

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.9

第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)
郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析	郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)
济南市背景区域大气 PM _{2.5} 污染特征及其对能见度的影响	别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估	刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)
2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势	刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)
长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征	赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)
燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征	杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)
高速公路沿线 PM _{2.5} 中重金属污染特征	李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)
北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险	胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)
风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用	秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春荣 (3935)
京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)
成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱	周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)
工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估	孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)
典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析	王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)
不同方法制备 Co ₃ O ₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制	仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)
全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征	崔杰文, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)
江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞 (4000)
城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浞江为例	高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)
水华对沉积物中氮的转化和去除的影响	肖琳, 杨佳怡 (4018)
沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性	刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)
汾河下游雨季硝酸盐污染源解析	汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)
新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)
基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性	张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)
FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例	陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)
天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制	邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)
镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb ²⁺ 的去除	何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)
2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb ²⁺	晋圣兆, 向阳, 张隽瑀, 张凯, 吉庆华 (4091)
钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验	白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)
大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除	贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建峰 (4105)
A ² /O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化	荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)
上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能	杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)
微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析	张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)
基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验	张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)
聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比	易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)
厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学	唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)
Ca ²⁺ 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响	张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)
从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷	畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)
信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响	徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏清旋 (4177)
海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响	胡越航, 宣丽霞, 裴琼芬 (4185)
耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析	赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)
稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响	保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)
地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响	陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)
氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N ₂ O 排放的影响	吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)
三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N ₂ O) 分布和释放	程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)
沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响	朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)
新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征	丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)
不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响	杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)
基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法	张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)
缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征	罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)
西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响	田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)
调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析	彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)
海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源	陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)
《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)	

西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响

田静¹, 盛茂银^{1,2*}, 汪攀^{1,3}, 温培才³

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 国家喀斯特石漠化治理工程技术研究中心, 贵阳 550001; 3. 贵州省喀斯特石漠化防治与衍生产业工程实验室, 贵阳 550001)

摘要:以贵州关岭花江喀斯特峡谷原生林、灌木林、草地和坡耕地这4种典型土地利用方式下的凋落物-土壤为研究对象, 研究土地利用变化对西南喀斯特植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响及其驱动机制。结果表明, 4种不同土地利用方式的凋落物-土壤 C、N、P 含量和土壤酶活性存在显著差异。与其他区域相比, 凋落物和土壤分别具有高 C 低 N 高 P、低 C 低 N 高 P 的格局。脲酶、蔗糖酶和淀粉酶表现出原生林 > 灌木林 > 草地 > 坡耕地, 碱性磷酸酶则是原生林 > 灌木林 > 坡耕地 > 草地。未来的生态建设应重视原生林的保护。土壤养分受凋落物 C、N、P 及其计量比的显著影响, 但土壤酶活性与凋落物无显著联系。冗余分析表明, 土壤酶活性与土壤 TN、SWC、C:N 极显著相关($P < 0.01$), 与 pH 和 N:P 显著相关($P < 0.05$), 重要性大小依次为 $TN > SWC > C:N > pH > N:P$ 。

关键词:喀斯特; 土壤酶活性; 土壤养分; 凋落物; 土地利用

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-4278-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812221

Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China

TIAN Jing¹, SHENG Mao-yin^{1,2*}, WANG Pan^{1,3}, WEN Pei-cai³

(1. Institute of Karst Research, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. National Engineering Research Center for Karst Rocky Desertification Control, Guiyang 550001, China; 3. Guizhou Engineering Laboratory for Karst Rocky Desertification Control and Derivative Industry, Guiyang 550001, China)

Abstract: In this study, the litter and soil under four typical land use patterns of primary forest, shrub, grassland, and sloping land in Huajiang Karst Gorge in Guanling, Guizhou Province, were used to study the effects of land use change on the carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) stoichiometry characteristics of karst plant litter and soil as well as the effects on soil enzyme activities and their driving mechanism in Southwest China. The results showed significant differences in the litter-soil C, N, and P contents and soil enzyme activities among the four land use types. Compared with other regions, the litter and soil showed a pattern of high C, low N, high P and low C, low N, high P, respectively. Urease, sucrose, and amylase showed an order of primary forest > shrub forest > grassland > slope farmland, whereas alkaline phosphatase showed primary forest > shrub forest > slope farmland > grassland. The protection of primary forests should be considered in future ecological construction. The soil nutrients were significantly affected by litter C, N, P, and their ratios, although the soil enzyme activities were not significantly associated with the litter. Redundancy analysis showed that soil enzyme activity had extremely significant correlation with the soil total N (TN), water content (SWC), and C:N ratio ($P < 0.01$) and relatively significant correlation with pH and the N:P ratio ($P < 0.05$). The order of importance was shown to be $TN > SWC > C:N > pH > N:P$. The research results have significant value for the study of karst rocky desertification and karst ecosystem nutrient cycling.

Key words: karst; soil enzyme activity; soil nutrient; litter; land use pattern

我国西南喀斯特地区分布面积广大, 是世界上喀斯特面积分布最连片、形态最丰富的区域, 成土物质和植物生长条件先天不足使得该地区成土速率缓慢, 土层浅薄贫瘠, 生产力低下, 实际成土量也低于侵蚀量^[1,2], 整体生态环境脆弱敏感, 可承受灾变阈值弹性小, 易受不利因素干扰^[3]。随着全球经济社会受资源环境制约现象日益明显, 人地关系耦合视角下的生态脆弱性研究不断深入^[4], 喀斯特石漠化生态系统的平衡稳定与植被恢复重建的理论和实践得以丰富和发展, 但仍缺乏系统全面的科学理论维系现有成果^[5]。因此, 探讨不同土地利用的植

物凋落物-土壤养分变化与酶活性的关系有利于了解喀斯特区域资源环境现状、明确未来调控方向。

C、N、P 是植物的基本组成元素和生长的必需元素^[6], 其中, N 和 P 又是陆地生态系统植物生长

收稿日期: 2018-12-29; 修订日期: 2019-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(31660136); 贵州省科学技术基金重点项目(黔科合基础[2016]1414); 贵州省优秀青年科技人才支持计划项目(黔科合平台人才[2017]5638); 贵州省科技合作计划重点项目(黔科合 LH 字[2015]7779); 贵州省普通高等学校科技拔尖人才支持计划项目(黔教合 KY 字[2016]064)

作者简介: 田静(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为喀斯特生态建设与区域经济, E-mail: 1176410895@qq.com

* 通信作者, E-mail: shmoy@163.com

发育的限制因素^[7]，三者通过在生态系统中的迁移转化将植物与土壤紧密联系起来。凋落物既是将植物与土壤紧密联系的纽带，也是地球生态系统生物化学过程的参与者，其累积分解过程影响着土壤有机质分解、养分转化以及生物活性强度^[8]。土壤是生态系统中植物生长的基础，既接受来自凋落物的养分供给，又将养分输送给植物供其生长，其质量关系着生态功能的发挥^[9]。凋落物和土壤 C、N、P 之间的比值以计量定量的方式明确反映了营养物质分解、补给速率的快慢以及土壤质量状况等生态系统动态变化和能量平衡过程。而土壤酶是土壤生态系统的重要微量成分之一，在参与凋落物分解的过程中也催化驱动着土壤的发育成熟和能量流动等^[10]，能灵敏地反映不同土地利用方式下生物化学过程的方向和强度^[11]。目前喀斯特地区主要是进行植物、土壤和凋落物这 3 个因子 C、N、P 联系或土壤酶与土地利用方式单一关系的研究^[12~14]，缺乏凋落物-土壤养分与酶活性三者相互关系的研究，不利于进一步科学指导区域植被恢复。

本文以喀斯特高原峡谷——北盘江花江峡谷为研究区，探究了植物凋落物-土壤 C、N、P 养分计量

特征和土壤酶活性随土地利用方式转变的变化规律及其内在相关性，以期用定量的方式描述喀斯特高原生态系统现状，并用基础数据为植被的恢复重建提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省安顺市北盘江花江河段峡谷两岸 (25°39.40'N, 105°39.042'E)，海拔 450 ~ 1 450 m，河谷深切，地势起伏落差大，是典型的喀斯特高原峡谷区(图 1)。土壤类型主要为黄壤和黄色石灰土，区内年均降雨量达 1 100 mm，降雨量主要集中在 5 ~ 10 月，占全年总降雨的 83%，属南亚热带干热河谷气候，植被为亚热带常绿落叶针阔混交林，原生植被被破坏，现主要为次生植被。野生植被是以窄叶火棘 (*Pyracantha angustifolia*)、刺梨 (*Rosa roxbunghii*)、救军粮 (*Pyracantha fortuneana*) 和铁线莲 (*Clematis florida*) 等为主的藤、刺、灌丛，以及零星分布的青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*)、马尾松 (*Pinus massoniana*) 和光皮桦 (*Betula luminifera*) 为主的乔木林。

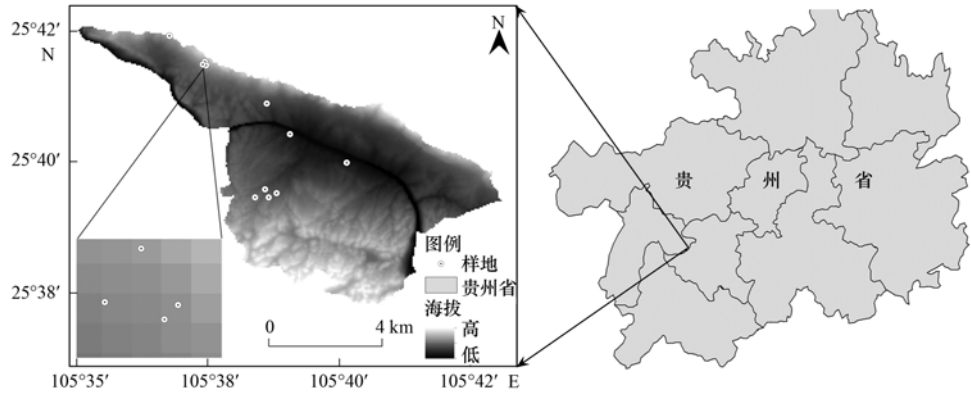


图 1 研究区及采样地分布
Fig. 1 Study area and distribution of sampling locations

1.2 样地设置与样品采集

于 2017 年 9 ~ 10 月在研究区选取同一区域自然条件大致相似背景下具有典型性和代表性的 4 种土地利用方式，进行样地设置与凋落物和土壤样品采集(表 1)。包括原生林以及由原生林逐步演替而来的灌木林、草地和坡耕地 4 种样地，每个样地面积为 20 m × 20 m，均重复设置 3 个，用梅花五点法设置 5 个 2 m × 2 m 样方，收集地表新鲜凋落物充分混匀后四分法取样放于自封袋中，带回实验室烘干后测定。同时，去除样方中表层苔藓、杂物等采集 0 ~ 10 cm 层土壤，自然风干后剔除石子、树根等研磨，一部分过 0.15 mm 筛用于 C、N、P 的测定，另一部分过 2 mm 筛用于土壤酶活性的测定。

表 1 样地土地利用方式和经纬度

Table 1 Land use patterns, longitude and latitude of sample plots			
样地	土地利用方式	经度	纬度
1	原生林	105°38'37.30"E	25°41'07.10"N
2	原生林	105°38'35.49"E	25°39'28.91"N
3	原生林	105°38'24.02"E	25°39'19.61"N
4	灌木林	105°40'08.85"E	25°39'59.19"N
5	灌木林	105°39'04.00"E	25°40'32.00"N
6	灌木林	105°38'48.56"E	25°39'24.36"N
7	草地	105°36'45.80"E	25°42'28.80"N
8	草地	105°37'28.85"E	25°41'51.47"N
9	草地	105°37'26.47"E	25°41'54.82"N
10	耕地	105°38'39.53"E	25°39'19.56"N
11	耕地	105°37'28.51"E	25°41'50.75"N
12	耕地	105°37'24.06"E	25°41'51.67"N

1.3 样品测定

凋落物:有机碳(SOC)采用重铬酸钾-外加热法^[15],全氮(TN)、全磷(TP)用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮后^[16],分别用凯氏定氮法和钼锑抗比色法测定。

土壤:有机碳(SOC)的测定采用重铬酸钾氧化-外加热法;全氮(TN)的测定采用凯氏定氮法;全磷(TP)的测定采用钼锑抗比色法,具体步骤可参见盛茂银等^[17]的方法。将样品在 105°C 下烘12 h后称重计算土壤水分含量。pH值由pH计直接测定。

土壤酶活性:参考关松荫等^[18]的测定方法,脲酶(Ure)采用苯酚钠-次氯酸钠比色法;蔗糖酶(Suc)和淀粉酶(Amy)均采用3,5-二硝基水杨酸比色法;碱性磷酸酶(ALP)采用磷酸苯二钠比色法。

1.4 数据分析

采用Excel 2016对实验数据进行初步的统计和分析。应用SPASS 21.0对凋落物、土壤C、N、P和酶活性数据进行均值和标准差计算。研究中的单因素方差分析(one-way ANOVA)、LSD多重比较、相关性分析等数理统计均由SPASS 21.0软件完成。利用CANOCO 4.5软件研究土壤酶活性的影响因素。

2 结果与分析

2.1 凋落物-土壤C、N、P化学计量特征与土壤酶活性对土地利用变化的响应

2.1.1 不同土地利用方式下凋落物C、N、P含量及其化学计量比差异性分析

由表2可知,不同土地利用方式下,凋落物

SOC平均含量为 $464.38 \sim 478.11 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,变化特征为草地>原生林>坡耕地>灌木林,但4种不同土地利用方式之间不具有显著差异。TN平均含量为 $7.35 \sim 9.20 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,变化特征为灌木林>坡耕地>原生林>草地,其中,灌木林与坡耕地、原生林、草地具有显著差异,但后三者之间无显著差异。而TP平均含量为 $0.96 \sim 1.83 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,变化特征为灌木林>坡耕地>草地>原生林,与TN的差异性特征基本相似。总体上来看,4种土地利用方式凋落物养分差异特征不尽相同,但林地相对坡耕地和草地有一定的优势。

4种土地利用方式凋落物C:N、C:P和N:P变化范围分别为 $65.31 \sim 50.50$ 、 $513.18 \sim 259.66$ 和 $8.27 \sim 5.14$ 。其中,草地C:N最大,与SOC含量特征一致,和原生林无显著差异,但二者显著高于灌木林。C:P和N:P差异性特征一致,均以原生林为最高,和灌木林比值差异显著,突出了原生林凋落物在有机质积累、分解和养分归还的优势。

2.1.2 不同土地利用方式下土壤C、N、P含量及其化学计量比差异性分析

如表2所示,土壤SOC平均含量为 $36.02 \sim 40.43 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,变化特征为原生林>灌木林>草地>坡耕地,但4种植被之间无显著差异,与凋落物SOC差异性特征一致。TN平均含量为 $2.49 \sim 5.62 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,原生林显著高于其他3种。而4种利用方式的TP平均含量与SOC一样无显著差异,以灌木林为最高。由此可知,林地为促进土壤养分积累方面同样在不同程度上优于坡耕地和草地,土壤C、

表2 不同土地利用方式下凋落物-土壤碳、氮、磷生态化学计量特征与土壤酶活性¹⁾

Table 2 Ecological stoichiometry of litter-soil C, N, and P with soil enzyme activities under different land use patterns

项目	指标	原生林	灌木林	草地	耕地
凋落物	dSOC/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$475.38 \pm 7.25\text{a}$	$464.38 \pm 13.39\text{a}$	$478.11 \pm 11.84\text{a}$	$469.26 \pm 16.89\text{a}$
	dTN/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$7.73 \pm 0.68\text{bc}$	$9.20 \pm 0.20\text{a}$	$7.35 \pm 0.48\text{bcd}$	$7.82 \pm 0.71\text{b}$
	dTP/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$0.96 \pm 0.23\text{bcd}$	$1.83 \pm 0.35\text{a}$	$0.97 \pm 0.05\text{bc}$	$1.24 \pm 0.08\text{b}$
	dC: dN	$61.91 \pm 6.57\text{a}$	$50.50 \pm 1.40\text{b}$	$65.31 \pm 5.50\text{a}$	$60.49 \pm 7.55\text{ab}$
	dC: dP	$513.18 \pm 113.36\text{a}$	$259.66 \pm 43.19\text{c}$	$494.03 \pm 34.10\text{ab}$	$377.92 \pm 11.65\text{bc}$
	dN: dP	$8.27 \pm 1.57\text{a}$	$5.14 \pm 0.89\text{c}$	$7.57 \pm 0.18\text{bab}$	$6.32 \pm 0.94\text{bc}$
	pH	$8.08 \pm 0.21\text{c}$	$8.09 \pm 0.29\text{bc}$	$8.27 \pm 0.08\text{abc}$	$8.45 \pm 0.06\text{a}$
土壤	SWC/%	$32.43 \pm 4.77\text{a}$	$26.86 \pm 0.44\text{bcd}$	$22.91 \pm 2.66\text{d}$	$25.78 \pm 2.18\text{cd}$
	SOC/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$40.43 \pm 8.23\text{a}$	$37.00 \pm 1.76\text{a}$	$36.22 \pm 1.38\text{a}$	$36.02 \pm 6.69\text{a}$
	TN/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$5.62 \pm 2.00\text{a}$	$2.59 \pm 0.02\text{bc}$	$3.03 \pm 1.13\text{b}$	$2.49 \pm 0.55\text{bd}$
	TP/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$1.00 \pm 0.29\text{a}$	$1.59 \pm 0.62\text{a}$	$0.91 \pm 0.16\text{a}$	$0.95 \pm 0.44\text{a}$
	C: N	$7.61 \pm 1.81\text{b}$	$14.30 \pm 0.62\text{a}$	$13.03 \pm 4.38\text{a}$	$14.61 \pm 1.54\text{a}$
	C: P	$41.16 \pm 3.98\text{a}$	$25.30 \pm 8.25\text{b}$	$40.71 \pm 7.77\text{a}$	$41.03 \pm 10.78\text{a}$
	N: P	$5.53 \pm 0.83\text{a}$	$1.79 \pm 0.66\text{bd}$	$3.26 \pm 0.63\text{b}$	$2.87 \pm 0.98\text{bc}$
酶活性	Ure/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$0.80 \pm 0.14\text{a}$	$0.59 \pm 0.08\text{ab}$	$0.56 \pm 0.20\text{ab}$	$0.47 \pm 0.06\text{b}$
	Suc/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$49.71 \pm 4.99\text{a}$	$27.47 \pm 5.20\text{bcd}$	$22.11 \pm 3.64\text{cd}$	$21.69 \pm 4.85\text{d}$
	ALP/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$12.80 \pm 3.10\text{a}$	$5.48 \pm 0.55\text{bcd}$	$2.84 \pm 0.87\text{d}$	$2.93 \pm 1.27\text{cd}$
	Amy/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$1.11 \pm 0.19\text{a}$	$0.79 \pm 0.16\text{b}$	$0.39 \pm 0.15\text{cd}$	$0.20 \pm 0.05\text{d}$

1) dSOC、dTN、dTP、dC: dN、dC: dP和dN: dP分别表示凋落物有机碳、全氮、全磷含量及其计量比; pH表示土壤pH值, SWC表示含水量; SOC、TN、TP、C: N、C: P和N: P分别表示土壤有机碳、全氮、全磷及其计量比; Ure表示脲酶, Suc表示蔗糖酶, ALP表示碱性磷酸酶, Amy表示淀粉酶

N、P 的生态化学计量比 C:N、C:P、N:P 在不同土地利用方式的变化范围分别为 14.61 ~ 7.61、41.16 ~ 25.30 和 5.53 ~ 1.79。其中，C:N 以坡耕地为最高，与原生林差异显著。C:P 和 N:P 均以原生林为最高，这与凋落物计量比特征一致，共同体现了原生林在维护生态环境上的重要作用，但与其他用地类型的差异两者表现不同。

2.1.3 不同土地利用方式下土壤酶活性差异性分析

研究区不同土地利用方式下土壤酶活性差异性如表 2 所示。不同酶活性受不同土地利用方式影响具有不同的差异性特征。脲酶活性整体较低，平均含量为 0.47 ~ 0.80 mg·g⁻¹，以原生林为最高，坡耕地最低，二者差异性显著，但均与灌木林地和草地无显著差异。蔗糖酶活性平均含量为 21.69 ~ 49.71 mg·g⁻¹，除平均含量最高的原生林外，其他 3 种类型酶活性之间差异均不显著。碱性磷酸酶活性则是原生林最高，草地最低，变化范围为 2.84 ~

12.80 mg·g⁻¹，与蔗糖酶差异性特征基本一致。淀粉酶活性同样在 0.20 ~ 1.11 mg·g⁻¹ 范围内以原生林为最高，除草地与坡耕地无显著差异外，彼此之间差异显著。从整体来看，不同土地利用方式下原生林酶活性最强，灌木林地次之，草地和坡耕地酶活性接近无明显差异。

2.2 凋落物-土壤生态化学计量特征及土壤酶活性的相关性分析

2.2.1 凋落物与土壤 C、N、P 及其化学计量比的相关性分析

由表 3 可知，凋落物 TP 与土壤 TP 显著正相关，与 C:P 和 N:P 分别呈显著负相关和极显著负相关；凋落物 C:P 与土壤 TN 显著正相关，与 C:N 和 N:P 分别呈显著负相关和极显著正相关；凋落物 N:P 与土壤 TN 显著正相关，与 C:N 和 C:P 分别呈显著负相关和显著正相关，与 N:P 则极显著正相关。表明凋落物 P 素与土壤之间 N、P 素密切相关，相互作用。

表 3 凋落物与土壤碳、氮、磷含量及其化学计量比的相关性分析¹⁾
Table 3 Correlation analysis of C, N, and P contents and stoichiometry ratio for litter and soil

项目	指标	土壤						酶			
		SOC	TN	TP	C:N	C:P	N:P	Ure	Suc	ALP	Amy
凋落物	dSOC	0.246	0.269	0.131	-0.150	-0.148	0.104	0.153	0.181	0.230	0.052
	dTN	-0.333	-0.412	0.332	0.322	-0.336	-0.431	-0.223	-0.129	-0.134	0.164
	dTP	-0.182	-0.534	0.695 *	0.534	-0.706 *	-0.775 **	-0.298	-0.245	-0.254	0.037
	dC: dN	0.369	0.410	-0.195	-0.300	0.192	0.352	0.245	0.147	0.165	-0.107
	dC: dP	0.338	0.704 *	-0.472	-0.654 *	0.517	0.815 **	0.485	0.381	0.423	0.169
	dN: dP	0.218	0.676 *	-0.574	-0.676 *	0.630 *	0.890 **	0.460	0.399	0.438	0.222
土壤	SOC							0.540	0.558	0.598 *	0.481
	TN							0.910 **	0.765 **	0.882 **	0.743 **
	TP							0.240	0.119	0.168	0.373
	C:N							-0.910 **	-0.664 *	-0.786 **	-0.714 **
	C:P							-0.208	0.024	-0.082	-0.298
	N:P							0.666 *	0.645 *	0.693 *	0.491

1) * 表示显著相关(P<0.05)，** 表示极显著相关(P<0.01)

2.2.2 土壤 C、N、P 及其化学计量比与土壤酶的相关性分析

土壤 SOC 仅与碱性磷酸酶显著正相关；土壤 TN 与脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和淀粉酶均极显著正相关；土壤 C:N 与脲酶、碱性磷酸酶和淀粉酶极显著负相关，与蔗糖酶显著负相关；土壤 N:P 与脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶显著正相关。表明土壤 N 素与 4 种酶活性密切相关，相互作用。

2.2.3 凋落物 C、N、P 及其化学计量比与土壤酶的相关性分析

表 3 表明凋落物 C、N、P 及其化学计量比与 4 种土壤酶活性均无显著相关关系。这可能是由于采集的凋落物样品为新鲜凋落叶，尚未分解参与土

壤养分循环。今后，可在凋落物分解过程与土壤酶活性的联系方面做进一步研究。

2.3 影响土壤酶活性的土壤环境因子分析

由上述分析结果可知，仅有土壤 C、N、P 及其计量比与土壤酶活性有显著关系。因此，对土壤酶活性与土壤环境因子在 Canoco 4.5 中做进一步分析。

2.3.1 土壤酶活性与环境因子 RDA 排序

表 4 所示，土壤 SWC、pH 和 SOC、TN 和 TP 等 8 个环境因子对 4 种酶活性的差异性解释量如下。4 种土壤酶活性在第 I 轴、第 II 轴的解释量分别为 82.7% 和 3.1%，即在 RDA 前两个排序轴 8 种土壤环境因子累计解释了土壤酶活性特征的 85.8%，且

表 4 土壤酶活性特征值与解释量的 RDA 排序分析

Table 4 RDA sequencing analysis of soil enzyme activity eigenvalues and interpretations

排序轴	第 I 轴	第 II 轴	第 III 轴	第 IV 轴
土壤酶活性特征解释量/%	82.7	3.1	1.8	0.3
土壤酶活特征与环境因子相关性	0.941	0.842	0.979	0.869
土壤酶活性特征累计解释量/%	82.7	85.8	87.6	87.9
土壤酶活性特征-环境因子关系累计解释量/%	94.1	97.6	99.6	100.0
典范特征值			0.879	
总特征值			1.000	

对两者关系的累计解释量达 97.6%。由此知前两轴能很好地反映土壤酶活性与环境因子的关系，且主要是由第 I 轴决定。

从 RDA 二维排序可以看出(图 2)，土壤 TN、SWC 和 C:N 的箭头连线最长，这说明土壤 TN、SWC 和 C:N 这 3 个因子能对这 4 种土壤酶活性的变化差异起到很好地解释作用，且与表 5 的重要性排序结果一致。其中，TN 与 AIP、SWC 与 Suc 箭头方向一致且夹角很小，表现为正相关关系，说明 TN 对碱性磷酸酶活性具有显著的正效应，是影响喀斯特地区碱性磷酸酶活性的主导因子，SWC 是影响蔗糖酶活性的重要因素。C:N 与 4 种酶活性则具有负相关关系，Amy 和 Ure 与 TN、SWC 均具有正相关关系，但相关性都不大，说明淀粉酶与脲酶活性受多个环境因子的叠加影响；其余因子中 pH 与 4 种酶活性表现为负相关，N:P 则与之为正相关。

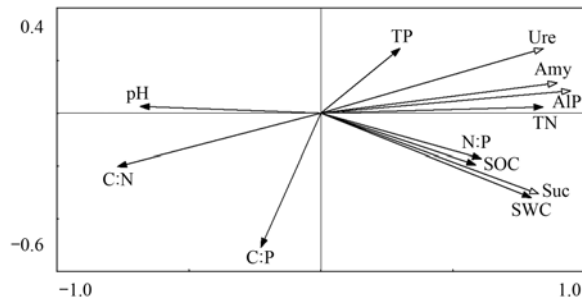


图 2 土壤酶活性与理化因子的冗余分析

Fig. 2 Biplot of the first two axes of the redundancy analysis for soil physicochemical factors and enzymatic activities

2.3.2 8 种环境因子对土壤酶活性的重要性排序

8 种不同环境因子对土壤酶活性影响不同。对 8 个土壤环境因子进行蒙特卡洛检验排序，结果如表 5 所示，不同环境因子的影响重要性依次为 TN > SWC > C:N > pH > N:P > SOC > TP > C:P。其中，土壤 TN、SWC 与 C:N 对土壤酶活性的影响达到极显著水平($P < 0.01$)，对酶活性大小差异性的解释量分别为 58.6%、53.0% 和 49.3%，而 pH 和 N:P 对酶活性的影响达到显著水平($P < 0.05$)，对酶活性差异性的解释量分别为 39.1% 和 30.8%，说明土壤养分氮及与其相关的生态化学计量比相比其他养分元素更能较好地呈现酶活性的差异性。

表 5 土壤理化因子解释的重要性排序和显著性检验结果

Table 5 Importance ranking and significance test results of soil physicochemical factor interpretation

环境因子	重要性排序	解释量/%	重要性(F)	显著性(P)
TN	1	58.6	14.156	0.006
SWC	2	53.0	11.264	0.008
C:N	3	49.3	9.718	0.008
pH	4	39.1	6.408	0.020
N:P	5	30.8	4.461	0.050
SOC	6	28.7	4.021	0.066
TP	7	7.7	0.839	0.404
C:P	8	5.1	0.542	0.500

2.3.3 单一环境因子对土壤酶活性的影响

将对土壤酶活性有影响的前 5 个因子在 CANOCO 4.5 中利用 t -value 双序图进一步做单一环境因子影响分析。对 TN 的分析如图 3(a) 所示，脲酶全部落在虚线圈内，表明脲酶与 TN 具有显著负相关关系，淀粉酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶均穿过虚线圈，表明 TN 与淀粉酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶有负相关关系。对 SWC 的分析如图 3(b) 所示，脲酶和淀粉酶完全落在实线圈内，表明 SWC 与脲酶和淀粉酶具有显著正相关关系，碱性磷酸酶和蔗糖酶均穿过实线圈，表明 SWC 与碱性磷酸酶和蔗糖酶有正相关关系。而对 C:N 的分析如图 3(c) 所示脲酶完全落在虚线圈中，表明 C:N 与脲酶具有显著负相关关系，淀粉酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶穿过虚线圈，表明 C:N 与淀粉酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶有负相关关系。对 pH 和 N:P 的分析如图 3(d) 和 3(e) 所示，4 种酶均没有完全落在实线圈或虚线圈，表明这两个因子与 4 种酶均无显著关系，其中，对 pH 的分析显示淀粉酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶穿过虚线圈，与 pH 具有负相关关系，而对 N:P 的分析显示，脲酶、淀粉酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶均穿过实线圈，4 种酶与 N:P 均有正相关关系。

3 讨论

3.1 西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响

3.1.1 土地利用变化对植物凋落物 C、N、P 的影响
植物凋落物经过衰老-死亡-分解-回归改善了土

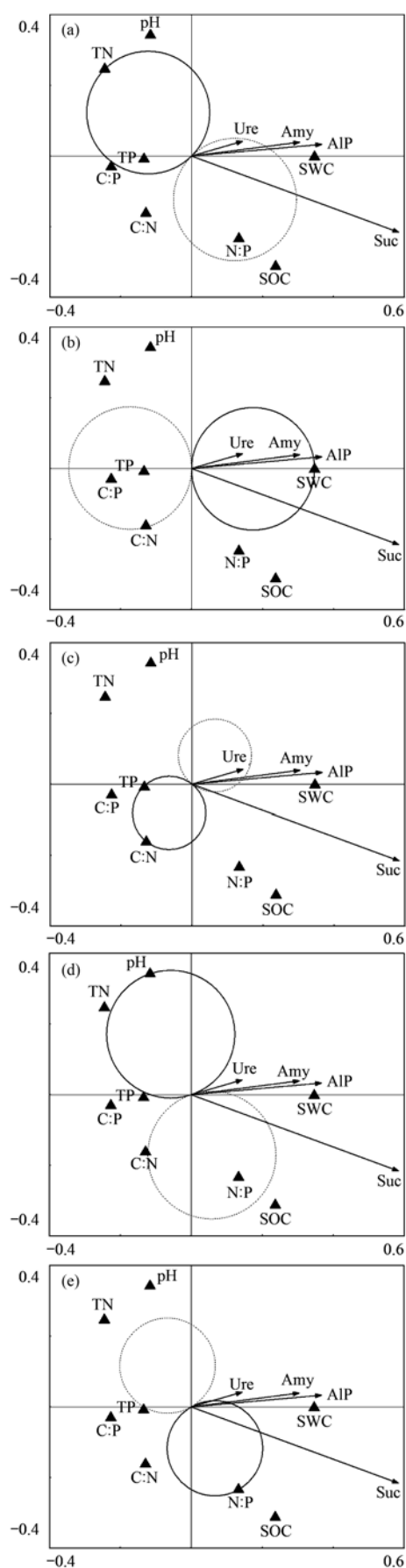


图3 单一因子对土壤酶活性特征影响的检验结果

Fig. 3 The t -value for a single factor influencing the varied characteristics of soil enzyme activities

壤结构、减少了土壤侵蚀、增加了土壤养分,将植物与土壤之间营养元素的吸收释放紧密联系,也影响着整个陆地生态系统养分和能量的流动^[19]. 本研究所在的花江峡谷区不同土地利用方式下调落物 SOC、TN 与 TP 的平均含量分别为 471.78、8.03 和 1.25 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中, SOC 显著高于同属喀斯特地貌的毕节撒拉溪喀斯特高原 5 种不同配置的水源涵养林凋落物 SOC (407.09 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[12] 和桂西北 2 种喀斯特林地凋落物 SOC (396.2 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[13]. TN 则明显低于喀斯特其他地区的均值 (16.07 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[12]、(12.7 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[13] 和 (16.89 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[20], 而 TP 略高于北热带弄岗喀斯特森林 (0.62 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[20] 和桂西北喀斯特林地 (0.9 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[13] 凋落物 TP 均值. 表明研究区凋落物具有高 C 低 N 高 P 的格局. 这可能受采集样品的新鲜程度、植物本身特性以及生长环境等的影响.

一般来说, C、N、P 计量比既能直接指示凋落物 N、P 分解效率, 也能间接表示养分归还土壤速率^[21]. 本研究中, 4 种土地利用方式均表现出 $\text{C}:\text{P} > \text{C}:\text{N} > \text{N}:\text{P}$, 且差距大, 表明研究区整体上植物 P 素较缺乏. 其中 $\text{N}:\text{P}$ 也均低于喀斯特高原 5 种水源涵养林 (8.38)^[12]、鄱阳湖乔灌草 (9.3)^[22] 以及陕西乔灌草 (15.46)^[23] 平均比值, 以原生林最高. 表明花江地区凋落物分解速率快, 不利于土壤养分存储, 但在植被演替过程中原生林更有利于保持水土和归还养分, 未来的发展中应注意保护现有原生林植被.

3.1.2 土地利用变化对土壤 C、N、P 的影响

土壤作为植物生长的基础, 其养分是影响植物生长状况的重要因素, 通过根系的养分吸收将植物和土壤系统的功能紧密联系起来, 共同作用于植物生产力与生态系统的物质循环与能量流动^[24,25]. 本研究中, 0~10 cm 土层土壤 C、N、P 平均含量分别为 37.42、3.43 和 1.11 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, SOC 和 TN 均略低于广西环江喀斯特峰丛洼地 3 种林地 SOC (38.17 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、TN (4.17 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), 高于 TP (0.64 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[26]. 但 3 种元素除 SOC 外, TN、TP 基本是喀斯特高原水源涵养林 0~20 cm 处均值 (25.02、1.56 和 0.33 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[12] 的 2 倍, 且均低于桂西北 6 种喀斯特森林建群种下同土层的均值 (92.0、6.4 和 1.5 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[13]. 整体上喀斯特地区 C、N、P 均高于非喀斯特地区鄱阳湖同土层元素平均含量 (6.8、0.4 和 0.5 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[22], 和黄土丘陵区不同森林类型的平均含量 (6.26、0.59 和 0.53 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[27]. 这表明, 研究区土壤具有低 C 低 N 高 P 的格局, 除 SOC 可能受新鲜凋落物分解不足影响

含量较低外, TN 和 TP 具有和凋落物一致的特征。

土壤 C、N、P 化学计量比是表述土壤养分平衡、矿化和固持作用的重要参数^[28], 可以反映土壤养分组成及质量状况的主要指标^[29]。本研究中, 土壤 C:N 的变化范围为 14.61 ~ 7.61, 原生林 C:N (7.61) 低于其他地区^[22,27], 而土壤 C:P 和 N:P 均以原生林为最高, 分别为 41.16 和 5.53, 但 4 种土地利用方式下土壤 P 素含量无显著差异。表明花江峡谷区原生林土壤有机质和有效 N 分解释放快, 有利于土壤养分循环, 改善土壤质量, 但区域土壤在有机质分解过程中受 P 素限制, 与王璐等^[30]和张亚冰等^[31]的研究基本一致。

3.1.3 土地利用变化对土壤酶活性的影响

土壤酶活性受植物根系、凋落物和微生物的分泌、数量以及残体分解、人为作用等的影响。不同的土地利用方式以最直接、最快速的人为干预的方式改变了土壤外部水热条件、养分来源和内部结构、营养循环等, 影响地球生态系统生物化学循环过程^[32,33]。本研究中, 4 种水解酶活性均以原生林地最高, 且脲酶、蔗糖酶和淀粉酶与坡耕地具有显著差异, 表现为原生林 > 灌木林 > 草地 > 坡耕地, 而碱性磷酸酶则表现为原生林 > 灌木林 > 坡耕地 > 草地, 这可能是由于采样时耕地已收割, 基本无植物生长, 土壤紧实, 通气性差, 可为酶活性提供的基质少, 或者长期的单一耕种方式, 使土地质量退化, 造成坡耕地整体酶活性较低。本研究结果表明, 林地相比草地、坡耕地而言可能由于根系更为发达、凋落物丰富、微生物数量多、活动强度大, 有利于形成良好的土壤环境状况, 促进养分的积累与循环代谢, 增强酶活性。这与徐广平等^[14]在广西平果、宁沐蕾等^[34]在崇明岛和胡尧等^[32]在岷江流域的研究结果基本一致。由此可见, 喀斯特地区在植被恢复过程中, 人为的干扰会在一定程度上影响土壤质量, 但林地更具有保持水土、提高土壤酶活性的作用, 在保护现有林地的基础上植树造林可以作为该区进行植被恢复与重建的一项重要措施。

3.2 西南喀斯特土地利用变化对凋落物-土壤 C、N、P 养分和酶活性变化的驱动机制

3.2.1 土地利用变化对凋落物-土壤 C、N、P 养分变化的驱动机制

本研究结果表明, 尽管不同土地利用方式下的凋落物、土壤 SOC 之间无显著差异, 但二者之间无直接关系, 表明这 4 种土地利用方式对研究区 C 循环影响不大。凋落物 TP 与土壤 TP、C:P 和 N:P 显著相关, 表明凋落物 TP 是土壤 P 素的直接来源, 且受其分解速率的影响较大。而土壤 TN、C:P、C:

N 和 N:P 与凋落物 C:P 和 N:P 显著相关, 表明土壤 N 素及其 N、P 的分解速率主要受凋落物有效 N、P 分解速率的影响。

3.2.2 土地利用变化对土壤酶活性变化的驱动机制

土壤酶活性是参与地球生态系统物质循环与能量流动的最活跃的生物因素^[35], 既是土壤养分代谢循环的参与者, 也是土壤理化因子作用结果的呈现者和土壤质量的评价者。本研究中土壤 TN、SWC、C:N、pH 和 N:P 是影响 4 种酶活性的重要因子。自然降雨或人为灌溉增加适量的水分可以使土壤的透气性和氧气含量降低, 厌氧微生物活动增强, 从而使得 C、N、P 等养分得以滞留积累, 酶活性得到提高, 最直接的表现通常为情况下, 雨季时酶活性大于干季, 且酶活性可以作为反映干旱不利影响的一项敏感指标^[36-38]。靳振江等^[39]对喀斯特溶洞湿地的研究表明蔗糖酶、碱性磷酸酶和归一化酶的活性与含水量具有显著正相关关系, 与本研究的结果基本一致。土壤 pH 在影响土壤有机质的分解矿化、胶体的聚散、氧化还原等过程的同时, 也参与着土壤酶的生化反应^[11]。不同种类的酶活性最适的 pH 范围不同, 本研究中, pH 均超过 8.0, 偏碱性, 与 4 种酶活性具有负相关关系, 因此可以认为 pH 是抑制酶活性的重要因素。土壤 C、N、P 作为土壤中的重要元素, 可以改变土壤的透气性、温度以及土壤结构, 为植物生长输送养分, 同时影响土壤微生物活性与强度, 与土壤酶活性密切相关。土壤 C:N 值越高表明有机质分解速率快, 有机碳的积累与矿化程度高^[40], 本研究中, TN 和 C:N 与脲酶极显著相关, 与蔗糖酶、淀粉酶和碱性磷酸酶有相关关系, N:P 则与 4 种酶都相关, 表明有机质分解、N 的输送和有效 N、P 的释放影响酶活性, 特别是脲酶, 与许亚东^[41]和王涛等^[42]的研究结果相近。

4 结论

(1) 凋落物与土壤 C、N、P 含量及其计量比存在显著差异。与其他地区相比, 研究区凋落物和土壤分别具有高 C 低 N 高 P、低 C 低 N 高 P 的格局, 原生林更有利于土壤养分循环。

(2) 4 种酶活性在不同土地利用方式下存在差异, 脲酶、蔗糖酶和淀粉酶表现出原生林 > 灌木林 > 草地 > 坡耕地, 碱性磷酸酶则是原生林 > 灌木林 > 坡耕地 > 草地, 但均以原生林最高。未来的生态环境建设应重视林地的保护, 特别是原生林。

(3) 土壤养分受凋落物养分及分解转化速率的影响, 但土壤酶与凋落物无显著联系。进一步地究

余分析表明, 土壤酶活性与土壤 TN、SWC、C:N 极显著相关($P < 0.01$), 与 pH 和 N:P 显著相关($P < 0.05$), 重要性大小依次为 $TN > SWC > C:N > pH > N:P$.

参考文献:

- [1] 钱庆欢, 王世杰, 白晓永, 等. 基于允许流失量和正负地形源汇理论的喀斯特关键带土壤侵蚀研究[J]. 地理学报, 2018, **73**(11): 2135-2149.
Qian Q H, Wang S J, Bai X Y, *et al.* Assessment of soil erosion in karst critical zone based on soil loss tolerance and source-sink theory of positive and negative terrains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(11): 2135-2149.
- [2] 盛茂银, 刘洋, 熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J]. 生态学报, 2013, **33**(19): 6303-6313.
Sheng M Y, Liu Y, Xiong K N. Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(19): 6303-6313.
- [3] 安显金, 李维. 基于 WOS 数据库和 CSCD 的全球喀斯特研究动态[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2018, **36**(3): 14-22.
An X J, Li W. Development trends of global karst research based on WOS and CSCD[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2018, **36**(3): 14-22.
- [4] 杨庆媛, 毕国华, 陈展图, 等. 喀斯特生态脆弱区休耕地的空间配置研究——以贵州省晴隆县为例[J]. 地理学报, 2018, **73**(11): 2250-2266.
Yang Q Y, Bi G H, Chen Z T, *et al.* Spatial allocation of fallow land in karst rocky desertification areas: A case study in Qinglong County, Guizhou Province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(11): 2250-2266.
- [5] Sheng M Y, Xiong K N, Wang L J, *et al.* Response of soil physical and chemical properties to Rocky desertification succession in South China Karst[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2018, **33**(1): 15-28.
- [6] Hessen D O, Ågren G I, Anderson T R, *et al.* Carbon sequestration in ecosystems: The role of stoichiometry [J]. *Ecology*, 2004, **85**(5): 1179-1192.
- [7] Han W X, Fang J Y, Guo D L, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, **168**(2): 377-385.
- [8] Hättenschwiler S, Tiunov A V, Scheu S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2005, **36**: 191-218.
- [9] 黄先飞, 洪江, 张家春. 喀斯特小流域土壤质量特征研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2018, **36**(4): 18-22.
Huang X F, Hong J, Zhang J C. Research on soil quality of small watershed in Karst area[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2018, **36**(4): 18-22.
- [10] 方瑛, 马任甜, 安韶山, 等. 黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1121-1127.
Fang Y, Ma R T, An S S, *et al.* Heidaigou opencast coal mine: Soil enzyme activities and soil physical and chemical properties under different vegetation restoration [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 1121-1127.
- [11] 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 等. 滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1404-1412.
Xie X F, Pu L J, Wang Q Q, *et al.* Response of soil enzyme activities and their relationships with physicochemical properties to different aged coastal reclamation areas, Eastern China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1404-1412.
- [12] 秦仕忆, 喻阳华, 邢容容, 等. 喀斯特高原山地区水源涵养林土壤及凋落物的生态化学计量特征[J]. 林业资源管理, 2017, (5): 66-73.
Qin S Y, Yu Y H, Xing R R, *et al.* Stoichiometric characteristics of litter and soils in water conservation forests of karst plateau mountainous region [J]. *Forest Resources Management*, 2017, (5): 66-73.
- [13] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, **39**(7): 682-693.
Zeng Z X, Wang K L, Liu X L, *et al.* Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in karst plant communities of Northwest Guangxi[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, **39**(7): 682-693.
- [14] 徐广平, 顾大彤, 潘复静, 等. 不同土地利用方式对桂西南岩溶山地土壤酶活性的影响[J]. 广西植物, 2014, **34**(4): 460-466.
Xu G P, Gu D X, Pan F J, *et al.* Effects of different land-use types on soil enzyme activity in karst mountain areas of Southwest Guangxi[J]. *Guihaia*, 2014, **34**(4): 460-466.
- [15] 杨慧, 李青芳, 涂春艳, 等. 桂林毛村岩溶区典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 广西植物, 2015, **35**(4): 493-499, 556.
Yang H, Li Q F, Tu C Y, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of typical plants in karst area of Maocun, Guilin[J]. *Guihaia*, 2015, **35**(4): 493-499, 556.
- [16] Zheng S X, Shangguan Z P. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China[J]. *Trees*, 2007, **21**(3): 357-370.
- [17] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 等. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报, 2015, **35**(2): 434-448.
Sheng M Y, Xiong K N, Cui G Y, *et al.* Plant diversity and soil physical-chemical properties in karst rocky desertification ecosystem of Guizhou, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(2): 434-448.
- [18] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [19] Zhang Z S, Song X L, Lu X G, *et al.* Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in estuarine wetland soils: influences of vegetation coverage, plant communities, geomorphology, and seawalls [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, **13**(6): 1043-1051.
- [20] 郭屹立, 李冬兴, 王斌, 等. 北热带喀斯特季节性雨林土壤和 6 个常见树种凋落物的 C、N、P 化学计量学特征[J]. 生物多样性, 2017, **25**(10): 1085-1094.
Guo Y L, Li D X, Wang B, *et al.* C, N and P stoichiometric characteristics of soil and litter fall for six common tree species in a northern tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China[J]. *Biodiversity Science*, 2017, **25**(10): 1085-1094.
- [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**(1-3): 139-151.
- [22] 陆远鸿, 曹昀, 许令明, 等. 鄱阳湖沙化土地植物-凋落物-土

- 壤化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, **38**(2): 329-335.
- Lu Y H, Cao Y, Xu L M, *et al.* Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in desertification area of Poyang Lake[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(2): 329-335.
- [23] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明. 陕西省森林群落乔灌木叶片和凋落物 C、N、P 生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(2): 365-372.
- Jiang P P, Cao Y, Chen Y M. C, N, P stoichiometric characteristics of tree, shrub, herb leaves and litter in forest community of Shaanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(2): 365-372.
- [24] 宾振钧, 王静静, 张文鹏, 等. 氮肥添加对青藏高原高寒草甸 6 个群落优势种生态化学计量学特征的影响[J]. 植物生态学报, 2014, **38**(3): 231-237.
- Bin Z J, Wang J J, Zhang W P, *et al.* Effects of N addition on ecological stoichiometric characteristics in six dominant plant species of alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, **38**(3): 231-237.
- [25] Parseval H, Abbadie L, Barot S, *et al.* Explore less to control more: why and when should plants limit the horizontal exploration of soil by their roots[J]. Oikos, 2016, **125**(8): 1110-1120.
- [26] 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.
- Yu Y F, Peng W X, Song T Q, *et al.* Stoichiometric characteristics of plant and soil C, N and P in different forest types in depressions between karst hills, southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(4): 947-954.
- [27] 张萍, 章广琦, 赵一娉, 等. 黄土丘陵区不同森林类型叶片-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, **38**(14): 5087-5098.
- Zhang P, Zhang G Q, Zhao Y P, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of leaf-litter-soil interactions in different forest types in the loess hilly-gully region of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(14): 5087-5098.
- [28] 高丽倩, 赵允格, 许明祥, 等. 生物土壤结皮演替对土壤生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2018, **38**(2): 678-688.
- Gao L Q, Zhao Y G, Xu M X, *et al.* The effects of biological soil crust succession on soil ecological stoichiometry characteristics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(2): 678-688.
- [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] 王璐, 喻阳华, 邢容容, 等. 喀斯特高原山地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.
- Wang L, Yu Y H, Xing R R, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of soils from main plantations in karst plateau mountainous area[J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, **48**(8): 1388-1394.
- [31] 张亚冰, 吕文强, 周传艳, 等. 贵州月亮山 5 个优势树种叶片与土壤生态化学计量特征[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(5): 182-188.
- Zhang Y B, Lu W Q, Zhou C Y, *et al.* Stoichiometry characteristics of leaves and soils of five dominant tree species in YueLiang Mountain of Guizhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, **24**(5): 182-188.
- [32] 胡尧, 李懿, 侯雨乐. 岷江流域不同土地利用方式对土壤有机碳组分及酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(9): 1617-1624.
- Hu Y, Li Y, Hou Y L. The variation of soil organic carbon fractions and soil enzyme activity of different land use types in Minjiang river valley [J]. Ecology and Environment Sciences, 2018, **27**(9): 1617-1624.
- [33] 朱美玲, 贡璐, 张龙龙. 塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2678-2685.
- Zhu M L, Gong L, Zhang L L. Soil enzyme activities and their relationships to environmental factors in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2678-2685.
- [34] 宁沐蕾, 高唤唤, 黄天颖, 等. 崇明岛土地利用方式对土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2017, **36**(7): 1949-1956.
- Ning M L, Gao H H, Huang T Y, *et al.* Effects of land use patterns on soil enzyme activity in Chongming Island [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, **36**(7): 1949-1956.
- [35] 贾曼莉, 郭宏, 李会科. 渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2777-2784.
- Jia M L, Guo H, Li H K. Mineralization of soil organic carbon and its relationship with soil enzyme activities in apple orchard in Weibei [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2777-2784.
- [36] 范方喜, 陆梅, 彭淑娟. 高原湿地纳帕海不同演替阶段下土壤养分和酶活性干湿季节变化[J]. 广东农业科学, 2016, **43**(8): 74-79.
- Fan F X, Lu M, Peng S X. Seasonal pattern of soil nutrients and enzymes activities at different successional stages of plateau wetland in Napahai [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, **43**(8): 74-79.
- [37] Verhoeven J T A, Arheimer B, Yin C Q, *et al.* Regional and global concerns over wetlands and water quality[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2006, **21**(2): 96-103.
- [38] Sardans J, Peñuelas J. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(3): 455-461.
- [39] 靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 等. 起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 335-341.
- Jin Z J, Zeng H H, Li Q, *et al.* Comparisons of microbial numbers, biomasses and soil enzyme activities between paddy field and dryland origins in Karst Cave wetland [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 335-341.
- [40] 窦晶鑫, 刘景双, 王洋, 等. 三江平原草甸湿地土壤有机碳矿化对 C/N 的响应[J]. 地理科学, 2009, **29**(5): 773-778.
- Dou J X, Liu J S, Wang Y, *et al.* Effects of amendment C/N ratio on soil organic carbon mineralization of meadow marshes in Sanjiang Plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, **29**(5): 773-778.
- [41] 许亚东, 王涛, 李慧, 等. 黄土丘陵区人工柠条林土壤酶活性与养分变化特征[J]. 草地学报, 2018, **26**(2): 363-370.
- Xu Y D, Wang T, Li H, *et al.* Variation characteristics of soil enzyme activities and nutrient of the artificial *Caragana korshinskii* plantation in loess hilly region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, **26**(2): 363-370.
- [42] 王涛, 马宇丹, 许亚东, 等. 退耕刺槐林土壤养分与酶活性关系[J]. 生态学报, 2018, **37**(7): 2083-2091.
- Wang T, Ma Y D, Xu Y D, *et al.* Relationship between soil nutrients and enzyme activity in *Robinia pseudoacacia* plantation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(7): 2083-2091.

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China	 CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province	 SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City	 GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal	 XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons	 ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jian-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process	 ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment: A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals	 DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China	 TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)