色土的湿筛团聚体含量与稳定性。研究^[19]表明,SOC 作为湿筛团聚体的有机胶结剂,可吸附在黏粒表面提高土粒的黏性,影响土壤团聚体结构的形成而间接影响土壤透水性和透气性,改善土壤结构,降低土壤容重,促进土壤团粒结构的形成^[13],增加土壤大团聚体含量和稳定性,提高土壤抗蚀指数,增强土壤抵抗侵蚀的能力^[5],从而提高土壤抗蚀性。

研究^[17,19]表明,黏粒有较强的抵抗地表径流对土粒的悬浮、分散能力,其含量高低影响土壤持水、保水能力。本研究中,湘南紫色土经土层置换、土壤基质改良后, $<0.002\text{ mm}$ 黏粒含量与结构性颗粒指数均有不同程度的提高,基质改良地变化更为显著($P<0.05$)。但经土壤基质改良后, $<0.002\text{ mm}$ 黏粒含量仍低于三峡库区^[12]、四川遂宁船山区^[20]的紫色土,可能是由于湘南紫色土受地理位置和气候共同影响,水蚀严重,土层浅薄,有的甚至没有土壤发育层,基岩裸露,SOC 含量低下,团粒胶结物质少,团聚体难以形成,黏粒特别容易流失,大颗粒含量上升,抗蚀、抗冲性差,透水性差,蓄水保水能力弱^[11],容易形成粗骨化。此外,研究表明, $<0.002\text{ mm}$ 黏粒可作为土壤微团聚体的基本组成元素,能直接影响土块的形成,从而影响土壤的结构特征、透气性和透水性,进而影响土壤抗蚀性^[21]。因此,微团聚体含量与黏粒含量呈现相似的变化趋势,使团聚状况也有相应变化趋势,但团聚状况与 $<0.002\text{ mm}$ 黏粒含量、结构性颗粒指数相关性不显著($P>0.05$)(表 5),可能是由于团聚状况的计算只涉及 $<0.05\text{ mm}$ 微团聚体含量,缺乏整体性和代表性,导致相关性不显著。

本研究中,土壤容重、SOC 含量、湿筛团聚体含量和稳定性指标对紫色土抗蚀性的影响较大。表明

土壤基质改良通过提高 SOC 含量,增加 $<0.002\text{ mm}$ 黏粒含量,优化土壤机械组成和团聚状况,提高土壤湿筛团聚体含量和稳定性,增大土壤抗蚀指数,改善土壤结构,降低土壤容重,进而显著提高紫色土综合抗蚀指数。此外, $0\text{—}10\text{ cm}$ 土层 SOC 含量、湿筛团聚体含量和稳定性高于 $10\text{—}20\text{ cm}$ 土层,且容重低于 $10\text{—}20\text{ cm}$ 土层,不同处理 $0\text{—}10\text{ cm}$ 土层综合抗蚀指数均高于 $10\text{—}20\text{ cm}$ 土层,与已有的研究^[22-23]结果基本一致。也有研究^[23]发现,当表土层破坏后,土壤侵蚀加剧,土壤肥力进一步丧失。因此,减少人为干扰对表土层的翻耕扰动,有效提高紫色土区域植被覆盖率,增强表土层结构的稳定性,增强其水源涵养和水土保持功能,不仅可以降低水土流失程度,同时也是改善土壤质量、恢复土壤肥力以及实现植被恢复重建的根本保障。

5 结论

(1)土壤基质改良和土层置换可提高湘南紫色土抗蚀性,其中土壤基质改良效果最为显著。土壤基质改良通过增加 SOC 的输入量,改善植被恢复过程紫色土容重、水稳性团聚体、 $<0.002\text{ mm}$ 黏粒含量等理化性质,显著提高紫色土抗蚀性。

(2)无论是单一抗蚀评价指标还是综合评价指数,紫色土抗蚀性在垂直方向上均表现出较为明显的变化规律,即紫色土抗蚀性随土层加深逐渐减弱。因此,减少人为干扰,促进植被恢复和保护现有森林植被,保持土壤表层理化性质的稳定性,对实现湘南紫色土区域经济和社会的可持续发展有着重大意义。

(3)湘南紫色土受成土母质、地理位置及气候等因素影响,土层浅薄,水蚀严重,极易形成粗骨化。土壤容重、SOC 含量、湿筛团聚体含量和稳定性对该地区土壤抗蚀性的影响最大。因此建议适当休耕,施用有机肥,恢复植被,减少地表裸露,以增强湘南紫色土抗侵蚀能力,改善生态环境。

参考文献:

- [1] 《中国水土保持》刊讯.水利部发布 2019 年全国水土流失动态监测结果[J].中国水土保持,2020(9):4.
- [2] 刘川.严重侵蚀退化地植被恢复对土壤抗冲抗蚀性影响研究[D].福州:福建师范大学,2018.
- [3] Chen J J, He B H, Wang X Y, et al. The effects of *Herba andrographitis* hedgerows on soil erodibility and fractal features on sloping cropland in the Three Gorges Reservoir Area[J].Environmental Science and Pollution Research,2013,20(10):7063-7070.
- [4] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003,17(3):34-37,117.
- [5] 吕刚,魏忠平,高英旭,等.不同土地利用类型植物根系

- 与土壤抗蚀性关系研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):111-115.
- [6] Fernando S F, Antonio M G, Carmelo Á Z, et al. Comparison of methods for evaluating soil quality of semiarid ecosystem and evaluation of the effects of physico-chemical properties and factor soil erodibility (Northern Plateau, Spain)[J].*Geoderma*,2019,354(11):e113872.
- [7] 王文艳,张丽萍,刘俏,等.黄土中主要矿物构成对土壤抗蚀性的影响及空间变异[J].水土保持学报,2013,27(4):7-11.
- [8] 王针针,刘泉宏,湛芸,等.紫色土区植物篱篱前淤积带与篱下土坎土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2020,34(5):61-67.
- [9] Chen Z X, Guo M M, Wang W L. Variations in soil erosion resistance of gully head along a 25-year revegetation age on the Loess Plateau[J/OL].*Water*,2020,12(12). DOI:10.3390/w12123301.
- [10] Chang E H, Li P, Li Z B, et al. The impact of vegetation successional status on slope runoff erosion in the Loess Plateau of China[J/OL].*Water*,2019,11(12):2614. <https://doi.org/10.3390/w11122614>.
- [11] 谢庭生,何英豪.湘中紫色土丘岗区水土流失规律及土壤允许侵蚀量的研究[J].水土保持研究,2005,12(1):87-90.
- [12] 史晓梅.紫色土丘陵区不同土地利用类型土壤抗蚀性特征研究[D].重庆:西南大学,2008.
- [13] 黄新君.紫色土坡耕地耕层结构稳定性及对抗蚀性影响[D].北京:中国农业科学院,2017.
- [14] 吕宸,宫渊波,车明轩,等.川西高寒山地灌丛草甸土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2020,34(2):9-17.
- [15] 张华渝,王克勤,宋娅丽.滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤抗蚀性[J].水土保持学报,2019,33(5):50-57.
- [16] Armstrong J S. Derivation of theory by means of factor analysis or tom swift and his electric factor analysis machine[J]. *The American Statistician*,2012,21(5):17-21.
- [17] 史东梅,吕刚,蒋光毅,等.马尾松林地土壤物理性质变化及抗蚀性研究[J].水土保持学报,2005,19(6):37-41.
- [18] 周冉冉,陈佩,郭世荣,等.醋糟和菇渣基质改良剂对连作障碍土壤理化性质及栽培黄瓜的影响[J].中国蔬菜,2021,385(3):57-64.
- [19] 任霞,严宁珍,程永毅,等.重庆溶洼一丘峰区土地利用类型对土壤抗蚀性的影响[J].中国岩溶,2020,39(6):829-835.
- [20] 王培,郭天雷,高强,等.不同生物埂模式对川中丘陵区坡耕地土壤抗蚀性的影响[J].水土保持研究,2018,25(1):7-11.
- [21] Hou X Q, Li R, Jia Z K, et al. Effect of rotational tillage on soil aggregates, organic carbon and nitrogen in the Loess Plateau Area of China[J].*Pedosphere*,2013,23(4):542-548.
- [22] 姜爱国,万福绪,胡菲.南京紫金山灵谷寺不同林地土壤抗蚀性研究[J].水土保持研究,2018,25(1):12-16.
- [23] 郑子成,张锡洲,李廷轩,等.玉米生长期土壤抗蚀性特征及其影响因素分析[J].农业工程学报,2014,30(4):100-108.
- (上接第 21 页)
- [17] 王雪松.红粘土工程堆积体侵蚀规律研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [18] 李宗勋,李启艳,侯晓龙,等.不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征[J].水土保持学报,2020,34(1):27-33.
- [19] 徐露,张丹,向宇国,等.不同耕作措施下金沙江下游紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].山地学报,2020,38(6):851-860.
- [20] 张杰,陈晓安,汤崇军,等.典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):165-173.
- [21] 宋江平,李忠武,刘春,等.湘北红壤低山丘陵区典型水土流失治理模式径流泥沙效应[J].水土保持学报,2018,32(1):32-38.
- [22] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响[J].农业工程学报,2016,32(3):125-134.
- [23] Zhao Z M, Shen Y X, Shan Z J, et al. Infiltration patterns and ecological function of outcrop runoff in Epikarst Areas of Southern China[J].*Vadose Zone Journal*,2018,17(1):1-10.
- [24] 史倩华,王文龙,郭明明,等.模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程[J].应用生态学报,2015,26(9):2673-2680.
- [25] 朱燕琴,赵志斌,齐广平.黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):9-16.