

红壤侵蚀区崩岗土壤养分化学计量特征分异规律

姜超^{1,2}, 陈志彪^{1,2,3}, 陈志强^{1,2,3}, 陈海滨^{1,2}, 区晓琳^{1,2}, 任天婧^{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; 3. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007)

摘要: 以福建省西南部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 处相邻崩岗为研究对象, 对各崩岗内集水坡面、崩壁(顶部、中部及底部)、崩积体(上部和下部)和沟道出口 7 个典型部位 0—10, 10—20, 20—30 cm 土壤基本理化性质进行测定, 分析了各植被盖度崩岗不同深度及部位土壤化学计量比的空间分异规律。结果表明: 随着植被盖度的升高, 土壤养分含量及化学计量比显著增加(除全磷含量和 P/K 以外); 随着土壤深度的增加, 有机碳、全氮和全钾含量以及 C/N、C/P、C/K 和 N/P 总体上呈减少趋势, 全磷含量以及 N/K 和 P/K 基本维持稳定; 沿集水坡面→崩壁→崩积体→沟道出口, 有机碳、全氮和全钾含量以及 C/N、C/P、C/K、N/P 和 N/K 基本表现为先减少再增加最后亦降低的变化趋势, 全磷含量和 N/P 无明显差异; 土壤化学计量特征与土壤养分含量、粉粒含量、容重、含水量和 pH 具有较强的相关关系。崩岗系统土壤物理结构较差, 养分含量普遍较低, 其中有机碳、全氮和全磷含量存在不同程度的限制。

关键词: 空间分异; 崩岗系统; 化学计量特征; 土壤养分; 植被恢复

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2016)06-0193-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.033

Variation of Stoichiometric Characteristics of Soil Nutrients in Collapse Mound of Eroded Red Soil Region

JIANG Chao^{1,2}, CHEN Zhibiao^{1,2,3}, CHEN Zhiqiang^{1,2,3},
CHEN Haibin^{1,2}, OU Xiaolin^{1,2}, Ren Tianjing^{1,2}

(1. Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology (Ministry of Science and Technology and Fujian Province Funded), Fuzhou 350007; 2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 3. Institute of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: 3 adjacent typical collapse mounds (I, II and III) were selected in Huangniken collapse mound group in Zhuotian Town, Changting County of southwestern Fujian Province, in which vegetation coverage of each collapse mound was 2%, 20% and 95%, respectively; seven plots including upper catchment, collapsing wall (top, middle and bottom part), colluvial deposit (upper and lower part) and channel outlet for each collapse mound were sampled, and the main physical and chemical properties including particle composition, bulk density, water content, pH value, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total potassium (TK) in 3 depths (0—10 cm, 10—20 cm and 20—30 cm) of each plot were measured. Meanwhile, spatial variation of the contents of SOC, TN, TP, TK and their stoichiometric characteristics in each collapse mound with different depth and position were analyzed in this paper. The results indicated that with improvement of vegetation coverage (from I to III), the contents of SOC, TN, TP, TK and their stoichiometric ratios increased significantly with the exception of TP content and P/K, and the order of increasing range of soil nutrients was SOC>TN>TK>TP, while that of soil stoichiometric ratios was C/P>C/K>C/N>N/K>N/P>P/K. Under different depth (from 0—10 cm to 20—30 cm), the contents of SOC, TN, TK and the ratios of C/N, C/P, C/K and N/P generally decreased, while the content of TP and the ratios of N/K and P/K basically remained stable. Variation of soil nutrient contents and their stoichiometric ratios for different position were greatly obvious in each collapsing hill; the contents of SOC, TN, TK, C/N

收稿日期: 2016-06-05
资助项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAC08B03); 国家自然科学基金项目(41171232, 41371532); 福建省社会发展指导性(重点)项目(2016Y0024)
第一作者: 姜超(1990—), 男, 四川平昌人, 博士研究生, 主要从事退化地生态系统过程研究。E-mail: jeci Jiangchengzi@163.com
通信作者: 陈志彪(1962—), 男, 福建平潭人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与资源环境研究。E-mail: chen zhibiao408@vip.163.com

and C/P, C/K, N/P and N/K showed a down-up-down variation tendency along the runoff routes from upper catchment to channel outlet via collapsing wall and colluvial deposit, while TP content and P/K ratio kept relatively consistent. Besides, soil stoichiometry was closely related to nutrient content, silt content, bulk density, water content and pH value by stepwise regression analysis. In summary, the contents of C, N and P were at very low level, especially P content in the severely eroded context of collapse mound.

Keywords: spatial variation; collapse mound; stoichiometric characteristics; soil nutrients; vegetation restoration

崩岗(Collapse mound)被称为南方红壤丘陵山区“生态溃疡”,用于描述一类“侵蚀沟沟头发生坍塌、陷蚀而形成的深围椅状崩口地貌”,为沟谷土壤侵蚀的高级阶段,一般由集水坡面、崩壁、崩积体、沟道和冲积扇等子系统组成^[1-2]。全国范围内崩塌面积 $\geq 60\text{ m}^2$ 崩岗数量约 239 000 处,侵蚀面积约 1 200 km^2 ,年侵蚀总量 6 000 万 t 以上,平均侵蚀模数高达 590 00 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,集中分布在广东、江西、广西、福建、湖南、湖北和安徽 7 省(自治区)^[3]。崩岗侵蚀的危害仅次于泥石流和滑坡,侵蚀过程形成的大量泥沙掩埋下游农田,淤积河道水系破坏土地资源,是导致区域生态环境恶化的重要因素,甚至对区内防洪安全、粮食安全及人民生命财产安全构成严重威胁。

导致崩岗发生的因素主要包括降雨、温度和地形等环境因素的影响;深厚疏松的花岗岩残积风化壳;节理、裂隙、断裂带等地质软弱结构面分布发育;植被破坏和人类活动干扰等。近 10 年来,刘希林等^[4]运用三维激光扫描技术对崩岗降雨—侵蚀过程展开原位动态监测模拟;邓羽松等^[5]分析了崩岗洪积扇土壤物理性质空间分异特征;蒋芳市等^[6]通过室内人工降雨模拟研究不同坡度和雨强条件崩岗崩积体土壤颗粒侵蚀特征。纵观上述崩岗领域的研究主要集中在崩岗红土层、砂土层及碎屑层等剖面结构岩土物理特性差异、崩岗崩积体土体特征及侵蚀过程模拟及其崩岗洪积扇区土壤质量养分状况与改良等方面,对整个崩岗系统不同部位及土层间土壤性质的分异特征还鲜有报道。

生态化学计量学结合了化学和生物学等基本原理,研究生态系统内碳、氮、磷、钾等多重化学元素强调等平衡关系与交互影响^[7-8]。最早于海洋生态系统浮游生物体内被发现存在稳定营养计量关系以来,陆地生态系统化学计量特征研究引起众多学者的高度关注^[9-10]。研究崩岗土壤养分化学计量特征,对理解我国红壤强度侵蚀地区养分循环与限制具有重要意义。然而,目前国内外关于土壤生态化学计量特征的研究以土壤—植被复合系统化学计量耦合关系居多,生态系统类型涉及森林^[11]、湿地^[12]及草原^[13]等,对以土壤侵蚀特征的退化生态系统的研究相对较少^[14];与此同时,崩岗系统土壤养分在侵蚀环境下的

响应机制研究较为薄弱,造成极度退化的崩岗区在土壤及植被的生态恢复与重建工作中存在局限性。因此,本研究以福建省西南部长汀县濯田镇黄泥坑崩岗群为内植被恢复过程中自然演替形成的 3 处不同植被盖度的典型崩岗为研究对象,分析不同类型崩岗土壤养分含量及其化学计量比空间分异特征,探究我国中亚热带湿润脆弱生态区土壤养分限制—系统维持与演变规律。研究成果有助于加深对崩岗侵蚀区生态效应与物质循环机制的理解,并为指导崩岗侵蚀区的生态恢复实践以及恢复效果评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长汀地区作为我国中亚热带花岗岩红壤生态系统脆弱区典型代表,多陡坡丘陵山地,土壤贫瘠,抗蚀性极差,保水保肥能力低,稀疏的植被覆盖加剧土壤侵蚀发生,同时农林资源的过度利用以及当地居民生活生产活动的干扰造成植被破坏亦是引发土壤侵蚀的重要因素^[15]。黄泥坑崩岗群($116^{\circ}16'52''\text{E}$, $25^{\circ}31'49''\text{N}$)位于福建省长汀县濯田镇西南部,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 37 500 m^2 ,其中主沟长度 200.34 m,宽度 4.87~12.10 m。境内属中亚热带季风气候,年均气温 18.5 $^{\circ}\text{C}$,年均降雨量 1 710 mm,年均相对湿度 80%,年均蒸发量 1 403 mm,年均无霜期 260 d, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 4 100~4 650 $^{\circ}\text{C}$ 。研究区内乔木仅存马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.),灌木有岗松(*Baeckea frutescens* Linn.)、毛冬青(*Ilex pubescens* Hook. et Arn.)、石斑木(*Raphiolepis indica* Lindl.)、黄瑞木(*Adinandra millettii* Hook. et Arn.)、轮叶蒲桃(*Syzygium buxifolium* Hance)及木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)等,草本主要有五节芒(*Miscanthus floridulus* Lab.)和黑莎草(*Gahnitris-tis* Nees.),蕨类植物有芒萁(*Dicranopteris dichotoma* Thunb.)、乌毛蕨(*Blechnum orientale* Linn.)等;土壤类型为在长期温热湿润气候条件花岗岩下发育形成的侵蚀性红壤。

1.2 样地调查与采样

根据典型性和代表性的原则,在实地勘查的基础上,于 2014 年 7 月在黄泥坑崩岗群内选取土壤母岩

和成土条件相同,海拔和坡度等地表生境相似的 3 处不同植被盖度毗邻崩岗。试验崩岗基本概况见表 1。于每条崩岗内,分别在集水坡面(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)中轴线位置布设 7 个样点,其中 UC 为崩岗侵蚀溯源区自然坡面,WT 为发生坍塌后形成的墙壁状陡崖上顶部,WM 为崩岗壁中部,WB 为崩岗壁底部,DU 为上方

坠落岩土体暂时堆砌形成的锥形崩积物上部,DL 为崩积体下侧区域,CO 为崩积体下方主沟末端,以上 7 个部位基本构成完备的崩岗系统。用环刀、铝盒采集各样点原状土 1 份;同时,每个样点内均在 2 m×2 m 的微样方内按“梅花形”多点混合采样,并以 0—10, 10—20,20—30 cm 分层采样,相同土层的 5 个取样点成 1 个混合样,重量约 1 kg;另外,在每样点等高位置,距中轴线左右两侧 1.5~2 m 处设置 2 个重复。

表 1 3 处试验崩岗基本概况

研究区域	地理位置	植被状况	地表特征
I	西南朝向,海拔 359 m,面积 542 m ²	绝大范围内地表裸露,仅有零星芒萁分布,长势极差,植被总盖度 2%	地表裸露土层呈棕褐色,石英颗粒随处可见,形成厚度 2 cm 的微土柱,约 2 mm 物理结皮分布于崩壁及崩积体;整个崩岗系统内 3 条侵蚀沟分布
II	位于 I 的西侧约 5 m 处,西南朝向,海拔 324 m,面积 705 m ²	马尾松幼树、岗松及和芒萁稀疏分布,枝干矮小,长势较差,植被总盖度 20%	地表裸露土层呈赤褐色,结构疏松,约 5 mm 物理结皮分布于崩壁及崩积体,崩积体结构疏松;崩岗内沟壑发育,有 7 条侵蚀沟分布
III	位于 II 的西南侧 10 m 处,东南朝向,海拔 318 m,面积 146 m ²	以芒萁为主,岗松、轮叶蒲桃等灌丛散布其中,长势较好,植被总盖度 95%	无表土出露,枯死枝、叶等地被凋落物的厚度达 10 cm 以上,无侵蚀沟分布

注: I 为无植被崩岗; II 为低植被崩岗; III 为高植被崩岗。下同。

1.3 样品处理及测定

所取土样待自然风干后,挑去植物根系、残体等,四分法混合均匀后研磨,过 25 目细筛用于样品颗粒组成和 pH 值的测定,过 100 目细筛用于有机碳、全氮、全磷和全钾含量的测定。土壤容重采用环刀法测定;土壤含水量采用铝盒烘干法测定;土壤颗粒组成采用德国 SEDIMAT4-12 粒径分析系统测定;土壤

pH 值按水土比 2.5 : 1,采用 STARTER 300 便携式酸度计测定。土壤有机碳、全氮含量采用德国 Elementar vario MAX 碳氮元素分析仪测定;土壤全磷含量采用硫酸—高氯酸消煮提取待测液后,荷兰 Skalar san⁺⁺ 连续流动分析仪测定;土壤全钾含量用氢氟酸—高氯酸消煮提取待测液,火焰分光光度仪测定。土壤基本性质见表 2。

表 2 不同植被盖度崩岗土壤基本理化性质 (N=63)

崩岗类型	颗粒组成/%			容重/(g·cm ⁻³)	含水量/%	pH
	砂粒	粉粒	黏粒			
I	54.39±10.12	26.82±7.50	18.79±4.05	1.41±0.09	7.51±0.76	5.14±0.16
II	54.49±9.56	26.95±6.98	18.56±4.68	1.42±0.13	8.79±0.59	5.16±0.16
III	50.37±12.18	27.26±7.98	22.37±3.95	1.31±0.17	9.28±4.18	4.87±0.24

1.4 数据处理与分析

数据经 Excel 初步整理后,采用软件 SPSS 16.0 进行方差检验,不同植被盖度、土层深度和侵蚀部位土壤养分含量及化学计量特征用(One-Way ANOVA)进行单因素方差分析及 LSD 法多重比较显著性检验,土壤化学计量特征与理化性质间的相关程度性运用逐步回归分析,图表制作由 Origin 9.0 完成。

2 结果与分析

2.1 不同植被盖度崩岗土壤养分含量变化

从图 1 可以看出,随着土层深度的增加,3 处不同植被盖度崩岗土壤有机碳、全氮和全钾含量表现出逐渐增加的趋势,全磷含量无明显差异。同一植被盖度下土壤养分含量不同深度的分布差异较小,其中 I

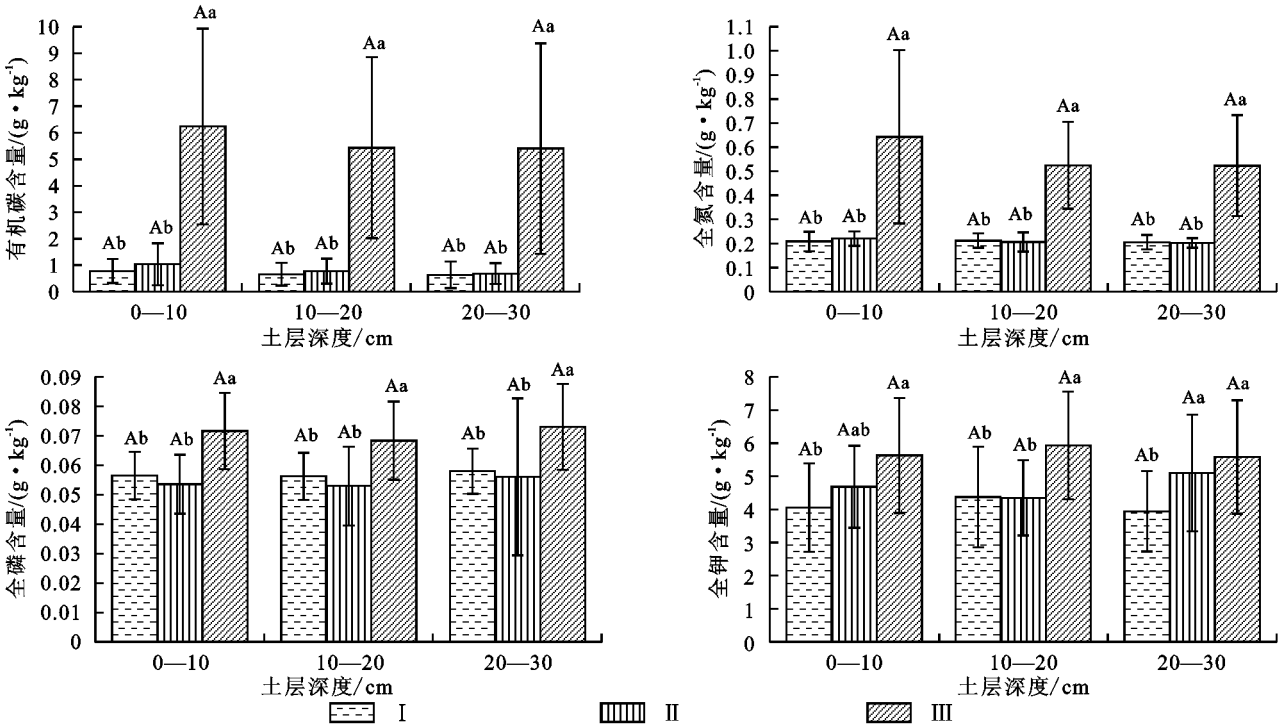
的有机碳含量随深度的增加而减少,10—20 cm 全钾含量最高,20—30 cm 最低,全氮含量无明显差异; II 的有机碳和全氮含量均随着深度的增加而减少,全钾含量随深度的增加先减少后增加; III 的全钾含量变化趋势与 I 保持基本一致,有机碳和全氮含量变化趋势与 II 保持基本一致。

从图 2 可以看出,从集水坡面至沟道出口,不同植被盖度崩岗土壤有机碳和全氮含量总体上呈增加趋势,全钾含量在崩岗上游区(集水坡面、崩壁顶部及中部)呈减少趋势,在崩壁底部、崩积体及沟道出口等崩岗下游区呈增加趋势,全磷含量上无明显差异。同一植被盖度下土壤养分含量在不同部位的分布规律存在差异:从集水坡面到沟道出口, I 的有机碳和全氮含量表现出减少→增加→减少的趋势,崩壁中部全钾

含量最高,沟道出口最低;Ⅱ内全磷含量呈先减少后增加的趋势,全钾含量在崩积体下部最高,在崩壁中部最低,有机碳和全氮含量的变化趋势与Ⅰ基本一致;Ⅲ内有机碳、全氮和全磷含量呈减少→增加→减少的趋势,全钾含量在崩积体上部最高,在沟道出口最低。

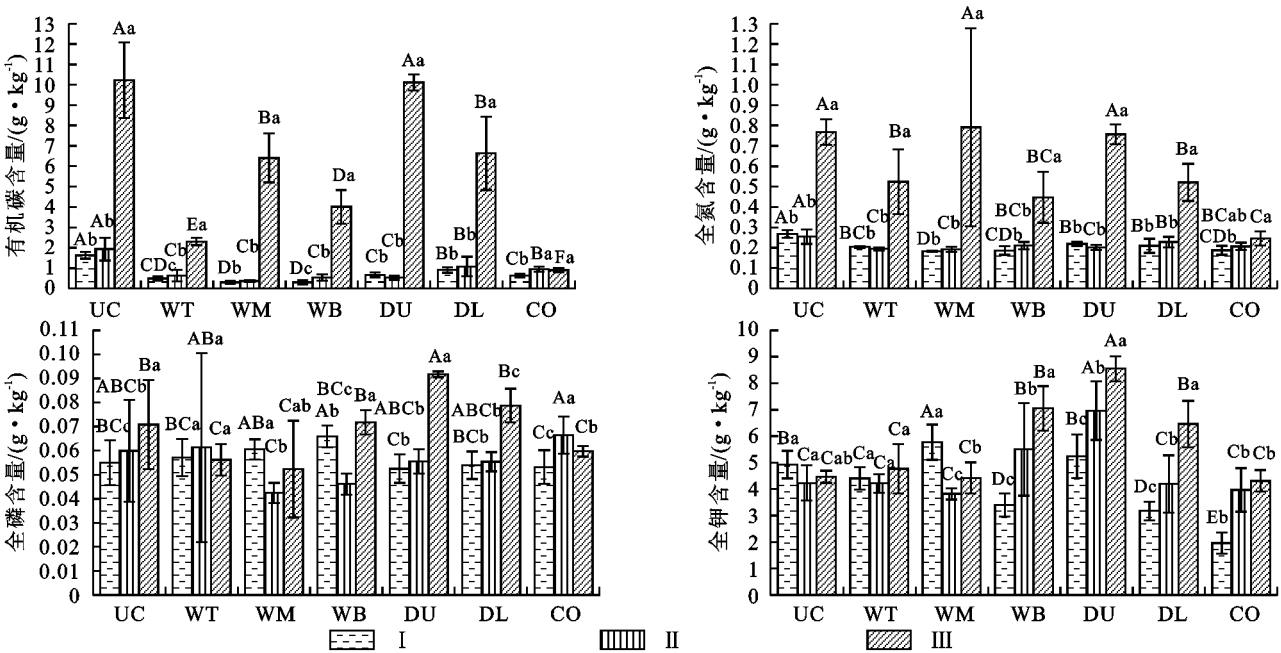
随着植被盖度的升高,崩岗土壤有机碳、全氮和全

钾含量逐渐增加,全磷含量先减少后增加(表 3),从Ⅰ到Ⅱ,土壤有机碳、全氮和全钾含量分别增加了 20.29%, 5.00%和 14.29%,全磷含量略有减少;从Ⅱ到Ⅲ,有机碳和全氮含量分别增加了 5.85 倍和 1.71 倍,全磷和全钾含量分别增加了 32.08%和 21.19%。总体上看,土壤养分含量变化幅度顺序为有机碳>全氮>全钾>全磷。



注:图中不同大写字母表示同一植被盖度不同土层间差异显著;不同小写字母表示同一土层不同植被盖度间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同深度土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量



注:UC为集水坡面;WT为崩壁顶部;WM为崩壁中部;WB为崩壁底部;DU为崩积体上部;DL为崩积体下部;CO为沟道出口。下同。

图 2 不同部位土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量

2.2 不同植被盖度崩岗土壤化学计量比变化

从图 3 可以看出,随着土层深度的增加,3 处不

同植被盖度崩岗土壤 C/N、C/P、C/K 和 N/P 逐渐增加,N/K 先降低后增加,P/K 无明显差异。同一植被

盖度下土壤养分化学计量特征在不同深度的分布规律类似, I 的 C/N、C/P 和 C/K 均随深度的增加而减少, N/P 先增加后减少, N/K 无明显差异; II 的 N/P 和 N/K 随着深度的增加而略有减少, C/N、C/P 和 C/K 的变化趋势与 I 基本一致; III 的 C/P 和 N/P 随着深度的增加而减少, C/K 和 N/K 先减少后增加, C/N 基本保持不变。

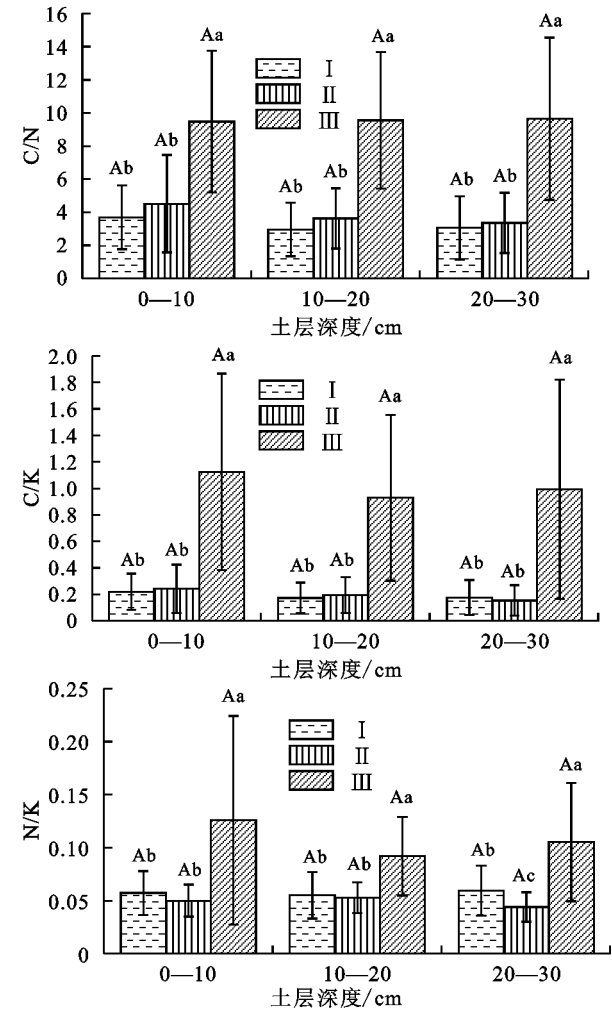


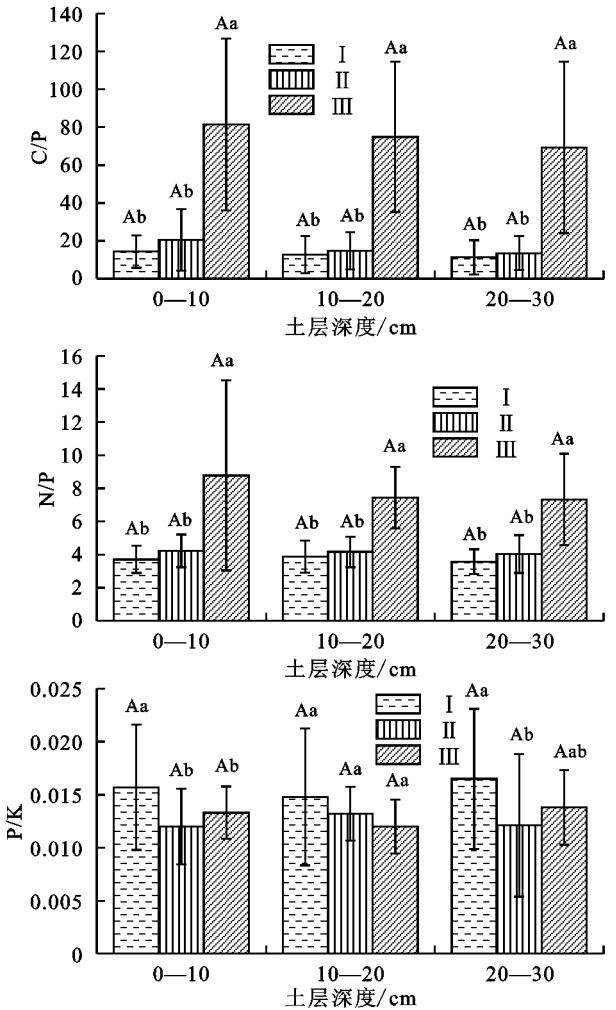
图 3 不同深度土壤有机碳、全氮、全磷和全钾的化学计量特征

从图 4 可以看出,从集水坡面至沟道出口,3 处不同植被盖度崩岗土壤 C/N、C/P 和 N/P 大体上呈增加趋势, C/K、N/K 和 P/K 在沟道出口呈减少趋势, 在其余部位基本呈增加趋势。同一植被盖度下不同部位土壤养分化学计量特征分异明显, 从集水坡面到沟道出口, I 的 C/N、C/P、N/P 呈减少→增加→减少的趋势, C/K 和 N/K 先降低后增加, 在沟道出口 P/K 最高, 崩积体上部最低; II 的 C/P、N/P 和 N/K 呈减少→增加→减少→增加→减少的变化趋势, C/K 呈减少→增加→减少的变化趋势, C/N 和 P/K 的变化趋势与 I 基本一致; III 的 C/N 和 C/K 呈减少→增加→减少→增加→减少的变化趋势, P/K 在集水坡面最高, 崩壁底部最低, C/P、N/P 和 N/K 的变化趋势与 II 保持基本一致。

表 3 不同类型土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量

崩岗类型	有机碳	全氮	全磷	全钾
I	0.69±0.46b	0.20±0.03b	0.06±0.01a	4.13±1.35c
II	0.83±0.59b	0.21±0.03b	0.05±0.02a	4.72±1.42b
III	5.69±3.66a	0.57±0.27a	0.07±0.02a	5.72±1.67a

注:表中同列不同字母表示不同植被盖度差异显著(P<0.05)。下同。



随着植被盖度的升高,崩岗土壤 C/N、C/P、C/K 和 N/P 逐渐增加, N/K 表现为 III>I>II, 磷钾比无明显差异(表 4)。从 I 到 II, C/N、C/P、C/K 和 N/P 分别增加了 18.52%, 26.77%, 5.26% 和 10.99%, N/K 减少了 16.67%; 从 II 到 III, C/N、C/P、C/K、N/P 和 N/K 分别增加了 1.49, 3.67, 4.1, 0.91, 1.2 倍。总体而言, 土壤化学计量特征变化幅度的顺序为 C/P>C/K>C/N>N/K>N/P>P/K。

2.3 化学计量特征与土壤理化性质的相关性

从表 5 可以看出, 对不同植被盖度崩岗土壤养分化学计量特征与理化性质逐步回归分析得知, 有机碳、全氮、全磷、全钾、pH、粉粒含量、容重及含水量均对 C/N 有显著影响, C/P 与有机碳和全磷含量密切相关, C/K 受有机碳、全氮、全磷、全钾和粉粒含量的显著影响, N/P

磷和全钾含量的影响,P/K 主要受全磷和全钾影响。

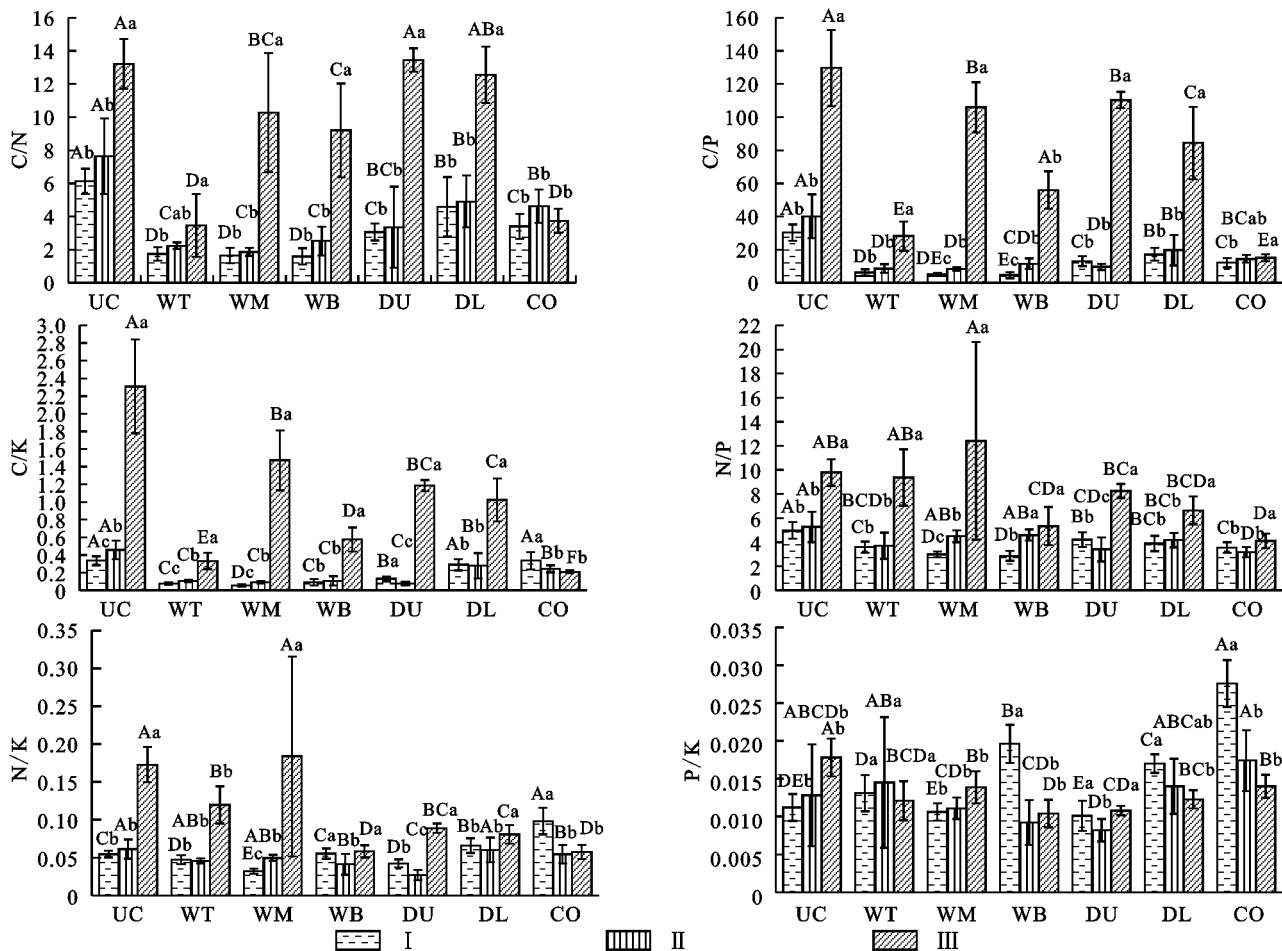


表 4 不同植被盖度崩岗土壤有机碳、全氮、全磷和全钾化学计量特征

崩岗类型	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	P/K
I	3.24±1.81b	12.70±9.09c	0.19±0.13b	3.73±0.85b	0.06±0.02b	0.02±0.00a
II	3.84±2.29b	16.10±12.27b	0.20±0.15b	4.14±1.00b	0.05±0.01b	0.01±0.00a
III	9.55±4.37a	75.16±43.12a	1.02±0.73a	7.90±3.86a	0.11±0.07a	0.01±0.00a

表 5 崩岗区土壤化学计量特征与理化性质逐步回归方程

项目	回归方程	决定系数 R^2
C/N	$C/N = 4.608C - 26.243N - 20.437P - 0.103K - 0.941X_1 + 0.023X_2 - 0.769X_3 - 0.051X_4 + 12.793$	0.983**
C/P	$C/P = 17.773C - 237.204P + 13.781$	0.982**
C/K	$C/K = 0.246C - 0.768N - 2.699P - 0.039K - 0.002X_2 + 0.553$	0.941**
N/P	$N/P = 18.089N - 64.752P + 3.651$	0.977**
N/K	$N/K = 0.189N - 0.388P - 0.013K + 0.111$	0.896**
P/K	$P/K = 0.138P - 0.004K + 0.014$	0.919**

注: X1 为 pH 值; X2 为粉粒含量; X3 为土壤容重; X4 为含水量; * * 表示在 $P < 0.01$ 水平上差异显著。

3 讨论

3.1 崩岗侵蚀区土壤养分含量特征

在径流和重力交互作用下,坡面土体崩塌坍塌形成崩壁,坠落的土体在崩壁底部形成崩积体,崩积体在降雨径流的冲刷下部分土体在沟道内沉积,或搬运至沟道出口以及下游农田发育成洪积扇。崩岗形成后,陡崖耸立,沟壑纵横,土体质地疏松且贫瘠、酸性强,植被稀疏、造林(草)难以存活,生态环境非常脆

弱^[3]。本研究表明,在自然恢复过程中,随着植被盖度的逐渐升高(植被逐渐侵入、存活及蔓延生长),崩岗系统内土壤有机碳、全氮和全钾含量逐渐增加,而全磷含量无明显差异(表3),但土壤养分含量总体上仍处于极度低下水平,与塔里木沙漠腹地^[16]、青藏高原退化草甸^[17]及鄱阳湖湿地松沙地^[18]等生态退化地区土壤养分含量大致相当,亦侧面证实了崩岗是我国南方红壤侵蚀区最为严重的侵蚀类型与生态系统退化的最高表

现形式^[2]。土壤钾素主要来自成土母质风化,而地表植被枯落物矿化分解是退化生态系统土壤有机碳与全氮的主要来源^[19-20],本文研究区域植被类型以岗松—芒萁矮灌丛为主,虽然群落结构较为单一,但是芒萁作为红壤侵蚀区自然恢复过程中较早侵入物种,具有耐酸耐瘠、株丛密集、叶面积大、生物量大且分布广泛的特点,在为地表凋落物覆盖提供必要物质基础的同时,较高程度的植物活体—凋落物覆盖也为表层养分的保育、固持提供有效屏障。而相比于土壤有机碳、全氮和全钾,全磷含量最低(0.06 g/kg),远低于我国土壤全磷的平均水平(0.65 g/kg)^[20],这可能与研究区域内受到强烈的土壤侵蚀(崩岗)导致磷素淋溶流失严重及植物的吸收利用有关,并与低纬度地区土壤全磷含量普遍偏低的地理分布格局基本吻合^[21]。不同侵蚀部位土壤养分含量差异较大,土层深度对土壤养分含量无明显差异(图1和图2),其原因可能与崩岗侵蚀对土壤结构具有严重的破坏作用,而自然恢复对土壤性质的改善作用相对有限有关。

3.2 崩岗土壤养分化学计量特征空间分异

土壤养分生态化学计量特征反映土壤有机碳与养分之间的平衡与耦合机制,除了受成土过程中土壤环境影响以外,还与气候条件、地形特征、植被状况以及人为干扰等因素密切相关^[22]。本研究中,土壤C/N、C/P和N/P分别3.24~9.55(5.54),12.70~75.76(34.65)和3.73~7.90(5.26),高植被盖度崩岗土壤C/N、C/P和N/P显著高于无植被和植被覆盖崩岗,这与前人得出的结论存在一定差异。朱秋莲等^[19]对黄土高原丘陵沟壑区的研究可知,C/N、C/P和N/P分别为5.65~12.57(9.44),3.62~17.32(8.15),0.43~1.38(0.86),草原、森林草原及森林土壤C/P和N/P差异显著,C/K无明显差异;俞月凤等^[23]对西南喀斯特峰丛的研究发现,任豆、香椿人工林土壤碳氮磷化学计量特征变化范围与文献^[19]基本一致,八角枫、伊桐次生林和菜豆树、侧柏原生林土壤C/P和N/P明显增加,不同森林类型土壤C/N无显著差异。分析其原因可能与崩岗系统土壤性质有关,即有机碳、全氮和全磷含量均处于极低水平,表现出“协同缺乏”特征,并可能激发级联效应(Cascade effect),引起土壤养分化学计量特征交互差异^[22]。不同土层深度间土壤养分化学计量比的差异性均不显著(图3),其原因可能是由于崩岗侵蚀导致土体结构遭受破坏,而在长期的植被恢复过程中这种“侵蚀效应”仍然存在。刘希林等^[4]对广东省莲塘岗崩岗2011—2013年侵蚀过程的研究发现,崩岗侵蚀主要发生在崩壁、崩积体及两者侧向区域;本研究中崩岗系统土壤养分生态化学计量特征基本表现为集水坡面到崩壁减少

→崩壁到崩积体增加→崩积体到沟道出口减少的变化规律(图4),这表明不同部位土壤生态化学比分布特征与崩岗侵蚀过程保持相对一致。崩岗的发生无论对土层结构还是地表形态都具有明显的“侵蚀”效应,加之植被恢复过程中,土壤养分地球化学循环过程(输入、输出等)的差异,因而崩岗土壤养分化学计量特征具有明显空间分异特征。

3.3 崩岗土壤化学计量特征生态指示意义

作为退化生态系统恢复的重要环节,土壤养分的改善决定土壤—植被系统物质循环过程中的平衡关系,并最终影响生态恢复的效果及其稳定性。Val-lauri等^[24]对阿尔卑斯山西南部山地人工植林120年植被恢复的研究发现,随着植被盖度的升高,植物群落组成无明显变化,林下土壤仅有物理性修复,但其结构与肥力状况仍然较差;吴彦等^[25]对亚高山针叶林物种多样性与土壤理化性质的关系研究表明,土壤容重、含水量随着物种多样性的增加得到明显改善,枯落物储量、有机质含量及其磷、镁、钙等矿质元素含量也随之增加,氧化钾含量随之减少,而氮与阳离子交换量含量无明显差异。本研究发现,随着植被状况逐渐得到改善,崩岗系统表土冲刷、崩壁坍塌等强度侵蚀现象基本得到遏制,然而土壤退化特征依然较为明显,具体表现在:一是砂粒含量较高,黏粒部分缺乏严重,机械组成表现出明显粗骨化特征,土壤容重偏高,而自然含水量极其低下,物理结构尚未得到根本改善;二是土壤酸化严重,养分含量整体处于较低状态,植被恢复能显著提高土壤有机碳、全氮及全钾含量,对全磷含量无明显变化,有机碳、全氮和全磷表现出不同程度的限制。因此,崩岗系统土壤性质的改善远滞后于植被覆盖,土壤恢复需要更长恢复时段的维持。关于崩岗系统内植被、土壤及微生物等不同组分间养分循环与能量平衡的结构、过程与功能及其交互效应的认识尚较为模糊,植物活体—凋落物—土壤(包括微生物及其活性酶)生态化学计量特征耦合关系有待深入研究;同时,在崩岗治理与生态恢复过程中,应充分考虑各土壤性质在特定的地形部位、植被类型等自然地理环境下的交互综合效应,“因地制宜”制定相应生态恢复措施,为崩岗分布区生态恢复与重建创造立地条件。

4 结论

红壤侵蚀区典型崩岗土壤养分含量及其化学计量特征具有明显空间分异特征,具体表现在随着植被盖度逐渐升高,崩岗土壤有机碳、全氮和全钾含量以及C/N、C/P、C/K、N/P和N/K均逐渐增加;沿集水坡面至沟道出口,各部位土壤有机碳、全氮、全钾含量以及C/N、C/P、C/K、N/P和N/K基本表现出先减

少再增加最后降低的波动变化趋势,而土层深度对养分含量及化学计量特征空间分布的影响较小;不同植被盖度崩岗各深度和部位间土壤磷含量和 P/K 无显著差异。另外,对土壤化学计量特征与土壤理化性质相关分析表明,土壤各养分计量比与土壤养分含量、粉粒含量、pH、容重及含水量关系密切。总体而言,崩岗系统土壤性质表现退化特征,颗粒组成以粗砂组为主,土壤容重较高,而含水量极低;土壤酸化严重,养分含量普遍较低,其中有机碳、全氮和全磷表现出不同程度的限制。

参考文献:

- [1] 曾昭璇,黄少敏.中国自然地理:地貌[M].北京:科学出版社,1980:32-36.
- [2] 孙波.红壤退化阻控与生态修复[M].北京:科学出版社,2011:309-310.
- [3] 梁音,宁堆虎,潘贤章,等.南方红壤区崩岗侵蚀的特点与治理[J].中国水土保持,2009(1):31-34.
- [4] 刘希林,张大林.基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J].农业工程学报,2015,31(4):204-211.
- [5] 邓羽松,丁树文,蔡崇法,等.鄂东南崩岗洪积扇土壤物理性质空间分异特征[J].中国农业科学,2014,47(24):4850-4857.
- [6] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响[J].土壤学报,2014,51(5):974-981.
- [7] Elser J J,Bracken M E S,Cleland E E,et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. Ecology Letters,2007,10(12):1135-1142.
- [8] Sardans J,Rivas-Ubach A,Peñuelas J. The elemental stoichiometry of aquatic and terrestrial ecosystems and its relationships with organismic lifestyle and ecosystem structure and function: A review and perspectives[J]. Biogeochemistry,2012,111(1/3):1-39.
- [9] Heuck C,Weig A,Spohn M. Soil microbial biomass C : N : P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus[J]. Soil Biology and Biochemistry,2015,85(6):119-129.
- [10] Sistla S A,Schimel J P. Stoichiometric flexibility as a regulator of carbon and nutrient cycling in terrestrial ecosystems under change[J]. New Phytologist,2012,196(1):68-78.
- [11] Fan H B,Wu J P,Liu W F,et al. Linkages of plant and soil C : N : P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations[J]. Plant and Soil,2015,392(1/2):127-138.
- [12] Wang W Q,Sardans J,Zeng C S,et al. Responses of soil nutrient concentrations and stoichiometry to different human land uses in subtropical tidal wetland[J]. Geoderma,2014,232/234:459-470.
- [13] Van D J,Robroek B,Kardel I,et al. Combined effects of nitrogen enrichment, sulphur pollution and climate change on fen meadow vegetation N : P stoichiometry and biomass[J]. Biogeochemistry,2012,111(1/3):139-150.
- [14] Jiao F,Wen Z M,An S S,et al. Successional changes in soil stoichiometry after land abandonment in Loess Plateau, China[J]. Ecological Engineering,2013,58(10):249-254.
- [15] 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[J].自然资源学报,2013,28(9):1498-1506.
- [16] 李从娟,雷加强,徐新文,等.塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 CNP 的化学计量特征[J].生态学报,2013,33(18):5760-5767.
- [17] 罗亚勇,张宇,张静辉,等.不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征[J].生态学杂志,2012,31(2):254-260.
- [18] 胡启武,聂兰琴,郑艳明,等.沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤 C、N、P 化学计量特征影响[J].生态学报,2014,34(9):2246-2255.
- [19] 朱秋莲,刑肖毅,张宏,等.黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2013,33(15):4674-4682.
- [20] Tian H Q,Chen G S,Zhang C,et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils; A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry,2010,98(3):139-151.
- [21] Houlton B Z,Wang Y P,Vitousek P M,et al. A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere[J]. Nature,2008,454(7202):327-330.
- [22] Sardans J,Rivas-Ubach A,Peñuelas J. The C : N : P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: A review and perspectives[J]. Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics,2012,14(1):33-47.
- [23] 俞月凤,彭晚霞,宋同清,等.喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J].应用生态学报,2014,25(4):947-954.
- [24] Vallauri D R,Aronson J,Barbero M. An analysis of forest restoration 120 years after reforestation on badlands in the Southwestern Alps[J]. Restoration Ecology,2002,10(1):16-26.
- [25] 吴彦,刘庆,乔永康,等.亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响[J].植物生态学报,2001,25(6):648-655.