

岳祥飞, 李衍青, 刘鹏. 广西岩溶区灌木林地凋落物—土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 中国岩溶, 2023, 42(5): 1106-1116.
DOI: 10.11932/karst2023y032

广西岩溶区灌木林地凋落物—土壤碳、氮、磷化学计量特征

岳祥飞^{1,2,3}, 李衍青⁴, 刘鹏⁵

(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. 岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心, 广西 桂林 541004; 3. 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; 4. 广西师范大学环境与资源学院, 广西 桂林 541004; 5. 广西大学林学院, 广西 南宁 530001)

摘要: 文章对广西7个典型岩溶石山区(隆林各族自治县、凌云县、东兰县、河池市金城江区、罗城仫佬族自治县、融水苗族自治县和桂林市雁山区)、63个灌木林地样方土壤及环境因子进行取样和调查, 研究典型岩溶区土壤和凋落物有机碳(C)、全氮(N)和全磷(P)的化学计量特征及其影响因素。结果表明: (1) 研究区灌木林地0~40 cm土壤C、N、P平均值分别为 $31.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $3.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数分别为40.13%、41.46%、65.24%; C/N、C/P、N/P平均值分别为8.10、14.82、7.80, 变异系数分别为14.88%、48.78%和41.33%; 0~20 cm土壤C/N、C/P、N/P值略高于20~40 cm土壤; 0~20 cm和20~40 cm土壤C/N、C/P和N/P组间均存在显著差异; (2) 土壤养分元素含量之间均存在极显著相关性, 土壤养分元素生态化学计量特征与凋落物N、P含量显著正相关, 与凋落物C/N显著负相关; 土壤P含量与海拔显著正相关, 土壤C/N与年平均气温呈负相关关系; 年平均降水量与土壤C、P呈中等负相关关系; 年平均气温与土壤C、C/N、C/P呈负相关关系, 与土壤N呈正相关关系。广西岩溶区土壤和凋落物均具有低碳高磷的特征, 凋落物氮、磷是影响岩溶灌木土壤养分化学计量特征的重要因子, 年均温升高会促进土壤N增加, 降低土壤C/N, 年均降水量增加会降低土壤C、P含量。

关键词: 岩溶区; 化学计量; 土壤; 凋落物; 灌木林

中图分类号: S714 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)05-1106-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

中国西南岩溶区, 是全球三大集中连片岩溶分布区之一, 生态系统极为脆弱。广西是我国岩溶地貌最集中连片的省区之一, 岩溶区面积达8.95万

km^2 , 占全区总面积的38%^[1]。在岩溶石山区, 土壤贫瘠、人地矛盾突出、贫困人口集中, 脆弱的生态环境叠加不合理的人类活动导致该地区出现一系列严重的生态环境问题, 其中以石漠化问题最为突出^[2]。石漠化治理成为生态、文明、经济建设中的一重要

基金项目: 广西自然科学基金面上项目(2018GXNSFAA138172); 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科AA20161004); 中国地质科学院基本科研业务费专项经费资助(2002372017007); 中国地质调查局地质调查项目(DD20230081)

第一作者简介: 岳祥飞(1989—), 男, 助理研究员, 主要从事退化岩溶生态系统恢复相关研究。E-mail: yuexf06@126.com。

通信作者: 李衍青(1982—), 男, 高级工程师, 长期从事岩溶环境学研究。E-mail: yanqingli@mailbox.gxnu.edu.cn。

收稿日期: 2022-09-08

内容,也是生态恢复和重建的重点和难点。

土壤地球化学元素循环中,碳(C)、氮(N)、磷(P)是养分循环的核心,驱动着生态系统的演替^[3]。凋落物是土壤与植物间物质交换的枢纽^[4],土壤为植物提供生长所需的养分元素,植物以凋落物的形式将养分归还给土壤,凋落物的分解是土壤有机质和养分积累的主要形式,对生态系统有机质的储存和养分循环起着重要作用^[4]。掌握水分和养分限制环境下 C、N、P 生态化学计量的关系有助于揭示生态系统植物生长的限制因子、土壤的养分供给能力及养分的有效性等,能更好地揭示生态系统各组分(植物、凋落物和土壤)养分比例的调控机制,认识其在生态系统功能中的作用^[4-5]。

生态系统 C、N、P 等元素的生态化学计量特征研究已成为当前全球变化碳循环研究领域的热点之一^[5-6]。近年来岩溶生态系统生物地球化学特征及循环研究受到越来越多的关注^[7-10]。Song 等^[10]研究岩溶区不同退化程度(演替阶段)植物群落植物—凋落物—土壤—微生物生态化学计量特征;谷佳慧等^[11]研究岩溶区不同土地利用方式土壤碳、氮、磷生态化学计量空间变异特征;刘立斌等^[12]研究岩溶高原次生林植物、凋落物和土壤 C、N、P 生态化学计量特征;王霖娇^[13]探究岩溶典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素;曾昭霞等^[14]对桂西北岩溶森林植物—凋落物—土壤生态化学计量特征进行了较为全面的研究;潘复静等^[15]研究广西典型峰丛洼地植物群落凋落物的 C、N、P 生态化学计量特征。但这些研究主要集中在小尺度岩溶生态系统土壤养分的空间分布特征、石漠化区植被演替过程中土壤养分的变化、不同森林生态系统植物—土壤的特征等方面。而岩溶生态系统分布范围广,生境复杂,植被、土壤异质性高,环境因子对生态化学计量特征的影响仍不清楚,因此开展较大空间尺度、更多植被类型的植物(凋落物)—土壤系统 C、N、P 化学计量学研究仍十分必要。

在岩溶石山区,灌木林地是重要的植被类型之一,在生态系统演替过程中既是一种顶级群落也是一种过渡类型,在岩溶区生态系统中扮演重要角色,开展岩溶区灌木林地 C、N、P 生态化学计量特征研究对生态系统功能维持、石漠化区植被恢复和生态重建有着重要意义。本研究从桂西至桂东选取 7 个

典型岩溶县(区),从较大空间尺度上研究岩溶石山区灌木林地土壤 C、N、P 元素化学计量特征及其变化与主要环境因子的关系,以期了解广西典型岩溶区生态系统的生态化学计量特征及其影响因素,为广西岩溶石漠化区的生态恢复重建和岩溶生态系统响应环境变化研究提供科学依据。

1 研究区概况

以广西壮族自治区隆林各族自治县、凌云县、东兰县、河池市金城江区、罗城仫佬族自治县、融水苗族自治县和桂林市雁山区岩溶峰丛洼地作为研究区(图 1)。隆林各族自治县地处云贵高原的东南边缘,境内海拔较高,以中山为主,海拔在 800~1400 m,属亚热带季风气候,年均温 19.4℃,年均降水量 1 149.4 mm,县域岩溶区面积占比 45.23%;凌云县、东兰县属云贵高原南缘延伸部分,典型的中山地貌类型,海拔为 400~900 m,属亚热带季风气候,年均气温 20.2~20.5℃,年平均降雨量 1 615.0~1 693.0 mm,县域岩溶区占比分别为 43.32% 与 62.23%;河池市金城江区与罗城仫佬族自治县系云贵高原余脉地带,地势自西北向东南倾斜,海拔为 200~600 m,为中亚热带向南亚热带过渡的气候带,年平均气温 18.9~20.4℃,年降水量为 1 470.0~1 566.6 mm,岩溶区占比分别为 83.65% 与 55.21%;融水苗族自治县系云贵高原向东延伸部分,海拔为 100~200 m,属中亚热带季风气候,年均温 19.7℃,年均降水量 1 757.7 mm,县域岩溶区占比 7.21%;桂林市地处桂东北部,具有典型峰林平原地貌,海拔为 100~200 m,属亚热带季风气候,年均温 19.3℃,年均降水量 1 931.3 mm,岩溶区占比 71.14%(表 1)。本研究区岩性以灰岩为主,土壤以黄壤、黄色石灰土为主。

2 研究方法

2.1 土壤样品的采集与测定

分别在隆林县(LL)、凌云县(LY)、东兰县(DL)、河池市(HC)、罗城县(LC)、融水县(RS)和桂林市(GL)主城区外岩溶石山区各选择 9 处灌木林地作为采样地,每个采样地间隔距离大于 5 km,每一个取样点选择 1 个 5 m×5 m 的样方,按照蛇形布点法随机选 3 个采样点,分别取 0~20 cm、20~40 cm 土壤样品

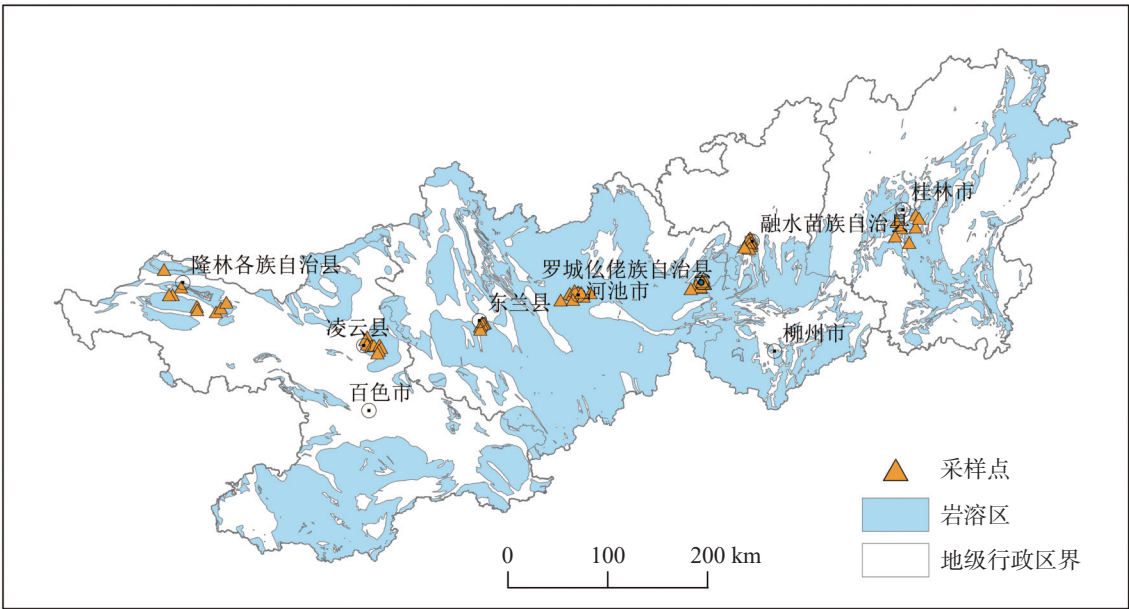


图 1 研究区及采样点分布示意图

Fig. 1 Location of the study area and distribution of sampling points

表 1 采样地环境状况

Table 1 Environmental conditions of the seven sampling regions

采样点	年均温/℃	年降水量/mm	经度	纬度	海拔/m	植被状况
LL	19.4	1 149.4	105°12'17.75"~ 105°38'00.71"	24°34'40.93"~ 24°52'12.92"	842~1 366	植被以灌木、草本植物为主， 植被盖度为60%~70%
LY	20.5	1 693.0	106°35'28.25"~ 106°41'58.96"	24°17'45.96"~ 24°24'25.95"	584~890	植被以灌木、草本植物为主，少量乔木， 植被盖度为70%~90%
DL	20.2	1 615.0	107°22'55.21"~ 107°24'45.17"	24°27'33.66"~ 24°30'17.71"	401~806	植被以灌木、草本植物为主， 植被盖度为50%~70%
HC	20.4	1 489.7	107°56'03.78"~ 108°08'27.44"	24°39'34.45"~ 24°43'28.96"	188~256	植被以灌木、草本植物为主，零星乔木， 植被盖度为60%~80%
LC	19.5	1 540.8	108°49'48.91"~ 108°55'42.43"	24°44'11.79"~ 24°48'38.54"	292~374	植被以灌木、草本植物为主， 植被盖度为70%~90%
RS	19.7	1 757.7	109°12'01.37"~ 109°14'55.63"	25°00'59.25"~ 25°05'14.77"	103~135	植被以灌木、草本植物为主， 植被盖度为50%~70%
GL	19.3	1 931.3	110°14'16.29"~ 110°24'05.22"	25°03'19.20"~ 25°14'44.85"	133~176	植被以稀疏的灌木、草本植物为主， 植被盖度为50%~60%

和土壤表层凋落物样品，均匀混合后分别取 500 g 带回实验室。土壤样品自然风干并研磨过筛(2 mm)备用；凋落物样品带回实验室后，在 80 ℃ 下烘干至恒重，粉碎后备用。测定土壤有机碳(C)、全氮(N)、全磷(P)、土壤酸碱度(pH)及凋落物全碳(C)、全氮(N)、全磷(P)。土壤/植物样品 C、N 的含量均采用德国元素分析仪进行测定 (vario MACRO cube, Germany)，土壤/植物样品 P 含量均经过 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后利用比色法进行测定，土壤 pH 采用 1 : 1 水土比的悬液进行测定 (Multiline F/SET-3, Germany)。

2.2 环境因子调查

在野外调查过程中，对每个采样点进行定位，记录样地经度、纬度、海拔、植被覆盖率、植被类型及生长状况，收集距离采样点最近基本气象站近 20 年的年降水量、年气温数据(表 1)。

2.3 数据处理

采用 SPSS 22.0 软件进行数据分析，采用 Excel 16.0 绘图。土壤及植物 C、N、P 含量均为质量含量，C/N、C/P 和 N/P 均为质量比。对土壤以及凋落物 C、

N、P 含量以及 C/N、C/P、N/P 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 进行比较, 所有统计数据以平均值 $\pm$ 标准差表示 ($M\pm SD$)。对土壤 C、N、P 化学计量特征与环境因子、凋落物 C、N、P 含量进行 Pearson 相关分析。

3 结果与分析

3.1 岩溶石山生态系统土壤 C、N、P 化学计量特征

由图 2 可知, 7 个调查点 63 个灌木林地样方 0~40 cm 土壤 C、N、P 平均值分别为 31.90 ± 12.80

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $3.95\pm 1.64 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.65\pm 1.73 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数分别为 40.13%、41.46%、65.24%。其中 0~20 cm 土壤 C、N、P 含量均值分别为 $36.53\pm 14.26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $4.33\pm 1.66 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.71\pm 1.80 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数分别为 39.03%、38.48% 和 66.52%; 20~40 cm 土壤 C、N、P 含量均值分别为 $27.26\pm 13.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $3.57\pm 1.72 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.57\pm 1.71 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数分别为 48.46%、48.15% 和 66.49%。0~20 cm 土层土壤 C、N 显著高于 20~40 cm 土层 ($P<0.05$), 不同土层土壤 P 含量无显著差异 ($P>0.05$); 土壤 P 含量的变异系数略高于土壤 C 和 N, 而 0~20 cm 土壤 C 和 N 含量变异系数小于 20~40 cm。

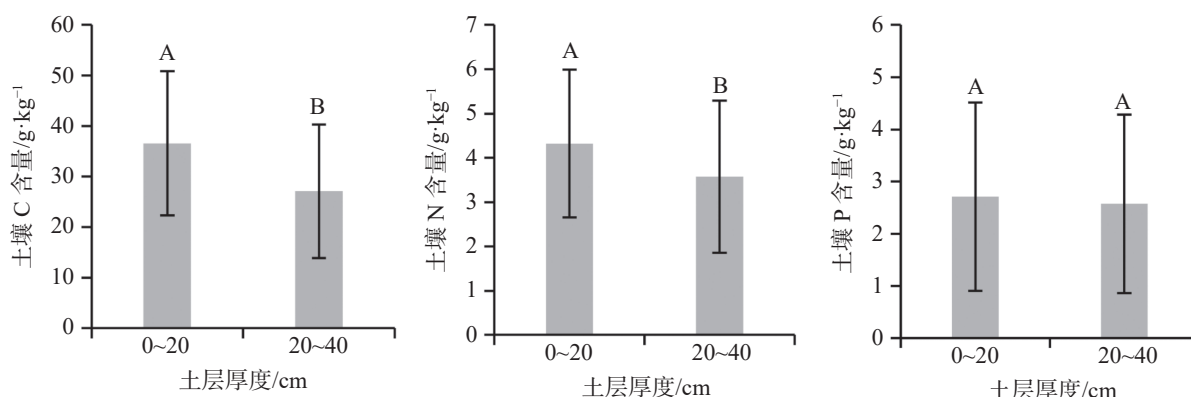


图 2 不同深度土壤 C、N、P 含量

注: 不同大写字母表示同一元素不同土层之间差异显著 ($P<0.05$)。

Fig. 2 Contents of soil C, N and P in different soil layers

Note: Different capital letters represent the significant difference of the same element in different soil layers ($P<0.05$).

由图 3 可知, 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤 C、N 均无显著差异 ($P>0.05$), 土壤 P 均存在显著组间差异 ($P<0.05$), 0~20 cm 土壤全磷含量平均值最大值为 $4.18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (DL), 次高值为 $3.89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (LL), 最小值为 $2.17 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (LC); 20~40 cm 土壤全磷含量最大值为 $3.68 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (LL) 和 $3.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (DL), 最小值为 $1.25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (LC)。

由图 4 可知, 0~40 cm 土壤 C/N、C/P、N/P 平均值分别为 8.10、14.82、1.78, 变异系数分别为 14.88%、48.78% 和 41.38%; 0~20 cm 土壤 C/N、C/P 和 N/P 略高于 20~40 cm 土层。土壤 C/N、C/P、N/P 均存在显著组间差异 ($P<0.05$), 0~20 cm 土壤 C/N 最大值为 9.74 (GL), 最小值为 7.12 (LY), 20~40 cm 土壤 C/N 最高值为 8.71 (LC), 最小值为 6.66 (DL); 土壤 C/P 最大值均出现在 LC 地区, 最小值均出现在 DL 地区; 与土壤 C/P 相似, 土壤 N/P 最大值均出现在 LC 地区,

最小值均出现在 DL 地区。

3.2 凋落物 C、N、P 含量

由图 5 可知, 凋落物 C、N、P 平均值分别为 $416.23 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $13.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.88 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 不同调查点凋落物 C、N、P 存在显著组间差异 ($P<0.05$)。其中 RS 地区凋落物 N 含量最大 ($17.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), LC ($11.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 LY ($11.47 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 含量较小。GL 地区凋落物 C 含量最大 ($435.23 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), LY 地区凋落物 C 含量最小 ($403.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。DL 地区凋落物 P 含量最大 ($1.27 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), LC 地区凋落物 P 含量最小 ($0.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

从桂西的隆林县至桂北的桂林市, 石山植物群落凋落物生态化学计量学指标呈现不同的变化趋势 (图 5)。其中, C 含量呈先减少后增加的趋势 ($R^2=0.8876$), N 含量的变化趋势呈先增加后减少的趋势 ($R^2=$

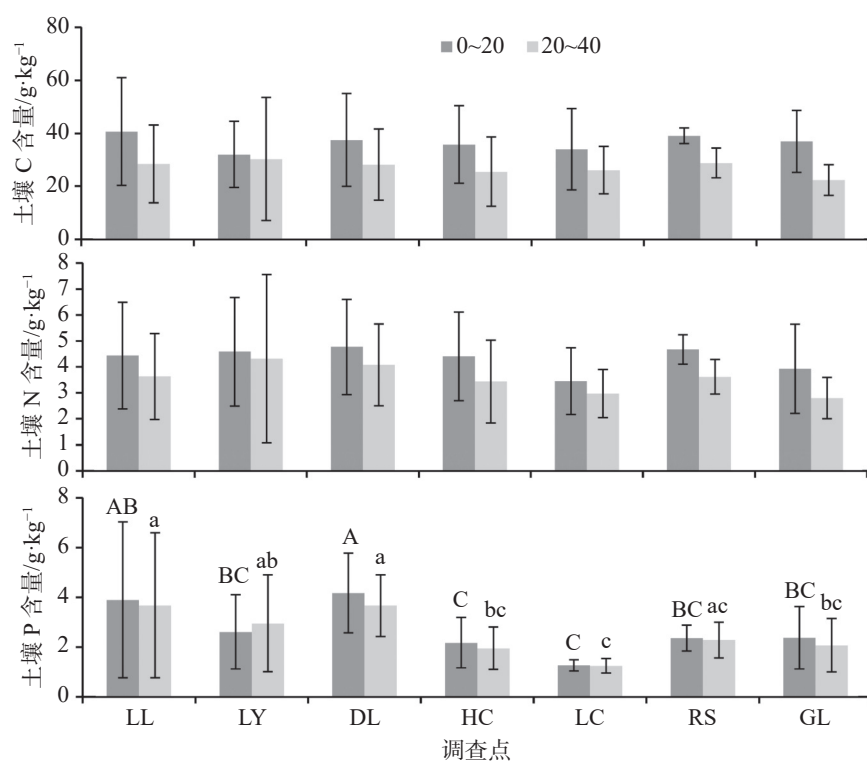


图3 调查点土壤 C、N、P 含量

注: 不同大、小写字母表示同一元素不同样地之间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 3 Contents of C, N and P in the seven sites

Note: Different lowercase and capital letters represent the significant difference of the same element in different sample soils ($P<0.05$).

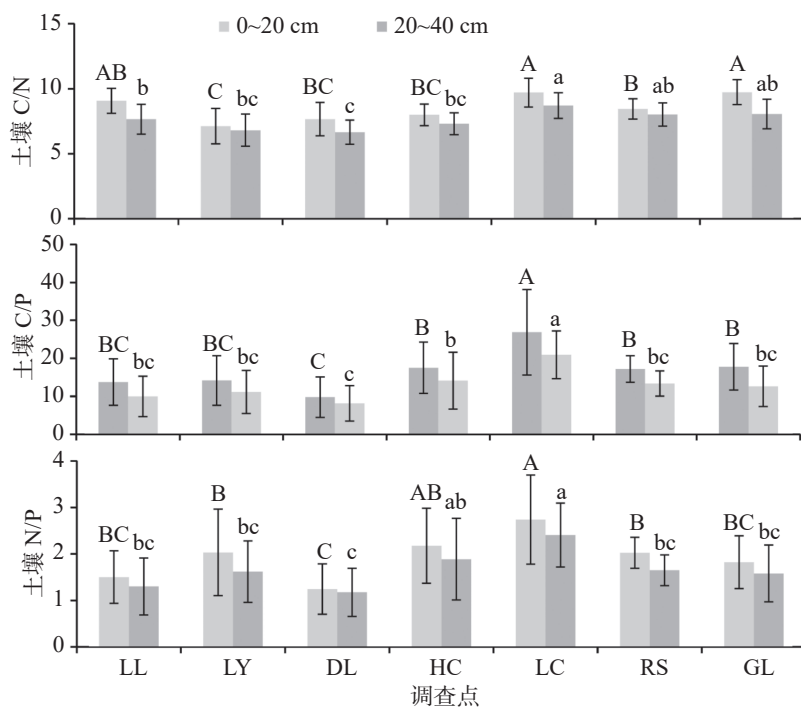


图4 土壤 C/N、C/P 和 N/P

注: 不同大、小写字母表示同一土层元素在不同样地之间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 4 Soil C/N, C/P and N/P

Note: Different lowercase and capital letters represent the significant difference of the same element in different sample soils ($P<0.05$).

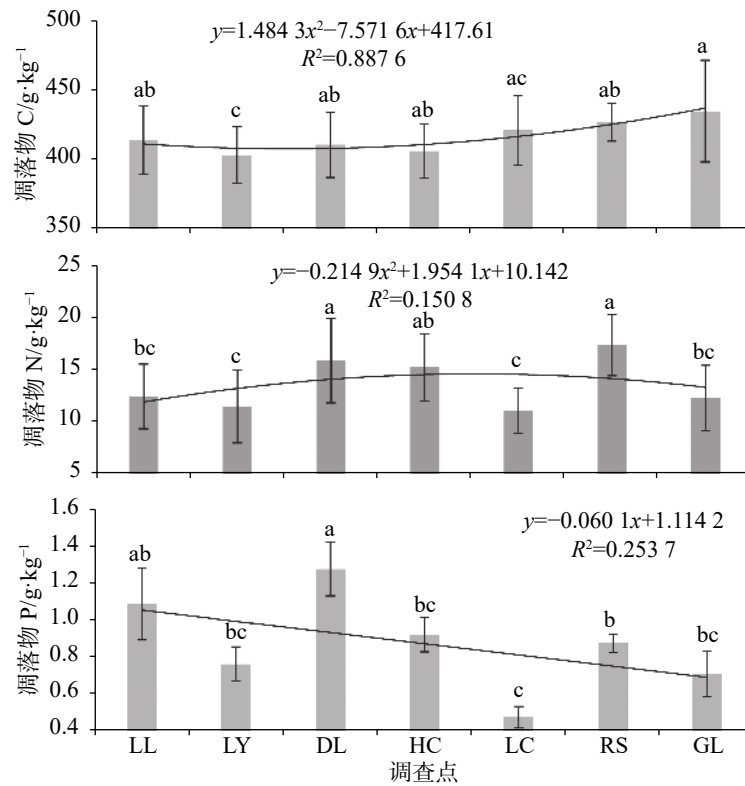


图 5 凋落物 C、N、P 含量

注: 不同小写字母表示同一元素不同样地之间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 5 Contents of C, N and P of litter

Note: Different lowercase letters represent the significant difference of the same element in different sample soils ($P<0.05$).

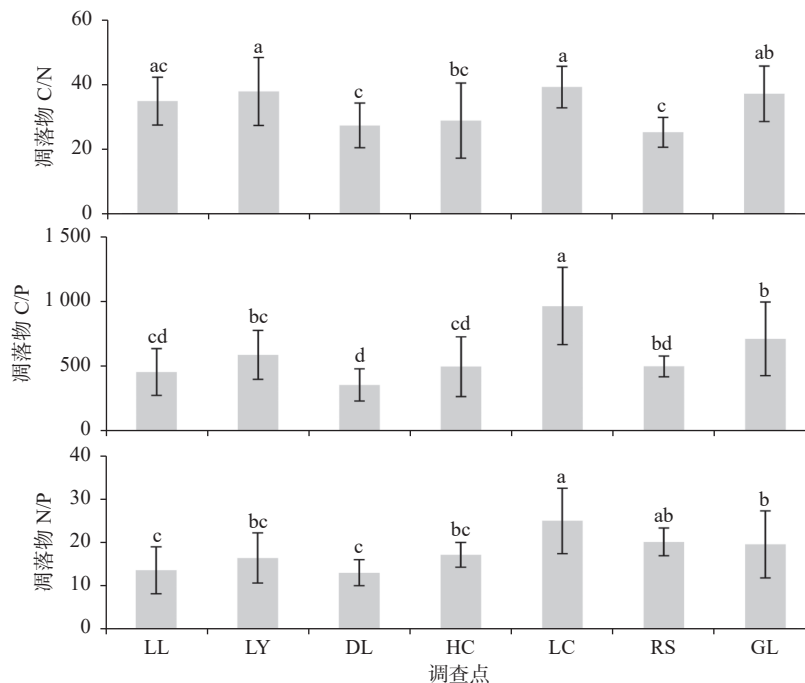


图 6 调查点凋落物 C/N、C/P 和 N/P 比

注: 不同小写字母表示同一元素不同样地之间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 6 Ratios of C to N, C to P and N to P of litter

Note: Different lowercase letters represent the significant difference of the same element in different sample soils ($P<0.05$).

0.150 8), P 的含量呈微弱线性下降趋势($R^2 = 0.253\ 7$)。

由图 6 可知, C/N、C/P、N/P 平均值分别为 32.94、577.37、17.61, 变异系数分别为 28.81%、47.66% 和 36.25%, 不同样地间凋落物 C/N、C/P 均存在显著差异($P < 0.05$), 而 N/P 差异未达到显著水平($P > 0.05$)。LC 的凋落物 C/N 最大(39.22), 显著高于 DL(27.41)、HC(28.86) 和 RS(25.27) ($P < 0.05$)。LC 的凋落物 C/P 最大(961.92), 显著高于其他样地($P < 0.05$), DL 的凋落物 C/P 最小(355.78)。

3.3 土壤碳、氮、磷与环境因子的相关性

对土壤 C、N、P 做相关性分析发现, 土壤 C 和土壤 N 表现为强正相关关系($R = 0.92$), 土壤 C 与土壤 P、土壤 N 与土壤 P 呈中等正相关关系(R 分别为 0.47 和 0.53), 且相关性均达到极显著水平($P < 0.01$)。

分析研究区岩溶石山生态系统土壤养分化学计量特征与环境因子的相关性(表 2)发现, 年降水量与土壤 C、P 呈中度负相关关系; 年均温与土壤 C/N 呈极显著负相关关系($P < 0.01$), 相关系数随土层深度增加而减小; 海拔与土壤 P 呈极显著正相关关系($P < 0.01$), 与土壤 C/P、土壤 N/P 呈显著负相关关系($P < 0.05$); 土壤 pH 与 20~40 cm 土壤 C/N 呈显著负相关关系($P < 0.05$); 凋落物 N 与 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤 C、N、P 均呈显著正相关关系($P < 0.05$); 凋落物 P 与土壤 P 呈极显著正相关关系($P < 0.01$), 与 0~20 cm 土壤 N 呈显著正相关关系($P < 0.05$), 但与土壤 C/P、N/P 均呈极显著负相关关系($P < 0.01$), 与 20~40 cm 土壤 C/N 呈显著负相关关系($P < 0.05$)。

表 2 土壤养分化学计量特征与环境因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between soil nutrient stoichiometry and environmental factors

	0~20 cm						20~40 cm					
	C	N	P	C/N	C/P	N/P	C	N	P	C/N	C/P	N/P
年降水量	-0.36	-0.12	-0.40	0.02	0.14	0.17	-0.36	-0.21	-0.41	0.10	0.12	0.13
年均温	-0.40	0.61	0.14	-0.90**	-0.45	-0.11	0.38	0.67	0.21	-0.79**	-0.34	-0.16
海拔	0.12	0.15	0.41**	-0.13	-0.29*	-0.28*	0.15	0.20	0.44**	-0.20	-0.30*	-0.28*
土壤 pH	-0.08	-0.04	0.02	-0.16	-0.12	-0.07	-0.05	0.02	0.08	-0.29*	-0.21	-0.15
C 凋落物	0.22	0.19	0.05	0.15	0.20	0.19	0.16	0.12	0.05	0.25	0.22	0.17
N 凋落物	0.35**	0.43**	0.29*	-0.07	-0.18	-0.16	0.29*	0.32*	0.29*	-0.04	-0.20	-0.23
P 凋落物	0.16	0.26*	0.68**	-0.17	-0.50**	-0.49**	0.10	0.19	0.66**	-0.28*	-0.51**	-0.52**
C/N 凋落物	-0.31*	-0.39**	-0.29*	0.08	0.22	0.20	-0.28*	-0.32*	-0.29*	0.06	0.24	0.27*
C/P 凋落物	-0.04	-0.19	-0.48**	0.25	0.58**	0.51**	-0.12	-0.20	-0.50**	0.26*	0.52**	0.51**
N/P 凋落物	0.18	0.05	-0.38**	0.27*	0.55**	0.48**	0.06	-0.03	-0.39**	0.31*	0.47**	0.45**

注: *代表 $P < 0.05$, **代表 $P < 0.01$ 。

Note: *: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$

4 讨 论

4.1 凋落物—土壤 C、N、P 化学计量特征

土壤 C、N、P 及比值, 是土壤质量的重要指标^[4-5]。研究区灌木林 0~20 cm 土壤 C、N、P 含量平均值分别为 $36.59\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $4.32\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.69\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。根据全国第二次土壤普查养分分级标准^[16], 该植被类型土壤 C 达到二级标准, N 和 P 含量均达到一级标准。其中土壤 C、N、P 含量高于内蒙古草原($25.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[17], 远高于黄土高

原($3.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[18], 但土壤 C 低于祁连山北麓中段灌丛群落^[19]; 尽管岩溶石山的土壤层较薄, 但西南岩溶石山生态系统的土壤养分含量并不低, 特别是磷含量, 这可能是研究区湿热气候条件有利于微生物的生长和繁殖, 同时加速岩溶作用和成土进程, 产生较多的 P 元素进入土壤。这与其他岩溶区的结果接近, 但存在一定差异, 如贵州关岭—贞丰一带岩溶石漠化区的土壤 C、N、P 含量分别为 $45.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.54\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.70\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[13], 广西环江峰丛洼地的土壤 C、N、P 含量分别为 $55.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $5.63\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.76\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[14], 广西平果峰丛洼地放牧区

土壤 C、N、P 含量分别为 $62.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[20]。总体上,研究区土壤有机碳含量略低于其他岩溶区,土壤全磷含量均明显高于其他岩溶区;全氮含量略高于贵州岩溶区,但略低于环江、平果等地区。这可能与研究区植被生长状况有关,贵州关岭、广西环江、广西平果等区域都曾经存在过较严重的石漠化现象,当植被破坏后,较多的降水会加剧水土流失,进而促进土壤养分的淋溶作用,特别是 P 元素^[20-21]。而本研究中土壤 P 含量相对较高,可能是因为选择的样地为植被覆盖较好且受人类活动干扰小的灌木林地,磷的淋溶作用较弱,从而矿化积累较多。

岩溶区土壤养分含量具有较高的空间变异性,本研究中土壤 C、N、P 变异系数分别为 40.13%、41.46%、65.24%,这是因为岩溶生态系统高度破碎,岩溶石山区土壤呈斑块状不连续分布,且土壤养分受气候、母岩、地貌、地形、植被类型、人类活动等多种因子的影响。土壤 C、N、P 含量随土层的深度增加呈降低的趋势,如本研究中 20~40 cm 土壤 C、N、P 含量平均值比 0~20 cm 土层分别降低了 25.38%、17.55%、10.51%,其中土壤 C、N 含量显著降低,这是因为凋落物分解产生的土壤养分先在表层土壤中富集,进而随降水及其他原因向下迁移扩散^[22]。

土壤的 C、N、P 比值可作为养分限制和饱和的诊断和预测指标^[5],土壤 C/N、土壤 C/P 的高低代表土壤有机质矿化作用的强弱,土壤 N/P 可有效预测养分限制类型^[23-24]。本研究中 0~20 cm 土壤 C/N、C/P 和 N/P 平均值分别为 8.50、16.67 和 1.94,均小于全国 0~10 cm 土层均值水平(12.3、74.0、2.2)^[25],也小于岩溶石漠化区^[13],这可能是因为岩溶生态系统植被在受到强烈人为干扰后,土壤 P 流失的速率会强于土壤 C 和 N。较低的 C/N 说明研究区有机质具有较高的矿化速率,这可能与研究区湿热的气候环境有关;较低的 C/P 表明研究区土壤 P 表现为净矿化,土壤 P 的有效性较高;具有比石漠化区更低的土壤 N 含量和 N/P,说明石漠化区土壤中较低的 P 有效性可能是限制植被恢复的关键限制因子,这与俞月凤等^[7]的研究结果一致。

凋落物是养分回归土壤的主要途径,是生态系统元素循环的重要组成部分。森林生态系统植物生长所需养分的 70%~90% 来自凋落物的降解^[26]。研究表明:当凋落物中 N 含量 $<7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, P 含量 $<$

$0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,表明凋落物 N、P 养分被叶片完全吸收;当 N 含量 $>10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, P 含量 $>0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,表明凋落物 N、P 没有被叶片完全吸收^[27]。本研究中凋落物 N、P 平均含量分别为 $13.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明灌木林地凋落物 N、P 未被完全吸收,植物生长所需 N、P 供应相对充分。研究区凋落物 N、P 含量均接近全球平均水平(10.9 和 0.9)^[28],但凋落物 C 含量略低于温带主要林地类型^[29],而 N 含量则略高。

凋落物 C/N 是预测凋落分解速率最理想的指标,较低的 C/N(32.94)说明研究区域凋落物具有较高的分解速率,这应归因于研究区湿热的环境。研究表明:凋落物 N/P 越高,凋落物的分解受 P 含量的限制越强,尤其是当 N/P 大于 25 或者 P 含量低于 $0.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时^[30],本研究中凋落物较低的 N/P(17.61)说明岩溶区灌木林地凋落物分解受 P 含量的限制较小,这与俞月凤等^[7]研究结果一致。其中由西向东,广西典型岩溶区凋落物 C 呈现指数增加的趋势,凋落物 N 呈现先增加后减少的趋势,凋落物 P 含量呈现降低的趋势,这可能与区域气候条件、植被结构和土壤特征有关。与同气候带非岩溶区森林生态系统相比^[31],岩溶区灌木林地凋落物具有低 C、高 P、低 C/P 和低 N/P 的特征。

4.2 影响岩溶区土壤 C、N、P 含量的主要因素

土壤 C、N、P 含量受到诸多环境因子的共同影响,如降水、土地利用方式、土壤水分、土壤质地、植被类型等^[6]。本研究中,土壤 C、N 呈强相关关系,这与马剑等^[17]在祁连山的研究结果一致;与凋落物质量、年均温、海拔和土壤 pH 的相关性表明,凋落物 C、N、P 含量是影响土壤 C、N、P 化学计量特征的关键因子。本研究发现凋落物 N 与土壤 C、N、P 含量具有显著相关性,凋落物 P 与土壤 P 含量显著相关,且与 0~20 cm 土壤 P 含量的相关性要高于 20~40 cm 土层,说明凋落物 N、P 的释放对表层土壤 N、P 的积累有着重要贡献,这与姜沛沛等^[32]的研究结果相同。植被生长有利于土壤 C、N、P 元素的积累,反过来,土壤 C、N、P 元素的积累又促进植物生长^[33]。海拔是影响土壤磷含量的主要因素之一^[34],本研究中土壤磷含量与海拔呈极显著正相关关系。一些研究表明降水、温度是生态系统土壤养分及化学计量比最主要的影响因素^[6,13]。王霖娇等^[13]的研究表明,岩溶石山土壤 N、P 与年降水量呈显著正相关,与 C/N、

C/P 呈极显著负相关; 年均温与土壤 C/N、C/P 显著负相关, 与土壤 N 呈显著正相关关系, 这是因为降水增加、温度升高会加速土壤有机质的分解, 促进 N、P 的释放, 进而降低土壤的 C/N、C/P。本研究同样发现年均温与土壤 N 呈正相关关系, 与土壤 C/N 呈负相关关系, 但年降水量与土壤 C、P 均呈中度负相关关系, 说明降水显著增加可能也会增加土壤 P 的流失。

5 结 论

(1) 广西典型岩溶石山灌木林地土壤碳、氮、磷含量平均值分别为 $31.90 \pm 12.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $3.95 \pm 1.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.65 \pm 1.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 具有较高的空间异质性; 与岩溶石漠化区和放牧区相比, 具有低碳、高磷的特征。广西典型岩溶石山灌木林地凋落物具有低碳、高磷、低碳磷比和低氮磷比的特征;

(2) 凋落物氮、磷是影响岩溶区灌木林地土壤养分化学计量特征的重要因子, 凋落物磷的释放对表层土壤磷的积累有重要贡献; 年均温升高会促进土壤氮含量增加, 降低土壤碳氮比, 年均降水量增加会降低土壤碳、磷含量。

参考文献

- [1] 袁道先 蒋勇军, 沈立成, 蒲俊兵, 肖琼. 现代岩溶学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
YUAN Daoxian, JIANG Yongjun, SHEN Licheng, PU Junbing, XIAO Qiong. Modern Karstology[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [2] Jiang Zhongcheng, Lian Yanqing, Qin Xiaoqun. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132(3): 1-12.
- [3] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 2-6.
HE Jinsheng, HAN Xingguo. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 2-6.
- [4] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
WANG Shaoqiang, YU Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [5] 张志山, 杨贵森, 吕星宇, 虎瑞, 黄磊. 荒漠生态系统 C、N、P 生态化学计量研究进展[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(1): 48-56.
ZHANG Zhishan, YANG Guisen, LYU Xingyu, HU Rui, HUANG Lei. Research progresses in ecological stoichiometry of C, N and P in desert ecosystems[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(1): 48-56.
- [6] 刘鑫, 李思亮, 岳甫均, 钟君, 覃蔡清, 丁虎. 喀斯特系统生物地球化学循环及对全球变化的响应[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(3): 465-476.
LIU Xin, LI Siliang, YUE Fujun, ZHONG Jun, QIN Caiqing, DING Hu. Biogeochemical cycles of karst systems and their response to global change[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(3): 465-476.
- [7] 俞月凤, 何铁光, 曾成城, 宋同清, 彭晚霞, 韦彩会, 苏利荣, 张野, 范适. 喀斯特区不同退化程度植被群落植物-凋落物-土壤-微生物生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 935-946.
YU Yuefeng, HE Tieguang, ZENG Chengcheng, SONG Tongqing, PENG Wanxia, WEI Caihui, SU Lirong, ZHANG Ye, FAN Shi. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in plants, litter, soil, and microbes in degraded vegetation communities in a karst area of Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3): 935-946.
- [8] 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.
- [9] 张婷, 代群威, 邓远明, 李琼芳, 董发勤, Bowen Li, Bruce W Fouke, 李相邑. 九寨沟优势植物凋落物叶片淋溶的碳氮磷释放特征[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(1): 133-139.
ZHANG Ting, DAI Qunwei, DENG Yuanming, LI Qiongfang, DONG Faqin, Bowen Li, Bruce W Fouke, LI Xiangyi. Release characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus from withered leaves of dominant plants in Jiuzhaigou valley[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(1): 133-139.
- [10] Song Min, Peng Wanxia, Du Hu, Xu Qingguo. Responses of soil and microbial C : N : P stoichiometry to vegetation succession in a karst region of Southwest China[J]. *Forests*, 2019, 10(9): 755.
- [11] 谷佳慧, 杨奇勇, 蒋忠诚, 罗为群, 曾红春, 覃星铭, 蓝芙宁. 广南县幅岩溶区与非岩溶区土壤碳氮磷生态化学计量比空间变异分析[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(5): 761-769.
GU Jiahui, YANG Qiyong, JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, ZENG Hongchun, QIN Xingming, LAN Funing. Spatial variation analysis of soil carbon, nitrogen and phosphorus eco-stoichiometric ratios in karst and non-karst areas of Guangnan county, Yunnan, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(5): 761-769.
- [12] 刘立斌, 钟巧连, 倪健. 贵州高原喀斯特次生林 C、N、P 生态化学计量特征与储量[J]. *生态学报*, 2019, 39(22): 8606-8614.
LIU Libin, ZHONG Qiaolian, NI Jian. Ecosystem C : N : P stoichiometry and storages of a secondary plateau-surface karst forest in Guizhou Province, Southwestern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(22): 8606-8614.

- [13] 王霖娇, 汪攀, 盛茂银. 西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6580-6593.
WANG Linjiao, WANG Pan, SHENG Maoyin. Stoichiometric characteristics of soil nutrient elements and its influencing factors in typical karst rocky desertification ecosystems, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6580-6593.
- [14] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 张浩, 杜虎. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 682-693.
ZENG Zhaoxia, WANG Kelin, LIU Xiaoli, ZENG Fuping, SONG Tongqing, PENG Wanxia, ZHANG Hao, DU Hu. Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in karst plant communities of north-west Guangxi[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2015, 39(7): 682-693.
- [15] 潘复静, 张伟, 王克林, 何寻阳, 梁士楚, 韦国富. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物C:N:P生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 335-343.
PAN Fuming, ZHANG Wei, WANG Kelin, HE Xunyang, LIANG Shichu, WEI Guofu. Litter C:N:P ecological stoichiometry character of plant communities in typical karst peak-cluster depression[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 335-343.
- [16] 章明奎. 土壤地理学与土壤调查技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011.
ZHANG Mingkui. Soil geography and soil survey techniques[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2011.
- [17] 银晓瑞, 梁存柱, 王立新, 王炜, 刘钟龄, 刘小平. 内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物养分化学计量学[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 39-47.
YIN Xiaorui, LIANG Cunzhu, WANG Lixin, WANG Wei, LIU Zhongling, LIU Xiaoping. Ecological stoichiometry of plant nutrients at different restoration succession stages in typical steppe of Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 39-47.
- [18] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 安韶山. 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): 4664-4682.
ZHU Qiulian, XING Xiaoyi, ZHANG Hong, AN Shaoshan. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly gully region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15): 4664-4682.
- [19] 马剑, 刘贤德, 金铭, 赵维俊, 敬文茂, 王荣新. 祁连山5种典型灌丛土壤生态化学计量特征[J]. 西北植物学报, 2021, 41(8): 1391-1400.
MA Jian, LIU Xiande, JIN Ming, ZHAO Weijun, JING Wenmao, WANG Rongxin. Soil ecological stoichiometry of five typical shrubs in Qilian mountain[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(8): 1391-1400.
- [20] 蓝芙宁, 李衍青, 赵一, 朱同彬, 蒋忠诚, 吴华英, 朱秀群, 侯士田. 放牧对峰丛洼地植物—土壤C、N、P化学计量特征的影响[J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 742-751.
LAN Funing, LI Yanqing, ZHAO Yi, ZHU Tongbin, JIANG Zhongcheng, WU Huaying, ZHU Xiuqun, HOU Shitian. Influence of grazing on characteristics of chemical metrology for C, N and P in plants and soil of peak-cluster depressions[J]. *Carso-logica Sinica*, 2018, 37(5): 742-751.
- [21] 盛茂银, 刘洋, 熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6303-6313.
SHENG Maoyin, LIU Yang, XIONG Kangning. Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China karst[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6303-6313.
- [22] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 603-612.
WEI Xiaorong, SHAO Ming'an. The distribution of soil nutrients on sloping land in the gully region watershed of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 603-612.
- [23] Güsewell Sabine, Koerselman Willem, Verhoeven Jos T A. Biomass N:P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands[J]. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 372-384.
- [24] Tessier Jack T, Raynal Dudley J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3): 523-534.
- [25] Tian Hanqin, Chen Guangsheng, Hall Charles A S, Zhang Chi, Melillo Jerry M. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1-3): 139-151.
- [26] 赵其国, 王明珠, 何园球. 我国热带亚热带森林凋落物及其对土壤的影响[J]. 土壤, 1991, 23(1): 8-15.
- [27] Killingbeck Keith T. Nutrients in senesced leaves: Keys to the search for potential resorption and resorption[J]. *Ecology*, 1996, 77(6): 1716-1727.
- [28] Kang Hongzhang, Xin Zaijun, Breg Bjorn, Burgess Paul J, Liu Qunlu, Liu Zhicheng, Li Zhaohua, Liu Chunjiang. Global pattern of leaf litter nitrogen and phosphorus in woody plants[J]. *Annals of Forest Science*, 2010, 67(8): 811-811.
- [29] 王瑾, 黄建辉. 暖温带地区主要树种叶片凋落物分解过程中主要元素释放的比较[J]. 植物生态学报, 2001, 25(3): 375-380.
WANG Jin, HUANG Jianhui. Comparison of major nutrient release patterns in leaf litter decomposition in warm temperate zone of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2001, 25(3): 375-380.
- [30] Güsewell Sabine, Verhoeven Jos T A. Litter N:P ratios indicate whether N or P limits the decomposability of graminoid leaf litter[J]. *Plant and Soil*, 2006, 287(1-2): 131-143.
- [31] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 闫俊华, 沙丽清, 韩士杰. 中国四种森林类型主要优势植物的C:N:P化学计量学特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(6): 587-595.
WANG Jingyuan, WANG Shaoqiang, LI Renlan, YAN Junhua, SHA Liqing, HAN Shijie. C:N:P stoichiometric characteris-

- tics of four forest types' dominant tree species in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(6): 587-595.
- [32] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 赵一婷. 陕西省3种主要树种叶片、凋落物和土壤N、P化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 443-454.
- JIANG Peipei, CAO Yang, CHEN Yunming, ZHAO Yiping. N and P stoichiometric characteristics of leaves, litter, and soil for three dominant tree species in the Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 443-454.
- [33] Jiao Feng, Wen Zhongming, An Shaoshan. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2011, 86(2): 110-116.
- [34] 刘进, 李娟, 龙健, 李红. 西南喀斯特区土壤生态化学计量与酶活性的海拔特征[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(2): 113-122.
- LIU Jin, LI Juan, LONG Jian, LI Hong. Altitude dependence of soil ecological stoichiometry and enzyme activities in a karst region of Southwest China[J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(2): 113-122.

Stoichiometric characteristics of C, N and P in soil and litter of shrublands in karst areas of Guangxi

YUE Xiangfei^{1,2,3}, LI Yanqing⁴, LIU Peng⁵

(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. National Center for International Research on Karst Dynamics System and Global Change, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China;

4. College of Environment and Resource, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China;

5. College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530001, China)

Abstract This study was conducted at seven typical karst areas (Longlin, Lingyun, Donglan, Hechi, Luocheng, Rongshui and Guilin) of Guangxi, China. These areas present subtropical monsoon climate, with annual temperatures averaging from 19.27 °C to 20.73 °C, and the annual rainfall averaging from 1,149.2 mm to 1,931.3 mm. This study focused on the stoichiometric characteristics and the influencing factors of organic carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in soil and litter of typical karst areas. By field sampling and laboratory experiment, the stoichiometric characteristics of soil organic C, N, and P, and litter C, N and P of 63 shrub quadrats in the seven typical karst areas were investigated. Besides, the correlation between the variation in stoichiometric characteristics of soil and environmental factors were analyzed.

The research findings show that: (1) the mean content of C, N and P in 0–40 cm soil was 31.90 g·kg⁻¹, 3.95 g·kg⁻¹ and 2.65 g·kg⁻¹, and the coefficient of variation was 40.13%, 41.46% and 65.24%, respectively. The mean value of C/N, C/P and N/P was 8.10, 14.82 and 7.80, and the coefficient of variation was 14.88%, 48.78% and 41.33%, respectively. The values of C/N, C/P and N/P in 0–20 cm soil were slightly higher than those in 20–40 cm. There were significant differences in soil C/N, C/P and N/P between 0–20 cm and 20–40 cm ($P > 0.05$). (2) There were significant correlations among the contents of soil C, N and P ($P < 0.01$). The stoichiometric characteristics of soil nutrients elements were significantly affected by litter N and P ($P < 0.05$) which was negatively correlated with the C/N ratio of litter. There was a moderately negative correlation between mean annual precipitation and soil C and P. However, the mean annual temperature was negatively correlated with soil C, C/N and C/P, which was positively correlated with soil N.

The soil C, N and P of typical karst shrubland in Guangxi presents high spatial heterogeneity, with the characteristics of low C and high P, and the litter is characterized by low C, high P, low C/P and low N/P. Litter N and P is the important factor affecting the stoichiometric characteristics of soil nutrients in shrubland of the karst area. The increase of mean annual temperature will promote the increase of soil N and decrease soil C/N, and the increase of mean annual precipitation will reduce soil C and P. Our research results have great significance for the theoretical improvement of the stoichiometric study on soil ecology, vegetation restoration in degraded karst ecosystem and the response of karst ecosystem to climate change in Southwest China.

Key words karst area, stoichiometric characteristics, soil, litter, shrubland

(编辑 黄晨晖)