

不同活动状况崩岗崩壁土壤及芒萁的生态恢复效应

梁美霞^{1,2,3}, 陈志彪^{2,3}, 陈志强^{2,3}, 刘雅慧¹, 姜超^{2,3}, 区晓琳^{2,3}

(1.泉州师范学院 资源与环境科学学院, 福建 泉州 362000; 2.福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007; 3.福建师范大学 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007)

摘要:为揭示在植被自然恢复过程中崩岗系统的生态恢复效应以及植物对于恶劣环境的适应机制,选取福建省长汀县濯田镇黄泥坑崩岗群的 3 种不同活动状况崩岗样地,应用生态化学计量学方法分析了其崩壁部位土壤养分和芒萁植物养分含量的变化特征及相关性。结果表明:同一活动状况崩岗崩壁不同部位土壤养分普遍达到显著性差异($p < 0.05$);不同活动状况崩岗崩壁土壤肥力有所提升,均在崩岗Ⅲ(稳定型)达最大值,但土壤有机碳、全氮、全磷含量仅有 3.88、0.44、0.06 g/kg,远远低于全国土壤养分平均含量。崩壁芒萁三大营养器官的 C、N、P 普遍存在显著差异($p < 0.05$),但其体内养分含量与土壤表层中养分含量的相关性不大。可见,随着地表植被覆盖提高,崩岗的活动状况逐渐稳定,崩壁土壤养分含量有所增加,仍处于极度低下水平。芒萁植物受土壤养分的影响较小,能通过调节自身的养分适应贫瘠的恶劣生境,可作为改善南方红壤侵蚀区崩岗系统土壤肥力的重要措施。

关键词:崩岗;生态恢复;红壤侵蚀区;芒萁

中图分类号:S154.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0138-06

Ecological Restoration Effects of Soil and *Dicranopteris pedata* Under Different Activities in Benggang

LIANG Meixia^{1,2,3}, CHEN Zhibiao^{2,3}, CHEN Zhiqiang^{2,3}, LIU Yahui¹, JIANG Chao^{2,3}, OU Xiaolin^{2,3}

(1.School of Resources & Environmental Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000, China; 2.School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3.Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-Geographical Processes of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The purpose of this study is to reveal the ecological restoration effect of Benggang in the process of vegetation natural restoration and the adaptation mechanism of plants to the harsh environment. Taking 3 Benggangs in Huangnikeng, Zhuotian Town, Changting County of Fujian Province representing 3 different active situations (active, semi-stable, and stable) as the study cases, we analyzed the ecological stoichiometric characteristics and correlations of soil and plant nutrient content under the process of natural vegetation restoration by using ecological stoichiometric methods. The results showed that the soil nutrients in different parts of collapse wall were significantly different ($p < 0.05$); the stable Benggang's soil organic C, total N and total P contents were the highest in the 3 Benggangs, but they were only up to 3.88 g/kg, 0.44 g/kg, 0.06 g/kg, which were far below the national level; the contents of C, N, P in *Dicranopteris pedata* were significantly different ($p < 0.05$); however, the correlations between C, N and P contents in plants and those in soil surface were not very relevant ($p > 0.05$). It can be concluded that with the increase of vegetation coverage, the activity of Benggang gradually stabilized and the soil fertility could be improved but only be at the low level. Additionally, the *Dicranopteris pedata* nutrient was not mainly determined by soil nutrient, but mainly affected by the characteristics of the plant itself, which showed the adaptability of the plant to the extremely degraded ecosystem environment and could be used as an important measure to improve soil fertility of Benggang system in red soil erosion area of southern China.

Keywords: Benggang; ecological restoration; red soil erosion area; *Dicranopteris pedata*

收稿日期:2020-08-19

修回日期:2020-12-08

资助项目:国家重点研发计划(2016YFC0502905);福建省科技厅高校产学研合作项目(2020N5007);福建省科技厅自然科学基金面上项目(2020J01780);泉州市科技计划项目(2018Z025)

第一作者:梁美霞(1981—),女,福建南安人,博士研究生,副教授,主要从事水土保持、生态恢复研究。E-mail:lmx2003440@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、自然资源与环境研究。E-mail:chenzhib408@vip.163.com

崩岗侵蚀是我国南方红壤地区危害最大、最为典型的土壤侵蚀方式,其形成的崩岗地貌被形象地称为南方红壤区的“生态溃疡”^[1]。早在 1960 年,曾昭璇等^[2]首次将“崩岗”作为中国特色的地貌学名称引入地貌学研究中。早期的崩岗研究多涉及崩岗基本概念、侵蚀影响因素、侵蚀机理方面^[3-4];近些年来,随着崩岗被列为南方红壤区的重点治理项目,相关研究越来越关注崩岗系统不同部位理化性状的试验研究以及崩岗治理的效益研究等^[5-7]。经过多年对崩岗的试验和治理研究,已探索出了多种有效的治理措施,并取得了良好的生态恢复效应。目前对于南方红壤区崩岗治理的效益研究多采用选取评价因子、建立评价指标体系的方法开展不同治理模式下或不同侵蚀强度下崩岗治理的综合效益定性或定量评价^[8-11]。而对于植被自然恢复过程中不同活动状态下崩岗系统的生态恢复效应研究则鲜见报道。

福建省是我国南方红壤区崩岗侵蚀最严重的区域之一,尤以长汀县、安溪县最为严重。本研究以福建省长汀县濯田镇黄泥坑崩岗群中 3 种不同活动状况崩岗类型为研究对象,开展对不同活动状况崩岗在植被自然恢复过程中,崩壁区土壤养分和植物养分含量的变化及二者之间的关系,旨在研究崩岗侵蚀区治理的生态恢复效应,揭示崩岗区土壤养分的循环和限制状况以及植物的生态指示作用,以期对极度退化生态系统崩岗的生态修复和重建提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区选取了福建省长汀县濯田镇西南部的黄

泥坑崩岗群(116°16'52"E,25°31'49"N)。该区地质结构复杂,境内陡坡、山地和丘陵多,气候温热湿润,年均气温 18.5℃,年均降雨量 1 710 mm,为典型的中亚热带季风性气候。土壤为粗晶花岗岩岩性风化发育而成的侵蚀性红壤,其抗侵蚀性能较差,保水保肥的能力也较弱。加上当地居民的活动干扰,大量植被遭受破坏,使得山体裸露,强降雨下,山体表层土被雨水冲刷侵蚀下切至砂土层,切沟发育。由于砂土土体疏松、抗蚀性差,在跌水与重力复合交替侵蚀作用下崩塌形成崩壁,冲刷下来的泥沙堆积在崩壁底部而形成崩积体,崩积体表层土体随径流往下游搬运,形成了独特的崩岗地貌。该区共分布有崩岗 34 条,侵蚀面积约 37 500 m²,主沟长度达 200.34 m,宽度为 4.87~12.10 m。

本研究依据陈志彪等^[12]对崩岗活动状况类型的划分,遵循典型性和代表性原则,于 2014 年 7 月选取黄泥坑崩岗群中同一集水区域内的 3 条不同活动状况典型崩岗样地,植被和土壤环境特征见表 1,3 处崩壁侵蚀皆接近山体分水岭,均属于崩岗发育的后期,以坡面侵蚀沟汇水特征的差异为划分依据,崩岗 I 崩壁受跌水作用强烈,处于活动状态,崩壁高度达 9.43 m,宽度 3.55~5.09 m,其上遍布白色粗粒的石英颗粒,表层土呈赤褐色;崩岗 II 崩壁受间歇性跌水作用,处于半稳定状态,崩壁高度达 11.80 m,宽度 4.62~6.02 m,表层土呈深红色,质地疏松;崩岗 III 崩壁不受跌水作用,处于稳定状态,崩壁高度达 6.30 m,宽度 2.70~3.42 m,其上有部分土体露出;3 处典型崩岗崩壁部位均分布有芒萁植物种。

表 1 3 种不同活动状况崩岗的基本情况

崩岗类型	崩岗编号	植被状况	土壤环境特征
活动型	I	仅零星分布芒萁,植被覆盖度仅 2%	裸露表层土呈棕褐色,白色石英粗颗粒到处可见
半稳定型	II	马尾松(<i>Pinus massoniana</i>)幼树、五节芒(<i>Miscanthus floridulus</i>)、芒萁稀疏分布,植被覆盖度 20%	地表裸露层呈赤褐色,结构疏松
稳定型	III	以芒萁为主,五节芒、岗松(<i>Baeckea frutescens</i>)等分散分布,植被覆盖度 95%	基本上无裸露表土,地表覆盖枯枝落叶

1.2 样品采集与分析

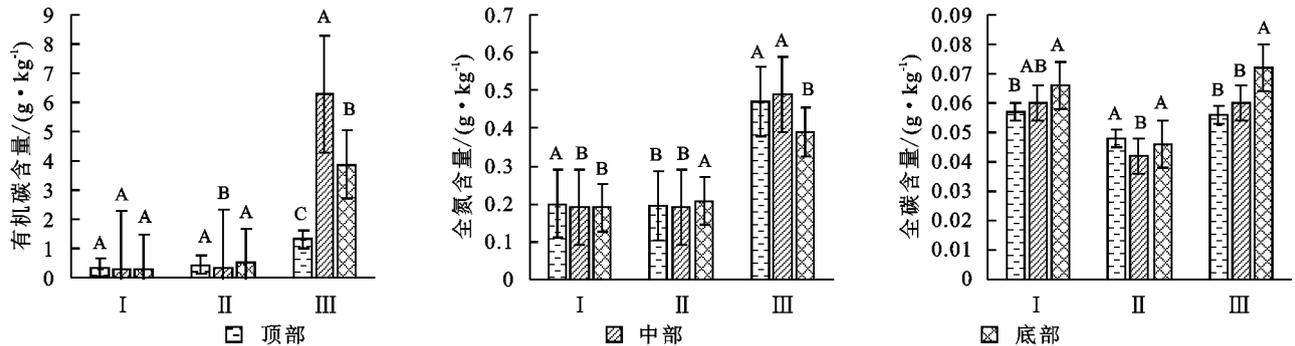
于每条崩岗的崩壁区部位按顶部、中部和底部依次设置采样地,顶部为集水坡面与崩壁交界区域,底部则为崩壁与崩积体的交界地带。每一处样地采用多点混合重复取样 3 次,分别采集芒萁植物的叶、茎和根以及 0—30 cm 土壤样品,并装入标记自封袋内。

实验室内,将芒萁植物的叶、茎和根 85℃ 烘干到恒重,然后研磨过 60 目筛用于全 C、全 N 和全 P 测

定;植物全 C 含量采用重铬酸钾容量-外加加热法测定,全 N 含量采用凯氏定氮法测定,全 P 含量采用钼锑抗比色法测定^[13]。不同深度的土壤样品自然风干后研磨,过 0.149 mm 筛的土样用于有机 C、全 N、全 P 含量的测定。土壤有机 C、全 N 采用德国 Elemtar vario max 碳氮元素分析仪测定;全 P 用硫酸-高氯酸消煮提取待测液后,采用荷兰 Skalar san⁺⁺ 连续流动分析仪测定^[14]。

1.3 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 2019 软件对试验所得的原始数据进行整理及图形的绘制,采用 SPSS 22 进行数据分析。首先,分析样本数据平均含量的表示法,若服从正态分布用算术平均值表示;服从对数正态分布用几何平均值表示;若两者都不服从用中位数表示。然后,进行样本之间的显著性差异检验。若符合正态分布,且满足方差齐次检验,用 One-Way ANOVA 单因素方差及 LSD 多重比较显著性检验。若不符合正态分布或未能通过方差齐次检验,使用非参数分析过程 Kruskal Wallis 秩和检验方法。各指标之间的



注: I 中有机碳含量和全磷含量、III 中全磷含量用算数平均数±标准误表示; II 中有机碳含量和全氮含量用几何均值±标准误表示; I 和 III 中全氮含量、II 中全磷含量、III 中有机氮含量用中位数±标准误表示。不同大写字母表示在同一活动状况不同部位间差异显著($p < 0.05$)。

图 1 同一活动状况崩壁不同部位土壤养分含量

2.1.2 不同活动状况下崩岗崩壁土壤养分含量变化由表 2 可知,从样本数据检验的结果来看,随着植被覆盖度的提高,崩岗活动状况逐渐稳定,3 种不同活动状况的崩岗区中,崩壁土壤中有有机碳、全氮的含量逐渐增加,表现为 $I < II < III$,全磷的含量有所波动,表现为 $II < I < III$ 。从总体上说,崩岗土壤养分含量变化幅度的大小为全磷 < 全氮 < 有机碳。通过 SPSS 的单因素方差分析,结果显示,土壤有机碳含量在崩岗 I, II, III 中存在显著差异($p < 0.05$),崩岗 III 的土壤全氮含量与崩岗 I 和 II 存在显著差异($p < 0.05$),崩岗 II 全磷含量与崩岗 I 和 III 存在显著差异($p < 0.05$)。

表 2 3 种不同活动状况崩岗土壤养分含量

编号	样本数/个	有机碳	全氮	全磷
I	27	0.314±0.016C	0.190±0.003B	0.061±0.001A
II	27	0.429±0.023B	0.198±0.003B	0.046±0.005B
III	27	3.880±0.421A	0.440±0.060A	0.063±0.002A

注: I 有机碳含量和全磷含量、III 全磷含量用算数平均数±标准误表示; II 有机碳含量和全氮含量用几何均值±标准误表示; I 和 III 全氮含量、II 全磷含量、III 有机氮含量用中位数±标准误表示;不同大写字母表示同一土壤养分含量在不同活动状况间显著差异($p < 0.05$)。

相关性采用 Pearson 相关系数法。

2 结果与分析

2.1 崩岗崩壁区土壤养分含量变化

2.1.1 同一活动状况下崩壁不同部位土壤养分含量变化 同一活动状况下,崩壁不同部位 0—30 cm 深度土壤中所含的养分除了崩岗 I 土壤有机碳含量以外,其他部位养分含量均达到显著性差异($p < 0.05$)。如图 1 所示,有机碳和全氮含量均在 I 区顶部、II 区底部、III 区中部含量最高,而全磷含量则在 I 区底部、II 区顶部、III 区底部含量最高。

2.2 崩岗崩壁区芒萁植物养分含量变化

2.2.1 同一活动状况下崩岗崩壁区芒萁植物不同器官养分含量变化 由图 2 可知,从样本数据检验的结果来看,同一活动状况的崩壁区芒萁植物不同器官中所含的养分有所差异。崩岗 I 和 II 中芒萁 C 含量表现为根 < 叶 < 茎,崩岗 III 中则为根 < 茎 < 叶;芒萁 N 和 P 含量均表现为茎 < 根 < 叶。根据方差分析可知,除了崩岗 I 中的芒萁 C 和 N 含量、崩岗 II 中的芒萁 C 含量以外,同一活动状况下芒萁其他植物养分在三大器官间普遍存在显著差异($p < 0.05$)。

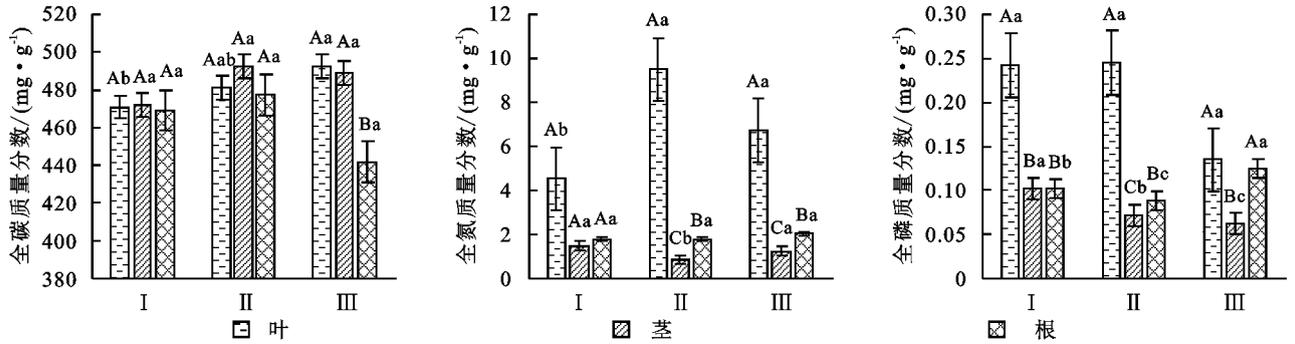
2.2.2 不同活动状况下崩岗崩壁区芒萁植物养分含量变化 从图 2 可以看出,随着崩岗活动状况的逐渐稳定,植被覆盖度的提高,崩壁区芒萁叶中全 C 的含量表现为 $I < II < III$,在崩岗 III 中含量达最大值,且呈现出崩岗 III, II 与崩岗 I 间存在显著差异($p < 0.05$),芒萁茎和根在 3 种不同活动状况崩岗间均无显著差异;芒萁叶、茎中全 N 的含量均表现出崩岗 III 与崩岗 II, I 间存在显著差异($p < 0.05$),根则无显著差异;芒萁茎和根中的全 P 的含量也均呈现出崩岗 I, II, III 间存在显著差异($p < 0.05$)。

2.3 芒萁植物与崩壁表层土壤养分的相关性

由表 3 可知,除了 I 茎的 N 质量分数与表层

土壤的有机氮呈正相关($p < 0.05$), II 根的 N 质量分数和表层土壤呈负相关以外,其余的植物不同

器官养分含量与相应的表土养分含量相关性不显著($p < 0.05$)。



注:植物全碳含量用算术平均数±标准误表示,全氮和全磷含量用中位数±标准误表示;不同大写字母表示植物体内养分在同一活动状况下不同器官之间存在的差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示植物体内养分在同一器官不同活动状况下存在的差异显著($p < 0.05$)。

图 2 不同活动状况崩岗芒萁体内养分的含量

表 3 不同活动状况崩岗中芒萁植物各器官与 0-10 cm 土壤 C,N,P 相关性

类型	植物器官		有机碳	全氮	全磷
I	叶	C	0.558	-0.258	-0.379
		N	0.439	-0.123	-0.249
		P	-0.574	0.277	0.397
	茎	C	0.996	-0.970	-0.993
		N	0.998*	-0.963	-0.989
		P			
II	根	C	-0.578	0.282	0.402
		N	-0.643	0.359	0.475
		P	-0.574	0.277	0.397
	叶	C	-0.799	-0.219	-0.342
		N	-0.424	-0.651	-0.742
		P	-0.762	-0.277	-0.397
III	茎	C	0.135	-0.959	-0.987
		N	0.207	0.807	0.875
		P	0.995	-0.319	-0.196
	根	C	-0.254	-0.777	-0.474
		N	0.462	-0.998*	-0.943
		P	0.539	0.546	0.181
III	叶	C	-0.769	-0.116	-0.909
		N	0.433	0.518	0.653
		P	0.990	-0.421	0.993
	茎	C	0.724	-0.973	0.519
		N	0.855	-0.902	0.690
		P	-0.923	0.181	-0.991
根	C	0.265	-0.952	0.005	
	N	0.028	0.822	0.288	
	P	0.992	-0.648	0.924	

注: * 表示 $p < 0.05$, I 芒萁茎中 P 的含量为常数,无法计算。

3 讨论

3.1 崩岗崩壁区土壤养分含量特征

崩岗侵蚀导致了土壤肥力急剧下降,生态环境恶化,本研究发现,崩岗的不同活动状况影响土壤养分

的高低,在植被自然恢复过程中,随着地表植被盖度的提高,崩岗活动状况逐渐趋于稳定,崩岗崩壁部位跌水作用依次减弱直至消失,水流对于地表的冲刷逐渐减缓,使得地表植物凋落物增多,其土壤中有机碳、全氮和全磷含量均在崩岗 III(稳定型)达最大值,崩岗 III 与崩岗 I、崩岗 II 普遍存在显著差异($p < 0.05$),可知随着崩岗稳定性的提高,土壤肥力也得到一定程度提高,但是 3 种不同活动状况崩岗系统崩壁部位土壤有机碳、全氮、全磷平均含量分别仅为 1.58, 0.33, 0.06 g/kg,即使是植被覆盖度最高、活动状态最稳定的崩岗 III 土壤有机碳、全氮、全磷含量也仅有 3.88, 0.44, 0.06 g/kg,远远低于全国土壤养分平均含量^[15](有机碳平均含量 11.12 g/kg,全氮平均含量 1.06 g/kg,全磷平均含量 0.65 g/kg),仅与塔里木沙漠腹地^[16]土壤养分含量大致相等,处于极度低下水平,这主要与崩岗土壤特性有关,呈现土壤有机碳、全氮和全磷表现出“协同缺乏”特征^[17],从而证实了崩岗是我国南方红壤侵蚀区最严重的退化生态系统类型,其土壤结构差,缺乏养分,肥力低下。

土壤中的有机碳和氮主要来源于土壤植物残体分解与合成所形成的有机质^[18],受到植物、水分、温度和土壤母质等因素的影响较大^[19]。崩岗在形成过程中受到水流冲刷和重力侵蚀的交替作用,原坡面土体崩塌坍塌形成崩壁,崩壁裸露,植物凋落物少,输送到崩壁中不同部位的有机质含量不同,导致同一活动状态下,崩壁不同部位土壤中所含有机碳和全氮含量普遍存在显著性差异($p < 0.05$)。而土壤中磷是一种沉积性元素,来源于岩石分化,土壤中全磷的含量极低,可能与研究区的气候条件、土壤侵蚀的强度和植物吸收利用有关,这与我国低纬度土壤全磷含量普遍较低的地理分布格局相一致^[20]。

3.2 崩岗崩壁部位芒萁植物养分含量特征

芒萁是一种广泛分布于我国亚热带地区的古老蕨类植物,具有喜阳、喜酸、耐贫瘠、耐旱的特点^[21],是红壤地区生态退化过程中最后退出,生态恢复过程中最早进入的草本植物之一^[22],不仅防止水土流失效果好,还能够提高土壤有机碳和氮素含量。本研究发现,崩岗系统崩壁部位的芒萁叶 C,N,P 含量分别为 481.54,6.63,0.20 mg/g。与全球或全国平均水平比,芒萁植物叶中 C 的平均含量高于全球平均水平(461.6 mg/g),表明芒萁植物合成有机物质的含量较高,而 N,P 的平均含量均远远低于我国植物叶片 N,P 的平均含量水平(19.09,1.56 mg/g)^[23],也低于中国东部南北样带的蕨类植物叶片的 N,P 平均含量(11.25,0.88 mg/g)^[24]。可能是由于退化生态系统的土壤环境中,原生矿物逐渐减少,土壤肥力下降,有机矿物形式的磷酸盐转化为闭蓄态和有机结合的形式,难被芒萁吸收利用^[25],植物体的生长需要维持较低的元素含量来提高其对土壤元素的利用效率。

同一种活动状况的崩岗,植物体三大营养器官分别执行不同的生理功能,根与土壤、微生物相互作用,吸收土壤中的无机盐和营养物质,茎是植物体营养物质向上向下运输的主要通道,叶片是植物进行光合作用的最重要场所,是植物体的同化器官,也是植物重要的养分储存器官^[17]。因而,导致芒萁三大营养器官的 C,N,P 普遍存在显著差异($p < 0.05$),叶的 C,N,P 质量分数均高于茎和根。

植物体内一般包括结构性、功能性和贮藏性 3 种物质。通常,C 是结构性物质,受环境影响较小,含量相对较稳定,而 N 和 P 是功能性物质,受环境影响较大,含量相对不稳定^[26]。不同活动状况下,随着崩岗稳定性的提高,植被覆盖度提高,芒萁叶中 C 的含量表现为 I < II < III,表明完全暴露于空气中的芒萁植物叶片光合作用强,其合成有机物质的含量逐步提高,而芒萁的根状茎和根受环境影响较小,芒萁茎和根的 C 含量相对稳定,未达到显著差异($p > 0.05$)。N 和 P 元素受到来自于土壤环境输入途径的深刻影响,因此,随着崩岗稳定性的升高,芒萁植物 N 和 P 含量普遍存在显著差异,可能与土壤养分库之间有关系,在退化生态系统中,芒萁生存环境恶劣,根茎对外界土壤环境所供给的养分吸收和利用的效率有所不同。

3.3 崩岗崩壁表层土壤养分与芒萁植物养分间的关联性及生态指示意义

植物与环境之间的相互作用方式受到植物本身以及环境中营养元素供应情况两面的影响^[27]。处在退化系统环境中的芒萁,其养分的吸收受到外界养分

供应条件的影响,在一定程度上能够反映出芒萁与土壤的关系以及土壤的生长状况。

本研究中,芒萁植物各器官(除了 I 茎的 N 含量和 II 根的 N 含量以外)的养分含量与各活动状况的崩岗表层土壤之间相关性不显著($p > 0.05$),从侧面可以反映出芒萁体内养分含量的多少与其自身发育节律、遗传特性有关,并不主要受土壤养分含量多少的限制。邓恢等^[28]指出芒萁植物本身的耐酸性、纵横交错的地下茎及庞大的根系使得它是根治南方红壤侵蚀区强度、极强度水土区的唯一草本植物。崩岗作为我国南方红壤侵蚀区典型的退化生态系统之一,本地草本植物芒萁是最早侵入该系统的草本植物,也是恶劣的环境中最后退出退化生态系统的草本植物,当生存环境恶劣时,耐瘠性极强的芒萁体现出对于恶劣环境的适应。

4 结论

(1) 随着植被覆盖度的提高,崩岗的活动状况逐渐稳定,崩壁土壤养分含量有所增加。但与全国土壤肥力的平均水平相比,仍处于极度低下状态,需进一步加强崩岗土壤的生态修复。

(2) 崩岗崩壁部位芒萁植物体的养分含量与表层土壤养分含量相关性不大,表明芒萁植物受土壤养分的影响较小,且在恶劣环境下进化形成自身防御和适应,并可作为改善南方红壤侵蚀区崩岗系统土壤肥力的重要措施。

在崩岗系统植被自然恢复过程中,随着先锋植物芒萁的入侵并成功生存以及生长,植被状况得到改善,崩岗系统受侵蚀的现象得到一定遏制,活动状况逐渐趋于稳定,一定程度上改良了土壤的性状,提高了土壤的肥力,植物的生存条件也进一步得到优化,崩岗治理所带来的生态恢复效应也更为显著。

参考文献:

- [1] 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[J].地球科学进展,2013,28(7):802-811.
- [2] 曾昭璇,黄少敏.中国自然地理:地貌[M].北京:科学出版社,1980.
- [3] 阮伏水.福建省崩岗侵蚀与治理模式探讨[J].山地学报,2003,21(6):675-680.
- [4] 牛德奎.华南红壤丘陵区崩岗发育的环境背景与侵蚀机理研究[D].南京:南京林业大学,2009.
- [5] 詹振芝,黄炎和,蒋芳市,等.砾石含量及粒径对崩岗崩积体渗透特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):85-90,95.
- [6] 姜超,陈志彪,陈志强,等.崩岗侵蚀对土壤速效养分质量分数及化学计量比的影响[J].中国水土保持科学,

- 2016,14(2):31-40.
- [7] 区晓琳,陈志彪,陈志强,等.闽西南崩岗土壤理化性质及可蚀性分异特征[J].中国水土保持科学,2016,14(3):84-92.
- [8] 文慧,冯舒悦,王军光,等.南方红壤区不同崩岗侵蚀治理模式及评价指标体系研究[J].中国水土保持,2019(9):40-44,69.
- [9] 赵会贞.花岗岩强度水土流失区不同治理措施的生态效益评价[D].福州:福建农林大学,2010.
- [10] 王道坦,黄炎和,王洪翠,等.花岗岩强度水土流失区的治理效益综合评价[J].福建热作科技,2006,31(4):4-7.
- [11] 谢炎敏.福建省长汀县崩岗生物治理模式的生态环境效应分析[J].亚热带水土保持,2017,29(2):13-15,34.
- [12] 陈志彪,朱鹤健,刘强,等.根溪河小流域的崩岗特征及其治理措施[J].自然灾害学报,2006,15(5):83-88.
- [13] 罗艳,贡璐,朱美玲,等.塔里木河上游荒漠区 4 种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2017,37(24):8326-8335.
- [14] 姜超.崩岗系统土壤理化性质及化学计量特征的空间分异[D].福州:福建师范大学,2016.
- [15] Tian H, Chen G, 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(1):139-151.
- [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 C N P 的化学计量特征[J].生态学报,2013,33(18):5760-5767.
- [17] 梁美霞,陈志彪,陈志强,等.崩岗系统化学计量特征及其生态指示意义[J].中国水土保持科学,2019,17(3):75-82.
- [18] 梁美霞,陈志彪,姜超,等.崩岗区不同植被覆盖度对土壤氮素含量的影响[J].生态科学,2018,37(4):81-85.
- [19] 聂兰琴,吴琴,尧波,等.鄱阳湖湿地优势植物叶片凋落物—土壤碳氮磷化学计量特征[J].生态学报,2016,36(7):1898-1906.
- [20] 刘兴诏,周国逸,张德强,等.南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N,P 的化学计量特征[J].植物生态学报,2010,34(1):64-71.
- [21] 张明如,何明,温国胜,等.芒萁种群特征及其对森林更新影响评述[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2010,31(4):303-308.
- [22] 李小飞,陈志彪,陈志强,等.南方红壤侵蚀区芒萁生长特征及其对环境因子的响应[J].水土保持通报,2013,33(3):33-37.
- [23] 白雪娟,曾全超,安韶山,等.黄土高原不同人工林叶片凋落物—土壤生态化学计量特征[J].应用生态学报,2016,27(12):3823-3830.
- [24] 陈俊佳,陈志彪,陈志强,等.闽西南崩岗侵蚀区芒萁叶片生态化学计量特征[J].中国生态农业学报,2018,26(11):1710-1719.
- [25] 柯立.安徽仙寓山亚热带常绿阔叶林植物叶水平生态化学计量特征研究[D].合肥:安徽农业大学,2014.
- [26] 徐沙,龚吉蕊,张梓榆,等.不同利用方式下草地优势植物的生态化学计量特征[J].草业学报,2014,23(6):45-53.
- [27] Elser J J, Urabe J. The stoichiometry of consumer-driven nutrient recycling: theory, observations, and consequences[J]. Ecology, 1999, 80(3):735-751.
- [28] 邓恢,林沁文,滕华卿,等.强度水土流失区芒萁生长规律分析[J].福建林学院学报,2004,24(3):262-264.

(上接第 137 页)

- [25] Wei Y, Hansen W. Early-age strain-stress relationship and cracking behavior of slag cement mixtures subject to constant uniaxial restraint [J]. Construction and Building Materials, 2013,49:635-642.
- [26] 满达,庞文台,樊忠成,等.复合水泥土应力应变本构模型研究[J].硅酸盐通报,2019,38(1):99-102
- [27] 冀璐,高建恩,郝连安,等.MBER 固化土弹性模量的试验研究[J].水土保持通报,2012,32(5):261-264.
- [28] 张少龙,高建恩,李兴华,等.含盐量对 MBER 土壤固化剂加固土性能的影响试验[J].水电能源科学,2015,33(11):133-135,139.
- [29] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等.水泥基土壤固化剂固化土的物理化学作用[J].岩土力学,2010,31(12):3741-3745.
- [30] Peng Y, Ma K, Long G, et al. Influence of nano-SiO₂, nano-CaCO₃ and nano-Al₂O₃ on rheological properties of cement-fly ash paste [J]. Materials, 2019,12(16).DOI:10.3390/ma12162598.
- [31] Khaloo A, Mobini M H, Hosseini P. Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016,113: 188-201.
- [32] Quercia G, Hüsken G, Brouwers H J H. Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(2):344-357.
- [33] 贾景超,陈志涛,郭佳朋,等.可溶盐对水泥土强度影响试验研究[J].人民长江,2019,50(S1):298-301.
- [34] 刘剑平,白晓红,王林浩.偏高岭土对水泥土强度影响的机理研究[J].非金属矿,2017,40(6):27-29.
- [35] 黄冠华,詹卫华.土壤颗粒的分形特征及其应用[J].土壤学报,2002,39(4):490-497.