

DOI: 10.5846/stxb20180210035

区晓琳, 陈志彪, 陈志强, 姜超, 梁美霞, 陈海滨. 中亚热带植被恢复过程中崩岗土壤性质分异特征. 生态学报, 2019, 39(6): - .
Ou X L, Chen Z B, Chen Z Q, Jiang C, Liang M X, Chen H B. Variation in soil property and its response to vegetation restoration in areas of collapse mounds in mid-subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): - .

中亚热带植被恢复过程中崩岗土壤性质分异特征

区晓琳^{1,2}, 陈志彪^{1,2,*}, 陈志强^{1,2}, 姜超^{1,2}, 梁美霞^{1,2}, 陈海滨^{1,2}

1 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

2 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

摘要:崩岗是我国南方红壤丘陵山区坡面沟道侵蚀后期发育而成的侵蚀地貌, 探讨崩岗系统植被恢复过程中不同部位土壤性质分异特征, 对揭示强度侵蚀环境下土壤环境效应以及指导崩岗区生态恢复具有重要借鉴意义。以闽西南长汀县濯田镇黄泥坑崩岗群内植被盖度分别为 2%、20% 和 95% 的 3 处毗邻崩岗为研究对象, 研究各崩岗集水坡面、崩壁(顶部、中部及底部)、崩积体(上部 and 下部)和沟道出口等部位 0—20 cm 土壤理化性质的分异特征。结果表明: 土壤容重、粉粒、pH、速效养分含量均表现为崩岗 III < 崩岗 II ≈ 崩岗 I, 土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量表现为崩岗 III > 崩岗 II ≈ 崩岗 I。从集水坡面至沟道出口, 土壤容重和砂粒含量呈增加→减少→增加趋势, 粉粒和黏粒含量呈降低变化趋势, 集水坡面和崩积体有机碳、全氮、全磷和全钾含量明显高于其它部位, 在崩壁顶部及沟道出口最低。从集水坡面至沟道出口, 铵态氮和硝态氮含量呈先增加后减少的态势, 速效钾含量呈“V”型变化态势, 最低值出现在崩壁底部, 速效磷和 pH 呈增加态势。本研究表明, 崩岗系统内土壤结构和土壤养分含量总体水平较差, 不同侵蚀部位土壤性质存在明显空间差异, 自然植被恢复过程对土壤特性有一定的改良效应。

关键词:崩岗; 土壤性质; 养分含量; 植被恢复; 空间分异

Variation in soil property and its response to vegetation restoration in areas of collapse mounds in mid-subtropical China

OU Xiaolin^{1,2}, CHEN Zhibiao^{1,2,*}, CHEN Zhiqiang^{1,2}, JIANG Chao^{1,2}, LIANG Meixia^{1,2}, CHEN Haibin^{1,2}

1 Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology (Ministry of Science and Technology and Fujian Province Funded), Fuzhou 350007, China

2 College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: The term of collapse mound, is called “*Benggang*” by local residents, represents the most severe eroded ecosystem in the red soil region of southern China. We studied the response of vegetation restoration on the characteristics of soil properties in different parts of the collapse mound system, which is an important reference to reveal the soil environmental effects under the intensity erosion environment and to guided the ecological restoration in the collapse mound area. Therefore, we selected three adjacent collapse mounds with different vegetation coverage (2%, 20%, and 95%) as the study object. The physicochemical properties of 63 soil sample plots were investigated in 7 sites, including upper catchment, collapsing wall (top, middle, and bottom section), colluvial deposit (upper and lower section), and channel outlet. The variation and correlation of soil properties were also analyzed. The results showed that the soil bulk density, slit content pH, ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) content decreased significantly, while the organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total potassium (TK) content increased considerably with process of the vegetation restoration. From the upper catchment to channel outlet (via collapsing wall and colluvial deposit), the soil bulk density and sand content showed up-

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502905); 福建省科技厅引导性项目(2016Y0024); 泉州市科技局科技计划项目(2018Z025)

收稿日期: 2018-02-10; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenzhb408@vip.163.com

down-up trend, whereas the content of silt and clay showed decreasing trend. The content of SOC, TN, TP and TK in the upper catchment and the colluvial deposit were significantly higher than that other sites, whereas their contents were lowest in the top collapsing wall and channel outlet, respectively. The spatial distributions of NH_4^+ -N and NO_3^- -N content showed downward and upward fluctuating trend, respectively, and the spatial variation of AK content showed a "V" tendency and its lowest content appeared in the bottom of the collapse wall, whereas AP and pH showed a significant increasing trend along with the runoff erosion direction. In summary, the soil structure and nutrient content were poor in the collapse mound ecosystem. and the soil physicochemical properties present obvious spatial differences in different erosion sites, they were improved by natural vegetation restoration.

Key Words: collapse mound(Benggang); soil property; nutrient content; vegetation restoration; spatial variation

“崩岗(Collapse mound or Benggang)”,用于描述一类“红壤丘陵坡地侵蚀沟沟头由于水力和重力的复合作用发生坍塌、陷蚀形成的深围椅状崩口地貌”^[1],是沟谷发育的高级阶段,为区域生态系统退化的最高形式^[2-3],沿径流方向可分为集水坡面、崩壁、崩积体、沟道和冲积扇等子系统^[4]。崩岗集中分布于我国长江流域、珠江流域以及东南沿海诸河流域花岗岩红壤丘陵山区,崩塌面积 $\geq 60 \text{ m}^2$ 达 23.9 万处,侵蚀面积约 1200 km^2 ,年侵蚀总量 6000 万 t 以上,平均侵蚀模数高达 5.9 万 $\text{t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[5];崩岗侵蚀具有发展迅速、突发性强,侵蚀模数大、危害严重的特点。其危害仅次于泥石流和滑坡,因侵蚀产生大量泥沙掩埋农田,淤积河道,使土地资源受损,甚至对区内防洪安全、粮食安全及人民生命财产安全构成潜在威胁,崩岗侵蚀是导致区域生态环境恶化的重要因素。

因此,探讨崩岗侵蚀发生机理与治理措施已成为研究崩岗的核心问题。刘希林等^[6-7]运用三维激光扫描技术对广东省五华县莲塘岗崩岗降雨侵蚀水文过程展开监测,发现崩岗侵蚀主要发生在崩壁、崩积体及两者侧向的区域,且在 24 h 内 $\geq 100 \text{ mm}$ 暴雨对崩岗侵蚀量的贡献最为显著。邓羽松等^[8-9]对湖北省通城县杨垄和五里崩岗剖面土壤水分特征调查得出,不同空间层次土壤容重、含水量、水吸力、颗粒组成及孔隙分布分异明显。蒋芳市等^[10]通过人工降雨模拟探讨不同坡度和雨强下福建省安溪县洋坑崩岗崩积体泥沙颗粒输移规律;林金石等^[11]分别采用直接剪切和三轴剪切试验对崩岗红土层土壤抗剪强度与含水率的关系进行分析。上述研究侧重于崩岗崩壁以及风化壳不同层次岩土含水状况、颗粒组成和物理机械性能等物理特性差异和崩积体与崩岗降雨-侵蚀过程观测与模拟等方面。由于崩岗系统各部位侵蚀特征不同,集水坡面、崩壁、崩积体及沟道等崩岗系统内土壤性质存在差异,但对其主要理化指标空间分布的分析相对薄弱,且植被侵入与生长过程对崩岗系统土壤性质的影响特征亦有待进一步深入探讨。

植被恢复是退化生态系统修复的核心,植被恢复中土壤特性是评价退化生态系统状况的重要指标,是定量反映植被恢复与土壤环境的响应规律^[12-16]。植被恢复显著提高表层土壤养分含量,尤其是有机碳储量明显增加,从而影响植物生长生理过程^[15, 17-18]。福建省长汀县境内丘陵分布广泛,土壤抗蚀性极差,且因过度的农林资源利用以及当地居民生活生产的严重干扰,植被破坏引起严重的水土流失,植被自然恢复较为困难,因而,该地区成为我国中亚热带花岗岩红壤生态系统脆弱区的典型代表^[19]。长期以来,对于植被恢复过程中崩岗土壤理化性质空间分异规律的认识比较模糊。为此,本文以福建省长汀县濯田镇黄泥坑崩岗群内 3 处不同植被盖度的崩岗为研究对象,分析崩岗系统不同侵蚀部位土壤理化指标的分异特征,揭示崩岗侵蚀部位土壤性质与植被恢复的响应规律,以期深化对崩岗侵蚀区土壤生态效应与物质循环机制的理解,并为指导崩岗治理实践与恢复成效评价提供理论依据。

1 研究区概况

长汀县位于福建省西南部,属中亚热带季风气候,年均气温 18.5℃,年均降雨量 1710 mm,年均相对湿度 80%,年均蒸发量 1403 mm,年均无霜期 260 d, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 4100—4650℃;历史上该区域植被的严重破坏,山

体坡面在强降雨条件下,集水坡面汇集的径流对表土冲蚀下切至砂土层,形成切沟。由于砂土层土体松散,抗蚀性差,加之跌水作用形成悬空临界面(崩壁),坍塌的土体在崩壁底部形成崩积体,崩积体在降雨径流冲刷下土体再侵蚀随径流通过沟道迁移到下游。全县崩岗总计 3583 条,占福建省崩岗总数的 13.77%,侵蚀面积 7.28 km²,占全省崩岗侵蚀总面积的 11.36%。黄泥坑崩岗群(25°31'49" N, 116°16'52" E)位于濯田镇西南部,205 省道边的牛坑头村段西侧约 1 km 处,分布崩岗共 34 条,侵蚀面积约 37500 m²。该处崩岗群区域内,大多数崩岗表土近乎裸露,由于植被的缺乏,侵蚀严重,土壤理化性质总体下降到极低水平。

2 试验设计

2.1 样地确定与采集

根据典型性和代表性的原则,课题组于 2014 年 7 月份在黄泥坑崩岗群同一集水区域内选取了 3 条崩岗(崩壁侵蚀皆接近山体分水岭,均属于崩岗发育的后期),但由于坡面的 3 条侵蚀沟汇水特征的变化。其中崩岗 I 的崩壁继续受跌水影响,处于活跃状态,崩岗内白色粗粒石英颗粒随处可见,形成高约 1 cm 的微土柱,有 2 mm 物理结皮覆盖,崩积堆有新土堆积,在崩壁下部和崩积体生长着零星芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)散布,长势极差,植被覆盖度仅 2%(裸露崩岗);崩岗 II 的崩壁处于间歇性跌水(因降水强度大小而异),处于半稳定状态,崩岗内赤褐色表土裸露,质地疏松,约 5 mm 物理结皮覆盖,有部分植物侵入,主要植被有马尾松幼树(*Pinus massoniana*)、岗松(*Baeckea frutescens*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)和芒萁,主要稀疏散布在崩壁下部以及崩积体部位,植被枝干矮小,植被覆盖度约 20%(低覆盖崩岗);崩岗 III 由于崩壁跌水消失,处于稳定状态植物侵入后,除了崩壁有部分土体出露,其余部位均有植被覆盖,地表凋落物的厚度 5 cm 以上;灌木植被以毛冬青(*Ilex pubescens*)、轮叶蒲桃(*Syzygium grijsii*)及岗松为主,草本有五节芒(*Miscanthus floridulus*)、黑莎草(*Gahnia tristis*)和芒萁等,植被覆盖度达 95%(高覆盖崩岗)。崩岗 II 位于 I 西侧约 5 m 处,崩岗 III 位于 II 西南方向约 10 m 处。崩岗具体信息见表 1。

表 1 试验崩岗基本情况

Table 1 Basic situation of experimental collapse mounds

崩岗 Collapse mound No.	植被覆盖度 Vegetation coverage/%	侵蚀面积 Erosion area/m ²	集水坡面 Upper catchment			崩壁 Collapsing wall			崩积体切沟 Gully of colluvial deposit	
			海拔 Elevation/m	坡度 Gradient/°	坡向 Aspect /°	高度 Altitude/m	宽度 Width/m	距分水岭 Distance of divide/m	长度 Length/m	宽度 Width/m
I	2	542	359	18	南偏西 18	9.43	3.55—5.09	1.60—9.10	13.83	2.20—4.50
II	20	705	324	3	南偏西 19	11.80	4.62—6.02	3.62—7.30	15.10	1.83—4.45
III	95	146	318	15	南偏东 26	6.30	2.70—3.42	8.24—11.26	16.48	0.71—1.54

根据崩岗侵蚀土体的迁移过程和崩岗各部位的长度或高差的实际情况,按径流方向从上到下将崩岗划分为 7 个部位,分别为集水坡面(UC)、崩壁顶部(WT)、崩壁中部(WM)、崩壁底部(WB)、崩积体上部(DU)、崩积体下部(DL)和沟道出口(CO)。在以上 7 个部位的中轴线位置布设 7 个样点(相邻样点间距 4—7m),采集其 0—20 cm 表层土壤。用环刀—铝盒采集各样点原状土 1 份;同时,每一样点中在 2 m×2 m 的小型样方内按“梅花形”5 点采样混合均匀成 1 个混合样(重量约 1 kg),装入聚乙烯自封袋内,并编号贴上标签;另外,于各样点等高位置距中轴线两侧 1.5—2 m 处设置 2 个重复,土样共 63 份。采样点分布图见图 1。

2.2 样品处理与测定

因铵态氮和硝态氮含量测定需要鲜土,土样迅速带回实验室,取适量鲜土样,用 2 mol/L 的 KCl 浸提,过滤,采用连续流动分析仪(Skalar san⁺⁺, 荷兰)测定;土壤容重采用标准环刀称重法。其余土样待自然风干后,挑除枝叶等杂物后,四分法混合均匀后研磨过筛,用于各土壤指标测定,包括:颗粒组成、pH、有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾。土壤颗粒组成采用粒径分析系统(SEDIMAT4-12, 德国)测定;pH 按照水土比为

2.5:1,采用便携式酸度计(STARTER 300, 中国)测定;有机碳和全氮采用碳氮元素分析仪(Elemantar vario MAX, 德国)测定;全磷用硫酸—高氯酸消煮定容及过滤,提取待测液后,采用连续流动分析仪(Skalar san⁺⁺, 荷兰)测定;全钾用氢氟酸-高氯酸消煮定容及过滤,提取待测液,采用火焰分光光度仪测定(FP 6140, 中国);速效磷用 Mehlich3 法浸提后,采用连续流动分析仪((Skalar san⁺⁺, 荷兰)测定;速效钾用 1 mol/L NH₄OAc 浸提后,采用火焰光度计法测定。

2.3 数据处理

数据经 Excel 软件初步整理后,采用 SPSS 19.0 进行统计分析。利用单因素方差分析(One-Way ANOVA)确定不同植被恢复和崩岗侵蚀部位对土壤性质的影响,显著性检验采用 Duncan 新复极差方法(显著性水平设为 $\alpha=0.05$),利用 Pearson 相关系数和因子分析评价崩岗系统土壤性质间相关程度,图表制作通过 Origin 9.0 完成。

3 结果与分析

3.1 崩岗系统土壤物理性质空间分布特征

土壤容重是表征土壤紧实程度的敏感指标,影响土壤中水分、气体及养分的蓄存及输移^[20]。由表 2 得知,各崩岗土壤容重变化范围为 1.17—1.63 g/cm³,崩岗 I、II 和 III 土壤容重均值分别为 1.41 g/cm³、1.42 g/cm³和 1.29 g/cm³,其变异系数表现为崩岗 III (11.05%) > II (10.67%) > I (6.06%)。从 I 到 II,土壤容重变化较小;从崩岗 II 到崩岗 III,土壤容重下降 10.1%。在崩岗各部位中,3 条崩岗的土壤容重呈先增加后减少再增加的趋势,沟道出口的容重高于其它部位。另外,崩岗 I、II 和 III 的 pH 分别为 5.14、5.13、4.86,其变异系数分别为 3.2%、3.73%和 5.11%。崩岗 I、II 的 pH 在各部位的变化趋势相似,集水坡面最低(分别为 4.93 和 4.89),沟道最高(分别为 5.24、5.51)。崩岗 III 的 pH 变化表现为沿径流方向(集水坡面→崩壁→崩积体→沟道出口,下同)呈增加→减少→增加趋势,崩壁顶部和沟道的值最高(5.19、5.25)。造成 3 条 pH 的差异可能由于 1、2 号植被稀疏,3 号植被覆盖较为完好,在马尾松芒萁等枯落物分解过程中产生大量酸性成分,导致 pH 下降。

表 2 不同部位崩岗土壤容重与 pH(平均值±标准差)

Table 2 Bulk density and pH value in the soils in the areas of collapse mounds under different sites(mean±SD)

部位 Sites	土壤容重 Bulk density/(g/cm ³)			pH		
	I	II	III	I	II	III
集水坡面 Upper catchment	1.33±0.03b	1.38±0.03bc	1.32±0.25a	4.93±0.06c	4.89±0.02c	4.79±0.03b
崩壁顶部 Top collapsing wall	1.44±0.01ab	1.41±0.04bc	1.34±0.01a	5.19±0.09ab	5.14±0.02b	5.19±0.04a
崩壁中部 Middle collapsing wall	1.44±0.08ab	1.43±0.10abc	1.34±0.09a	5.28±0.02a	5.14±0.02b	4.65±0.03c
崩壁底部 Bottle collapsing wall	1.40±0.12ab	1.31±0.09bc	1.33±0.25a	5.24±0.02ab	5.05±0.05b	4.62±0.03c
崩积体上部 Upper colluvial deposit	1.39±0.14ab	1.51±0.05ab	1.17±0.13a	4.98±0.03c	5.11±0.01b	4.75±0.01b
崩积体下部 Lower colluvial deposit	1.39±0.03ab	1.25±0.21c	1.25±0.12a	5.11±0.03b	5.08±0.04b	4.75±0.02b
沟道出口 Channel outlet	1.50±0.06a	1.63±0.15a	1.30±0.06a	5.24±0.01ab	5.51±0.06a	5.25±0.02a
变异系数 Variation coefficient/%	6.06	10.67	11.05	3.2	3.73	5.11

不同小写字母表示不同部位间差异达到显著水平 ($P<0.05$)



图 1 崩岗侵蚀采样分布图

Fig.1 Sites for soil sampling in collapse mounds

UC: 集水坡面, Upper catchment; WT: 崩壁顶部, Top collapsing wall; WM: 崩壁中部, Middle collapsing wall; WB: 崩壁底部, Bottom collapsing wall; DU: 崩积体上部, Upper colluvial deposit; DL: 崩积体下部, Lower colluvial deposit; CO: 沟道出口 Channel outlet

土壤颗粒组成反映土壤矿物组分的大小、数量及比例, 决定土壤容重、质地等重要物理特性, 并导致养分赋存形态的差异^[21]。3 处崩岗不同部位土壤颗粒组成特征如表 3 所示, 崩岗侵蚀区土壤砂粒、粉粒和黏粒含量分别介于 34.43—73.51%、11.89—33.82%、11.90—28.85%。崩岗 I、II 和 III 砂粒含量均值分别 54.27%、54.47% 和 50.27%, 粉粒含量均值分别为 27.15%、26.99% 和 27.21%, 黏粒含量均值分别为 19.06%、18.54% 和 22.52%。土壤砂粒含量的变异系数表现为崩岗 III (23.50%) > I (18.38%) > II (16.76%), 粉粒含量的变异系数表现为崩岗 I (27.78%) > III (25.36%) > II (24.80%), 黏粒含量的变异系数表现为崩岗 II (23.76%) > III (23.67%) > I (20.31%)。3 条崩岗中, 崩岗 I 和 II 的土壤机械组成含量差异较小, 从崩岗 II 到 III 砂粒含量降低了 8.35%, 粉粒和黏粒含量分别增加了 0.81% 和 17.67%。从崩岗各部位来分析, 崩岗 I、II 从集水坡面到崩积体下部的砂粒含量逐渐增加, 而沟口处砂粒含量达到最高值, 且显著高于其它部位 ($P < 0.05$)。崩岗 III 各部位砂粒含量总体上相对低于崩岗 I、II 的各部位, 主要表现为集水坡面到沟道出口呈显著的增加趋势 (崩壁顶部和崩积体下部除外)。崩岗 I、II 的粉粒含量从集水区至崩积体下部逐渐减少, 沟道出口处的粉粒含量迅速降低。崩岗 III 除崩积体下部的粉粒含量较高外, 从崩壁顶部到沟道出口呈降低趋势。黏粒表现为先减少后增加, 在沟道出口处最少的变化趋势。

表 3 不同部位崩岗土壤颗粒组成 (平均值±标准差)

Table 3 Particle composition in the soils in the areas of collapse mounds under different sites (mean±SD)

部位 Sites	砂粒含量 Sand content/% (2.0—0.10 mm)			粉粒含量 Silt content/% (0.10—0.002 mm)			黏粒含量 Clay content/% (<0.002 mm)		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
	集水坡面 Upper catchment	46.40±3.44bc	54.90±5.47b	40.71±5.48d	32.01±3.45ab	26.41±4.67a	31.09±2.40b	21.59±1.98ab	18.69±1.97ab
崩壁顶部 Top collapsing wall	44.05±2.79cd	51.64±1.34bc	34.43±1.62e	33.82±1.39ab	31.34±7.06a	36.72±1.82a	22.14±1.85a	17.02±6.43b	28.85±0.76a
崩壁中部 Middle collapsing wall	57.14±6.83b	48.85±3.20bc	49.76±4.00c	26.24±5.50bc	31.08±2.07a	27.86±2.57bc	16.62±1.47c	20.07±2.23ab	22.38±1.92b
崩壁底部 Bottom collapsing wall	53.97±4.05b	53.67±3.21bc	55.81±3.15b	28.53±3.13bc	26.70±1.74a	25.16±1.86c	17.50±2.03bc	19.64±1.85ab	19.03±1.84c
崩积体上部 Upper colluvial deposit	51.03±4.12bc	49.50±8.08bc	52.16±4.13bc	29.20±3.72bc	30.68±5.88a	25.79±2.86c	19.78±1.43abc	19.83±2.74ab	22.06±2.12b
崩积体下部 Lower colluvial deposit	52.56±3.19bc	49.24±3.84bc	47.60±6.28c	28.36±3.56bc	28.11±2.09a	29.34±4.58b	19.08±4.47abc	22.65±3.63a	23.07±3.34b
沟道出口 Channel outlet	71.43±10.71a	73.51±2.35a	71.47±5.47a	11.89±3.84d	14.59±1.95b	14.52±2.98d	16.68±7.11c	11.90±1.64c	14.02±2.55d
变异系数 Variation coefficient/%	18.38	16.76	23.50	27.78	24.80	25.36	20.31	23.76	23.67

不同小写字母表示不同部位间差异达显著水平 ($P < 0.05$)

3.2 崩岗系统土壤养分含量空间分布特征

为阐明侵蚀部位对崩岗系统土壤主要化学性质的影响, 对不同植被覆盖度下崩岗土壤养分含量空间分异特征进行分析。如图 2 所示, 不同植被覆盖的崩岗系统不同部位土壤全量养分含量存在明显空间差异。崩岗 I、II 和 III 土壤有机碳和全氮含量分别为 0.71、0.90、5.84 g/kg 和 0.21、0.21、0.59 g/kg。崩岗 III 各部位的有机碳全氮含量均明显高于崩岗 I 和崩岗 II。崩岗 I、II 和 III 土壤全磷和全钾含量分别为 0.056、0.053、0.070 g/kg 和 4.22、4.49、5.78 g/kg, 崩岗 III 全磷和全钾含量总体上略高崩岗 I 和崩岗 II, 即随植被覆盖度的增加, 崩岗土壤中的有机碳、全氮、全磷和全钾含量呈增加的趋势。就崩岗各部位来看, 崩岗 I、II 各部位土壤有机碳和全氮的变化趋势一致, 均沿径流方向呈减少→增加→减少的变化趋势, 且集水坡面高于其它部位, 崩岗 II 的有机碳和全氮含量稍略高 I。崩岗 III 崩壁顶部的有机碳和全氮含量出现低峰, 这可能由于崩壁顶部无植被覆盖的缘故, 沟道出口处的有机碳和全氮含量最低 (0.94 g/kg 和 0.26 g/kg)。

崩岗 I、II 中集水坡面和崩积体 (上部和下部) 的全磷含量相当, 崩岗 I 的崩壁 (顶部、中部和底部) 高于崩岗 II。崩岗 I 沿径流方向呈减少到增加的趋势, 在沟道出口处全磷含量为最高。崩岗 II 沿径流方向呈增加

到减少的趋势。崩岗Ⅲ从沿径流方向呈减少→增加→减少的趋势,崩积体上部的全磷含量最高(0.092 g/kg),崩壁顶部和沟道出口最低(0.052 g/kg、0.059 g/kg)。崩岗Ⅱ、Ⅲ各部位的土壤全钾含量的变化趋势相似,但崩岗Ⅲ的全钾含量高于崩岗Ⅱ。崩岗Ⅰ除崩壁中部和崩积体上部的全钾含量略高(分别为 5.96 g/kg 和 5.36 g/kg),其它部位的全钾含量沿径流方向呈现下降的趋势,沟道出口处的全钾含量最低,为 1.98 g/kg。崩岗Ⅱ、Ⅲ从集水坡面到崩壁中部全钾含量变化不大,从崩壁中部→崩积体上部→沟道出口呈先增加后减少趋势,崩积体上部全钾含量最高(分别为 6.64、8.70 g/kg)。总之,崩岗系统土壤全量养分含量总体上沿径流方向表现出减少、增加再减少的波动变化规律。

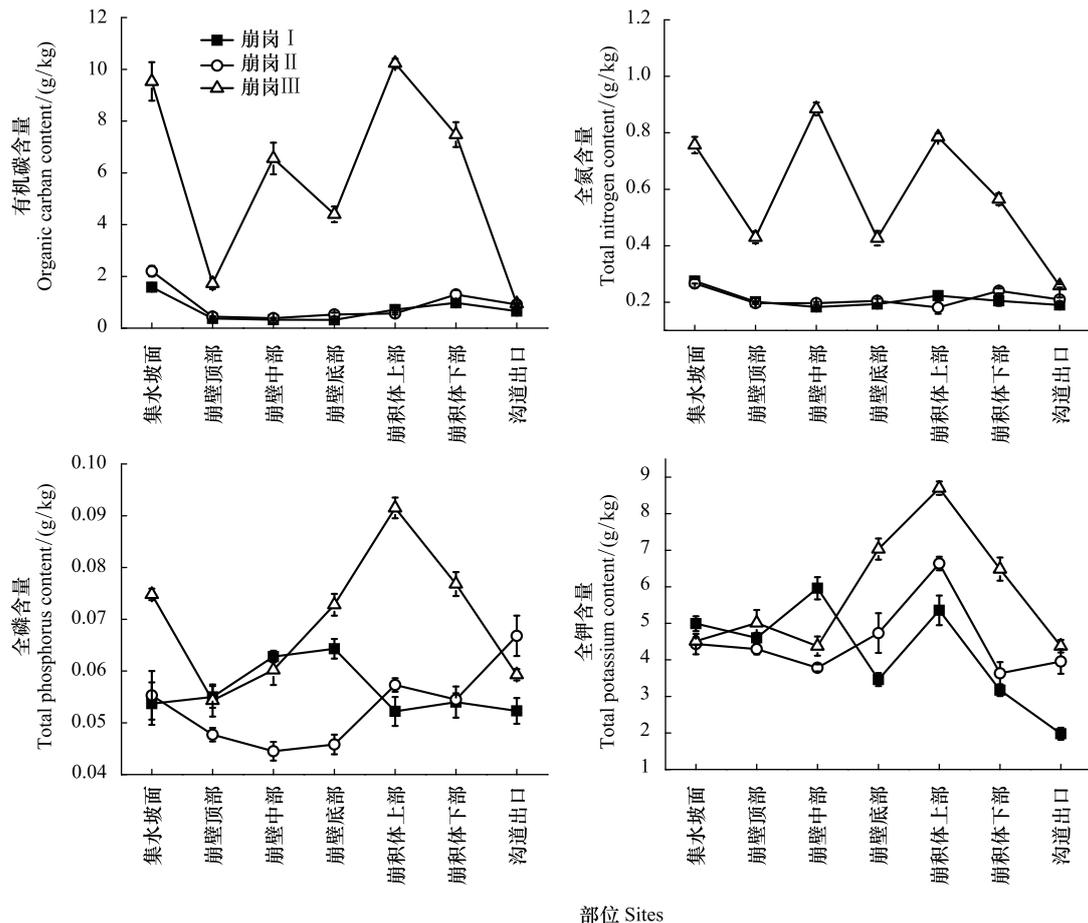


图2 崩岗不同部位土壤有机碳及全量养分含量特征

Fig.2 Characteristics of soil organic carbon and total nutrient content in the areas of collapse mounds under different sites

相对于全量养分,不同植被覆盖度的崩岗系统土壤各速效养分含量基本呈现出相反的空间分布特征(图3)。崩岗Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ土壤铵态氮和硝态氮含量分别为 10.95、6.16、7.26 mg/kg 和 1.48、0.98、0.86 mg/kg。崩岗Ⅰ、Ⅱ的土壤铵态氮和硝态氮沿着径流方向呈增加→减少→增加→减少的波动变化趋势,崩壁顶部的铵态氮含量最高(分别为 16.70 mg/kg 和 13.40 mg/kg),崩积体上部的硝态氮含量最高(分别为 2.59 mg/kg 和 2.02 mg/kg)。崩岗Ⅲ土壤铵态氮含量的变化趋势与有机碳和全氮的变化趋势相似,表现为沿径流方向呈减少→增加→减少的变化趋势。土壤硝态氮含量变化从集水坡面到沟道出口表现为平缓的下降趋势。

崩岗Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ的土壤速效磷和速效钾含量分别为 0.66、0.61、0.33 mg/kg 和 23.24、30.59、19.32 mg/kg。崩岗Ⅰ的土壤速效磷含量沿径流方向呈增加趋势,沟道处速效磷含量最高,为 0.91 mg/kg。崩岗Ⅱ的土壤速效磷含量从集水坡面到崩壁底部无明显变化,最低值在崩积体上部(0.30 mg/kg),从崩积体上部到沟道出口呈明显的增加趋势。崩岗Ⅲ速效磷含量呈“W”变化趋势,崩壁底部和崩积体下部为最低点(分别为 0.16 mg/

kg 和 0.20 mg/kg)。崩岗 I 中从集水坡面到崩壁底部土壤速效钾含量呈降低趋势(31.18 mg/kg→13.91 mg/kg),到沟道出口处速效含量为 28.48 mg/kg。崩岗 II 从集水区到崩积体上部速效钾含量呈降低趋势(41.62 mg/kg→14.99 mg/kg),此后的部位略有增加。崩岗 III 径流方向呈现增加→下降→增加的变化特点,崩壁底部的速效钾含量最低(38.72 mg/kg),三者总体上呈“V”形变化态势。

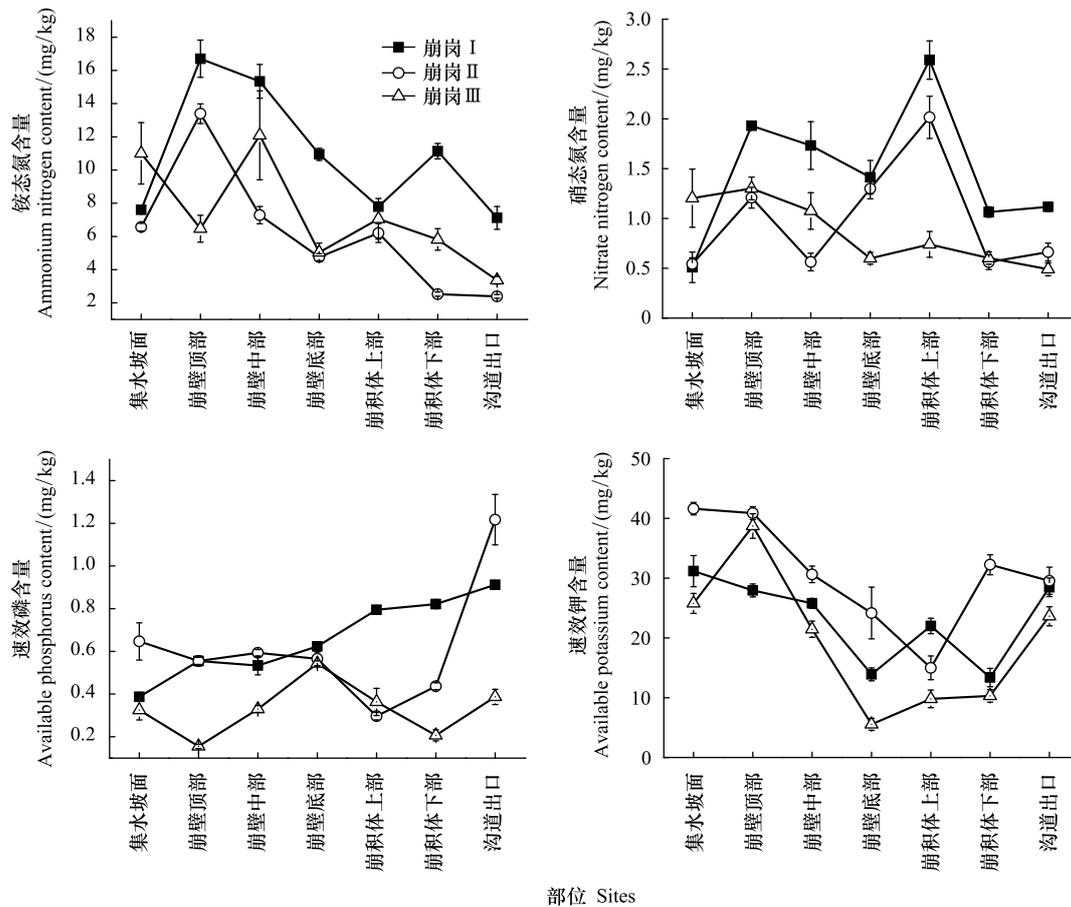


图3 崩岗不同部位土壤速效养分含量特征

Fig.3 Characteristics of the soil available nutrient content in the areas of collapse mounds under different sites

3.3 崩岗系统土壤理化性质间的相关程度

为进一步了解各植被盖度崩岗土壤性质间的相互影响,对崩岗系统土壤基本理化指标进行相关性分析(表4)。结果表明,土壤容重与pH、速效磷含量呈极显著正相关,与硝态氮含量达到显著正相关水平,与有机碳、全氮含量呈极显著负相关,与全钾含量达到显著负相关水平。以上结果表明崩岗土壤养分含量分异很大程度受到土壤容重的影响。土壤颗粒组成除了与pH、速效磷含量具有极显著相关性以外,与其余指标均无明显相关关系,这是由于植被恢复过程中崩岗土壤机械组成无显著差异,物理结构尚无明显改善,因而对土壤养分含量的影响相对较小。与此同时,pH与绝大多数指标具有显著甚至极显著相关关系,表明pH对崩岗土壤物理环境及调节土壤养分平衡具有重要作用。有机碳含量除了受到土壤容重、颗粒组成、pH的显著影响外,与全氮、全磷、全钾含量呈极显著正相关,与速效磷、速效钾含量呈极显著负相关,说明植被恢复对崩岗土壤全量养分含量的影响可能具有同质效应,而速效养分受到植被利用吸收和地表径流侵蚀的交互影响,可能表现出与全量养分含量迥异的特征。另外,硝态氮和铵态氮含量与其它土壤性质指标相关性较低,说明强度侵蚀环境(崩岗)土壤矿质化氮的转化受理化性质的影响较小。

表 4 崩岗土壤理化性质的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of soil physicochemical properties in the areas of collapse mounds

	容重 Bulk density	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	pH	有机碳 Organic C	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	速效磷 Available P	速效钾 Available K
容重 Bulk density	1												
砂粒 Sand	0.225	1											
粉粒 Silt	-0.169	-0.946 **	1										
黏粒 Clay	-0.244	-0.801 **	0.591 **	1									
pH	0.447 **	0.482 **	-0.392 **	-0.465 **	1								
有机碳 Organic C	-0.388 **	-0.316 *	0.153	0.470 **	-0.738 **	1							
全氮 Total N	-0.354 **	-0.331 **	0.162	0.516 **	-0.714 **	0.916 **	1						
全磷 Total P	-0.226	-0.039	-0.039	0.139	-0.408 **	0.760 **	0.616 **	1					
全钾 Total K	-0.305 *	-0.268	0.280	0.195	-0.486 **	0.509 **	0.402 **	0.575 **	1				
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	0.098	-0.331 **	0.350 **	0.121	-0.001	-0.017	0.050	-0.064	-0.071	1			
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	0.310 *	-0.213	0.249	0.087	0.190	-0.270	-0.212	-0.210	0.057	0.510 **	1		
速效磷 Available P	0.459 **	0.605 **	-0.505 **	-0.635 **	0.476 **	-0.439 **	-0.483 **	-0.221	-0.461 **	-0.063	0.060	1	
速效钾 Available K	0.197	0.020	-0.043	0.036	0.394 **	-0.394 **	-0.302 *	-0.539 **	-0.466 **	0.052	-0.069	0.106	1

* * 表示在 $P < 0.01$ 水平下相关性达到极显著; * 表示 $P < 0.05$ 水平下相关性达到显著

4 讨论

4.1 植被恢复过程中崩岗系统土壤物理性质的空间分异

崩岗侵蚀过程可概括为:在植被严重破坏后,土壤汇集水坡面(汇水)→崩壁(坍塌)→崩积体(堆积后再侵蚀)→沟道(搬运)→洪积扇(堆积)的空间输移过程^[7, 22-23]。由于土体结构不同的破坏程度,使崩岗各部位的土壤特性空间分布存在一定的差异。随着崩岗侵蚀程度下降甚至崩岗发育终止,随之先锋植物逐渐侵入、存活、生长与繁殖,崩岗内植被盖度明显增加。在降雨过程中,通过植被冠层截留,降雨动能得以极大程度消减,枯枝落叶层的覆盖也使表土侵蚀得以有效控制。植被产生凋落物经腐化分解增加地表土壤有机质养分,而地下根系更是直接参与土壤系统养分循环过程。植被状况影响着侵蚀退化地土壤性质的空间差异性^[12-13]。

从不同植被覆盖度来看,植被覆盖为 2% 和 20% 的崩岗 I、II 的土壤容重、pH 和土壤颗粒组成含量以及变化趋势相似(见表 5)。崩岗 I、II 除了黏粒含量低于覆盖度为 95% 的崩岗 III,其它物理指标均高于崩岗 III。造成这结果可能由于崩岗发育后土壤物理结构均遭严重破坏,而崩岗 III 植被覆盖度相对较高,对土壤容重和土壤颗粒组成有一定的改善,但由于前期亦遭受崩岗侵蚀,土壤理化性质尚未得到根本的改善。总体上,崩岗侵蚀区域土壤物理性质均较差,植被恢复过程中崩岗土壤物理性质虽然稍有改善,但剧烈的侵蚀作用对土壤物理结构的破坏效应在短期年限内难以根本恢复,需要更长的恢复年限。本研究结果与 Vallauri 等^[12] 和唐国勇等^[24] 分别在阿尔卑斯山南麓侵蚀劣地造林 120 a 和我国金沙江流域干热河谷造林 22 a 后土壤物理性状的研究结果基本一致。在剧烈的崩岗侵蚀环境下土壤物理结构表现出明显的同质效应^[25],印证了崩岗侵蚀作为南方红壤丘陵山地最为严重的侵蚀类型对土壤结构破坏作用的严重性^[4, 26]。

崩岗侵蚀导致其土壤物理性质空间分异,崩岗从集水坡面至沟道出口土壤容重总体呈先升高后降低再升高趋势。其中,在崩积体处的土壤容重低于崩壁,这主要由于崩积体是由崩壁土体发生崩塌坠落形成,其土质松散。集水坡面地处崩岗系统后缘部分,土壤侵蚀以面蚀为主,侵蚀强度较低,土壤容重较其它部位偏低。土壤颗粒组成的部位分异主要受强烈的侵蚀作用所致,崩岗的砂粒含量占 50% 以上,其空间分布特征与土壤容重基本类似,尤其沟道出口是崩岗系统泥沙输移的通道,受径流冲刷作用,随着径流路径的逐渐延长,细小颗粒组分被搬运至洪积扇甚至下游农田,而粗大颗粒单元逐渐在沟道沉积下来^[23, 25],沟道出口处的砂粒比例高

达70%以上,显著高于其它部位。粉粒和黏粒含量的空间变化趋势与砂粒基本相反。总体而言,沟道出口与其它部位间土壤物理性质差异明显,而集水坡面、崩壁及崩积体等区域土壤物理性质空间差异较小,这一分异特征与崩岗侵蚀过程与机制的复杂性有关^[6-7, 22-23]。

表5 植被恢复对崩岗土壤物理性质的影响(平均值±标准差)

植被覆盖度 Restoration coverage/%	土壤容重 Bulk density/ (g/cm ³)	pH	颗粒组成 Particle composition/%		
			砂粒 Sand (2.0—0.10 mm)	粉粒 Silt (0.10—0.002mm)	黏粒 Clay (<0.002 mm)
2	1.41±0.07a	5.14±0.05a	54.27±8.66a	27.15±6.69a	19.06±2.77b
20	1.42±0.15a	5.13±0.07a	54.47±8.78a	26.99±5.88a	18.54±3.71b
95	1.29±0.14b	4.86±0.10b	50.27±9.68a	26.08±5.46a	22.52±5.04a

不同小写字母表示不同植被覆盖度间达显著差异水平(P<0.05)

4.2 植被恢复过程中崩岗系统土壤养分的空间分异

崩岗植被恢复对调控退化生态系统土壤养分循环,改善肥力状况具有重要影响^[15]。本研究中,不同植被覆盖度下崩岗土壤养分含量呈现出更加明显分异规律(见表6)。植被覆盖度达95%的崩岗Ⅲ各部位有机碳和全氮含量均明显高于低覆盖的崩岗Ⅰ、Ⅱ。而土壤崩岗Ⅱ除有机碳含量略高于崩岗Ⅰ外,全氮含量相对一致,这主要是由于极度侵蚀退化区凋落物的矿化分解所致^[27]。随着植被盖度的逐渐升高,土壤有机碳和全氮含量明显增加,崩岗Ⅲ的土壤全磷和全钾含量高于崩岗Ⅰ、Ⅱ,但崩岗系统内的土壤全磷、全钾含量普遍低下,这是由于研究区地处中亚热带湿润区,受气候条件、成土母质、土壤侵蚀及植被生长等因素影响,导致磷素出现普遍流失^[28],但枯枝落叶的增加在一定程度上提高了全磷和全钾的含量。

土壤速效养分含量反映土壤养分有效性,是养分循环中分解归还与淋溶流失过程动态平衡的结果,其含量的高低主要受植被吸收、地表侵蚀、微生物活动、土壤水热条件等诸多因素的交互影响^[29-30]。在崩岗中,土壤铵态氮和硝态氮含量随植被盖度提高基本呈减少态势(见表6),植被盖度较高的崩岗Ⅲ地表凋落物较为丰富,其厚度达到5 cm以上,对土壤温湿度和通气性产生一定影响,加之植物生长消耗导致该崩岗的无机氮含量有所降低。土壤速效磷和速效钾含量从崩岗Ⅰ到Ⅲ有所减少,可能与基岩风化特征与植被吸收利用有关,而pH随植被覆盖增加而降低主要原因是由于凋落物分解过程中产生大量单宁等酸性成分所致。植被恢复显著提升崩岗土壤养分含量(以有机碳和全氮含量的提升尤为明显),说明对土壤化学性质的影响大于物理性质,与前人类研究结论一致^[12-13, 16, 24]。

由于崩岗侵蚀导致输移物质沿径流方向发生剥蚀、搬运及沉积,土壤养分随之流失,在后续植被自然恢复过程中表现出明显的部位差异(图2)。崩岗Ⅰ、Ⅱ各养分含量在各崩岗部位的变化趋势基本相似,而崩岗Ⅲ与其它两个崩岗的变化趋势有较大差异,这与植被恢复程度关系密切。在崩系统各部位内,崩壁底部至崩积体下部,土壤全量养分含量明显较高,而崩壁的养分含量偏低,其原因可能是崩壁陡峭,植物侵入十分困难。崩壁侵蚀的土体坠落至崩壁下方堆积成崩积体。由于崩积体坡度相对平缓(20°—40°)^[10],土壤结构、养分状况和植被条件均远好于崩壁,因此,崩积体土壤全量养分含量高于崩壁,且植被恢复程度越高,土壤养分含量差异越明显。从崩积体上部至沟道出口,各全量养分含量普遍逐渐降低,这与径流侵蚀导致的物质迁移和地形差异有关^[6-7]。

在崩岗系统中,崩岗Ⅰ、Ⅱ沿径流方向,其土壤速效养分变化趋势具有相似性。主要表现为硝态氮和铵态氮含量基本上呈先增加后减少的趋势,速效磷含量呈增加趋势,速效钾含量先减少后略有增加(图3)。由于崩岗Ⅰ、Ⅱ的崩壁处土体裸露,但表土水热条件相对较好,有利于微生物的矿化分解,因而铵态氮和硝态氮含量相对高于集水坡面。在崩积体至沟道,受到径流冲刷及化学淋溶影响,铵态氮、硝态氮含量从崩积体至沟道出口逐渐减少。崩岗Ⅲ各部位的速效养分总体低于崩岗Ⅰ、Ⅱ,这主要是崩岗Ⅲ以马尾松+芒萁为代表的植物群落生长较好,对速效养分需求相对较高,加之凋落物对速效养分含量变化的影响相对较小^[31]。崩岗中速

效磷含量与土壤容重、砂粒含量呈极显著正相关(表4),可能与土壤颗粒的赋存特征有关^[28]。速效钾含量与土壤全磷养分的相关性均达到显著或极显著负相关,可能与母质成土风化过程有关^[32]。另外,从集水坡面至沟道出口,pH呈明显增加态势,这主要是土壤侵蚀、植物根系及微生物活动对土壤物理化学性质交互影响的结果。

表6 植被恢复对崩岗土壤养分含量的影响(平均值±标准差)

Table 6 Effects of vegetation restoration on nutrient contents in the soils in the areas of collapse mounds (mean±SD)

植被覆盖度 Restoration coverage/%	pH	有机碳 Organic C/ g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	全钾 Total K/ (g/kg)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/ (mg/kg)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/ (mg/kg)	速效磷 Available P/ (mg/kg)	速效钾 Available K/ (mg/kg)
2	5.14±0.14a	0.71±0.44b	0.21±0.03b	0.05±0.01a	4.22±1.38b	10.95±3.72a	1.48±0.66a	0.66±0.18a	23.24± 6.99b
20	5.13±0.18a	0.90±0.62b	0.22±0.03b	0.05±0.01a	4.49±1.03b	6.16±3.55b	0.98±0.53b	0.61±0.29a	30.59± 9.21a
95	4.86±0.25b	5.80±3.39a	0.59±0.23a	0.07±0.01a	5.78±1.63a	7.26±3.54b	0.86±0.36b	0.33±0.12b	19.32±11.08b

不同小写字母表示不同植被覆盖度间达显著差异水平($P<0.05$)

4.3 植被恢复对崩岗土壤性质的影响

生物地球化学循环差异是造成土壤特性时空异质性的基础,土壤性质的演变很大程度上除了受崩岗侵蚀制约外,植被恢复的影响亦尤为重要。在崩岗植被恢复过程中土壤容重与土壤养分间存在负相关关系(特别是与有机碳和全氮含量),崩岗内部土壤结构紧实在一定程度上抑制了土壤碳氮循环。pH与土壤其它指标均存在一定的相关性(铵态氮及硝态氮除外),表明崩岗土壤性质普遍受到pH的影响,适宜的土壤酸碱环境对养分固持、酶活性及微生物活动至关重要^[33]。土壤有机碳与其它全量养分均呈极显著相关,与速效磷和速效钾含量呈显著负相关,说明植被恢复是崩岗土壤全量养分的主要来源,而速效养分则受植物生长消耗、径流淋溶流失等因素综合影响。我们还发现不同植被覆盖度崩岗其养分含量处于极低水平,参照全国第二次土壤普查养分推荐分级标准^[34],崩岗土壤有机质、全磷、速效氮和速效磷含量均处于6级(最低等级),全氮、全钾和速效钾含量处于5级以下。综上所述,随着自然植被恢复过程中植被覆盖度的提高使土壤物理结构和养分含量得到一定程度的改善,但受制于崩岗侵蚀过程的剧烈影响,仍未能达到侵蚀坡面植被未破坏前基本水平^[35],土壤退化特征仍旧较为明显。因此,适当的人工恢复措施对促进崩岗土壤修复至关重要。

5 结论

本研究经过3个不同植被覆盖度崩岗研究表明,植被覆盖度提高使崩岗土壤容重、粉粒、pH、速效养分的值降低,明显提高了土壤有机碳、全氮、全磷和全钾的养分含量,植被自然恢复过程对崩岗土壤特性有一定的改良效应。沿着崩岗径流方向,土壤容重和砂粒含量呈增加→减少→增加态势,粉粒和黏粒含量则呈降低趋势。土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量在集水坡面和崩积体高于其它部位,在崩壁顶部及沟道出口其含量最低。铵态氮和硝态氮含量沿崩岗径流方向呈先增加后减少的态势,速效钾含量呈“V”型变化态势,速效磷和pH呈增加态势,崩岗各部位因不同侵蚀程度以及植被恢复程度土壤性质有明显的空间差异,且不同土壤理化性质间具有一定的耦合关系。总体上,崩岗系统内土壤物理结构较差,养分含量较低,植被恢复对土壤性质有一定改善,但自然修复过程迟缓。开展植被恢复过程对崩岗土壤理化性质的定量分析,有助于理解崩岗的发生机制及生态效应,为崩岗发育地区生态恢复措施的制定提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 曾昭璇,黄少敏. 中国自然地理:地貌. 北京:科学出版社,1980:32-36.
- [2] 唐克丽. 中国水土保持. 北京:科学出版社,2004:80-82.
- [3] 孙波. 红壤退化阻控与生态修复. 北京:科学出版社,2011:309-310.
- [4] Xu J X. Bengang erosion: the influencing factors. CATENA, 1996, 27(3/4): 249-263.
- [5] 梁音,宁堆虎,潘贤章,李德成,张斌. 南方红壤区崩岗侵蚀的特点与治理. 中国水土保持,2009,(1):31-34.

- [6] 刘希林, 张大林. 崩岗地貌侵蚀过程三维立体监测研究——以广东五华县莲塘岗崩岗为例. 水土保持学报, 2015, 29(1): 26-31.
- [7] 刘希林, 张大林. 基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析. 农业工程学报, 2015, 31(4): 204-211.
- [8] 邓羽松, 丁树文, 蔡崇法, 吕国安. 鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟. 土壤学报, 2016, 53(2): 355-364.
- [9] 邓羽松, 丁树文, 刘辰明, 夏栋, 张晓明, 吕国安. 鄂东南花岗岩崩岗崩壁土壤水分特征研究. 水土保持学报, 2015, 29(4): 132-137.
- [10] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 赵淦, 葛宏力, 林敬兰. 坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响. 土壤学报, 2014, 51(5): 974-982.
- [11] 林金石, 庄雅婷, 黄炎和, 蒋芳市, 林敬兰, 葛宏力. 不同剪切方式下崩岗红土层抗剪特征随水分变化规律. 农业工程学报, 2015, 31(24): 106-110.
- [12] Vallauri D R, Aronson J, Barbero M. An analysis of forest restoration 120 years after reforestation on badlands in the Southwestern Alps. Restoration Ecology, 2002, 10(1): 16-26.
- [13] Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H L, Zhang T H, Guo Y R, Li Y Q, Huang Y G. Spatial heterogeneity of soil properties and vegetation-soil relationships following vegetation restoration of mobile dunes in Horqin Sandy Land, Northern China. Plant and Soil, 2009, 318(1/2): 153-167.
- [14] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. Scientific Reports, 2013, 3(2846): 1-5.
- [15] Xie J S, Guo J F, Yang Z J, Huang Z Q, Chen G S, Yang Y S. Rapid accumulation of carbon on severely eroded red soils through afforestation in subtropical China. Forest Ecology and Management, 2013, 300: 53-59.
- [16] Erktan A, Cécillon L, Graf F, Roumet G, Legout C, Rey F. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. Plant and Soil, 2016, 398(1/2): 121-137.
- [17] Knops J M H, Tilman D. Dynamics of soil nitrogen and carbon accumulation for 61 years after agricultural abandonment. Ecology, 2000, 81(1): 88-98.
- [18] Chen Z Q, Chen Z B, Yan X Y, Bai L Y. Stoichiometric mechanisms of *Dicranopteris dichotoma* growth and resistance to nutrient limitation in the Zhuxi watershed in the red soil hilly region of China. Plant and Soil, 2016, 398(1/2): 367-379.
- [19] 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. 自然资源学报, 2013, 28(9): 1498-1506.
- [20] 唐庄生, 安慧, 邓蕾, 上官周平. 荒漠草原沙漠化植物群落及土壤物理变化. 生态学报, 2016, 36(4): 991-1000.
- [21] Wang J G, Li Z X, Cai C F, Ma R M. Particle size and shape variation of Ultisol aggregates affected by abrasion under different transport distances in overland flow. CATENA, 2014, 123: 153-162.
- [22] 丘世钧. 红土坡地崩岗侵蚀过程与机理. 水土保持通报, 1994, 14(6): 31-40.
- [23] 邓羽松, 丁树文, 蔡崇法, 吕国安, 夏栋, 朱芸. 鄂东南崩岗洪积扇土壤物理性质空间分异特征. 中国农业科学, 2014, 47(24): 4850-4857.
- [24] 唐国勇, 高成杰, 李昆. 植被恢复对干热河谷退化土壤改良的影响. 生态学报, 2015, 35(15): 5157-5167.
- [25] 刘希林, 张大林, 贾瑶瑶. 崩岗地貌发育的土体物理性质及其土壤侵蚀意义——以广东五华县莲塘岗崩岗为例. 地球科学进展, 2013, 28(7): 802-811.
- [26] Sheng J A, Liao A Z. Erosion control in South China. CATENA, 1997, 29(2): 211-221.
- [27] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [28] Walker T W, Syers J K. The fate of phosphorus during pedogenesis. Geoderma, 1976, 15(1): 1-19.
- [29] Johnson D W, Dijkstra F A, Cheng W. The effects of *Glycine max* and *Helianthus annuus* on nutrient availability in two soils. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(8): 2160-2163.
- [30] Lu M, Yang Y H, Luo Y Q, Fang C M, Zhou X H, Chen J K, Yang X, Li B. Responses of ecosystem nitrogen cycle to nitrogen addition: a meta-analysis. The New Phytologist, 2011, 189(4): 1040-1050.
- [31] 宋蒙亚, 李忠佩, 刘明, 刘满强, 江春玉. 不同林地凋落物组合对土壤速效养分和微生物群落功能多样性的影响. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2454-2461.
- [32] Jalali M. Kinetics of non-exchangeable potassium release and availability in some calcareous soils of western Iran. Geoderma, 2006, 135: 63-71.
- [33] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [34] 汪邦稳, 夏小林, 段剑. 侵蚀地形对马尾松林下土壤特性的影响. 土壤学报, 2016, 53(3): 808-819.
- [35] 杨玉盛, 何宗明, 邱仁辉, 罗学升. 严重退化生态系统不同恢复和重建措施的植物多样性与地力差异研究. 生态学报, 1999, 19(4): 490-494.