

黔中森林不同土地利用类型土壤养分及计量特征

王登超^{1,2}, 张蒙蒙^{1,2}, 安静^{1,2*}, 吴灿^{1,2}, 申招^{1,2}, 黄鹏程^{1,2}, 任燕^{1,2}

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州贵阳 550001)

摘要 为探讨黔中森林公园中不同土地利用类型土壤养分状况及其计量比特征, 利用统计学的方法研究黔中地区龙架山国家森林公园内 6 种土地利用类型的不同土层土壤养分及其生态化学计量比特征。结果表明, 研究区土壤 SOC 和 TN 随土层深度增加而减少, 不同土地利用类型对 0~10 cm 土层的土壤养分含量影响显著, 且耕地、针叶林及针阔混交林 SOC 和 TN 含量较高。土壤 C/K 和 C/P 受土地利用类型的影响较大, 土壤化学计量比特征表明土壤氮素成为该区植物生长的限制性养分。土壤 C/N、C/P、C/K 主要受 SOC 控制, P/K 主要受到 TK 含量的影响, N/P 和 N/K 主要由 TN 控制。研究区森林土壤处于“氮限制”状态, 且土壤 C、N、P、K 间存在较强耦合关系; 土壤 SOC、TN 和 TK 较 TP 受土地利用类型的影响明显。

关键词 土地利用类型; 土壤养分; 化学计量; 变化特征

中图分类号 S153 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)02-0093-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.02.023



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Soil Nutrient and Quantitative Characteristics of Different Land Use Types of Forest in Central Guizhou

WANG Deng-chao^{1,2}, ZHANG Meng-meng^{1,2}, AN Jing^{1,2} et al (1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550025; 2. State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001)

Abstract To study the soil nutrient status and its quantitative characteristics of different land use types in the central forest park of Guizhou, soil nutrients and their ecological stoichiometry of six land use types in Longjiashan National Forest Park in central Guizhou were studied by statistical methods. The results showed that soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) decreased with the increase of soil depth, and soil nutrient contents in 0-10 cm soil layer were significantly affected by different land use types, and SOC and TN contents were higher in cultivated land, coniferous forest and mixed forest. Soil C/K and C/P were affected by land use types, and the characteristics of soil stoichiometry indicated that soil nitrogen was the limiting nutrient for plant growth in this area. Soil C/N, C/P, C/K were mainly controlled by SOC, P/K were mainly affected by TK content, N/P and N/P were mainly controlled by TN. The forest soil in the study area was in a “nitrogen limited” state, and there was a strong coupling relationship among soil C, N, P, K; soil SOC, TN and TK were more affected by land use type than TP.

Key words Land use type; Soil nutrients; Stoichiometry; Change characteristics

森林公园是现代城市建设的重要内容, 在承担市民休憩及游玩的同时, 还具有净化空气、涵养水源、维持生物多样性和固土保肥等重要生态服务功能^[1]。随着城市化进程的快速发展, 土地利用类型改变、人为干扰以及交通污染等都会影响森林生态服务功能的稳定^[2], 而土壤作为森林生态系统的基本构筑, 人为活动的干扰势必对土壤环境造成影响, 如土壤板结、微生物活性下降、矿化作用下降等问题^[3-4], 因此, 探讨人为干扰对森林公园土壤理化性质和养分循环影响, 是深入了解森林公园土壤环境的关键一步。生态化学计量学为研究生态环境元素比率和元素平衡提供了科学方法^[5-6]。土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)是重要的生命元素, 其化学计量关系不仅可以揭示土壤养分的饱和状态, 也在生态系统物质循环、元素平衡和生物生存等方面发挥了重要作用^[7]。土壤 C:N:P 主要受水热条件和成土特性控制, 由于气候、地貌、植被、母岩、成土时间和土壤生物等成土因素和人类活动影响, 使土壤 C:N:P 的空间变异性较大^[8]。C、N、P 及其计量比之间的动态平衡首先影响土壤肥力性质和植物生长发育, 进而引起生态系统的变化^[9]。可见, 不同土地利用类型的土壤 C、N、P 含量及其计量比可以反映土壤养分状况, 有助于揭示

地表覆被与土壤养分的相互影响, 同时土壤深度显著影响土壤养分, 随着土壤深度加深, 土壤理化性质亦会存在较大差异。因此, 从生态计量学角度揭示不同土地覆被内部 C、N、P 元素的平衡与循环过程, 对于深入认识黔中森林公园生态系统具有重要意义。

近年来, 学者们对土壤生态化学计量学进行了探讨。如吴昊等^[10]研究发现, 海拔梯度对秦岭松栎混交林土壤 N、P、K 含量及其计量比特征的影响较明显; Hui 等^[11]研究表明, 土壤 C、N 含量对经度敏感, 纬度显著影响土壤 P 含量、C:P 和 N:P; 李培玺等^[12]研究认为, pH 对 C、N、P 及其计量比的空间异质性存在较大贡献; 李丹维等^[13]研究认为, 土壤温度对土壤 C、N、P 化学计量比有重要影响, 其次为海拔; 王慧等^[14]研究表明, 土壤 C、N、P 受地表覆被的影响较大。陶晓等^[4]研究城市公园土壤发现, 区位、季节和土层三者共同影响土壤碳氮磷含量及其计量学特征。但对森林公园土壤养分、化学计量比及其垂直变异的研究较少。对森林公园不同覆被及其土壤深度对土壤 C、N、P、K 含量与计量学特征的研究有助于进一步揭示土壤养分的供给能力和不同植物覆被养分循环及垂直分布特征。该研究以黔中地区龙架山国家森林公园为例, 选取 6 种不同土地利用类型, 对其不同深度的土壤 C、N、P 及其化学计量特征进行探讨, 阐明不同土地利用类型土壤养分及其化学计量特征, 揭示土壤深度对土壤养分和化学计量的影响规律, 探讨黔中公园土壤养分限制现

基金项目 贵州师范大学 2020 年度大学生科研训练计划项目 (DK-2020A047)。

作者简介 王登超 (2000—), 男, 贵州遵义人, 从事环境生态学研究。
* 通信作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事植物生理生态研究。

收稿日期 2022-03-28

状,为该区土壤质量的维护和森林生态系统的恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 研究区位于黔中地区龙里县龙架山国家森林公园(106°55′15″~107°10′50″E,26°26′50″~26°29′45″N),地处苗岭山脉中部,由哨上、干冲和响水3个部分组成,总面积6 101 hm²,海拔1 060~1 386 m。属中亚热带季风气候,年均气温14.8℃,极端高温和低温分别为34.2、-9.2℃,年降水量达1 000 mm以上,季节分布不均,全年平均相对湿度为79%,气候温暖,雨热充沛。调查区域成土母质以石英砂岩和碳酸盐为主,土壤类型以黄壤和石灰土为主,森林覆盖率84.8%,区内主要包括针叶林、针阔混交林、阔叶林、灌木林、灌草丛等6个植被型。

1.2 样地设置及样本采集 基于黔中龙架山国家森林公园的遥感影像,并结合实地调查选取6种典型土地利用方式,分别为针叶林、阔叶林、针阔混交林、灌木林、耕地和未利用地。各土地利用类型随机选取3块20 m×20 m典型样地,每个单元坡向与坡度相近,采样单元间至少有100 m缓冲距离。在每个采样单元内按“S”型取样法采样,在去除地表枯落物后用土钻法分别取0~10、10~20、20~40、40~60 cm的土样,各样点同层混合后用四分法取出足够样品,去除杂质带回实验室,经自然风干、研磨和过筛后用于土壤氮磷钾测定。各类样地信息见表1。

表1 样地概况

Table 1 Sample plot overview

编号 No.	土地利用类型 Land use type	经度 Longitude	纬度 Latitude	优势种 Dominant species
GD	耕地	106°56′18″E	26°27′45″N	玉米
ZY	针叶林	106°55′31″E	26°27′01″N	马尾松
ZK	针阔混交林	106°56′02″E	26°28′01″N	马尾松、构树
KY	阔叶林	106°56′48″E	26°27′06″N	杜仲
GM	灌木林	106°55′56″E	26°27′27″N	火棘、石楠
WL	未利用地	106°56′06″E	26°27′22″N	狗尾巴草、小飞蓬

1.3 样品分析 土壤养分的测定参考《土壤农化分析》^[15]的分析方法,土壤有机碳(SOC)用K₂Cr₂O₇外加热法测定,pH采用酸度计法测定,全氮(TN)用半微量凯氏定氮法测定,全磷(TP)用碱溶-钼锑抗比色法测定,全钾(TK)采用碱溶-火焰分光光度法测定;生态化学计量比采用质量比^[16]。

1.4 数据处理 数据经Microsoft Excel 2019整理后,采用SPSS 26.0进行单因素方差分析(One-way ANOVA)比较各植被类型及土层pH、SOC、TN、TP、TK及其计量比关系,利用Duncan多重比较(Duncan's multiple range test),用Pearson相关系数法进行相关性检验,利用Canoco 5软件进行冗余分析(RDA),采用Origin软件完成图形制作。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤养分特征 由图1可知,0~10 cm土层SOC含量表现为针叶林(ZY)最高(17.87 g/kg),针阔混交林(ZK)、灌木林(GM)、耕地(GD)、未利用地(WL)依次下降,阔叶林(KY)显著低于其余5种土地利用类型;同种土地利用类型土壤SOC含量均随土层深度的增加而逐渐

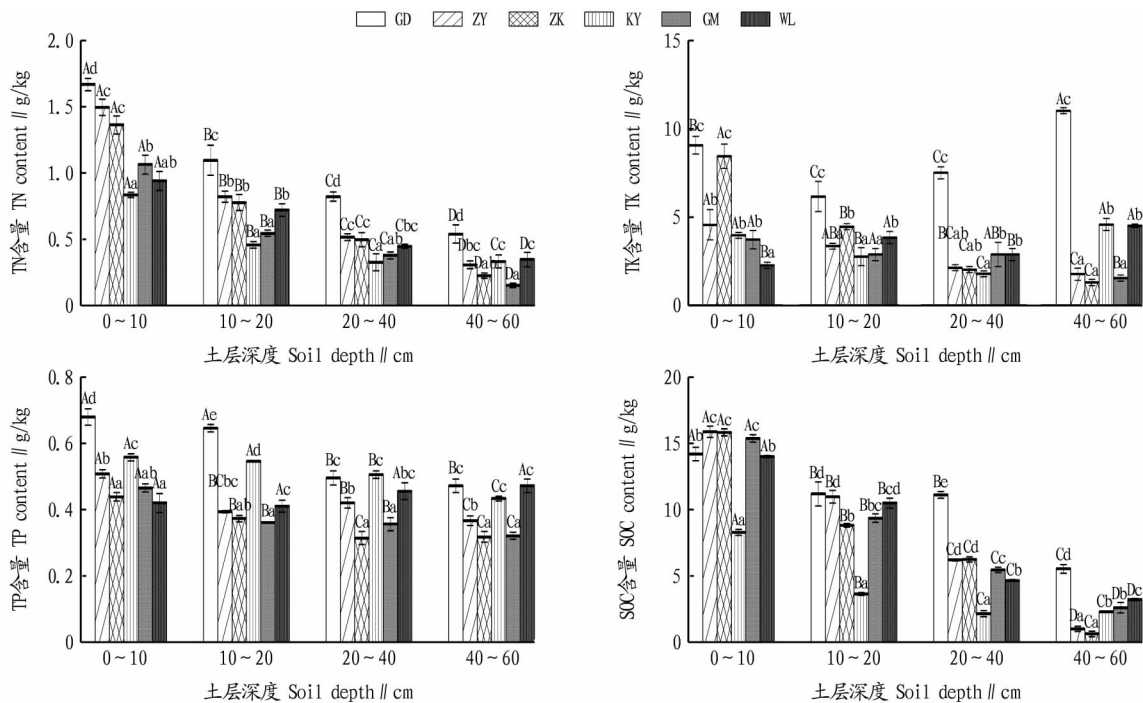
下降,但阔叶林在20~40与40~60 cm间差异不显著;同一层次土壤SOC含量在不同土地利用类型间差异较大,属中等变异(表2),其中耕地和未利用地SOC含量均显著高于同一层次的阔叶林。TN含量在6种土地利用类型中表现为表层聚集,0~10 cm耕地TN含量最高(1.71 g/kg),阔叶林最低(0.83 g/kg),垂直变化与SOC相近;除阔叶林外,其余5种土地利用类型在土层间差异显著;土壤TN受土地利用类型影响显著,其变化趋势与SOC相近。TP含量土层间的变异较小,随土层深度的增加呈现下降的趋势;土壤同一层次的不同土地利用类型间TP含量变化不一致,且随着土层深度增加而趋于稳定,总体表现为耕地>阔叶林>未利用地>针叶林>灌木林>针阔混交林。

研究区不同土地覆被下不同土层TK的平均含量为1.20~11.05 g/kg,变异系数达61.21%(表2),属中等变异,针叶林、针阔混交林和灌木林为表层聚集,而耕地、阔叶林和未利用地在底层更加聚集,但差异不明显;随土层深度增加呈现逐渐降低或先降低后增加趋势,在0~20 cm土层中,除针叶林和灌木林外,同种覆被不同土层间存在显著差异;耕地的TK含量在同一土层均为最高,除0~10 cm针阔混交林外,均显著高于其他覆被类型。

2.2 不同土地利用类型土壤生态化学计量特征 从图2可以看出,6种土地利用类型土壤C/N随土层深度增加变化规律有所差异。针叶林(ZY)、耕地(GD)、针阔混交林(ZK)、阔叶林(KY)、未利用地(WL)土层间差异显著。除0~10 cm外,其他土层中灌木林(GM)C/N垂直变异较小且显著高于其他类型。相同土层土壤C/N受土地利用类型的影响显著。不同土地利用类型0~60 cm土壤C/P在1.87~41.37(表2),不同土地利用类型对C/P均具有明显影响;阔叶类型在同一层次C/P除高于40~60 cm针阔和针叶类型差异不显著外,均显著低于其他土地利用类型;同种土地利用类型表现为耕地在0~10和20~40 cm土层间、阔叶林和未利用地在20~40和40~60 cm土层间垂直影响不显著外,其余土地利用类型土壤C/P受深度显著影响。

6种土地利用土壤C/K随土层深度的逐渐增加变化不同,其比值在0~60 cm为0.44~7.36(表2)。针叶林、阔叶林、灌木林和未利用地C/K在0~10 cm达到峰值,且除针叶林与灌木林差异不显著外,其余类型之间均差异显著;耕地在10~20 cm土层最高,与针阔混交林差异不显著;针阔混交林在20~40 cm最高,除针阔混交林外,均显著高于其他类型。同一土地利用类型C/K在0~10和10~20 cm土层的除阔叶林与未利用类型差异显著外,其余类型差异均不显著;而未利用地各土层间耕地、针阔混交林、阔叶林的20~40和40~60 cm土层间差异显著。

6种土地利用类型土壤N/P与土层深度呈负相关。除耕地10~20和20~40 cm土层间、未利用地20~40和40~60 cm土层间差异不显著外,其余土层间均存在显著差异。土壤N/P受土地利用类型的影响较大,但该影响随土层深度增加逐渐减少。

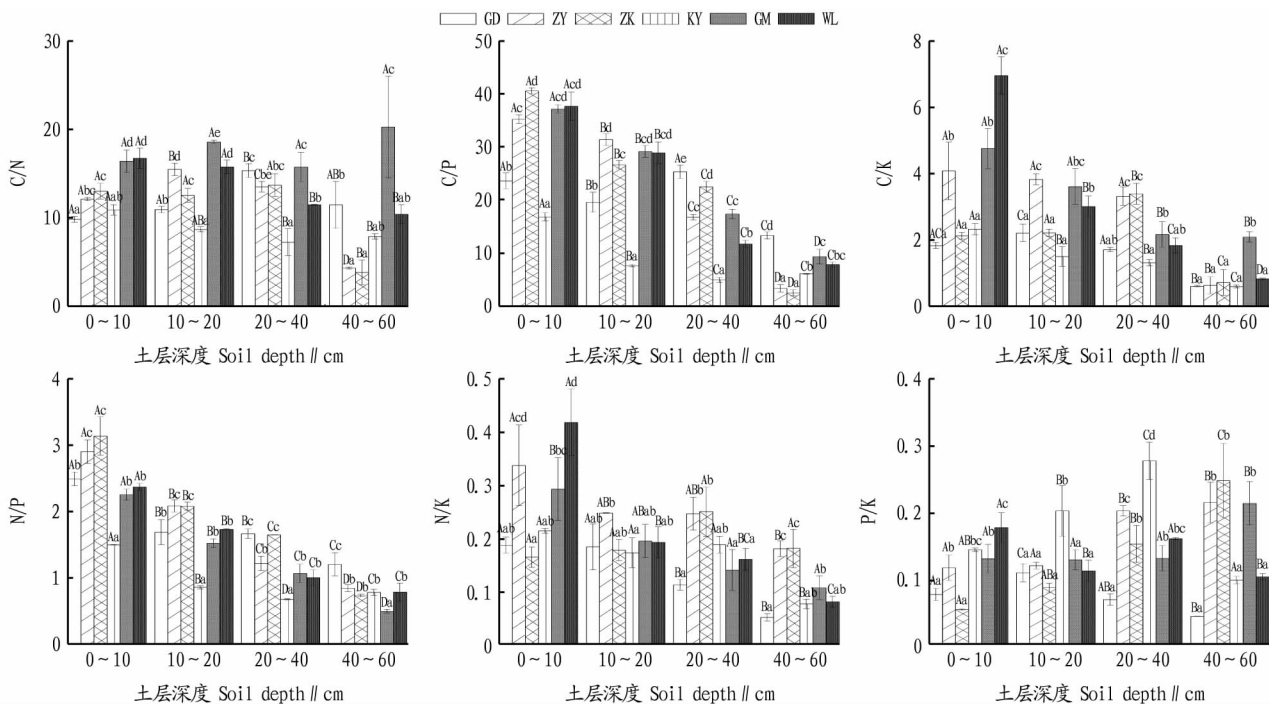


注:不同大写字母表示同一土地利用类型不同土层深度间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一土层深度不同土地利用类型间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different capital letters indicate significant difference between different soil depths of the same land use type ($P < 0.05$), different lowercase letters indicate significant differences between different land use types at the same soil depth ($P < 0.05$).

图 1 不同土地利用类型的各层土壤 C、N、P、K 含量

Fig.1 Contents of soil C, N, P and K in different land use types



注:不同大写字母表示同一土地利用类型不同土层深度间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一土层深度不同土地利用类型间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different capital letters indicate significant difference between different soil depths of the same land use type ($P < 0.05$), different lowercase letters indicate significant differences between different land use types at the same soil depth ($P < 0.05$).

图 2 不同土地利用方式下土壤 C/N、C/P、C/K、N/P、N/K 和 P/K 的垂直格局

Fig.2 Vertical pattern of soil C/N, C/P, C/K, N/P, N/K and P/K under different land use patterns

不同土地利用类型土壤 N/K 为 0.05~0.46(表 2),耕地、针叶林、灌木林和未利用地土壤 N/K 随土层深度增加逐渐减少,而针阔混交林为先增加后减少趋势,但差异不显著。同一土地利用土壤 N/K 总体为 0~40 cm 各层差异不显著。同一层次 N/K 受土地利用类型影响较明显。

随土层深度变化,6 种土地利用类型土壤 P/K 变化规律存在差异,总体在 0.04~0.30(表 2)。不同土地利用类型在 10~20 cm 影响最小,20~40 cm 影响最大。除耕地和未利用

地外,不同土地利用类型土壤 P/K 峰值均出现在 20~60 cm,除耕地外,均显著高于 0~20 cm。

表 2 显示,不同土地利用土壤 C/N、C/P、C/K、N/K、N/P 和 P/K 变异系数分别为 34.40%、59.11%、63.48%、45.08%、47.98%和 45.03%,表明研究区土壤生态化学计量比均属中等变异,在不同土地利用类型间差异较大,分析可知 C/N 的变异相对较低,其值相对稳定,C/K 和 C/P 对土地利用类型的响应强于 C/N、N/P、N/K 和 P/K。

表 2 土壤 SOC、TN、TP、TK 含量及化学计量比统计分析

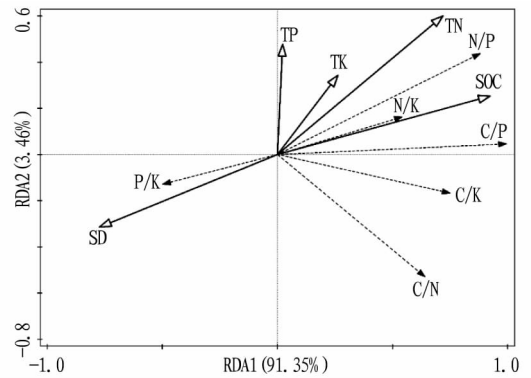
Table 2 Statistical analysis of soil SOC, TN, TP, TK content and stoichiometric ratio

项目 Item	SOC g/kg	TN g/kg	TP g/kg	TK g/kg	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	P/K
最小值 Minimum	0.80	0.15	0.29	1.20	2.85	1.87	0.44	0.47	0.05	0.04
最大值 Maximum	18.55	1.71	0.71	11.05	24.34	41.37	7.36	3.34	0.46	0.30
平均值 Mean	8.92	0.70	0.45	4.14	12.35	19.76	2.40	1.53	0.19	0.14
标准差 SD	5.46	0.40	0.10	2.53	4.25	11.68	1.52	0.73	0.09	0.06
变异系数 CV//%	61.27	57.39	21.33	61.21	34.40	59.11	63.48	47.98	45.08	45.03

2.3 不同土地利用类型 SOC、TN、TP、TK 与其化学计量比相关性分析 黔中森林公园不同土地利用类型土壤养分与生态化学计量比冗余分析结果见图 3,第一、第二排序轴分别可以解释系统方差变化的 91.35%和 3.46%,累计解释量为 94.81%。在第一主轴上 SOC 含量对土壤 C/N、N/K、N/P、C/K、C/P 具有正向影响,对 P/K 存在负向影响,TN 对计量比的影响与 SOC 一致,土层深度对化学计量比有较大的反向作用效应。第二主轴上 TP、TK 和 TN 与化学计量比具有正相关,但相关性不强。分析发现 SOC 对 C/P 的影响大于 TP, SOC 较 TN 和 TK 对 C/N 和 C/K 的影响大,TN 较 TP 和 TK 对 N/P 和 N/K 的影响更大,TK 相对于 TP 对 P/K 的影响较大。

由表 3 可知,土壤 SOC、TP、TN、TK 两两之间相关性较强,表明研究区不同土地利用类型下土壤 SOC、TP、TN、TK 相互之间协同关系显著。土壤养分与其化学计量比间具有较强的耦合关系。研究区不同土地利用类型中,土壤 SOC 和 TN 对其生态化学计量比耦合关系较强。土壤 C/N、C/P、

C/K 和 N/K 与 SOC 含量相关关系密切,N/P 受 TN、SOC 二者共同调控,而 P/K 主要受土壤 TK 含量的影响。



注:SD 表示土层深度。

Note:SD represents the depth of the soil.

图 3 土壤 SD、SOC、TN、TP、TK、pH 及其计量比的 RDA 分析
Fig.3 RDA analysis of soil SD, SOC, TN, TP, TK, pH and their stoichiometric ratio

表 3 土壤 SOC、TN、TP、TK 含量及其生态化学计量特征间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between soil SOC, TN, TP, TK contents and their eco-stoichiometric characteristics

因子 Factor	SOC	TN	TK	TP	C/N	C/P	C/K	N/P	P/K	N/K	pH
SOC	1										
TN	0.92**	1									
TK	0.45**	0.56**	1								
TP	0.38**	0.59**	0.53**	1							
C/N	0.46**	0.14	0.01	-0.24	1						
C/P	0.93**	0.74**	0.28	0.05	0.62**	1					
C/K	0.65**	0.42**	-0.25	-0.08	0.60**	0.74**	1				
N/P	0.94**	0.91**	0.43**	0.26	0.30*	0.90**	0.59**	1			
P/K	-0.55**	-0.53**	-0.81**	-0.25	-0.28	-0.52**	0.02	-0.53**	1		
N/K	0.52**	0.45**	-0.37**	0.02	0.18	0.55**	0.87**	0.56**	0.28	1	
pH	0.44**	0.47**	0.34*	0.05	0.08	0.43**	0.24	0.57**	-0.36**	0.26	1

注: **、* 分别表示 0.01、0.05 水平(双尾)显著相关。

Note: ** and * represent significant correlation at 0.01 and 0.05 levels(both tails) respectively.

3 讨论

森林生态系统稳定及养分循环过程受土壤 C、N、P、K 含量及其分布状况的影响^[17],森林土地覆被通过凋落物分解、根系分泌物及根际微生物的积累等过程调控森林土壤质地^[18]。该研究得出 6 种土地利用类型土壤 SOC、TN 含量随土层深度增加而递减,这与李玉珍等^[19]、王慧等^[14]的研究结果一致。一方面因土壤表层具有较多枯落物分解合成产物,首先聚集在地表^[20],其次土壤表层较底层土壤结构、通气性能更利于土壤微生物生长代谢,致使土壤表层的养分循环较快。研究区 0~10 cm SOC、TN 含量低于我国同层次土壤含量均值^[21],表明黔中森林土壤碳蓄积能力有所降低。这可能是城市化进程不断发展,人为干扰加剧所引起森林土壤肥力下降、土壤生物活性受抑制、凋落物分解率降低等问题,影响了土壤碳氮含量的积累^[4]。

研究发现该区表层土壤 SOC 含量表现为针叶林、针阔混交林、灌木林含量较高,主要原因是该区针叶、针阔和灌木覆被下土壤枯落物较多,根系分泌物及微生物新陈代谢促进枯落物分解过程;耕地由于受人类活动(施肥、翻土等)的影响,使其土壤 SOC 和 TN 相对较高。研究区阔叶林土壤 SOC 和 TN 含量均最低,主要是受人类活动长期践踏,导致土壤结构严重破坏,土壤容重增大,通气性能变劣,进而影响土壤养分循环^[22],最终导致土壤 SOC 和 TN 含量较低。

6 种土地利用类型 0~10 cm 土壤 TP 含量均值低于贵州省表土 TP 含量均值^[23],表明该区 TP 含量水平较低。土壤磷和钾含量主要受母岩、成土作用、有机质矿化过程及气候影响^[19,24],该区特殊的地质环境和气候条件可能是引起 P 素水平偏低的原因。该研究显示,研究区 TP 含量随土层深度增加而降低,降低趋势逐渐减缓,这与李志英等^[25]的研究结果相似,原因可能是磷主要来源于母岩,母岩释放相对稳定,加之地表有机质对其 TP 进行补充,致使 TP 垂直分布差异。针叶林、针阔混交林和灌木林 TK 表现为表层更富集,与前人研究相反^[26],可能与表层土壤有机质矿化作用加快和人为干扰有关,而阔叶林和未利用地 TK 随土层深度增加而增大,这与邓小军等^[26]对猫儿山 3 种森林类型土壤养分的研究一致。土壤 TP、TK 的空间变异均达到了中等变异,变异系数分别为 21.33%、61.21%,磷的变异相对较低,钾的变异较高,原因是磷钾元素除受土壤深度影响外,受土地利用类型的影响也较大导致。该区矿质养分的变异均达中等变异,可能与淋溶作用、地貌、地表覆被、母岩、气候和土壤动物等因子及人类活动的协同作用有关^[27]。耕地因耕作施肥的影响,土壤 TP、TK 含量高于其他 5 种覆被类型。

土壤 C、N、P 的化学计量比对土壤内部养分循环特征具有较好的指示作用,已有研究表明,其比值在一定范围内可反映土壤养分限制情况及养分的有效性^[28]。由于土壤 C、N、P 含量受气候、植被、母质、微生物等成土因子和人类活动综合影响,致使其养分有较大的空间变异^[29]。该研究发现,6 种土地利用类型各层的 C/N 的变异系数较 SOC 和 TN 大幅降低,这与 Tian 等^[21]的研究结果相近,其原因可能是 SOC 和

TN 具有相似变化规律。这种规律反映了土壤 C、N 对环境变化的协同效应。而 6 种土地利用类型的土壤 C/P 和 N/P 变异系数较高,其原因可能是 SOC 和 TN 的空间变异性较大。

土壤 C/N 通过影响与 SOC 分解相关的微生物活性,进而影响土壤养分的积累^[21]。一定范围内,低的土壤 C/N 将促进微生物对 SOC 的矿化;反之,则分解 SOC 的微生物受元素限制^[30]。该研究中针阔混交林、灌木林和未利用地 0~10 cm 土层 C/N 均高于全球森林土壤同层次的平均水平(12.40)及全国土壤同层次平均水平(12.00)^[21]。土壤 C/N 以未利用地和灌木林较大,原因是未利用地和灌木林混作土壤 0~10 cm 具有较高的 SOC 和较低的 TN,说明未利用地和灌木林的 SOC 矿化能力较其他 4 种土地利用类型差。而阔叶林 C、N 含量变化与其余 5 种土地利用类型相比有较大差异,即较低的 C、N 导致较低的 C/N 其原因可能是公园阔叶林区人类活动更频繁,降低了土壤 C、N 养分含量,进而影响 C/N。研究区内土壤 C/N 随土层深度加深呈先增后减趋势,与李江荣等^[31]的研究结果相近,可能是植物根系的富集作用,及研究区土层较薄深层土壤接近母质层导致养分含量降低。

C/P 是土壤 P 素的矿化能力的指示因子,也是表征微生物分解 SOC 释放 P 或吸收 P 潜力的指标^[32]。该研究中,6 种土地利用类型 0~10 cm 土层 C/P 均值低于贵州省表土的平均水平(50.92)^[23],高于喀斯特峰丛洼地的平均水平(17.70)^[32]。区域内 C/P 较低,表明 P 素的有效性较高。不同土地利用类型土壤的 C/P 不同,可能由于不同土地利用类型优势种群的差异,使不同土地利用对养分需求不同,而导致土壤养分的差异,进而造成 C/P 的差异。C/P 随土层深度变化趋势与 SOC 变化趋势一致,这与前人的研究结果一致^[31],这主要是 SOC 随土层深度增加而大幅降低造成。

N/P 可作为 N 饱和的指示因子,被用来确定养分限制的阈值^[33]。6 种土地利用类型土壤的 N/P 随土层深度的增加而减小,这可能是土壤 TN 含量随土层深度增加而降低造成的。研究区 N/P 均值均低于我国陆地土壤均值(3.90)、贵州表层土壤均值(3.75)^[23]。该区 0~10 cm 土壤 N/P 大小表现为针阔混交林>针叶林>耕地>未利用地>灌木林>阔叶林。说明该区土壤 N 素较缺乏,氮素成为该森林公园植物生长的限制因子,且未利用地、灌木林和阔叶林较其他土地类型更易受到氮胁迫。因此,适当的施加氮素对公园土壤生态计量比的维持有重要作用。

李培玺等^[12]研究发现,C 与 N 和 P 及 N 与 P 有极显著正相关($P<0.01$)。该研究发现,土壤 C、N、P、K 两两间均呈极显著正相关。还发现 pH 与 C、N 为极显著正相关,与 K 为显著正相关,而与 P 相关性不强,与李培玺等^[12]研究近似。说明土壤 C、N、P、K 及其生态化学计量比紧密相关。冗余分析发现,土壤 SOC 对 C/P 的影响大于 TP, SOC 较 TN 和 TK 对 C/N 和 C/K 的影响较大, TN 较 TP 和 TK 对 N/P 和 N/K 的影响更大, TK 相对于 TP 对 P/K 的影响较大,与前人的研究结果一致^[14]。

4 结论

该研究显示,研究区6种土地利用类型C、N、P、K及其化学计量特征表明,土层深度和土地利用类型对土壤SOC、TN、TP、TK均有一定程度影响,土壤SOC、TN、TK较P更易受到土层深度和土地利用方式的影响。针阔混交林和针叶林对研究区土壤质量的改善具有积极作用。研究区6种土地利用类型土壤C/N较其他指标变异较小,且C/N低于贵州省表层土壤C/N平均水平,研究区有机质矿化作用缓慢。N/P均低于全国平均水平及贵州省表层土壤平均水平,研究区土壤表现为氮素缺乏。不同土地利用类型的土壤C、N、P、K与其计量比具有较强的耦合关系。研究区土壤C/N、C/P、C/K主要受SOC控制,N/P和N/K主要由TN控制,P/K主要受到TK含量的影响。

参考文献

- [1] 肖强, 肖洋, 欧阳志云, 等. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 216-223.
- [2] 骆玉珍, 张维维, 李雅颖, 等. 上海市公园绿地土壤肥力特征分析与综合评价[J]. 中国土壤与肥料, 2019(6): 86-93.
- [3] MOREL J L, CHENU C, LORENZ K. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAS) [J]. Journal of soils & sediments, 2015, 15(8): 1659-1666.
- [4] 陶晓, 俞元春, 张云彬, 等. 城市森林土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 88-96.
- [5] SARDANS J, JANSSENS I A, CIAIS P, et al. Recent advances and future research in ecological stoichiometry [J]. Perspectives in plant ecology, evolution and systematics, 2021, 50: 1-24.
- [6] JIANG P P, CHEN Y M, CAO Y C. N:P stoichiometry and carbon storage in a naturally regenerated secondary *Quercus variabilis* forest age sequence in the Qinling Mountains, China [J]. Forests, 2017, 8(8): 1-17.
- [7] DU C J, GAO Y H. Grazing exclusion alters ecological stoichiometry of plant and soil in degraded alpine grassland [J/OL]. Agriculture, ecosystems & environment, 2021, 308 [2021-09-27]. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107256.
- [8] 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.
- [9] 唐高溶, 郑伟, 王祥, 等. 喀纳斯景区山地草甸不同退化阶段群落共有种的生态化学计量特征研究[J]. 草业学报, 2016, 25(12): 63-75.
- [10] 吴昊, 邹梦茹, 王思宇, 等. 秦岭松栎林土壤生态化学计量特征及其对海拔梯度的响应[J]. 生态环境学报, 2019, 28(12): 2323-2331.
- [11] HUI D F, YANG X T, DENG Q, et al. Soil C:N:P stoichiometry in tropical forests on Hainan Island of China: Spatial and vertical variations [J]. CATENA, 2021, 201: 1-10.

- [12] 李培玺, 储炳银, 滕臻, 等. 巢湖湖滨带不同植被类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 草业科学, 2020, 37(8): 1448-1457.
- [13] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 160-170.
- [14] 王慧, 郭月峰, 姚云峰, 等. 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.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 李占斌, 周波, 马田田, 等. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 312-318.
- [17] 曹祥会, 龙怀玉, 周脚根, 等. 中温-暖温带表土碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性: 以河北省为例[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6053-6063.
- [18] MCGRODDY M E, DAUFRESNE T, HEDIN L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: Implications of terrestrial redfield-type ratios [J]. Ecology, 2004, 85(9): 2390-2401.
- [19] 连玉珍, 曹丽花, 刘合满, 等. 色季拉山西坡高海拔区土壤养分含量及化学计量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(1): 140-150.
- [20] FENG D F, BAO W K, PANG X Y. Consistent profile pattern and spatial variation of soil C/N/P stoichiometric ratios in the subalpine forests [J]. Journal of soils and sediments, 2017, 17(8): 2054-2065.
- [21] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.
- [22] 秦娟, 许克福. 我国城市绿地土壤质量研究综述与展望[J]. 生态科学, 2018, 37(1): 200-210.
- [23] 侯堂春, 喻阳华, 钟欣平. 贵州省表土生态化学计量特征[J]. 西南农业学报, 2020, 33(10): 2310-2315.
- [24] 王辽宏, 邱莉萍, 高海龙, 等. 农牧交错带本氏针茅坡地土壤-植物系统磷素分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1192-1199.
- [25] 宁志英, 李玉霖, 杨红玲, 等. 沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力和多样性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3537-3546.
- [26] 邓小军, 曹继钊, 宋贤冲, 等. 猫儿山自然保护区3种森林类型土壤养分垂直分布特征[J]. 生态科学, 2014, 33(6): 1129-1134.
- [27] 杨丹丽, 喻阳华, 秦仕亿, 等. 石漠化区不同利用类型土地养分的含量及其生态化学计量特征[J]. 西南农业学报, 2018, 31(9): 1875-1881.
- [28] 余道, 刘子琦, 喻阳华, 等. 黔西南石漠化区不同群落土壤碳氮磷垂直分异及化学计量特征[J]. 西南农业学报, 2021, 34(10): 2231-2239.
- [29] 王璐, 喻阳华, 邢容容, 等. 喀斯特高原山区主要人工林土壤生态化学计量特征[J]. 南方农业学报, 2017, 48(8): 1388-1394.
- [30] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 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): 4674-4682.
- [31] 李江荣, 高郑, 郑维列, 等. 急尖长苞冷杉4种林型土壤养分特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(11): 108-119.
- [32] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤C、N、P化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 947-954.
- [33] TESSIER J T, RAYNAL D 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.

(上接第92页)

- [3] 张彦彬, 安楠, 刘佩艳, 等. 基于MODIS数据的山西省六大煤田区植被覆盖度时空变化特征及其驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(1): 162-170.
- [4] 赵秀霞, 楚新正, 马晓飞, 等. 基于像元二分模型的艾比湖湿地NDVI指数对微气候的响应[J]. 草业科学, 2017, 34(6): 1168-1177.
- [5] 韩雪莹. 近30年毛乌素沙地沙漠化土地时空动态变化及其自相关研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [6] 邹彬. 西安市植被覆盖度冷热点时空动态变化及其风险分析[J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(2): 197-204.
- [7] 陈晓光, 李剑萍, 韩颖娟, 等. 宁夏近20年来植被覆盖度及其与气温降

- 水的关系[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1375-1383.
- [8] 何清芸, 牟风云, 李秋彦, 等. 重庆植被覆盖度时空演变及驱动力地理学探究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 11955-11962.
- [9] 晋成名, 杨兴旺, 景海涛. 基于RS的陕北地区植被覆盖度变化及驱动力研究[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(4): 258-264.
- [10] 高鹏文, 阿里木江·卡斯木, 赵永玉, 等. 1988—2018年哈密绿洲植被覆盖度时空变化及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 273-280, 287.
- [11] 彭晶晶, 闫如柳. 湖南省植被覆盖度动态变化监测及影响因素分析[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(7): 51-54.
- [12] 封山禁牧成为中国西部地区生态恢复的有效途径[J]. 农村实用技术, 2009(8): 27.