DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.007 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.007
叶尚青, 白永会, 王卓钰. 红壤侵蚀区植被恢复下土壤微生物对土壤可蚀性的影响[J]. 水土保持研究,2026,33(6):49-56.
Ye Shangqing, Bai Yonghui, Wang Zhuoyu. Influence of soil microorganisms on soil erodibility under vegetation restoration in red soil erosion areas [J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):49-56.

红壤侵蚀区植被恢复下土壤微生物对土壤可蚀性的影响

叶尚青, 白永会, 王卓钰
(东华理工大学 地球与行星科学学院, 南昌 330013)

摘 要:[目的]明确植被恢复背景下土壤微生物与土壤可蚀性关系,为水土保持效益评价和退化地修复提供科学依据。[方法]选取福建省长汀县不同植被恢复年限(12,15,21,24,43 a)的样地,以严重侵蚀退化地(0 a)为对照,分析了土壤微生物量碳氮含量和土壤微生物群落结构对土壤可蚀性的潜在作用。[结果]与对照样地相比,土壤可蚀性K值逐渐降低,恢复43 a土壤可蚀性K值降低了29.6%;土壤微生物量碳氮含量分别提高11.35,3.48倍;革兰氏阳性细菌、阴性细菌、真菌、丛枝菌根真菌和放线菌的生物量对比严重退化地均差异显著($p<0.05$);与对照样地相比分别提高30.87,100.36,13.96,618.84,84.5倍;相关分析表明土壤可蚀性与土壤微生物量碳氮及土壤微生物群落结构均呈极显著负相关($p<0.001$)。冗余分析说明土壤微生物指标对土壤可蚀性的累计解释率为92.02%。[结论]土壤微生物量碳氮含量与土壤微生物群落结构的改善,降低了土壤可蚀性K值,且植被恢复43 a时最低,增强了土壤抗侵蚀能力。

关键词:退化红壤; 植被恢复年限; 土壤可蚀性; 土壤微生物量碳氮; 土壤微生物群落结构
中图分类号:S157.1; S154.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0049-08

Influence of soil microorganisms on soil erodibility under vegetation restoration in red soil erosion areas

Ye Shangqing, Bai Yonghui, Wang Zhuoyu
(*School of Earth and Planetary Sciences*, *East China University of Technology*, *Nanchang* 330013, *China*)

Abstract: [**Objective**] To clarify the relationship between soil microorganisms and soil erodibility under the background of vegetation restoration, and to provide a scientific basis for evaluating soil and water conservation benefits and restoring degraded lands. [**Methods**] Study sites with different vegetation restoration years (12 a, 15 a, 21 a, 24 a, 43 a) were selected in Changting County, Fujian Province, China, with severely eroded and degraded land (0 a) as the control. The potential effects of soil microbial biomass carbon and nitrogen contents and microbial community structure on soil erodibility were analyzed. [**Results**] Compared with the control plot, the soil erodibility factor (K value) gradually decreased with increasing restoration duration, and the K value decreased by 29.6% after 43 years of vegetation restoration. Soil microbial biomass carbon and nitrogen contents increased by 11.35 and 3.48 times, respectively. Biomass of Gram-positive bacteria, Gram-negative bacteria, fungi, arbuscular mycorrhizal fungi, and actinomycetes were significantly different from those of severely degraded land ($p<0.05$), and increased by 30.87, 100.36, 13.96, 618.84, and 84.5 times, respectively, compared with the control plot. Correlation analysis showed that soil erodibility was extremely significantly negatively correlated with soil microbial biomass carbon and nitrogen contents and microbial community structure ($p<0.001$).

收稿日期:2026-01-15 **修回日期:**2026-01-31 **接受日期:**2026-02-11
资助项目:东华理工大学博士科研启动基金(DHBK2019004);国家自然科学基金(42377326)
第一作者:叶尚青(2000—),女,山东枣庄人,硕士研究生,研究方向为植被恢复与侵蚀退化。E-mail:2481627274@qq.com
通信作者:白永会(1981—),女,内蒙古赤峰人,博士,讲师,主要从事植被恢复与侵蚀退化研究。E-mail:20196007@ecut.edu.cn

Redundancy analysis indicated that soil microbial indicators accounted for 92.02% of the cumulative explanatory power of soil erodibility. [**Conclusion**] Improvements in soil microbial biomass carbon and nitrogen contents and soil microbial community structure reduced the *K* value, with the lowest *K* value observed after 43 years of vegetation restoration, and strengthened soil resistance to erosion.

Keywords: degraded red soil; vegetation restoration years; soil erodibility; soil microbial biomass carbon and nitrogen contents; soil microbial community structure

土壤侵蚀已成为全球性问题,直接威胁土壤资源可持续利用与农业生产力发展,严重制约着生物多样性、粮食生产安全和人类生计[1]。亟需理解并扭转这一趋势。植被恢复是修复土壤侵蚀退化的途径之一,可通过改善地上部分如植被多样性、覆盖度、冠层结构[2],地表部分如凋落物,地下部分如根系、土壤物理性质和土壤化学指标等加速土壤养分循环,有效调控土壤质量,调控水土流失过程[3]。

土壤可蚀性因子*K*值可表示土壤可蚀性程度[4],是评价土壤结构稳定性与抗蚀性的重要指标。土壤可蚀性受到外部因子和内部因子的双重影响,内部因子如土壤物理指标颗粒组成、土壤化学指标调控,外部因子如气候条件、植被因素和地形因素影响[5]。土壤微生物是退化地修复的重要参与者和改变者[1]。研究者认为土壤微生物通过参与有机质的分解转化等一系列过程,起到降低水力侵蚀的作用,并提高了土壤稳定性[6-7]。所以把植物-土壤-微生物相互作用连接起来,尤其是福建省长汀县是我国亚热带丘陵红壤侵蚀区典型代表,植被恢复多年取得丰硕成果,如地上部分[8]、地表[9-10]和地下部分[11],但仍会发生水土流失,出现"远看青山在,近看水土流"的现象[12-13]。为明确植被恢复过程中土壤微生物的变化对调控水土流失的作用,本文从土壤学和微生物学交叉学科更微观的视角,初步量化植被恢复下土壤微生物对土壤可蚀性的影响。

本文采用野外调查和室内试验相结合的方法,以南方红壤侵蚀退化地植被恢复下样地及严重退化地为对照,阐明植被恢复不同年限下土壤微生物和土壤可蚀性的关系及潜在作用,为解释植被恢复下红壤区土壤结构稳定性的提升与抗蚀性增强提供一定的生物学证据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福建省长汀县河田镇(25°36′—25°39′N,116°26′—116°29′E),地势自北向南倾斜,属中亚热带季风气候,年平均气温18.8 ℃,降水量1 698.7 mm,集中于3—6月份。根据中国土壤系统分类指标,土壤为粗晶花岗岩风化壳上发育的山地丘陵红壤[14]。

1.2 样地设置和指标测定

1.2.1 样地设置与土壤样品采集 2024年11月选取植被恢复12 a,15 a,21 a,24 a和43 a的恢复样地,以严重退化地(0 a)为对照。每个年限样地设置3个重复,每块样地面积20 m×20 m,采样前,同步记录样点经纬度、海拔等信息,样地情况见表1。随机按照"S"形采集0—5 cm土层的土壤样品,将采集的土壤样品去除植物根系、石子等后分成两份保存于密封袋,一份放入含冰袋的保温箱运回实验室,测定土壤微生物碳氮和微生物群落,另一份自然风干测定土壤颗粒组成和土壤有机碳。

表1 植被恢复年限下样地信息

Table 1 Information on plots under different vegetation restoration years

恢复时间/a	位置	海拔/m	坡度/(°)	坡向	植被覆盖度/%	主要植物类型
0	来油坑	315	16～19	SE15°	10	芒萁、马尾松
12	来油坑	315	15～19	SE16°	70	芒萁、百喜草、宽叶雀稗、木荷、马尾松
15	马坑	327	14～18	SE16°	75	芒萁、百喜草、宽叶雀稗、枫香、马尾松、火炬松
21	罗屋喂	328	13～18	SE14°	75	芒萁、宽叶雀稗、木荷、枫香、马尾松、火炬松
24	黄流垄	331	14～19	SE15°	75	芒萁、百喜草、宽叶雀稗、冬青、木荷、枫香、马尾松、火炬松
43	水东坊	329	15～18	SE15°	90	芒萁、百喜草、宽叶雀稗、冬青、刺槐、木荷、枫香、马尾松、火炬松

注:芒萁(*Dicranopteris pedata*),百喜草(*Paspalum notatum*),宽叶雀稗(*Paspalum wettsteinii*),冬青(*Ilex chinensis*),刺槐(*Robinia pseudoacacia*),枫香树(*Liquidambar formosana*),木荷(*Schima superba*),火炬松(*Pinus taeda*),马尾松(*Pinus massoniana*)。

1.2.2 土壤有机质和土壤颗粒组成测定 重铬酸钾氧化外加热法测定有机碳[15]。土壤颗粒通过激光粒度仪分析。颗粒粒径划分:砂粒(2～0.05 mm)、粉粒(0.05～0.002 mm)、黏粒(<0.002 mm)。

1.2.3　土壤微生物量碳氮和土壤微生物群落结构的测定　土壤微生物量碳氮采用氯仿熏蒸法[16]。土壤微生物群落结构采用磷脂脂肪酸分析法[17]。

磷脂脂肪酸的提取步骤如下:选取 9 g 鲜土,利用氯仿、甲醇和磷酸缓冲液(1∶2∶0.8,v/v/v)提取,经活性硅胶柱分离磷脂后,加入甲醇甲苯混合液(1∶1,v/v)和KOH甲醇溶液进行甲基化形成脂肪酸甲酯,并用正己烷溶液进行萃取得到甲酯化的脂肪酸样品;采用气相色谱仪测定,MIDISherlock鉴定。用来表征微生物群落的标志物[17-18]见表 2。

表 2　检验土壤微生物群落的脂肪酸标志物

Table 2　Fatty acid biomarkers for soil microbial communities

土壤微生物群落类型	磷脂脂肪酸标记
革兰氏阳性细菌	i14:0,i15:0,a15:0,i16:0,i17:0,a17:0
革兰氏阴性细菌	16:1ω9c,16:1ω7c,cy17:0,18:1ω7c,cy19:0
丛枝菌根真菌	16:1ω5c
放线菌	10Me16:0,10Mel7:0,10Me18:0
真菌	18:1ω9c,18:2ω6c

1.3　土壤可蚀性值 K 的计算

$$K=\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.025\,\mathrm{SAN}\left(1-\frac{\mathrm{SIL}}{100}\right)\right]\right\}\left(\frac{\mathrm{SIL}}{\mathrm{CLA}+\mathrm{SIL}}\right)^{0.3}\left[1-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)}\right]\left[1-\frac{0.7\,\mathrm{SN}}{\mathrm{SN}+\exp(-5.51+22.9\,\mathrm{SN})}\right] \quad (1)$$

式中:SN 为 1-SAN/100;SAN,SIL,CLA 和 C 分别为砂粒、粉粒、黏粒和有机碳含量(%)。计算得出 K 值的单位为美制,应乘以 0.131 7,转换到国际单位(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)[19]。

1.4　土壤微生物量碳和土壤微生物量氮的计算

$$\mathrm{MBC}=0.38\mathrm{EC} \quad (2)$$

$$\mathrm{MBN}=0.45\mathrm{EN} \quad (3)$$

式中:MBC,MBN 分别为土壤微生物量碳和土壤微生物量氮;EC 为熏蒸土壤提取的有机碳含量减去未熏蒸土壤提取的有机碳含量;EN 为熏蒸土壤提取的有机氮含量减去未熏蒸土壤提取的有机氮含量[20]。

1.5　数据处理和绘图

单因素方差分析(one-way ANOVA)分析不同年限的样地与严重退化地土壤颗粒、土壤有机碳含量、土壤微生物量碳氮含量、土壤微生物群落含量以及土壤可蚀性 K 值的显著差异,并运用 LSD 进行多重比较。Pearson法分析土壤可蚀性 K 值和土壤微生物指标的相关性;采用 Origin 2024 冗余分析,分析土壤微生物量碳氮、微生物指标与土壤可蚀性 K 值的关系,显著性水平 0.05;Excel,SPSS 27.0 及 Origin 2024 完成数据处理与图表绘制。

2　结果与分析

2.1　植被恢复不同年限土壤有机碳含量和土壤颗粒组成变化

由表 3 可知,植被恢复不同年限下土壤粒径组成和有机碳含量与严重退化地相比差异显著($p<0.05$)。土壤有机碳的含量的变化范围 2.39～51.33 g/kg,恢复 15 a 和 21 a 土壤有机碳的含量分别是 24, 18.30 g/kg,恢复 24,43 a 分别是 36.40,51.33 g/kg。土壤砂粒含量在严重退化地为 74.23%,恢复 12 a 降低至 69.40%,恢复 15,21 a,分别是 71.90%,72.67%,恢复 43 a 降低到 70.29%;土壤粉粒含量随植被恢复时间先升高后降低,粉粒含量在严重退化地中为 16.58%,恢复 12 a 升高到 17.26%,恢复 43 a 降低到 14.67%;黏粒含量在严重退化地仅 10.25%,恢复 43 a 升高为 21.15%。

表 3　植被恢复年限下土壤颗粒组成及有机碳含量变化

Table 3　Changes in soil particle composition and organic carbon content under different vegetation restoration years

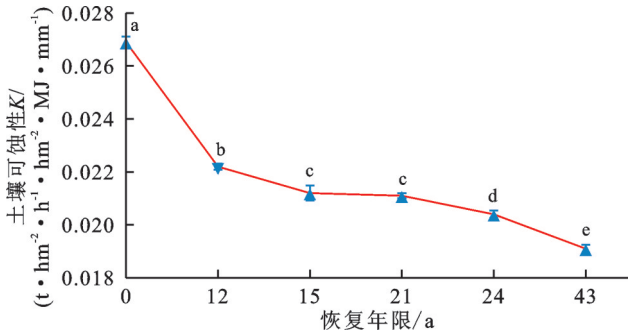
恢复时间/a	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	土壤有机碳/(g·kg⁻¹)
0	74.23±0.38a	16.58±0.28ab	10.25±0.6d	2.39±0.21e
12	69.40±0.27d	17.26±0.22a	10.94±0.21cd	26.22±0.28c
15	71.90±0.81bc	17.19±0.11a	11.38±0.10c	24.00±0.76c
21	72.67±0.39ab	15.42±0.06bc	10.82±0.07cd	18.30±0.38d
24	70.19±0.55cd	15.33±1.03bc	15.35±0.17b	36.40±1.88b
43	70.29±0.16cd	14.67±0.63c	21.15±0.27a	51.33±2.53a

注:数据为平均值±标准误差;同列不同字母表示恢复年限下土壤颗粒和有机碳存在显著差异($p<0.05$)。

2.2　植被恢复不同年限下土壤可蚀性 K 值变化特征

如图 1 所示,随着植被恢复年限的增加,土壤可蚀性 K 值逐渐降低,不同恢复时间的土壤可蚀性 K 值与严重退化地相比差异显著($p<0.05$)。土壤可蚀性 K 值在严重退化地达到最大值 0.027 (t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm),恢复 12 a K 值降低为 0.022,恢复 15 a 和 21 a 无显著性差异($p>0.05$),15 a,21 a 和 24 a 的土壤可蚀性 K 值分别是 0.021,0.021,0.020

(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm),植被恢复43 a降低到0.019 (t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm),相比严重退化地,植被恢复43 a土壤可蚀性*K*值降低29.6%。



注:数据为平均值±标准误差;字母表示植被恢复年限下土壤可蚀性*K*值间差异显著($p<0.05$)。

图1 植被恢复年限下土壤可蚀性值变化

Fig. 1 Changes in soil erodibility factor (*K* value) under different vegetation restoration years

2.3 植被恢复不同年限土壤微生物量碳、氮含量变化

由表4可知,植被恢复不同年限MBC相比严重退化地差异显著($p<0.05$),MBN的含量恢复12 a与对照样地相比无显著差异($p>0.05$),但与其他恢复年份均呈显著差异($p<0.05$);土壤微生物量碳、氮含量的变化范围是(11.57±0.62)~(131.27±5.81) mg/kg,(6.51±0.08)~(22.63±0.91) mg/kg。MBC含量在恢复12 a和15 a分别是(49.33±2.34),(66.82±0.68) mg/kg,恢复21~24 a, MBC含量从(82.87±1.19) mg/kg提高到(108.67±4.34) mg/kg,43 a时达到(131.27±5.81) mg/kg,与对照样地相比,提高11.35倍;MBN含量恢复12 a数值是(10.46±0.57) mg/kg;恢复15 a是(17.06±2.39) mg/kg,恢复21 a和24 a含量分别是(20.02±2.73),(21.32±1.52) mg/kg,植被恢复43 a的MBN含量为(22.63±0.91) mg/kg,相比严重退化地提高3.48倍。

2.4 植被恢复不同年限土壤微生物群落结构组成变化

如图2所示,植被恢复不同年限下革兰氏阳性细菌、阴性细菌、真菌、丛枝菌根真菌和放线菌的生物量对比严重退化地均差异显著($p<0.05$)。严重退化地中革兰氏阳性细菌和阴性细菌的生物量分别为(0.44±0.04),(0.14±0.01) nmol/g(图2A,B),恢复12 a分别为(3.66±0.05),(3.80±0.12) nmol/g($p<0.05$),恢复15 a分别为(4.20±0.04),(4.44±0.06) nmol/g,恢复21 a分别达到(6.25±0.33),(6.15±0.58) nmol/g, 24 a分别是(7.20±0.04),(7.80±0.12) nmol/g,植被恢复43 a分别达到(13.58±1.25),(14.05±0.03) nmol/g,与对照样地相比,提高30.87倍和100.36倍;丛枝菌根真菌的生物量在严重退化地中为(0.02±0.01) nmol/g(图2C),恢复12 a是(1.64±0.04) nmol/g,恢复15 a达到(2.68±0.23) nmol/g,恢复21,24 a分别是(6.16±0.89),(8.14±0.83) nmol/g,恢复43 a增长至(12.38±0.60) nmol/g,与严重退化地相比提高618.84倍;放线菌生物量在对照样地中为(0.06±0.01) nmol/g(图2D),恢复12 a显著提升到(1.05±0.35) nmol/g,在恢复15~21 a从(2.52±0.31) nmol/g降低至(2.32±0.02) nmol/g,恢复43 a与对照样地相比含量增长到(5.07±0.41) nmol/g,提高84.5倍;对照样地中真菌生物量为(1.13±1.04) nmol/g(图2E),恢复12 a和15 a真菌的生物量为(3.29±0.31),(4.86±0.31) nmol/g,恢复21~24 a,真菌生物量由(9.75±0.52)降低至(7.03±0.49) nmol/g,恢复43 a真菌生物量达到(15.78±0.94) nmol/g,与对照样地相比提高13.96倍。

表4 植被恢复年限下土壤微生物生物量碳、氮变化

Table 4 Changes in soil microbial biomass carbon and nitrogen contents under different vegetation restoration years

恢复时间/a	土壤微生物量碳/(mg·kg⁻¹)	土壤微生物量氮/(mg·kg⁻¹)
0	11.57±0.62f	6.51±0.08c
12	49.33±2.34e	10.46±0.57c
15	66.82±0.68d	17.06±2.39b
21	82.87±1.19c	20.02±2.73ab
24	108.67±4.34b	21.32±1.52ab
43	131.27±5.81a	22.63±0.91a

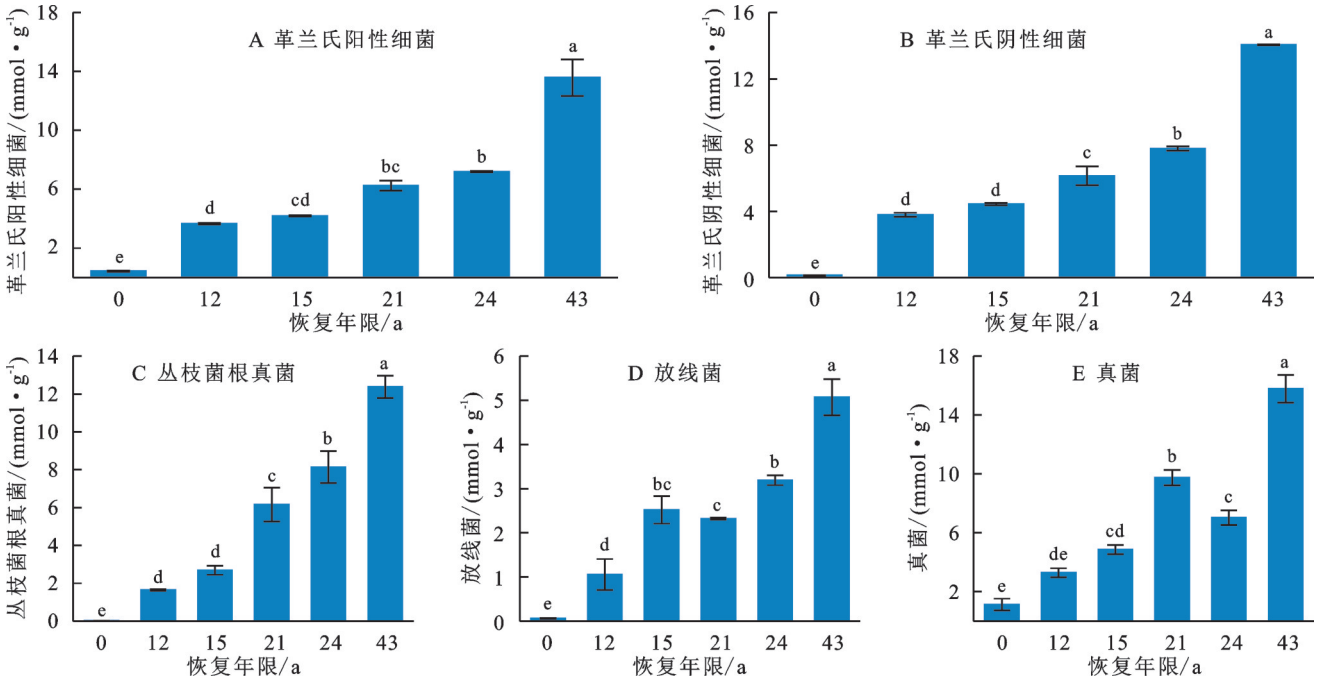
注:数据为平均值±标准误差,不同字母表示恢复年限下土壤微生物量碳氮变化的差异显著($p<0.05$)。

2.5 植被恢复不同年限土壤可蚀性*K*值和土壤微生物的相关分析

图3是对土壤可蚀性*K*值和土壤微生物变量进行的Pearson相关分析,并进行可视化的结果。具体而言,*K*值与土壤微生物变量呈极显著负相关($p<0.001$)。与MBC负相关关系最强($R=-0.92$),其次是放线菌*R*为-0.87,与MBN、革兰氏阳性细菌、阴性细菌和放线菌的*R*均超过-0.80($p<0.001$),*K*值与丛枝菌根真菌呈极显著负相关($p<0.001$,$R=-0.79$),土壤可蚀性与真菌的负相关系数最低-0.77($p<0.001$)。

2.6 植被恢复不同年限土壤可蚀性*K*值和土壤微生物的冗余分析

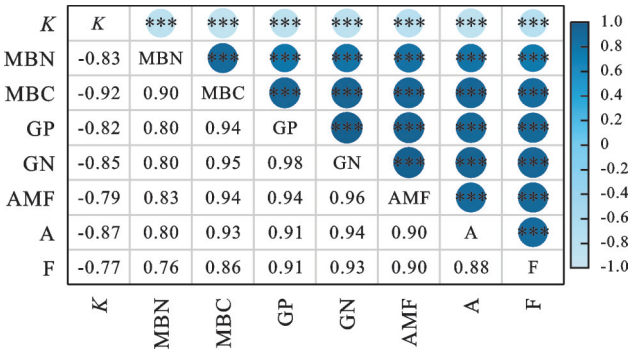
以土壤可蚀性指标为响应变量,以革兰氏阳性细菌、阴性细菌、丛枝菌根真菌、真菌、放线菌以及土壤微生物量碳氮为解释变量进行冗余分析(RDA),探究土壤可蚀性和土壤微生物的关系(图4)。RDA1的解释累积量86.13%,前两轴的累积解释率为92.02%。可见,土壤可蚀性受到土壤微生物的直接影响。



注:小写字母代表恢复年限下土壤微生物量的差异显著($p<0.05$)。

图 2　植被恢复年限下土壤微生物群落结构变化

Fig. 2　Changes in soil microbial community structure under different vegetation restoration years



注:K 为土壤可蚀性值;MBC,MBN 分别为土壤微生物量碳、氮含量;GP,GN,AMF,A 和 F 分别为革兰氏阳性细菌、革兰氏阴性细菌、丛枝菌根真菌、放线菌和真菌的生物量。***为 $p<0.001$,下图同。

图 3　土壤可蚀性与土壤微生物的相关性分析

Fig. 3　Correlation analysis of soil erodibility and soil microorganisms

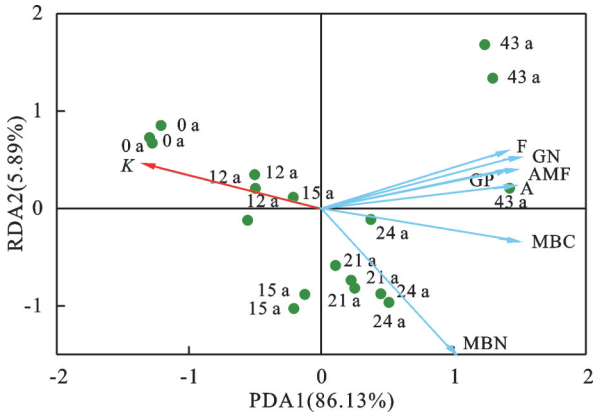


图 4　土壤可蚀性与土壤微生物的冗余分析

Fig. 4　Redundancy analysis of soil erodibility and soil microorganisms

3　讨　论

3.1　植被恢复不同年限土壤可蚀性 K 值与土壤微生物量碳氮含量关系

随着恢复时间的增长,与对照样地相比,土壤微生物量碳氮含量分别提高 11.35,3.48 倍;土壤可蚀性 K 值呈降低趋势。这与张浩等[9]研究结论吻合。其原因有以下几点:植被恢复年限增加,多样丰富的凋落物和根系分泌物为土壤微生物提供更丰富的食物来源,使得土壤微生物的种类和数量增多,进而随着时间的更替,具有较高的生物量。MBC 和 MBN 降低土壤可蚀性的途径包括:(1) 土壤微生物量碳是土壤有机碳的一部分。土壤有机碳中的有机胶体可以提高土粒团聚性和非毛管孔隙度,是促进团聚体形成和稳定的重要物质基础[21],进而影响土壤可蚀性;(2) 促进有机质的分解与转换。微生物通过参与有机质分解转化、促进养分矿化与固持,改善土壤结构,间接增强土壤抗蚀能力[6]。同时通过分解凋落物和土壤中的动植物残体,微生物将有机质转换为植物可以吸收的养分,促进植物的生长发育和繁殖,植物死亡后形成土壤肥力与养分,进而降低土壤可蚀性 K 值[22]。还有研究认为,革兰氏阳性细菌[23]显著提高 SOC 和 MBC,提高土壤的稳定性和抗蚀性,尽管土壤类型不一致,仍能够说明革兰氏阳性细菌在退化地修复中有重要作用。

3.2 植被恢复不同年限土壤可蚀性*K*值与土壤微生物群落结构关系

本研究表明,植被恢复过程中土壤微生物碳氮含量与土壤微生物群落结构逐步完善,恢复43 a,革兰氏阳性、阴性细菌、真菌、放线菌、丛枝菌根真菌生物量较严重退化地分别增长30.87,100.36,13.96,84.5,618.84倍,而对应的*K*值降低29.6%。说明土壤微生物的生物量提高进而增强土壤抗蚀能力,这与张丙昌等[24]的研究结论吻合,尽管植被类型和土壤类型不一样。具体原因包括以下几点:(1)地上部分,随着植被恢复年限延长,植被覆盖度从严重退化地的10%提升至90%[25],植被类型更加复杂(表1)。植被冠层和枯枝落叶层拦截吸收水分[8],削弱降雨对土壤的冲刷和侵蚀,调节地表温度湿度小气候,为土壤革兰氏阳性细菌、革兰氏阴性细菌、真菌和放线菌的生长、发育、代谢、繁殖和生命过程提供更加适宜的微生态环境,进而维持微生物的稳定、维持土壤稳定[26-27]。(2)地表部分,植物的枯枝落叶在土壤表层累积,腐烂分解后增加土壤养分可为主要微生物类群提供大量养分[28]。放线菌可在土壤中的养分浓度较低时,更多地参与土壤中养分的代谢,如几丁质、木质素、腐殖质和植物残体的分解等,为其他生物提供营养物质[29]。所以,微生物生命活动不仅能改善土壤孔隙状况,减弱地表径流流速,而且能稳定土体结构,进一步降低土壤可蚀性[6]。(3)地下部分,乔灌草的深根、浅根、粗根和细根等多样性根系在不同土层,尤其是表层的穿插生长、发育和死亡等生命过程,增加土壤的孔隙度和通气性,加之植被根系分泌物也有利于植被根系生长[11],丛枝菌根真菌与根系形成共生关系,通过菌丝网络缠绕土粒,其分泌的球囊霉素相关土壤蛋白可进一步胶结土粒、优化土壤孔隙结构,降低土壤可蚀性[1,11];真菌利用发达的菌丝网络缠绕土粒,形成稳定结构,其代谢活动分泌的胞外聚合物作为"生物胶黏剂"改善土壤结构[21],对降低土壤可蚀性*K*值产生正向效果。放线菌可利用细胞壁促进碳酸钙的沉淀,进而显著降低土壤孔隙率并提高土壤强度[30]。细菌通过代谢产生的胞外聚合物,可作为生物胶结剂,借助氢键与离子键的作用黏结分散的砂粒与粉粒,推动土壤可蚀性*K*值下降[1]。

总之,土壤微生物在南方红壤区的降低侵蚀退化地土壤可蚀性方面发挥着积极作用,不仅直接通过增强土壤抗蚀能力缓解水力侵蚀,还间接通过改善土壤环境促进植被恢复,形成微生物—侵蚀—植被恢复良性循环。这一过程展示微生物与植物、土壤的复杂而紧密的相互作用。

4 结 论

(1)植被恢复年限下土壤可蚀性*K*值逐渐降低,与对照样地相比恢复43 a土壤可蚀性*K*值降低29.6%。

(2)土壤微生物量碳氮含量比对照样地提高11.35,3.48倍;革兰氏阳性细菌和阴性细菌、丛枝菌根真菌、真菌和放线菌的生物量对比严重退化地均差异显著($p<0.05$)。与对照样地相比,分别提高30.87,100.36,618.84,13.96,84.5倍。

(3)相关分析表明土壤可蚀性与土壤微生物量碳氮及土壤微生物群落结构均呈极显著负相关($p<0.001$)。冗余分析说明土壤微生物指标对土壤可蚀性的累计解释率为92.02%。

参考文献(References):

[1] Coban O, Deyn G B D, Ploeg M V D. Soil microbiota as game-changers in restoration of degraded lands[J]. Science, 2022,375(6584):abe0725.

[2] 欧阳帅,项文化,陈亮,等.南方山地丘陵区森林植被恢复对水土流失调控机制[J].水土保持学报,2021,35(5):1-9.
Ou Y S, Xiang W H, Chen L, et al. Regulation mechanisms of forest vegetation restoration on water and soil erosion in mountainous and hilly area of Southern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5):1-9.

[3] 姜永孟,苏浩浩,陆宇明,等.针阔混交措施对红壤侵蚀区马尾松林土壤有机碳稳定性的影响[J].水土保持学报,2024,38(5):323-331.
Jiang Y M, Su H H, Lu Y M, et al. Effect of coniferous and broadleaf mixture measures on soil organic carbon stability of pinus massoniana plantation in red soil erosion area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5):323-331.

[4] 蒙雯洋,饶良懿.砒砂岩覆土区典型小流域土壤可蚀性*K*值空间变异特征[J].水土保持研究,2024,31(3):10-19.
Meng W Y, Rao L Y. Spatial variability of soil erodibility factor *K* of the typical small watershed in the soil covered area of Pisha sandstone region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(3):10-19.

[5] 武逸杭,田芷源,周璐,等.基于径流小区实测数据的江苏省土壤可蚀性因子变异特征[J].水土保持研究,2025,32(4):1-10.
Wu Y H, Tian Z Y, Zhou L, et al. Variation characteristics of soil erodibility factor in Jiangsu Province based on measured data from runoff plots[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(4):1-10.

[6] 张新,邬奇峰,周燕,等.有机物料单施及与生物质炭配施对红壤团聚体稳定性的影响[J].土壤学报,2025,62

(4):1093-1102.
Zhang X, Wu Q F, Zhou Y, et al. Effects of organic amendments and their combination with biochar on the stability of aggregates in red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,62(4):1093-1102.

[7] Mardhiah U, Caruso T, Gurnell A, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal hyphae reduce soil erosion by surface water flow in a greenhouse experiment[J]. Applied Soil Ecology, 2016,99:137-140.

[8] Wang X P, Zhou M, Wang H, et al. Depth-dependent responses of the soil bacterial community under vegetation restoration in soil erosion areas of Southern China[J]. Land Degradation & Development, 2024, 35(3): 1142-1154.

[9] 张浩,吕茂奎,谢锦升.红壤侵蚀区芒萁对土壤微生物群落结构的影响[J].生态学报,2018,38(5):1639-1649.
Zhang H, Lu M K, Xie J S. Effect of *Dicranopteris dichotoma* on soil microbial community structure in red soil erosion area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(5): 1639-1649.

[10] 胡文静.长汀县不同治理措施对坡面水土流失的影响[J].亚热带水土保持,2023,35(3):12-17.
Hu W J. Impact of different governance measures on soil and water loss on slopes of Changting County[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2023,35(3):12-17.

[11] 颜华玲,林根根,杨乔乔,等.不同植被恢复措施对中国南方侵蚀地区土壤固碳功能菌的影响[J].水土保持研究,2025,32(4):92-99.
Yan H L, Lin G G, Yang Q Q, et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil carbon sequestration functional bacteria in eroded areas of South China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(4):92-99.

[12] 习杰,吴泽华,林强,等.不同植被恢复措施对红壤区马尾松侵蚀退化地土壤崩解特性的影响[J].水土保持学报,2024,38(6):35-43,53.
Xi J, Wu Z H, Lin Q. Effects of different vegetation restoration measures on the disintegration characteristics of eroded degraded land of *Pinus massoniana* in red soil region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(6):35-43,53.

[13] 杨志坚,魏静,张俊鹏,等.红壤侵蚀区马尾松恢复林分发育对持水能力的影响[J].生态学报,2025,45(23): 11793-11809.
Yang Z J, Wei J, Zhang J P, et al. Influence of development on water-holding capacity of *Pinus massoniana* restoration stand in red soil erosion area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(23):11793-11809.

[14] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组.中国土壤系统分类 修订方案[M].北京:中国农业科技出版社,1995.
Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Revised scheme of Chinese soil taxonomy[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995.

[15] 胡璟,吕世琪,胡宗达,等.温带过渡区典型天然林林型土壤有机碳物理组分变化特征及其影响因素[J].生态学报,2025,45(19):9712-9726.
Hu J, Lu S Q, Hu Z D, et al. Variation of soil organic carbon physical fractions and their main influencing factors under four typical natural forest types in a temperate transition area in western of Taiyuan City, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(19):9712-9726.

[16] 刘政,索沛蘅,轩寒风,等.南方红壤侵蚀区马尾松林植被恢复对土壤氮有效性和微生物量碳、氮季节动态的影响[J].生态学报,2025,45(5):2094-2103.
Liu Z, Suo P H, Xuan H F, et al. Seasonal dynamics of soil nitrogen availability and microbial biomass carbon, nitrogen along restoration ages of nitrogen plantations in red soil erosion region at Southern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(5):2094-2103.

[17] 刘顺,许格希,陈健,等.云南金沙江干热河谷土壤微生物群落结构特征及影响因素[J].生态学报,2024,44(16):7172-7182.
Liu S, Xu G X, Chen J, et al. Soil microbial community structure and influencing factors in dry-hot valley region of Jinsha River, Yunnan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(16):7172-7182.

[18] 马旭满,于小萌,王伟鹏,等.不同土地利用方式土壤微生物磷脂脂肪酸在土壤剖面上的变化[J].应用生态学报,2024,35(10):2755-2764.
Ma X M, Yu X M, Wang W P, et al. Changes of soil microbial phospholipid fatty acid in soil profile under different land use types[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(10):2755-2764.

[19] 郑海金,杨洁,喻荣岗,等.红壤坡地土壤可蚀性K值研究[J].土壤通报,2010,41(2):425-428.
Zheng H J, Yang J, Yu R G, et al. Long study on soil erodibility factor K on red-soil sloping land[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010,41(2):425-428.

[20] Bai Y H, Zha X, Chen S F. Effects of the vegetation restoration years on soil microbial community composition and biomass in degraded lands in Changting County, China[J]. Journal of Forestry Research, 2020, 31(4):1295-1308.

[21] 蔡健,申超,郁洁,等.外源有机物对盐碱地土壤大团聚体形成的影响[J].土壤,2025,57(4):892-902.
Cai J, Shen C, Yu J, et al. Promoting effect of exogenous organic material on formation of soil macroaggregates in coastal saline-alkali soil[J]. Soils, 2025,57(4): 892-902.

[22] 宋泽海,田沛.土壤微生物在土壤改良与修复中的作用概述[J].草业科学,2024,41(11):2622-2636.
Song Z H, Tian P. A review of soil microorganism functions in soil improvement and remediation[J]. Pratacultural Science, 2024,41(11):2622-2636.

[23] 崔家馨,韩钰,冯晨,等.秸秆还田配施复合微生物菌剂对退化褐土修复及关键微生物筛选[J].河南农业大学学报,2026,60(1):110-121.
Cui J X, Han Y, Feng C, et al. Remediation effects and keystone microbial taxa screening in degraded cinnamon soil using straw returning combined with microbial agents [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2026,60(1):110-121.

[24] 张丙昌,武志芳,李彬.黄土高原生物土壤结皮研究进展与展望[J].土壤学报,2021,58(5):1123-1131.
Zhang B C, Wu Z F, Li B. Progress and prospect of biological soil crusts in Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021,58(5):1123-1131.

[25] 陈淼,汪小钦,林敬兰,等.土地利用和植被覆盖变化对长汀县30多年土壤侵蚀变化的定量影响[J].水土保持学报,2023,37(5):168-177,188.
Chen M, Wang X Q, Lin J L, et al. Quantitative effects of land use and vegetation cover changes on soil erosion in Changting County in recent 30 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(5):168-177,188.

[26] 刘星雨,谢雷雷,刘刚,等.典型黑土区杨树水土保持林带对耕地土壤抗侵蚀能力的影响[J].生态学报,2024,44(24):11286-11294.
Liu X Y, Xie L L, Liu G, et al. Effect of poplar soil and water concervation shelter on soil erotion resistance of cultivated land in typical black soil area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(24):11286-11294.

[27] 赵灿灿,李印,张济麟,等.改变森林碳输入对土壤微生物磷脂脂肪酸群落组成的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2021,49(6):24-31.
Zhao C C, Li Y, Zhang J L, et al. Effects of alterations in carbon inputs on soil microbial phospholipid fatty acid community composition in forest[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2021,49(6):24-31.

[28] Wang Z G, Hoffmann T, Six J, et al. Human-induced erosion has offset one-third of carbon emissions from land cover change[J]. Nature Climate Change, 2017,7(5):345-349.

[29] 崔熙雯,林小锐,李家兵,等.抗逆放线菌的多样性、功能特性及其在环境修复中的应用[J].微生物学报,2023,63(5):1930-1943.
Cui X W, Lin X R, Li J B, et al. Diversity, functional characteristics, and environmental remediation potential of stress-tolerant actinomycetes [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2023,63(5):1930-1943.

[30] Wang L, Huang Y, Yang Q S, et al. Biocrust reduces the soil erodibility of coral calcareous sand by regulating microbial community and extracellular polymeric substances on tropical coral island, South China Sea [J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14(1):7.

(上接第48页)

[18] 蒋荣,张兴奇,张科利,等.喀斯特地区不同林草植被的减流减沙作用[J].水土保持通报,2013,33(1):18-22.
Jiang R, Zhang X Q, Zhang K L, et al. Runoff and sediment reduction effects under different forest and grass vegetation in a karst area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013,33(1):18-22.

[19] 邵奕铭,高光耀,刘见波,等.自然降雨下黄土丘陵区草灌植物垂直覆盖结构的减流减沙效应[J].生态学报,2022,42(1):322-331.
Shao Y M, Gao G Y, Liu J B, et al. Effects of vertical cover structure of grass and shrub on reducing runoff and soil loss under natural rainfall in the loess hilly region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(1):322-331.

[20] 常玉,余新晓,陈丽华,等.模拟降雨条件下林下枯落物层减流减沙效应[J].北京林业大学学报,2014,36(3):69-74.
Chang Y, Yu X X, Chen L H, et al. Effects of undergrowth litter layer on runoff and sediment reduction under simulated rainfall conditions[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014,36(3):69-74.

[21] 杨霞.基于结构方程模型的林分结构与水土保持功能关系研究[D].北京:北京林业大学,2020.
Yang X. Coupling relationships between stand structure and soil and water conservation function based on structural equation model[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[22] 黄少平,陈俊毅,肖衡林,等.不同坡度植被边坡降雨入渗和径流侵蚀规律的试验研究[J].岩土力学,2023,44(12):3435-3447.
Huang S P, Chen J Y, Xiao H L, et al. Test on rules of rainfall infiltration and runoff erosion on vegetated slopes with different gradients [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023,44(12):3435-3447.

[23] Jia G M, Zhang B L, Liu C, et al. Effects of different vegetation cover on soil carbon in Three Gorges Reservoir [J]. Ecology and Environment, 2008,17(5):2037-2040.

[24] 朱谧远,武小飞,李晨辉,等.黄土高原陡坡地不同植被类型及恢复过程对径流泥沙的影响[J].水土保持研究,2023,30(6):57-66.
Zhu M Y, Wu X F, Li C H, et al. Effects of different vegetation types and restoration processes on runoff and sediment on steep slopes of the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):57-66.

[25] Zhang C H, Wang J L, Jia J B. Characteristics of hydrodynamic parameters of different understory vegetation patterns[J]. Plants, 2025,14(16):2556.