

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.10.004

紫色土区典型土地利用方式下 土壤碳、氮、磷生态化学计量特征分析

梁珂, 何丙辉

西南大学 资源环境学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 为明确紫色土区不同土地利用方式对土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)质量分数及其生态化学计量比变化的影响, 对比分析了 3 种典型土地利用方式(林地、园地、耕地)下, 不同土层(0~5, 5~10, 10~15, 15~20 cm) C, N, P 质量分数及其生态化学计量比变化特征及其影响因素. 研究表明: 0~5 cm 土层, 林地 C 及园地 N 质量分数均显著高于耕地($p < 0.05$), 而 5~10, 10~15, 15~20 cm 土层 C, N 质量分数差异均无统计学意义($p > 0.05$); 在所有土层中, 园地 P 质量分数显著高于林地、耕地($p < 0.05$). 研究区土壤 C : N, C : P, N : P 均值分别为 10.63, 36.08, 3.32, 皆低于中国与全球土壤均值. 0~5 cm 土层, 林地 C : N, C : P, N : P 显著高于园地($p < 0.05$); 5~10, 10~15, 15~20 cm 土层, 耕地 C : P, N : P 显著高于园地($p < 0.05$). 相同土地利用方式下 0~5 cm 土层的 C, N, P 质量分数均显著高于 5~10, 10~15, 15~20 cm 土层($p < 0.05$), 但 C : N, C : P, N : P 差异无统计学意义($p > 0.05$). 土壤容质量、pH 值、含水率与土壤 C, N 质量分数相关性有统计学意义($p < 0.05$), 电导率、阳离子交换量与土壤 P 质量分数、C : P, N : P 相关性有统计学意义($p < 0.05$). 研究区林地土壤 C, N, P 比例相对更均衡, 土壤理化性质间存在显著相互作用, N 为该区域土壤养分限制性元素.

关键词: 土地利用方式; 化学计量特征; 碳质量分数; 侵蚀;
紫色土

中图分类号: S153.6 文献标志码: A
文章编号: 1673-9868(2022)10-0029-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Stoichiometry Characteristics under Typical Land Uses in Purple Soil Area

LIANG Ke, HE Binghui

College of Resources and Environment, Southwest University/Key Laboratory of Eco-environment in the
Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China

Abstract: In this study, the effects of different land uses on soil carbon (C), nitrogen (N), phosphorus

收稿日期: 2022-01-10
基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U20A20326); 国家自然科学基金青年科学基金项目(42107347); 中央高校基
本科研业务费项目(SWU-KT22060).
作者简介: 梁珂, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀与生物地球化学循环研究.
通信作者: 何丙辉, 教授, 博士研究生导师.

(P) contents and stoichiometry ratios as well as their influencing factors were determined. Soil samples were collected from three representative land uses including forest land, garden, arable land at different soil layers (i. e. 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 cm). C content in forest land soil and N content in garden soil were significantly higher than those of in arable land soil at 0-5 cm soil layer ($p < 0.05$), while the variations of C and N contents were not significant among 5-10, 10-15, 15-20 cm soil layers ($p > 0.05$). P content was significantly higher in garden soil than in forest and arable land soils across four soil layers ($p < 0.05$). The average values of soil C : N, C : P and N : P were 10.63, 36.08 and 3.32 in the study area, which are lower than the Chinese and global averages, respectively. C : N, C : P and N : P were significantly higher in forest land soil than in garden soil ($p < 0.05$) at the 0-5 cm soil layer, and C : P and N : P were significantly higher in arable land soil than garden soil at 5-10, 10-15, 15-20 cm soil layers ($p < 0.05$). C, N and P contents were significantly higher at the 0-5 cm soil layer than those in other three soil layers ($p < 0.05$), but C : N, C : P and N : P were not significant among all soil layers ($p > 0.05$) under the same land use. Soil bulk density, pH and soil moisture content were significantly correlated with soil C and N contents ($p < 0.05$), while electron conductivity and cation exchange capacity were significantly correlated with soil P content, C : P and N : P ($p < 0.05$). The results indicated that the proportion of C, N and P was much more balanced in the forest land than in garden and arable lands. There was significant interaction among soil physical and chemical properties. Nitrogen was the limiting soil nutrient element in the study area.

Key words: land uses; stoichiometric characteristics; carbon content; erosion; purple soil

土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)是植物生长所必需的营养元素,在生态系统的演替过程中起重要作用^[1]. 土地利用是影响土壤 C,N,P 循环最主要的因素之一^[2]. 不同土地利用方式下植被类型、养分输入、管理措施、侵蚀强度及理化性质等不同,显著改变了土壤环境,进而导致土壤 C,N,P 质量分数及其生态化学计量比发生改变^[3-6]. 土壤 C,N,P 生态化学计量影响着植物初级生产力、微生物活动、土壤质量等,是全球生物化学平衡与循环的关键因素^[7-9]. 因此,研究不同土地利用下土壤 C,N,P 的生态计量特征对揭示土壤 C, N,P 有效性及其平衡与循环机制具有重大意义^[10].

紫色土是四川盆地一种典型的土壤类型,其矿质养分丰富,肥力较高,农业利用价值很高. 然而,由于降雨丰富,农业生产活动频繁,垦殖率高,紫色土区的水土流失较为严重^[11]. 近年来,为取得较好的水土保持效益,紫色土部分区域实施了耕地转林地、园地等水土流失治理措施^[12-13]. 这些措施改变了土地利用方式,导致土壤 C,N,P 质量分数及生态化学计量比发生变化,但其变化程度和量级尚未量化^[14-15]. 鉴于此,本研究通过对比分析同一紫色土区坡面 3 种不同土地利用方式(耕地、园地、林地)下土壤 C,N,P 质量分数及其生态化学计量比差异,揭示不同土地利用方式对土壤生态化学计量变化的影响特征,为区域土地的合理利用及生态恢复重建提供科学指导.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究地点位于重庆市忠县石宝寨石盘丘小流域(108°10'25"E, 30°24'53"N),其地势南低北高,海拔 119~780 m. 该区域气候为典型湿润季风气候,年均降雨量 1 100 mm,年均气温为 18.5 °C. 该小流域总面积约 0.44 km²,土壤以中性紫色土和水稻土为主,主要土地利用方式为耕地(35.46%)、林地(28.17%)、园地(13.78%). 耕地主要为玉米、油菜轮作,每年施尿素 250~350 kg/hm² 和标准复混肥 300~600 kg/hm²; 园地树种为柑橘,每年施标准复混肥 500~900 kg/hm²; 林地树种主要以马尾松为主,夹杂柏木、栎属和杉木等,无施肥.

1.2 样品采集与分析

2019 年 5 月分别在 3 种土地利用方式的(耕地、园地、林地)坡顶、坡中、坡脚各选择 3 个代表性样地, 每个样地面积为 10 m×10 m. 按“S”型布设 7 个采样点, 各点均采集 0~5, 5~10, 10~15, 15~20 cm 土层样品, 并将相同土层 7 个采样点的土壤均匀混合后, 用四分法收集 1 kg 混合土样, 装入塑料袋编号后带回实验室备用. 同时, 各土层 7 个采样点均用铝盒和环刀采样, 密封后带回实验室测定土壤含水率(SMC)和容质量(BD).

实验室内, 将混合土样自然风干后去除砾石、植物等杂物, 研磨过筛(1.0 mm), 分成 2 份. 一份用于测定土壤 pH 值、电导率(EC)和阳离子交换量(CEC), 另一份进一步筛分(0.25 mm)后用于测定土壤有机碳(C)、全氮(N)和全磷(P)质量分数. 各指标的具体测定方法为: C 采用重铬酸钾外加热法, N 采用半微量开氏蒸馏法, P 采用钼蓝比色法. 土壤含水率(SMC)采用烘干法, 土壤容质量(BD)采用环刀法, pH 值采用电位法, 土壤 EC, CEC 分别采用电导法、醋酸铵法^[16].

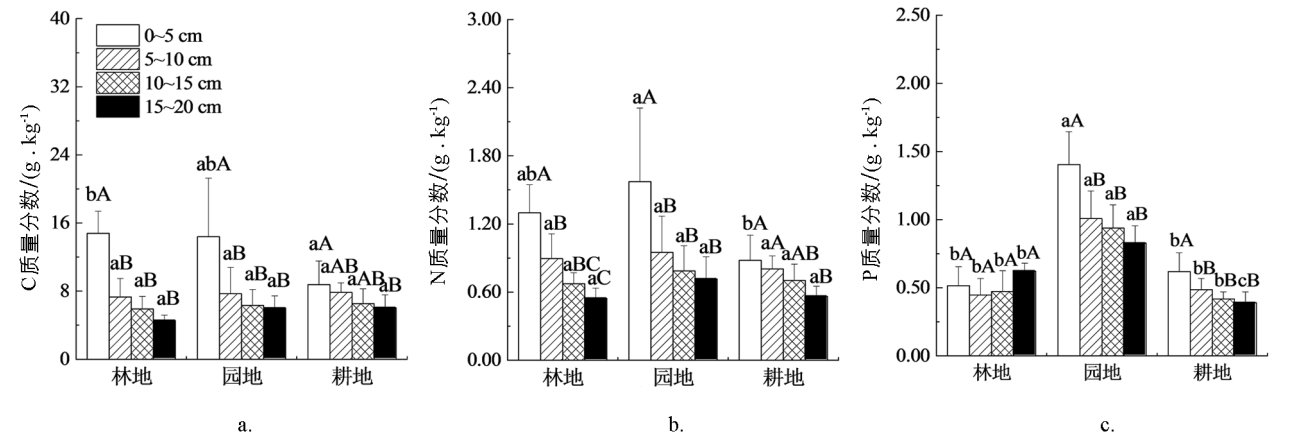
1.3 数据处理

采用 SPSS 18.0 软件进行数据处理和分析. 采用单因素方差(One-way ANOVA)和 Turkey 法比较不同土地利用方式间及相同土地利用方式各土层间土壤 C, N, P 质量分数及化学计量比的差异性. 采用 Pearson 系数表征 C, N, P 质量分数及生态化学计量比与其他土壤性质(SWC, BD, pH 值, EC, CEC)之间的相关性. 显著性水平为: $p < 0.05$ 为差异有统计学意义, $p < 0.01$ 为差异极有统计学意义. 采用 Originlab 2018 绘图. 本研究中土壤 C, N, P 的生态化学计量比均为摩尔比.

2 结果与分析

2.1 土壤 C, N, P 质量分数

如图 1 所示, 0~5 cm 土层中, 园地 C 质量分数与林地、耕地差异无统计学意义($p > 0.05$), 而林地 C 质量分数显著高于耕地($p < 0.05$); 5~10, 10~15, 15~20 cm 土层中, 不同土地利用之间 C 质量分数差异均无统计学意义($p > 0.05$). 0~5 cm 土层中, 林地 N 质量分数与园地、耕地差异无统计学意义($p > 0.05$), 但园地 N 质量分数显著高于耕地($p < 0.05$); 5~10, 10~15, 15~20 cm 土层中, 各土地利用之间 N 质量分数差异均无统计学意义($p > 0.05$). 0~5, 5~10, 10~15 土层中, 园地 P 质量分数显著高于林地、耕地($p < 0.05$), 而林地与耕地差异无统计学意义($p > 0.05$); 15~20 cm 土层中, 各土地利用之间 P 质量分数差异均有统计学意义($p < 0.05$), 从大到小依次为: 园地(0.83 g/kg)、林地(0.62 g/kg)、耕地(0.39 g/kg).



不同小写字母表示相同土层不同土地利用方式差异有统计学意义($p < 0.05$), 不同大写字母表示相同土地利用方式不同土层差异有统计学意义($p < 0.05$), 下同.

图 1 不同土地利用方式各土层 C, N, P 质量分数

林地中, 0~5 cm 土层 C 质量分数显著高于其他土层($p<0.05$), 其他土层间 C 质量分数差异无统计学意义($p>0.05$); 0~5 cm 土层 N 质量分数显著高于其他土层, 且 5~10 cm 土层 N 质量分数也显著高于 15~20 cm 土层($p<0.05$); 各土层间 P 质量分数差异无统计学意义($p>0.05$). 在园地、耕地中, 0~5 cm 土层的 C, N, P 质量分数均显著高于其他土层($p<0.05$), 而 5~10, 10~15, 15~20 cm 土层之间差异均无统计学意义($p>0.05$).

2.2 土壤 C,N,P 生态化学计量比

如图 2 所示, 0~5 cm 土层中, 耕地 C : N 与林地、园地差异无统计学意义($p>0.05$), 而林地 C : N 显著高于园地($p<0.05$); 5~10, 10~15, 15~20 cm 土层中, 不同土地利用方式之间 C : N 差异无统计学意义($p>0.05$). 0~5 cm 土层中, 林地 C : P 显著高于园地、耕地($p>0.05$), 而园地与耕地差异无统计学意义($p>0.05$); 5~10, 10~15 cm 土层中, 园地 C : P 显著低于林地、耕地($p>0.05$), 而林地与耕地差异无统计学意义($p>0.05$); 15~20 cm 土层中, 耕地 C : P 显著高于林地、园地($p>0.05$), 而林地与园地差异无统计学意义($p>0.05$). 0~5 cm 土层中, 林地 N : P 显著高于园地、耕地($p>0.05$), 而园地与耕地差异无统计学意义($p>0.05$); 5~10, 10~15 cm 土层中, 园地 N : P 显著低于林地、耕地($p>0.05$), 而林地和耕地差异无统计学意义($p>0.05$); 15~20 cm 土层中, 耕地 N : P 显著高于林地、园地($p>0.05$), 而林地与园地差异无统计学意义($p>0.05$).

林地中, 0~5 cm 土层 C : N, C : P, N : P 显著高于其他土层($p>0.05$), 其他土层间 C : N, C : P, N : P 差异无统计学意义($p>0.05$). 在园地、耕地中, 各土层之间 C : N, C : P, N : P 差异均无统计学意义($p>0.05$).

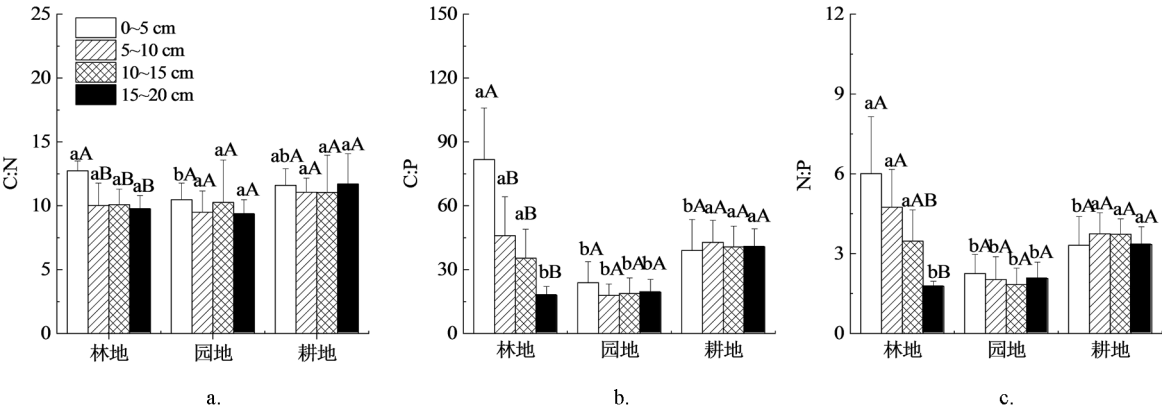


图 2 不同土地利用方式各土层 C,N,P 生态化学计量比

2.3 其他土壤性质

如图 3 所示, 在所有土层中, 林地 BD 均显著大于园地、耕地($p<0.05$), 园地与耕地差异无统计学意义($p>0.05$); 不同土地利用方式间 pH 值、SMC 差异均无统计学意义($p>0.05$); 园地 EC 显著高于林地、耕地($p<0.05$), 林地与耕地差异无统计学意义($p>0.05$); 不同土地利用方式间 CEC 差异有统计学意义($p<0.05$).

同一土地利用方式中, BD, pH 值随土层递增, SMC, EC 随土层加深递减. 在林地、园地、耕地中, 15~20 cm 土层 BD 显著大于 0~5 cm 土层($p<0.05$); 各土层之间 pH 值, SMC, EC, CEC 差异均无统计学意义($p>0.05$).

2.4 土壤 C,N,P 生态化学计量比与土壤各因子的相关性

由表 1 可看出, 土壤 C, N 质量分数与 BD, pH 值呈极显著负相关($p<0.01$), 与 SMC 呈极显著正相关($p<0.01$), N 质量分数与 CEC 呈显著正相关($p<0.05$); 土壤 P 质量分数与 EC, CEC 呈极显著正相关($p<0.01$), C : N 与 CEC 呈显著负相关($p<0.05$); C : P, N : P 与 EC, CEC 均呈极显著负相关($p<0.01$).

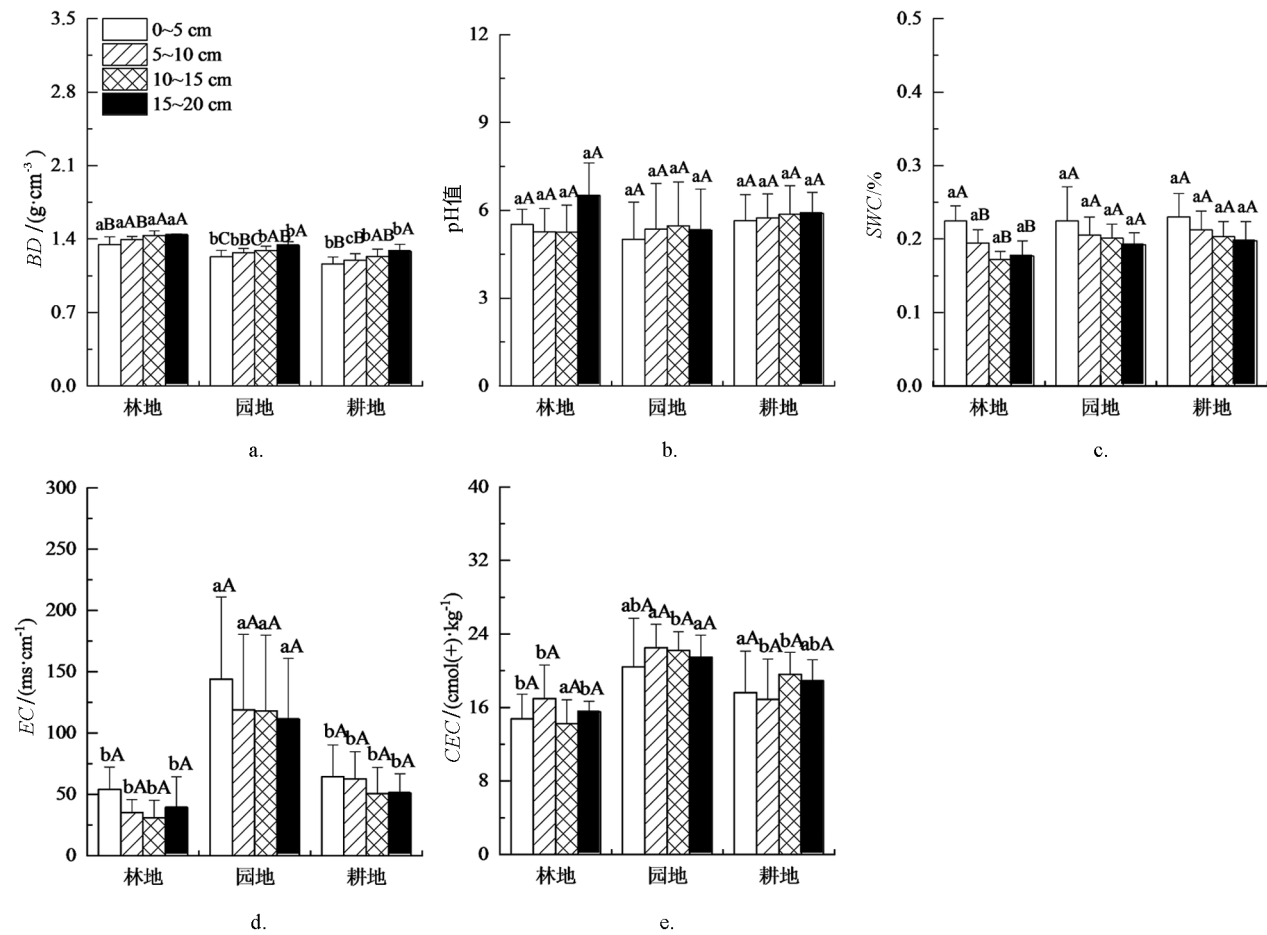


图 3 不同土地利用方式各土层选择的其它土壤性质

表 1 土壤 C,N,P 质量分数及其生态计量比与选择的其它土壤性质的相关性

项目	BD	pH 值	SMC	EC	CEC
C	−0.291**	−0.239**	0.391**	0.091	0.083
N	−0.301**	−0.299**	0.426**	0.149	0.211*
P	−0.173	−0.142	0.156	0.596**	0.387**
C : N	−0.092	0.029	0.017	−0.171	−0.226*
C : P	−0.017	−0.089	0.153	−0.351**	−0.445**
N : P	0.013	−0.101	0.151	−0.383**	−0.381**

注: * $p<0.05$, ** $p<0.01$.

3 讨论

3.1 不同土地利用方式下土壤 C,N,P 质量分数特征

本研究结果表明,林地与园地 C,N 质量分数总体上高于耕地,这与罗由林等^[17]研究结果相似. 施肥增加了耕地和园地中土壤 C,N 输入量,但耕地植被覆盖远低于园地,农业翻耕等活动频繁,破坏了土壤团粒体结构,促进土壤有机质矿化和土壤侵蚀,导致了 C,N 元素大量流失^[4,15,18]. 此外,与耕地相比,林地、园地内的植被枯枝落叶能有效增加表层土壤 C,N 质量分数,加之浅层根系发达,土壤结构良好,有利于土壤 C,N 固存^[19]. 在本研究中,园地土壤 P 质量分数显著高于林地、耕地. 这可能是因为一方面园地施肥增加了外源 P 肥输入,另一方面,相比耕地,园地水土流失程度较轻,减少了土壤 P 流失.

各土地利用方式下,土壤 C,N 质量分数随土层深度增加而递减,表层土壤 C,N 质量分数(0~5 cm)显

著高于其他土层,这与杜映妮等^[20]的研究结果相似.这可能是因为表层土壤易受外界环境因素的影响,植物的枯枝落叶及施肥均为表层土壤提供了充足的 C,N 源,呈现出表聚性^[21].水分垂直运动可使 C,N 向下层迁移,但在迁移过程中,其扩散能力随土层深度增加而递减,使得下层土壤 C,N 质量分数增加不明显^[22].土壤 P 在耕地和园地中同土壤 C,N 一样呈表聚性,而在林地 15~20 cm 土层中最高.这可能是因为不同土地利用方式下土壤 P 的主要来源不同.在耕地、果园等土壤中,因长期施肥导致了土壤 P 呈现表聚性,而林地土壤 P 主要来源于土壤母质风化产物,因此林地 15~20 cm 土层 P 质量分数最高^[23-24].

3.2 不同土地利用方式下土壤 C,N,P 生态化学计量比特征

本研究中,土壤 C:N 值从大到小依次为:耕地(11.33)、林地(10.72)、园地(9.90),土壤 C:P 值从大到小依次为:林地(49.94)、耕地(40.82)、园地(20.02),土壤 N:P 值从大到小依次为:林地(4.48)、耕地(3.54)、园地(2.05),表明土地利用方式可导致 C,N,P 生态化学计量变化,这与王维奇等^[25]的研究结果相似.这可能是因为各土地利用方式下土壤 C,N,P 的积累与流失机制不同.一方面,与施肥增加耕地 C,N,P 输入量相比,林地通过植被反馈积累 C,N,P 元素,而园地则通过施肥及植被反馈共同积累,不同的输入方式可使土壤 C,N,P 质量分数呈不同比例增加,而改变它们的生态化学计量比.另一方面,耕地与林地、园地相比,水土流失更严重^[15];此外,土壤 C,P 主要以颗粒态流失,N 主要以溶解态流失^[26],土壤 C,N,P 不同的流失形态使得土壤 C,N,P 在不同侵蚀强度下流失比率会不一样,这也使得 3 种土地利用方式下土壤生态化学计量比产生差异.因此,导致在 3 种土地利用方式下耕地土壤 C:N 高于林地、园地,林地土壤 C:P,N:P 高于耕地.本研究中,耕地 C:P,N:P 均大于园地,这可能是因为园地土壤 P 质量分数较高,且能够更好地固存外源输入性 P 肥,使得园地 C:P,N:P 较低.不同土地利用方式下,各土层之间 C:N,C:P,N:P 差异均无统计学意义,表明各土层间 C,N,P 的比例变化不大,这与 Li 等^[27]的研究结果相似.

土壤 C,N,P 生态化学计量比是衡量 C,N,P 元素平衡与循环,判断土壤有机物组成及矿化、累积程度的重要指标^[1].研究区各土地利用方式土壤平均的 C:N(10.63),C:P(36.08)及 N:P(3.32)均低于中国土壤平均值(分别为 13.9,154.9,11.3)^[28]及全球土壤平均值(分别为 14.3,186.0,13.1)^[29],表明 N 为该区域土壤限制元素,这与 Li 等^[27]结果相似.这可能是因为相比于 C 和 P,N 更易随径流发生淋溶和横向迁移流失.降雨径流通常优先搬运土壤中 N、极少的可溶性 C 和 P、较轻的植物残体和凋落物,而泥沙开始迁移时,土壤 C,P 才随泥沙开始大量流失^[15,30].

3.3 不同土地利用方式下土壤 C,N,P 质量分数及生态化学计量比的影响因素

土壤 BD,pH 值与土壤 C,N 质量分数皆呈极显著负相关,这与张晗等^[31]研究结果一致.土壤 BD 反映土壤疏松程度,BD 小,土壤下渗及蓄水能力强,有利于植物生长和土壤养分积累^[32].pH 值显著影响土壤微生物及酶的活性进而影响土壤 C,N 固定和积累能力;pH 值减小时,微生物及酶分解活动减弱,有利于土壤 C,N 贮存^[33].土壤 SMC 与土壤 C,N 质量分数呈极显著正相关,这与丁小慧等^[34]的研究结果一致.土壤 SMC 与土壤养分循环、微生物活动、植物光合生理过程密切相关^[35-36];较高的土壤 SMC 厌氧细菌反硝化作用增强,矿化速率降低,固氮能力增强,有利于 C,N 矿化积累^[37].土壤 EC,CEC 与土壤 P 质量分数呈极显著正相关,与土壤 C:P,N:P 呈极显著负相关,这与宋佳龄等^[38]研究结果相似.土壤 EC 与含盐量呈显著相关关系,常用来表示含盐量的高低^[39].本研究中 EC 对土壤 P 的固定有促进作用.酸性紫色土土壤 P 固定主要通过铝、铁离子^[40],CEC 一定程度上可以代表土壤的固 P 能力.当 CEC 增大时,紫色土中铝、铁离子增多,对磷酸根离子的吸附增强,土壤固 P 能力变强^[38,41].

4 结论

土地利用方式显著影响土壤 C,N,P 质量分数及其生态计量比.由于林地、园地和耕地 3 种土地利用方式 C,N,P 的积累与流失机制差异,耕地土壤 C,N,P 质量分数最低,但其 C:N 相对最大,而 C:P,N:P 低于林地,高于园地.各土地利用方式下 C,N 质量分数和耕地、园地 P 质量分数均为 0~5 cm 土层最高,而林地 P 质量分数 15~20 cm 土层最高($p<0.05$);各土层间 C:N,C:P,N:P 差异也无统计学意

义($p>0.05$). 土壤 C,N 质量分数与土壤 BD,pH 值及 SMC 相关性有统计学意义($p<0.05$), 土壤 P 质量分数,C:P,N:P 则与 EC,CEC 相关性有统计学意义($p<0.05$). 研究区各土地利用方式下土壤的 N:P 均值小于中国及世界土壤的平均值, 表明 N 为该区土壤限制性营养元素.

参考文献:

[1] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展 [J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5484-5492.

[2] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵区土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 177-185.

[3] 赵彤, 闫浩, 蒋跃利, 等. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5615-5622.

[4] 邓利梅, 陆传豪, 刘刚才. 川中丘陵区耕地撂荒对土壤肥力的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 36-44.

[5] 侯建伟, 邢存芳, 邓晓梅, 等. 花椒园土壤养分质量比特征对秸秆生物质炭类型与施用量的响应 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(2): 80-85.

[6] 张巧颖, 陈志强, 陈志彪, 等. 长汀县红壤侵蚀区土壤生态化学计量学特征 [J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2017, 40(5): 699-702.

[7] 程滨, 赵永军, 张文广, 等. 生态化学计量学研究进展 [J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1628-1637.

[8] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64-71.

[9] 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.

[10] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 等. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5594-5602.

[11] 廖晓勇, 陈治谏, 刘邵权, 等. 三峡库区紫色土坡耕地不同利用方式的水土流失特征 [J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 159-161.

[12] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区典型退耕还林模式水土保持功能研究 [J]. 中国水土保持, 2017(1): 33-37, 68.

[13] 刘勇, 王玉杰, 王红霞, 等. 长江三峡库区 6 种退耕还林模式涵养水源与保育土壤效益及其价值估算 [J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(6): 50-58.

[14] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制 [J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3825-3831.

[15] 张晓艳, 李琴书. 不同土地利用方式对土壤侵蚀及养分流失的影响 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 12-17.

[16] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.

[17] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近 30 年川中丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮磷生态化学计量特征变化 [J]. 土壤, 2016, 48(4): 726-733.

[18] 孔涛, 张德胜, 寇涌苹, 等. 浑河上游典型植被河岸带土壤有机碳、全氮和全磷分布特征 [J]. 土壤, 2014, 46(5): 793-798.

[19] 段亚锋, 王克林, 冯达, 等. 典型喀斯特小流域土壤有机碳和全氮空间格局变化及其对退耕还林还草的响应 [J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1560-1568.

[20] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 等. 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤 C、N、P 和 K 化学计量特征 [J]. 环境科学, 2020, 41(1): 394-402.

[21] LIU Y, JIANG M, LU X G, et al. Carbon, Nitrogen and Phosphorus Contents of Wetland Soils in Relation to Environment Factors in Northeast China [J]. Wetlands, 2017, 37(1): 153-161.

[22] 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.

[23] 任嘉欣, 刘京, 陈轩敬, 等. 长期施肥紫色土有效磷变化及其对稻麦轮作产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2021, 54(21): 4601-4610.

[24] 邱亚群. 湖南典型土壤磷的吸附解吸机制及磷流失控制研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.

[25] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响 [J]. 环境科学,

2010, 31(10): 2411-2416.

[26] 郭太龙, 谢金波, 孔朝晖, 等. 华南典型侵蚀区土壤有机碳流失机制模拟研究 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1266-1273.

[27] LI T Y, WANG C Y, HE B H, et al. Soil Nutrient Concentrations and Stoichiometry under Different Tree-Cropping Systems in a Purple Hillslope in Southwestern China [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65(6): 741-754.

[28] 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(1-3): 139-151.

[29] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C : N : P Stoichiometry in Soil: Is there a “Redfield Ratio” for the Microbial Biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.

[30] 刘琳. 黄土坡面有机碳迁移流失机制及模拟研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2018.

[31] 张晗, 欧阳真程, 赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(3): 939-951.

[32] 姚云. 不同坡长条件下扰动地表对紫色土坡面土壤可蚀性的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2014.

[33] 娄翼来, 关连珠, 王玲莉, 等. 不同植烟年限土壤 pH 和酶活性的变化 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 531-534.

[34] 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化 [J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3467-3476.

[35] 陈四清, 崔骁勇, 周广胜, 等. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的 CO₂ 排放速率研究 [J]. 植物学报, 1999, 41(6): 645-650.

[36] 张树兰, 杨学云, 吕殿青, 等. 温度、水分及不同氮源对土壤硝化作用的影响 [J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2147-2153.

[37] 周才平, 欧阳华. 温度和湿度对暖温带落叶阔叶林土壤氮矿化的影响 [J]. 植物生态学报, 2001, 25(2): 204-209.

[38] 宋佳龄, 盛浩, 周萍, 等. 亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征 [J]. 环境科学, 2020, 41(1): 403-411.

[39] 欧阳林梅, 曾冬萍, 闵庆文, 等. 鼓山茶园土壤碳氮磷生态化学计量学特征 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 297-301, 312.

[40] 闫光第, 庞秀萍. 腐植酸盐类对土壤磷固定的抑制 [J]. 北京农业大学学报, 1981(1): 27-36.

[41] 苏玲, 章永松, 林咸永. 干湿交替过程中水稻土铁形态和磷吸附解吸的变化 [J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 410-415.

责任编辑 包颖