

粤北鹿颈水库小流域土壤有机碳 分布特征及其影响因素*

王蝶¹, 江涛¹, 禰映雪², 黎坤¹, 梁作兵¹, 黄颖¹

1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510006

2. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006

摘要: 土壤有机碳是土壤养分和质量评估的重要指标之一, 在小流域尺度上, 研究土壤有机碳(SOC)含量水平和垂向的分布特征及其主要影响因素对土地利用的科学管理具有重要意义。以粤北英德市鹿颈水库小流域为研究对象, 通过采集流域内茶园(英红12号和英红9号)、桉树林、马尾松林和次生林等4种主要土地利用类型的土壤, 测定土壤的粒度组成、土壤容重(BD)、pH、电导率(EC)、SOC、颗粒有机碳(POC)、全氮(TN)、碳氮比(C/N), 以及土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$, 结合采样点的坡度、坡向以及凋落物的质量和厚度, 采用冗余分析研究SOC和POC含量的主要影响因素。结果表明: 1) 鹿颈水库流域土壤pH在4.2~5.8之间, 出现土壤酸化现象, 土壤质地均为粉壤土, 不同土地利用类型之间土壤pH、EC、TN含量、C/N及 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 差异显著($P<0.05$); 2) 在0~40 cm的土壤深度, SOC和POC含量均随深度的增加而降低, 变化范围分别为0.5%~1.3%和1.2~3.9 g/kg, 表现出明显的表聚性, 但不同土地利用类型之间SOC和POC含量没有明显差异; 3) 本研究所选取的土壤因子、地形因子和环境因子可以解释SOC和POC含量78.1%的变异, 其中土壤因子中的C/N、TN含量、pH、土层深度和BD是影响水库流域SOC和POC含量变化的主要因素, SOC和POC含量与C/N、TN含量呈显著正相关, 而与土壤pH、土层深度和BD呈显著负相关。

关键词: 土壤有机碳; 土地利用类型; 碳氮同位素; 冗余分析; 鹿颈水库流域

中图分类号: K903 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2023)01-0075-11

Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in the small watershed of Lujing reservoir, northern Guangdong

WANG Die¹, JIANG Tao¹, XUAN Yingxue², LI Kun¹, LIANG Zuobing¹, HUANG Ying¹

1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

Abstract: Soil organic carbon is one of the important indicators for soil nutrient and quality assessment. At the small watershed scale, studying the horizontal and vertical distribution characteristics of soil organic carbon and its main influencing factors is of great significance to the scientific management of landuse. Taking the small watershed of Lujing Reservoir in Yingde city, northern Guangdong Province as the research object, collecting soils of four main landuse types including *Camellia sinensis* gardens

* 收稿日期: 2021-12-27

录用日期: 2022-01-20

网络首发日期: 2022-05-31

基金项目: 中国博士后科学基金(2021M693588); 国家自然科学基金(41961144027); 广西岩溶动力学重大科技创新基地开放课题(KDL&Guangxi202105)

作者简介: 王蝶(1996年生), 女; 研究方向: 自然地理; E-mail: wangd93@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 江涛(1965年生), 女; 研究方向: 水资源与环境; E-mail: eesjt@mail.sysu.edu.cn

(Yinghong12 (Cs12) and Yinghong9 (Cs9)), *Eucalyptus robusta* forests (Er), *Pinus massoniana* forests (Pm) and secondary forests (SF) in the watershed. Soil particle size composition, pH, electrical conductivity (EC), soil organic carbon (SOC), particulate organic carbon (POC), total nitrogen (TN), carbon to nitrogen ratio (C/N), and soil carbon and nitrogen isotope values ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) were measured, combined with the slope and aspect of the sampling site and the quality and thickness of litter, redundant analysis was conducted to explore the main influencing factors of SOC and POC content. The results show that: 1) The soil pH in the Lujing Reservoir watershed is between 4.2 and 5.8, and soil acidification occurs. The soil texture is silt loamy. The difference in soil pH, EC, TN, T/N, and $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ between different landuse types is significant ($P < 0.05$); 2) In 0~40 cm depth, the SOC and POC content decrease with the increase of the depth, and the variation ranges are 0.5%~1.3% and 1.2~3.9 g/kg, respectively, showing obvious surface aggregation. However, there is no significant difference in SOC and POC content between the different landuse types selected; 3) The soil, topographic and environmental factors selected in this study can explain 78.1% of the variation of SOC and POC. Among them, C/N, TN, pH, soil depth and bulk density(BD) are the main factors affecting the changes in SOC and POC content in this small watershed. SOC and POC were significantly positively correlated with C/N and TN, while significantly negatively correlated with soil pH, soil depth, and BD.

Key words: soil organic carbon; landuse types; carbon and nitrogen isotope; redundancy analysis; Lujing reservoir watershed

土壤有机碳不是一种单纯的化合物,它包括植物、动物和微生物的遗体、排泄物、分泌物及其部分分解产物,以及土壤腐殖质,其数量和质量不仅决定土壤肥力状况、碳库稳定性,同时也是评估土壤质量的重要指标^[1]。土壤是最大的陆生碳库,碳储量分别是大气碳库和生物碳库的2倍和3倍,土壤碳库微小的变化将对全球碳循环产生巨大影响^[2]。土壤有机碳作为碳库的重要组成部分,其累积和分解速率对土壤碳库储量具有决定性作用。此外,土壤颗粒有机碳,即土壤粒径大于53 μm 的土壤有机碳,腐殖质化程度较低,是动物、植物和微生物残体向腐殖质转化过程中的过渡产物,对植被的自然恢复和人为管理措施的干预较敏感,在揭示土壤有机碳动态变化方面有重要作用^[3-4]。

影响土壤有机碳的因素包括结构性因素如气候、植被类型、地形等,以及随机性因素如土地利用类型、耕作管理措施等^[5]。对于不同土地利用类型而言,岑龙沛等^[6]在喀斯特地区的研究发现土壤有机碳的含量表现为灌丛地显著高于乔木林地、草地和撂荒地;而对于滇中尖山河小流域,土壤有机碳含量总体上呈现出园地>林地>坡耕地>荒草地的特征^[7],刘世梁等^[8]发现澜沧江中游地区土壤有机碳含量的大小依次为林地>灌丛>草地>农田。对于土壤有机碳的垂向变化特征的研究均

表明土壤有机碳含量随着土层深度的增加而降低^[9-10]。此外,不同地区土壤有机碳含量的主导影响因素存在差异,商泽安等^[10]发现海南岛次生雨林土壤有机碳与土壤全氮、碱解氮和有效磷呈极显著正相关性,刘波等^[11]对宁夏六盘山华北落叶松林的研究表明土壤有机碳含量与电导率呈显著正相关,而与粗粉粒、黏粒含量呈显著负相关;常帅等^[12]对干旱区锡林郭勒草原的研究表明土壤有机碳与土壤含水量和土壤全氮呈显著性相关;而李理等^[13]对河南宝天曼自然保护区的研究揭示了植被覆盖度和地形因子对土壤有机碳具有重要影响。

粤北地区处于中亚热带红壤丘陵区,东亚季风盛行,雨热同期,湿润多雨,是生态系统生产力高、碳储量大的地区^[14]。亚热带季风常绿阔叶林是研究区的地带性植被,由于人类活动干扰,现已被大面积人工桉树林地和茶园取代^[15],黎艳明等^[16]在该区域开展了次生常绿阔叶林土壤有机碳分布特征的研究,发现土壤有机碳呈显著的表聚性,并且与全氮含量呈显著正相关;而刘姝媛等^[17]对该区桉树人工林土壤有机碳密度及其影响因素的探究表明其有机碳含量略高于同一地区的马尾松和杉树林,与土壤全氮的含量呈显著正相关。但针对该区域小流域尺度下不同土地利用类型土壤有机碳的分布特征及其主要影响因素的研

究鲜有报道。为此, 选取粤北英德市鹿颈水库小流域为研究对象, 针对流域次生林、桉树林、松树林和茶园4种主要土地利用类型, 通过野外实地采样、实验室分析及统计方法研究不同土地利用类型土壤质地、土壤容重(BD)、pH、电导率、土壤有机碳、土壤颗粒有机碳、全氮、碳氮比及碳、氮同位素值的空间分布特征, 结合地形和凋落物数据, 探究土壤有机碳、土壤颗粒有机碳的主要影响因子, 以期为粤北小流域土地利用的科学管理提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

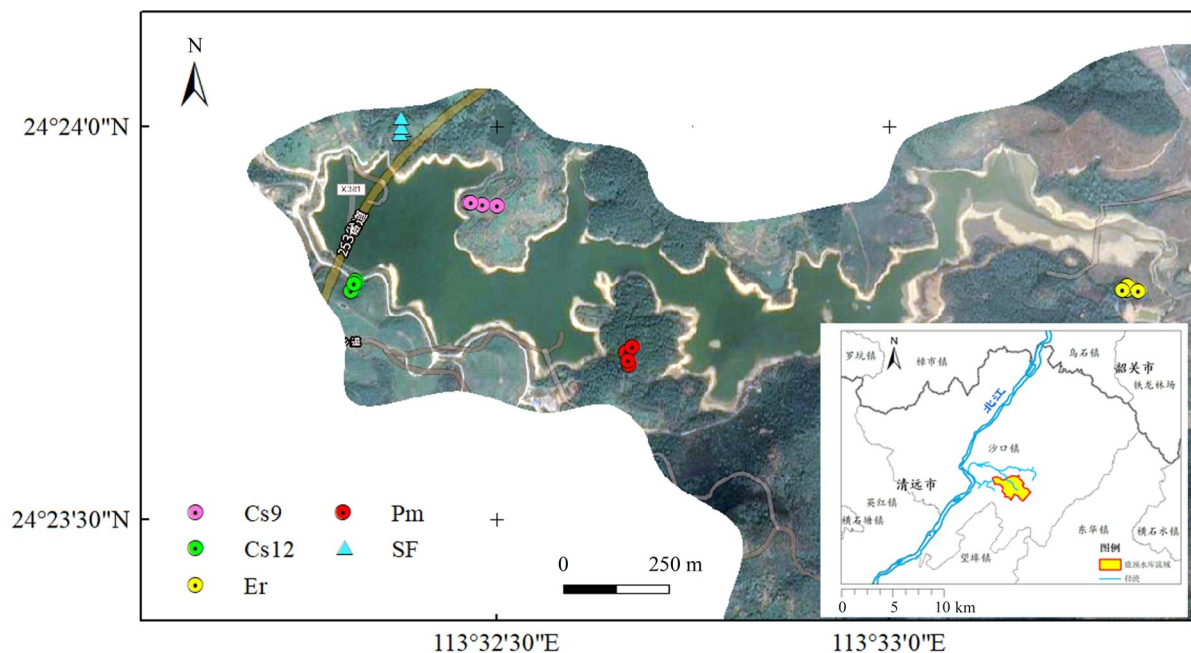
鹿颈水库位于广东省清远市英德市沙口镇(24°22'30"~24°24'30"N, 113°32'00"E~113°34'30"E), 流域面积为4.9 km²(图1)。研究区地处南亚热带向中亚热带过渡地区, 2000—2020年平均温度为21.29℃, 年均降水量为1637.4 mm, 降水主要集中在3~9月, 数据来自NOAA的国家环境信息中心(NCEI, <https://www.ncei.noaa.gov/>)。研究区土壤主要为英德灰红土, 属红壤亚类灰红土, 该土种母质为石灰岩风化的坡积物, 土壤深度一般>1 m。

流域内主要分布4种不同的土地利用类型: 次

生林(SF)、桉树林(Er)、松树林(Pm)和 *Camellia sinensis* 茶园(Cs)。桉树林和松树林在2012年开始种植, 之前为次生林; 英红12号茶园(Cs12)为坡地茶园, 茶树植于坡上, 未开辟阶梯, 2005年之前为次生林, 后种植桉树, 2015开垦为茶园; 英红9号茶园(Cs9)为阶梯式茶园, 随着海拔高度的增加, 梯高增高, 每梯种植2~3行茶树, 行距、株距近似, 于2013年开垦。两个茶园施肥情况相同, 每年2次, 分别在1~2月和8~9月, 肥料为花生油渣发酵有机肥, 每次施肥量约为0.75 kg/m²。

1.2 样品采集及预处理

2020年10月分别在5种土地利用类型内设置3块10 m×10 m样地(图1), 每块样地分别在中心布设一个土壤采样点。在土壤采样点拨开表层凋落物后, 用土钻每间隔10 cm采集0~40 cm的土壤, 采集的新鲜土壤装入聚乙烯封口袋封存。此外, 在每种土地利用类型内分别挖取了一个0~100 cm深的剖面; 不足100 cm的, 以母质层为下限, 自下而上每间隔10 cm采样, 每个剖面于表层采集两个环刀土样, 用于测量土壤含水量和容重(BD)。次年3月份, 采用S形随机布点法在原样地内设置3个60 cm×60 cm凋落物采样点, 测量凋落物的厚度, 并采集样方内所有的凋落物, 装入聚乙烯袋中封存。



Cs9和Cs12分别为英红9号和12号茶园, Er为桉树林, Pm为松树林, SF为次生林。

图1 鹿颈水库流域采样点分布图

Fig. 1 Distribution of the sampling points within Lujing watershed

采集的土样放置在阴凉通风处风干。将干土样品剔除根和砾石后,过 20 目筛,用于测定 pH、电导率(EC)、粒径组成和土壤颗粒有机碳(POC)含量。从 20 目的样品中取一部分研磨过 100 目筛,用于测定土壤有机碳(SOC)含量、全氮(TN)含量及土壤碳、氮同位素值($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)。采集的凋落物样品以 60 °C 在烘箱内烘至恒质量,称量并记录。

1.3 测定指标与方法

土壤粒度采用英国马尔文公司的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定; pH 和 EC 采用美国哈希公司生产的水质分析仪测定(水土质量比 5:1); BD 采用环刀法测定^[18]; SOC 采用德国 Elementar 公司生产的总有机碳分析仪测定; POC 采用 Cambardella 的方法^[19]; TN 采用德国 Elementar 公司的元素分析仪测定; 碳氮比(C/N)=SOC 含量/TN

含量。

土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 采用美国 Thermo Fisher 公司生产的 Flash EA2000 型元素分析仪联立 Picarro L2130-i 型同位素质谱仪测定。同位素比值 δ 表示样品中两种同位素比值相对于某一标准对应比值的相对千分差,

$$\delta = ((R_{\text{sa}} - R_{\text{st}}) / R_{\text{st}}) \times 1000\text{‰},$$

式中 R_{sa} 和 R_{st} 分别为样品和标准物质的重同位素与轻同位素丰度的比值(如 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)^[20]。

所有样品的预处理和测试均在中山大学的实验室完成。

1.4 样地基本情况

采样点的凋落物厚度、坡度、坡向、植被组成和历史种植情况由实地调查获得,凋落物质量在实验室烘干样品后称量获得(表 1)。

表 1 鹿颈水库样地基本情况表

Table 1 Basic information of the sampling sites at the Lujing reservoir

样地特征	Cs12	Cs9	Er	Pm	SF
凋落物厚/cm	2.8	4.2	3.4	3.8	3.2
凋落物质量/g	29.4	52.9	61.6	50.8	21.7
样地坡度	陡坡	缓坡	平坡	斜坡	缓坡
样地坡向	N	SW	E	NW	S
主要植被组成	<i>Camellia sinensis</i> , Asteraceae, Rosaceae	<i>Camellia sinensis</i> , Poaceae, Asteraceae	<i>Eucalyptus robusta</i> , Fabaceae, Rosaceae	<i>Pinus massoniana</i> , Moraceae, Cornaceae	Lauraceae, Pinaceae, Fabaceae
样地历史种植情况	2005 年前为自然林 2005 年种植桉树 2015 年开垦为茶园	2013 年前为自然林 2015 年开垦为茶园	2012 年前为自然林 2012 年开始种植桉树	2012 年前为自然林 2012 年开始种植松树	

1.5 数据处理

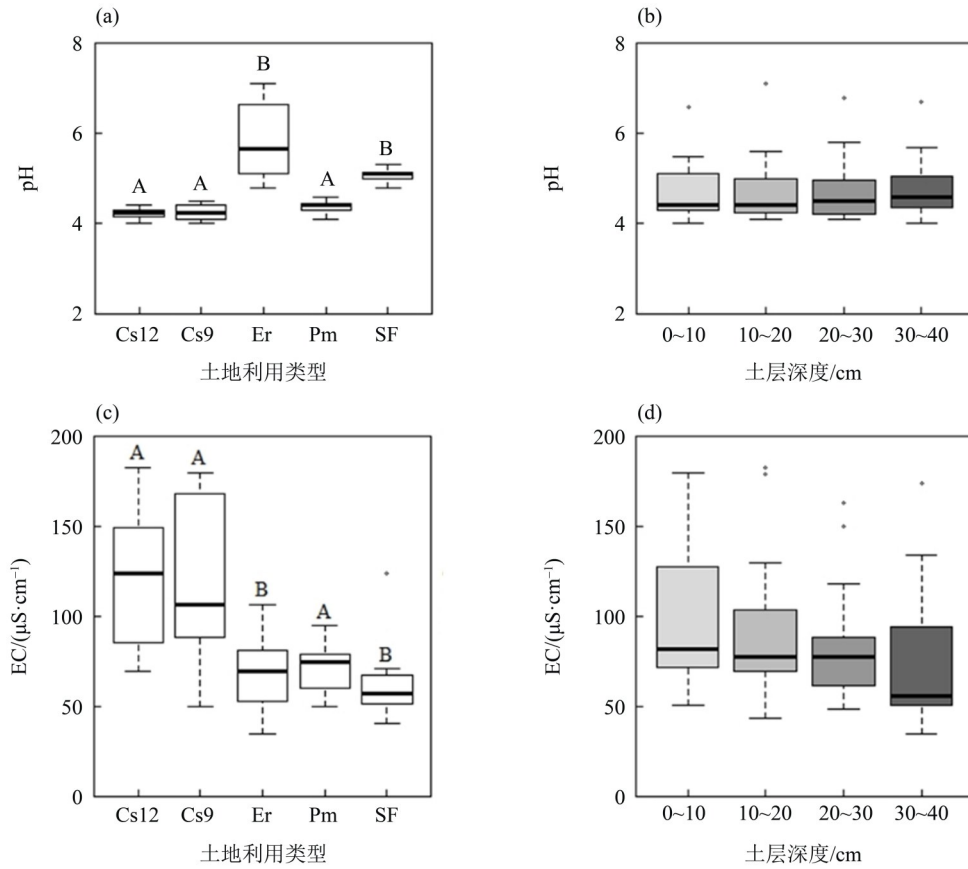
采用 Excel、SPSS 和 R4.1.1 对数据进行分析 and 绘图。在统计分析之前检查数据的正态性和方差同质性,在正态分布的情况下采用单因素方差分析,若满足方差齐性,事后检验采用 Turkey test,方差不齐则采用 Tamhane test; 不满足正态分布的条件下采用 Kruskal-Wallis 非参数检验。本研究以 SOC 和 POC 作为响应变量,以土壤因子、地形因子和环境因子作为解释变量,其中土壤因子包括土层深度、含水量、BD、黏粒、粉粒、砂粒、pH、BD、TN 含量、C/N 及 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$; 地形因子包括坡度和坡向,坡向的等级划分和量化方法参照邵方丽等^[21]的研究; 以凋落物的厚度和质量作为环境因子,采用 R4.1.1 中的 vegan 包^[22]进行冗

余分析(RDA),删除强烈共线性因子后,采用前向选择法对因子贡献率进行排序,选取主要的影响因子,并采用方差分解法比较土壤、地形和环境 3 大类因子的贡献率。

2 结果与分析

2.1 流域土壤基本理化性质分异规律

研究区土壤 pH=4.0~7.1,呈中性或偏酸性。最小值出现在 12 号茶园,最大值出现在桉树林。总体而言,在 0~40 cm 深度范围内, pH 值随土壤深度的变化不明显(图 2b),但在松树林中 pH 随着土壤深度的增加而升高,不同土层之间表现出了明显的差异。而对于不同土地利用类型而言, pH 值差异较大,其中桉树林的 pH 值最高,为 5.8±



不同大写字母表示不同土地利用类型间差异显著($P < 0.05$)。

图2 不同土地利用类型和0~40 cm土壤pH和EC的分异规律

Fig. 2 Variations of soil pH and electric conductance of different landuse types and along depth of 0-40 cm

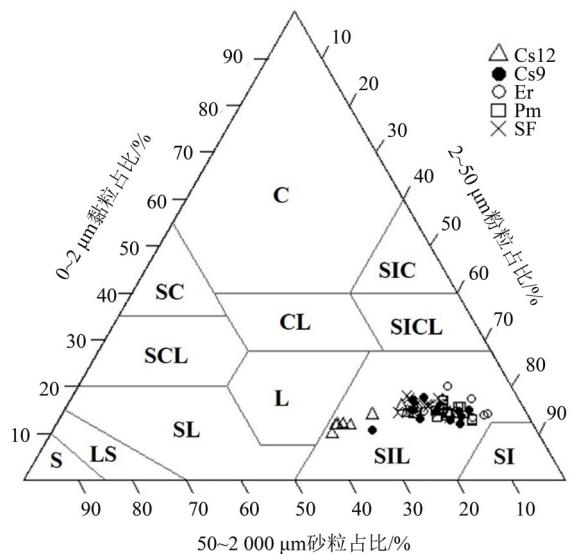
0.8; 次生林次之, 为 5.1 ± 0.2 ; 马尾松林、英红9号和12号茶园的pH均较低, 为4.2~4.4(图2a)。

研究区的土壤EC为35~183 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 不同土地利用类型土壤EC变化存在差异($P < 0.05$)(图2c), 总体表现为茶园大于3种林地。对于0~40 cm不同深度的土层而言, 各层土壤之间EC并没有显著差异(图2d)。

由美国农业土壤分类土壤质地三角图可以看出, 本研究区土壤质地绝大多数分布在粉壤土的区域范围, 以粉粒为主(51.8%~78.5%), 砂粒和黏粒含量较低, 且两者无显著性差异($P < 0.05$); 流域内不同土地利用类型和不同深度土壤质地的分异不明显, 具有较均一的土壤机械组成(见图3)。

2.2 流域土壤养分因子分异规律

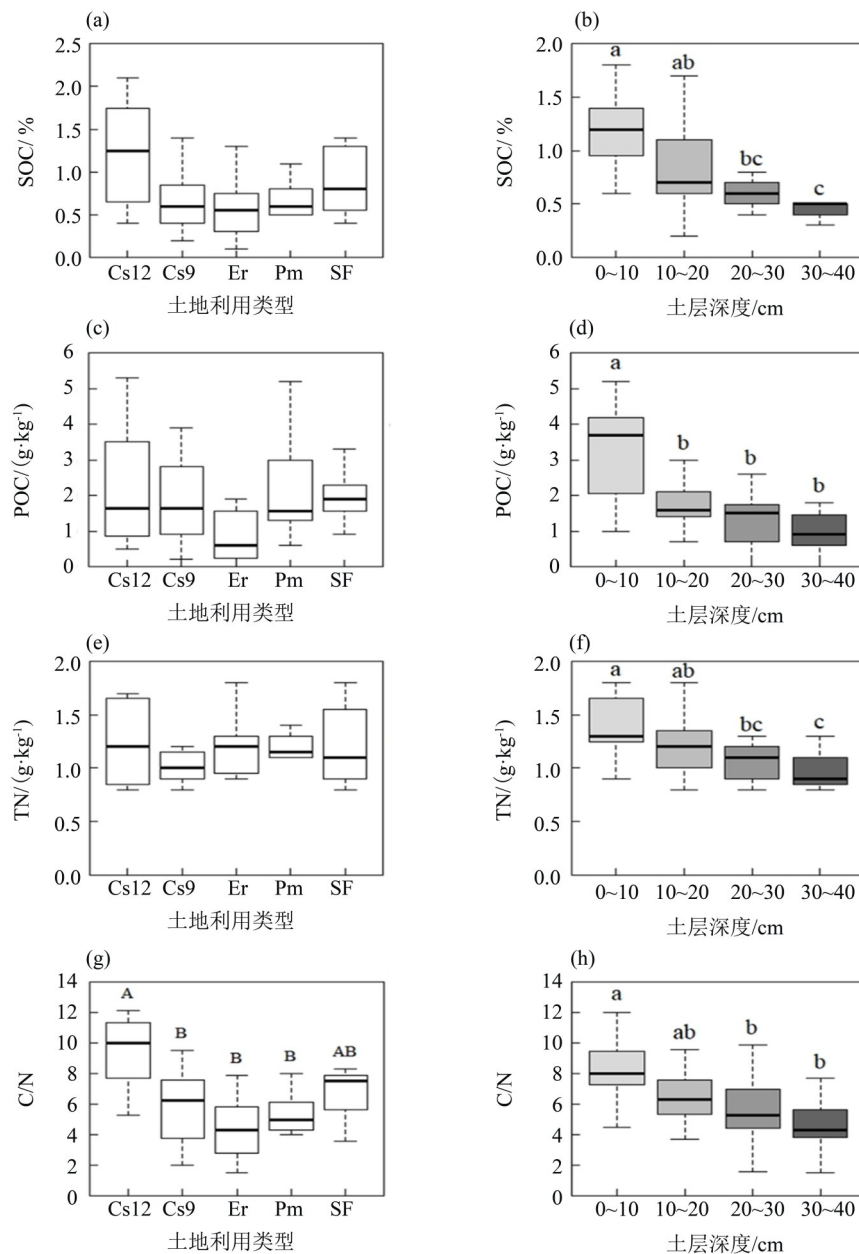
研究区SOC和POC含量在0~40 cm深度的变化范围分别为0.5%~1.3%和1.2~3.9 g/kg, 总体随深度的增加呈现递减的趋势(图4), 但POC含量在垂向10 cm深度处明显下降, 在10~40 cm之间则相对稳定, 表现出明显的表聚性。不同土地利用类型SOC和POC含量的差异并不显著($P < 0.05$)。



砂土(S);壤砂土(LS);砂壤土(SL);壤土(L);粉壤土(SIL);粉土(SI);砂黏壤土(SCL);黏壤土(CL);砂黏土(SC);粉砂质黏壤土(SICL);黏土(C);粉砂质黏土(SIC)。

图3 土壤质地三角图

Fig. 3 Soil texture triangle



不同大写字母表示不同土地利用类型间土壤指标差异显著($P < 0.05$),
不同小写字母表示不同深度土层间土壤指标差异显著($P < 0.05$)。

图4 不同土地利用类型和不同深度处SOC、POC、TN和C/N的分异规律

Fig. 4 SOC, POC, TN and C/N variation among different landuse types and along depth of 0-40 cm

TN含量变化与SOC含量变化相似,不同土地利用类型间没有显著性的差异($P < 0.05$),但随深度的增加而递减,不同土层之间具有显著性差异($P < 0.05$)(图4)。C/N随着深度的增加而下降,综合上述SOC和TN含量的变化趋势可知,随深度的增加,相对TN含量,SOC含量的减少幅度较大。不同土地利用类型C/N具有明显的差异,具体表现为12号茶园(9.5)>次生林(8.6)>9号茶园(5.9)>松树

林(5.4)>桉树林(4.4)。

不同土地利用类型POC和非颗粒态有机碳(NPOC)的占比有所不同,且随深度的增加其变化趋势并不相同(图5)。3种林地表现出POC占比随深度的增加而降低的趋势,而12号茶园POC占比随深度的增加先减少后增加,9号茶园POC占比随深度的增加变化不大,甚至在20~30 cm处略有增加。

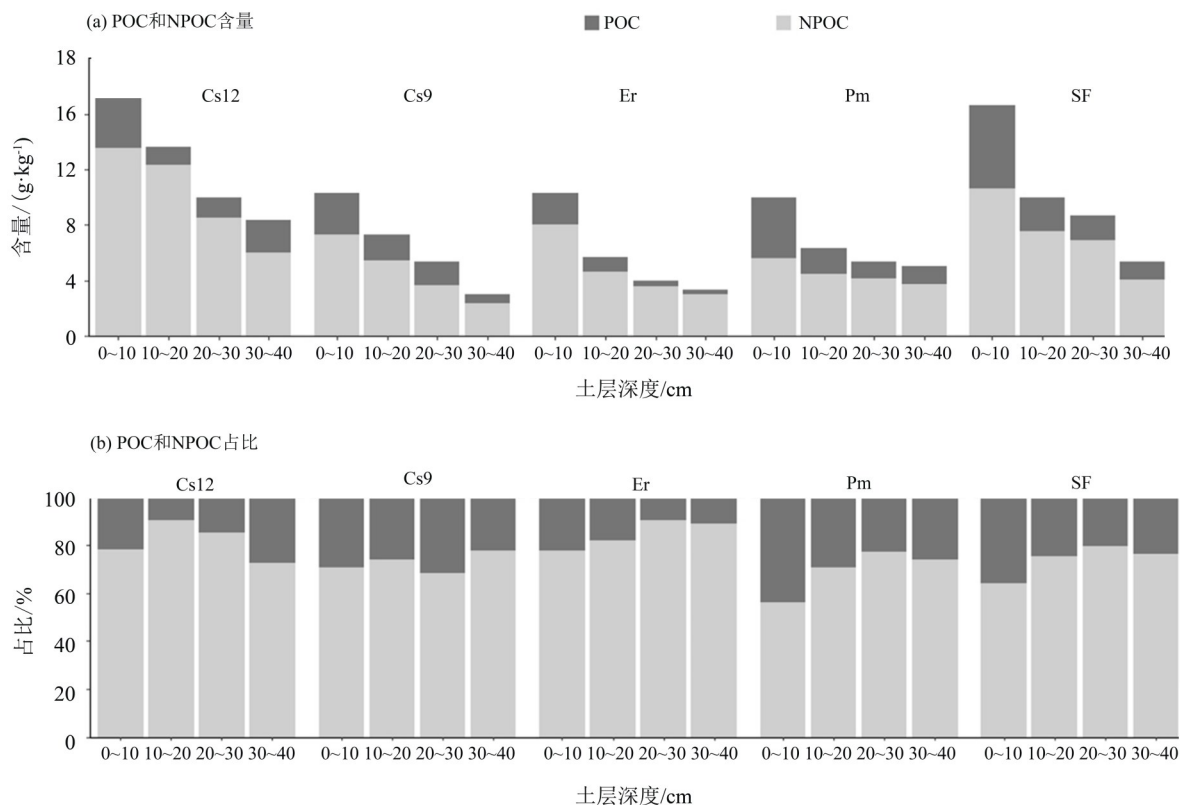


图5 不同土地利用类型0~40 cm土层深度的POC和NPOC含量和占比变化图

Fig. 5 Particular organic carbon and non-particular organic carbon content variation and proposition variation of different landuse types along depth of 0-40 cm

2.3 流域土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 分布规律

土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 随深度的变化不明显,但不同土地利用类型间差异显著($P<0.05$)(图6)。就 $\delta^{13}\text{C}$ 而言,3种林地和12号茶园之间的差异显著,林地 $\delta^{13}\text{C}$ 较高,12号茶园 $\delta^{13}\text{C}$ 较低,但林地与9号茶园之间没有明显差异,两种茶园之间也没有明显的差异。而对于 $\delta^{15}\text{N}$ 而言,9号茶园与3种林地之间存在显著差异,但12号茶园与3种林地之间的差异不明显,总体表现出松树林(5.9‰)>次生林(5.5‰)≈12号茶园(5.2‰)>桉树林(4.9‰)>9号茶园(3.6‰)的趋势。

2.4 流域SOC和POC含量的影响因素

冗余分析结果表明,所选因子解释了78.1%的数据变异。前向选择后,所保留的因子解释了75.6%的数据变异,其中轴一的解释率为72.6%,轴二的解释率为3.1%(图7)。C/N、TN含量、pH、土层深度和BD是具有显著影响力的因子,其中C/N、TN与SOC和POC箭头连线的夹角较小且方向一致,呈显著的正相关关系;而pH、土层深度和BD与SOC和POC箭头连线的方向不一致,表明这

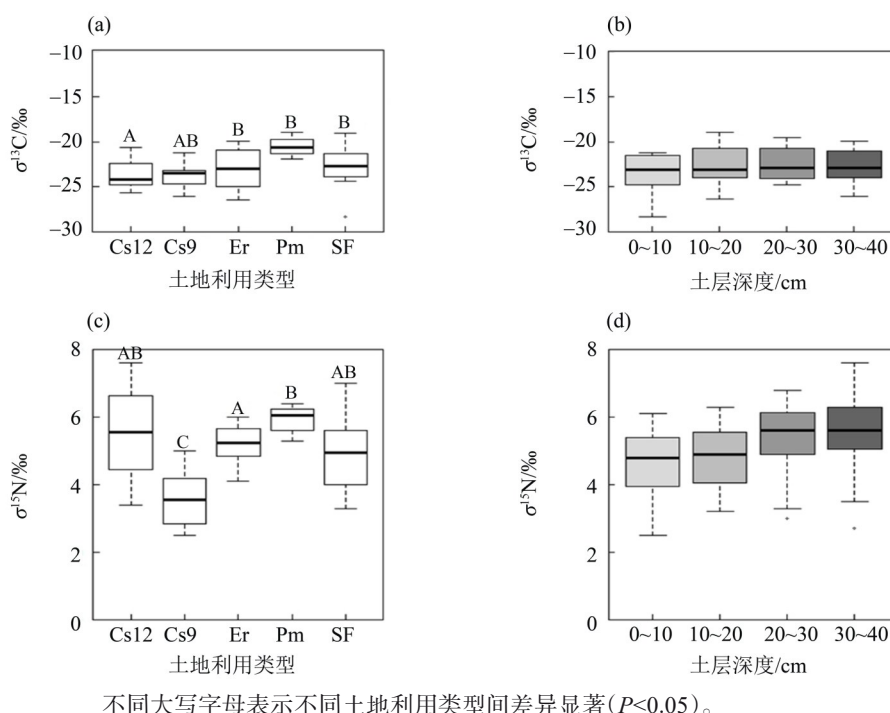
些因素与SOC和POC存在明显负效应,即随着深度的增加和pH值的增加,SOC和POC的含量降低。

通过方差分解法对所选土壤、地形和环境三大类因子的贡献率进行计算,结果表明土壤因子的贡献率较高,为62.4%;而地形、环境因素分别解释了4.8%和2.2%的变异;由土壤、地形和环境三个因素共享的解释率为7.2%;土壤和地形这两个因素共享的解释率为5.6%。

3 讨论

3.1 流域土壤理化性质的分异规律

鹿颈水库流域土壤理化性质即土壤质地、pH和EC随深度的变异较小,但不同土地利用类型之间差别较大。土壤颗粒组成以粉粒为主,属于美国土壤农业质地分类中的粉壤土(silty loam)。不同土地利用类型和不同深度间土壤质地的分异不明显,具有较均一的土壤机械组成(图3)。土壤平均pH=4.2~5.8,最大值出现在桉树林,最小值出现在12号茶园。其中茶园和松树林的pH均低于



不同大写字母表示不同土地利用类型间差异显著($P < 0.05$)。

图 6 不同土地利用类型和不同深度处土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 分异规律

Fig. 6 Soil $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ variation of different landuse types and along depth of 0-40 cm

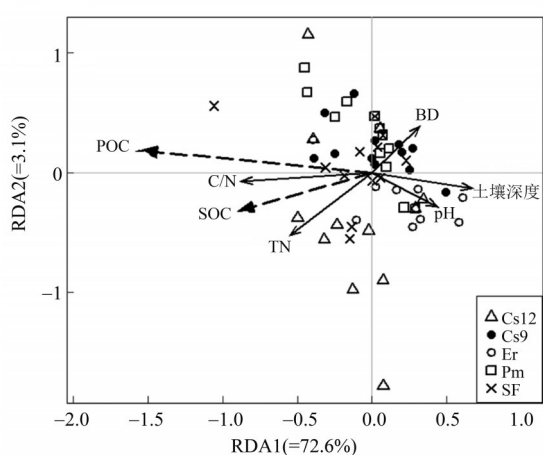


图 7 冗余分析结果图

Fig. 7 Redundancy analysis result

4.5, 存在较严重的土壤酸化的现象。土壤 EC 均值范围为 62.8~119.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 两种茶园的 EC 较高, 约 119 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 3 种林地的 EC 较低, 为 62~70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。这可能是由于该区域茶园定期施肥, 茶树生长状况良好, 茶树在生长和繁殖过程中造成了较多数目的土壤可溶性离子, 从而导致了 EC 的增加^[23]。

3.2 流域 SOC 和 POC 含量的分异规律

本研究选取的土地利用类型之间 SOC 含量没有明显的差异, 但付志蓝等^[24]的研究发现, 林地

SOC 含量高于茶园。本研究中茶园和 3 种林地间 SOC 含量差异不大, 这可能与茶园人工施加有机肥有一定的关系。SOC 和 POC 含量随着土壤深度的增加呈降低趋势, 这是由于地表的枯枝落叶层是 SOC 的主要来源, 其分解形成的 SOC 首先进入土壤表层, 再由重力作用向下迁移, 此外, 土壤温度、水分和养分及微生物活性随着深度的增加逐渐下降, 也会导致深层 SOC 含量较低^[25]。

作为土壤活性有机碳的一种表征形式, POC 占 SOC 的比例越高, 说明有机碳活性越强, 被矿化分解的潜力越大, 养分循环速度越快, 不利于 SOC 的累积^[26]。本研究中, 随着深度的增加, 3 种林地 POC 在 SOC 中的占比逐渐降低, 说明相对深层而言, 表层 SOC 活性较大, 循环较快, 对土地利用的变化更敏感。9 号茶园 POC 的占比并未随深度的增加而减少, 可能与灌木根系较深, 导致深层输入的 POC 也较多。12 号茶园 POC 先随深度的增加而降低, 而后升高, 可能与其种植历史有关, 桉树的全株移除会导致较大的土壤扰动, 使得 POC 含量降低。

3.3 流域 TN、C/N 及 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 的分异规律

不同土地利用类型 TN 含量差别不大, 且随着

深度的增加显著降低, 这与张瑶瑶等^[27]的研究结果一致。C/N随土地利用类型和深度的变化均有较大的变化, 不同土地利用之间总体表现为12号茶园>次生林>9号茶园>松树林>桉树林, 这一结果反应了不同土地利用类型间有机物输入量、性质以及碳氮累积速率的差异。土壤C/N与土壤有机质分解速率成反比关系^[28], 土壤C/N反应了土壤微生物群落结构特征, 控制着植被对土壤养分的吸收和植被碳生产^[29], 茶园和次生林的C/N较高, 但枯枝落叶的数量较少, 表明微生物分解有机质速率较慢, SOC累积率较高^[30]。而C/N随着深度的增加显著降低, 这应该与不同深度土层间微生物的数量、群落结构和活性相关^[31]。

$\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 变化特征与土壤理化性质的分异规律相似, 随深度的增加无显著变化, 但不同土地利用类型间具有较大差异。对于土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 而言, 总体表现出松树林~次生林~桉树林>9号茶园>12号茶园的 trend。两种茶园的pH值较低, 微生物活动可能受到抑制, 有机质分解率降低, 土壤碳同位素分馏作用较小, 土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低^[32]。对于 $\delta^{15}\text{N}$ 而言, 总体表现出松树林>12号茶园~次生林>桉树林>9号茶园的 trend。土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值取决于输入物(例如凋落物和肥料) $\delta^{15}\text{N}$ 组成以及不同N化合物之间转化过程中的 $\delta^{15}\text{N}$ 分馏^[32]。本研究中土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的差异主要体现在Cs12号茶园 $\delta^{15}\text{N}$ 显著升高, 这可能与Cs12茶园植物根氮同化的速率, 即氮的利用效率, 较高有关, 植物优先利用低 $\delta^{15}\text{N}$ 的氮素, 导致土壤有机质中 ^{15}N 的富集^[33]。

3.4 影响流域SOC和POC含量的主要因素

由于研究区域较小, 气候差异可以忽略不计, 由此说明土壤性质、地形和环境因子在很大程度上解释了SOC含量的空间变异性^[34]。C/N、TN含量、pH、土层深度和BD是SOC、POC含量的主要影响因素, SOC、POC含量与C/N、TN含量呈显著正相关, 而与pH、土层深度和BD呈显著负相关, 这与尤海舟等^[35]和孟苗婧等^[36]的研究发现一致。

方差分解表明土壤因子是SOC、POC含量分异的主要解释因子, 地形和环境因子仅在与土壤因素的共同作用下对SOC和POC含量的变异具有

较大的解释率, 单独的解释率较低。

本研究中的土壤因子可进一步细分为土壤养分因子和土壤理化性质因子, 土壤养分因子包括C/N和TN, 土壤理化因子包括pH、土层深度和BD。SOC、POC含量与土壤养分因子中的C/N和TN存在显著正相关性。这意味着凋落物较高的C/N通常有利于SOC的累积。土壤C/N一般被认为是土壤氮素矿化的标志, 低C/N促进微生物的分解和碳素矿化, 而C/N的增大会导致微生物的降解速率降低, 从而促进碳的累积^[37]。SOC和POC含量与土壤TN含量呈显著正相关关系, 这与前人的研究结果一致^[38-39], 这是因为微生物对有机质的分解和利用速率受土壤有机质氮含量影响^[40]。

土壤理化因子并不直接作用于SOC, 而是通过对土壤结构和植被的影响间接改变SOC含量及分布特征^[41]。在一定范围内土壤pH下降, 即酸性的增强, 会导致微生物活动的减弱, 从而减缓有机质的分解, 造成SOC的累积^[29]。而土壤BD反应了土壤的通透性, 其大小会对SOC含量造成显著影响。本研究中SOC含量与土壤BD呈显著负相关, 这与前人研究结果一致^[17, 42]。

4 结 论

1) 鹿颈水库流域土壤pH=4.2~5.8, 出现土壤酸化现象, 土壤质地为粉壤土, 不同土地利用类型土壤理化性质差异显著($P<0.05$);

2) 在0~40 cm的土壤深度, SOC和POC含量均随深度的增加而降低, 变化范围分别为0.5%~1.3%和1.2~3.9 g/kg, 表现出明显的表聚性。但在所选取的不同土地利用类型之间SOC和POC含量没有明显差异;

3) 冗余分析表明本研究所选取的因子可以解释SOC和POC含量78.1%的变异, 其中土壤因子中的C/N、TN含量、pH、土层深度和BD是影响流域SOC和POC含量变化的主要因子, SOC和POC含量与C/N、TN含量呈显著正相关, 而与土壤pH、土层深度和BD呈显著负相关; C/N是最显著的影响因子, 流域SOC和POC含量主要受土壤氮调节。

参考文献:

- [1] BONGIORNO G, BÜNEMANN E K, OGUEJOFOR C U, et al. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 38–50.
- [2] RAMESH T, BOLAN N S, KIRKHAM M B, et al. Soil organic carbon dynamics: Impact of land use changes and management practices: A review[M]//SPARKS D L, ed. *Advances in Agronomy*. America: Elsevier Inc, 2019: 1–107.
- [3] 刘晓君, 高盼, 潘俊, 等. 红壤区植被恢复团聚体 POC 变化归因分析[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 217–224+234.
- [4] 孙文泰, 马明, 董铁, 等. 长期覆膜旱地苹果园表层土壤“隐性”退化下活性有机碳与酶活性差异[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 272–279.
- [5] 欧阳园丽, 吴小刚, 林小凡, 等. 九连山自然保护区土壤有机碳时空变异的耦合效应[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(6): 561–568.
- [6] 岑龙沛, 严友进, 戴全厚, 等. 喀斯特不同土地利用类型裂隙土壤有机碳及磷素赋存特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 7567–7575.
- [7] 张华渝, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中尖山河小流域不同土地利用类型土壤活性有机碳分布特征[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 16–21.
- [8] 刘世梁, 安南南, 杨珏婕, 等. 澜沧江中游山地不同土地利用对土壤有机碳的影响及预测[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 981–988.
- [9] 王深华, 江军, 刘丰彩, 等. 中国成熟天然林土壤有机碳垂直分异特征[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2371–2377.
- [10] 商泽安, 宋涵晴, 舒琪, 等. 海南岛甘什岭低地次生雨林土壤有机碳及影响因素[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(2): 297–304.
- [11] 刘波, 陈林, 庞丹波, 等. 六盘山华北落叶松土壤有机碳沿海拔梯度的分布规律及其影响因素[J]. *生态学报*, 2021, 41(17): 6773–6785.
- [12] 常帅, 于红博, 曹聪明, 等. 锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(5): 1355–1366.
- [13] 李理, 朱文博, 刘俊杰, 等. 宝天曼自然保护区土壤有机碳异质性及其影响因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(3): 687–695.
- [14] 杨玉盛, 谢锦升, 盛浩, 等. 中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响[J]. *地理学报*, 2007, 11: 1123–1131.
- [15] 林培松, 欧阳椿陶, 尚志海, 等. 粤东北山区不同土地利用类型红壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. *热带地理*, 2011, 31(4): 362–367.
- [16] 黎艳明, 周毅, 陈会智. 粤北次生常绿阔叶林土壤有机碳分布特征研究[J]. *广东林业科技*, 2011, 27(4): 6–11.
- [17] 刘姝媛, 刘月秀, 叶金盛, 等. 广东省桉树人工林土壤有机碳密度及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 1981–1985.
- [18] 鲍士旦. *土壤农化分析*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 22–163.
- [19] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 777–783.
- [20] 陈森, 刘顺, 许格希, 等. 土壤剖面碳氮稳定同位素自然丰度的垂直分布模式及其影响机制[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 1919–1927.
- [21] 邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等. 北京山区防护林优势树种分布与环境的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(19): 6092–6099.
- [22] 刘玉祯, 刘文亨, 冯斌, 等. 坡向和海拔对高寒山地草甸植被分布格局特征的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(6): 1166–1173.
- [23] PEIFFER J A, SPOR A, KOREN O, et al. Diversity and heritability of the maize rhizosphere microbiome under field conditions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(16): 6548–6553.
- [24] 付志蓝, 卢瑛. 粤北山区不同土地利用方式下土壤有机碳及其组分特征[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(3): 627–632.
- [25] 徐侠, 陈月琴, 汪家社, 等. 武夷山不同海拔高度土壤活性有机碳变化[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 539–544.
- [26] 习丹, 旷远文. 城市化梯度上亚热带常绿阔叶林土壤有机碳及其组分特征[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2149–2155.
- [27] 张瑶瑶, 冷若琳, 崔霞, 等. 甘南州高寒草地土壤氮磷空间分布特征[J]. *草业学报*, 2018, 27(12): 12–21.
- [28] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 等. 不同林龄油松 (*Pinus*

- tabulaeformis*)人工林植物、凋落物与土壤C、N、P化学计量特征[J].生态学报, 2016, 36(19): 6188-6197.
- [29] 任玉连, 陆梅, 曹乾斌, 等. 南滚河国家级自然保护区典型植被类型土壤有机碳及全氮储量的空间分布特征[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(11): 104-115.
- [30] 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.
- [31] TRUU M, JUHANSON J, TRUU J. Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(13): 3958-397.
- [32] 李亚翠, 季宏兵, 张涛, 等. 石林地区典型土壤剖面有机碳、氮含量分布特征研究[J]. 地球与环境, 2018, 46(5): 437-443.
- [33] HAN G, TANG Y, LIU M, et al. Carbon-nitrogen isotope coupling of soil organic matter in a Karst region under land use change, southwest China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 301:107027.
- [34] RODRÍGUEZ A, DURÁN J, COVELO F, et al. Spatial pattern and variability in soil N and P availability under the influence of two dominant species in a pine forest [J]. Plant Soil, 2011, 345: 211-221.
- [35] 尤海舟, 毕君, 王超, 等. 河北小五台山不同海拔白桦林土壤有机碳密度分布特征及影响因素[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 432-437.
- [36] 孟苗婧, 张金池, 郭晓平, 等. 海拔变化对黄山松阔叶混交林土壤有机碳组分的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 106-112.
- [37] CHENG L, LEAVITT S W, KIMBALL B A, et al. Dynamics of labile and recalcitrant soil carbon pools in a sorghum free-air CO₂ enrichment (face) agroecosystem [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(9): 2250-2263.
- [38] 吴玥, 赵盼盼, 林开森, 等. 戴云山黄山松林土壤碳组分的海拔变化特征及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5761-5770.
- [39] 聂阳意, 王海华, 李晓杰, 等. 武夷山低海拔和高海拔森林土壤有机碳的矿化特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 748-756.
- [40] 向慧敏, 温达志, 张玲玲, 等. 鼎湖山森林土壤活性碳及惰性碳沿海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2015, 35(18): 6089-6099.
- [41] EDWARDS K R, PICEK T, ČÍŽKOVÁ H, et al. Nutrient addition effects on carbon fluxes in wet grasslands with either organic or mineral soil [J]. Wetlands, 2015, 35: 55 - 68.
- [42] 徐薇薇, 乔木. 干旱区土壤有机碳含量与土壤理化性质相关分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1558-1561.

(责任编辑 秦社彩)