

桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复与土壤养分变化^{*}

吴海勇^{1,2,3}, 彭晚霞^{1,3,4}, 宋同清^{1,3}, 曾馥平^{1,3,*}, 黎星辉^{1,2}, 宋希娟^{1,3,5}, 欧阳资文^{1,3,4}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 2. 南京农业大学茶学研究所, 南京 210095;
3. 中国科学院环江喀斯特生态实验站, 环江 547200; 4. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128;
5. 甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070)

摘要: 为促进桂西北喀斯特退化生态系统的恢复与重建, 采用全面调查和样方调查方法, 以自然保护区的顶级群落为对照, 研究了桂西北喀斯特人为干扰区自然恢复 22a 后植被的演替规律与土壤养分变化。结果表明, 干扰区物种丧失严重, 种类仅有自然保护区的 26.6%, 随着群落由草丛 草灌丛 灌丛 藤刺灌丛 乔灌丛 顶级群落的顺向演替和发展, 群落的高度、生物量和物种多样性、土壤有机质、养分、阳离子交换量和硅、铁、铝、钛等矿物质含量逐步增加, 钙、镁含量显著减少, pH 值降低, 土壤质量随着植被的恢复呈波折性提高。

关键词: 干扰区; 植被自然恢复; 土壤养分; 桂西北喀斯特

中图分类号: Q948.5; S158.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2008)04-0143-05

Changes of Soil Nutrients in Process of Natural Vegetation Restoration in Karst Disturbed Area in Northwest Guangxi

WU Hai-yong^{1,2,3}, PENG Wan-xia^{1,3,4}, SONG Tong-qing^{1,3}, ZENG Fu-ping^{1,3,*},
LI Xing-hui^{1,2}, SONG Xi-juan^{1,3,5}, OU YANG Zi-wen^{1,3,4}

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125;
2. Tea Institute, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095;
3. Station of Karst Ecology in Huanjiang, Institute of Subtropical Agriculture, CAS, Huanjiang 547200;
4. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;
5. Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: The successional rule of vegetation and dynamics of soil nutrient elements after 22-years' natural restoration were studied in karst disturbed area in northwest Guangxi, which would promote the degraded ecosystem restoration and reconstruction in northwest Guangxi. The study was employed overall and sample quadrat investigation method and taken the climax community in Mulun Natural Reserve in Huanjiang County as control. The results showed that the diversity lost severely in the disturbed area with only 26.6% species of that in Mulun Natural Reserve. With the succession and development from grass, grass and bushes, bushes, liana and bushes, trees and bushes to the climax community, the community height, biomass, plant diversity, soil organic carbon, soil nutrient, cation exchange capacity (CEC), and the content of Si, Fe, Al, and Ti increased gradually. However, the content of Ca and Mg reduced remarkably, the value of pH decreased. All this indicated that the soil quality improved with the vegetation recovery basically but with slight drop in the stage of liana and bushes.

Key words: disturbed area; natural vegetation restoration; soil nutrient; karst region in northwest Guangxi

1 引言

土壤不仅影响植被群落的发生、发育和演替速度, 而且也对生态系统过程、生产力和结构具有重要影响, 植物群落的演替进程同时也丰富了土壤资源, 增加了其空间异质性, 维持了物种间关系、种的分布格局以及干扰下的群落物种多样性^[1]。以贵州高原为中心连带成片的我国西南喀斯特地区是世界 3 大岩溶区之一, 区域面积为 $115 \times 10^4 \text{ km}^2$, 岩溶面积达 $70 \times 10^4 \text{ km}^2$, 地形地貌特殊, 受地球内动力、强烈的地质运动、高温多雨且分

* 收稿日期: 2008-03-01 * 通讯作者

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2 - XB2 - 08 - 02); 国家“十一五”科技支撑计划 (2006BAC01A10); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 课题 (2006CB403208)

作者简介: 吴海勇 (1984 -), 男, 湖南郴州人, 硕士生, 研究方向为恢复生态。E-mail: haiyongwu@163.com

布不均、碳酸盐岩溶性强、水文二维结构明显以及其适生性植物具有嗜钙性、耐旱性和石生性等限制特点的综合影响^[2],生态系统的稳定性和抗干扰性差,是我国六大脆弱生态系统之一,极易退化,难以恢复。桂西北喀斯特地处西南喀斯特南部的斜坡过度地带,其典型景观单元为峰丛洼地,面积约 9.7 万 km²,资源短缺,生活极度贫困,尚有 50 万人生活在人均面积不足 0.02 hm²、每年人畜饮水短缺 3~4 个月的非人类适宜生存的大石山区,为生存起见,人类通过采伐、开垦、采樵、采矿、旅游开发。工程建设等方式对本来脆弱的喀斯特生态环境进行不断的干扰和破坏,绝大部分森林基本退化成灌丛和草坡,生境质量严重下降,水土流失严重,部分地带完全石漠化。进入 80 年代中期环境保护阶段之后,人为干扰显著减少,植被自然恢复了 22 a,但变化缓慢,大部分仍持续在草丛和草灌丛阶段。有关方面的研究主要集中在茂兰等少数自然保护区和土地利用方式上,广大干扰区植被的恢复和土壤质量变化研究已经滞后,报道甚少。本文在中国科学院环江喀斯特生态实验站喀斯特森林人为干扰区内进行全面和典型样方调查,以实验站所在县的木论自然保护区为参照,以对植被演替过程及其发育阶段的认识为前提,从土壤酸碱度、土壤养分、土壤阳离子交换量和土壤矿质全量出发,探讨了干扰区植被 22 a 的自然恢复进程和土壤养分变化规律,旨在为喀斯特地区土壤资源合理利用、植被迅速恢复的人工调控以及生态恢复重建提供科学依据。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

研究区位于桂西北中国科学院环江喀斯特生态实验站。地理位置为 108°18'56.9" - 108°19'58.4" E, 24°43'58.9" - 24°44'48.8" N,地势四周高、中间低,海拔最高为 647.2 m,最低为 272.0 m,最大相对高差 375.2 m,地形破碎,坡度较陡,25°的坡面占 62%。土壤为深色或棕色石灰土,洼地基岩裸露面积占 15%,土壤厚度 20~160 cm,坡地基岩裸露面积 30%,土层较薄,一般为 10~50 cm。多年平均气温为 19.9℃,7 月平均气温为 27.9℃,1 月平均气温 10.1℃,极端温度分别为 38.7℃ 和 -5.2℃,年平均 10℃ 积温为 6300℃,无霜期 329 d。多年平均降雨量 1389.1 mm,4-8 月为雨季,降雨量占全年的 73.7%,9 月至次年 3 月为旱季。年平均日照 1451.1 h,平均太阳总辐射量 413.8 kJ/cm²,其中有效辐射量为 211.9 kJ/cm²。整个地貌为低山丘陵,位于中亚热带季风气候区,1984 年之前在砍伐、樵采、垦殖、放牧、火烧 5 种主要方式干扰下植被遭到了大面积的破坏,至目前为止,虽然恢复了 22 a 但大部分仍处于草丛和草灌丛阶段,属典型的桂西北喀斯特峰丛洼地人为干扰区。为保证样方调查的准确性和可比性,除顶级群落外,野外调查限定在实验站内,最远距离 10 km,海拔高度在 302~330 m 之间,样方均选择在坡脚和坡麓,避免坡位和坡向的影响。

2.2 试验布置

本研究采取样地法取样和以“空间代替时间”的研究方法^[2],参照茂兰自然保护区 6 个群落演替系列的划分标准^[3],结合干扰区的实际情况,将干扰区的植被自然恢复过程划分为草丛() 草灌丛() 灌丛() 藤刺灌丛() 乔灌丛() 5 个演替阶段,并以干扰区所在的环江县木论自然保护区顶级群落为对照(),在各演替阶段的不同群落类型上设置样地,3 次重复,共获样地 36 块,其中有 12 块固定标准地。

2.3 植被调查

乔木、灌木和草本样地的取样面积分别为 20 m × 30 m、10 m × 10 m 和 5 m × 5 m。每个乔木样地分为 10 个 6 m × 10 m 乔木样方,在每个乔木样方内设置 1 个 5 m × 5 m 灌木样方和 1 个 1 m × 1 m 草本样方。每个灌木样地分为 4 个 5 m × 5 m 灌木样方和 1 个 1 m × 1 m 草本样方。每个草本样地按五点法设置 5 个 1 m × 1 m 草本样方。调查记录每个样方内乔、灌木及幼树种类、数量、胸径、地径、高度、冠幅和盖度;草本植物调查其种类、数量、多度、平均高和盖度;草本生物量用全割法,灌木和乔木生物量用标准木法;同时记录每个样方的地理位置、地形地貌、土壤特征、人为影响方式和强度、所属植被类型、总盖度等,并用手持 GPS 进行定位。调查时间为 2007 年 6-7 月。

2.4 土样采集与分析

2007 年 6-7 月同期进行土壤采样,在样方内按 S 型采集表层土壤(0-20 cm) 15 个样点,3 次重复,土壤样品风干处理后进行分析。pH 值用 1:2.5 土液比水提,酸度计测定;有机质用重铬酸钾容量法;全 N 用半微量开氏法;全 P 用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法;全 K 用 NaOH 熔融-火焰光度法;碱解氮用扩散吸收法;速效 P 用 NaHCO₃ 提取-钼锑抗比色法;速效 K 用中性醋酸铵提取-火焰光度法测定;CEC 用中性醋酸铵淋洗法;矿质成分采用碳酸钠碱熔-盐酸提取后,二氧化硅用质量法,钙、铁、镁用原子吸收法,钛用变色酸比色法,

铝用氟化钾取代 EDTA 容量法。

2.5 物种多样性计算及数据处理方法

多样性指数的计算方法:物种丰富度 $S = \text{样方内物种数} / \text{样方面积}$,它反映样方单位面积的物种数目,并不涉及种的多度分布概率,对常见种和偶见种不加区别;Shannon - Wiener 指数 $H = - \sum P_i \cdot \ln P_i$, $P_i = N_i / N$, N_i 为样方中第 i 物种的个体数, N 为样方总个体数;Simpson 优势度指数 $D = 1 / \sum (P_i)^2$;Pielou 均匀度指数 $J = H / \ln S$ 。所有研究数据使用 Excel 软件进行数据处理,并运用 SPSS11.0 软件进行统计分析。

3 结果与分析

3.1 干扰区植被自然恢复过程与主要植物群落更替

野外调查表明,桂西北喀斯特干扰区物种多样性丧失严重,目前共有维管束植物 91 科 206 属 241 种(含种下等级),仅为自然保护区的 26.6%,植物物种总的趋势是科属分布性广,集中性强,充分反映了喀斯特地区的生境异质多样性和人为干扰的结果。常见的植物种类有圆叶乌桕 (*Sapium rotundifolium*)、朴树 (*Celtis tetrandrassp slnensis*)、华南皂荚 (*Gleditsia fera*)、石山榕 (*Ficus virens var. sublancoolata*)、榔榆 (*Ulmus parvifolia*)、棠梨 (*Pyrus betulaefolia*)、继木 (*Loropetalum chinense*)、菜豆树 (*Radermachera sinica*)、广西巴豆 (*Croton kangsiensis*)、黄荆 (*Vitex negundo*)、小构树 (*Broussonetia kazinok*)、红背山麻杆 (*Alchornea trewioides.*)、盐肤木 (*Rhus chinensis*)、竹叶花椒 (*Zanthoxylum armatum*)、八角枫 (*Alangium chinensis*)、灰毛浆果楝 (*Cipadessa cinerascens*)、石山苎麻 (*Boehmeria strigosifolia*)、小果野桐 (*Mallotus microcarpus*)、甜叶算盘子 (*Glochidion philippicum*)、老虎刺 (*Euphorbia milii*)、火棘 (*Pyracantha fortuneana*)、冻绿 (*Rhamnus utilis*)、金樱子 (*Rosa laevigata*)、龙须藤 (*Bauhinia championii*)、山葛藤 (*Pueraria montana*)、白茅 (*Imperata cylindrica*)、蔓生莠竹 (*Microstegium vagans*)、斑茅 (*Saccharum arundinaceum*)、类芦 (*Neyraudia reynaudiana*)、臭蒿 (*Artemisia hedinii*)、鬼针草 (*Bidens parviflora*)、小飞蓬 (*Comniza canadensis*)、蕨菜 (*Pteridium aquilinum*)、肾蕨 (*Nephrolepis auriculata*)、芒萁 (*Dicranopteris pedata*)、野古草 (*Arundinella anomala*) 等,其中圆叶乌桕、华南皂荚、黄荆、小构树、红背山麻杆、盐肤木、竹叶花椒、八角枫、灰毛浆果楝、火棘、金樱子、白茅、蔓生莠竹、鬼针草、蕨菜等是干扰区植被各群落主要的建群种或共建种,由于干扰强度大,退化严重,它们中的大部分均为阳性先锋物种。

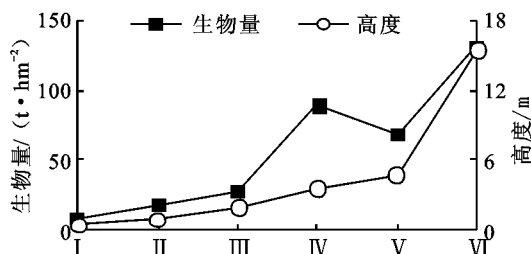


图1 群落生物量与高度、草本层生物量百分比的关系

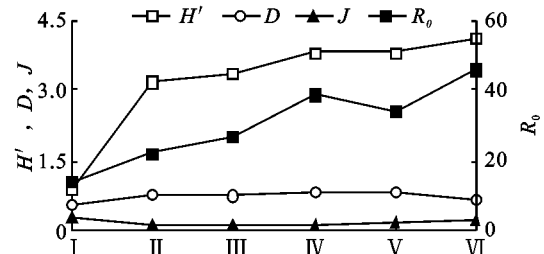


图2 各演替阶段群落多样性变化

研究区共有 6 个演替阶段,顺向演替系列为草丛 草灌丛 灌丛 藤刺灌丛 乔灌丛 常绿落叶阔叶混交林片段,但常绿落叶阔叶混交林残存于人类干扰难以达到的悬崖峭壁上,面积极少,无法进行调查,顶级群落落在自然保护区内选择立地条件相似的青冈栎 (*Cyclobalanopsis glauca*) + 南酸枣 (*Choerospondias axillaries*) 群落。不同演替阶段的主要植被类型为草丛阶段:白茅、蔓生莠竹和蕨草草,草灌丛阶段:斑茅 + 黄荆、白茅 + 黄荆和蔓生莠竹 + 火棘群落,灌丛阶段:黄荆和红背山麻杆群落,藤刺灌丛阶段:老虎刺 + 八角枫和火棘 + 盐肤木群落,乔灌丛阶段仅有一个乌桕 + 华南皂荚群落。由图 1 和图 2 可看出,随着干扰区群落的自然恢复,群落的高度 (0.49 ~ 15.56 m) 上升,群落生物量 (7.74 ~ 131.42 t/hm²) 逐渐积累增大,物种数 (14 ~ 46)、Shannon - Wiener 多样性指数 (0.89 ~ 4.13) 升高,生态优势度在演替前期 (0.28) 和后期 (0.23) 较高,中间较低且保持相对稳定 (0.10 ~ 0.16),均匀度的变化规律正好相反。和顶级群落相比,干扰区最大群落高度、生物量和多样性指数分别下降了 10.82 m, 42.02 t/hm² 和 0.29。

3.2 干扰区植被自然恢复过程中的土壤养分变化

3.2.1 土壤酸碱度变化 石灰岩山地发育的石灰土一般富含碳酸钙,土壤呈微碱性反应,pH 值较高。桂西北岩溶峰丛洼地高温多雨,土壤中的钙、镁大量淋失,随着植被自然恢复进程的发展,地表枯枝落叶不断增加,释放大量的酸性物质进入土壤,对岩石风化形成的碱性物质起到中和作用,pH 值逐步降低,在发育较好的乔灌

丛和顶级阶段, pH 值下降显著, 分别为 6.75 和 6.70, 呈中性和偏微酸性反应(见表 1)。

3.2.2 土壤有机质和其他营养成分的变化 桂西北岩溶峰丛洼地土壤的形成与发育, 极大程度上受成土母质和生物的影响, 岩石的风化过程形成了土壤的物质基础, 旺盛的生物累积过程是土壤提高肥力的基础, 而较好的土壤肥力促进了植被的生长, 土壤和植物之间形成了物质的良性循环。多重比较分析表明(见表 1), 与草丛相比, 各演替时期的有机质和其他营养成分含量均有不同程度的提高, “生物自肥”作用强烈^[5]。其中只有速效 P 在草灌丛、灌丛和乔灌丛阶段没有达到显著水平, 有机质在藤刺灌丛阶段仅达到了显著水平, 其他均达到了极显著水平, 但都极显著低于顶级群落, 表明土壤质量的改善与植被恢复一样潜力巨大。由表 1 还可以看出, 除藤刺灌丛外, 随着植被的恢复, 有机质和其他养分含量呈逐步提高的趋势, 且各阶段之间大部分指标的变化均达到了显著或极显著水平, 藤刺灌丛是植被在反复人为干扰胁迫下产生的, 以常绿的老虎刺为主的藤刺植物攀缘上升在群落的顶端, 形成一层薄而紧密的伞盖, 群落的其他植物生长受到了极大的影响, 整个群落呈单层结构, 枯枝落叶极少, 占总生物量的 5.58%, 且 92.63% 由枯枝组成, 除碱解 N 外, 有机质、全 N、全 K、速效 K 均处于低峰, 仅高于草丛阶段, 而全 P 和速效 P 处于高峰(枯枝的磷养分含量相对较高), 仅低于顶级群落, 进一步揭示了生物累积在提高喀斯特土壤肥力方面的重要作用^[6]。土壤阳离子交换量的提高, 说明土壤养分和缓冲能力得到了一定的改善, 与其他养分相比, 草丛阶段的土壤阳离子交换量很低, 随着植被的恢复, 增加的效果更加明显, 除藤刺灌丛外, 很接近顶级群落, 乔灌丛与顶级群落的差异没有达到显著水平。

表 1 恢复过程中不同演替阶段的土壤养分状况及 Duncan's 多重比较分析

演替阶段	pH 值	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	阳离子交换量/ (mmol · kg ⁻¹)
	7.83	57.47Dd	1.94Ee	0.89Dd	0.79Dd	223.03Ee	27.18Cd	3.31Cb	161.13De
	7.73	77.83Bb	3.04Cc	1.17Cc	4.05Bb	254.47Dd	83.43Bbc	4.91BCb	335.45Bc
	7.28	76.04BCb	2.76CDcd	1.13Cc	4.70Aa	267.05Dd	91.89Bb	3.75Cb	365.67ABb
	7.77	66.36CDc	2.55Dd	1.57Bb	1.74Cc	233.77Cc	81.48Bc	7.23ABa	252.57Cd
	6.75	78.11Bb	4.01Bb	1.19Cc	4.12Bb	392.76Bb	84.75Bbc	3.42Cb	379.09Aab
	6.70	98.12Aa	4.83Aa	1.86Aa	4.90Aa	432.45Aa	118.72Aa	8.31Aa	403.20Aa

3.2.3 干扰区植被自然恢复过程中的土壤矿质全量演变 土壤矿物质的化学组成与成土条件和成土过程密切相关, 对土壤的性质有极大的影响, 分析土壤矿质全量的化学组成, 能够了解土壤的风化发育程度, 阐明土壤化学性质在成土过程中的演变情况及土壤肥力背景状况^[7]。喀斯特生态系统常以石生、旱生及喜钙性和地下空间复杂性为特征, 是一种由地质条件(碳酸盐岩水文系统和富钙、镁的地球化学环境)所决定的脆弱环境^[8]。SiO₂, Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 构成土壤的骨干成分, 钛与铁质红壤化作用有关, 在热带土壤中含量较高。故本文对与喀斯特土壤关系较大的钙、镁、铁、铝、钛、二氧化硅 6 种矿质成分的全量进行分析。结果表明(见表 2), 随着植被的恢复, 土壤矿质全量的变化更加明显, 不同演替阶段之间的差异大部分均达到极显著水平。受高温多雨的影响, 岩石在溶蚀过程中, 含量最高的钙、镁碳酸盐大量淋失, 仅有极少部分生成次生矿物, 成为土壤的组成部分, 随着群落的顺向演替, 由“森林效应”生成的潮湿的生态环境日趋加强, 加速了岩石的溶蚀过程, 钙、镁含量显著下降。但是由于生物累积作用增加及岩石在溶蚀过程中生成的重碳酸钙、重碳酸镁源源不断地进入土体, 不但没有形成地带性红壤那样明显的脱硅现象, 硅的含量反而随着植被的恢复呈极显著增加趋势, 铁、铝、钛表现了相同的规律, 其中铝远没有达到地带性红壤的富铝化程度。总之, 随着植被的恢复, 土壤发育程度越来越好, 但藤刺灌丛与草丛更为接近, 其在群落演替中的作用和使土壤发生退化的原因和机制正在进行深入研究。

3.3 干扰区植被自然恢复过程中养分的相 表 2 恢复过程中不同演替阶段土壤矿质全量及 Duncan's 多重比较分析
关性

通过对干扰区植被自然恢复过程中土壤有机质、养分(全 N、全 P、全 K、碱解 N、速效 P、速效 K)、阳离子交换量和土壤矿质全量(钙、镁、硅、铁、铝、钛) 14 个因子线性

演替阶段	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂
	20.20Aa	17.02Aa	10.34Ff	0.85Ff	1.65Ef	2.24Ff
	4.23Cc	3.92Cc	45.69Bb	5.11Dd	6.92Dd	9.93Dd
	1.54Dd	2.09DEde	50.29Aa	5.63Cc	8.57Cc	11.32Cc
	17.23Bb	14.45Bb	15.08Ee	1.99Ee	6.19De	3.72Ee
	1.21de	2.65Dd	42.35Dd	6.61Bb	22.80Bb	13.33Bb
	1.02De	1.88Ee	44.46Cc	8.53Aa	25.47Aa	16.89Aa

相关分析表明, 土壤有效 P 除只与土壤全 P 呈显著正相关, 与其它因子的相关性均不显著; 全 P 与全 K、阳离子交换量、硅、钙、镁及碱解 N 与硅的相关性不显著, 其它因子间均达显著或极显著的线性相关; 钙和镁除与速效 P 呈不显著的正相关、与全 P 呈不显著的负相关外, 与其它各因子之间的关系均呈显著或极显著的负相关, 它们之间极度正相关, 相关系数达 0.999。

4 结 论

(1) 桂西北喀斯特人为干扰区物种多样性丧失严重,自然恢复 22 a 后,维管束植物具有 91 科 206 属 241 种,仅为当地保护区的 26.6%,且大部分为阳性先锋植物,其顺向演替系列为草丛—草灌丛—灌丛—藤刺灌丛—乔灌丛—常绿落叶阔叶混交林片段,随着植被的自然恢复,群落的结构、生物量和物种多样性渐趋合理,但由于繁殖体缺乏和抚育措施不当,和自然保护区的顶级群落相比,干扰区最大群落高度、生物量和多样性指数分别下降了 10.82 m, 42.02 t/hm² 和 0.29。

(2) 植物与土壤的关系是桂西北喀斯特人为干扰区退化生态系统恢复与重建的重要理论基础,干扰区群落恢复和演替过程中土壤养分的变化与群落结构动态相对应,和干旱荒漠类似,植被具有明显的“沃岛”现象,随着植被的恢复,土壤碱性弱化,pH 值降低,土壤有机质和其它养分含量、土壤阳离子交换量及铁、硅、铝、钛等矿质全量逐渐提高,钙、镁全量显著下降,土壤的质量和发育程度越来越好,但藤刺灌丛的情况特殊,其土壤养分变化与草丛阶段极为相似,虽然群落结构与物种多样性恢复良好,但土壤质量却发生了退化现象,其机制有待进一步研究。

(3) 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复过程中土壤有机质、养分、阳离子交换量和土壤矿质全量的 14 个因子线性相关分析表明,速效 P 只与全 P 相关显著,全 P 与全 K、阳离子交换量、硅、钙、镁及碱解 N 与硅的相关不显著,其它因子间均达到了显著或极显著相关。

(4) 在全面认识桂西北喀斯特人为干扰区植被的演替过程、发育阶段与土壤养分变化的关系及土壤养分相互作用机理的基础上,充分研究和开发植被恢复和重建的关键技术,促进该区域的可持续性发展。

参考文献:

- [1] 刘忠宽,汪诗平,陈佐忠,等. 不同放牧强度草原休牧后土壤养分和植物群落变化特征[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 2048-2056.
- [2] 曾馥平,彭晚霞,宋同清,等. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复 22 年后群落特征[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5110-5119.
- [3] 龙健,李娟,汪境仁,等. 典型喀斯特地区石漠化演变过程对土壤质量性状的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 77-81.
- [4] 喻理飞,朱守谦,叶镜中. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究[J]. 林业科学, 2002, 38(1): 1-7.
- [5] 欧阳学军,黄忠良,周国逸. 鼎湖山南亚热带森林群落演替对土壤化学性质影响的累积效应研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 51-54.
- [6] 焦菊英,焦峰,温仲明. 黄土高原丘陵沟壑区不同恢复方式下植物群落的土壤水分和养分特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 667-674.
- [7] 郭曼,安韶山,常庆瑞,等. 宁南宽谷丘陵区土壤矿质元素与氧化铁的特征[J]. 水土保持学报, 2005, 12(3): 38-40.
- [8] 袁道先. 论喀斯特环境系统[J]. 中国岩溶, 1988, 7(3): 179-186.

责任编辑:付会芳