

胡林安, 邱江梅, 李强. 云南岩溶断陷盆地植被演替土壤碳氮磷化学计量学特征[J]. 中国岩溶, 2023, 42(6): 1213-1223.

DOI: [10.11932/karst20230607](https://doi.org/10.11932/karst20230607)

云南岩溶断陷盆地植被演替土壤 碳氮磷化学计量学特征

胡林安^{1,2}, 邱江梅^{1,2}, 李强^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西桂林 541004; 2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西平果 531406)

摘要: 岩溶断陷盆地生态环境脆弱, 石漠化严重, 植被恢复是该地区生态重建、水土保持的有效措施。文章采用空间换时间的方法, 以云南省泸西县岩溶断陷盆地 5 种不同演替阶段(玉米地、人工林、草地、灌木林、原始林)不同土层(0~10、10~20 cm)的土壤为研究对象, 对比分析不同植被类型和不同深度条件下土壤 C(碳)、N(氮)、P(磷)含量及化学计量比差异, 旨在探明研究区土壤养分垂向分布及化学计量学特征, 为该地区植被恢复管理及土地合理利用提供科学依据。结果表明: 不同演替阶段、不同土壤深度土壤养分含量存在较大差异; 随着演替年限的增长, 土壤 SOC(土壤有机碳)、TN(总氮)含量总体呈增长趋势且主要表现在 0~10 cm 深度土层上, 而 TP(总磷)含量存在波动, 未表现出明显变化规律; 各演替阶段 0~10 cm 土层的 SOC、TN 含量数值上均要高于 10~20 cm 土层, 除原始林地以外, 其余演替阶段不同土层间 TP 含量没有显著差异; 在 0~10 cm 土层上, C/N、C/P、N/P 均与土壤 SOC 含量呈显著正相关, C/P、N/P 与土壤 TN 含量呈显著正相关, 土壤 TP 含量与 C/N、C/P 和 N/P 无显著相关性; 植被类型和土壤深度显著影响研究区土壤 SOC、TN 和 TP 含量及其化学计量比。

关键词: 岩溶断陷盆地; 植被演替; 土壤养分; 化学计量学

中图分类号: S153 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)06-1213-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

我国西南岩溶区特殊的地质背景及较低的环境承载和抗干扰能力极易受到不合理的人类活动干扰而导致生态环境退化^[1]。随着该区域人口压力增大, 人地矛盾突出, 高强度的土地开垦导致了植被破坏、水土流失、“石漠化”等一系列生态问题, 严重地威胁到农业生产及居住环境的安全^[2-3]。岩溶断陷盆地是我国西南岩溶区典型的生态脆弱区, 断陷盆地的

地形起伏变化大, 地理环境复杂, 气候垂直分带明显, 是岩溶区生态恢复和重建的重要区域^[4]。恢复与重建退化的岩溶区森林意义重大, 植被恢复能够修复退化的土壤理化性质, 是解决岩溶区退化环境问题的关键^[5]。

C(碳)、N(氮)、P(磷)是土壤主要的营养成分, 它们的含量能够反映土壤质量的变化, 其化学计量比也是反映土壤养分持续供给能力的重要指标^[6-7]。研究表明, 土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)、全

资助项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0502501)

第一作者简介: 胡林安(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事岩溶土壤微生物研究。E-mail: 907174427@qq.com。

通信作者: 李强(1978—), 男, 博士, 研究员。主要从事岩溶生物地球化学研究。E-mail: glqiangli@163.com。

收稿日期: 2022-12-25

氮 (total nitrogen, TN) 和全磷 (total phosphorus, TP) 的含量与植被恢复类型关系密切, 一方面土壤中的 C、N、P 含量可能影响植物群落物种组成, 另一方面植物凋落物和根系分泌物会导致土壤 C、N、P 浓度的差异^[8]。C、N、P 元素在土壤各层之间的不断循环与转化, 调节和驱动着整个岩溶生态系统的演替过程^[9]。不同演替系列中土壤 C、N、P 化学计量学特征能够揭示生态系统中的主要限制性元素, 从而为植被恢复管理提供科学指导^[10]。因此, 研究土壤 C、N、P 计量学特征对了解植物群落与土壤养分之间相互作用关系、认知生态过程对全球气候变化的响应具有重要作用。

生态化学计量学从元素计量的角度分析生物地球化学元素区域循环规律^[11], 为解决生态系统养分供求与循环问题提供了新思路^[12], 在研究土壤养分循环及平衡机制中有着重要的应用价值, 是当前生态学研究的热点之一^[13]。近年来, 国内围绕生态化学计量学的研究主要集中在荒漠草原、黄土高原及闽江河口地区^[14–16]。有关岩溶断陷盆地不同植被演替阶段土壤计量学特征少见系统研究, 其土壤养分及生态化学计量对不同植被恢复类型的响应尚不明确。为阐明岩溶断陷盆地不同演替阶段土壤 C、N、P 元素含量及化学计量比特征, 本研究采用空间换时间的方法, 选择云南泸西县小江岩溶断陷盆地的三塘乡 5 个不同植被演替阶段(玉米地、草地、灌木林、人工林和原始林)的典型植物群落为研究对象, 分析了不同演替阶段土壤中 C、N、P 含量、生态化学计量特征及其相关性, 以期进一步了解植被演替过程中养分的限制和养分的变化规律, 为岩溶山区植被恢复管理及土地资源的合理利用提供科学依据。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic information of sample plots

演替阶段	经度(E)	纬度(N)	海拔高度/m	主要物种
人工林地	103.850°	24.508°	2 314.6	以水冬瓜(<i>Alnus cremastogyne</i>)为主
玉米地	103.851°	24.508°	2 291.0	以玉米作物(<i>Zea mays L.</i>)为主
草地	103.850°	24.508°	2 332.8	有火棘(<i>Pyracantha fortuneana</i> (Maxim.) Li)、针茅(<i>Stipa capillata</i> Linn.)、狗牙根(<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.)、蕨类(<i>Pteridophyta</i>)等
灌木林地	103.853°	24.508°	2 292.2	有檵木(<i>Loropetalum chinense</i> (R. Br.) Oliver)、小果蔷薇(<i>Rosa cymosa</i> Tratt.)、火棘(<i>Pyracantha fortuneana</i> (Maxim.) Li)等
原始林地	103.894°	24.508°	2 341.5	有云南松(<i>Pinus yunnanensis</i>)、小果蔷薇(<i>Rosa cymosa</i> Tratt.)、火棘(<i>Pyracantha fortuneana</i> (Maxim.) Li)等

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省泸西县三塘乡, 地处东经 $103^{\circ}46'13''$ — $103^{\circ}57'20''$, 北纬 $24^{\circ}21'03''$ — $24^{\circ}31'00''$ 之间。区域境内群山蜿蜒起伏, 层峦叠嶂, 沟壑纵横, 地貌复杂。年平均气温 15.2°C , 年平均日照 2 122 h, 年平均降雨量 1 000 mm 左右。区域内主要土壤类型为碳酸盐黄壤, 受侵蚀严重, 区域原有天然森林被破坏后, 主要植被演变为灌木丛和次生林^[17]。近 20 年, 有大量人工林被营造, 主要树种包括侧柏林、赤杨林、云南松林等。

1.2 样地设置与采集

为了研究植被恢复后不同演替阶段各层土壤 SOC、TN 和 TP 含量及其化学计量的动态变化特征, 以阐明植被演替过程与土壤性状演变间的关系, 作者于 2018 年 1 月份, 选择玉米地、草地、人工林、灌木林和原始林等 5 个植被演替不同阶段土壤作为研究样地(样地基本情况见表 1)。每类样地设置 3 个 10 m^2 的样方, 样方间距离 300 m 以上, 以避免假重复, 每个样方采用“S”形 5 点混合样, 按照挖剖面法从不同土壤深度(0~10、10~20 cm)采集土壤样品。同一深度的土壤样品用保温箱保存并带回实验室去除植物根系和碎石等侵入体后, 一部分经自然风干、混匀后, 过 100 目筛, 标记后装入自封袋, 供土壤理化性质分析。

1.3 测定方法

土壤理化性质测定参照《土壤农业化学分析方法》^[18]: SOC 含量采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定; TN 含量采用浓硫酸消煮-凯氏定氮法测定; TP 含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗显色-紫外分光

光度法测定。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 进行数据统计分析, 采用单因素方差分析法 (One-way ANOVA) 进行方差分析, 运用邓肯新复极差法 (LSD) 对不同演替阶段数据进行差异显著性检验 ($\alpha=0.05$), 用 Pearson 分析法分析土壤化学计量指标的相关性, 应用双因素方差分析 (Two-Way ANOVA) 研究土壤深度和植被类型对土壤 SOC、TN、TP 含量及计量学特征的影响, 所有数据均为 3 次重复的平均值。

2 结果分析

2.1 不同演替阶段 SOC、TN 和 TP 的含量比较

由图 1(a. b. c.) 可知, 不同演替阶段土壤碳、氮、

磷含量存在显著差异。在 0~10 cm 深度土层上, 土壤 SOC 含量在原始林地阶段最高, 为 57.56×10^{-3} , 显著高于灌木林、玉米地和人工林阶段 ($P<0.05$), 人工林地土壤 SOC 含量最低, 为 28.85×10^{-3} ; 土壤 TN 含量变化范围为 $2.63 \times 10^{-3} \sim 5.47 \times 10^{-3}$, 表现为人工林<玉米地<草地<原始林<灌木林; 而土壤 TP 含量在玉米地最高, 为 1.1×10^{-3} , 显著高于人工林、草地和原始林阶段 ($P<0.05$), 玉米地与灌木林土壤 TP 含量差异不显著 ($P>0.05$), 人工林土壤 TP 含量最低, 为 0.61×10^{-3} 。总体而言, 随着植被恢复演替的进行, 表土层 (0~10 cm) 土壤 SOC 和 TN 含量表现出增加趋势, 而土壤 TP 含量在各个演替阶段间存在波动。

在 10~20 cm 深度土层, 土壤 SOC 和 TN 含量表现为灌木林>原始林>玉米地>草地>人工林, 整体以处于演替后期的灌木林和原始林阶段高于演替前期的玉米地、草地和人工林阶段。与 0~10 cm 深度土壤

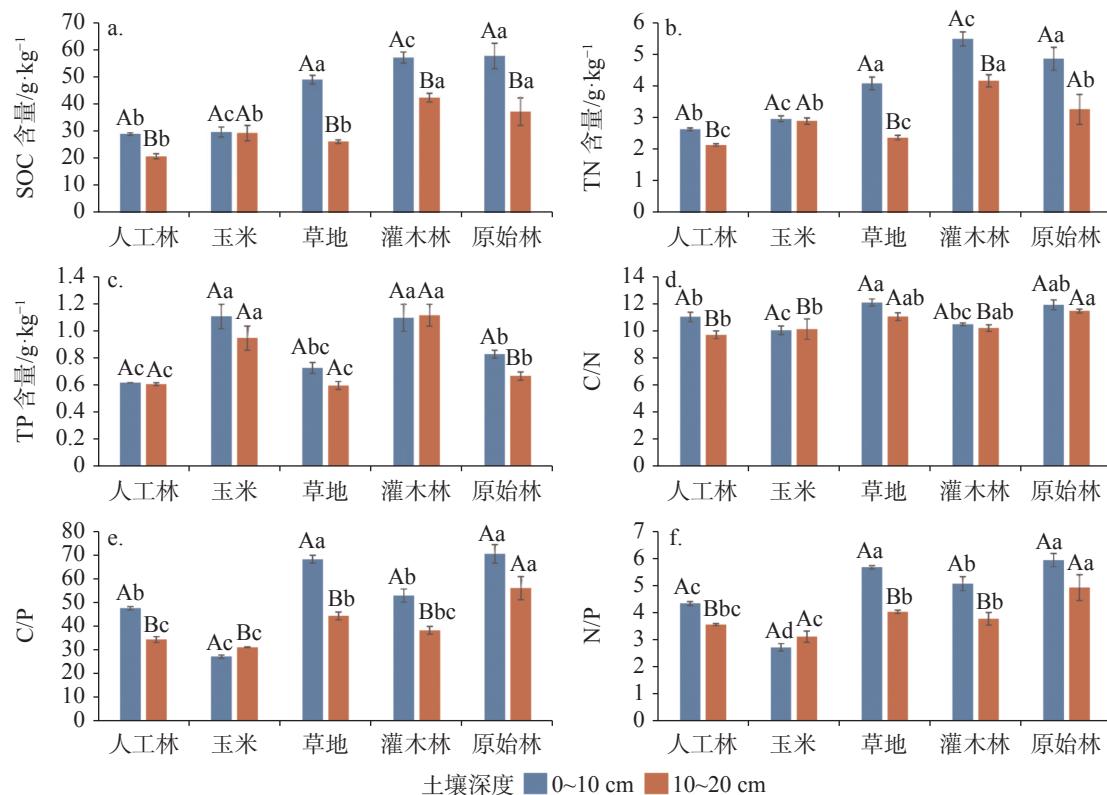


图 1 不同演替阶段土壤 C、N、P 含量及化学计量学特征

注: a. b. c. 分别为不同演替阶段各层土壤 SOC、TN 和 TP 含量, d. e. f. 分别为不同演替阶段各土层 C/N、C/P 和 N/P 比值, 不同大写字母表示同一植被不同深度土壤 SOC、TN、TP 及其化学计量比显著差异 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一深度不同植被土壤 SOC、TN、TP 及其化学计量比显著差异 ($P<0.05$)。

Fig. 1 C, N and P contents in soil and stoichiometric characteristics at different successional stages

Note: a., b. and c. are the respective contents of SOC, TN and TP of each soil layer in different successional stages. d. e. and f. are the respective ratios of C/N, C/P and N/P of each soil layer in different successional stages. Capital letters represent the significant difference of SOC, TN and TP and stoichiometric ratios of the same vegetation in different soil depths ($P<0.05$). Lowercase letters represent the significant difference of SOC, TN and TP and stoichiometric ratios of different vegetation in the same soil depth ($P<0.05$).

相似, 10~20 cm 深度土壤中的全磷含量表现为灌木林和玉米地显著高于人工林、草地和原始林阶段 ($P<0.05$), 且在各个演替阶段间也表现出波动的情况。

不同土层间碳氮含量也存在差异, 人工林、草地、灌木林和原始林地表层土壤 (0~10 cm) SOC、TN 含量显著高于下层土壤 (10~20 cm) ($P<0.05$), 玉米地两土层间 SOC 和 TN 含量虽未见明显差异, 但数值上仍呈降低趋势, 因此, 整体上不同演替阶段表土层 (0~10 cm) 土壤 SOC 和 TN 含量最高且随土层加深相应降低。土壤 TP 含量仅在原始林地阶段土层间表现出显著差异 ($P<0.05$), 玉米地、人工林、草地和灌木林不同土层间土壤 TP 含量差异不明显 ($P>0.05$), 不同土层间 TP 含量的分布较为均匀, 土层间含量差异不大。此外, 土壤 SOC、TN、TP 含量受到了植被类型和土壤深度及其交互作用的显著影响 ($P<0.001$) (表 2)。

2.2 不同演替阶段土壤碳、氮、磷生态化学计量比特征

由图 1(d. e. f.) 可知, 演替过程显著影响了土壤 C/N、C/P 和 N/P。在 0~10 cm 土层上, 不同演替阶

段 C/N 的变化范围为 9.98~11.86, C/P 的变化范围为 26.95~70.34, N/P 的变化范围为 2.71~5.93, 草地和原始林地 C/N、C/P 和 N/P 无显著差异 ($P>0.05$), 与人工林、灌木林和玉米地存在显著差异 ($P<0.05$)。

在 10~20 cm 土层, 不同演替阶段 C/N 的变化范围为 9.64~11.40, C/P 的变化范围为 31.00~55.94, N/P 的变化范围为 3.11~4.92, 原始林地 C/N 与草地和灌木林差异较小 ($P>0.05$), 与人工林和玉米地差异较大 ($P<0.05$), 原始林地 C/P 和 N/P 与人工林、玉米地、草地和灌木林具有显著差异 ($P<0.05$)。

在不同土层间, 不同演替阶段土壤 C/N、C/P 和 N/P 比值随着土壤深度的增加以减少趋势为主, 其中玉米地 C/N、C/P 和 N/P 比值随土壤深度的增加未表现出减少趋势。此外, 由表 2 可以看出, 植被类型和土壤深度及其交互作用对化学计量比具有极显著影响 ($P<0.001$), 其中植被类型和土壤深度的交互作用对 C/N 无显著影响。

2.3 土壤养分与生态化学计量比的相关性

不同植被类型土壤 C、N、P 含量与其生态化学计量比之间相关性分析如表 3 所示。土壤碳氮磷含

表 2 土壤深度、植被类型与土壤 SOC、TN、TP 含量及其化学计量比的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA on the effects of soil depth and vegetation type on SOC, TN and TP contents in soil and their stoichiometric ratios

因素	F值					
	SOC	TN	TP	C/N	C/P	N/P
A	33.987***	21.185***	28.055***	9.114***	61.569***	37.542***
B	64.180***	29.680***	5.266*	7.229*	67.388***	38.581***
A×B	6.052**	3.622*	1.076	1.298	7.482**	6.274**

注: A 表示植被类型, B 表示土壤深度, A×B 表示两者交互作用, *表示 $P<0.05$ 的显著水平, **表示 $P<0.01$ 的显著水平, ***表示 $P<0.001$ 的显著水平。

Note: A represents vegetation type; B represents soil depth; A×B represents interaction between the two; *represents significant level of $P<0.05$; **represents significant level of $P<0.01$; ***represents significant level of $P<0.001$.

表 3 土壤 SOC、TN、TP 含量与其化学计量比的相关性

Table 3 Pearson correlation among SOC, TN and TP contents in soil and their stoichiometric ratios

土壤深度/cm	组分	C/N	C/P	N/P
0~10	SOC	0.449*	0.736**	0.778**
	TN	0.201	0.562*	0.646**
	TP	-0.529	-0.485	-0.439
10~20	SOC	0.338	0.441	0.411
	TN	0.063	0.263	0.306
	TP	-0.105	-0.355	-0.375

注: *表示 $P<0.05$ 的显著水平, **表示 $P<0.01$ 的显著水平。

Note: *represents significant level of $P<0.05$; **represents significant level of $P<0.01$.

量对其计量比的影响主要体现在 0~10 cm 土层上, 表现为土壤 SOC 含量与 C/N、C/P、N/P 呈显著正相关, 土壤 TN 与 C/P、N/P 呈显著正相关, TN 与 C/N 相关性不明显 ($P>0.05$), 土壤 TP 含量与 C/N、C/P、N/P 均呈不显著负相关关系 ($P>0.05$)。

在 10~20 cm 土层中, 土壤 SOC 和 TN 含量与 C/N、C/P、N/P 呈正相关关系, 土壤 TP 含量与 C/N、C/P、N/P 呈负相关关系, 其相关性均不显著 ($P>0.05$)。

3 讨 论

3.1 植被类型对土壤碳氮磷含量的影响

土壤 C、N、P 是土壤的主要营养成分, 它们的含量能够体现土壤生产力的高低和土壤质量的好坏^[19]。研究区不同植被类型 (0~10 cm) 土壤 SOC、TN 含量在 $28.85\times10^{-3} \sim 57.56\times10^{-3}$ 和 $2.63\times10^{-3} \sim 5.47\times10^{-3}$ 范围内, 高于我国 (0~10 cm) 土壤 SOC 和 TN 平均含量 (24.56×10^{-3} 、 1.88×10^{-3})^[20-21]。不同土层间土壤 TP 含量在 $0.59\times10^{-3} \sim 1.1\times10^{-3}$ 范围内, 低于全球土壤 TP 的平均含量 (2.8×10^{-3})^[22], 陶慧敏等^[17]的研究表明, 岩溶地区土壤中普遍缺 P, 本研究结果与其保持一致。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层上, 人工林和玉米地土壤 SOC 含量均远低于灌木林和原始林地土壤, 这主要是由于林地土壤有机养分来源途径是枯落物和采伐残余物, 原始林地和灌木林受人类活动影响少, 枯落物回归土壤, 人工林在采伐时大部分凋落物和采伐残余物没有回归土壤, 林地有机质得不到及时有效补充是导致土壤 SOC 含量下降的主要原因^[23]。玉米地因长期耕作使得土壤团聚体破碎, 土壤有机质的物理保护层遭到破坏, 土壤有机质极易在微生物作用下分解, 使得土壤 SOC 含量降低^[9]。此外, 玉米地收割后, 土地基本处于裸露状态, 在外界因素影响下使得表层土壤淋失、土壤质地粗化、土壤团聚性降低等一系列情况发生, 这些因素最终都会降低土壤碳氮的含量^[24]。土壤中的 N 大部分来源于土壤植物残体分解与合成的有机质, 并且土壤氮素水平一定程度上决定土壤 SOC 含量^[25], 本研究中土壤 SOC、TN 空间变化具有同步性, 李智超^[26]等的相关研究结果也得到了相似的结论, 这是由于土壤微生物在分解凋落物释放养分到土壤的过程中, 首先将有机物的碳骨架破坏, 使得凋落物被分解时同步释放碳氮^[27]。关于植被演替土壤养分变化规律的研究结论

基本一致, 即土壤中主要养分 (SOC、TN 等) 含量随演替进程呈增加趋势^[28]。本研究中, 两土层土壤 SOC 和 TN 含量总体而言随演替进程呈上升趋势, 表土层 (0~10 cm) 尤为明显, 这主要有两个方面的原因: 一方面, 随着演替的进行, 植被枯落物和根系分泌物的增加, 促进了土壤 SOC 和 TN 的积累, 另一方面, 演替过程中人为干扰少同时也减少了土壤碳氮的输出^[29], 表明植被恢复过程一定程度上改善了土壤肥力。在中小尺度上, 人工施肥、耕作方式等随机性因素土是壤磷素空间变异的主因, 而土壤质地、矿化过程、成土过程等结构性因素影响较小^[30]。玉米地两土层土壤 TP 含量均远高于人工林、草地和原始林说明耕作管理和人工施肥等随机性因素是导致其 TP 含量较高的主因。此外, 有研究表明, 气候类型、海拔高度、植被及土壤类型都会影响到土壤中的元素含量^[26, 31], 本研究中土壤 SOC、TN 和 TP 含量与全国或同气候类型区域的差异可能与研究区特殊的地理位置、土壤发育特征等因素有关。

3.2 植被类型对土壤碳氮磷化学计量学特征的影响

研究土壤化学计量特征对于了解土壤质量、揭示土壤养分可获得性具有重要作用^[31]。有机质分解速率主要受到土壤微生物活性影响, 而土壤碳氮含量又会影响到微生物活性, 两者之间相互作用^[12]。前人研究结果表明, 有机质分解速率越高, C/N 越低^[32]。本研究中, 0~10 cm 深度土壤 SOC 含量与 C/N 呈显著正相关 (表 3), 表明土壤 SOC 含量对 C/N 的增加具有促进作用, 符合前人研究规律。0~10 cm 深度土壤 SOC 含量与 N/P、TN 含量与 C/P 之间存在显著正相关关系 (表 3), 这可能与土壤 C、N 之间变化一致性有关。研究区 0~10 cm 土壤 C/N 范围在 9.98~11.89 之间, 10~20 cm 土壤 C/N 在 9.64~11.40 之间, 演替前期土壤 C/N 略低于中国土壤平均 C/N(10~12) 范围^[33], 较低的 C/N 比值表明土壤有机矿化能力和有机质分解能力较好, 不利于有机物的积累。土壤 C/P 是表征土壤磷矿化能力和微生物矿化土壤从环境中吸收磷潜力的指标^[34]。本研究中, 5 种植被类型下 0~10、10~20 cm 深度土壤 C/P 分别在 26.95~70.34 和 31.00~55.94 范围内, 均 <200, 表明研究区土壤有利于微生物分解有机质, 增加养分释放量, 提高了土壤磷的有效性^[35]。土壤 N、P 是植被生长必需的矿质营养元素, N/P 是养分限制的有效预测

指标^[36]。研究区不同演替阶段 0~10 cm 土壤 N/P 介于 2.71~5.93 之间, 10~20 cm 土壤 N/P 介于 3.11~4.92 之间, 前人研究表明, 当土壤 N/P 比值<10 时, 区域植被生长更倾向于受到 N 素限制^[37], 但考虑到本研究区域中, 相较于 N 含量而言, 土壤中 P 的含量相对偏低, 植被生长应首先受到 P 的限制而非 N 的限制, 表明区域植被生长受到了 N、P 的共同限制尤其是 P 的限制。

已有的研究表明, 植被类型是影响土壤 C、N、P 化学计量比的重要因素^[38]。本研究中, 植被类型对土壤 C/N、C/P 和 N/P 比值产生了显著影响(表 2)。其中, 处于演替末期的原始林地 0~10 和 10~20 cm 深度土壤 C/N 比值均显著高于人工林、玉米地(图 1(d、e、f)), 影响土壤 C/N 的主要因素是 SOC 含量, 在 0~10 cm 深度上尤为明显(表 3), 这与原始林地植被覆盖度高, 枯落物量大, 微生物分解枯落物释放的养分大大增加了表层土壤 SOC 含量有关^[39]。同时土壤 SOC 含量的增加率高于 TN, 使得 C/N 比值增大, 有研究也表明地上植被覆盖度与 C/N 比值存在极显著正相关^[40]。在 0~10 和 10~20 cm 深度土层上, C/P 和 N/P 比值均在原始林地最大, 这主要与原始林地土壤较高的 SOC 和 TN 含量有关, 由表 3 可以看出土壤 C/P 和 N/P 与土壤中的 SOC 和 TN 含量呈正相关关系, 在 0~10 cm 深度土层上尤为明显, 表明土壤 SOC 和 TN 含量分别对 C/P 和 N/P 的增加起到了促进作用。何高迅^[8]等的研究结果表明, 随着植被演替的进行, 土壤 C/N、C/P 和 N/P 比值存在逐渐增大的情况。本研究中, 不同演替阶段的 C/N、C/P 和 N/P 比值存在波动无明显变化趋势, 这可能与岩溶土壤异质性高, 各个样点的 SOC 和 TN 含量存在差异有关。此外, 相对于 C/P、N/P 而言, 土壤 C/N 相对稳定, 不同植被类型间 C/N 比值波动范围较小, 原因在于 C、N 元素作为土壤结构性成分, 紧密相关, 其消耗、积累过程存在相对固定的比值, 两者对植被类型变化的响应较为一致^[41]。

3.3 土壤深度变化对土壤碳氮磷含量及其化学计量学特征的影响

土壤深度是土壤 SOC、TN、TP 含量及其化学计量比的影响因素之一^[42~43], 在垂直剖面上, 表层土壤是森林土壤碳、氮主要贮存空间^[44]。研究区不同演替阶段土壤碳氮含量总体随土层深度增加而减少,

表层土(0~10 cm)显著高于底层土(10~20 cm)。其原因主要是由于表层土壤是枯落物和植物根系聚集的土层, 表层土壤通气状况良好, 微生物对枯落物的分解能力强, 枯落物分解释放的养分主要集中在表层, 在受到雨水的淋溶作用时, 土壤表层养分向深层迁移扩散, 随着土壤深度的增加, 养分逐渐减少。此外, 随土层深度增加, 植物根系难以到达, 而根系分泌物也是土壤养分的重要来源^[45], 因此土壤 SOC、TN 出现表层富集现象。与土壤 SOC 和 TN 相比, TP 对土壤深度变化的响应趋势较小(图 1a、b、c), 原因在于磷是一种沉积性矿物, 不利于迁移, 主要受到土壤质地、耕作施肥及成土作用影响^[46]。本研究中, 土壤中 TP 含量相对稳定, C/P、N/P 主要受到土壤 SOC 或 TN 含量的影响, 因此呈现较大的差异。总体而言, 除玉米地以外, 不同植被类型土壤 C/N、C/P、N/P 值均随土壤深度增加而减少, 表明研究区土壤 C/N、C/P、N/P 具有垂直递减性。玉米地 C/N、C/P、N/P 均随土壤深度的增加呈增加趋势, 这可能是由于耕作活动显著的改变了环境因素对土壤 C/N、C/P、N/P 的调控能力, 从而使得土壤 C/N、C/P、N/P 随土壤深度变化呈现复杂的变化规律^[47]。本研究中, 土壤 SOC、TN 和 TP 的含量受到植被类型、土壤深度及其交互作用的显著影响(表 2), 表明植被类型、土壤深度是影响土壤养分分布的重要因素。

4 结 论

通过对对比分析云南泸西县岩溶断陷盆地 5 个不同植被演替阶段 0~10 cm、10~20 cm 两个分土层的土壤 SOC、TN、TP 含量及其化学计量学特征, 结果如下:

(1) 随着演替年限的增长, 5 个不同类型植被土壤 SOC、TN 含量总体呈上升趋势, 主要表现在 0~10 cm 土层上, 土壤 TP 含量在各演替阶段间存在较大差异, 表明研究区植被恢复演替一定程度上改善了土壤肥力;

(2) 在垂直方向上, 土壤 SOC、TN 含量主要集中在表土层(0~10 cm), 随土壤深度增加呈现出减少趋势, 土壤 TP 含量分布较为均匀;

(3) 土壤化学计量学特征随演替进程变化趋势差异较大, 除玉米地以外, 其余各演替阶段 C/N、C/P 和 N/P 数值上均表现为 0~10 cm 土层要高于 10~20 cm

土层;

(4) 研究区植被的生长主要受到土壤 N、P 的共同限制尤其是 P 的限制。

参考文献

- [1] 戴明宏, 张军以, 王腊春, 苏维词, 李阳兵. 岩溶地区土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J]. 生态科学, 2015, 34(3): 189-196.
DAI Minghong, ZHANG Junyi, WANG Lachun, SU Weici, LI Yangbing. A review on impacts of land use/land cover change on water resources in karst areas[J]. Ecological Science, 2015, 34(3): 189-196.
- [2] 李强. 土地利用方式对岩溶断陷盆地土壤细菌和真核生物群落结构的影响[J]. 地球学报, 2021, 42(3): 417-425.
LI Qiang. Land-use types leading to distinct ecological patterns of soil bacterial and Eukaryota communities in karst graben basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(3): 417-425.
- [3] 刘方, 刘元生, 卜通达, 陈祖拥. 贵州喀斯特山区植被演替对土壤有效性氮磷含量及酶活性的影响[J]. 中国岩溶, 2012, 31(1): 31-35.
LIU Fang, LIU Yuansheng, BU Tongda, CHEN Zuyong. Impact of vegetation community succession on available N, P and enzyme activity of the soil in karst hill of Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(1): 31-35.
- [4] 杨慧, 朱同彬, 王修华, 蒲俊兵, 李建鸿, 张淘, 曹建华. 云南断陷盆地高原面典型小流域土壤元素含量特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27(5): 859-865.
YANG Hui, ZHU Tongbin, WANG Xiuhua, PU Junbing, LI Jianhong, ZHANG Tao, CAO Jianhua. Soil element contents of typical small watershed in the plateau area of karst fault basin, Yunnan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(5): 859-865.
- [5] 邓艳, 曹建华, 蒋忠诚, 周晓东, 岳祥飞. 西南岩溶石漠化综合治理水-土-植被关键技术进展与建议[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 476-485.
DENG Yan, CAO Jianhua, JIANG Zhongcheng, ZHOU Xiaodong, YUE Xiangfei. Advancement in key technologies for comprehensive treatment of water, soil and vegetation resources in karst rocky desertification areas[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(5): 476-485.
- [6] 罗美, 周运超, 唐凤华. 不同植被下碳酸盐岩石发育形成土壤属性研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 277-289.
LUO Mei, ZHOU Yunchao, TANG Fenghua. Soil properties of carbonate rocks under different vegetation types[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(2): 277-289.
- [7] 刘玉杰, 王世杰, 刘秀明, 刘方. 茂兰喀斯特植被演替中土壤微生物量碳氮研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 188-195.
LIU Yujie, WANG Shijie, LIU Xiuming, LIU Fang. Research on soil microbial biomass carbon and nitrogen at the different stages of vegetation succession in the Maolan karst area[J]. Earth and Environment, 2011, 39(2): 188-195.
- [8] 何高迅, 王越, 彭淑娴, 郭兆来, 刘嫦娥, 付登高, 段昌群. 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4425-4435.
HE Gaoxun, WANG Yue, PENG Shuxian, GUO Zhaolai, LIU Chang'e, FU Denggao, DUAN Changqun. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks and ecological stoichiometry characteristics of different vegetation restorations in degraded mountainous area of central Yunnan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4425-4435.
- [9] 肖时珍, 何江湖, 曾成, 肖华, 石绍妮. 白云岩喀斯特地区土壤养分及生态化学计量特征[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 76-81.
XIAO Shizhen, HE Jianghu, ZENG Cheng, XIAO Hua, SHI Shaoni. Soil nutrient and ecological stoichiometry characteristic in dolomite karst area[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 41(2): 76-81.
- [10] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 张志钧, 李忠文. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤C、N、P化学计量特征[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6581-6590.
LIU Wande, SU Jianrong, LI Shuaifeng, ZHANG Zhijun, LI Zhongwen. Stoichiometry study of C, N and P in plant and soil at different successional stages of monsoon evergreen broad-leaved forest in Pu'er, Yunnan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [11] 王月玲, 马璠, 许浩, 董立国, 万海霞, 蔡进军. 宁南山区不同年限撂荒梯田土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 25-31.
WANG Yueling, MA Pan, XU Hao, DONG Liguo, WAN Haixia, CAI Jinjun. Stoichiometry of soil C, N, and P in abandoned terrace lands with different years in hilly region of southern Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 25-31.
- [12] 勒佳佳, 苏原, 罗艳, 耿凤展, 朱玉梅, 李凯辉, 刘学军. 围封对天山高寒草原4种植物叶片和土壤化学计量学特征的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1621-1628.
LE Jiajia, SU Yuan, LUO Yan, GENG Fengzhan, ZHU Yumei, LI Kaihui, LIU Xuejun. Effects of enclosure on leaves of four plants and soil stoichiometry in an alpine grassland of Tianshan mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1621-1628.
- [13] 刘敏, 孙经国, 徐兴良. 土壤元素失衡是导致高寒草甸退化的重要诱因[J]. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2574-2580.
LIU Min, SUN Jingguo, XU Xingliang. Imbalance of soil elements drives the degradation of alpine grasslands[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(8): 2574-2580.
- [14] 张超, 马亚亚, 刘国彬, 王杰, 李静. 黄土高原植被恢复过程中土壤微生物的演变特征[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 240-247.
ZHANG Chao, MA Yaya, LIU Guobin, WANG Jie, LI Jing. Evolution of soil microbial community during vegetation restoration in Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conserva-

- tion, 2018, 38(6): 240-247.
- [15] 宁静, 杨磊, 曹建华, 李亮. 基于文献计量分析的岩溶区植被恢复研究现状与热点[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 321-336.
- NING Jing, YANG Lei, CAO Jianhua, LI Liang. Bibliometric analysis of the current research focus on vegetation restoration in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(2): 321-336.
- [16] 郭二辉, 方晓, 马丽, 杨小燕, 杨喜田. 河岸带农田不同恢复年限对土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响: 以温榆河为例[J]. 生态学报, 2020, 40(11): 3785-3794.
- GUO Erhui, FANG Xiao, MA Li, YANG Xiaoyan, YANG Xitian. Effects of different recovery years on the ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in riparian farmland: A case study of Wenyu river[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11): 3785-3794.
- [17] 陶慧敏, 孙宁晓, 温家豪, Umair Muhammad, 袁俊, 杜红梅, 刘春江. 滇南喀斯特地区灌木群落和人工林土壤元素化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9119-9130.
- TAO Huimin, SUN Ningxiao, WEN Jiahao, Umir Muhammad, YUAN Jun, DU Hongmei, Liu Chunjiang. Characteristics of soil stoichiometry in native shrub and plantation communities in karst regions of Yunnan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(24): 9119-9130.
- [18] 鲁如坤. 土壤化学分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [19] 李路, 常亚鹏, 许仲林. 天山雪岭云杉林土壤CNP化学计量特征随水热梯度的变化[J]. 生态学报, 2018, 38(22): 8139-8148.
- LI Lu, CHANG Yapeng, XU Zhonglin. Stoichiometric characteristics of *Picea schrenkiana* forests with a hydrothermal gradient and their correlation with soil physicochemical factors on Tianshan mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(22): 8139-8148.
- [20] Tian Hanqin, Chen Guangsheng, Zhang Chi, Jerry M Melillo, Charles A S Hall. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98: 139-151.
- [21] 李阳兵, 罗光杰, 黄娟. 茂兰喀斯特自然保护区撂荒地时空演变、机制及其植被恢复[J]. 中国岩溶, 2017, 36(4): 447-453.
- LI Yangbing, LUO Guangjie, HUANG Juan. Spatial-temporal evolution, mechanism and vegetation restoration of abandoned farmland in the Maolan national nature reserve[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(4): 447-453.
- [22] 陈柯豪, 杜红梅, 刘春江. 云南喀斯特断陷盆地典型群落植物生态化学计量学特征[J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 883-893.
- CHEN Kehao, DU Hongmei, LIU Chunjiang. Characteristics of leaf ecological stoichiometry in typical plant communities in karst fault-depression basins of Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(6): 883-893.
- [23] 杨承栋. 我国人工林土壤有机质的量和质下降是制约林木生长的关键因子[J]. 林业科学, 2016, 52(12): 1-12.
- YANG Chengdong. Decline of quantity and quality of soil organic matter is the key factor restricting the growth of plantation in China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(12): 1-12.
- [24] 杨帆, 潘成忠, 鞠洪秀. 晋西黄土丘陵区不同土地利用类型对土壤碳氮储量的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 318-324.
- YANG Fan, PAN Chengzhong, JU Hongxiu. Effects of different land use types on storage of soil organic carbon and total nitrogen in western Shanxi hilly Loess Plateau region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(4): 318-324.
- [25] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 邵明安. 黄土高原典型土壤全氮和微生物氮剖面分布特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1020-1027.
- DANG Yaai, LI Shiqing, WANG Guodong, SHAO Ming'an. Distribution characteristics of soil total nitrogen and soil microbial biomass nitrogen for the typical types of soils on the Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6): 1020-1027.
- [26] 李智超, 张勇强, 宋立国, 厚凌宇, 孙启武. 江西大岗山不同林龄杉木人工林土壤碳氮储量[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 116-122.
- LI Zhichao, ZHANG Yongqiang, SONG Liguo, HOU Lingyu, SUN Qiwu. Storage of soil carbon and nitrogen in Chinese fir plantations at different ages in Dagang mountain of Jiangxi Province[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, 39(10): 116-122.
- [27] 张雨鉴, 王克勤, 宋娅丽, 李加文. 滇中亚高山5种林型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(1): 73-82.
- ZHANG Yujian, WANG Keqin, SONG Yali, LI Jiawen. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in five forest types in subalpine of middle Yunnan Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(1): 73-82.
- [28] 任扬航, 马明国, 张霞, 蔡悦, 游茂超. 典型喀斯特石漠化地区植被动态监测与土地利用变化的影响分析[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 550-556.
- REN Yanghang, MA Mingguo, ZHANG Xia, CAI Yue, YOU Maochao. Dynamic monitoring of vegetation and the impact of land use/cover change in the typical karst rocky desertification areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 550-556.
- [29] 成祥. 滇中不同土壤磷素条件下植物群落磷素营养策略与输出特征[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- CHENG Xiang. Phosphorus nutrition strategy and output characteristics of plant communities under different soil phosphorus condition in central Yunnan[D]. Kunming: Yunnan University, 2019.
- [30] 陈志超, 杨小林, 刘昌华. 万安流域不同土地利用类型土壤全磷时空分异特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 857-862.
- CHEN Zhichao, YANG Xiaolin, LIU Changhua. Spatial and temporal variations of soil total phosphorus under different land use types in Wan'an watershed[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(4): 857-862.
- [31] 李义玲, 李太魁, 顾令爽, 杨小林. 紫色土丘陵区小流域不同土地利用方式土壤氮磷储量特征[J]. 安徽农业科学, 2018,

- 46(31): 133-137.
- LI Yiling, LI Taikui, GU Lingshuang, YANG Xiaolin. Characteristics of soil nitrogen and phosphorus reserves of different land use modes of small watershed in purple hilly area[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2018, 46(31): 133-137.
- [32] Clemmensen K E, Bahr A, Ovashainen O, Dahlberg A, Ekblad A, Wallander H, Stenlid J, Finlay R D, Wardle D A, Lindah B D. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest[J]. Science, 2013, 339(6127): 1615-1618.
- [33] An Hui, LI Guoqi. Effects of grazing on carbon and nitrogen in plants and soils in a semiarid desert grassland, China[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(3): 341-349.
- [34] 吴鹏, 崔迎春, 赵文君, 舒德远, 侯贻菊, 丁访军, 杨文斌. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(3): 80-92.
- WU Peng, CUI Yingchun, ZHAO Wenjun, SHU Deyuan, HOU Yiju, DING Fangjun, YANG Wenbin. Characteristics of soil stoichiometric in natural restoration process of Maolan karst forest vegetation, Southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(3): 80-92.
- [35] 陶治, 张元明, 周晓兵. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2239-2248.
- TAO Ye, ZHANG Yuanming, ZHOU Xiaobing. Ecological stoichiometry of surface soil nutrient and its influencing factors in the wild fruit forest in Yili region, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(7): 2239-2248.
- [36] 王建林, 钟志明, 王忠红, 余成群, 沈振西, 张宪洲, 胡兴祥, 大次卓嘎. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 9-19.
- WANG Jianlin, ZHONG Zhiming, WANG Zhonghong, YU Chengqun, SHEN Zhenxi, ZHANG Xianzhou, HU Xingxiang, DACIZHUOGA. Soil C/P distribution characteristics of alpine steppe ecosystems in the Qinhai-Tibetan Plateau[J]. Acta Pratoculturae Sinica, 2014, 23(2): 9-19.
- [37] Zhao Fazhu, Sun Jiao, Ren Chengjie, Kang Di, Deng Jian, Han Xinhui, Yang Gaihe, Feng Yongzhong, Ren Guangxin. Land use change influences soil C, N, and P stoichiometry under 'Grain-to-Green Program' in China[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10195.
- [38] 张光德, 赵传燕, 戎战磊, 毛亚花. 祁连山中部不同植被类型土壤生态化学计量特征研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 533-540.
- ZHANG Guangde, ZHAO Chuanyan, RONG Zhanlei, MAO Yahua. Ecological stoichiometry of soils with different vegetation types in the middle part of the Qilian mountains[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2019, 55(4): 533-540.
- [39] 魏兴琥, 徐喜珍, 雷俐, 周红艳. 粤北岩溶峰林不同地貌部位植被特征研究[J]. 中国岩溶, 2014, 33(4): 441-448.
- WEI Xinghu, XU Xizhen, LEI Li, ZHOU Hongyan. Study on the features of vegetation in different landforms of peak forest plain in the north Guangdong[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(4): 441-448.
- [40] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 林勇明, 马瑞丰, 俞伟, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征: 以云南省小江流域为例[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 675-687.
- ZHANG Guangshuai, DENG Haojun, DU Kun, LIN Yongming, MA Ruifeng, YU Wei, WANG Daojie, WU Chengzhen, HONG Wei. Soil stoichiometry characteristics at different elevation gradients of a mountain in an area with high frequency debris flow: A case study in Xiaojiang watershed, Yunnan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): 675-687.
- [41] 由政, 张鹏, 薛莲, 王国梁, 姚旭. 退耕地植被演替过程对土壤化学计量特征的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(3): 657-661.
- YOU Zheng, ZHANG Peng, XUE Sha, WANG Guoliang, YAO XU. Effect of vegetation succession on abandoned cropland on soil stoichiometry characteristics[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(3): 657-661.
- [42] 彭晓, 方晰, 喻林华, 项文化, 黄志宏. 中亚热带4种森林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(11): 65-72.
- PENG Xiao, FANG Xi, YU Linhua, XIANG Wenhua, HUANG Zhihong. Change characteristic of soil C, N, P stoichiometric ratios in mid-subtropical forests restoration[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(11): 65-72.
- [43] 王慧, 郭月峰, 姚云峰, 祁伟, 秦富仓, 王佳坤. 不同土地利用方式下土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 西南农业学报, 2020, 33(5): 995-1000.
- WANG Hui, GUO Yuefeng, YAO Yunfeng, QI Wei, QIN Fucang, WANG Jiakun. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus under different land use patterns[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(5): 995-1000.
- [44] 韩冰雪, 赵光影, 臧淑英, 邵宗仁. 大兴安岭多年冻土区森林湿地土壤碳氮含量及酶活性研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(13): 136-140.
- HAN Bingxue, ZHAO Guangying, ZANG Shuying, Shao Zongren. Soil carbon and nitrogen contents and enzyme activities in forest wetlands in permafrost regions of Daxing'an mountains[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(13): 136-140.
- [45] 汪宗飞, 郑粉莉. 2018. 黄土高原子午岭地区人工油松林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 38(19): 6870-6880.
- WANG Zongfei, ZHENG Fenli. C, N and P stoichiometric characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantation in the Ziwuling region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): 6870-6880.
- [46] 周俊英. 黄土丘陵区典型种植梯田土壤肥力质量评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- ZHOU Junying. Evaluation of soil fertility quality of typical terraced fields in loess hilly region[D]. Yangling: Northwest Agri-

- culture and Forest University, 2017.
- [47] 王平安, 宫渊奇, 王琪武, 任旭明, 薄夫京, 张芸香, 郭晋平. 不同林龄华北落叶松人工林针叶-凋落叶-土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(6): 1-9.
WANG Ping'an, GONG Yuanqi, WANG Qiwu, REN Xuming, BO Fujing, ZHANG Yunxiang, GUO Jinping. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of needle leaf-leaf litter-soil from *Larix principis-rupprechtii* plantations with different stand ages[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(6): 1-9.

Stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in different stages of vegetation succession at karst graben basin of Yunnan Province, China

HU Lin'an^{1,2}, QIU Jiangmei^{1,2}, LI Qiang^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China)

Abstract The contradiction between humans and land is prominent in the karst area of Southwest China. Human destruction of vegetation eventually leads to serious water loss and soil erosion, resulting in a large number of rocky desertification. In order to control the expansion of rocky desertification, the Chinese government has carried out a series of projects, such as returning farmland to forest, natural forest protection and Yangtze River shelterbelt projects, which have caused corresponding changes in land use and vegetation cover. As one of the most important types of rocky desertification control in China, karst graben basins are usually characterized by drastic changes in basin-mountain topography, great climate contrast, severe soil flow/loss, poor vegetation site conditions, and the slow recovery of community ecosystem. Therefore, the study on the comprehensive control of rocky desertification at the karst graben basin became urgent. The ecological stoichiometry is a state-of-the-art science that analyzes the regional circulation patterns of biogeochemical elements from the perspective of element metrology, which provides a new insight to solve the problem of nutrient supply/demand and circulation in ecosystems. It has important application value in the study of soil nutrient circulation and balance mechanism, and is one of the hot spots in current ecological research. However, domestic studies on ecological stoichiometry mainly select desert steppe, Loess Plateau and Minjiang River estuary as research areas in recent years. There is a paucity of systematic studies on soil metrology characteristics in different stages of vegetation succession at karst graben basins, and the response of soil nutrients and ecological stoichiometry to different types of vegetation restoration is still unclear.

In order to elucidate the content and stoichiometric ratios of C, N and P elements in the soils in different stages of vegetation succession at karst graben basins, Santang, located in Xiaojiang karst basin, Luxi county, Yunnan Province, was selected as a study area. This area is dominated by a subtropical monsoon climate, with the average annual temperature of 15.2 °C, the average annual sunshine of 2,122 h, and the average annual precipitation of 1,000 mm. The main tree species in the study area include *Platycladus orientalis* (L.) Franco, sticky alder, Yunnan pine, and so on. In January 2018, by the "space for time" approach, the soils from 5 different stages of vegetation succession (corn land, grassland, shrub land, planted forest and primary forest) were collected from different soil depths (0–10 cm and 10–20 cm) according to the sampling method of profile excavation. The soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) contents were determined by potassium dichromate oxidation with an external heating method, Kjeldahl method, and molybdenum antimony anti-colorimetric method. Excel 2019 software was used for data statistics. One-Way ANOVA, Duncan's new multiple range test method (LSD), Pearson correlation and Two-way ANOVA in SPSS 25.0 software were used to study the variance and correlations of soil ecological stoichiometric characteristics. The study results are expected to further reveal nutrient restriction and nutrient change patterns in the vegetation succession process, meanwhile, providing the scientific basis for vegetation restoration management and rational use of land resources in karst graben basins.

There were significant differences in soil nutrient contents in different succession stages, mainly manifested in the 0–10 cm soil layer. SOC and TN contents showed an overall increasing trend with the increase of succession years, while TP content fluctuated and showed no obvious change pattern. Soil C and N contents differed significantly among soil layers. Specifically, SOC and TN contents in 0–10 cm soil layer were higher than those in 10–20 cm soil layer at each succession stage. Compared with C and N contents, soil P content did not differ significantly among soil layers at each succession stage, except for the content in the primary forest. In 0–10 cm soil layer, C/N, C/P and N/P showed significantly positive correlations with SOC content; C/P and N/P indicated significantly positive correlations with TN content; soil TP content was not significantly correlated with C/N, C/P and N/P. There was no significant correlation between soil physicochemical properties and soil stoichiometric ratio in the 10–20 cm soil layer. In the present study, the N/P ratios of 0–10 cm soil in different succession stages were between 2.71 and 5.93, and those of 10–20 cm soil were between 3.11 and 4.92. Essentially, all of the N/P ratios of soil at different depths were lower than 10, indicating that vegetation growth in the study area was more likely to be limited by N. However, given the fact that P content in karst soil is relatively low, vegetation growth should be first limited by P rather than N. Moreover, vegetation types and soil depths significantly affected SOC, TN and TP contents and their stoichiometric ratios in the study area. In summary, soil nutrient and stoichiometric ratios at karst graben basins change significantly with vegetation restoration chronosequence, and soil physicochemical properties have an important impact on soil stoichiometric ratios. These results are of great significance for further research on soil nutrient balance and limiting factors in karst graben basins.

Key words karst graben basin, vegetation succession, soil nutrient, stoichiometry

(编辑 张玲)

近 40 年粤港澳大湾区水资源环境演变格局

近日,中国地质调查局岩溶地质研究所联合相关单位,利用多源水资源监测数据(遥感卫星图像、气候模型数据、地面观测数据等),深度挖掘历史文献资料,从地球系统科学视角深入分析了近 40 年来粤港澳大湾区水资源环境的演变格局,研究者采用定性与定量相结合方法,分析大湾区水资源自 1980 年以来的水文、气候、地表覆盖等水资源环境格局变化及区域分异规律,包括大湾区的水体湿地、植被覆盖、地表径流、人口及 GDP 分布等特征,认为粤港澳大湾区水资源状况总体上呈现出“西多东少、北多南少”的分布特征,气候呈现暖湿化、水资源总量减少趋势,部分区域水质污染较严重,水生生物多样性受到一定威胁;植被覆盖度整体上升,局部出现退化;

城市建设用地和人口向珠江三角洲集中,GDP 分布呈现由珠江三角洲向周边递减的特征;大湾区水资源环境存在的主要问题为水资源时空分布不均、以地表水为主的供水水源结构单一、水生态服务功能退化及水资源与经济发展的不协调。

针对粤港澳大湾区面临的水资源环境问题,研究团队提出具有开发远景的 41 处水源地作为应急备用水源,允许开采量达 234.26 万 m³/d。建议用先进的遥感信息技术、水文模拟技术优化水资源监测和评估,利用人工智能和大数据技术合理配置、高效管理水资源,实现粤港澳大湾区水资源的可持续发展。

(供稿 赵良杰)