

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.03.039

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.03.039

李松阳, 林根根, 许梦瑶, 等. 崩岗综合治理对土壤物理结构及蓄水能力的影响[J]. 水土保持学报, 2026, 40(3):13-23, 46.

LI Songyang, LIN Gengen, XU Mengyao, et al. Effects of comprehensive Benggang management on soil physical structure and soil water storage capacity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3):13-23, 46.

崩岗综合治理对土壤物理结构及蓄水能力的影响

李松阳¹, 林根根², 许梦瑶¹, 黄种辉¹, 饶绪黎^{3,4},

蒋芳市¹, 张越¹, 黄炎和¹, 林金石¹

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2. 福建省长汀县水土保持站, 福建 龙岩 361000;

3. 福州职业技术学院信息工程学院, 福州 350108; 4. 福建农林大学机电工程学院, 福州 350002)

摘要: [目的] 揭示崩岗综合治理对土壤物理性质和蓄水功能的改善效应及其阶段性特征, 为治理成效评估与技术优化提供科学依据。[方法] 以福建长汀典型的崩岗为研究对象, 选取治理6、10、23 a的恢复样地及未治理崩岗(BG)为对照, 分层(0~20、20~40 cm)采集上、中、下不同部位的土样, 测定体积质量、孔隙度、质地及持水特性等物理指标, 计算土壤蓄水能力指标, 分析其时空演变规律。[结果] 1) 随着治理年限的增大, 土壤物理性质的变化呈现非线性特征, 6 a样地出现初步恢复特征, 上部非毛管孔隙度增至14.91%; 10 a样地表现出较优的综合改良特征, 中部总孔隙度达55.65%且土壤体积质量降至1.11 g/cm³; 23 a样地多数指标维持在较好水平, 部分指标变化趋缓, 可能表明其进入相对稳定阶段。2) 地形部位对土壤物理性质的影响总体强于治理年限。10 a样地中部黏粒占比提高为4.35%, 下部砂粒占比在谷坊拦截与植被固土作用下降低。3) 土壤蓄水功能由非毛管孔隙滞留模式向毛管孔隙吸持模式转变。10 a样地下部吸持贮水量达1 013.73 t/hm², 表明土壤有效贮水能力明显增强; 23 a样地蓄水能力增长趋缓。[结论] 崩岗综合治理通过分区调控, 有效重塑试验样地崩岗坡面土壤物理结构和蓄水能力的空间格局, 表明综合治理模式可能有助于改善崩岗坡面土壤物理结构与蓄水功能, 为崩岗侵蚀区水土流失精准治理提供理论支撑。

关键词: 崩岗; 综合治理; 土壤物理性质; 土壤蓄水功能; 时空演变

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0013-11

Effects of Comprehensive Benggang Management on Soil Physical Structure and Soil Water Storage Capacity

LI Songyang¹, LIN Gengen², XU Mengyao¹, HUANG Zhonghui¹, RAO Xuli^{3,4},

JIANG Fangshi¹, ZHANG Yue¹, HUANG Yanhe¹, LIN Jinshi¹

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Soil and Water Conservation Station of Changting County, Fujian Province, Longyan, Fujian 361000, China;

3. College of Information, Fuzhou Polytechnic, Fuzhou 350108, China; 4. College of Mechanical and

Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: [Objective] To clarify the improvement effects and stage-specific characteristics of comprehensive Benggang (BG) management on soil physical properties and soil water storage capacity, providing a scientific basis for evaluating management effectiveness and optimizing technical practices. [Methods] A typical BG in Changting County, Fujian Province, China, was selected as the study site. Plots restored for 6, 10, and 23 years (6 a, 10 a, 23 a) were selected with an untreated BG as the control. Soil samples were collected from the upper, middle, and lower slope positions at two depths (0-20, 20-40 cm). Physical indicators including bulk density, porosity, texture, and water retention characteristics were measured, and soil water storage capacity was calculated to analyze their

收稿日期: 2026-02-27

修回日期: 2026-04-07

录用日期: 2026-04-13

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-04-21

资助项目: 水利部重大科技专项(SKS2022073); 福建省水利科技专项(KJG21009A)

第一作者: 李松阳(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀与生态恢复研究。E-mail: songyangli163@163.com

通信作者: 林金石(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: linjsh18@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

spatiotemporal dynamics. **[Results]** 1) Soil physical properties showed non-linear changes with increasing management duration. In the 6 a plot, non-capillary porosity at the upper slope increased to 14.91%, indicating initial recovery characteristics. In the 10 a plot, better overall improvement was observed, with total porosity reaching 55.65% and bulk density decreasing to 1.11 g/cm³ at the middle slope. In the 23 a plot, most indices remained at relatively favorable levels, and changes in some indices slowed down, possibly suggesting a transition toward a stable stage. 2) The influence of slope position on soil physical properties was generally greater than that of management duration. In the 10 a plot, clay content at the middle slope increased to 4.35%. At the lower slope, sand content decreased under the combined effects of sediment interception by check dams and vegetation-induced soil stabilization. 3) Soil water holding function shifted from a non-capillary water retention mode to a capillary water adsorption mode. In the 10 a plot, soil water storage capacity via water adsorption at the lower slope reached 1 013.73 t/hm², indicating a marked enhancement in effective soil water storage capacity. In the 23 a plot, the increase in water storage capacity tended to slow down. **[Conclusion]** Comprehensive BG management effectively reshapes the spatial pattern of slope soil physical structure and soil water storage capacity in experimental plots through zonal regulation. The results indicate the integrated management approach may help improve soil physical structure and water storage function on BG slopes, providing theoretical support for the precise control of soil and water loss in BG erosion areas.

Keywords: Benggang; comprehensive management; soil physical properties; soil water storage function; spatiotemporal dynamics

Received: 2026-02-27

Revised: 2026-04-07

Accepted: 2026-04-13

Online(www.cnki.net): 2026-04-21

我国南方红壤丘陵区位于热带-亚热带季风气候带, 水热资源充沛, 是重要的农林业生产基地。然而, 该区域广泛发育深厚的花岗岩风化壳, 受地质构造活动抬升地层, 叠加区域常年湿热的气候影响, 土体结构松散, 抗侵蚀能力弱。在水力与重力的共同作用下, 极易诱发崩岗侵蚀, 严重威胁区域生态安全与社会经济的可持续发展^[1]。因此, 崩岗侵蚀区的生态修复与系统治理已成为南方水土保持工作的核心内容之一。在崩岗生态修复的系统工程中, 土壤不仅是植被定居、群落演替的物质基础, 也是调节地表径流、涵养水源的关键载体^[2]。其中, 土壤物理性质作为评价土壤质量的核心指标, 直接决定土壤的通气透水性、入渗速率及持水保肥能力^[3]。深入揭示崩岗治理过程中土壤物理性质的演变规律, 对于阐明生态恢复机制、科学评估治理成效具有重要的理论价值与现实意义。

针对崩岗侵蚀的治理实践已从早期的单一工程拦挡逐步演变为综合的系统调控, 目前普遍采用以上部截排水阻断径流、中部削坡辅以立体植被配置及下部拦沙营造经济林为核心的标准化工程措施与生物措施结合的综合治理模式^[4]。与此同时, 国内外学者对崩岗侵蚀机理及土壤理化性质分异开展了大量研究, 指出受水力与重力交互作用影响, 崩岗侵蚀区土壤普遍表现出砂化严重^[5]、高孔隙率^[6]等退化特征, 且土壤机械组成与水文过程在集水坡面、崩壁与崩积体等不同地貌部位呈现显著的空间异质性^[7]。

尽管部分研究^[8]已证实, 工程整治与植被恢复措施能有效改善土壤物理结构, 使得治理区土壤体积质量降低且水稳性团聚体含量随植被恢复呈上升趋势, 但现有评价多聚焦于土壤化学养分库的重建或植被群落特征的短期静态评估, 关于崩岗生态治理后土壤物理结构及蓄水功能随恢复年限增加的长周期演变轨迹尚不明确, 导致对不同恢复阶段土壤物理性质的响应差异及关键阈值认识不足, 制约了对崩岗生态系统水土保持功能恢复机制的深入认知。

因此, 本研究采用以空间代时间的研究方法, 以未治理崩岗为对照, 设置6、10、23 a 3种治理年限的恢复样地, 系统探究不同坡位和土层深度的土壤物理结构及蓄水能力的演变特征, 旨在加深对崩岗生态修复过程中土壤结构重构与水文功能恢复机理的认识, 为南方红壤区崩岗治理工程的长期效益评价及后续精准管护提供理论支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省长汀县河田镇(25°30′~25°44′N, 116°16′~116°34′E), 属中亚热带季风气候区。年平均气温17℃, 年降雨量约1 700 mm, 主要集中在4—9月。地形以低山丘陵为主, 海拔300~400 m, 母岩主要以黑云母花岗岩与花岗斑岩为主, 风化壳深厚且节理发育, 抗蚀性差^[9]。土壤类型为花岗岩红壤, 质地疏松, 水土流失严重, 是我国南方典型的崩

岗侵蚀活跃区。经过 30 余年的综合治理,该区域已形成成熟的“上拦、下堵、中间削”的崩岗治理模式,生态环境得到显著改善^[10]。

1.2 样地设置与时空序列构建

本研究采用以空间代时间的研究方法,于 2024 年 10—11 月在研究区内选取立地条件基本一致的 3 个治理样地及 1 个未治理样地构建恢复演替序列,样地具体情况见表 1。治理样地分别为:治理 6 a,处于工程扰动后的生态重建初期;治理 10 a,植被郁闭度增加,凋落物开始积累;治理 23 a,群落结构趋于稳定。选取相邻的未治理活动型崩岗(BG)作为对照。所有治理样地在

修复初期均实施标准化的工程和生物措施:上部修建截排水沟阻断径流;中部实施机械削坡并配置乔灌草立体植被;在下部和中部交界处修建谷坊拦截泥沙,并在下部营造经济林。各样地间距 < 3 km,母质均为酸性粗粒黑云母花岗岩风化物,土壤类型均为红壤,治理前各崩岗占地面积约为 3 000 m²,最大限度消除非时间因子的干扰。在区域尺度上,各样地空间距离较近且母质一致,有助于减弱区域环境差异对恢复序列比较的影响。研究重点在于揭示典型恢复阶段土壤物理性质与蓄水能力的变化特征及其可能机制,而非进行严格意义上基于独立重复样地的处理效应因果检验。

表 1 样地概况
Table 1 Plot overview

治理年限/ a	部位	经纬度	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	母质	土壤类型	主要植被
BG	上部	25°38'49"N, 116°27'57"E	329	20	SW	黑云母花岗岩风化物	红壤	马尾松(<i>Pinus massoniana</i> Lamb.), 芒萁 [<i>Dicranopteris pedata</i> (Houtt.) Nakaike], 五节芒 [<i>Miscanthus floridulus</i> (Labill.) Warburg ex K. Schumann]
	中部		310	24		黑云母花岗岩风化物	红壤	马尾松(<i>Pinus massoniana</i> Lamb.), 芒萁 [<i>Dicranopteris pedata</i> (Houtt.) Nakaike]
	下部		302	3		黑云母花岗岩风化物	红壤	/
6	上部	25°39'47"N, 116°28'36"E	338	25	SW	黑云母花岗岩风化物	红壤	马尾松(<i>Pinus massoniana</i> Lamb.), 芒萁 [<i>Dicranopteris pedata</i> (Houtt.) Nakaike], 木荷 (<i>Schima superba</i> Gardner & Champ.)
	中部		332	16		黑云母花岗岩风化物	红壤	马尾松(<i>Pinus massoniana</i> Lamb.), 芒萁 [<i>Dicranopteris pedata</i> (Houtt.) Nakaike], 五节芒 [<i>Miscanthus floridulus</i> (Labill.) Warburg ex K. Schumann], 宽叶雀稗 (<i>Paspalum wettsteinii</i> Hack.), 胡枝子 (<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.)
	下部		319	5		黑云母花岗岩风化物	红壤	柑橘 (<i>Citrus reticulata</i> Blanco), 宽叶雀稗 (<i>Paspalum wettsteinii</i> Hack.)
10	上部	25°39'18"N, 116°28'13"E	320	20	SW	黑云母花岗岩风化物	红壤	马尾松(<i>Pinus massoniana</i> Lamb.), 枫香 (<i>Liquidambar formosana</i> Hance), 木荷 (<i>Schima superba</i> Gardner & Champ.), 芒萁 [<i>Dicranopteris pedata</i> (Houtt.) Nakaike]
	中部		323	18		黑云母花岗岩风化物	红壤	巨菌草 (<i>Pennisetum giganteum</i> Z.X.Lin), 宽叶雀稗 (<i>Paspalum wettsteinii</i> Hack.), 香根草 [<i>Chrysopogon zizanioides</i> (L.) Roberty], 葛藤 (<i>Argyreia pierreana</i> Bois)
	下部		315	5		黑云母花岗岩风化物	红壤	马尾松(<i>Pinus massoniana</i> Lamb.), 杉木 [<i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.], 枫香 (<i>Liquidambar formosana</i> Hance), 木荷 (<i>Schima superba</i> Gardner & Champ.), 巨菌草 (<i>Pennisetum giganteum</i> Z.X.Lin), 宽叶雀稗 (<i>Paspalum wettsteinii</i> Hack.)
23	上部	25°39'48"N, 116°27'16"E	323	22	SW	黑云母花岗岩风化物	红壤	马尾松(<i>Pinus massoniana</i> Lamb.), 枫香 (<i>Liquidambar formosana</i> Hance), 木荷 (<i>Schima superba</i> Gardner & Champ.), 芒萁 [<i>Dicranopteris pedata</i> (Houtt.) Nakaike]
	中部		306	15		黑云母花岗岩风化物	红壤	马尾松(<i>Pinus massoniana</i> Lamb.), 枫香 (<i>Liquidambar formosana</i> Hance), 芒萁 [<i>Dicranopteris pedata</i> (Houtt.) Nakaike]
	下部		300	6		黑云母花岗岩风化物	红壤	马尾松(<i>Pinus massoniana</i> Lamb.), 油茶 (<i>Camellia oleifera</i> Abel.), 芒萁 [<i>Dicranopteris pedata</i> (Houtt.) Nakaike]

1.3 样品采集及测定

1.3.1 土壤样品采集 在每个样地的上部、中部和下部各随机布设3个10 m×10 m样方,样方间距大于20 m,用于表征不同坡位的土壤特征。去除地表凋落物后,按“S”形分层(0~20、20~40 cm)采集土壤样品。每个土层采集约1 kg混合土样,剔除石砾与根系后风干过筛,用于颗粒组成测定;同时利用100 cm³标准环刀采集原状土,每个土层重复3次,用于测定土壤体积质量、孔隙度及持水特性。

1.3.2 土壤物理性质测定及计算 土壤体积质量、孔隙度、含水率和持水性采用环刀法测定,将采集的原状土环刀(100 cm³)置于平底器皿中,加水至环刀上沿浸泡12 h至饱和状态;随后将环刀置于干砂上通过重力与干砂吸力作用排水2 h,排空非毛管孔隙中的重力水,此时保留的水分即为毛管持水量;最后将土样置于105 ℃烘箱中烘干至恒重。基于上述饱和湿重、排水后湿重及烘干土重,计算土壤体积质量、含水率、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、总孔隙度、毛管孔隙度及非毛管孔隙度。计算公式参照文献[11]。

土壤饱和贮水量、吸持贮水量和滞留贮水量计算公式^[12]为:

$$W_i = 10\,000 \times P_i \times h \quad (1)$$

$$W_c = 10\,000 \times P_c \times h \quad (2)$$

$$W_{nc} = 10\,000 \times P_{nc} \times h \quad (3)$$

式中: W_i 为土壤饱和贮水量, t/hm²; P_i 为土壤总孔隙度, %; W_c 为土壤吸持贮水量, t/hm²; P_c 为土壤毛管孔隙度, %; W_{nc} 为土壤滞留贮水量, t/hm²; P_{nc} 为非毛

管孔隙度, %; h 为土层厚度, m, 本研究中土层厚度取值为0.2 m。

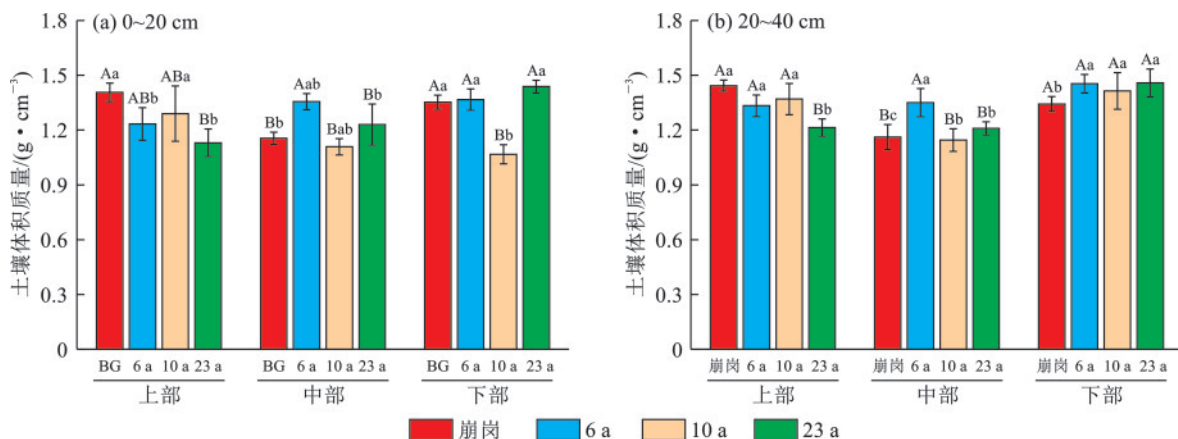
1.4 数据处理

试验数据采用Excel 2019软件进行整理,利用SPSS 27软件进行统计分析。采用多因素方差分析检验治理年限、地形部位及其交互作用对土壤物理性质的影响,差异显著性检验采用LSD法($\alpha=0.05$)。主成分分析及绘图工作使用Origin 2024软件完成。考虑到本研究采用单样地多点采样设计,为评估小样本条件下统计结果的稳健性,对关键土壤物理指标进一步开展敏感性检验。选取土壤体积质量、孔隙度和持水量等关键指标,采用Kruskal-Wallis非参数检验对不同治理年限间的关键指标差异进行辅助验证,并将其结果与参数检验结果进行对照分析,评估统计结论的稳健性与可靠性。

2 结果与分析

2.1 土壤体积质量与质地特征

由图1可知,各样地土壤体积质量为1.07~1.46 g/cm³。整体上,体积质量随治理年限呈先升后降趋势,10 a样地体积质量整体最低。23 a样地上部的体积质量在2个土层中均显著低于BG($p<0.05$),降幅分别为19.67%和15.93%。6 a样地中部的体积质量(1.36 g/cm³)显著高于BG(1.16 g/cm³)和10 a样地(1.11 g/cm³)($p<0.05$),10、23 a样地中部则逐渐降低。10 a样地下部0~20 cm的体积质量仅为1.07 g/cm³,为全部处理中最低值,较BG显著降低21.08%,但在20~40 cm为1.41 g/cm³。23 a样地下部的体积质量在2个土层中均为最高值(1.44、1.46 g/cm³)。



注:图柱上方不同大写字母表示同一部位下不同治理年限间的差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一治理年限下不同部位间的差异显著($p<0.05$)。下同。

图1 崩岗不同治理年限土壤体积质量

Fig.1 Soil bulk density of Benggang under different management durations

由图2可知,随着治理年限的增长,土壤砂粒占比总体呈下降趋势,粉粒和黏粒占比相应增加,其中下部变化最为显著。各样地颗粒组成以砂粒

为主(37.07%~87.37%),粉粒次之,黏粒占比最低。依据美国制土壤质地分类,BG下部属砂土(砂粒>87%),BG上部0~20 cm和23 a样地下部

20~40 cm 属粉壤土,其余样品均属砂壤土。下部质地改善最为显著,0~20 cm 砂粒占比由 BG 的 87.37% 分别显著降至 6 a 的 72.26%、10 a 的 51.71% 和 23 a 的 48.09% ($p < 0.05$); 20~40 cm 呈现相同规律,23 a

样地砂粒占比降至 37.07%,粉粒升至 57.60%,为全部处理中最高值,质地由砂土转变为粉壤土。下部黏粒占比在 10、23 a 样地中均显著高于 BG ($p < 0.05$)。

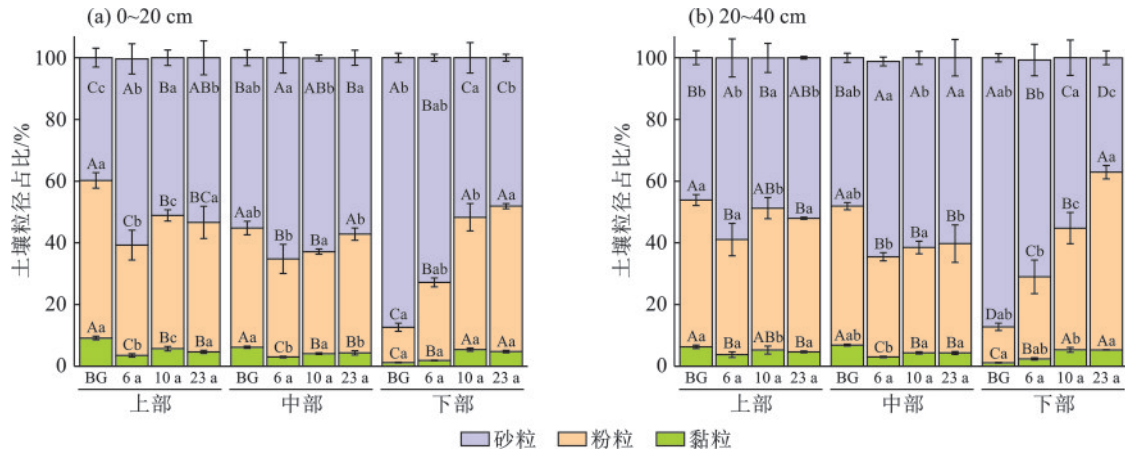


图 2 崩岗不同治理年限土壤粒径分布

Fig.2 Soil particle size distribution of Benggang under different management durations

2.2 土壤孔隙结构

由图 3 可知,随治理年限增加,总孔隙度和毛管孔隙度总体呈增大趋势,而非毛管孔隙度呈减小趋势。总孔隙度为 40.78%~56.86%。0~20 cm 土层中,6、23 a 样地上部显著高于 BG ($p < 0.05$); 10 a 样地在 3 个部位均显著高于 BG,其中下部达 56.86%,为全部处理中最高值。20~40 cm 土层中,6、23 a 样地上部的总孔隙度仍显著高于 BG,但各样地下部间差异不显著。毛管孔隙度为 34.14%~50.69%,随治理年限增加总体呈增大趋势。0~20 cm 土层中,10 a 样地在 3 个部位均显著高于 BG ($p < 0.05$),其中下部达 50.69%,较 BG (34.14%) 增加 48.45%; 23 a 样地在上部和下部也显著高于 BG。20~40 cm 土层中,23 a 样地上部(46.11%)的毛管孔隙度显著高于 BG (34.82%); 而下部仅有 23 a 样地显著高于 BG。非毛管孔隙度随治理年限呈下降趋势。6 a 样地上部在 2 个土层中均显著高于其余样地 (0~20 cm: 14.91%; 20~40 cm: 13.90%) ($p < 0.05$), 而 10 a 样地上部在 2 个土层中均显著低于其余样地 (0~20 cm: 2.67%; 20~40 cm: 2.12%)。23 a 样地下部非毛管孔隙度在两个土层中均显著低于 BG (0~20 cm: 3.42%; 20~40 cm: 1.83%)。

2.3 土壤持水与蓄水能力

由图 4 可知,不同治理年限及坡位土壤水分特征存在显著差异。总体上,中部土壤含水率最高 (19.17%~20.20%),且随恢复年限波动较小;而下部土壤含水率受治理措施影响最为显著,BG 下部含水率极低,为 7.49%,经治理后 6、10、23 a 显著回升至 12.45%~26.58%,表明工程拦截与植被覆盖有效改

善坡脚的水分保持状况。随着治理年限的增加,土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量总体呈增大趋势。23 a 样地上部的 3 项持水指标在 2 个土层中均显著高于 BG ($p < 0.05$),其中 0~20 cm 土层的田间持水量达 35.17%,较 BG (22.27%) 增加 57.88%; 20~40 cm 3 项指标也显著高于 10 a 样地。10 a 样地中部和下部 0~20 cm 各指标均显著高于 6、23 a 样地 ($p < 0.05$),下部饱和持水量 (55.94%)、毛管持水量 (50.20%) 和田间持水量 (47.51%) 均为全部处理中最高值。6 a 样地中部 3 项持水指标在 0~20 cm 土层中均显著低于其余样地 ($p < 0.05$)。

由表 2 可知,随治理年限增加,饱和贮水量和吸持贮水量总体呈增大趋势,而滞留贮水量呈减小趋势。10、23 a 样地上部吸持贮水量在 2 个土层中均显著高于 BG ($p < 0.05$)。10 a 样地中部和下部 0~20 cm 的饱和贮水量和吸持贮水量均显著高于 6、23 a 样地,其中下部饱和贮水量 (1 137.17 t/hm²) 和吸持贮水量 (1 013.73 t/hm²) 均为全部处理中最高值。23 a 样地下部 20~40 cm 吸持贮水量 (832.93 t/hm²) 显著高于其余样地。6 a 样地中部吸持贮水量在 2 个土层中均显著低于其余样地 ($p < 0.05$)。滞留贮水量方面,6 a 样地上部在 2 个土层中均显著高于其余样地 (0~20 cm: 298.17 t/hm²; 20~40 cm: 277.83 t/hm²), 10 a 样地上部则显著低于其余样地 (0~20 cm: 53.40 t/hm²; 20~40 cm: 42.33 t/hm²), 23 a 样地下部在 2 个土层中均显著低于其余样地。部位间差异方面,BG 中部饱和贮水量和吸持贮水量显著高于上部和下部,而 6、23 a 样地饱和贮水量上部显著高于下部 ($p < 0.05$)。

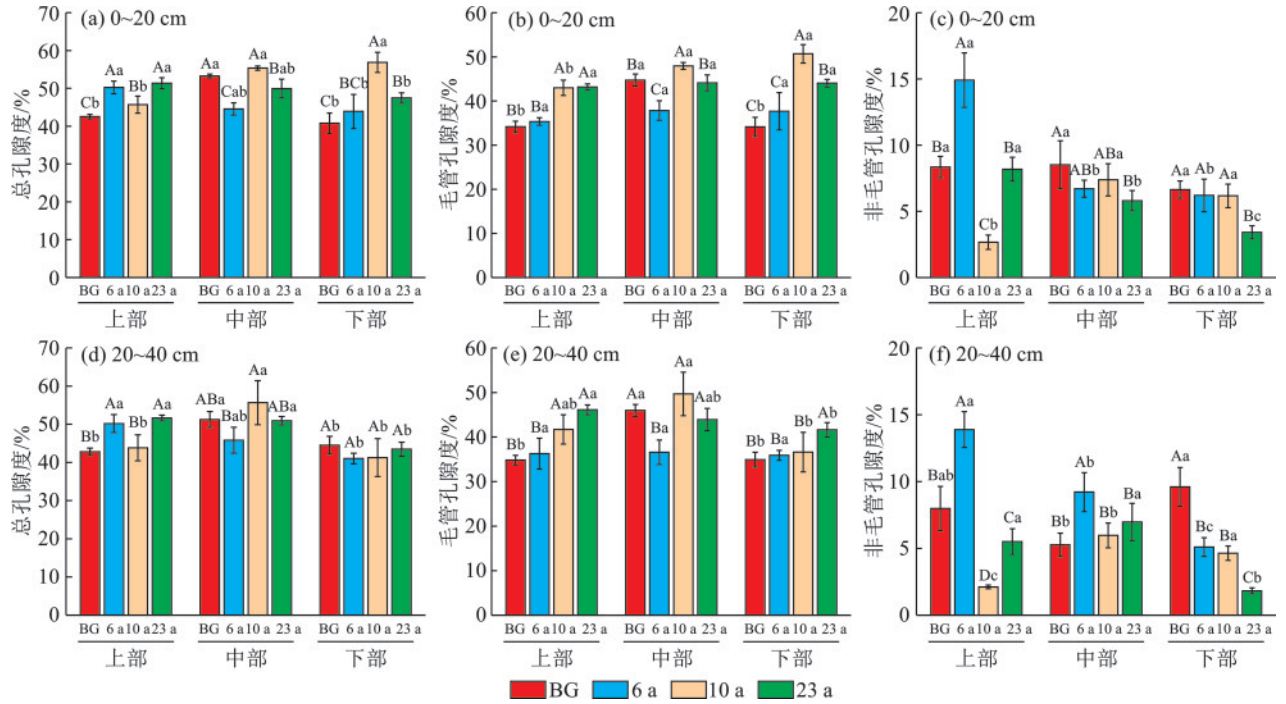


图 3 崩岗不同治理年限土壤孔隙度

Fig.3 Soil porosity of Benggang under different management durations

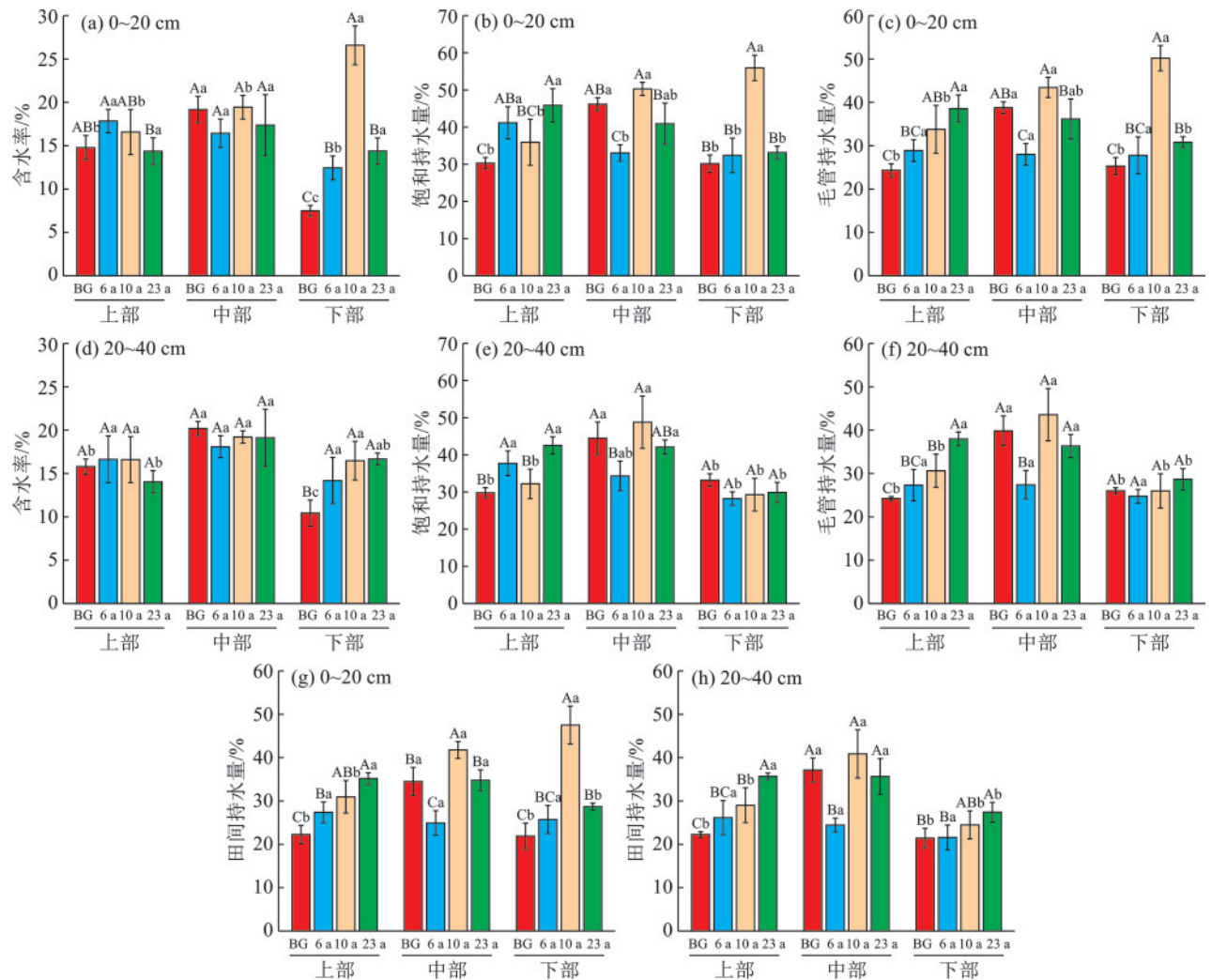


图 4 崩岗不同治理年限土壤持水量

Fig.4 Soil water-holding capacity of Benggang under different management durations

表2 崩岗不同治理年限土壤贮水特征
Table 2 Soil water storage characteristics of Benggang under different management durations t/hm²

治理年限/部位	饱和贮水量		吸持贮水量		滞留贮水量	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
a						
BG 上部	850.20±12.34Cb	856.00±19.17Bb	683.17±25.20Bb	696.30±21.69Bb	167.03±16.09Ba	159.70±33.17Bab
BG 中部	1065.07±10.25Aa	1024.83±41.53ABa	894.73±27.48Ba	919.37±26.51Aa	170.33±36.17Aa	105.47±17.45Bb
BG 下部	815.53±53.64Cb	890.43±46.24Ab	682.83±43.64Cb	698.23±33.39Bb	132.70±13.16Aa	192.20±28.72Aa
6 上部	1004.90±32.98Aa	1003.33±47.14Aa	706.73±17.29Ba	725.50±69.16Ba	298.17±41.19Aa	277.83±26.85Aa
6 中部	890.97±32.61Cab	916.17±67.89Bab	756.80±44.42Ca	731.90±54.92Ba	134.17±12.72ABb	184.27±29.04Ab
6 下部	877.77±90.01BCb	820.33±28.01Ab	753.60±84.63Ca	718.27±22.54Ba	124.17±24.51Ab	102.07±14.01Bc
10 上部	913.57±45.17Bb	876.60±67.87Bb	860.17±34.60Ab	834.27±65.75Aab	53.40±10.88Cb	42.33±2.83Dc
10 中部	1106.60±11.25Aa	1113.00±114.88Aa	959.00±15.48Aa	993.53±97.73Aa	147.60±24.34ABa	119.47±18.53Ba
10 下部	1137.17±52.97Aa	825.20±99.35Ab	1013.73±41.72Aa	732.40±88.81Bb	123.43±17.75Aa	92.80±10.71Bb
23 上部	1027.20±29.28Ca	1032.33±14.91Aa	863.57±14.35Aa	922.13±22.24Aa	163.63±17.93Ba	110.20±19.31Ca
23 中部	998.63±49.48Bab	1018.20±22.21ABa	882.57±36.03Ba	878.60±49.72Aab	116.07±15.27Bb	139.60±27.78Ba
23 下部	949.07±27.43Bb	869.47±36.27Ab	880.67±17.61Ba	832.93±31.82Ab	68.40±9.96Bc	36.53±4.46Cb

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示同一部位下不同治理年限间的差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一治理年限下不同部位间的差异显著($p<0.05$)。

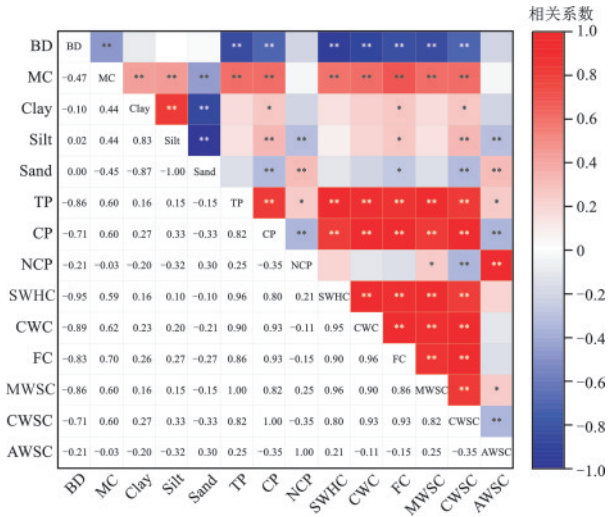
2.4 土壤物理性质的影响因素

相关性分析(图5)表明,土壤体积质量与总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、饱和贮水量和吸持贮水量均呈极显著负相关($p<0.01$)。含水率与黏粒和粉粒占比呈极显著正相关,与砂粒占比呈极显著负相关,并与总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、饱和贮水量和吸持贮水量均呈极显著正相关。黏粒占比与毛管孔隙度、田间持水量和吸持贮水量呈显著正相关($p<0.05$);粉粒占比与毛管孔隙度和吸持贮水量呈极显著正相关,与非毛管孔隙度和滞留贮水量呈极显著负相关;砂粒占比与毛管孔隙度和吸持贮水量呈极显著负相关,与非毛管孔隙度和滞留贮水量呈极显著正相关。毛管孔隙度与非毛管孔隙度呈极显著负相关。总孔隙度和毛管孔隙度与饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均呈极显著正相关。

对土壤质地、孔隙结构和持水指标进行主成分分析,由于土壤贮水量指标由相应孔隙度指标按固定土层厚度换算得到,为避免变量间的结构性共线性及重复表征,主成分分析中未纳入贮水量指标,仅保留孔隙结构、质地及持水特征指标进行排序分析。由图6可知,主成分1和主成分2累计解释82.00%的总变异,其中第1主成分和第2主成分的解释率分别为55.88%和26.12%。第1主成分正向主要包括总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量,负向主要为体积质量,说明第1主成分主

要表征土壤孔隙结构和持水能力的综合变化。第2主成分正向主要包括砂粒和非毛管孔隙度,负向主要包括黏粒、粉粒和含水率,说明第2主成分反映土壤质地组成及孔隙配置的差异。从各指标在排序图中的夹角关系看,饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、总孔隙度和毛管孔隙度方向基本一致,且夹角较小;砂粒与非毛管孔隙度方向相近;体积质量与总孔隙度、毛管孔隙度及各持水指标方向相反。按治理年限分组后,不同样地数据点在排序图中表现出明显分异,总体上,BG和6a样地更多分布在第2象限,10a样地更多分布在第1象限,23a样地则在第1和第3象限均有分布。

多因素方差分析(表3)表明,治理年限(Y)和地形部位(P)对所有土壤物理指标均有极显著影响($p<0.01$), $Y\times P$ 的交互作用均达极显著水平($p<0.01$)。从 F 值看,地形部位对体积质量($F=27.37$)、黏粒占比($F=79.73$)、总孔隙度($F=32.07$)和非毛管孔隙度($F=33.78$)的影响最大;治理年限对毛管孔隙度($F=54.44$)、毛管持水量($F=52.69$)及贮水量指标($F=54.47\sim 67.60$)的影响最大;粉粒和砂粒占比受 $Y\times P$ 交互作用影响最大($F=73.50$ 和 82.39),表明治理年限对粒径组成的影响因地形部位而异。土层深度(D)的影响相对较小,对体积质量和非毛管孔隙度有极显著影响($p<0.01$),对含水率、粒径组成和毛管孔隙度的影响不显著。三因素交互作用($Y\times P\times D$)对所有指标均达显著水平($p<0.05$)。



注:BD为体积质量;MC为含水率;Clay为黏粒占比;Silt为粉粒占比;Sand为砂粒占比;TP为总孔隙度;CP为毛管孔隙度;NCP为非毛管孔隙度;SWHC为饱和持水量;CWC为毛管持水量;FC为田间持水量;MWSC为饱和贮水量;CWSC为吸持贮水量;AWSC为滞留贮水量;**表示在 $p < 0.01$ 水平上极显著相关;*表示在 $p < 0.05$ 水平上显著相关。

图5 土壤物理性质的相关性

Fig.5 Correlations among soil physical properties

为评估小样本量对统计结果的影响,本研究引入Kruskal-Wallis非参数检验进行稳健性分析,分组变量为不同治理年限样地。由表4可知,多数水分吸

持指标(毛管持水量、田间持水量)、多数孔隙指标(毛管孔隙度、非毛管孔隙度)、多数土壤蓄水能力指标(吸持贮水量和滞留贮水量)及土壤质地指标在非参数模型下依然保持极显著差异($p < 0.001$),证明崩岗治理对蓄水功能提升效应的稳定性。尽管体积质量、总孔隙度和饱和贮水量的显著性在非参数检验下有所减弱,但主要归因于非参数检验在处理小样本空间异质性时的保守性,整体演变趋势与参数检验保持一致。

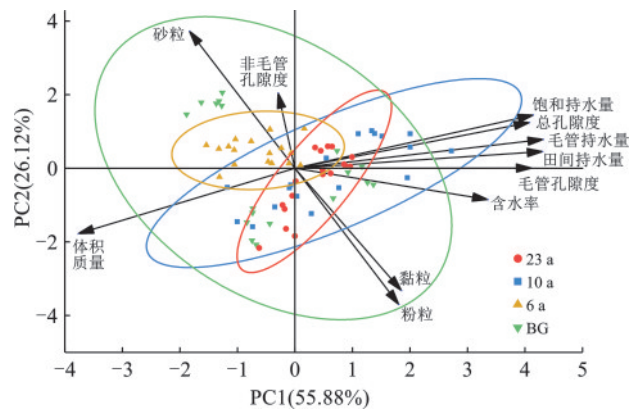


图6 土壤物理性质的主成分分析

Fig.6 Principal component analysis of soil physical properties

表3 治理年限(Y)、地形部位(P)和土层深度(D)及其交互作用对土壤性质的影响

Table 3 Effects of management duration (Y), slope position (P), soil layer depth (D), and their interactions on soil properties

因素	BD	MC	Clay	Silt	Sand	TP	CP	NCP	SWHC	CWC	FC	MWSC	CWSC	AWSC
Y	9.03	18.23	66.49	50.77	50.38	11.52	54.44	16.05	41.76	52.69	11.52	54.47	67.60	67.57
P	27.37	25.72	79.73	62.69	72.24	32.07	28.32	33.78	33.31	36.70	32.07	28.33	31.82	31.82
D	15.06	0.01	0.65	2.83	2.36	7.18	3.59	17.39	14.07	12.20	7.16	3.58	4.87	4.88
F														
Y×P	13.76	16.09	66.14	73.50	82.39	15.03	9.10	18.49	13.63	14.01	15.03	9.11	41.60	41.61
Y×D	3.85	6.91	3.08	0.55	0.70	5.31	4.65	7.90	8.46	9.22	5.31	4.65	1.48	1.48
P×D	3.69	1.44	6.78	0.34	0.92	6.32	8.77	6.77	9.18	11.79	6.33	8.77	1.28	1.28
Y×P×D	2.39	4.96	4.33	3.64	3.80	4.98	4.14	5.91	5.95	5.28	4.99	4.14	7.15	7.14
Y	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**
P	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**
D	<0.01**	0.92	0.42	0.10	0.13	0.01*	0.06	<0.01**	<0.01**	<0.01**	0.01**	0.06	0.03*	0.03*
P	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**
Y×P	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**
Y×D	0.02*	<0.01**	0.04*	0.65	0.56	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	0.23	0.23
P×D	0.03*	0.25	<0.01**	0.71	0.40	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	0.29	0.29
Y×P×D	0.04*	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**

注:BD为体积质量;MC为含水率;Clay为黏粒占比;Silt为粉粒占比;Sand为砂粒占比;TP为总孔隙度;CP为毛管孔隙度;NCP为非毛管孔隙度;SWHC为饱和持水量;CWC为毛管持水量;FC为田间持水量;MWSC为饱和贮水量;CWSC为吸持贮水量;AWSC为滞留贮水量;**表示在 $p < 0.01$ 水平上极显著相关;*表示在 $p < 0.05$ 水平上显著相关。下同。

3 讨论

3.1 崩岗综合治理对土壤物理性质的改善效应及阶段性特征

本研究表明,在所选取的样地序列内,治理后崩岗

土壤体积质量总体降低,总孔隙度、毛管孔隙度及各持水指标均有不同程度提升,说明本研究样地上,崩岗综合治理对土壤物理性质的改善总体有效。该趋势与黄土高原退耕还林等退化生态系统的研究^[13]结论一致,

表明降低体积质量、改善孔隙结构和提升持水能力是不同退化类型土壤物理性质恢复的共性方向。

在本研究中,崩岗土壤物理性质的改善过程并非随治理年限线性递增,而是呈显著的阶段性非线性演变特征。治理6 a样地多项指标与未治理崩岗差异不显著,说明治理初期土壤物理性质存在明显的改善滞后特征。可能与工程措施和植被措施发挥作用的阶段不同有关:工程措施实施后通过物理重构迅速稳定坡面并打破原有的板结结构^[14],但土壤孔隙结构的实质性改善主要依赖于植被根系的长期重塑与有机胶结物质的积累^[15],治理初期植被处于定居与早期生长阶段,根系网络尚未完全形成,对土壤结构的改善作用尚未充分显现。同时,花岗岩风化壳土体砂粒占比高、结构性极差的本底条件也造成孔隙结构的重建难度大于黄土等粉粒主导的土壤^[16]。

表4 不同治理年限下关键土壤物理指标的Kruskal-Wallis非参数检验

Table 4 Kruskal-Wallis nonparametric test of key soil physical indicators under different management durations

指标	K-W	自由度	<i>p</i>
BD	6.75	3	0.080
MC	8.99	3	0.029*
SWHC	7.07	3	0.070
CWC	21.57	3	<0.001**
FC	7.49	3	0.058
TP	28.10	3	<0.001**
CP	24.61	3	<0.001**
NCP	21.23	3	<0.001**
Clay	21.80	3	<0.001**
Silt	17.18	3	<0.001**
Sand	17.57	3	<0.001**
MWSC	7.49	3	0.058
CWSC	28.11	3	<0.001**
AWSC	21.28	3	<0.001**

治理10 a样地各指标较其他样地出现显著改善,该特征可能与植被恢复进入较快演替阶段有关。随着群落由早期草本覆盖向乔灌草复合结构过渡,地表覆盖度提高、根系生物量和枯落物输入增加,土壤有机质来源趋于稳定。植物根系的穿插、挤压及后期分解不仅有助于疏松土体、降低体积质量,还可形成生物孔隙、优化孔隙结构,从而增强土壤持水能力、促进微生物活动及团聚体形成,进一步有利于土壤结构优化和持水能力提升^[17]。前人^[18]研究表明,植被恢复10~15 a通常是土壤结构改善较为显著的阶段,本研究10 a样地表现出的阶段性特征与此总体

一致。相比之下,从不同治理年限样地的对比结果看,23 a样地部分指标已表现出变化趋缓和相对稳定的特征。治理23 a样地虽然总体仍优于未治理崩岗和6 a样地,但部分指标并未继续显著高于10 a样地,说明该阶段土壤物理性质的改善幅度可能趋于减弱,此现象可能与生态系统进入较成熟阶段后,土壤结构调整趋缓、植被耗水增强、土壤颗粒重新排列等过程有关^[19]。主成分分析结果表明,土壤恢复的主要方向体现为总孔隙度、毛管孔隙度及持水能力增强与体积质量降低协同变化,说明崩岗治理后土体恢复的本质,是由紧实、低效蓄水状态向疏松、有效持水能力较强状态转变。与此同时,砂粒和非毛管孔隙增大与粉黏粒增加、含水状态改善之间的分异,进一步表明崩岗土壤恢复不仅受植被恢复进程影响,还受到土壤颗粒重组、孔隙类型转换和母质本底条件的共同制约^[2]。前人^[20]研究表明,退化生态系统恢复过程中,土壤结构改善与保水能力提升往往具有明显协同性,此规律在黄土高原植被恢复和其他退化坡面治理中均有体现。本研究中,土壤质地细化、孔隙优化和持水增强的同步变化,反映崩岗土壤由松散、粗化和低效蓄水状态向相对稳定、保水能力较强状态的恢复过程。土壤细颗粒增加有利于颗粒胶结和团聚体形成,并促进毛管孔隙发育,从而降低体积质量,增强土壤田间持水能力;相较之下,砂粒和非毛管孔隙占优的土体虽具有较强的瞬时水分通透性,却不利于水分保持,也难以形成相对稳定的土体结构^[21]。综上所述,在本研究的样地范围内,崩岗土壤物理性质的恢复呈明显的阶段性和协同性特征,土壤恢复并非单一物理指标的独立改善,而是质地重组、孔隙优化与持水功能提升相互耦合、共同促进土壤结构稳定性增强的过程。工程措施为坡面稳定和植被恢复提供必要的立地条件,而植物发育与根系活动则进一步推动土壤由松散、粗化、低效蓄水状态向结构相对稳定、蓄水能力较强的状态演变。

3.2 崩岗不同地形部位土壤物理性质的恢复差异及驱动因素

方差分析结果显示,地形部位对体积质量、粒径分布、总孔隙度和非毛管孔隙度的*F*值大于治理年限,说明在当前的采样范围内,地形部位是崩岗土壤基本物理性质的主要影响因素,其影响力在本研究的治理年限范围内始终强于治理年限。前人^[22]对坡面土壤的研究发现,坡位通过控制侵蚀-沉积过程和水分再分配格局影响土壤发育,而崩岗各部位在母质风化程度、坡度和水分汇集条件等方面有显著差异,表明崩岗独特的地貌异质性是土壤发育的主要影响因素之一^[23]。

本研究发现,未治理崩岗下部砂粒占比较高,可能与水力侵蚀过程中的分选与搬运作用有关。但在治理样地内也观察到这一空间格局发生明显重组,6 a样地中部恢复相对滞后,而10 a样地中部与下部则出现显著改善。这种空间格局的动态重组现象在矿区的生态修复研究中也有类似报道^[24],说明退化地不同地貌部位的恢复速率和路径普遍存在分异。这种部位间恢复轨迹的差异与各部位立地条件及工程措施的作用方式密切相关。本研究中谷坊修建在中部和下部交界处,发挥关键的物理屏障作用。谷坊可能增强对上方集水区泥沙的拦截作用,有利于中部细颗粒物质的积累^[25],与10 a样地中部总孔隙度及持水量达到峰值的结果相吻合。然而,崩岗中部原为坡度大且土体稳定性差的区域,即使实施削坡等工程措施,植被定植和根系发育仍面临较大困难,导致6 a样地中部恢复相对滞后。而崩岗上部集水区地形相对平缓,有利于植被长期生长和群落发育,随着治理年限延长,植被对土壤结构的持续改善效应在上部得到充分累积,可能是23 a样地上部物理性质相对较优的原因之一。综上所述,崩岗治理实践中应充分考虑不同地形部位的立地条件差异,对崩积体等恢复困难部位可适当加强工程措施的稳固力度和植被配置的针对性,以缩小部位间的恢复差距。

3.3 崩岗综合治理对土壤蓄水功能的影响

土壤蓄水功能是崩岗治理生态效益的核心之一,评价治理效果需重点关注贮水结构的变化。本研究结果显示,随着治理年限增加,吸持贮水量显著增大而滞留贮水量显著降低,二者呈明显的权衡关系。此现象在其他退化地的植被恢复研究中也有类似报道^[26],说明随植被群落发育,土壤蓄留有效水的能力趋于增强。而未治理崩岗及治理初期6 a样地虽然滞留贮水量较高,但这部分水分主要储存于非毛管孔隙中,极易以重力水形式快速通过优先流路径排出;而治理后非毛管孔隙占比的下降,可能减少重力水沿优先流路径的快速下移,并进而对坡面产流过程产生影响。与此同时,随着治理年限增加,吸持贮水量的持续提升反映毛管孔隙的发育,通常意味着田间持水量与植物可利用水库容的增加。本研究中观测到10 a样地中部与下部的吸持贮水量达到峰值,与该阶段土壤黏粒占比回升及有机质积累促进的团粒结构形成有关。结果表明,崩岗综合治理有助于推动土壤蓄水功能从以重力蓄水为主向以毛管蓄水为主的结构性转变,对治理区植被的持续恢复和旱季水分供给具有重要意义。

本研究发现,治理23 a样地部分部位的吸持贮水量并未显著高于10 a样地,表明植被耗水与土壤蓄水

之间可能存在复杂的平衡关系。随着群落演替至成熟林分阶段,植被蒸腾耗水显著增强,其对土壤水分的消耗效应可能在一定程度上抵消土壤孔隙结构改善带来的蓄水增益^[27],该过程在长期生态水文效应评价中值得进一步关注。综上所述,在本研究的时间尺度及样地条件下,崩岗综合治理表现出提升崩岗土壤的蓄水功能的趋势,其中吸持贮水量的增加是其核心特征,为治理区生态系统的良性演替奠定重要的水文基础。

3.4 研究局限性

本研究采用以空间代替时间的方法构建恢复序列。受研究区内崩岗分布、治理历史和立地条件一致性限制,每个治理年限仅设置1个代表性样地,不同坡位样方反映的是样地内部空间差异,而非治理年限处理的独立重复。敏感性检验结果表明,Kruskal-Wallis非参数检验所得主要差异判断与参数检验结果总体一致,说明本文关于崩岗综合治理促进土壤物理性质改善及其阶段性特征的认识在小样本条件下具有一定稳健性。因此,本文结果更适用于揭示典型恢复阶段崩岗土壤物理性质与蓄水能力的变化趋势及其可能机制,而不宜将其外推为严格意义上的治理年限效应定量检验。未来应结合更多独立重复样地和长期定位监测,对本文发现进行进一步验证。

4 结论

1)崩岗综合治理总体上改善土壤物理性质,并表现出一定的阶段性特征。治理6 a样地已表现出初步恢复的特征,但总体改善仍较有限;治理10 a样地综合改良特征较为突出,体积质量显著降低,总孔隙度显著提高,表明该阶段可能是土壤结构优化和功能提升较为显著的时期;治理23 a样地多数指标仍维持在较好水平,但部分指标变化趋缓,表现出相对稳定的发展特征。崩岗土壤恢复并非单一物理指标的独立改善,而是体积质量下降、孔隙结构优化与持水能力增强协同推进的综合过程。

2)地形部位对土壤物理性质的影响总体强于治理年限,说明崩岗坡面空间异质性是控制土壤恢复差异的重要因素。治理后中下部样地细颗粒占比回升、砂粒占比下降,表明谷坊拦沙与植被固土共同促进退化坡面土壤质地与结构的重组。

3)崩岗综合治理驱动土壤蓄水功能发生由短期滞留模式向长期吸持涵养模式的结构性转变。10 a下部吸持贮水量最高,说明该阶段土壤有效持水能力提升较为明显;23 a吸持贮水量未继续显著高于10 a,表明恢复后期土壤蓄水功能可能由快速增强转向相对平稳。

参考文献:

- [1] ZHU X C, GAO L, WEI X R, et al. Progress and prospect of studies of Benggang erosion in southern China[J]. *Geoderma*, 2023, 438: e116656.
- [2] HUANG J, JIANG D H, DENG Y S, et al. Soil physicochemical properties and fertility evolution of permanent gully during ecological restoration in granite hilly region of south China[J]. *Forests*, 2021, 12(4): e510.
- [3] 许彦崑, 谢江, 罗敏, 等. 生态胶园构建初期5种植模式土壤质量综合评价[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2025, 23(6): 167-174.
- XU Y Y, XIE J, LUO M, et al. Comprehensive evaluation of soil quality of five planting modes in the initial stage of ecological rubber garden construction[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(6): 167-174.
- [4] 谢福信, 李四高, 瞿翼, 等. 桂东南红壤丘陵区崩岗分区治理实践[J]. *中国水土保持*, 2025(1): 54-56.
- XIE F Q, LI S G, QU Y, et al. Practice of partition management of Benggang in red soil hilly area of south-east Guangxi[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2025(1): 54-56.
- [5] LIAO K T, SONG Y J, XIE S H, et al. Quantitative analysis of the factors influencing the spatial distribution of Benggang landforms based on a geographical detector [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, 11(6): e337.
- [6] 陈志超, 郭朝旭, 张祖榕. 福建安溪崩岗高发区土体土-水特征及其与崩岗的相关性分析[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2025, 23(5): 216-224.
- CHEN Z C, GUO Z X, ZHANG Z R. Analysis of soil-water characteristics and their correlation with collapsing gully in the high-occurrence area of collapsing gully in Anxi, Fujian[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(5): 216-224.
- [7] 段晓倩. 花岗岩土体异质性与崩岗坡面土壤水文过程[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- DUAN X Q. Heterogeneity of granite soil and hydrological process on benggang slope [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [8] 王乾坤, 张歆, 杨伟, 等. 亚热带崩岗侵蚀区不同植被恢复类型对土壤团聚体孔隙特征的影响[J]. *土壤学报*, 2025, 62(5): 1282-1293.
- WANG Q K, ZHANG X, YANG W, et al. Effects of different types of vegetation restoration on soil pore characteristics in Benggang erosion areas[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(5): 1282-1293.
- [9] HUANG B, YANG M, ZHONG H, et al. Specific ion effects on the soil shear strength and clay surface properties of collapsing wall in Benggang[J]. *PeerJ*, 2024, 12: e17796.
- [10] 谢炎敏, 林根根, 上官院斌, 等. 长汀县崩岗开发造地治后的土地利用实践[J]. *亚热带水土保持*, 2024, 36(2): 30-33.
- XIE Y M, LIN G G, SHANGGUAN Y B, et al. Land use practice after land reclamation management of Benggang development in Changting County [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2024, 36(2): 30-33.
- [11] 国家林业局. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- National Forestry Administration. Forest soil analysis method[M]. Beijing: Standards Press of China, 1999.
- [12] 吕春娟, 陈丹, 郭星星, 等. 铁尾矿不同复垦模式土壤贮水能力及入渗特征[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(4): 59-66.
- LU C J, CHEN D, GUO X X, et al. Water storage capacity and the infiltration characteristics of soil in different reclamation modes in iron tailings [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(4): 59-66.
- [13] 刘卓昕, 高鹏, 穆兴民, 等. 黄土区植被恢复对土壤水文物理性质的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(6): 206-213.
- LIU Z X, GAO P, MU X M, et al. Effects of vegetation restoration on soil hydrophysical properties in Loess region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6): 206-213.
- [14] 吴和秋, 赵龙, 杨雨荷, 等. 基于固土的高陡岩质边坡植被重建技术应用现状与展望[J]. *中国水土保持科学*, 2025, 23(4): 12-22.
- WU H Q, ZHAO L, YANG Y H, et al. Application status and prospects of vegetation restoration technology based on soil consolidation for high and steep rocky slope[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(4): 12-22.
- [15] 张睿焯, 马宏红, 高鹏, 等. 黄土丘陵沟壑区土壤大孔隙特征变化及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(4): 59-67.
- ZHANG R D, MA H H, GAO P, et al. Changes in soil macropore characteristics and its influencing factors in loess hilly and gully region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(4): 59-67.
- [16] 王浩, 许少鸿, 陈叶健, 等. 闽粤地区花岗岩风化土体粘粒迁移过程的土柱渗流试验[J]. *山地学报*, 2024, 42(1): 132-142.
- WANG H, XU S H, CHEN Y J, et al. Soil column seepage test on clay particles migration process of granite weathered soil in Fujian and Guangdong areas, China[J]. *Mountain Research*, 2024, 42(1): 132-142.
- [17] 刘俊廷, 张建军, 孙若修, 等. 晋西黄土区退耕年限对土壤孔隙度等物理性质的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(1): 94-103.
- LIU J T, ZHANG J J, SUN R X, et al. Effects of the conversion time of cropland into forestry on soil physical properties in loess area of western Shanxi Province of northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(1): 94-103.