

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测	陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)
粤港澳大湾区大气PM _{2.5} 浓度的遥感估算模型	代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)
典型输送通道城市冬季PM _{2.5} 污染与传输变化特征	代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)
郑州市夏季PM _{2.5} 中二次无机组分污染特征及其影响因素	和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)
重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析	彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沐, 翟天宇 (48)
2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析	陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)
2020年“三连击”台风对我国东部地区O ₃ 污染的影响分析	花丛, 尤媛, 王峰, 张碧辉 (71)
北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析	张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)
机动车减排降碳综合评价体系综述	范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)
基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景	杨峰, 张贵驰, 孙佑, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)
广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力	翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王辉嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)
给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素	张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)
中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评价	窦殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)
太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评价	张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)
水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价	张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈凤, 沈晓盛 (151)
长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析	姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)
珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用	李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)
富春江水库浮游植物功能群变化的成因	张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)
合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制	陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)
新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素	李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)
京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素	李魁明, 王婉燕, 姚罗兰 (218)
近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析	王耕, 张芙蓉 (228)
光伏电站建设对陆地生态环境的影响:研究进展与展望	田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)
大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因	石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)
西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究	徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)
不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响	崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)
基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测	帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋琨 (287)
基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测	石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)
长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态	胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨洁, 高超 (314)
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子	申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)
不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响	陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)
紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征	李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)
氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响	薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)
重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析	梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)
中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展	刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)
基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测	解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)
基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析	马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)
铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析	李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)
天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价	李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)
基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应	唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)
腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值	胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍芬, 魏世强 (439)
生物炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复	吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)
人体微塑料污染特征及健康风险研究进展	马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)
聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(<i>Lactuca sativa</i>)生理生态的影响	牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霞, 刘淑丽 (470)
转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制	刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)
微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响	赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)
微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响	刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)
民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测	王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)
不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应	郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)
厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响	刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)
土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征	陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)
叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响	梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)
昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析	王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)
基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征	黄福义, 周曙仡, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张炯 (576)
城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素	刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)
氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制	刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)
CO ₂ 气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb ²⁺ 吸附性能对比	江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征

李子阳^{1,2}, 陈露^{1,2}, 赵鹏², 周明华^{1*}, 郑静¹, 朱波¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 20世纪90年代以来,西南紫色土丘陵区大量坡耕地转变为果园,提高了农民的经济收益,但这一土地利用变化对土壤碳(C)、氮(N)空间分布特征的影响仍然缺乏研究. 为探究紫色土丘陵区坡耕地转变为果园后土壤C、N的空间分布特征,选取四川盆地中部紫色土丘陵区代表性柑橘园为研究对象,分析了由坡耕地转变为柑橘园后,土壤C、N空间分布特征及其主要影响因素. 结果表明,坡面位置(坡位)对土壤总氮(TN)、硝态氮(NO_3^- -N)和可溶性有机碳(DOC)含量均有显著影响($P < 0.05$),而对土壤总有机碳(SOC)和铵态氮(NH_4^+ -N)的含量没有显著影响($P > 0.05$). 在0~30 cm土层,土壤 NO_3^- -N含量沿坡面的变化趋势为:上坡位<中坡位<下坡位,而TN和DOC含量沿坡面的变化趋势为:上坡位>中坡位>下坡位. 各坡位土壤C、N含量随深度(0~30 cm)增加呈现整体降低趋势,其中土层深度对土壤TN、SOC、 NO_3^- -N和DOC含量的影响显著($P < 0.05$). 坡面土壤TN储量(0~30 cm)随坡位自上而下逐渐降低($P < 0.05$),其中坡上、坡中和坡下的土壤TN储量分别为2.37、1.89和1.62 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以N计). SOC储量沿坡面的分布差异不显著,变化范围(以C计)为56.12~58.48 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,整个坡面土壤TN与SOC的储量呈显著正相关关系. 结果表明,在预测土壤C、N含量及储量对土地利用转变响应时不能忽视土壤养分的空间分布规律,研究可为理解紫色土丘陵区耕地转变为果园后土壤C、N空间分布特征及主控因子提供研究案例.

关键词: 紫色土; 柑橘园; 坡位; 氮(N); 碳(C); 空间分布

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0343-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202302013

Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area

LI Zi-yang^{1,2}, CHEN Lu^{1,2}, ZHAO Peng², ZHOU Ming-hua^{1*}, ZHENG Jing¹, ZHU Bo¹

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Since the 1990s, a large area of sloping farmland in a purple soil hilly region of southwest China was converted into an orchard to prevent soil erosion, increase soil fertility, and elevate economic benefits for farmers. In order to explore the spatial distribution of soil carbon (C) and nitrogen (N) fractions on the slope of returning arable lands to citrus orchards in purple soil hilly areas, a soil sampling event was carried out in a citrus orchard at the Yanting Agro-ecological Experimental Station of Purple Soil, Chinese Academy of Sciences, to examine the differences in soil C and N fractions and their influencing factors. The results showed that the slope position had significant effects on the contents of soil total nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NO_3^- -N), and dissolved organic carbon (DOC) ($P < 0.05$), but the effects were not obvious regarding the total organic carbon (SOC) and ammonia nitrogen (NH_4^+ -N) of the soil ($P > 0.05$). For topsoil (0-30 cm), the variation trend of soil NO_3^- -N content along the slope was upper slope < middle slope < lower slope, whereas the TN and DOC contents along the slope exhibited the trend of upper slope > middle slope > lower slope. The contents of soil C and N in each slope position generally showed a downward trend with increasing soil depth (0-30 cm). The contents of soil TN, SOC, NO_3^- -N, and DOC were significantly affected by soil depth ($P < 0.05$). The TN storage (0-30 cm) significantly decreased from the top to the bottom within the soil slope, with a value of 2.37, 1.89, and 1.62 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (reported as N) for the upper slope, middle slope, and lower slope, respectively. There was no significant difference in SOC reserves along the slope, with a range from 56.12 to 58.48 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (reported as C). Our results provide scientific basis for understanding the spatial distribution of soil nutrients of the restored farmland in purple soil hilly areas. Our research suggests that the spatial distribution of soil carbon and nitrogen storage should not be ignored when predicting the response of soil nutrients to land use change.

Key words: purple soil; citrus orchards; slope position; soil nitrogen (N); soil carbon (C); spatial variation

碳(C)、氮(N)是植物生长必需的营养元素,也是土壤养分的重要组成部分^[1]. 作为生物圈中最大的陆地C库,土壤的C储存量远远高于植物和大气C储存量的总和,而土壤中约有2/3的C被认为是土壤有机碳(SOC)^[2]. SOC可以直接影响土壤肥力和土壤结构,其微小的变化都将会对大气中的二氧化碳(CO_2)浓度产生极大的影响^[3]. 而土壤中的N素为生物体的生命元素,通常是陆地生态系统初级生产力的营养限制因子^[4],同时还直接影响SOC在土层中的累积速率^[5,6]. 土壤C、N的累积受多种因素的影响,如气候

条件^[7]、地形^[8]和土地利用变化^[9]等. 其中,土地利用变化会导致植物种类、数量及生物量的改变,植物生理变化又会影响土壤C、N含量动态变化,进而影响土壤C、N的固存^[10]. 在过去的几十年里,许多国内外研究在不同尺度上探讨了土地利用变化对土壤C、N

收稿日期: 2023-02-03; 修订日期: 2023-03-12

基金项目: 国家自然科学基金委区域创新发展联合基金重点支持项目(U22A20562)

作者简介: 李子阳(1996~),男,博士研究生,主要研究方向为土地利用和土壤生态, E-mail: liziyang18@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: mhuazhou@imde.ac.cn

含量分布的影响。例如,雷利国等^[11]在重庆缙云山的研究发现,林地转变为耕地后,大大降低了SOC含量;Kooch等^[12]在伊朗北部的研究发现,森林向牧场的转变增加了土壤总氮(TN)含量。在全球气候变化背景下,研究土地利用转变下土壤C、N空间分布变化具有重要意义^[13-15]。

紫色土坡耕地作为川中丘陵地区的主要耕地类型,具有结构差和有机质含量低等特点^[16]。20世纪90年代以来,为提高山区农民的经济效益,大量坡耕地被人工种植果树建成果园^[17]。对于川中丘陵区坡地而言,坡面结构与位置作为该地区的主要地形因子,影响着温度、水分和光照等在坡面的空间分布,从而影响土壤坡面C、N累积与分解^[18]。此外,不同坡面位置(坡位)具有不同的土壤侵蚀与泥沙沉积,也显著影响着土壤C、N在坡面上的重新分配^[19,20]。目前,关于紫色土丘陵区地形条件对坡地柑橘园土壤C、N含量与储量及其空间分布的研究不足。

因此,本研究选取川中丘陵紫色土区种植13 a的柑橘园为对象,采用野外调查采样与室内分析相结合的方法,分析了坡地柑橘体系不同坡位土壤C、N含量与组分的空间分布特征与影响因素,以期川中丘陵紫色土地区柑橘园土壤肥力长期可持续管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站附近的万安小流域(E 105°31', N 31°16')。该流域位于四川盆地中北部盐亭县大兴回族乡,地处嘉陵江流域和涪江流域的分水岭^[21],为典型的川中丘陵沟渠集水区,平均海拔在400~600 m之间。区内属亚热带季风气候,年均气温为17.3℃,年均降水量为826 mm(1981~2006年),且65%的年降水量集中在5~9月^[22]。本研究的试验土壤被当地称为“紫色土”,是我国川中丘陵地区一种主要的土壤类型^[23]。大部分紫色土区域土层较浅薄,平均土层厚度为30~80 cm,保水保肥差,有机质和土壤TN含量低^[24]。近20年来,川中丘陵地区大面积不适宜耕种的陡坡耕地被人工恢复为森林和果园,而该地区作为石灰性紫色土土地利用转变的一个极具代表性的研究地点,备受关注^[25,26]。

本研究主要在万安流域选取了一个典型的柑橘园作为试验坡地,坡长为140 m,坡宽为45 m,平均坡度夹角14.5°。该坡地于2008年由农田退耕,并休耕一年,2009年开始种植柑橘。农田退耕前由当地村民耕种,至少在过去的20年里,施行7个月小麦和4.5

个月玉米的轮作制度。其中小麦年施氮量为130 kg·hm⁻²(以N计,下同)、磷肥量为90 kg·hm⁻²(以P计,下同)和钾肥36 kg·hm⁻²(以K计,下同),玉米年施氮量为150 kg·hm⁻²、磷肥量为90 kg·hm⁻²和钾肥36 kg·hm⁻²。退耕后,种植“爱媛38号”果冻橙,种植密度为1350株·hm⁻²。每年施肥3次,分别是春肥、夏肥以及冬肥,春肥主要施用高氮复合肥(含氮量26%、含磷量10%及含钾量10%),夏肥主要施用平衡型复合肥(含氮、磷和钾量各16%),冬肥主要施用普通复合肥(含氮量18%、含磷量10%以及含钾量10%)。春夏肥每株用量1500 g复合肥,冬肥每株用量800 g复合肥。施用复合肥的同时,每株还配合施用5 kg左右有机肥(猪粪发酵,氮磷钾平均总含量8%)。以上所有信息均为询问当地农民和查阅官方记录获取。具体试验选点信息见图1。

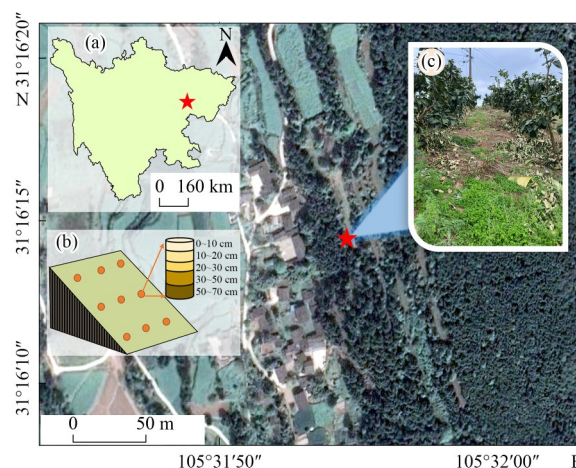


图1 研究区位置和采样点位示意

Fig. 1 Location of study area and sampling sites

1.2 样品采集与测定

采样时间为2022年10月11日,根据样地的具体地形,结合Brubaker坡面划分原则,将研究坡位分成3个部分:坡上、坡中和坡下位置^[27]。在每个坡位随机选取3块2 m×2 m的样方,每个样方均去除地表覆盖植被和枯枝落叶层。由于紫色土壤具有明显的土壤“浅”的特征,坡上和坡中大部分采样点在30 cm以下混入了大块石块和母质,而坡下采样点在70 cm左右即到达紫色土母岩,所以本研究坡上、坡中和坡下3个坡位的采样深度分别为0~30、0~30和0~70 cm。使用土钻(直径5 cm)分别采集0~10、10~20、20~30、30~50和50~70 cm土壤样品,每个土层取3个样品重复,共得到土壤样品99份[3个坡位×3个地点×(3~5)个土层×3个样品重复],同时采集对应土样的标准环刀样品(环刀容积100 cm³)。土壤样品在室温下风干20 d以上,研磨后通过2 mm筛网测定粒径组成、pH值、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)

和可溶性有机碳(DOC)含量. 通过 0.25 mm 筛网测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全碳(TC)含量^[28].

采用 105 °C 环刀烘干法测定各垂直土层土壤容重(BD)和土壤含水量(SWC). 利用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000, 英国)分析土壤粒径分布(PSD)^[29], 利用 pH 计(Delta 320, 中国上海)测定土壤(土:水 = 1:5)的 pH 值^[30]. 采用连续流动分析仪(AA3, 德国 SEAL)分析氯化钾浸提液中的 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 DOC 浓度. 土壤 TC 和 TN 含量用碳氮分析仪测定(CNS Elementar vario MAX, 德国)^[31]. 采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定 SOC 的含量^[32].

1.3 数据统计与分析

SOC 和 TN 储量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别以 C 和 N 计, 下同)计算如下^[33]:

$$\text{SOC 储量} = \sum \text{SOC}_i \times \text{BD}_i \times D_i \times 0.1$$

$$\text{TN 储量} = \sum \text{TN}_i \times \text{BD}_i \times D_i \times 0.1$$

式中, SOC_i 和 TN_i 为第 i 层采样土壤的 SOC 和 TN 含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), BD_i 为第 i 层采样土壤的容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), D_i 为第 i 层采样土壤的土层厚度(cm), 0.1 为单位换算因子.

采用 Kolmogorov-Smirnov 检验原始数据是否服从正态分布($P = 0.05$), 采用 Levene's 检验方差齐性($P > 0.05$), 所有数据均以平均数 $\pm$ 标准差(SD)表示. 不同处理之间采用 LSD 最小显著差数法进行多重比较, 显著水平为 0.05. 采用双因素方差定量分析坡位(因子 1)和土层厚度(因子 2)及其交互作用对土壤理化性质的影响. 使用 SPSS Statistics 23.0 (SPSS Inc, 美国)进行相关性分析和线性回归分析, $P < 0.05$ 认为结果具有显著相关性. 使用 Origin 9.0 (Originlab, 美

国)生成所有描述参数变化的图表. 此外, 使用 CANOCO 5.0 (Micro Power, 美国)软件进行部分冗余分析(RDA)和方差分解分析(VPA), 分别计算各因素对土壤 TN 储量和 SOC 储量的影响.

2 结果与分析

2.1 紫色土丘陵区柑橘园不同坡位土壤物理参数的空间分布特征

退耕 13 a 后, 不同坡位的柑橘园土壤物理参数分布如表 1 和表 2 所示. 土壤 pH 值在 8.54 ~ 8.77 之间, 属于典型的石灰性紫色土. 所有坡位 0 ~ 30 cm 土层, 均出现 pH 值随土壤深度的增加而逐渐增加的现象. 其中上坡位和下坡位 0 ~ 10 cm 土层的 pH 值均显著低于 20 ~ 30 cm 土层($P < 0.05$). 但是, 同一土层厚度的不同坡位间 pH 值没有显著差异($P > 0.05$). 不同坡位剖面土壤 BD 在 0 ~ 10 cm 土层最低, 为 $1.15 \sim 1.23 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 并随土层深度增加而显著增大. 下坡位表层土壤(0 ~ 20 cm) BD 显著高于中坡位和上坡位土壤. 不同坡位最大 SWC 均出现在 0 ~ 10 cm 土层(上、中和下坡位分别为: 17.04%, 15.74% 和 15.80%), 且上坡位土壤的 SWC 显著低于中、下两坡位. 不同坡位的 ω (粉粒)均高于 50%, ω (黏粒)和 ω (沙粒)的变化范围分别为 7.74 ~ 16.95 % 和 20.49 ~ 37.41%, 表明该地区土壤质地以黏壤土和粉壤土为主(表 2). 如表 3 所示, 双因素方差分析表明坡位和土层厚度显著影响土壤砂、粉、黏粒含量($P < 0.01$), 且两因素交互作用(坡位 $\times$ 土层深度)对上述机械组成因子也有显著影响($P < 0.05$). 同样地, 坡位和土层厚度也显著影响了土壤 BD($P < 0.01$), 但对土壤 pH 值和 SWC 均无显著影响($P > 0.05$).

表 1 不同坡位土壤 pH 值、BD 和 SWC 的空间分布特征¹⁾

Table 1 Spatial distribution characteristics of soil pH, BD, and SWC in different slope positions

土层厚度 /cm	pH			BD/ $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$			SWC /%		
	坡上	坡中	坡下	坡上	坡中	坡下	坡上	坡中	坡下
0 ~ 10	8.61 $\pm$ 0.10Aa	8.65 $\pm$ 0.16Aa	8.54 $\pm$ 0.07Aa	1.15 $\pm$ 0.02Aa	1.17 $\pm$ 0.05Aa	1.23 $\pm$ 0.02Ba	12.04 $\pm$ 1.64Ab	15.74 $\pm$ 2.57Ba	15.80 $\pm$ 2.81Bb
10 ~ 20	8.63 $\pm$ 0.14Aa	8.71 $\pm$ 0.17Aa	8.62 $\pm$ 0.17Aab	1.16 $\pm$ 0.03Aa	1.19 $\pm$ 0.04Aa	1.27 $\pm$ 0.02Bab	13.03 $\pm$ 0.98Aa	15.30 $\pm$ 1.32Ba	15.10 $\pm$ 1.41Bab
20 ~ 30	8.71 $\pm$ 0.13Ab	8.77 $\pm$ 0.17Aa	8.68 $\pm$ 0.15Ab	1.23 $\pm$ 0.01Ab	1.29 $\pm$ 0.03Ab	1.28 $\pm$ 0.04Aab	11.40 $\pm$ 2.35Aa	15.63 $\pm$ 2.25Ba	14.93 $\pm$ 2.07Bab
30 ~ 50	—	—	8.71 $\pm$ 0.08b	—	—	1.29 $\pm$ 0.05b	—	—	12.34 $\pm$ 0.51a
50 ~ 70	—	—	8.64 $\pm$ 0.23ab	—	—	1.31 $\pm$ 0.03b	—	—	14.32 $\pm$ 1.22ab

1) 不同大写字母表示同一土层不同坡位间差异显著($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一坡位不同土层间的差异显著($P < 0.05$); BD 和 SWC 分别表示土壤容重和土壤含水量; “—”表示该土层未取得土样

2.2 紫色土丘陵区柑橘园不同坡位土壤碳、氮养分含量的空间分布特征

如图 2 所示, 3 种坡位土壤 NH_4^+ -N 含量在 0 ~ 30 cm 土层差异较小, 其中上坡位 0 ~ 10 cm 土层 $\omega(\text{NH}_4^+$ -N) 最高, 为 $3.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并随着土层加深呈现先降低后增加的趋势. 中坡位 $\omega(\text{NH}_4^+$ -N) 的

变化趋势与上坡位相反, 呈现先增加后降低的趋势, 在 10 ~ 20 cm 土层达到最高值, 为 $2.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 下坡位 $\omega(\text{NH}_4^+$ -N) 在 0 ~ 30 cm 土层的变化趋势与中坡位相同, 但在 50 cm 土层达到最低值 $1.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 后, 趋势转为增加, 在 70 cm 土层达到下坡位的最高值 $2.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图 2(a)]. 上、中两

表 2 不同坡位土壤机械组成的空间分布特征¹⁾

Table 2 Spatial distribution characteristics of soil mechanical composition in different slope positions

土层厚度 /cm	ω (砂粒)(2 ~ 0.02 mm)/%			ω (粉粒)(0.002 ~ 0.02 mm)/%			ω (黏粒)(< 0.002 mm)/%		
	坡上	坡中	坡下	坡上	坡中	坡下	坡上	坡中	坡下
0 ~ 10	24.39±1.47Aab	27.67±2.3Aab	26.98±0.56Aa	58.66±3.26Aa	59.53±3.69Aa	58.04±4.04Ab	16.95±1.27Ba	12.80±2.16Ab	14.99±1.15ABab
10 ~ 20	26.60±0.98Ab	23.25±1.36Aa	25.39±1.47Aa	58.01±4.11Aa	68.29±4.24Bb	58.16±4.56Ab	15.39±0.69Ba	8.46±1.67Aa	16.45±1.29Bb
20 ~ 30	20.49±1.23Aa	24.78±2.10Aa	37.41±2.58Bb	62.56±2.09Ba	67.75±2.27Bb	51.65±2.17Aa	16.95±2.01Ca	7.74±0.99Aa	10.94±0.86Ba
30 ~ 50	—	—	29.15±0.87a	—	—	56.79±2.98ab	—	—	14.06±2.12ab
50 ~ 70	—	—	27.74±3.85a	—	—	59.84±3.49b	—	—	11.42±1.39a

1)不同大写字母表示同一土层不同坡位间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示同一坡位不同土层间的差异显著($P < 0.05$);“—”表示该土层未取得土样

表 3 坡位和土层深度对土壤物理性质影响的双因素方差分析¹⁾

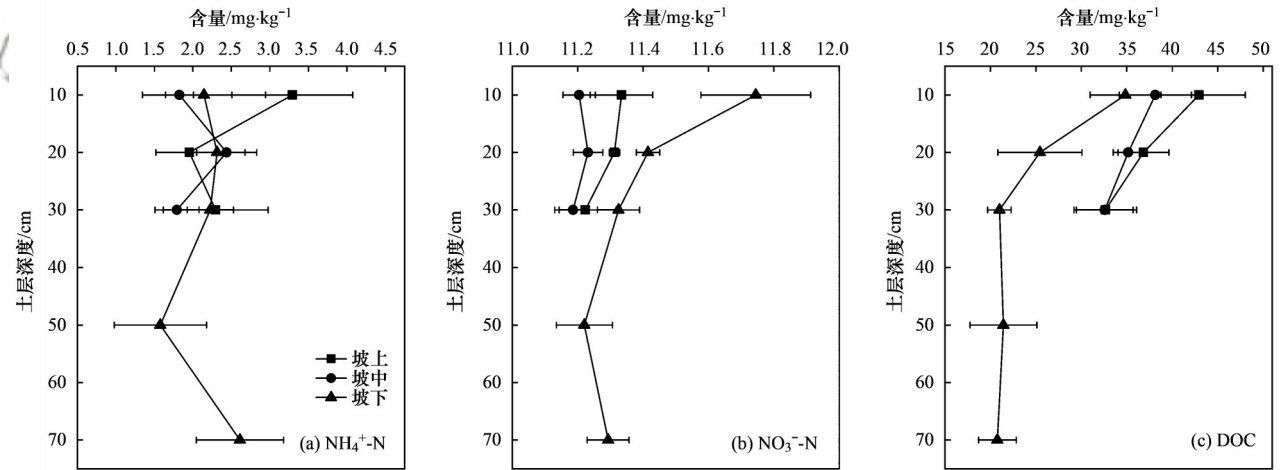
Table 3 Two-way analysis of variance to test the effects of slope positions and soil layers on soil physical properties

项目	pH	BD	SWC	砂粒	粉粒	黏粒
坡位	0.400	0.000**	0.043	0.000**	0.000**	0.001**
土层深度	0.574	0.001**	0.205	0.004**	0.000**	0.002**
坡位 × 土层深度	0.918	0.099	0.441	0.000**	0.000**	0.012*

1)*表示显著性水平 $P < 0.05$, **表示极显著性水平 $P < 0.01$

坡位之间 0 ~ 30 cm 土层 NO_3^- -N 含量并无显著差异 ($P < 0.05$),且随土层的变化趋势较小,0 ~ 10 cm 土层 NO_3^- -N 含量略高于 20 ~ 30 cm 土层. 下坡位 0 ~ 30 cm 土层 NO_3^- -N 含量均高于上、中两坡位,其中 0 ~ 10 cm 土层 $\omega(\text{NO}_3^-$ -N)在整个坡面最高,为 $11.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,并随着土层深度的加深,先降低后增加[图 2(b)]. 上、中两坡位 0 ~ 30 cm 土层 DOC

含量同样没有显著差异 ($P < 0.05$),且变化趋势一致,均随着土层加深而降低. 与 NO_3^- -N 含量在整个坡面的分布相反,下坡位土壤 DOC 含量均低于上、中两坡位. 虽然 $\omega(\text{DOC})$ 随深度的变化趋势在 0 ~ 30 cm 土层与上、中两坡位一致,但是在 30 cm 土层以下基本保持不变,维持在 $20.76 \sim 21.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的波动范围内[图 2(c)].



NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 DOC 分别为土壤铵态氮、硝态氮和可溶性有机碳

图 2 不同坡位土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 DOC 含量沿土层的空间分布

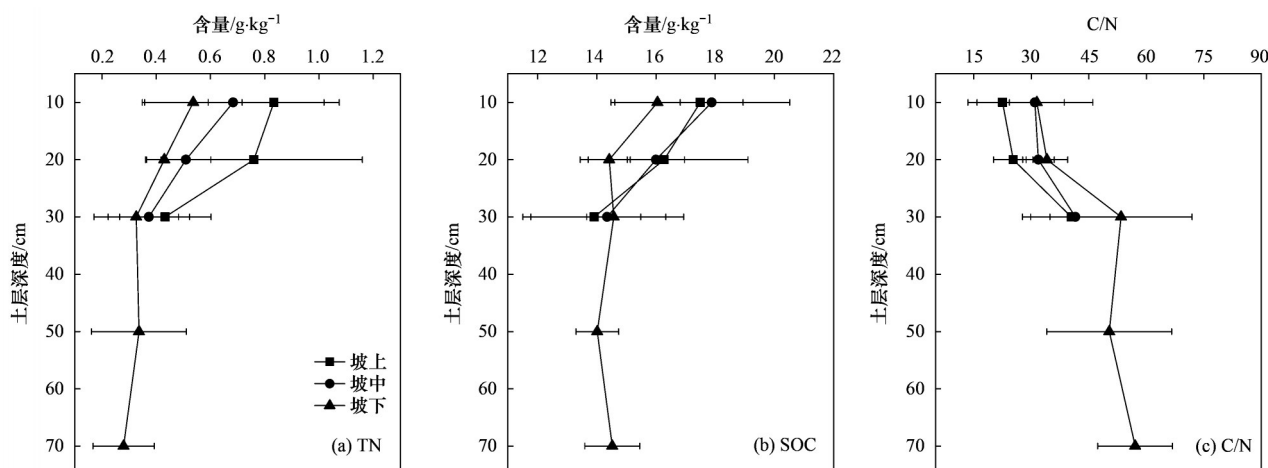
Fig. 2 Spatial distribution of NH_4^+ -N, NO_3^- -N, and DOC contents along soil layers at different slope positions

整体来看,0 ~ 30 cm 土层的不同坡位,土壤 TN 含量分布呈现出上坡位 > 中坡位 > 下坡位的规律. 整个土壤剖面 0 ~ 10 cm 土层 $\omega(\text{TN})$ 均是最高值,不同坡位的波动范围为 $0.54 \sim 0.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,且随着土层加深,土壤 TN 含量呈现出降低的趋势[图 3(a)]. 对于下坡位 30 cm 以下的土层, $\omega(\text{TN})$ 维持在 $0.28 \sim 0.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的波动范围内,土层间差异并不显著($P >$

0.05). 上、中两坡位 0 ~ 30 cm 土层 $\omega(\text{SOC})$ 几乎保持一致,且随着土层深度的加深而降低,变化范围为 $13.92 \sim 17.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 下坡位 0 ~ 20 cm 土层 $\omega(\text{SOC})$ 略低于上、中两坡位,但 20 cm 以下的各土层间并无明显差异,基本维持在 $14.02 \sim 14.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的范围内上下波动[图 3(b)]. 土壤 C/N 值同样也是反映应土壤 C、N 养分含量的重要指标. 如图 3(c)所示,0 ~ 20

cm 土层上坡位土壤 C/N 较低, 分别为 22.50(0~10 cm 土层)和 25.29(10~20 cm 土层). 对于 20~30 cm

土层, 下坡位土壤 C/N 较高, 并在 30 cm 以下的土层中呈现先降低后增加的趋势.



TN、SOC 和 C/N 分别为土壤总氮、土壤有机碳和土壤碳氮比

图3 不同坡位土壤 TN、SOC 和 C/N 沿土层的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of TN and SOC contents, and C/N along soil layers at different slope positions

土壤 TN 和 SOC 储量(0~30 cm)沿坡向的空间分布如图 4 所示. 整体来看, 0~30 cm 柑橘林土壤剖面 TN 储量随坡面呈自上而下降低的趋势, 其中坡上、坡中和坡下的土壤 TN 储量分别为 2.37、1.89 和 1.62 t·hm⁻², 坡下土壤 TN 储量显著低于坡上 ($P < 0.05$), 二者相差 0.75 t·hm⁻²[图 4(a)], 但同层土壤不同坡位间 TN 储量差异较小, 仅仅在 10~20 cm 土层, 坡上土壤 TN 储量显著高于坡下. 同一坡位, 随着土

层加深, 土层 TN 储量呈现降低的趋势, 0~30 cm 土层 SOC 储量在不同坡位的变化范围在 56.12~58.48 t·hm⁻². 其中, 中坡位 SOC 储量最高, 但 3 个坡位的差异并不显著 ($P > 0.05$). 与 TN 储量结果相似, 不同坡位 SOC 储量的最大值均出现在 0~10 cm 土层, 分别为 20.13、20.92 和 19.74 t·hm⁻²(坡上、坡中和坡下). 随着土层加深, SOC 储量呈现微弱降低的趋势, 但土层间的差异同样不显著[图 4(b)].

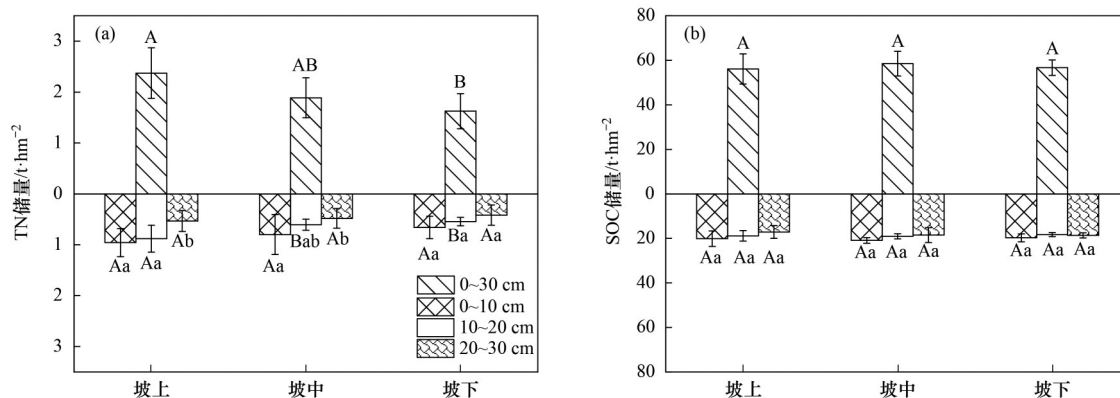


图4 不同坡位 0~30 cm 土层 TN 和 SOC 储量的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of TN and SOC storages in 0-30cm soil layer at different slope positions

2.3 不同因素对柑橘园坡地土壤碳、氮变化影响及其贡献

坡位和土层深度对柑橘园坡地土壤 C、N 养分的影响见表 4. 土壤 NO₃⁻-N、DOC 和 TN 含量受到坡位和土层深度的显著影响 ($P < 0.05$), 且两因素交互作用(坡位 × 土层深度)对土壤 NO₃⁻-N 含量也有显著影响 ($P < 0.05$). 但是土壤 NH₄⁺-N 含量与坡位和土层深度之间没有明显的相关关系 ($P > 0.05$). 此外, 土层深度对 SOC 含量影响显著 ($P < 0.05$), 但 SOC 的含量

不受坡位的影响 ($P > 0.05$). 无论是坡位和土层深度, 以及两因素交互作用, 均对土壤的 C/N 影响较小 ($P > 0.05$). 土壤物理参数与土壤 C、N 养分含量的相关矩阵如表 5 所示, 在整个柑橘园坡地, 土壤 NO₃⁻-N 含量与土壤 pH 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 其余土壤 C、N 组分含量与土壤 pH 均无显著相关关系 ($P > 0.05$). 除土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 外, DOC、TN、SOC 含量分别与土壤 C/N 值和 BD 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$). 其余土壤物理参数与土壤 C、N 组分含

表 4 坡位和土层深度对土壤 C、N 养分含量影响的双因素方差分析¹⁾

Table 4 Two-way analysis of variance to test the effects of slope positions and soil layers on soil C and N nutrient contents

项目	TN	SOC	C/N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	DOC
坡位	0.037*	0.697	0.510	0.394	0.000**	0.003**
土层深度	0.045*	0.042*	0.189	0.468	0.000**	0.011*
坡位 × 土层深度	0.880	0.934	0.986	0.258	0.011*	0.794

1)*表示显著性水平 $P < 0.05$, **表示极显著性水平 $P < 0.01$

表 5 坡面土壤物理性质和 C、N 养分含量的相关矩阵¹⁾

Table 5 Correlation matrix of physical properties and C and N nutrient contents of slope soils

	pH	SWC	BD	砂粒	粉粒	黏粒	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	DOC	TN	SOC	C/N
pH	1											
SWC	-0.380	1										
BD	0.161	-0.245	1									
砂粒	-0.117	0.112	0.375	1								
粉粒	0.495	0.077	-0.102	-0.736**	1							
黏粒	-0.558	-0.256	-0.339	-0.241	-0.479	1						
NH ₄ ⁺ -N	-0.245	0.424	-0.297	-0.203	-0.005	0.269	1					
NO ₃ ⁻ -N	-0.802**	0.305	-0.023	0.113	-0.357	0.367	0.168	1				
DOC	-0.202	0.388	-0.887**	-0.577	0.376	0.209	0.279	0.070	1			
TN	-0.375	0.347	-0.949**	-0.324	-0.006	0.429	0.317	0.117	0.884**	1		
SOC	-0.363	0.592	-0.853**	-0.098	-0.010	0.142	0.289	0.138	0.784**	0.873**	1	
C/N	0.335	-0.373	0.878**	0.538	-0.217	-0.386	-0.249	-0.236	-0.901**	-0.905**	-0.738**	1

1)**表示极显著性水平 $P < 0.01$

量均无明显的相关关系. 此外, 为了直观地研究柑橘园坡地土壤 TN 含量与 SOC 含量、TN 储量与 SOC 储量之间的关系, 采用线性拟合方法(图 5). 研究结果发现, 土壤 TN 含量和 SOC 含量呈极显著正相

关关系($P < 0.01$), 不同土层的 TN 储量与 SOC 储量也呈显著正相关关系($P < 0.05$), 回归斜率分别为 6.6 和 3.8, R^2 分别为 0.76 和 0.41, P 值均小于 0.05, 拟合效果较好.

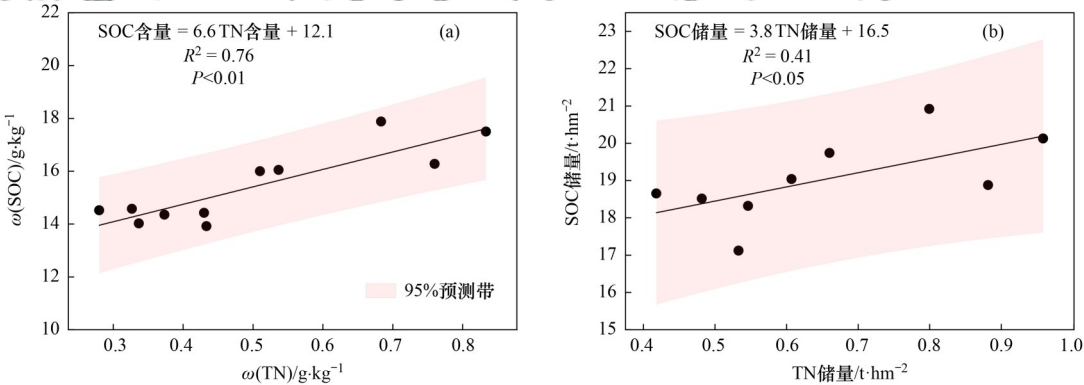


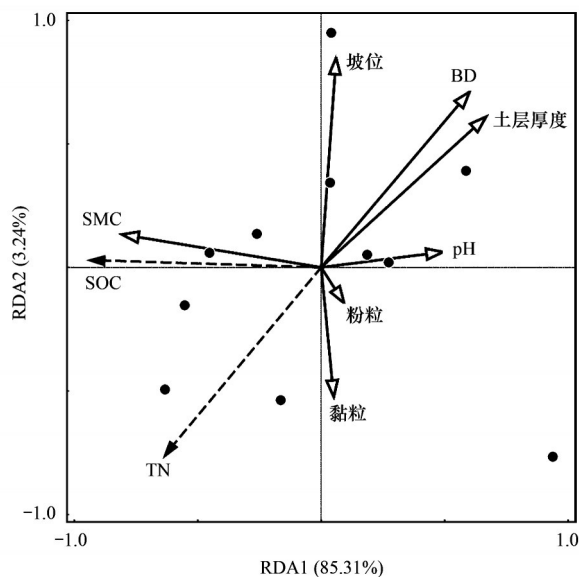
图 5 坡地土壤 TN 与 SOC 含量; TN 与 SOC 储量的相关性拟合

Fig. 5 Relationships between SOC and TN contents, and between SOC and TC storages on the slope

根据各环境变量(坡位、土壤深度及土壤理化因子: BD、SWC、pH、粉粒和黏粒含量)和土壤 TN 和 SOC 含量的 RDA 结果可见(图 6), 第一轴土壤 TN 和 SOC 含量与环境因子相关性为 0.94, 第二轴土壤 TN 和 SOC 含量与环境相关性为 0.93, 排序结果可靠. RDA1 和 RDA2 解释率分别为 85.3%、3.2%, 两轴能解释 88.6% 的差异信息. SWC、土层深度和土壤 BD 对 TN 和 SOC 含量变异的解释度分别为 55.6% ($P < 0.01$)、39.2% ($P < 0.05$) 和 32.5% ($P < 0.05$), 是影

响土壤 TN 和 SOC 含量变化 3 个主要的环境因子. 此外, VPA 分析表明(图 7), 采样位置(坡位和土层深度)和土壤物理因子(BD、pH、SWC、黏粒和粉粒含量)可以解释土壤 TN 储量 97.6% 的变异[图 7(a)]和 SOC 储量 42.2% 的变异[图 7(b)]. 样地位置和土壤物理因子是影响土壤 TN 储量的主要因素. 它们分别解释了 16.6% ($P = 0.07$) 和 4.4% ($P = 0.25$) 的变异, 2 个因素的交互作用解释了 76.6% 的变异 ($P < 0.05$). 采样位置对 SOC 储量变化不能提供相应的解

释,但是土壤物理因子可以解释 SOC 储量 15.9% ($P = 0.45$) 的变异,且 2 个因素的交互作用解释了 40.6% 的变异 ($P < 0.05$)。



虚线箭头表示结果变量,实线箭头表示影响变量

图 6 评估 TN 和 SOC 含量与影响变量之间关系的冗余分析 (RDA)

Fig. 6 Redundancy analysis (RDA) assessing the relationships of TN and SOC contents with influential variables

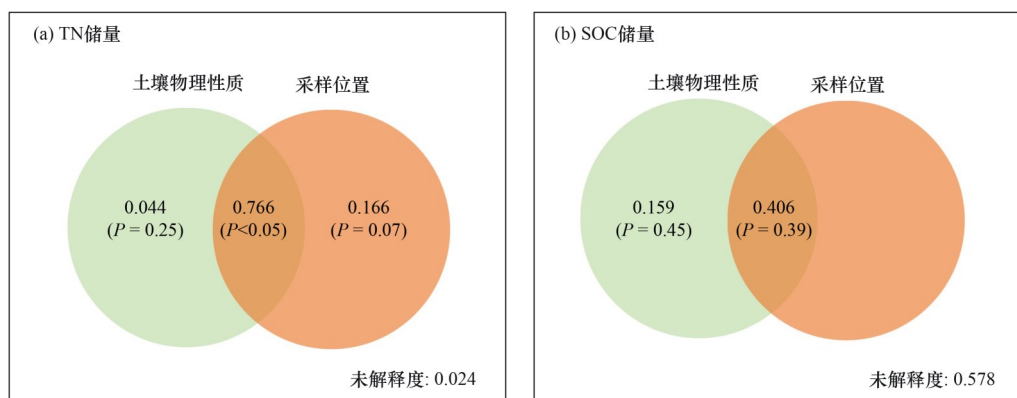
3 讨论

3.1 影响紫色土丘陵区柑橘园土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 DOC 含量变化的主要因素

一般来说,不同坡位的土层厚度、通风条件和光照辐射^[34]均具有较大的差异,这些条件会影响植被长势,土壤微生物的活性以及凋落物的分解程度^[35],从而共同决定了坡地土壤养分含量的差异以及分布的空间异质性^[36]。本研究发现,坡位显著影响紫色土柑橘园剖面土壤物理参数和 C、N 养分分布,且坡位对不同土壤参数的影响差异较大(表 3 和表 4)。土壤 NO_3^- -N 含量在坡面的分布表现为:下坡位 > 中坡位 > 上坡位[图 2(b)],这与 Zhang 等^[28]在黄土高原丘

陵区的研究结果类似;而土壤 NH_4^+ -N 含量在不同坡面上的分布差异较小[图 2(a)]。造成这一现象的主要原因为土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 主要来源于肥料并以水溶性状态存在于土壤中^[37],而川中丘陵地区降雨较多,在地表径流输送的分离作用下, NO_3^- -N 向下坡方向输移和再分布^[38, 39],从而导致下坡位土壤 NO_3^- -N 含量显著高于上坡位。同时,土壤 NH_4^+ -N 作为不稳定且易被植物直接吸收利用的养分,虽然容易随水分流动到下坡位,但能快速被植物吸收,且容易在转运过程中转化为 NO_3^- -N,所以坡位间 NH_4^+ -N 差异不大^[40]。土壤 DOC 含量在坡面的分布与 NO_3^- -N 含量则相反,表现为:下坡位 < 中坡位 < 上坡位[图 2(c)]。这一结果与王艳丹等^[41]在云南玉溪的人工酸枣林的研究结果相似,均为上坡位土壤 DOC 含量显著高于下坡位。已有研究证明,上坡位的果树根系更为发达,物质周转速度更快,可为土壤 DOC 提供丰富的基质来源^[42]。但是徐曼等^[20]对紫色土旱地坡面的研究则发现下坡位土壤 DOC 含量更高,分析其原因可能是未作阻控措施的坡耕地极易发生水土流失,将上层和中层的 DOC 带到下层重新分布^[43],而果树林土壤表层分布着丰富的植被根系和枯落物,这会极大地影响地表径流的形成和流速,阻止土壤 DOC 向坡面下部迁移和积累^[44]。本研究表明速效 C、N 养分在坡面上的分布是不同坡位多重因素综合作用的结果。

此外,本研究还发现,0 ~ 30 cm 土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 DOC 含量随土壤深度的变化趋势各异,但是整体呈现出随土层加深波动下降的趋势(图 2)。这与汝海丽等^[45]对黄土高原坡地的研究结果一致。除坡形和坡位外,影响养分在土壤剖面垂直分布的主要因素是径流强度、与土壤入渗能力相关的土壤结构、土壤溶液中各养分的吸附能力以及植物对养分的吸收和利用^[46, 47]。土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 DOC 均



土壤物理性质包括:pH,容重,土壤含水量,黏粒含量,粉粒含量;采样位置包括:坡位和土层深度;数字表示每个解释变量所解释的方差的比例

图 7 基于方差分解分析(VPA)的土壤物理性质和采样位置对土壤 TN 和 SOC 储量的影响

Fig. 7 Effects of soil physical properties and sampling positions on TN and SOC storages based on variation partitioning analysis (VPA)

属于土壤 C 和 N 的速效养分,易溶于水且容易被植物吸收利用.随自然降雨入渗到下层后,被大量果树的根系生长消耗,从而造成下层土壤 C 和 N 的速效养分低于上层的现象^[40].而柑橘园下坡位拥有更深的土层,土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量在 50 cm 土层往下出现含量升高的趋势,侧面证明了更深层土壤在没有植物利用的情况下,会出现速效 N 素累积的现象.

3.2 影响紫色土丘陵区柑橘园土壤 TN 含量、SOC 含量和土壤 C/N 变化的主要因素

土壤 TN 和 SOC 的含量不仅是体现土壤肥力的直接指标,还可以指示土壤 C、N 养分矿化输入和损失平衡的结果.与速效 C、N 养分变化相似,柑橘园土壤 TN 和 SOC 含量在坡面的分布也会受到上述多种因素的共同影响.一般研究认为,在土壤侵蚀或雨水冲刷作用下,坡位由上至下 TN 和 SOC 含量会逐渐增加^[48,49].而本研究发现,土壤 TN 含量在坡面的分布表现为:上坡位 > 中坡位 > 下坡位[图 3(a)],且受到坡位的显著影响(表 4).虽然 SOC 含量在坡面上的分布不受空间位置的影响,表现为不同坡位间差异不显著,但下坡位 0~20 cm 土层 SOC 含量仍略低于上、中两坡位,此处借助 RDA 分析来解释上述结果产生的原因.在众多土壤物理因素中,SWC 和 BD 是影响坡面土壤 TN 和 SOC 的含量分布的关键因素(图 6),其中 TN 和 SOC 含量与 BD 均呈显著负相关关系(表 5).前人研究表明,坡面土壤随着 BD 增大,产流时间提前,径流系数增大,入渗率减小,泥沙侵蚀和养分流失严重^[50].研究区域内 0~20 cm 土层,上坡位 BD 显著低于下坡位(表 1),可合理推测下坡位的土壤侵蚀更严重,从而造成果园下坡位 TN 和 SOC 含量会明显减少.另有前人研究发现,林地坡面枯枝落叶的分解系数(枯枝落叶量/枯枝落叶层)由坡下到坡上逐渐减小,分解率明显降低^[41].柑橘园上坡位土壤含水量显著低于中坡位和下坡位(表 1),水分丧失较快无法为微生物分解提供足够的水分,土壤微生物对有机 C、N 的分解速率低,导致上坡位 TN 和 SOC 的含量要高于下坡位.同时,下坡位地势较平,靠近路基村道,人为活动更加频繁,翻耕土壤使土壤有机 C、N 分解速度更快,积累困难^[51].土壤 C/N 是土壤质量变化的重要指标,其大小会影响植物的养分利用效率,对生态系统中 C、N 循环过程起着决定作用^[52].柑橘园坡地的 C/N 表现出下坡位高于上坡位,中坡位在二者间徘徊的现象,这与 TN 和 SOC 沿坡面的分布相反.谢柠杲等^[53]在紫色土植烟坡地也发现了同土层中土壤 C/N 变化规律与土壤 C、N 基本相反的现象,表明整个坡面上 TN 和 SOC 积累并非同步,土壤 TN 和 SOC 因坡位和土壤物理性质以及微生物的差异而发生变化,

最终导致土壤 C/N 在不同坡位呈现出一定的差异性.

柑橘园土壤剖面 TN 和 SOC 含量分布具有明显的表聚性,并在 0~30 cm 土层呈现随土层深度的加深,含量均在降低的现象.双因素方差分析表明,土壤 TN 和 SOC 含量均受到土层深度的显著影响,同时 RDA 分析进一步证明,土层深度对土壤 TN 和 SOC 含量变异解释度高达 39.2%,仅次于 SWC 的解释度.刘延坤等^[54]对长白山人工林的研究也得到了类似的结果.这是因为,土壤表层累积了大量的枯枝落叶和腐殖质,加上光、水、热和通气状况等良好,为微生物和土壤动物生长提供良好环境,加速了地表凋落物分解为土壤有机 C、N,并且富集在土层表面^[55].之后随水分或其他介质向土壤下层迁移扩散,形成土壤 C、N 含量从表层向下层逐渐降低的分布格局^[56].整体来看,整个坡面的 C/N 不受土层深度的影响(表 4),这与梁珂等^[57]在重庆三峡紫色土区的研究结果一致,进一步证明了紫色土坡耕地退耕后土壤 C/N 仍然相对稳定的结论.

3.3 土地利用方式转变后紫色土坡地土壤 TN 和 SOC 储量变化的主要影响因素

目前已有大量研究表明,植被恢复导致的生物量增加会影响土壤 C、N 的积累^[58],而牧场或林地的开垦会使土壤物理性质退化,从而造成更多的土壤 C、N 损失^[59].本研究表明,紫色土坡耕地转变为柑橘园 13 a 后,坡上、坡中和坡下的土壤 TN 储量(0~30 cm)分别为 2.37、1.89 和 1.62 t·hm⁻²,坡面 TN 储量呈现出自上而下显著降低的趋势[图 4(a)];SOC 储量沿坡面的分布差异不显著,变化范围在 56.12~58.48 t·hm⁻²[图 4(b)].由于储量是根据含量计算而来,因此土壤储量的变化趋势与导致原因和土壤含量基本一致,此处不加赘述.值得注意的是,本研究只探讨了 0~30 cm 土层的土壤 TN 和 SOC 的储量,原因是上、中两坡位的土层厚度只有 30 cm,如果计算整个土层的总储量,下坡位土壤 TN 和 SOC 的储量是最高的.基于回归分析,土壤 TN 和 SOC 的含量及储量均呈现高度正相关关系(图 5),说明土地利用转变过程中存在较强的土壤 C、N 相互作用^[60],熊杏等^[61]在南方红壤以及张春华等^[62]在东北黑土的研究均得出了相同的结论.分析认为,出现上述结果的原因是由于土壤中大部分氮素和碳素均以有机状态存在于土壤有机质中,其动态变化均受土壤有机质分解的影响^[63],导致 TN 和 SOC 储量在坡面的高低分布也呈现出相同的趋势.VPA 分析结果表明,柑橘园坡面土壤 TN 和 SOC 储量受到坡位、土层深度和土壤物理性质的影响,且这 3 个因素的共同影响对土壤 TN 和 SOC 储量变异的解释度最大(图 7).因此,坡耕地转变为

柑橘园后会通过影响土壤 C、N 的输入和输出平衡, 以及改变土壤结构来影响土壤 C、N 储量^[64]。此外, 微生物在土壤的生物地球化学循环和生态系统功能中发挥着重要作用^[65]。未来在研究土地利用方式对紫色土丘陵生态系统不同地形条件和不同恢复年限植被恢复后土壤-植物系统碳、氮的动态变化的影响机制时, 还应综合考虑土壤微生物的相关特性。

4 结论

(1) 紫色土丘陵区柑橘园坡面土壤不同 C、N 组分在空间上的分布具有较大差异, 并受到坡位和土层深度的显著影响。其中, 土壤 NO_3^- -N 含量从上坡到下坡逐渐增加, TN 和 DOC 含量从上坡到下坡逐渐降低, NH_4^+ -N 和 SOC 含量在坡面上的分布没有显著差异。各坡位表层土壤的 C 和 N 养分含量均大于底层 (NH_4^+ -N 含量除外)。

(2) 土壤物理性质也会显著影响坡面土壤 C、N 养分含量。其中, 土壤 NO_3^- -N 含量与土壤 pH 呈极显著负相关关系, 除土壤 NO_3^- -N 含量和 NH_4^+ -N 含量外, DOC 含量、TN 含量、SOC 含量和土壤 C/N 与土壤 BD 呈极显著负相关关系。

(3) 整体来看, 紫色土柑橘园坡地土壤 TN 储量 (0~30 cm) 沿坡面的变化趋势为: 上坡位 > 中坡位 > 下坡位, 且上坡位土壤 TN 储量显著高于下坡位, 而 SOC 储量沿坡面的分布差异不显著, 整个坡面 TN 与 SOC 的储量呈显著正相关关系。综上所述, 土壤 TN 和 SOC 储量受到坡位、土层深度和土壤物理性质的共同影响。因此, 紫色土丘陵区坡耕地向果园的转变应重视土地利用类型及其转变后土壤 C、N 在坡面的迁移与重新分配规律, 并据此优化养分管理措施, 有效提升资源利用效率和减少农业面源污染问题。

参考文献:

- [1] Wei X R, Shao M, Fu X L, *et al.* The effects of land use on soil N mineralization during the growing season on the northern Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2011, **160**(3-4): 590-598.
- [2] Scharlemann J P W, Tanner E V J, Hiederer R, *et al.* Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. *Carbon Management*, 2014, **5**(1): 81-91.
- [3] Wang T, Kang F F, Cheng X Q, *et al.* Spatial variability of organic carbon and total nitrogen in the soils of a subalpine forested catchment at Mt. Taiyue, China [J]. *CATENA*, 2017, **155**: 41-52.
- [4] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed [J]. *Ecology*, 2008, **89**(2): 371-379.
- [5] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecological Applications*, 2000, **10**(2): 423-436.
- [6] Fu X L, Shao M, Wei X R, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2010, **155**(1-2): 31-35.
- [7] Han X Y, Gao G Y, Chang R Y, *et al.* Changes in soil organic and inorganic carbon stocks in deep profiles following cropland abandonment along a precipitation gradient across the Loess Plateau of China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, **258**: 1-13.
- [8] Fernández-Romero M L, Lozano-García B, Parras-Alcántara L. Topography and land use change effects on the soil organic carbon stock of forest soils in Mediterranean natural areas [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **195**: 1-9.
- [9] Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(4): 1658-1670.
- [10] Gao G Y, Tuo D F, Han X Y, *et al.* Effects of land-use patterns on soil carbon and nitrogen variations along revegetated hillslopes in the Chinese Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 746, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141156.
- [11] 雷利国, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2669-2677.
- Lei L G, Jiang C S, Hao Q J. Impacts of land use changes on soil light fraction and particulate organic carbon and nitrogen in Jinyun Mountain[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2669-2677.
- [12] Kooch Y, Ghorbanzadeh N, Haghverdi K, *et al.* Soil quality cannot be improved after thirty years of land use change from forest to rangeland [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159132.
- [13] Meena V S, Mondal T, Pandey B M, *et al.* Land use changes: strategies to improve soil carbon and nitrogen storage pattern in the mid-Himalaya ecosystem, India [J]. *Geoderma*, 2018, **321**: 69-78.
- [14] Deng L, Liu G B, Shangquan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis [J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(11): 3544-3556.
- [15] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(4): 345-360.
- [16] 苏正安, 熊东红, 张建辉, 等. 紫色土坡耕地土壤侵蚀及其防治措施研究进展[J]. *中国水土保持*, 2018, (2): 42-47.
- [17] Chen Z J, Wang L, Wei A S, *et al.* Land-use change from arable lands to orchards reduced soil erosion and increased nutrient loss in a small catchment [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **648**: 1097-1104.
- [18] Gong X, Brueck H, Giese K M, *et al.* Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, **72**(4): 483-493.
- [19] 孙文义, 郭胜利, 宋小燕. 地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区表层土壤有机碳空间分布影响[J]. *自然资源学报*, 2010, **25**(3): 443-453.
- Sun W Y, Guo S L, Song X Y. Effects of topographies and land use on spatial distribution of surface soil organic carbon in Hilly Region of the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, **25**(3): 443-453.
- [20] 徐曼, 余冻, 王富华, 等. 紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5491-5499.
- Xu M, Yu L, Wang F H, *et al.* Response of soil organic carbon content in different slope positions to fertilization management in purple soil sloping fields [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**

- (11): 5491-5499.
- [21] 马胜兰, 况福虹, 唐家良, 等. 种植模式对川中丘陵石灰性紫色土结构和地力的影响[J]. 土壤学报, 2021, **58**(4): 935-947.
- Ma S L, Kuang F H, Tang J L, *et al.* Effects of planting patterns on soil structure and fertility of calcareous purple soil in hilly areas of central Sichuan basin [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, **58**(4): 935-947.
- [22] Zhao P, Tang X Y, Zhao P, *et al.* Mixing of event and pre-event water in a shallow Entisol in sloping farmland based on isotopic and hydrometric measurements, SW China [J]. *Hydrological Processes*, 2016, **30**(19): 3478-3493.
- [23] Zhu B, Wang T, You X, *et al.* Nutrient release from weathering of purplish rocks in the Sichuan Basin, China [J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(2): 257-264.
- [24] Zhu B, Wang T, Kuang F H, *et al.* Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the central Sichuan Basin, China [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, **73**(4): 1419-1426.
- [25] Li Z Y, Sun X T, Huang Z H, *et al.* Changes in nutrient balance, environmental effects, and green development after returning farmland to forests: a case study in Ningxia, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 735, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139370.
- [26] 柯韵, 杨红薇, 王小国, 等. 紫色土坡耕地退耕还林对土壤 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(7): 1398-1406.
- Ke Y, Yang H W, Wang X G, *et al.* Effect of returning cropland to forestland on N₂O emissions from sloping purple soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(7): 1398-1406.
- [27] Brubaker S C, Jones A J, Lewis D T, *et al.* Soil properties associated with landscape position [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, **57**(1): 235-239.
- [28] Zhang Q Y, Wang Z, Yao Y F, *et al.* Effects of slope morphology and position on soil nutrients after deforestation in the hilly loess region of China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 321, doi: 10.1016/j.agee.2021.107615.
- [29] Qi Y L, Wei W, Li J R, *et al.* Effects of terracing on root distribution of *Pinus tabulaeformis* Carr. forest and soil properties in the Loess Plateau of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 721, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137506.
- [30] Zhang J, Wang X J, Wang J P. Impact of land use change on profile distributions of soil organic carbon fractions in the Yanqi Basin [J]. *CATENA*, 2014, **115**: 79-84.
- [31] Valjavec M B, Čarni A, Žlindra D, *et al.* Soil organic carbon stock capacity in karst dolines under different land uses [J]. *CATENA*, 2022, 218, doi: 10.1016/j.catena.2022.106548.
- [32] Liu X, Ma J, Ma Z W, *et al.* Soil nutrient contents and stoichiometry as affected by land-use in an agro-pastoral region of northwest China [J]. *CATENA*, 2017, **150**: 146-153.
- [33] Deng L, Wang K B, Chen M L, *et al.* Soil organic carbon storage capacity positively related to forest succession on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2013, **110**: 1-7.
- [34] 罗永清, 丁杰萍, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地半固定沙丘不同坡位土壤 C、N 特征[J]. 水土保持通报, 2015, **35**(2): 94-100.
- Luo Y Q, Ding J P, Zhao X Y, *et al.* Soil carbon and nitrogen characteristics of different positions of semi-fixed dune in Horqin Sandy Land [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, **35**(2): 94-100.
- [35] 秦华军, 何丙辉, 赵旋池, 等. 西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3580-3586.
- Qin H J, He B H, Zhao X C, *et al.* Influence of different slope position and profile in Disporopsis Pernyi forest land on soil microbial biomass and enzyme activity in southwest Karst Mountain of China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3580-3586.
- [36] Zhang Y, Wei L Y, Wei X R, *et al.* Long-term afforestation significantly improves the fertility of abandoned farmland along a soil clay gradient on the Chinese Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2019, **29**(10): 3521-3534.
- [37] 贾晓红, 李新荣, 肖洪浪. 沙坡头地区农田灌溉和施肥对氮淋溶量影响的研究[J]. 中国沙漠, 2005, **25**(2): 223-227.
- Jia X H, Li X R, Xiao H L. Effect of irrigation and fertilization on nitrogen leach loss in field of Arid Shapotou Area [J]. *Journal of Desert Research*, 2005, **25**(2): 223-227.
- [38] Wang L, Shi Z H, Wang J, *et al.* Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: a case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **512**: 168-176.
- [39] Pieri L, Bittelli M, Hanuskova M, *et al.* Characteristics of eroded sediments from soil under wheat and maize in the North Italian Apennines [J]. *Geoderma*, 2009, **154**(1-2): 20-29.
- [40] 刘银, 何露露, 强薇, 等. 经营模式对大渡河干暖河谷黄果柑坡地果园土壤养分的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021, **27**(2): 271-279.
- Liu Y, He L L, Qiang W, *et al.* Effects of management modes on soil nutrients in sloping Huangguogan orchards in the dry-warm valley of the Dadu River [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2021, **27**(2): 271-279.
- [41] 王艳丹, 何光熊, 宋子波, 等. 酸角人工林不同坡位土壤有机碳及其活性组分的变化[J]. 土壤, 2020, **52**(6): 1256-1262.
- Wang Y D, He G X, Song Z B, *et al.* Study on soil organic carbon and its active fractions at different slope sites of *Tamarindus indica* plantation [J]. *Soils*, 2020, **52**(6): 1256-1262.
- [42] Zhou G Y, Zhou X H, He Y H, *et al.* Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(3): 1167-1179.
- [43] 雷金银, 雷晓婷, 周丽娜, 等. 耕作措施对缓坡耕地土壤养分分布及肥料利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(18): 127-134.
- Lei J Y, Lei X T, Zhou L N, *et al.* Effects of tillage measures on soil nutrients distribution and fertilizer use efficiency on gentle slope farmland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(18): 127-134.
- [44] De Baets S, Poesen J, Knapen A, *et al.* Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, **32**(9): 1323-1345.
- [45] 汝海丽, 张海东, 焦峰, 等. 黄土丘陵区微地形梯度下草地群落植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J]. 自然资源学报, 2016, **31**(10): 1752-1763.
- Ru H L, Zhang H D, Jiao F, *et al.* Plant and soil C, N, P stoichiometric characteristics in relation to micro-topography in the Hilly Loess Plateau region, China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, **31**(10): 1752-1763.
- [46] Yuan Y, Zhao Z Q, Niu S Y, *et al.* Reclamation promotes the succession of the soil and vegetation in opencast coal mine: a case

- study from *Robinia pseudoacacia* reclaimed forests, Pingshuo mine, China[J]. Catena, 2018, **165**: 72-79.
- [47] Huang Y M, Liu D, An S S. Effects of slope aspect on soil nitrogen and microbial properties in the Chinese Loess region[J]. Catena, 2015, **125**: 135-145.
- [48] 周志文, 潘剑君, 居为民, 等. 神农架不同坡位3种林型土壤碳氮比分布特征[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(4): 210-217.
Zhou Z W, Pan J J, Ju W M, *et al.* Distribution of soil C:N ratio in three forest types on different slope positions in Mt. Shennongjia, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(4): 210-217.
- [49] 李龙, 姚云峰, 秦富仓. 内蒙古赤峰梯田土壤有机碳含量分布特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(11): 2930-2935.
Li L, Yao Y F, Qin F C. Distribution and affecting factors of soil organic carbon of terraced fields in Chifeng, Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, **33**(11): 2930-2935.
- [50] 沈奕彤, 郭成久, 金珊, 等. 土壤容重对黑土坡面养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(1): 26-30.
Shen Y T, Guo C J, Jin S, *et al.* Effect of soil bulk density on nutrient loss of black soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(1): 26-30.
- [51] 张欣, 梁敬, 于铎, 等. 清水河流域山区坡面土壤养分分布特征[J]. 河北农业大学学报, 2017, **40**(6): 27-32, 38.
Zhang X, Liang J, Yu S, *et al.* Analysis of the distribution characteristics of soil nutrients of mountain slope in Qingshui river watershed[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2017, **40**(6): 27-32, 38.
- [52] 杜满义, 范少辉, 漆良华, 等. 不同类型毛竹林土壤碳、氮特征及其耦合关系[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(4): 198-202.
Du M Y, Fan S H, Qi L H, *et al.* Characteristics and coupling relationship of soil organic carbon and total nitrogen in different types of *Phyllostachys pubescens* stands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**(4): 198-202.
- [53] 谢柠枌, 王棋, 李冰, 等. 坡度和坡位对植烟坡地紫色土有机碳氮变化的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(9): 2245-2252.
Xie N Y, Wang Q, Li B, *et al.* Effects of gradients and positions on organic carbon and nitrogen of purple soil on tobacco planting slope[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, **30**(9): 2245-2252.
- [54] 刘延坤, 李云红, 陈瑶, 等. 坡位对不同密度长白落叶松人工林生态系统碳储量的影响[J]. 贵州农业科学, 2022, **50**(7): 133-140.
Liu Y K, Li Y H, Chen Y, *et al.* Effects of slope position on carbon storage of *Larix olgensis* plantation forest ecosystem with different stand density[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2022, **50**(7): 133-140.
- [55] Marschner P, Kandeler E, Marschner B. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35**(3): 453-461.
- [56] Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, *et al.* Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands[J]. Global Change Biology, 2008, **14**(7): 1592-1599.
- [57] 梁珂, 何丙辉. 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[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, **44**(10): 29-36.
Liang K, He B H. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics under typical land uses in purple soil area[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022, **44**(10): 29-36.
- [58] Chen S P, Wang W T, Xu W T, *et al.* Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, **115**(16): 4027-4032.
- [59] Celik I. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey[J]. Soil and Tillage Research, 2005, **83**(2): 270-277.
- [60] Han X Y, Gao G Y, Li Z S, *et al.* Effects of plantation age and precipitation gradient on soil carbon and nitrogen changes following afforestation in the Chinese Loess Plateau[J]. Land Degradation & Development, 2019, **30**(18): 2298-2310.
- [61] 熊杏, 熊清华, 郭熙, 等. 南方典型丘陵区耕地土壤全氮、有机碳和碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(9): 1656-1668.
Xiong X, Xiong Q H, Guo X, *et al.* Spatial variation characteristics of total nitrogen, organic carbon and ratio of carbon to nitrogen of cultivated land in typical hilly areas in south China and its influencing factors[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, **26**(9): 1656-1668.
- [62] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1407-1414.
Zhang C H, Wang Z M, Ju W M, *et al.* Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen Plain Maize Belt[J]. Environmental Science, 2011, **32**(5): 1407-1414.
- [63] 刘金山, 戴健, 刘洋, 等. 过量施氮对旱地土壤碳、氮及供氮能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(1): 112-120.
Liu J S, Dai J, Liu Y, *et al.* Effects of excessive nitrogen fertilization on soil organic carbon and nitrogen and nitrogen supply capacity in dryland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, **21**(1): 112-120.
- [64] Arevalo C B M, Bhatti J S, Chang S X, *et al.* Ecosystem carbon stocks and distribution under different land-uses in north central Alberta, Canada[J]. Forest Ecology and Management, 2009, **257**(8): 1776-1785.
- [65] Hu C J, Fu B J, Liu G H, *et al.* Vegetation patterns influence on soil microbial biomass and functional diversity in a hilly area of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, **10**(6): 1082-1091.

CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-rui, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Appointment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)