

贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C、N、P 含量和空间异质性

胡忠良, 潘根兴*, 李恋卿, 杜有新, 王新洲

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

摘要: 西南喀斯特地区是中国四大生态脆弱地区之一, 为了解喀斯特生态环境下植被演替对土壤养分循环的影响, 选取贵州中部喀斯特地区由乔木林、灌木林和灌草丛等不同植被类型下的土壤为研究对象, 采用样块法采集了表层土壤样品, 测定 C、N、P 全量及有效态含量, 分析了这些元素的空间异质性特点。结果表明, 各养分元素无论全量和有效态含量均在乔木林下最高, 灌木林下有机碳及 N、P 全量的下降并不显著, 但养分有效态含量显著下降, 而灌草丛下土壤养分无论是全量还是有效态含量均较灌木林下显著降低; 土壤养分空间异质性在灌木林下最高, 土壤全磷素特别是速效磷的空间异质性高于有机碳和 N。这显示, 不仅是土壤养分含量, 而且土壤养分的空间异质性都随植被演替而改变。这种变化中, 土壤养分有效态较全量更为剧烈。植物类型和结构变化下凋落物返还及土壤生物化学转化环节的变化可能是引起喀斯特生态系统退化下土壤养分库降低而空间异质化提高的主要原因, 这最终也会影响土壤养分在生态系统内的循环和分布。

关键词: 喀斯特; 不同植被类型; 土壤养分; 空间异质性

文章编号: 1000-0933(2009)08-4187-09 中图分类号: S154 文献标识码: A

Changes in pools and heterogeneity of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus under different vegetation types in Karst mountainous area of central Guizhou Province, China

HU Zhong-Liang, PAN Gen-Xing*, LI Lian-Qing, DU You-Xin, WANG Xin-Zhou

Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4187 ~ 4195.

Abstract: The karst areas of Southwest China had been considered as one of four ecotones in China. To understand the impacts of the succession of vegetation on soil nutrient pool and the heterogeneity in the karst ecosystems, quadrat sampling of topsoil was done and pools (total and available contents) and the spatial distribution were analysed under three different vegetation types (forest, shrubs and grassland) in karst mountainous area from central Guizhou province, China. The results showed that, both total and available pool of OC, N and P was highest under forest and decreased under shrub and grasslands, with the more prominent descending trend for available pools. However, highest spatial heterogeneity of nutrient pools was found under shrub and associated with soil P. This indicated changes both in total pool and in spatial distribution with vegetation degradation in the karst area. Nutrient availability was shown in prompt response to vegetation degradation. Changes in littering and the associated soil biochemical transformation may occur under vegetation degradation which, in turn, may result in reduction of nutrient pool and increase in spatial variability. These changes in soil nutrient status may ultimately impact on ecosystem cycling of life elements and the productivity in the long run.

Key Words: Karst; vegetation types; soil nutrient; spatial heterogeneity

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展计划资助项目(2006CB403205)

收稿日期: 2008-12-01; 修订日期: 2009-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pangexing@yahoo.com.cn

陆地生态系统中,土壤作为最重要的水分及养分资源的提供者,通过调节资源的供给与分配影响生态系统内的物种组成和群落动态,制约着生态系统的演替过程和对环境变化的响应。良好的土壤功能是维持喀斯特生态系统稳定的基础。而在土壤养分循环中,C、N、P 元素作为生命元素驱动着其他养分元素的循环与转化,是养分元素循环的核心^[1,2]。土壤养分的生物地球化学循环不但起着生态系统生产力的支持功能,而且调节和驱动岩溶作用和生态系统的演替。

喀斯特生态系统是以碳酸盐为物质基础,在大气-水-岩-生物相互作用下所形成的一种具有特殊物质、能量、结构和功能的生态系统^[3]。喀斯特环境中,石灰岩风化和土壤形成作用是以土壤为媒介的生物地球化学过程^[4]。喀斯特系统由于其自身特殊的二元结构体系和物质基础,与黄土、沙漠、寒漠并列为我国四大生态环境脆弱区的地区^[5]。近年来,在人为活动的干扰加剧情况下,西南喀斯特地区出现了石漠化等严重的生态退化问题。喀斯特生态系统植被退化对土壤养分的影响研究已成为喀斯特生态研究的热点问题之一。刘方等研究了黔中地区植被退化对土壤质量的影响^[6],吴海勇等研究了桂西北地区植被恢复与土壤养分变化关系^[7],表明植被退化后土壤养分含量降低,但在植被恢复后土壤养分库会提高。任京辰等研究了贵州花江谷地典型植被群落下喀斯特土壤养分库在生态系统退化中的演化特点^[8],提出了限制性养分和养分的有效含量在植被演替中强烈变化现象。受地形和小生境等因素的影响,喀斯特生态系统是具有高度空间异质性的系统^[9,10]。所以,探讨喀斯特植被演替中土壤养分库变化与其空间异质性变化的关系对于阐明喀斯特生态系统演变机制具有重要的科学意义。

本文选取贵州中部喀斯特山区一典型小流域内乔木林、灌木林和灌草丛 3 种植被类型覆盖的生态系统为研究对象,采用高密度样块土壤采样法,调查和分析不同植被类型下样块土壤有机碳和氮、磷元素的全量和有效态含量及其空间异质性特征的变化,试图了解不同植被类型下土壤养分资源供应水平和空间异质性的变化特征,在此基础上揭示植被演替与土壤养分储量变化及空间异质性变化的关系,为认识喀斯特生态系统中植被演替后土壤-植物系统养分循环机制和恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

本研究样地位于贵州省安顺地区普定县城关镇陈旗村-赵家田村地区一典型喀斯特小流域内(26°16.39'~26°18.05'N,105°46.72'~105°48.61'E),海拔 1300~1500m 之间,气候温和,年均温 15.1℃,年均降雨量 1396.9mm,但季节分布不均,约 70% 以上的降雨集中于 5~9 月份,年均相对湿度 80%,年均日照时数 1202h,属中亚热带季风湿润气候区^[11]。地形为峰丛岩溶洼地,峰丛主要植被类型包括乔木林、灌木林和灌草丛,土壤类型为非地带性石灰土。

1.2 样地选择

本研究以海拔、岩性、坡向和坡度等条件均相似且紧邻的 3 个独立的喀斯特峰丛山丘为对象,它们分别由乔木林、灌木林和灌草丛 3 种不同的植被类型所覆盖。在研究区域内,先期对各样区的植被组成进行了调查。各调查样区基本情况如表 1 所示。

表 1 喀斯特生态系统样地基本情况

Table 1 Site description of the studied karst ecosystems

地点 Site	植被类型 Vegetation types	全球定位位置 GPS position	海拔 Altitude (m)	坡向 Slope	植物覆盖度 Plant coverage (%)	丰富度 Richness	植被冠层高度 Canopy height (m)
对门坡	乔木林(FO) Forest	E105°46'46.56" N 26°15'58.44"	1410	SE 31°	83.5	34.2	12.99
笔架山	灌木林(SR) Shrub	E105°46'36.84" N 26°16'4.6"	1375	SE 29°	70.4	35.5	1.31
老蛇坡	灌草丛(GS) Shrub-grassland	E105°46'43.08" N 26°16'36.20"	1380	SE 32°	30.7	21.6	0.89

3 种植物群落的主要特征为:(1) 乔木林(常绿落叶混交阔叶林, FO), 林内乔木层、灌木层和草本层高度分化, 并进一步分化为乔木层和亚乔木层, 其优势层乔木树种平均高度达 17m 以上, 物种优势非常突出, 以圆果化香(*Platycarya longipes*)、白栎(*Quercus fabri*)为绝对优势树种。(2) 灌木林(SR), 具有完整的灌木层和草本层, 灌木层覆盖度 70.4%, 群落高度至 1.3m, 主要优势种为小果蔷薇(*Rosa cymosa*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、竹叶椒(*Zanthoxylum*)。(3) 灌草丛(GS), 其主要优势种与灌木林相似, 但其植被覆盖率及物种丰富度较灌木林显著下降。

1.3 样品采集及制备方法

2007 年 7 月, 在由不同植被类型覆盖的 3 个山丘上, 分别选择海拔、坡向、坡度均相近的样地, 在样地的范围内进行网格法样块采样。按垂直方向间距 10m, 水平方向间距 20m 划定样块, 纵向和横向每隔 2m 为一个土壤采样点, 每样块共采样 50 个(部分网格点由于基岩裸露而无法采集到土壤样品, 每样块实际土样数不足 50 个)。最后在乔木林内采集到土壤样品 37 个, 灌木林和灌草丛分别采集到样本 44 和 48 个。

采集样品时先除去地表凋落物, 后用 Eijkelkamp 土钻取表层(0~10cm 深度)土壤样品, 装入塑料自封袋内带回实验室, 自然风干, 捡去根、石砾和任何侵入体后磨碎过筛, 供土壤性质测定。

1.4 分析方法

土壤样品分析方法采用《土壤农化分析方法》^[12]。土壤有机质测定采用浓硫酸-重铬酸钾外加法, 土壤全氮采用浓硫酸消煮-凯氏定氮法, 碱解氮采用碱解扩散法测定, 土壤全磷采用浓硫酸-高氯酸消煮钼锑抗比色法, 速效磷采用 Olsen-P 法测定。

1.5 数据处理与统计分析

本实验数据分析采用 Excel2003 及 SPSS13.0 进行统计分析和检验。统计分析采用方差分析(ANOVA)和多重比较以判断植被对土壤养分的影响。方差分析前, 检验各组数值是否满足正态分布及方差是否具有齐性, 如不满足, 对相应数值进行转换以满足方差分析要求。方差分析结束后, 采用 Tukey 检验对各水平均值进行比较。

2 结果与分析

2.1 不同植被下土壤养分库变化

不同生态系统植被下土壤养分含量表现出明显差异(表 2)。土壤有机碳、全氮和全磷的平均含量均为乔木林 > 灌木林 ≈ 灌草丛, 其中灌木林和灌草丛土壤有机碳、全氮含量比乔木林分别降低了约 26% 和 20%, 而全磷含量则降低了 30% 以上。同时, 土壤氮素和磷素的有效态平均含量依下序变化: 乔木林 > 灌木林 > 灌草丛。土壤碱解氮含量在灌木林下比乔木林下降低 20% 以上, 灌草丛下比灌木林下降低约 30%。而速效磷含量在灌木林下比乔木林下降低 30% 以上, 灌草丛下比灌木林下降低了近 40%。这些结果说明, 植被保护较好的乔木林中保存有较高的全效和有效态养分库; 就养分全量来说, 土壤全磷在不同植被下的变化较全氮和有机质含量强烈; 同一个养分元素, 有效态含量的变化又较全量明显强烈。在所有分析的 3 个生命元素中, 由乔木林到灌草丛, 磷库(全磷和速效磷含量)的消减(降幅达 40%)显著强于有机质和氮素。

表 2 不同植被类型下喀斯特生态系统表土养分元素含量统计

Table 2 Soil pool of organic C, N and P under different vegetation types in the karst ecosystems

样地 Sampling quadrom	有机碳 Organic carbon (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	碱解氮 Alkaline-dehydrolysed N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)
FO	65.56 ± 10.74 A	5.19 ± 0.92 A	0.28 ± 0.089 A	430.46 ± 87.22 A	3.96 ± 1.28 A
SR	49.68 ± 20.50 B	4.30 ± 1.38 B	0.19 ± 0.038 B	338.79 ± 73.23 B	2.55 ± 0.79 B
GS	51.32 ± 11.70 B	4.07 ± 0.83 B	0.19 ± 0.037 B	244.60 ± 72.39 C	1.66 ± 0.57 C

表中数值为平均值 ± 标准差, 同列不同字母表示 1% 水平上的差异 (Tukey 检验) Data are means ± SD; Different letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.01$ (Tukey test)

2.2 土壤养分库空间异质性

对不同植被类型间土壤有机碳和全效态氮、磷养分异质性特征变化进行了分析,结果如图 1 所示。正态性检验(Kolmogorov-Smirnov)结果表明,土壤有机碳和全氮含量在乔木林和灌木丛下服从正态分布,灌木林下服从右偏态分布;而土壤全磷含量则在乔木林和灌木林下服从正态分布,在灌木丛服从右偏态分布(图 3)。

从变异系数来看,乔木林中土壤有机碳和全氮的变异系数均为 18%,小于灌木林下(35% 和 32%),也小于灌木丛下(21% 和 20%)。土壤全磷在乔木林中的变异系数为 31%,明显高于灌木林和灌木丛的 20%。土壤速效磷在乔木林和灌木林的变异系数为 32%,灌木丛中为 34%。总体上看,灌木林中的土壤养分空间异质性最高,养分因子中土壤速效磷的空间异质性最大,这显示灌木对土壤养分的空间异质化作用较为显著,植被对土壤磷素的空间变异性影响显著。

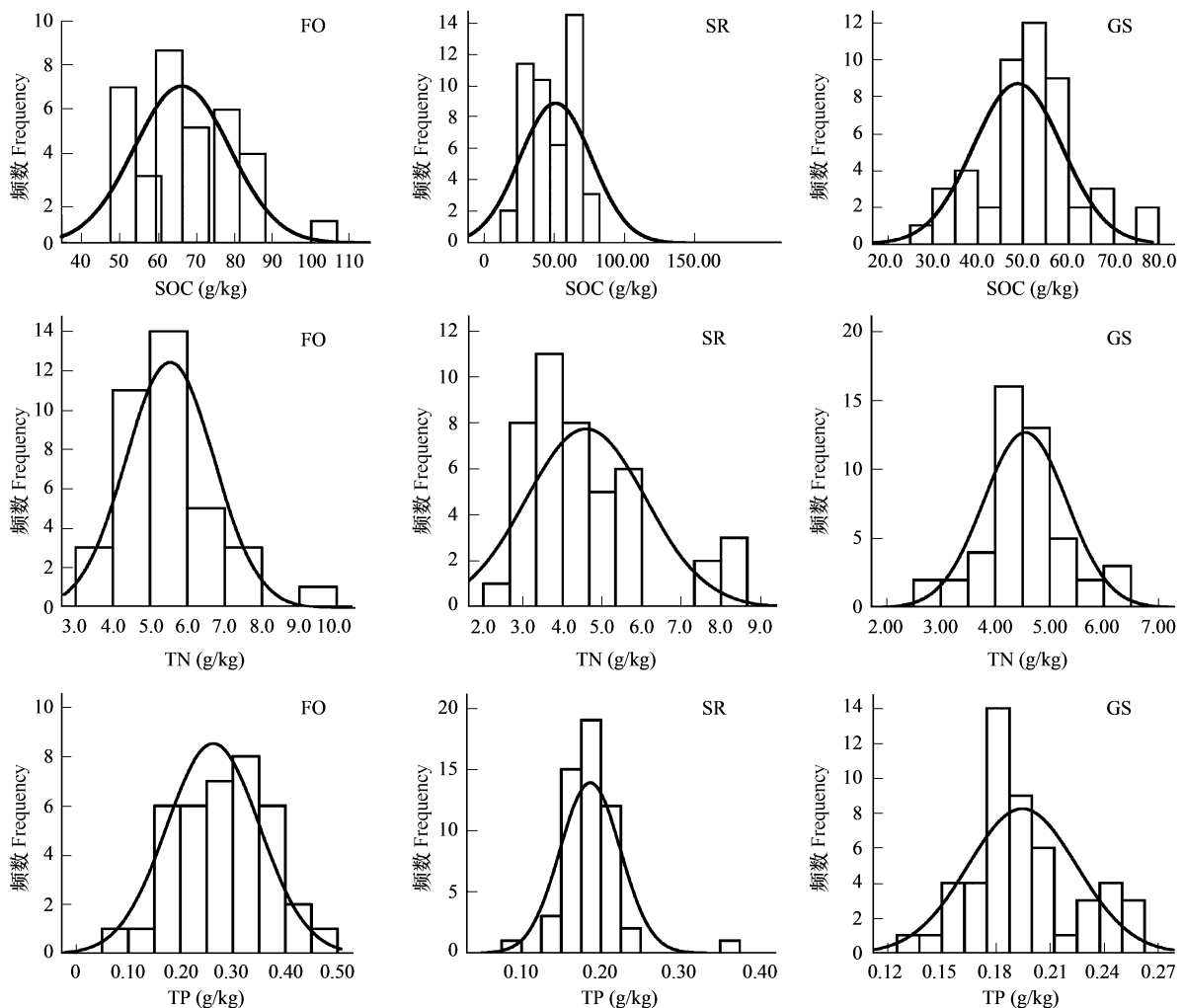


图 1 3 个植被样地土壤有机碳含量、全氮含量和全磷含量的频数分布图

Fig. 1 Frequency distributions of soil organic carbon, total N and total P of the three studied vegetation plots

FO: 乔木林 Forest, SR: 灌木林 Shrub, GS: 灌木丛 Shrub-grassland, SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon, TN: 土壤全氮 Total nitrogen, TP: 土壤全磷 Total phosphorus

有效态氮、磷养分含量频数分布如图 2 所示。正态性检验分析表明,土壤碱解氮含量在乔木林和灌木林中服从正态分布,灌木丛服从右偏态分布。土壤速效磷含量在灌木林和灌木丛中服从正态分布,乔木林中服从右偏态分布。

碱解氮在乔木林中变异系数为 30%,大于灌木林(22%)和灌木丛(20%);土壤速效磷的变异系数在乔木

林和灌木林中为 32%, 略小于灌草丛(34%)。不同的有效态养分含量空间异质性特征不同, 土壤速效磷含量在乔木林中均值为 3.96 mg/kg, 灌木林中为 2.55 mg/kg, 84% 的样本的土壤速效磷含量在 2.0 ~ 3.5 mg/kg, 灌草丛中为 1.66 mg/kg, 近 85% 样本的土壤速效磷含量在 2.0 mg/kg 以下。有效态磷素特征表现为低含量和高空间变异性。所以, 在研究的 3 种生命元素中, 磷素对喀斯特生态系统植被演替的响应最为敏感。

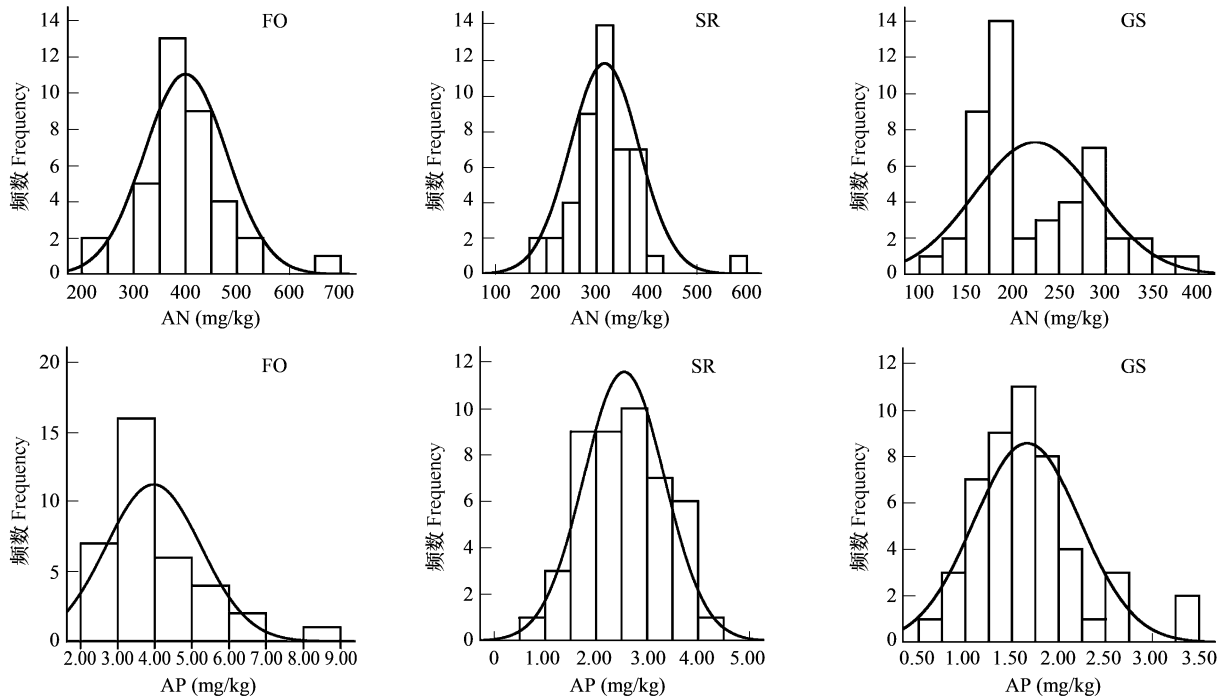


图 2 3 个样地土壤碱解氮含量和速效磷含量的频数分布图

Fig. 2 Frequency distributions of soil alkaline hydrolytic nitrogen and available phosphorus of the studied 3 vegetation plots

FO: 乔木林 Forest, SR: 灌木林 Shrub, GS: 灌草丛 Shrub-grassland, AN: 碱解氮 alkaline hydrolytic nitrogen, AP: 速效磷 available phosphorus

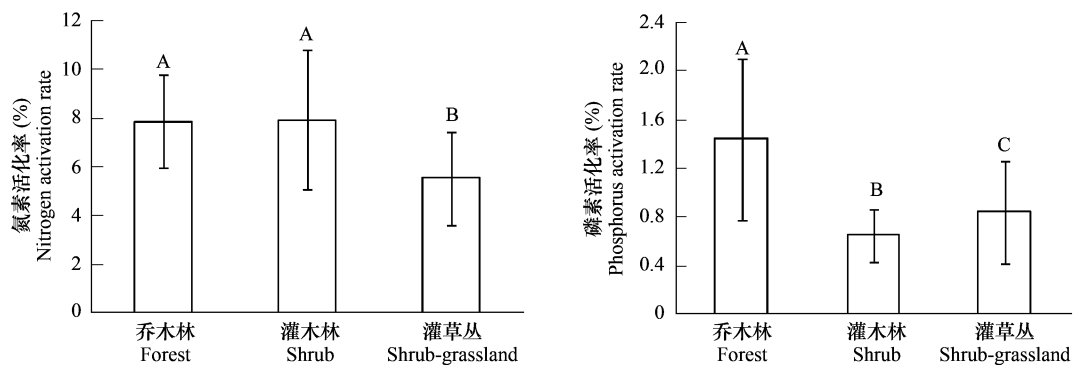


图 3 不同植被类型下的土壤有效态养分有效性的变化

Fig. 3 Change of nutrient activation rate under different vegetation types

不同字母表示不同植被类型间的显著性差异 Different letters on the column indicate significant differences at $P < 0.01$ (Tukey test)

3 讨论

3.1 不同植被下土壤养分库与潜在供应特点

在自然条件下, 植被生产力及植物群落的物种组成大都受到养分的限制, 由于氮素和磷素在植物物质合成方面的重要作用, 氮素和磷素在退化植被中的限制作用更为明显^[13,14]。生态系统中植物养分的主要来源

是土壤,所以土壤中养分库影响着地上植被群落的结构和生产力功能。土壤养分全量是该元素土壤中各种形态含量的总和,一定程度上可以代表土壤的养分供应的潜在水平。而有效养分是指土壤中易被植物吸收利用的养分元素或化合物的数量,其含量可反映土壤中可提供植物易吸收和同化的养分元素或化合物的程度或能力。为比较元素的土壤有效供应水平,这里把有效态养分含量占全量的比率作为该元素有效性指标。计算结果如图3所示,氮素的有效性在乔木林和灌木林中显著高于灌草丛($P < 0.01$),由乔木林到灌木林,土壤氮素有效性无显著变化($P > 0.05$)。乔木林下土壤磷素有效性在退化为灌木林后显著降低($P < 0.01$),但从灌木林演替为灌草丛后,土壤磷素有效性反而显著提高($P < 0.01$)。这可能是由于灌草丛中的土壤磷素极度贫乏,为适应这种低磷生境,植物和微生物通过形成菌根和分泌根系分泌物等方式提高对土壤磷素的利用率^[15],从而表现为土壤磷素有效性的提高。

将养分有效供给率与养分含量空间异质性进行比较分析后发现,养分有效性的空间异质性大幅增加,乔木林、灌木林和灌草丛中氮素有效性的变异系数分别为达24.09%、36.00%和34.52%,磷素有效性变异系数分别为46.36%、33.71%和50.1%。植被演替后土壤在空间上有效养分的异质化程度增加,土壤养分活化过程可能受多种因素的影响和控制,这些因素在空间上具有较高异质性。

从3种不同植被类型覆盖下土壤C、N、P元素含量及空间异质性特征的变化可看出:各植被类型下的土壤速效磷素含量均极低,随着植被的退化,土壤速效磷含量显著下降,植被的退化加剧了土壤速效磷的贫瘠化。已有研究表明,在许多自然生态系统,植物和微生物的生长和活动也受到磷素限制^[16]。而植物群落的格局和结构的改变后,通过改变凋落物的量与质以及非生物的环境条件,影响土壤过程,从而改变土壤养分的循环^[17~19]。在此过程中,土壤养分含量和调节能力的不断降低,使植被群落朝着耐贫瘠和干旱的群落类型方向发展^[20],植被的这些变化对土壤有机碳和氮、磷养分的影响是显著的,彻底改变了土壤和植物之间原有的相互关系。在该系统中土壤磷素的极度缺乏使具有高效磷素利用率的植物类型成为演替后的优势种导致生态系统内优势植被的变化,磷素成为整个系统的首要限制因子,由此可见,恢复土壤磷素特别是速效磷素含量对恢复和重建生态系统具有重要意义。

3.2 土壤养分空间异质特征

空间异质性反映了生态格局和生态过程的内在特性,生态因子在空间上的分布受多种作用的影响,土壤性质在空间上的变异产生了其结构功能上的差异^[8],研究土壤养分的空间变异性有利于探讨土壤性质与环境因子间的关系。研究发现,不同植被类型覆盖下土壤养分空间异质特征变化显著。就植被类型而言,植物群落的组成和群落中植物个体的分布格局制约着土壤结构和元素的异质化过程^[21]。相较于乔木林与灌草丛,灌木林下的土壤养分空间异质性最大。这可能是因为,当植被由乔木林演替为灌木林后,灌木成为新的优势种,灌木植物通过对土壤资源的吸收和沉积,将有机物质集中于其冠层下土壤中,对养分的空间分布和循环产生影响,使土壤资源异质性增强^[22],导致土壤养分资源的重新分配,土壤养分空间异质性也大大增加。

元素在生态系统中的分布特征可以反应该元素形态在受外界因素的影响后的变化程度,在所有养分因子中,土壤速效磷的空间异质性最大。植被对磷素利用能力的差异可能是导致土壤速效磷素资源空间分配异质最大的主要原因。植物群落的组成和分布格局制约着土壤组成的异质化过程,反过来土壤性质的空间分布的改变也制约着地上植被生产力和结构,土壤养分的异质性提高可能导致景观异质化形成破碎的景观^[23],进一步加剧生态系统脆弱化。空间上较均匀的土壤养分资源分布可为植被提供较为均匀而稳定的养分,维持地上植被群落结构和稳定。

由于本研究选取的是以气候、地形和母质相似条件下由不同植被类型覆盖下的土壤,主要关注小尺度上植被对土壤养分的影响。在喀斯特地区特殊的二元结构体系和地貌特点,决定了土壤养分异质性来自多方面,在大尺度上,地形和母质等因素对土壤养分在空间上的异质的影响可能更大^[24],而在小尺度上,植被对土壤养分含量与空间异质性的影响也是显著的。

3.3 不同植被下土壤养分元素关系

为探讨影响C、N、P元素有效态和全效养分因子间的关系及影响因素,对数据进行因子分析(factor analy-

sis)。因子分析前进行 KMO 和 Bartlett's 检验,其检验结果为 KMO 值为 0.692, Bartlett's 球形检验值为 160.032, $df = 10$, 达显著性水平 ($P < 0.01$), 数据适合进行因子分析(表 3)。

从表 3 中因素组型的负荷量可以判断在生态系统内的养分元素主要受两大因素影响。碱解氮,全磷和速效磷等养分因子属于因素一,而有机碳和全氮养分因子属于因素二。碱解氮和速效磷含量主要决定于土壤生物化学活性,而影响全磷的主要因素为成土母质,所以将因素一命名为土壤因素。影响土壤有机碳和全氮的主要因素是植被的生物量归还量,所以将因素二命名为植被因素。属同一因素内的各因子间关系紧密,有机碳和氮素在生态系统中相互影响,相互制约^[25],但都受到植被凋落物的显著影响。此外植被还可通过影响土壤温度、水分条件以及其它非生物因子等方式,间接引发土壤微生物、土壤动物种类组成和结构的变化^[26,27],进一步作用于土壤有机碳和氮磷养分元素的主要生物地球化学循环环节,从而影响到土壤养分的活性与分布。

4 结论

本研究对喀斯特地区不同植被类型覆盖下的土壤有机碳及氮、磷元素变化及空间异质特征进行的初步探讨。结果表明,不同植被类型下土壤养分变化显著,其中乔木林中土壤各养分库均为最高,而灌草丛中为最低。而灌木林土壤养分因子的空间变异受到植被结构和分布影响,变异性为最高。在 3 个生态系统中均表现出植被类型的变化对土壤有效态养分的影响较全量养分显著,在生态系统养分循环研究中应更关注有效养分的变化。土壤速效磷在含量和空间异质性上灵敏地响应植被类型的演替,在该系统中土壤磷素可能作为首要限制性因子影响到植被结构和功能。此外,土壤中碳、氮关系紧密,且主要受植被因素影响,速效养分的含量可能更多受到土壤生物化学活性控制。植被通过改变凋落物的质与量和非生物环境等方式影响生态系统内土壤养分资源的循环和分布,土壤养分资源的量及空间分布也会反过来影响植被群落结构及分布。喀斯特生态系统中维持土壤有效养分资源的供应,特别是速效磷的供应对维持整个生态系统的稳定具有重要意义。

References:

- [1] Orazinska D L, Bardgett R D, Blauw M B, *et al.* Relationships at the aboveground below ground interface: plants, soil biota, and soil processes. *Ecological Monographs*, 2003, 73 (3): 377—395.
- [2] Pablo L P, Ver nica G, Pastur G M. Above- and belowground nutrients storage and biomass accumulation in marginal *Nothofagus antarctica* forests in Southern Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255 (7): 2502—2511.
- [3] Yuan D X. *China Karstology*. Beijing: Geology Press, 1993. 1—30.
- [4] Pan G X, Cao J H. Karstification in epikarst zone: the earth surface ecosystem processes taking soil as a medium-case of the YaJi karst experiment site, GuiLin. *Carsologica Sinica*, 1999, 18 (4): 287—296.
- [5] Long J, Jiang X L, Deng Q Q, *et al.* Characteristics of soil rocky desertification in the karst region Of Guizhou Province. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (3): 419—427.
- [6] Liu F, Wang S J, Liu Y S, *et al.* Changes of soil quality in the process of karst rocky desertification ion and evaluation of impact on ecological environment. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (3): 639—644.
- [7] Wu H Y, Peng W X, Song T Q, *et al.* Changes of soil nutrients in process of natural vegetation restoration in karst disturbed area in northwest Guangxi. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22 (4): 143—147.
- [8] Ren J C, Zhang P J, Pan G X, *et al.* Indices of eco-geochemical characteristics in a degradation-reclamation sequence of soils in mountainous karst

表 3 五个养分指标变量的因子分析结果

Table 3 Results of analysis on five soil fertile indicators by factor analysis

变量 Variance	因素 Factor		共同性 Communalities
	土壤因素 Soil factor	植被因素 Plant factor	
1 有机碳 SOC	0.079	0.845 *	0.721
2 全氮 TN	0.231	0.778 *	0.685
3. 碱解氮 AN	0.667 *	0.330	0.554
4. 全磷 TP	0.880 *	-0.007	0.774
5. 速效磷 AP	0.861 *	0.234	0.796
特征值 Eigenvalues	2.466	1.038	3.504
解释异质量 Explained variance values	49.310%	20.758%	
累计解释异质量 Cumulative explained variance values	49.310%	70.068%	

- area: a case study in Guanling-Zhenfeng region, Guizhou, China. *Advances in Earth Science*, 2006, 21 (5): 504 — 512.
- [9] Zhang W, Chen H S, Wang K L, *et al.* Spatial variability of soil organic carbon and available phosphorus in a typical Karst depression, northwest of Guangxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (12): 5169 — 5175.
- [10] Liu F, Wang S J, Luo H B, *et al.* Micro-habitats in karst forest ecosystem and variability of soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (6): 1055 — 1062.
- [11] Si B, Yao X H, Ren H D, *et al.* Species composition and diversity in the process of natural succession of karst vegetation in central Guizhou: case study of Puding country in Guizhou. *Forest Research*, 2008, 21 (5): 669 — 674.
- [12] Lu R K, ed. *Methods of soil and Agro-Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Technology Press, 2000. 106 — 185.
- [13] Jian Chen, John M Stark. Plant species effects and carbon and nitrogen cycling in a sagebrush crested wheatgrass soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32 (1): 47 — 57.
- [14] Chen F S, Zeng D H, He X Y. Soil nitrogen transformation and cycling in forest ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23 (5): 126 — 133.
- [15] Zhao Q, Zeng D H. Phosphorus cycling in terrestrial ecosystems and its controlling factors. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29 (1): 153 — 163.
- [16] Cleveland C C, Townsend A R, Schmidt S K. Phosphorus limitation on microbial process in moist tropical forests: evidence from short-term laboratory incubation and field studies. *Ecosystems*, 2002, 5 (7): 680 — 691.
- [17] Nilsson C, Xiong S, Johansson M E, *et al.* Effects of leaf-litter accumulation on riparian plant diversity across Europe. *Ecology*, 1999, 80 (5): 1770 — 1775.
- [18] Huttel R F, Schaa F W. Nutrient supply of forest soils in relation to management and site history. *Plant & Soil*, 1995, 169 (1): 31 — 41.
- [19] Yan E R, Wang X H, Zhou W. characteristics of litterfall in relation to soil nutrients in mature and degraded evergreen broad-leaved forests of Tiantong east China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32 (1): 1 — 12.
- [20] Gang W, Jing W, Hong B D, *et al.* Nutrient cycling in an Alpine tundra ecosystem on Changbai Mountain, Northeast China. *Applied Soil Ecology*, 2006, 32 (2): 199 — 209.
- [21] Chen X L, An S Q, Li Y, *et al.* The individual distribution patterns and soil elements heterogeneity during the degradation of grassland in Ordos. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27 (4): 503 — 509.
- [22] Xiong X G, Han X G. Spatial heterogeneity in soil carbon and nitrogen resources, caused by *Caragana microphylla*, in the thickening of semiarid grassland, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (7): 1678 — 1683.
- [23] Robertson G P, Crum J R, Eillis BG. The spatial variability of soil resources following long-term disturbance. *Oecologia*, 1993, 96 (4): 451 — 456.
- [24] Wang k L, Su Y R, Zeng F P, *et al.* Ecological process and vegetation restoration in karst region of southwest China. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, 29 (6): 641 — 645.
- [25] Peng Q, Dong Y S, Qi Y C. Influence of external nitrogen input on key processes of carbon cycle in terrestrial ecosystem. *Advance in Earth Sciences*, 2008, 23 (8): 874 — 882.
- [26] María C. R J, Mitchell A T. Vegetation structure, species diversity, and ecosystem processes as measures of restoration success. *Forest Ecology and Management*, 2005, 21 (8): 159 — 173.
- [27] Yan E R, Wang X H, Chen X Y. Impacts of evergreen broad-leaved forest, degradation on soil nutrients and carbon pools in Tiantong, Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (4): 1646 — 1655.

参考文献:

- [3] 袁道先. 中国岩溶学. 北京:地质出版社, 1993. 1 ~ 30
- [4] 潘根兴,曹建华. 表层带岩溶作用:以土壤为媒介的地球表层生态系统过程——以桂林峰丛洼地岩溶系统为例. *中国岩溶*, 1999, 18 (4): 287 ~ 296.
- [5] 龙健,江新荣,邓启琼,刘方. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究. *土壤学报*, 2005, 42 (3): 419 ~ 427.
- [6] 刘方,王世杰,刘元生,等. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价. *生态学报*, 2005, 25 (3): 639 ~ 644
- [7] 吴海勇,彭晚霞,宋同清,等. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复与土壤养分变化. *水土保持学报*, 2008, 22 (4): 143 ~ 147
- [8] 任京辰,张平究,潘根兴,等. 岩溶土壤的生态地球化学特征及其指示意义——以贵州贞丰-关岭岩溶石山地区为例. *地球科学进展*, 2006, 21 (5): 504 ~ 512

- [9] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 桂西北喀斯特洼地土壤有机碳和速效磷的空间变异. 生态学报, 2007, 27 (12): 5169 ~ 5175.
- [10] 刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性. 土壤学报, 2008, 45(6): 1055 ~ 1062.
- [11] 司彬, 姚小华, 任华东, 等. 黔中喀斯特植被自然演替过程中物种组成及多样性研究——以贵州省普定县为例. 林业科学研究, 2008, 21(5): 669 ~ 674.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 106 ~ 185
- [14] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环. 生态学杂志, 2004, 23 (5): 126 ~ 133.
- [15] 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素. 植物生态学报, 2005, 29(1): 153 ~ 163.
- [18] 闫恩荣, 王希华, 周武. 天童常绿阔叶林不同退化群落的凋落物特征及与土壤养分动态的关系. 植物生态学报, 2008, 32 (1): 1 ~ 12.
- [22] 程晓莉, 安树青, 李远, 等. 鄂尔多斯草地退化过程中个体分布格局与土壤元素异质性. 植物生态学报, 2003, 27(4): 503 ~ 509.
- [23] 熊小刚, 韩兴国. 内蒙古半干旱草原灌丛化过程中小叶锦鸡儿引起的土壤碳、氮资源空间异质性分布. 生态学报, 2005, 25(7): 1678 ~ 1683.
- [25] 王克林, 苏以荣, 曾馥平, 等. 西南喀斯特典型生态系统土壤特征与植被适应性恢复研究. 农业现代化研究, 2008, 29(6): 641 ~ 645.
- [26] 彭琴, 董云社, 齐玉春. 氮输入对陆地生态系统碳循环关键过程的影响. 地球科学进展, 2008, 23(8): 874 ~ 882.
- [27] 闫恩荣, 王希华, 陈小勇. 浙江天童地区常绿阔叶林退化对土壤养分库和碳库的影响. 生态学报, 2007, 27(4): 1646 ~ 1655.