

花岗岩红壤侵蚀退化地不同治理模式土壤抗蚀性评价

姜兴雪^{1,3}, 查瑞波^{1,2}, 毛兰花^{1,3}, 查轩^{1,3}, 陈诗婷^{1,3}, 刘川^{1,3}

(1.福建师范大学地理科学学院,福州 350007;2.福建师范大学旅游学院,
福州 350007;3.湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地,福州 350007)

摘要:为探究花岗岩红壤侵蚀退化地不同治理模式对土壤抗蚀性的影响,通过野外调查与室内外试验,以长汀县封禁(M1)、乔灌木混交(M2)、全坡面播草(M3)、低效林改造(M4)、条沟草灌带(M5)这5种治理模式的土壤为研究对象,选取开垦地(CK1)和裸露地(CK2)为对照,利用主成分分析法揭示土壤抗蚀性主要影响因子,并结合灰色关联分析和耦合分析对土壤抗蚀性进行综合评价。结果表明:(1)不同治理模式的土壤抗蚀性由强到弱依次为 M5>M2>M3>M4>M1>CK2>CK1;(2)>0.25 mm 水稳性团聚体含量和有机质含量是影响土壤抗蚀性的主要因子;(3)土壤抗蚀性与土壤理化性质的灰色关联度较高(0.696),M3的土壤抗蚀性与土壤理化性质之间系统耦合度最高(0.883)。研究结果为花岗岩红壤侵蚀退化地的水土流失治理及生态恢复提供科学依据。

关键词:土壤抗蚀性;花岗岩红壤;侵蚀退化地;土壤理化性质;关联耦合分析

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)06-0031-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.005

Evaluation of Soil Erosion Resistance Under Different Treatment Modes in Erosion Degraded Land of Granite Red Soil

JIANG Xingxue^{1,3}, ZHA Ruibo^{1,2}, MAO Lanhua^{1,3}, ZHA Xuan^{1,3}, CHEN Shiting^{1,3}, LIU Chuan^{1,3}

(1.College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

2.College of Tourism, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 3.State Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology of the Ministry of Science and Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: To explore the effects of different treatment modes on soil erosion resistance in eroded degraded land of granite red soil, field investigation and laboratory experiment were conducted. Soil of five treatment modes in Changting county, including banned (M1), arbor-shrub-grass mixed forest (M2), whole slope grass sowing (M3), low efficiency forest transformation (M4) and the furrow grass shrub zone (M5), were taken as the research objects, clearage (CK1) and the bare land (CK2) were selected as the control. The main influencing factors of soil erosion resistance were revealed by principal component analysis, and the comprehensive evaluation of soil erosion resistance was carried out by combining grey correlation analysis and coupling analysis. The results showed that: (1) The order of soil erosion resistance under different treatment modes was M5>M2>M3>M4>M1>CK2>CK1. (2) The content of water-stable aggregate >0.25 mm and organic matter content were the main factors affected soil erosion resistance. (3) The soil erosion resistance index was strongly correlated with the soil physical and chemical properties (0.696), and the coupling degree between soil erosion resistance and soil physical and chemical properties of M3 was the highest (0.883). The results provide a scientific basis for soil and water loss control and ecological restoration in eroded degraded land of granite red soil areas.

Keywords: soil erosion resistance; granite red soil; erosion degraded land; physical and chemical properties of soil; associated coupling analysis

收稿日期:2021-05-20

资助项目:国家重点研发计划项目“南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理”(2017YFC05054);国家科技支撑计划项目“福建红壤区生态修复和持续经营关键技术集成和示范”(2014BAD15B02)

第一作者:姜兴雪(1998—),女,硕士研究生,主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail: jiang_xingxue@163.com

通信作者:查瑞波(1989—),男,副教授,硕士生导师,主要从事水土保持与生态旅游研究。E-mail: rbzha@fjnu.edu.cn

土壤抗蚀性是土壤对水分散和悬浮的抵抗能力^[1],是衡量土壤抗侵蚀性能强弱的重要测量指标^[2],目前关于土壤抗蚀性的评价方法和影响因素复杂多样。国内外关于土壤对侵蚀的敏感性研究^[3-7]主要集中在土壤抗蚀性方面,通过结合人工模拟与数理统计方法,从对土壤质地、土壤成分、植被恢复措施的定性研究,深入到对团聚体稳定性、有机质、分散率等指标的定量研究,得出土壤抗蚀性主要与土壤结构、土壤颗粒含量等因子有关的结论^[8-10]。土壤抗蚀性在黄土高原地区取得丰富的研究成果,严方晨等^[11]指出,黄土丘陵沟壑区撂荒地的土壤抗侵蚀能力随着植被恢复年限的增加不断增强;刘旦旦等^[12]认为,土壤团聚体含量和土地利用类型直接影响黄土坡面土壤的抵抗侵蚀能力,而土壤有机质和根系含量间接影响土壤抗蚀性。

南方红壤丘陵区是我国第二大土壤侵蚀区^[13],长汀县是我国花岗岩红壤侵蚀最为严重的区域之一,花岗岩红壤侵蚀退化地存在土壤结构疏松、养分缺乏、抗侵蚀性能差等问题,人为扰动和自然灾害导致红壤水土流失现象加剧,阻碍了自然资源和社会经济的良性发展^[14],因此加强对花岗岩红壤区的研究很有必要。关于我国南方红壤区土壤抗蚀性的研究不断丰富,邱陆盼等^[15]通过熵权法指出土壤结构性颗粒指数、土壤团聚度是评价浙江省瓯江流域红壤区土壤抗蚀性的主要指标;李英等^[16]通过主成分分析法对南方红壤丘陵区进行分析,筛选出土壤结构性颗粒指数和 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量作为土壤抗蚀性的最佳指标;张杰等^[17]认为,土壤水稳性团聚体含量和土壤养分较低是导致红壤侵蚀劣地土壤抗蚀性较弱的主要原因。前人的研究主要集中于土壤颗粒含量、土壤结构以及土壤有机质,充分挖掘了影响土壤侵蚀的内部原因,但是综合探究土壤因子之间耦合协调关系的研究较少,不明确土壤抗蚀性能与土壤理化性质之间的相互作用程度,所以土壤抗蚀性研究还需要进行丰富。

基于此,本研究以花岗岩红壤侵蚀退化地作为研究对象,选取封禁、乔灌木混交、全坡面播草、低效林改造、条沟草灌带这 5 种治理模式,以开垦地和裸露地作为对照,通过主成分分析、灰色关联分析和耦合度分析,揭示土壤抗蚀性的主要影响因子及其与土壤理化性质的关联耦合程度,综合分析不同治理模式对土壤抗蚀性的影响,为提高花岗岩红壤侵蚀退化地的土壤抗蚀性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省龙岩市长汀县($116^{\circ}00'45''$ —

$116^{\circ}39'20''\text{E}$, $25^{\circ}18'40''$ — $26^{\circ}02'05''\text{N}$),属于亚热带季风气候,年均气温 $17.5\sim 18.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期 269.8 天,年均降水量 $1\ 613.5\text{ mm}$,3—6 月降雨量占全年的 60%,年均日照时间 $1\ 792\text{ h}$,平均相对湿度 79.2%。土壤类型以花岗岩红壤、水稻土、黄壤为主,植被类型是亚热带常绿阔叶林^[18]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与测定 本试验样地均设置在长汀县河田镇罗地,各治理模式均于 2006 年 1 月开始实施具体措施。试验实施前确保各小区地形地貌、气候、母质条件均一致,各样地土壤均为严重退化的马尾松林地花岗岩红壤,土壤侵蚀严重,地表砂砾层较厚,立地条件差。每个试验小区的海拔(320 m)、坡向(阳坡)、坡度(15°)基本一致,各小区之间用 50 cm 高的水泥围梗隔离,防止互相干扰。根据植被调查实际情况,采取 5 种有代表性的治理模式(封禁、乔灌木混交、全坡面播草、低效林改造、条沟草灌带)和 2 种对照(开垦地、裸露地)。其中开垦地对照(CK1)对土壤进行开垦处理,无植被,土壤结构疏松;裸露地对照(CK2)未采取任何水保措施,无植被,土壤侵蚀严重;封禁治理(M1)对马尾松疏林地采取封禁管理;乔灌木混交治理(M2)沿等高线品字形种植枫香、木荷、胡枝子、宽叶雀稗;全坡面播草治理(M3)在全坡面穴播宽叶雀稗;低效林改造治理(M4)在马尾松上方挖穴施肥;条沟草灌带治理(M5)沿等高线品字形挖条沟,沟内种植胡枝子,沟面播宽叶雀稗。每种治理模式设置 3 组重复,共设 21 个 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的标准样地。

2019 年 9 月采集试验土样,在不同治理模式样地内按“S”形均匀布设 5 个 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的样方,在每个样方 0—20 cm 土层按“梅花”形钻取 5 个土壤样品,采取土样重量约 1 kg ,并带回实验室进行测定,在收集和搬运时尽量减少对团聚体的晃动和破坏。土壤水稳性团聚体采用湿筛法;土壤容重、土壤孔隙度采用环刀法;土壤含水量通过烘箱烘干称重测定;土壤有机质和全氮使用 CN 元素分析仪测定;全磷采用流动分析仪测定^[19]。其他相关指标分别计算公式为:

(1)土壤平均重量直径

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n R_i \overline{W_i} \quad (1)$$

(2)土壤几何平均直径

$$\text{GMD} = \exp \left[\sum_{i=1}^n W_i \ln R_i \right] \quad (2)$$

式中:MWD 为土壤平均重量直径(mm);GMD 为土壤几何平均直径(mm); R_i 为各粒径团聚体的直径(mm); W_i 为各粒径团聚体的重量百分比(%)。

(3)土壤抗蚀指数采用静水崩解法,每种治理模式选取 100 颗 $5\sim 8\text{ mm}$ 粒径的风干土,分 4 次轻放

在崩解盒的网板上,使水面将土粒完全浸没。记录 10 min 内每隔 1 min 的土粒崩塌个数^[20]。

$$S = \frac{\omega - \sigma}{\sigma} \times 100\% \quad (3)$$

式中: S 为土壤抗蚀指数(%); ω 为总土粒数(个); σ 为崩塌土粒数(个)。

1.2.2 土壤抗蚀性评价方法 (1)主成分分析。结合花岗岩红壤侵蚀退化地的特点,使用主成分分析法探究土壤抗蚀性的主要影响因子,本研究选取 13 项与土壤抗蚀性相关的评价指标,其中 $R_{0.25}$ 为 >0.25 mm 水稳性团聚体含量(x_1), $R_{0.5}$ 为 >0.5 mm 水稳性团聚体含量(x_2),MWD 为平均重量直径(x_3),GMD 为几何平均直径(x_4),SP 为土壤总孔隙度(x_5),SBD 为土壤容重(x_6),SWC 为土壤含水量(x_7),SOM 为土壤有机质含量(x_8),TN 为全氮含量(x_9),TP 为全磷含量(x_{10}),AP 为速效磷含量(x_{11}),pH 为土壤溶液酸碱程度(x_{12}),SAI 为土壤抗蚀指数(x_{13})。

(2)灰色关联分析。灰色关联度可以判定土壤抗蚀指数与土壤理化性质的关联程度,通过灰色关联度模型计算关联系数:

$$\xi_i(o)(k) = \frac{\min_i \min_o |Z_i^L(k) - Z_o^L(k)| + \rho \max_i \max_o |Z_i^L(k) - Z_o^L(k)|}{|Z_i^L(k) - Z_o^L(k)| + \rho \max_i \max_o |Z_i^L(k) - Z_o^L(k)|} \quad (4)$$

式中: $\xi_i(o)(k)$ 为不同治理模式下的第 k 组样本的土壤因子 i 与土壤抗蚀指数 o 的关联系数; ρ 为分辨系数,一般取值 0.5; $Z_i^L(k)$ 为第 k 组数据土壤因子 i 的无量纲处理值; $Z_o^L(k)$ 为第 k 组数据土壤抗蚀指数 o 的无量纲处理值。

通过计算均值求取影响关联度:

$$d_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i(k) (i=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

式中: d_o 为土壤因子 i 对土壤抗蚀指数的影响关联度^[21]。

(3)耦合分析。土壤理化性质与土壤抗蚀性之间有一定的相关性,但是相关程度是否协调还有待探究。系统耦合度可以比较不同治理模式土壤抗蚀指数与土壤理化性质的耦合协调程度,耦合度 C 的计算公式:

$$C = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{o=1}^n \xi_i(o)(k) (i=1, 2, \dots, m; o=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

其中,系统耦合度 C 在 $[0, 0.4)$ 严重不协调,在 $[0.4, 0.5)$ 中度不协调,在 $[0.5, 0.6)$ 轻度不协调,在 $[0.6, 0.7)$ 弱协调,在 $[0.7, 0.8)$ 中度协调,在 $[0.8, 0.9)$ 良好协调,在 $[0.9, 1]$ 优质协调^[21]。

1.2.3 数据处理 使用 Excel 2003 进行数据整理,使用 SPSS 22.0 软件进行数据分析,使用 Origin

2021 软件进行制图,使用 Duncan 法进行显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 不同治理模式的土壤理化性质

对不同治理模式的土壤水稳性团聚体含量进行比较分析(图 1a), >0.25 mm 水稳性团聚体含量分布在 55.40%~84.30%,其中 M5、M2、M3 分别比 CK2 增加 28.9%,23.64%,21.26%。 >0.5 mm 水稳性团聚体含量分布在 47.14%~79.20%,其中 M5、M2、M3 分别比 CK2 增加 32.06%,23.32%,14.98%,不同治理模式的土壤水稳性大团聚体存在显著差异($P<0.01$)。图 1b 为土壤团聚体平均重量直径(MWD)与几何平均直径(GMD),其中 M5 的 MWD 与 GMD 最高,分别为 2.80,2.04 mm,而 CK2 最低,分别为 1.40,0.74 mm。与 CK2 相比,M5、M2 和 M3 可以增加土壤水稳性大团聚体的含量。

不同治理模式的土壤容重见图 1c,土壤总孔隙度与土壤含水量见图 1d。土壤容重排序为 CK2>M1>CK1>M4>M3>M2>M5,土壤总孔隙度排序为 M5>M2>M3>M4>CK1>M1>CK2,土壤含水量排序为 M5>M2>M3>M1>M4>CK2>CK1。其中 CK2 的土壤容重最高,土壤总孔隙度最低,分别为 1.59 g/cm³ 和 39.83%,CK1 的土壤含水量最低为 3.13%。M5 的土壤容重最低,而土壤总孔隙度和土壤含水量最高,分别为 0.68 g/cm³,74.16% 和 31.46%。不同治理模式的物理性质说明,M5、M2、M3 和 M4 治理模式可以改善土壤结构,提高土壤蓄水能力。

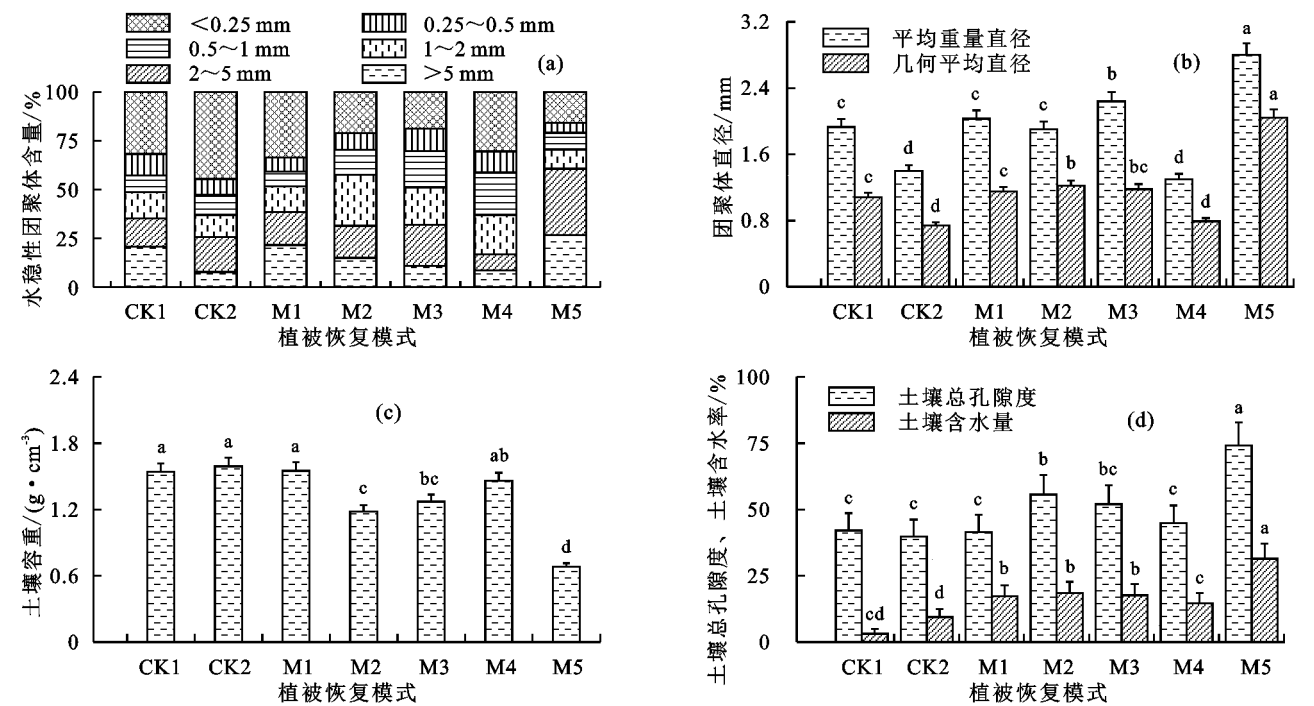
从表 1 可以看出,不同治理模式下土壤有机质含量分布在 3.30~48.18 g/kg,其中 M2 和 M5 最高,分别比 CK1 增加 44.88,42.20 g/kg。土壤全氮含量分布在 0.44~1.73 g/kg,其中 M4 和 M2 的全氮含量最高,M1、M3 和 M5 次之,CK1 和 CK2 最低;土壤全磷含量分布在 0.08~0.29 g/kg,其中 M5 和 M2 的全磷含量最高,M3 和 M4 次之,CK2、CK1 和 M1 最低;土壤速效磷含量分布在 0.001 6~0.127 5 g/kg,其中 M5 的速效磷含量最高,M3、M2 和 M4 次之,CK2 和 CK1 最低;而不同治理模式的土壤 pH 分布在 3.88~5.30,其中 CK2 和 CK1 的 pH 较高,M1、M2、M3 和 M4 次之,M5 最低。不同治理模式的土壤化学性质说明,M5、M2、M3 和 M4 可以增加土壤有机质、全氮、全磷和速效磷的含量。

2.2 不同治理模式的土壤抗蚀指数

不同治理模式的土壤抗蚀指数平均值、标准差与变异系数见表 2。土壤抗蚀指数平均值排序为 M5 (97.20%)>M2 (96.40%)>M3 (96.27%)>M4 (89.07%)>M1 (49.07%)>CK2 (21.20%)>CK1

(17.60%),其中 M5 土壤抗蚀指数的平均值最大(97.20%),标准差与变异系数最小(1.83%,1.88%)。使用 SPSS 22.0 软件的曲线拟合功能,将土壤抗蚀指

数(S)与浸水时间(t)进行回归分析,得出拟合程度比较高的三次多项式函数关系,其通式为: $S=at^3+bt^2+ct+d$,各方程决定系数均在 0.86 以上。



注:不同小写字母表示不同治理模式间存在显著差异($P<0.05$)。下同。

图 1 不同治理模式土壤物理性质

表 1 不同治理模式土壤化学性质

治理模式	有机质含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷含量/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH
CK1	3.30g	0.50d	0.14b	1.6c	5.21ab
CK2	4.97f	0.44d	0.12b	2.1c	5.30a
M1	12.00e	1.62a	0.08b	3.6c	5.12bc
M2	48.18a	1.73a	0.27a	10.7b	5.05bcd
M3	36.11c	1.46b	0.15b	11.9b	5.02cd
M4	21.42d	1.72a	0.13b	7.9bc	4.89d
M5	45.51b	1.33c	0.29a	127.5a	3.88e

不同治理模式的土壤抗蚀指数随浸水时间的动态变化见图 2。在整个崩解过程中,随着时间的增加,土壤抗蚀指数呈不同幅度的降低,CK2 和 CK1 变化幅度最大,分别下降 33.33%和 32.00%,M1 和 M4 次之,分别下降 30%和 24%,M2、M3 和 M5 的变化幅度最小,分别下降 8.00%,5.33%,5.33%。在浸水的第 1 min,M5、M2、M3 和 M4 的抗蚀指数相对较大,M1 次之,CK1 和 CK2 的抗蚀指数较小,均在 50%以下;在浸水的前 1~3 min 内,M5、M2、M3 和 M4 的抗蚀指数波动变化不明显,M1、CK1 和 CK2 降低程度较大;在浸水的 3~10 min 内,M5、M2 和 M3 崩解缓慢,在第 6 min 后趋于稳定,M4、M1、CK2 和 CK1 崩解较快,抗蚀指数分别降至 34%,8%,6%。不同治理模式的土壤抗蚀指数及其随时间变化的下降程度均有所差异,M5 的土壤抗蚀效果最好,

M3 和 M2 次之,M4 和 M1 的抗蚀效果较差,而 CK2 与 CK1 的抗蚀效果最差。由此可见,M5 通过生物措施为主、工程阻控为辅的林下水土流失治理方式,挖条沟改变地表微地形,并且种植多种灌草,土壤理化性质最强,抗蚀效果最佳;M3 与 M2 通过有效的水土保持措施提高植被覆盖度,进而增强土壤水稳性大团聚体含量,抗蚀效果次之;M4 和 M1 以自然植被为主,人为投入的生物措施较少,抗蚀效果较差;CK2 和 CK1 分别对严重退化马尾松林地土壤进行保留和开垦,缺乏水土保持措施,故抗蚀效果最差。

2.3 土壤抗蚀性评价指标的主成分分析

对土壤抗蚀性评价指标进行主成分分析,KMO 检验值为 0.764>0.5, Bartlett 检验值为 0<0.02,主成分分析结果见表 3。提炼出前 2 个主成分的特征根均大于 1,分别为 9.532 和 1.697,第 1 主成分方差贡献率为 73.325%,第 2 主成分方差贡献率为 13.057%,第 1 主成分的贡献比重远大于第 2 主成分,且累积方差贡献率达到 86.382%,在信息损失量所允许的范围之内,这说明前 2 个主成分基本可以反映土壤抗蚀性能。

对土壤抗蚀性因子的载荷与得分情况进行分析(图 3),分别以第 1 主成分、第 2 主成分的载荷值为横、纵坐标,通过载荷与原点的距离反映土壤抗蚀性

因子的解释程度。其中第 1 主成分中正向贡献较高的指标有 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 ($R_{0.25}$)、 >0.5 mm 水稳性团聚体 ($R_{0.5}$)、土壤总孔隙度 (SP)、有机质 (SOM)、平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD)、土壤抗蚀指数 (SAI)、全磷 (TP)、土壤含水量 (SWC) 和速效磷 (AP), 负向贡献值较高的有土壤容重 (SBD) 和 pH; 第 2 主成分中正向贡献值较高的有全氮 (TN), 说明土壤水稳性大团聚体、土壤养分、土壤抗蚀指数等指标可以被第 1 主成分良好解

释, 土壤全氮可以被第 2 主成分良好解释。根据土壤抗蚀性评价指标的主成分分析结果, 结合指标全面的原则, >0.25 mm 水稳性团聚体、有机质、 >0.5 mm 水稳性团聚体、全氮在第 1, 2 主成分正向载荷值最高, 对土壤抗蚀性的贡献最高, 故水稳性大团聚体、有机质是影响土壤抗蚀性的主要因子。结果表明, 土壤有机质促进土壤胶粒凝结形成水稳性大团聚体, 土壤团粒结构的稳定性不断提高, 进而使土壤抗蚀能力增强。

表 2 土壤抗蚀指数随时间变化曲线的参数

治理模式	土壤抗蚀指数的表述值/%			土壤抗蚀指数(S)与 浸水时间(t)的方程	决定系数 R^2
	平均值	标准差	变异系数		
CK1	17.60	10.74	61.03	$S=0.0319t^3-0.2681t^2-3.8757t+39.600$	0.992
CK2	21.20	11.11	52.41	$S=-0.0329t^3+0.8811t^2-9.7729t+50.978$	0.992
M1	49.07	9.63	19.63	$S=-0.0642t^3+1.2012t^2-9.5628t+74.844$	0.989
M2	96.40	2.44	2.53	$S=-0.0080t^3+0.1173t^2-1.2282t+101.070$	0.953
M3	96.27	1.86	1.94	$S=0.0041t^3-0.0078t^2-0.9008t+100.270$	0.860
M4	89.07	8.07	9.06	$S=-0.0215t^3+0.3395t^2-4.1036t+105.070$	0.980
M5	97.20	1.83	1.88	$S=-0.0034t^3+0.1010t^2-1.3300t+101.640$	0.941

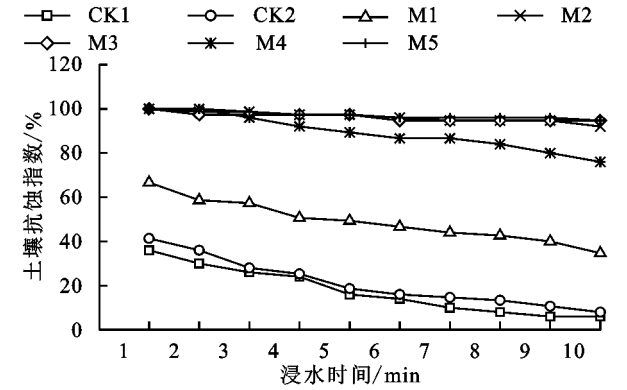


图 2 不同治理模式土壤抗蚀指数随浸水时间的变化曲线

表 3 土壤抗蚀性评价指标主成分分析的特征根与贡献率

主成分	特征根	方差	累积方差
		贡献率/%	贡献率/%
PC1	9.532	73.325	73.325
PC2	1.697	13.057	86.382

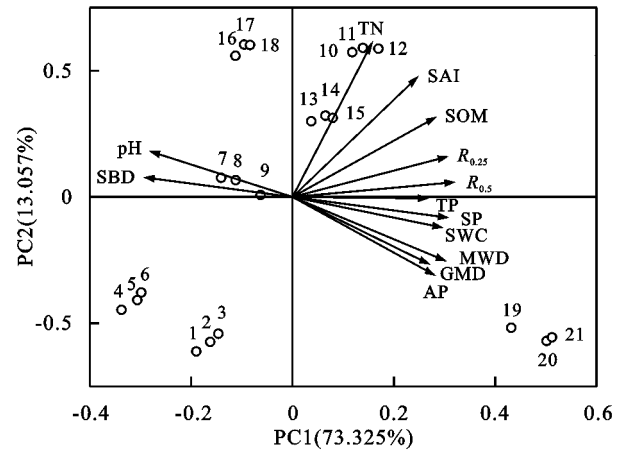


图 3 土壤抗蚀性评价指标的主成分分析

2.4 土壤抗蚀性评价指标的关联耦合分析

通过灰色关联度模型, 对土壤抗蚀指数与土壤理化性质指标的关联度进行计算, 以土壤抗蚀指数为参考指标, 其他土壤理化性质指标为比较指标。如果灰色关联度越大, 说明指标之间的发展趋势越接近, 并且比较指标对参考指标的影响程度越深。土壤抗蚀指数与理化性质指标的关联度平均值为 0.696, 系统关联度较强, 说明不同治理模式下土壤抗蚀指数与土壤理化性质指标的联系较为密切。各指标与土壤抗蚀指数较强关联, 关联度依次排序为有机质 (0.809)、全氮 (0.768)、 >0.25 mm 水稳性团聚体 (0.757)、 >0.5 mm 水稳性团聚体 (0.719)、土壤容重 (0.717)、MWD (0.662)、土壤总孔隙度 (0.660)、土壤含水量 (0.660)、GMD (0.656)、全磷 (0.655)、pH (0.654)、速效磷 (0.641), 这说明土壤抗蚀指数与土壤有机质、全氮和水稳性大团聚体的关联性最强。

为探究不同治理模式土壤抗蚀指数与土壤理化性质的相关程度是否协调, 对其耦合协调度进行计算 (表 4) 可知, 不同治理模式的耦合度最大值为 0.883 (M5), 最小值为 0.416 (M4), 这说明土壤抗蚀指数与土壤理化性质的耦合程度并未达到最佳状态。抗蚀能力越强的治理模式不一定系统耦合协调度越高, 究其原因可能是不同治理模式下植被种植方式和地表微地形不同、植被养分消耗有所差异。在不同植被的不同生长阶段中投入合理的养分, 加强生物措施与工程措施的结合, 有利于提高系统耦合协调度。

表 4 不同治理模式土壤抗蚀指数与评价指标的耦合度

治理模式	CK1	CK2	M1	M2	M3	M4	M5
耦合度	0.725	0.824	0.651	0.548	0.451	0.416	0.883
协调类型	中度协调	良好协调	弱协调	轻度不协调	中度不协调	中度不协调	良好协调

3 讨论

3.1 不同治理模式下土壤抗蚀指数

本研究中,不同治理模式的土壤特征及抗蚀能力有所差异,与开垦地和裸露地相比,人工林治理对土壤抗蚀性的改善效果明显。条沟草灌带的抗蚀能力最高,乔灌草混交、低效林改造和全坡面播草的抗蚀效果次之,封禁的抗蚀性最差,这说明生物调控和工程阻控都是提高土壤抗蚀性的重要措施。生物调控有利于快速增加植被覆盖,减轻水分蒸发与雨滴减蚀;工程阻控可以改变坡面形态,增强土壤养分累积,提高土壤稳定性,这 2 种措施均显著拦蓄径流,提高径流的滞留时间,增加地表入渗。肖盛杨等^[22]对喀斯特区土壤抗蚀性的研究表明,林地的土壤抗蚀效果优于草地和耕地,而本研究中条沟草灌带的抗蚀性略强于乔灌草混交,这可能是由于土壤特征、林草类型和处理措施有所区别。花岗岩红壤侵蚀退化地的土壤中含有大量易风化的云母和长石,导致土壤含砂量大、土壤结构疏松、团聚体的水稳性差,而灌草抗逆性强,生长成熟快,能够迅速为土壤提供养分,所以需要结合母质、植被与地貌开展水土保持措施。条沟草灌带治理模式不仅通过生物措施提高土壤孔隙度、含水量和水稳性大团聚体含量,还通过挖条沟改善地表微地形,促进土壤有机质、氮、磷等养分的积累,增强土壤的蓄水保土能力,使花岗岩红壤的抗蚀能力显著提高。

3.2 不同治理模式下土壤抗蚀性的主要影响因子

土壤抗蚀性的影响因子之间相互作用,土壤理化性质之间存在重叠效应,故结合土壤抗蚀性评价指标的主成分分析与灰色关联分析,可以使评价结果更客观清晰。本研究中水稳性大团聚体含量和有机质含量是衡量花岗岩红壤侵蚀退化地抗蚀能力的主要指标,赵锦梅等^[23]也证明,土壤有机质、水稳性团聚体、MWD 对土壤抗蚀性有重要影响。 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量是判断土壤抗蚀性能的最佳指标,这是因为水稳性团聚体是一种由有机质胶结而成的团粒结构,水稳性大团聚体含量越高,土壤团粒结构更稳定,进而可以使土壤对水流冲击与破坏的阻挡能力更强,土壤遇水难分散^[24]。除此以外,土壤有机质也是土壤抗蚀性研究的重要指标。在土壤颗粒水稳性结构的形成过程中,有机质是促进颗粒胶结和凝聚的重

要物质^[25]。林冠郁闭度与灌草覆盖度越高,根系分泌物越丰富,林下调落物分解不断促进腐殖质形成,土壤有机质积累,促进土壤团聚体形成,土壤抗蚀性越强。土壤总孔隙度也是土壤抗蚀性的重要影响因素。由于条沟草灌带与乔灌草混交的植被空间得到了更加充分合理的利用,凋落物累积与根系发育促使土壤密度疏松、土壤孔隙形成,在改善土壤结构的同时削弱地表径流、增强水分下渗。生物调控与工程阻控相结合的治理模式,可以促进土壤的团粒结构和孔隙结构良性发育,使土壤具备更强的颗粒黏聚力和团聚结构,进而提高土壤的抗侵蚀能力。

3.3 不同治理模式下土壤抗蚀性指标的耦合度

土壤理化性质与土壤抗蚀性之间存在一定的相关性,但是相关程度是否协调则需要借助耦合度模型进行探究。在土壤抗蚀指数与土壤理化性质指标的耦合度计算结果中,抗蚀性较高的乔灌草混交却表现为系统轻度不协调,这可能是由于植被种植方式和地表微地形不同、植被养分消耗有所差异的原因。本试验研究对象为严重退化马尾松林地的花岗岩红壤,由粗晶花岗岩风化而成,土壤粒径较大,胶结能力弱,养分难以储存吸收。乔灌草混交治理模式的养分吸收多,但是归还速率慢、消耗地力强,所以其土壤理化性质与土壤抗蚀指数之间轻度不协调。谢贤健等^[21]研究结论表明,巨桉纯林的系统耦合度中度协调,耕地弱协调,巨桉+果树、巨桉+粮食作物模式轻度不协调,究其不协调的原因是人为翻耕与施肥缺乏合理性。不同类型的林分不仅对外界养分需求不同,自身的制肥能力也有区别。抗蚀能力越强的治理模式不一定系统耦合协调度越高,所以在研究土壤抗蚀性指标相关性的同时,结合耦合协调性共同讨论,可以更好地判断不同治理模式土壤的养分供需合理性。

4 结论

(1)不同治理模式土壤理化性质与土壤抗蚀性存在显著差异。不同治理模式的土壤抗蚀指数排序为 $M5>M2>M3>M4>M1>CK2>CK1$,且与浸水时间呈三次多项式函数关系。 $M5$ 、 $M2$ 和 $M3$ 不仅使土壤总孔隙度、含水量和水稳性大团聚体含量显著增加,提高土壤 MWD 和 GMD,还促进土壤有机质、全氮、全磷等养分的形成,增强土壤抗蚀性,其中 $M5$ 的土壤理化性质与抗蚀性最佳。

(2)土壤抗蚀性受到土壤理化性质等多因子的影响。土壤抗蚀性评价指标的主成分分析结果表明,>0.25 mm水稳性团聚体含量、有机质、>0.5 mm 水稳性团聚体含量、全氮是花岗岩红壤侵蚀退化地土壤抗蚀性的主要影响因子,其中>0.25 mm 水稳性团聚体对土壤抗蚀性影响最大。

(3)不同治理模式对土壤抗蚀性与土壤理化性质的关联耦合度有明显影响。土壤抗蚀性评价指标的关联耦合分析结果表明,土壤抗蚀指数与土壤理化性质较强关联(0.696),其中与有机质含量的关联性最强(0.809)。M5 的土壤抗蚀指数与土壤理化性质系统耦合度最高(0.883),其系统良好协调。关联耦合分析结果可以定量分析土壤抗蚀性水平与土壤理化性质之间的耦合程度,有利于为不同治理模式抗蚀性的综合评价提供科学依据。

参考文献:

[1] 邱陆晞.浙江省瓯江流域源头区林地土壤抗蚀特性及影响因素研究[D].杭州:浙江大学,2016.

[2] 何淑勤,宫渊波,郑子成,等.不同植被类型条件下土壤抗蚀性变化特征及其影响因素[J].水土保持学报,2013,27(5):17-22.

[3] 张华淦,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.

[4] Yakupoglu T, Gundogan R, Dindaroglu T, et al. Effects of land conversion from native shrub to pistachio orchard on soil erodibility in an arid region[J/OL]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189 (11). DOI: 10.1007/s10661-017-6313-8.

[5] Olaniya M, Bora P K, Das S, et al. Soil erodibility indices under different land uses in Ri-Bhoi district of Meghalaya (India) [J]. Scientific Reports, 2020, 10 (1): e14986.

[6] Ostovari Y, Dashtaki S G, Kumar L, et al. Soil erodibility and its prediction in semi-arid regions[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65 (12): 1688-1703.

[7] Fattahi S M, Soroush A, Huang N, et al. Physico-chemical and strength properties of soil affecting erosion induced by saltating particles[J/OL]. Journal of Environmental Geotechnics, 2020. DOI: 10.1680/jenge.19.00230.

[8] 王计磊,吴发启.不同生长期大豆坡耕地土壤抗侵蚀能

力特征[J].土壤学报,2016,53(6):1389-1398.

[9] 余晓章,魏鹏,范川,等.两种巨桉人工林地土壤抗蚀性的比较研究[J].水土保持通报,2015,35(2):58-63.

[10] 刘宽梅,周秋文.典型喀斯特森林土壤的抗蚀性[J].生态学报,2020,40(2):568-577.

[11] 严方晨,焦菊英,曹斌挺,等.黄土丘陵沟壑区撂荒地不同演替阶段植物群落的土壤抗蚀性:以坊塌流域为例[J].应用生态学报,2016,27(1):64-72.

[12] 刘旦旦,张鹏辉,王健,等.黄土坡面不同土地利用类型土壤抗蚀性对比[J].林业科学,2013,49(9):102-106.

[13] 朱鹤健.我国亚热带山地生态系统脆弱区生态恢复的战略思想:基于长汀水土保持 11 年研究成果[J].自然资源学报,2013,28(9):1498-1506.

[14] 张灿,徐涵秋,张好,等.南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估:以福建省长汀县为例[J].自然资源学报,2015,30(6):917-928.

[15] 邱陆晞,张丽萍,陆芳春,等.基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析[J].水土保持学报,2016,30(4):74-79.

[16] 李英,林圣玉,张龙,等.鄱阳湖生态经济区坡耕地表土抗蚀性评价[J].中国水土保持,2016(7):48-51.

[17] 张杰,郑太辉,肖胜生,等.不同植被恢复模式对红砂岩土壤化学性质及抗蚀特征的影响[J].农业工程学报,2018,34(24):115-122.

[18] 朱鹤健,陈志彪,林惠花,等.长汀水土保持研究[M].北京:科学出版社,2013:1-9.

[19] 刘根华.严重侵蚀退化地不同治理模式对土壤理化性质的调控研究[D].福州:福建师范大学,2017.

[20] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.花岗岩红壤区不同治理模式土壤抗冲性因素试验[J].水土保持学报,2019,33(5):34-40,49.

[21] 谢贤健,李永飞.不同巨桉林下紫色土壤抗蚀性与土壤因子的耦合关系分析[J].水土保持学报,2017,31(1):97-102.

[22] 肖盛杨,舒英格,陈梦军.喀斯特高原峡谷区不同植被类型的土壤抗蚀性[J].水土保持通报,2019,39(4):30-35,81.

[23] 赵锦梅,徐长林,马瑞,等.东祁连山不同高寒灌丛草地土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2016,30(5):119-123.

[24] 白秀梅,韩有志,郭汉清.关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2014,28(2):79-84.

[25] 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.