

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征

薛悦^{1,2}, 康海斌¹, 杨航¹, 冰德叶¹, 晁志¹, 张凯¹, 王得祥^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 2. 国家林业和草原局黄土高原林木培育重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 明确撂荒地植被恢复过程中土壤微生物养分限制特征及其驱动机制对揭示土壤养分循环和维持生态系统稳定具有重要意义. 以秦岭中段不同年限撂荒地为研究对象, 通过测定土壤理化性质、5种胞外酶活性[β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)、纤维二糖水解酶(CBH)、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)和酸性磷酸酶(AP)], 运用胞外酶化学计量学模型, 探讨撂荒地植被恢复过程中的土壤微生物养分限制状况及其与土壤性质之间的关系. 结果表明, 耕地撂荒显著增加了BG、CBH、NAG、LAP和AP的活性; 随撂荒年限增加, (BG + CBH)/(NAG + LAP)和(BG + CBH)/AP显著降低, 而(NAG + LAP)/AP则相反, 相关性分析表明大多数土壤性质与胞外酶活性及其计量比显著相关. 酶化学计量向量长度随撂荒年限的增加而减小, 表明土壤微生物受碳(C)限制减缓, 向量角度均大于45°且呈现降低趋势, 表明微生物受到磷(P)限制且逐渐减轻. 回归分析表明土壤C和P限制与土壤全量养分、速效养分、养分计量比和物理性质显著相关. 偏最小二乘路径模型结果显示, 养分计量比是微生物C和P限制的主要驱动因素. 综上所述, 秦岭植被恢复过程中微生物代谢特征反映了微生物参与下的土壤养分循环机制, 为揭示该地区植被恢复过程中群落动态及稳定性, 维持区域生态环境安全提供了理论依据.

关键词: 撂荒地; 酶化学计量; 微生物养分限制; 植被恢复; 秦岭

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0550-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105287

Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China

XUE Yue^{1,2}, KANG Hai-bin¹, YANG Hang¹, BING De-ye¹, CHAO Zhi¹, ZHANG Kai¹, WANG De-xiang^{1,2*}

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Forest Cultivation on the Loess Plateau, State Forestry and Grassland Administration, Yangling 712100, China)

Abstract: Clarifying the characteristics of soil microbial nutrient limitation and its driving mechanisms during vegetation restoration after farmland abandonment has important implications for revealing soil nutrient cycling and maintaining ecosystem stability. To determine the limitation of soil microbial nutrients and its relationship with soil properties along a chronosequence of abandoned farmland in the middle of the Qinling Mountains, the soil physicochemical properties and five enzyme activities (β -1,4-glucosidase (BG), cellobiohydrolase (CBH), β -1,4-N-acetylglucosaminidase (NAG), leucine aminopeptidase (LAP), and acid phosphatase (AP)) were measured, and models of extracellular enzymatic activity were applied. The results showed that the activities of BG, CBH, NAG, LAP, and AP were significantly increased following farmland abandonment. With the increasing years of abandonment, the ratios of (BG + CBH)/(NAG + LAP) and (BG + CBH)/AP significantly decreased, whereas the ratio of (NAG + LAP)/AP increased. Correlation analysis showed that most soil physicochemical properties were significantly correlated with extracellular enzyme activities and extracellular enzymatic stoichiometry. The vector length of extracellular enzymatic stoichiometry decreased with the increase in abandonment years, indicating that the limitation of soil microorganisms on carbon (C) was reduced. Moreover, the vector angles ($>45^\circ$) showed a decreasing trend, indicating that microbial metabolisms were limited by phosphorus (P) and gradually decreased. Regression analysis showed that the C and P limitations were significantly related to total nutrients, available nutrients, nutrient ratio, and soil physical properties. Partial least squares path modeling (PLS-PM) revealed that the C and P limitations were directly regulated by nutrient ratio. PLS-PM further showed that soil total nutrients indirectly affected soil microbial C and P limitations by affecting nutrient ratio, and nutrient ratio affected the soil metabolism limitation via available nutrients and pH. Our study suggests that the characteristics of microbial metabolism during the vegetation restoration process reflect the mechanism of microorganism-mediated soil nutrient cycling, which provides a theoretical basis for revealing the community dynamics and stability during the vegetation restoration process and maintaining the regional ecological environment security in the Qinling Mountains.

Key words: farmland abandonment; enzymatic stoichiometry; microbial nutrient limitation; vegetation restoration; Qinling Mountains

随着经济社会的快速发展,一些立地环境差的山区和林区,出现了大面积的撂荒地.耕地在撂荒后恢复过程中,原有的植被类型格局发生了变化,立地环境也随之得到改善^[1,2],这种动态变化进程影响着陆地生态系统的养分平衡.植被恢复会引起地上植物的物种组成、生物量和地下土壤养分、微生物群落等的变化^[3,4].土壤养分状况是影响植物群落建成和演替的主要因素之一,地上植物的生长,针阔叶树种比例的变化影响了植物凋落物及根系分泌物的输入从而改变了土壤养分状况^[5~7].土壤微生物

通过矿化和分解土壤有机质提供更多的可利用性养分,在植物生长和土壤养分循环中发挥了至关重要的作用^[8,9].目前,植被恢复的研究主要集中在植物多样性、土壤养分和微生物群落等方面^[10~14],而撂荒地植被恢复过程中,微生物代谢特征及其影响因素等研究较少.因此,明确土壤微生物代谢对植被恢

收稿日期: 2021-05-28; 修订日期: 2021-06-18

基金项目: 环境科学院项目(2019-4-3)

作者简介: 薛悦(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为植被恢复及土壤生态, E-mail: xyue@nwfau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: wangxb66@sohu.com

复的响应特征及其驱动因素对了解植被恢复过程中土壤养分现状和维持区域生态系统土壤养分平衡具有重要意义。

土壤微生物主要通过胞外酶分解土壤有机质获取碳和养分,这一过程也会为植物提供更多的有效养分^[15,16],对土壤物质循环和能量流动起着一定的调控作用^[17,18]。其中,主要有与碳(C)循环相关的 β -1,4-葡萄糖苷酶(β -1,4-glucosidase, BG)、纤维二糖水解酶(cellobiohydrolase, CBH),与氮(N)循环相关的 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(β -1,4-N-acetylglucosaminidase, NAG)、亮氨酸氨基肽酶(leucine aminopeptidase, LAP)和与磷(P)循环相关的酸性磷酸酶(acid phosphatase, AP),这些酶主要参与高分子有机聚合物降解末端的催化反应,能有效反映土壤微生物的能量(C)和养分(N、P)代谢水平^[17,19]。

微生物代谢限制相比于土壤养分和微生物群落对环境变化更为灵敏^[20]。酶化学计量能反映微生物代谢与养分需求间的生态化学平衡,常用于评价土壤微生物能量和养分的限制特征^[17,18,21]。当土壤微生物受到养分限制时,为满足自身生长和代谢需求会分泌相关的胞外酶而引起酶计量比的变化^[22]。Sinsabaugh 等^[18]的研究首先发现在全球尺度上土壤 C、N 和 P 获取酶的生态计量比对数转换后收敛于 1:1:1,微生物受到了 C 的限制,此后大量的学者对不同生态系统的酶计量比进行了研究。Waring 等^[23]的研究发现热带森林较温带森林土壤酶 C:P、N:P 偏低,受到了 P 限制。曾泉鑫等^[24]的研究发现 N 添加刺激微生物分泌 P 获取酶,加剧了毛竹林微生物 C、P 限制。此外, Moorhead 等^[25]的研究提出了酶计量矢量分析模型,用向量长度和向量角度分别量化微生物受到的 C 限制和养分(N、P)限制。基于此,王强等^[26]的研究发现过量的生物炭会导致土壤微生物 P 限制的加剧,进而使得 C 限制增强。Deng 等^[27]的研究发现黄土高原退耕后植被恢复过程中土壤微生物主要受到 C 和 P 限制。因此胞外酶计量比和酶计量矢量分析模型有助于进一步理解植被恢复过程中微生物的养分限制特征及其影响因素。受环境因素的影响,不同生态系统的胞外酶化学计量特征存在较大的差异^[23,28]。Xu 等^[29]的研究发现我国东部南北样带不同森林生态系统土壤酶计量比与气温和降水显著相关外,还与土壤 pH、土壤养分计量比和叶片化学计量比有关。Zhang 等^[30]对黄土高原撂荒地和人工刺槐林研究发现,土壤速效养分是影响酶化学计量的主要因素。虽然,影响特定生态系统酶计量比的土壤因素受到关注,但各因子调控的

相对大小和途径仍不明确。

秦岭地区植被群落演替及稳定对调节陆地生态系统平衡和改善生态环境具有重要意义^[31]。目前,该区域植被恢复研究主要集中在地上植物多样性变化和地下土壤微生物群落结构组成等方面^[32],较少关注植被恢复过程中土壤微生物代谢限制特征及其影响因素。本研究以秦岭中段不同撂荒年限恢复的典型植被为对象,从酶计量比和酶计量矢量分析模型角度探究恢复过程中土壤微生物代谢的主要养分限制,以及植被恢复过程中,微生物代谢限制的变化特征及关键驱动因素,旨在为秦岭地区植被恢复和森林经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省宁陕县火地塘林区(33°18'~33°28'N, 108°21'~108°39'E),该林区地处秦岭中段南坡,属于北亚热带和暖温带过渡地带,海拔 1 450~2 473 m,年平均气温 8~10℃,年降水量 1 000~1 200 mm,年蒸发量 800~950 mm,年日照时数 1 100~1 300 h,无霜期 170 d。土壤以山地棕壤为主,土层厚度 45~105 cm。上世纪林区人口大量流动,集中出现了不同年限的撂荒地,撂荒地植被逐渐恢复,现植被恢复类型有草丛、灌丛和天然林。乔木优势种有锐齿槲栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、华山松(*P. armandii*)、栓皮栎(*Q. variabilis*)、铁杉(*Tsuga chinensis*)和红桦(*Betula albosinensis*)等,灌木优势种有白檀(*Symplocos paniculata*)、榛子(*Corylus heterophylla*)、南方六道木(*Abelia dielsii*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、忍冬(*Lonicera japonica*)和卫矛(*Euonymus alatus*)。草本优势种有大披针叶苔草(*Carex lanceolata*)、艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)、铁杆蒿(*A. gmelinii*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium* var. *sibiricum*)和茜草(*Rubia cordifolia*)等。

1.2 样地设置

2019 年 7~9 月,在火地塘林区选择恢复 1、15 和 30 a 的典型撂荒植被作为样地(表 1 和图 1),选择种植玉米的耕地作为对照样地,同时选择未砍伐过的天然林代表恢复至顶级群落的样地,共计 5 个恢复阶段。每个阶段设置 5 个样方,共 25 块。林地阶段设置样方面积为 20 m×20 m,灌木阶段样方面积为 5 m×5 m,草地阶段样方面积为 2 m×2 m。所有样方背景信息(海拔、坡向和坡度等)相似,其中,样方间距大于 20 m,不同恢复阶段样地间距大于 300 m,所有样地均在同一流域。

表 1 样地植被特征
Table 1 Vegetation characteristics of sampling sites

项目	乔木层			灌木层			草本层		
	郁闭度	物种数	优势种	盖度/%	物种数	优势种	盖度/%	物种数	优势种
耕地	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1 a	—	—	—	—	—	—	90	16	臭蒿(<i>Artemisia hedini</i>)、 飞蓬(<i>Erigeron acer</i>)
15 a	0.57	6	漆树(<i>Toxicodendron vernicifluum</i>)、 盐肤木(<i>Rhus chinensis</i>)	30	6	华中悬钩子(<i>Rubus cockburnianus</i>)	91	16	菱蒿(<i>Artemisia selengensis</i>)
30 a	0.62	21	栗(<i>Castanea mollissima</i>)、山核桃 (<i>Juglans mandshurica</i>)	45	15	圆锥山蚂蝗(<i>Desmodium elegans</i>)、 华中悬钩子(<i>R. cockburnianus</i>)	76	23	细叶苔草(<i>Carex rigescens</i>)、 荩草(<i>Arthraxon hispidus</i>)
天然林	0.79	14	锐齿槲栎(<i>Quercus aliena</i> var. <i>acutiserrata</i>)	74	15	榛(<i>Corylus heterophylla</i>)	10	5	细叶苔草(<i>C. rigescens</i>)、秦岭箭竹 (<i>Fargesia qinlingensis</i>)

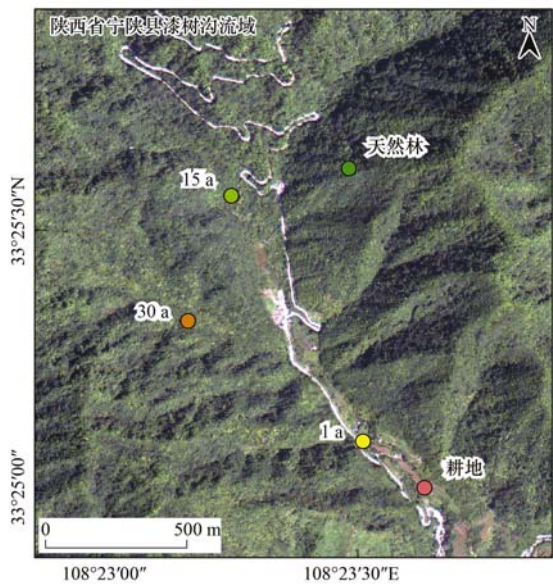


图 1 研究区位置示意
Fig. 1 Location of the study area

1.3 样品采集

在样方内用土钻(口径4.5 cm)按“S”形取土样,其中,林地阶段选取 12 个采样点,灌草阶段选取 8 个采样点. 取样前去除枯落物,取样深度为 0~20 cm,将同一样方内的土样混合,过筛(孔径 2 mm),剔除石头、根等杂质装入冰盒带回实验室. 将土样分为两部分,一部分在实验室内自然风干,用于后续土壤理化性质的测定;一部分放入 4℃ 冰箱,用于胞外酶活性的测定. 在样方对角线设置 3 个样点,用体积 100 cm³ 环刀随机取 0~10 cm 土层的土样,并装入铝盒带回实验室立即称重,随后放入烘箱 105℃ 烘干至恒重,以测定土壤容重.

1.4 样品分析

1.4.1 土壤理化性质测定

采用重铬酸钾容量法测定土壤有机碳(SOC),采用凯氏定氮法测定土壤全氮(TN),土壤全磷(TP)采用 H₂SO₄-HClO₄ 消解,钼锑抗比色法测定.

土壤可溶性有机碳(DOC)用 K₂SO₄ 浸提,总有机碳分析仪(TOC-VCPH,日本)测定,土壤硝铵态氮(NO₃⁻-N和hNH₄⁺-N)用 KCl 浸提,连续流动分析仪(Auto Analyzer 3-AA3,德国)测定,速效磷(Olsen-P)用 NaHCO₃ 浸提,钼锑抗比色法测定. 使用 pH 计(奥豪斯 ST2100,上海)测定土壤 pH 值,水土比为 2.5:1. 土壤含水量(SWC)采用烘干法测定. 土壤容重(SBD)采用环刀法测定.

1.4.2 胞外酶活性测定

采用 96 微孔板荧光法测定相关酶:β-1,4-葡萄糖苷酶(BG)、纤维二糖水解酶(CBH)、β-1,4-N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)和酸性磷酸酶(AP). 酶底物为 4-甲基-7-羟基香豆素(MUB),称取 1 g 鲜土加入 125 mL 蒸馏水在 25℃ 恒温摇床上振荡 2 h(240 r·min⁻¹),使之混合均匀,用移液器吸取 1 mL 悬浊液到离心管内,分别加入 0.25 mL 蒸馏水作为空白管、0.25 mL 标准物质溶液为淬灭管以及 0.25 mL 对应荧光底物为测定样品管,摇匀后 25℃ 黑暗条件下培养 4 h,随后每个离心管加入 50 μL 0.5 mol·L⁻¹ 的 NaOH 终止反应,最后分别吸取 250 μL 样品、空白、淬灭、标准和阴性溶液到 96 孔酶标板中,用多功能酶标仪(M200PRO,瑞士)在 365 nm 激发波长和 450 nm 检测波长下进行测定.

1.5 数据处理

通过计算酶化学计量的向量长度(vector length, VL)和向量角度(vector angle, VA)分析土壤微生物受到养分限制的情况,即^[25]:

$$X = (BG + CBH)/(BG + CBH + AP)$$

$$Y = (BG + CBH)/(BG + CBH + NAG + LAP)$$

$$VL = \text{SQRT}(X^2 + Y^2)$$

$$VA = \text{DEGREES}[\text{ATAN2}(X,Y)]$$

式中,VL 越大表明微生物受 C 限制越大;VA < 45° 时表明微生物受 N 限制;VA > 45° 时表明微生物受 P 限制,VA 越大微生物 P 限制越大.

采用 R 3.6.2 软件对实验数据进行统计分析. 运用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 分析不同撂荒年限土壤理化性质、胞外酶活性及其化学计量比、酶化学计量向量长度及角度的差异, 并采用 Tukey's HSD 进行事后多重比较. 对酶活性、酶化学计量比及其向量特征与土壤性质进行 Pearson 相关性分析. 采用广义线性模型 (GLM) 确定微生物代谢限制与环境变量的关系. 选择重要的环境变量利用 R 中的“plsmp”程序包构建偏最小二乘路径模型 (PLS-PM), 进一步探究控制植被恢复过程中微生物代谢限制的可能路径.

表 2 不同撂荒年限耕地土壤理化性质¹⁾

Table 2 Soil physicochemical properties in abandoned farmlands in different years

土壤理化性质	耕地	撂荒年限/a			天然林
		1	15	30	
$\omega(\text{有机碳})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	14.51 ± 0.60a	9.62 ± 0.96c	12.39 ± 2.14b	14.86 ± 1.31a	14.97 ± 1.50a
$\omega(\text{全氮})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.35 ± 0.10a	1.08 ± 0.17b	1.31 ± 0.26a	1.33 ± 0.14a	1.08 ± 0.15b
$\omega(\text{全磷})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.9 ± 0.20c	1.17 ± 0.14ab	1.33 ± 0.17a	1.05 ± 0.7bc	1.04 ± 0.12bc
C: N	10.76 ± 0.40bc	9.09 ± 1.47d	9.57 ± 1.38cd	11.18 ± 0.64b	13.97 ± 0.80a
C: P	16.82 ± 4.27a	8.38 ± 1.73b	9.46 ± 2.21b	14.16 ± 0.74a	14.61 ± 2.26a
N: P	1.57 ± 0.44a	0.93 ± 0.16b	1.00 ± 0.23b	1.27 ± 0.09ab	1.05 ± 0.22b
$\omega(\text{可溶性有机碳})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	152.95 ± 59.85a	55.09 ± 8.71c	96.72 ± 27.99bc	87.83 ± 12.80bc	110.08 ± 19.61b
$\omega(\text{硝铵态氮})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	10.39 ± 2.80bc	9.01 ± 0.50c	10.49 ± 4.00bc	13.16 ± 0.92ab	16.84 ± 4.24a
$\omega(\text{速效磷})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.47 ± 3.29b	12.51 ± 5.54ab	15.76 ± 8.17a	6.57 ± 0.85b	5.86 ± 3.26b
pH	5.80 ± 0.07a	5.68 ± 0.20ab	5.72 ± 0.28ab	5.52 ± 0.07b	5.08 ± 0.12c
土壤容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.98 ± 0.08a	1.37 ± 0.07b	1.35 ± 0.03b	1.37 ± 0.04b	1.23 ± 0.09c
土壤含水率	0.21 ± 0.02a	0.17 ± 0.02b	0.17 ± 0.02b	0.19 ± 0.03ab	0.11 ± 0.02c

1) 不同小写字母表示不同撂荒年限耕地之间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 不同撂荒年限耕地胞外酶活性及酶计量比特征

由图 2 可见, 不同撂荒年限耕地对土壤 BG、CBH、NAG、LAP 和 AP 活性有显著的影响 ($P < 0.05$). 随着撂荒年限的增加, 土壤 BG、CBH、NAG、LAP 和 AP 呈上升趋势, 并且均在撂荒 30 a 时达到最大, 与耕地土壤相比分别增加了 63.6%、193.4%、274.7%、196.2% 和 97.9%. 天然林土壤 CBH 活性和 LAP 活性显著大于撂荒 30 a 土壤, 而土壤 NAG 活性则相反.

由图 3 可见, 随着撂荒年限的增加, (BG + CBH)/(NAG + LAP) 和 (BG + CBH)/AP 呈显著下降趋势 ($P < 0.05$), 在撂荒 30 a 时达到最低, 与耕地土壤相比分别降低了 55.2%、24.0%. 而 (NAG + LAP)/AP 呈相反趋势 ($P < 0.05$), 在撂荒 30 a 时达到最高, 比耕地土壤增加了 81.8%. 天然林 (NAG + LAP)/AP 显著大于撂荒 30 a, 相比增加了 52.5%, 而 (BG + CBH)/(NAG + LAP) 和 (BG + CBH)/AP 则相反分别降低了 45.2% 和 18.4%. 天然林土壤胞外酶 C: N: P [用 $\ln(\text{BG} + \text{CBH}) : \ln(\text{NAG} + \text{LAP})$:

2 结果与分析

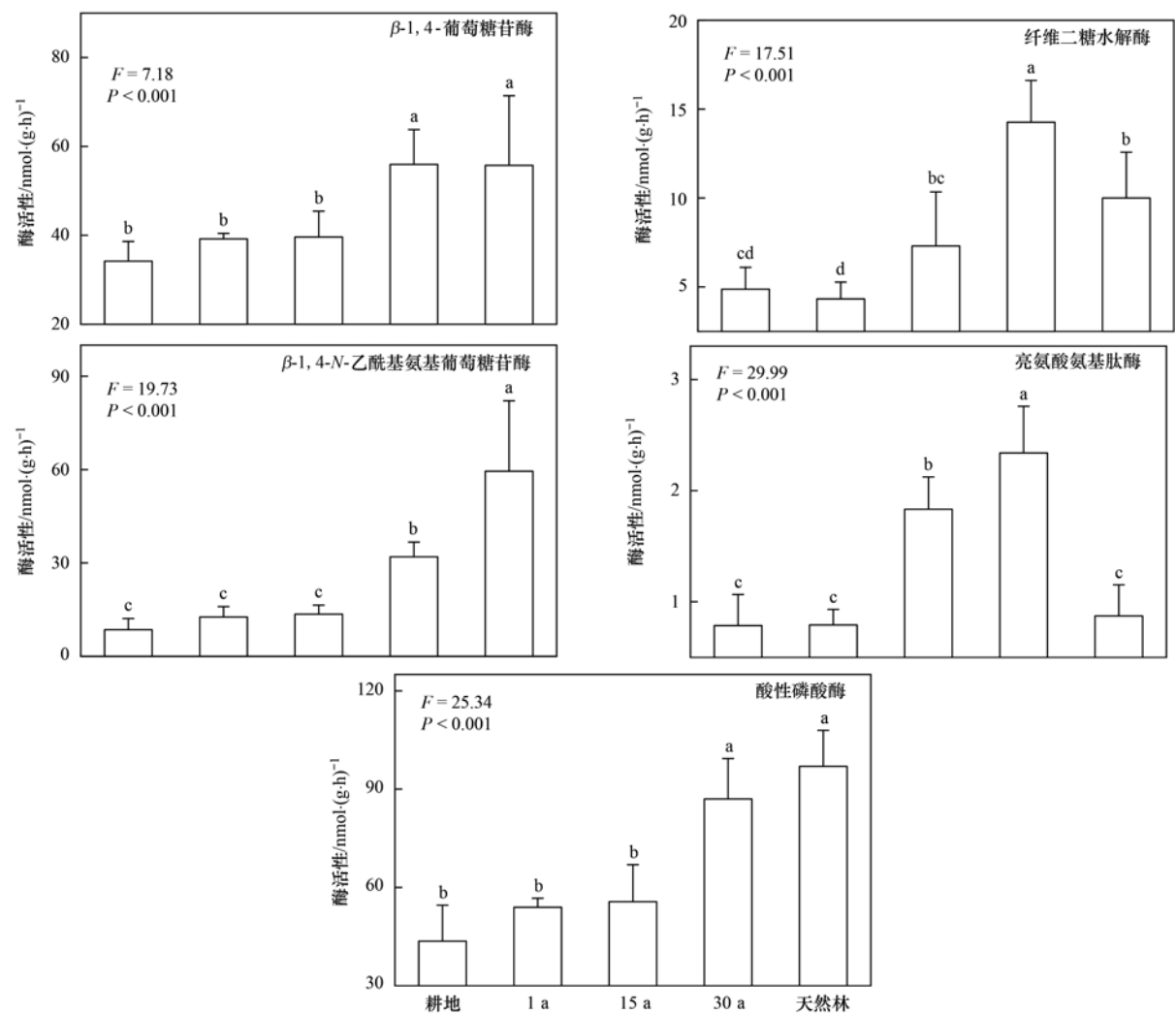
2.1 不同撂荒年限耕地土壤理化性质特征

不同撂荒年限耕地的土壤理化性质变化特征见表 2, 土壤 SOC、TN、C: N、C: P、N: P 和 $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 随撂荒年限的增加呈显著上升的趋势 ($P < 0.05$), 在撂荒 30 a 时达到最大, 撂荒 30 a 时土壤 C: N 显著小于天然林, 而 TN 显著大于天然林. 土壤 TP、DOC 和 Olsen-P 呈先增大后减小的趋势 ($P < 0.05$), 在撂荒 15 a 时最大, 天然林土壤 Olsen-P 和 TP 显著小于撂荒 15 a. 天然林土壤 pH、SBD 和 SWC 显著小于耕地和 1、15 和 30 a 撂荒地 ($P < 0.05$).

ln AP 表示] 接近于 1: 1: 1.13. 此外, 由表 3 可见, 土壤胞外酶活性及酶计量比与土壤全量养分、速效养分、养分计量比及物理性质有显著的相关性 (表 3), 如 (BG + CBH)/(NAG + LAP) 与 SOC、C: N、C: P、DOC 和 $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈显著负相关, 与 TP、Olsen-P、SBD 和 pH 呈显著正相关 ($P < 0.05$).

2.3 不同撂荒年限耕地胞外酶计量向量特征

不同撂荒年限耕地向量特征差异显著 ($P < 0.05$), 向量长度及角度变化范围分别为 0.66 ~ 0.95 和 $52.92^\circ \sim 59.71^\circ$, 变化趋势如图 4. 随撂荒年限的增加向量长度显著降低, 撂荒 30 a 时最小 (0.81), 表明随着撂荒年限的增加土壤微生物受到的 C 限制逐渐减缓, 天然林向量长度 (0.66) 显著小于撂荒 30 a. 向量角度变化趋势与长度相同, 撂荒 30 a 最小 (56.36°), 天然次生林向量角度为 52.92° 显著小于撂荒 30 a, 这表明虽然土壤微生物受到 P 限制逐渐减缓, 但仍然受到较强 P 限制. 此外, 由表 3 可见, 土壤理化性质 (如 SOC、C: N、C: P、DOC、 $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、SBD 和 pH) 与向量长度和角度均显著相关 ($P < 0.05$).



不同小写字母表示不同撂荒年限耕地之间差异显著,下同

图 2 不同撂荒年限耕地胞外酶活性变化

Fig. 2 Changes in extracellular enzymatic activities in abandoned farmlands in different years

表 3 土壤理化性质与微生物代谢特征的 Pearson 相关性¹⁾

Table 3 Pearson correlations between the soil physicochemical properties and microbial metabolic characteristics

	有机碳	全磷	全氮	C: N	C: P	N: P	可溶性有机碳	硝铵态氮	速效磷	土壤容重	土壤含水率	pH
BG + CBH	0.67 **	-0.64 **	0.26	0.43	0.81 ***	0.69 ***	0.49 *	0.42	-0.37	-0.31	-0.01	-0.30
NAG + LAP	0.59 **	-0.61 **	-0.14	0.73 ***	0.75 ***	0.33	0.64 **	0.75 ***	-0.57 **	-0.75 ***	-0.46 *	-0.65 **
AP	0.62 **	-0.64 **	-0.13	0.77 ***	0.75 ***	0.33	0.56 *	0.74 ***	-0.65 **	-0.56 *	-0.20	-0.61 **
酶 C: N	-0.71 ***	0.63 **	0.17	-0.87 ***	-0.80 ***	-0.29	-0.57 **	-0.70 ***	0.71 ***	0.55 *	0.44	0.70 ***
酶 C: P	-0.38	0.33	0.39	-0.74 ***	-0.41	0.11	-0.11	-0.54 *	0.60 **	0.39	0.44	0.65 **
酶 N: P	0.62 **	-0.60 **	-0.09	0.71 ***	0.77 ***	0.37	0.63 **	0.68 ***	-0.52 *	-0.72 ***	-0.52 *	-0.65 **
VL	-0.51 *	0.50 *	0.34	-0.86 ***	-0.60 **	-0.06	-0.51 *	-0.79 ***	0.67 **	0.70 ***	0.50 *	0.75 ***
VA	-0.63 **	0.55 *	-0.07	-0.57 **	-0.75 ***	-0.48 *	-0.60 **	-0.54 *	0.37	0.63 **	0.41	0.51 *

1) 酶 C: N 表示 (BG + CBH)/(NAG + LAP), 酶 C: P 表示 (BG + CBH)/AP, 酶 N: P 表示 (NAG + LAP)/AP; *** 表示在 0.001 水平 (双侧) 上显著相关, ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关, * 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

2.4 微生物代谢与土壤理化性质的关系

线性回归分析表明 (图 5 和图 6), 土壤微生物 C 限制与土壤 SOC、C: N、C: P、DOC 和 NO₃⁻ + NH₄⁺-N 呈显著负相关, 与 TP、Olsen-P、pH、SMC 和 SBD 呈显著正相关 (P < 0.05). P 限制与土壤 SOC、C: N、C: P、N: P、DOC 和 NO₃⁻ + NH₄⁺-N 呈显著负

相关, 与 TP、pH 和 SBD 呈显著正相关 (P < 0.05). 偏最小二乘路径模型分析显示 (图 7), 土壤物理性质、总养分、速效养分、养分计量比和 pH 对微生物 C、P 限制均存在直接和间接的影响, 如土壤总养分直接影响微生物对 C 和 P 的获取, 也可以通过影响养分计量比间接对微生物 C 和 P 限制产生影响. 养

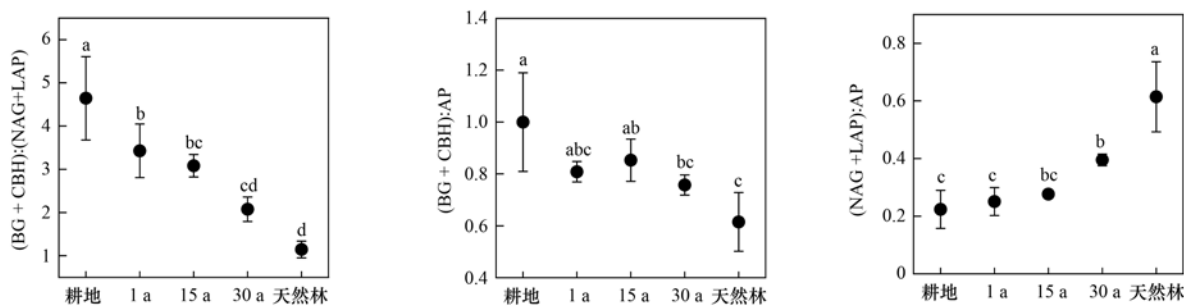


图3 不同撂荒年限耕地胞外酶计量比变化

Fig. 3 Changes in extracellular enzymatic stoichiometry in abandoned farmlands in different years

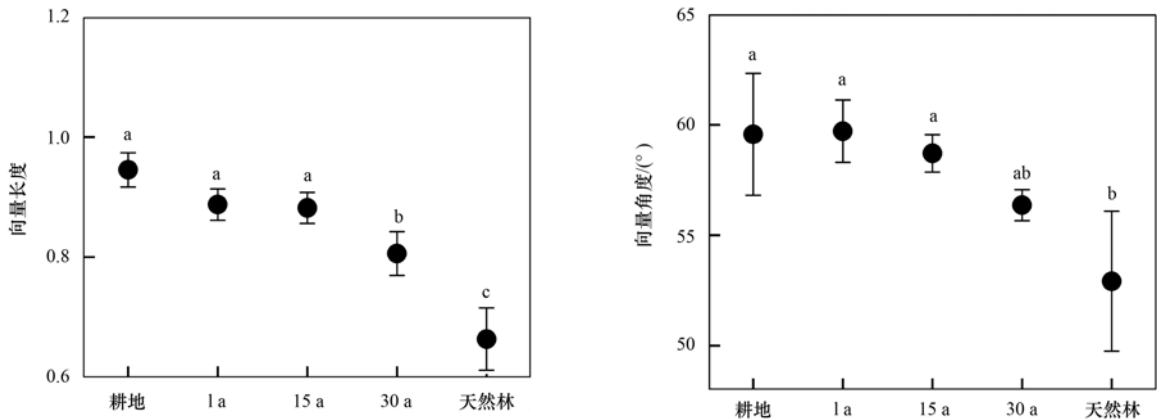
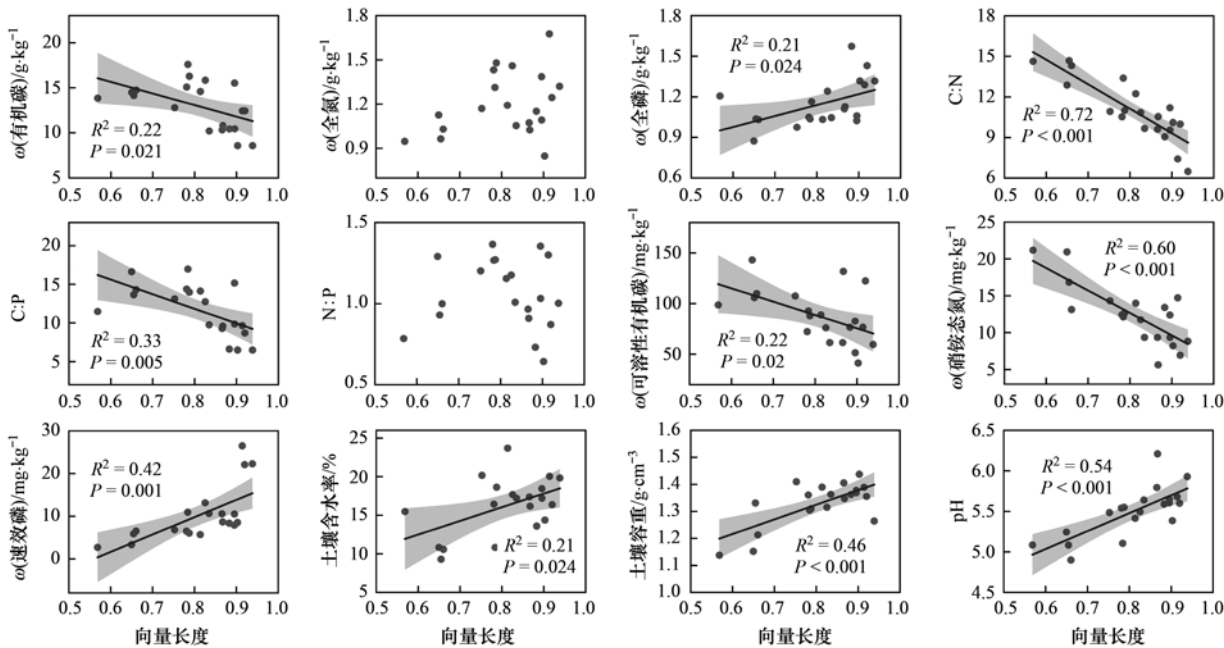


图4 不同撂荒年限耕地胞外酶计量比向量长度和角度变化

Fig. 4 Changes in vector length and angle of extracellular enzymatic stoichiometry in abandoned farmlands in different years

分计量比(- 0.96)、土壤总养分(- 0.51)和速效养分(- 0.48)对微生物 C 限制表现为负效应,而土壤物理性质(0.29)和 pH(0.13)则表现为正效应,其中土壤养分计量比影响最大. 对于微生物 P 限

制,土壤养分计量比(- 0.71)、土壤总养分(- 0.59)、pH(- 0.14)和速效养分(- 0.09)表现为负效应,土壤物理性质(0.36)为正效应,其中受到土壤养分计量比的影响最大.



实线表示向量长度与土壤理化性质之间的模型拟合,灰色区域表示模型 95% 置信区间,下同

图5 向量长度与土壤理化性质线性回归

Fig. 5 Linear regression between the vector length and soil physicochemical properties

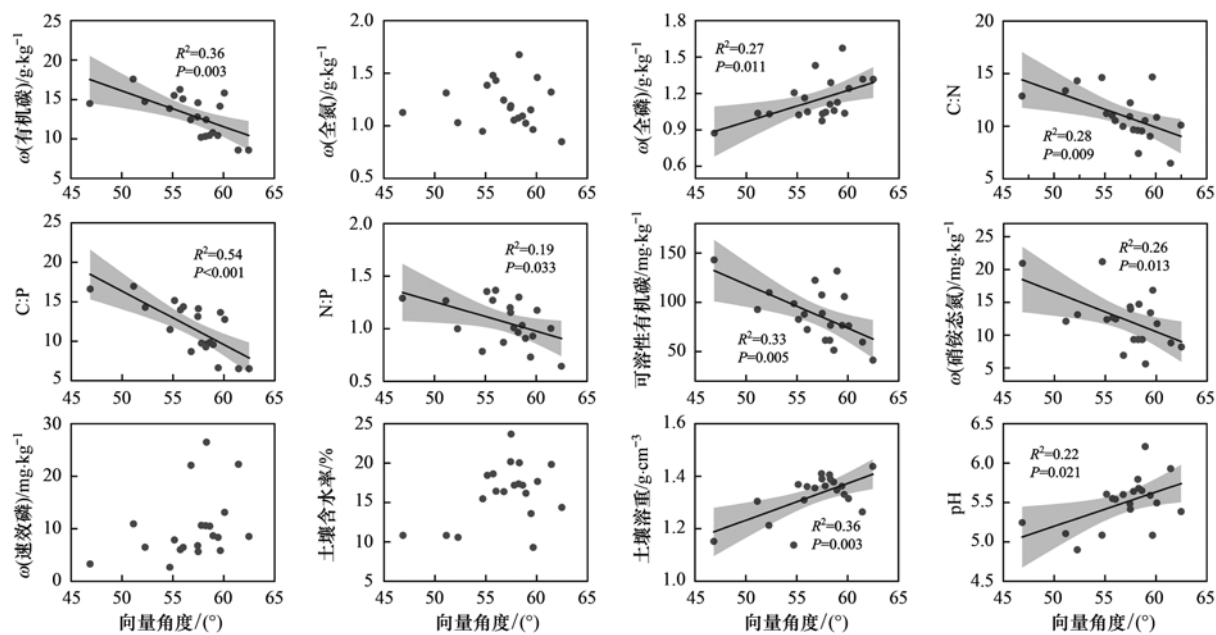
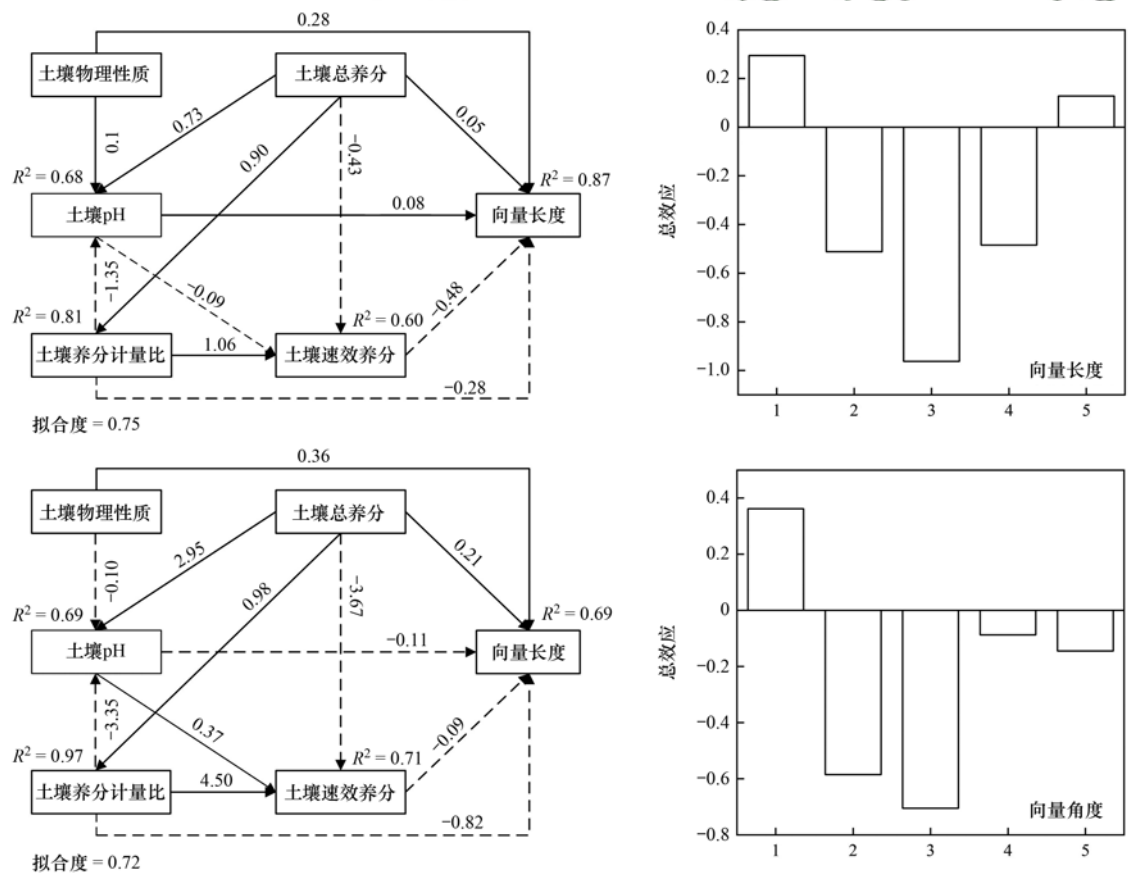


图 6 向量角度与土壤理化性质线性回归

Fig. 6 Linear regression between the vector angle and soil physicochemical properties



1 表示土壤物理性质, 2 表示土壤总养分, 3 表示土壤养分计量比, 4 表示土壤速效养分, 5 表示土壤 pH; 实线表示正向因果关系, 虚线表示负向因果关系; 箭头上的数字表示标准化路径系数; R^2 表示模型解释的因变量的方差

图 7 偏最小二乘路径建模分析

Fig. 7 Partial least-squares path modeling (PLS-PM)

3 讨论

3.1 耕地撂荒对胞外酶活性的影响

胞外酶活性在有机质分解和养分循环中起着重

要的作用,可以在一定程度上反映微生物的代谢活动^[17,18]. 本研究发现,随着撂荒年限增加土壤 C、N 和 P 代谢酶活性增强(图 2). 钟泽坤等^[22]对黄土高原农田撂荒过程中酶活性变化特征的研究同样发

现,土壤 NAG、LAP 和 AP 随着撂荒年限增加而增加. Cui 等^[33]的研究发现黄土高原农田转变为灌木的植被恢复过程中 C、N 和 P 代谢酶活性逐渐增强,与本研究的结果一致. 有研究发现胞外酶活性与土壤有机物的分解有关^[15,16]. 耕地撂荒后的恢复过程中,土壤有机质逐渐增多,使得土壤微生物有了更多的养分来源,从而刺激微生物分泌大量的胞外酶^[34,35]. 不同生态系统胞外酶活性的影响因素不同,本研究表明胞外酶活性与土壤 SOC、TP、C:P 和 pH 等显著相关(表 3). 孙彩丽等^[35]的研究发现土壤 TN、C:N、N:P 和 pH 是引起酶活性变化的主要驱动因素. 罗攀等^[36]的研究发现喀斯特山区土壤酶活性主要受土壤 pH、总氮和无机氮的影响. 因此,随着撂荒年限的增加,土壤物理结构和化学性质逐渐得到改善,微生物活性增强,且土壤养分水平总体较低,使得微生物分泌更多的胞外酶分解有机物.

3.2 耕地撂荒对土壤微生物代谢限制的影响

胞外酶计量比可以为生物的代谢需求和环境养分可利用性提供信息,进而反映土壤的生物化学过程和养分限制情况^[21]. 结合资源分配学说,土壤微生物会通过调节自身酶的合成,提高限制元素的有效性,从而缓解土壤养分的限制. 酶计量矢量化可以更加直观分析微生物所受的能量(C)和养分(N、P)限制^[37]. 本研究中,胞外酶计量向量分析发现,微生物受到 C 和 P 的共同限制[撂荒后向量角度均大于 45°且 $(\text{NAG} + \text{LAP})/\text{AP}$ 均低于全球尺度水平 0.44^[18],图 4]. Xiao 等^[38]对农田植被恢复过程中酶计量矢量化研究发现,微生物受到 C 和 P 的共同限制,与本研究的结果一致. Cui 等^[39]的研究同样发现黄土高原的不同植被恢复过程中微生物受到 C 和 P 的共同限制. 本研究还发现,随着撂荒时间的延长 $(\text{BG} + \text{CBH})/(\text{NAG} + \text{LAP})$ 和 $(\text{BG} + \text{CBH})/\text{AP}$ 呈下降趋势(图 3),表明微生物对 N、P 的需求大于对 C 的需求. 同样,胞外酶化学计量的向量长度逐渐减小,核对了土壤微生物受到的 C 限制减弱,逐渐转化为养分限制. 钟泽坤等^[22]的研究发现农田撂荒后向量长度及土壤 BG:(NAG + LAP)和 BG:ALP 逐渐减小,微生物 C 限制逐渐减弱,与本研究的结果一致. 撂荒地经过植被恢复过程,凋落物及根系分泌物等增加,使得土壤有机质含量显著增加,从而缓解了微生物 C 限制. 本研究中,撂荒后土壤 N:P 随撂荒时间呈增大趋势(表 2),表明植被恢复中 P 是生态系统主要的限制因素^[38,40]. 这可能是由于土壤中的 P 元素主要来自岩石的风化,长时间的植被生长已经将本来不富足的 P 消耗殆尽,且研究区的土壤呈酸性,P 元素易被络合^[41],另外撂荒后豆科植

物(如圆锥山蚂蝗)的出现和有机物的输入增加了 N 素的含量,因此土壤微生物 N 限制得到逐步缓解,表现为受 P 限制. 本研究中, $(\text{NAG} + \text{LAP})/\text{AP}$ 随撂荒时间的增加而增加(图 3). 这可能是由于耕地撂荒后主要受到 P 元素的限制,但植物多样性和丰富度下降,植物根系与微生物的养分竞争缓解,导致微生物 P 限制逐渐降低,且 N 元素也不富裕. 综上,胞外酶计量比及其矢量分析模型揭示了撂荒地植被恢复过程中土壤微生物主要受到 C 和 P 限制,且均随撂荒年限的增加而逐渐减缓.

3.3 土壤微生物 C、P 限制与土壤理化性质的关系

虽然随撂荒年限延长,土壤质量得到改善,有机物含量增加,进一步影响土壤微生物 C 和养分获取,但限制微生物 C 和 P 的直接因素仍不清楚. 本研究发现土壤 C:N 和 C:P 均与向量长度有显著相关性(图 5),土壤 C:N、C:P 和 N:P 与向量角度显著相关(图 6),表明养分计量比显著影响微生物 C 和 P 获取. 偏最小二乘路径模型分析同样显示养分计量比对微生物 C 和 P 限制影响最大. 植被恢复过程中土壤养分计量比调控着微生物 C 和 P 限制^[20,42]. 在不同的植被类型下,土壤养分水平不同,而养分化学计量比是否平衡是影响微生物活性的主要原因. Deng 等^[27]在黄土高原植被恢复过程中土壤微生物代谢限制的驱动因素研究中同样发现,C:P 对微生物 C 和 P 限制影响最大. Cui 等^[20]的研究也发现土壤 C:P 和 N:P 与微生物 C 和 P 限制显著相关. 这可能是因为土壤养分化学计量比对微生物群落的结构和活性有很大影响,进而影响微生物的养分限制. 本研究中,土壤 SOC、DOC 和 $\text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与向量长度及角度呈负相关,而 TP、SBD 和 pH 与向量长度和向量角度呈正相关(图 5 和图 6),表明土壤全量养分、速效养分、物理性质和 pH 也显著影响微生物 C 和 P 限制. Xiao 等^[38]的研究发现黄土高原次生演替过程中微生物 C 和 P 限制与土壤全量养分显著相关. Barantal 等^[43]对亚马孙热带森林有机质分解的能量与养分限制研究中发现,分解者的能量限制受土壤速效养分的影响. 偏最小二乘路径模型进一步说明土壤全量养分直接或通过影响养分计量比间接影响微生物 C 和 P 限制,养分计量比直接或通过影响速效养分、pH,从而影响 C 和 P 限制(图 7). 本研究中,土壤 SOC、DOC、C:N 和 C:P 随撂荒年限延长显著增大(表 2)且与微生物 C 限制呈显著负相关(图 5),表明植被恢复为土壤微生物提供了更多的碳源,从而缓解了微生物的 C 限制. 综上,通过回归分析和偏最小二乘路径模型分析,本研究发现植被恢复过程中土壤养分计量比是

影响微生物 C 和 P 限制主要因素.

4 结论

(1) 秦岭中段撂荒地植被恢复提高了土壤 SOC、TN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的含量, 改变了土壤物理性质, 改善了土壤质量.

(2) 秦岭中段耕地撂荒后 BG、CBH、NAG、LAP 和 AP 的活性显著增加.

(3) 撂荒地植被恢复过程中土壤微生物主要受到了 C 和 P 限制, 且随撂荒年限的增加微生物 C、P 限制逐渐减缓.

(4) 土壤养分计量比取决于全量养分, 土壤养分计量比直接介导了微生物 C 和 P 限制.

(5) 本研究通过明确胞外酶化学计量比与土壤养分计量比的耦合关系, 揭示了撂荒地植被恢复过程中微生物养分限制特征, 为进一步明确秦岭中段撂荒地植被恢复过程中微生物代谢特征和土壤养分循环提供了理论依据.

参考文献:

- [1] Knelman J E, Graham E B, Trahan N A, *et al.* Fire severity shapes plant colonization effects on bacterial community structure, microbial biomass, and soil enzyme activity in secondary succession of a burned forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **90**: 161-168.
- [2] 高涵, 肖礼, 牛丹, 等. 宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3825-3832.
Gao H, Xiao L, Niu D, *et al.* Effects of converting farmland into forest and grassland on soil nitrogen component and conversion enzyme activity in the mountainous area of southern Ningxia[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3825-3832.
- [3] van Hall R, Cammeraat L H, Keesstra S D, *et al.* Impact of secondary vegetation succession on soil quality in a humid Mediterranean landscape [J]. *GETENA*, 2017, **149**: 836-843.
- [4] Cline L C, Zak D R. Soil microbial communities are shaped by plant-driven changes in resource availability during secondary succession[J]. *Ecology*, 2015, **96**(12): 3374-3385.
- [5] Zhang W, Zhao J, Pan F J, *et al.* Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China[J]. *Plant and Soil*, 2015, **391**(1-2): 77-91.
- [6] Wu Y, Chen W J, Li Q, *et al.* Eoenzymatic stoichiometry and nutrient limitation under a natural secondary succession of vegetation on the Loess Plateau, China[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, **32**(1): 399-409.
- [7] 陈金磊, 张仕吉, 李雷达, 等. 亚热带不同植被恢复阶段林地凋落物层现存量 and 养分特征[J]. *生态学报*, 2020, **40**(12): 4073-4086.
Chen J L, Zhang S J, Li L D, *et al.* Stock and nutrient characteristics of litter layer at different vegetation restoration stages in subtropical region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(12): 4073-4086.
- [8] Bitas V, Kim H S, Bennett J W, *et al.* Sniffing on microbes: diverse roles of microbial volatile organic compounds in plant health[J]. *Current Review*, 2013, **26**(8): 835-843.
- [9] Lozano Y M, Hortal S, Armas C, *et al.* Interactions among soil, plants, and microorganisms drive secondary succession in a dry environment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **78**: 298-306.
- [10] Sun C L, Chai Z Z, Liu G B, *et al.* Changes in species diversity patterns and spatial heterogeneity during the secondary succession of grassland vegetation on the Loess Plateau, China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**, doi: 10.3389/fpls.2017.01465.
- [11] 海旭莹, 董凌勃, 汪晓珍, 等. 黄土高原退耕还草地 C、N、P 生态化学计量特征对植物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2020, **40**(23): 8570-8581.
Hai X Y, Dong L B, Wang X Z, *et al.* Effects of carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry characteristics on plant diversity since returning farmland to grassland on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(23): 8570-8581.
- [12] 孙沛沛, 钱朝菊, 尹晓月, 等. 半干旱区沙地蒿类植被建成对土壤细菌的影响[J]. *生态学报*, 2020, **40**(16): 5783-5792.
Sun P P, Qian C J, Yin X Y, *et al.* Effects of artemisia vegetation built on soil bacteria in semi-arid sandy land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(16): 5783-5792.
- [13] 张芳, 杜虎, 曾馥平, 等. 西南喀斯特峰丛洼地木本植物群落结构与多样性变化[J]. *生态学报*, 2020, **40**(12): 4094-4104.
Zhang F, Du H, Zeng F P, *et al.* Changes of woody community structure and diversity in karst peak-cluster depressions in southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(12): 4094-4104.
- [14] 陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 等. 黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1824-1832.
Chen M L, Zeng Q C, Huang Y M, *et al.* Effects of the farmland-to-forest/grassland conversion program on the soil bacterial community in the Loess Hilly Region [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1824-1832.
- [15] Cui Y X, Fang L C, Guo X B, *et al.* Eoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **116**: 11-21.
- [16] Manzoni S. Flexible carbon-use efficiency across litter types and during decomposition partly compensates nutrient imbalances—results from analytical stoichiometric models [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**, doi: 10.3389/fmicb.2017.00661.
- [17] Sinsabaugh R L, Hill B H, Shah J J F. Eoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. *Nature*, 2009, **462**(7274): 795-798.
- [18] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, *et al.* Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. *Ecology Letters*, 2008, **11**(11): 1252-1264.
- [19] Merino C, Godoy R, Matus F. Soil microorganisms and enzyme activity at different levels of organic matter stability[J]. *Journal of soil science and plant nutrition*, 2016, **16**: 14-30.
- [20] Cui Y X, Bing H J, Fang L C, *et al.* Extracellular enzyme stoichiometry reveals the carbon and phosphorus limitations of microbial metabolisms in the rhizosphere and bulk soils in alpine ecosystems[J]. *Plant and Soil*, 2021, **458**(1-2): 7-20.
- [21] 左宜平, 张馨月, 曾辉, 等. 大兴安岭森林土壤胞外酶活力的时空动态及其对潜在碳矿化的影响[J]. *北京大学学报*

- (自然科学版), 2018, **54**(6): 1311-1324.
- Zuo Y P, Zhang X Y, Zeng H, *et al.* Spatiotemporal dynamics of soil extracellular enzyme activity and its influence on potential mineralization rate of soil organic carbon in forests of Daxing'an mountain range [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, **54**(6): 1311-1324.
- [22] 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 等. 黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 411-421.
- Zhong Z K, Yang G H, Ren C J, *et al.* Effects of farmland abandonment on soil enzymatic activity and enzymatic stoichiometry in the Loess Hilly Region, China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 411-421.
- [23] Waring B G, Weintraub S R, Sinsabaugh R L. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial nutrient acquisition in tropical soils [J]. *Biogeochemistry*, 2014, **117**(1): 101-113.
- [24] 曾泉鑫, 张秋芳, 林开森, 等. 酶化学计量揭示 5 年氮添加加剧毛竹林土壤微生物碳磷限制[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(2): 521-528.
- Zeng Q X, Zhang Q F, Lin K M, *et al.* Enzyme stoichiometry evidence revealed that five years nitrogen addition exacerbated the carbon and phosphorus limitation of soil microorganisms in a *Phyllostachys pubescens* forest [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(2): 521-528.
- [25] Moorhead D L, Sinsabaugh R L, Hill B H, *et al.* Vector analysis of ecoenzyme activities reveal constraints on coupled C, N and P dynamics [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **93**: 1-7.
- [26] 王强, 耿增超, 许晨阳, 等. 施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2425-2433.
- Wang Q, Geng Z C, Xu C Y, *et al.* Effects of biochar application on soil microbial nutrient limitations and carbon use efficiency in Lou Soil [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2425-2433.
- [27] Deng L, Peng C H, Huang C B, *et al.* Drivers of soil microbial metabolic limitation changes along a vegetation restoration gradient on the Loess Plateau, China [J]. *Geoderma*, 2019, **353**: 188-200.
- [28] Peng X Q, Wang W. Stoichiometry of soil extracellular enzyme activity along a climatic transect in temperate grasslands of northern China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **98**: 74-84.
- [29] Xu Z W, Yu G R, Zhang X Y, *et al.* Soil enzyme activity and stoichiometry in forest ecosystems along the North-South Transect in eastern China (NSTEC) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **104**: 152-163.
- [30] Zhang W, Xu Y D, Gao D X, *et al.* Ecoenzymatic stoichiometry and nutrient dynamics along a revegetation chronosequence in the soils of abandoned land and *Robinia pseudoacacia* plantation on the Loess Plateau, China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **134**: 1-14.
- [31] 马姜明, 李昆. 森林生态系统稳定性研究的现状与趋势[J]. *世界林业研究*, 2004, **17**(1): 15-19.
- Ma J M, Li K. Current situation of research and prospects on forest ecosystem stability [J]. *World Forestry Research*, 2004, **17**(1): 15-19.
- [32] 张洪武, 于飞, 王得祥, 等. 秦岭南坡松栎林群落演替过程中物种组成及多样性动态分析[J]. *西北植物学报*, 2014, **34**(1): 169-176.
- Zhang H W, Yu F, Wang D X, *et al.* Changes of species composition and diversity in the process of community succession of pine oak forests on the south-facing slopes in Qinling mountains [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, **34**(1): 169-176.
- [33] Cui Y X, Fang L C, Guo X B, *et al.* Responses of soil bacterial communities, enzyme activities, and nutrients to agricultural-to-natural ecosystem conversion in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(3): 1427-1440.
- [34] 郭天斗, 于露, 孙忠超, 等. 宁夏东部荒漠草原向灌丛地人为转变过程中土壤胞外酶活性响应[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(8): 2541-2548.
- Guo T D, Yu L, Sun Z C, *et al.* Responses of soil extracellular enzyme activities to the anthropogenic transition from desert grassland to shrubland in eastern Ningxia, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(8): 2541-2548.
- [35] 孙彩丽, 王艺伟, 王从军, 等. 喀斯特山区土地利用方式转变对土壤酶活性及其化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2021, **41**(10): 4140-4149.
- Sun C L, Wang Y W, Wang C J, *et al.* Effects of land use conversion on soil extracellular enzyme activity and its stoichiometric characteristics in karst mountainous areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(10): 4140-4149.
- [36] 罗攀, 陈浩, 肖孔操, 等. 地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2577-2585.
- Luo P, Chen H, Xiao K C, *et al.* Effects of topography, tree species and soil properties on soil enzyme activity in karst regions [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2577-2585.
- [37] Sinsabaugh R L, Moorhead D L. Resource allocation to extracellular enzyme production: a model for nitrogen and phosphorus control of litter decomposition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, **26**(10): 1305-1311.
- [38] Xiao L, Li P, Shi P, *et al.* Soil nutrient stoichiometries and enzymatic activities along an elevational gradient in the dry-hot valley region of southwestern China [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019, **65**(3): 322-333.
- [39] Cui Y X, Fang L C, Guo X B, *et al.* Natural grassland as the optimal pattern of vegetation restoration in arid and semi-arid regions: evidence from nutrient limitation of soil microbes [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **648**: 388-397.
- [40] Jiao F, Wen Z M, An S S, *et al.* Successional changes in soil stoichiometry after land abandonment in Loess Plateau, China [J]. *Ecological Engineering*, 2013, **58**: 249-254.
- [41] 殷爽, 王传宽, 金鹰, 等. 东北地区大秃顶子山土壤-微生物胞外酶 C:N:P 化学计量特征沿海拔梯度的变化[J]. *植物生态学报*, 2019, **43**(11): 999-1009.
- Yin S, Wang C K, Jin Y, *et al.* Changes in soil-microbe-exoenzyme C:N:P stoichiometry along an altitudinal gradient in Mt. Datudingzi, Northeast China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, **43**(11): 999-1009.
- [42] Sinsabaugh R L, Shah J J F. Ecoenzymatic stoichiometry and ecological theory [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, **43**: 313-343.
- [43] Barantal S, Schimann H, Fromin N, *et al.* Nutrient and carbon limitation on decomposition in an amazonian moist forest [J]. *Ecosystems*, 2012, **15**(7): 1039-1052.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)