

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

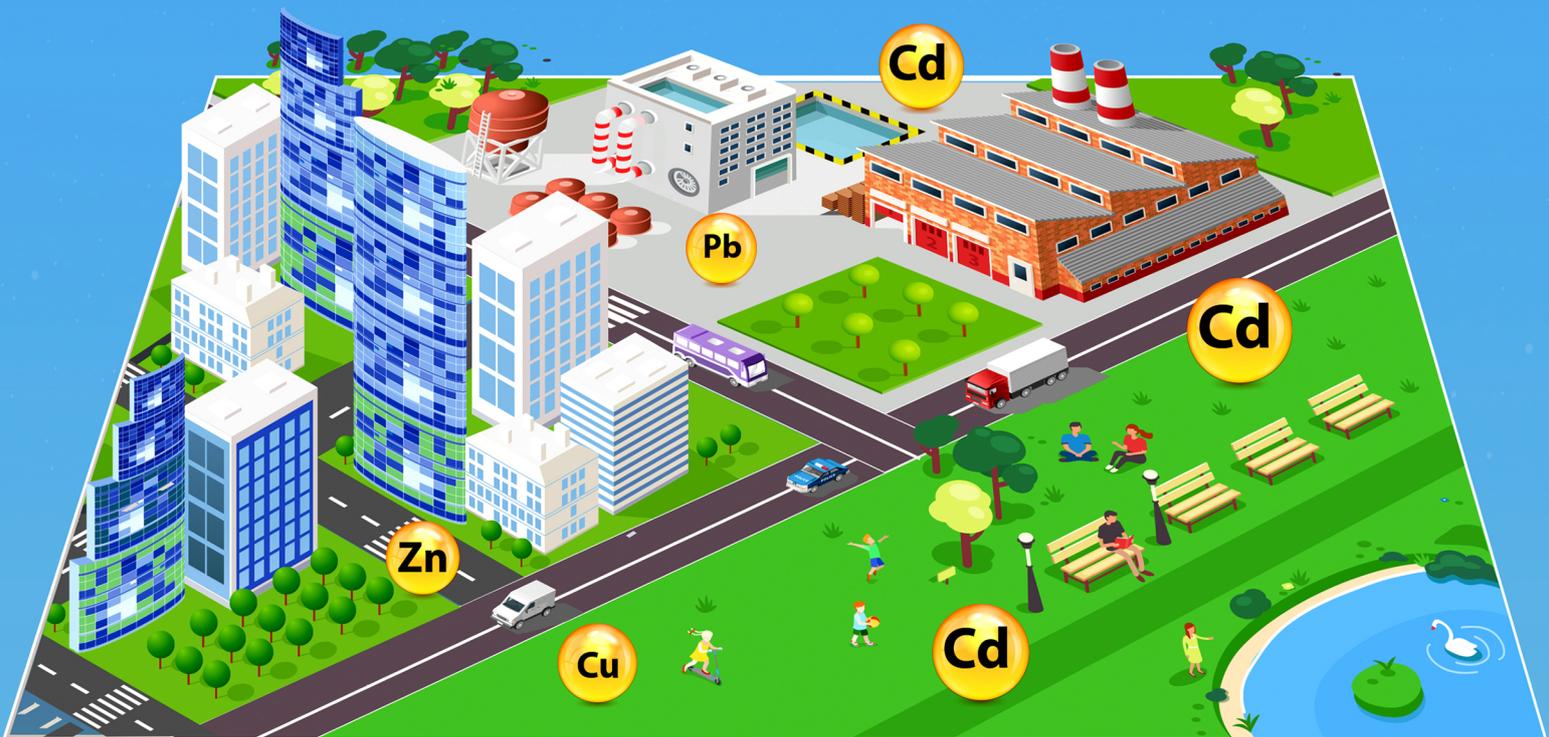
ENVIRONMENTAL SCIENCE

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, 严仁嫦, 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 O₃ 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, 王洪杰 (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)

李家河水库春季分层期 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, 吴锴彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)

三峡库区万州段河流水-气界面 CO₂ 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 Pb²⁺ 的吸附行为 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱延省, 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田土壤重金属风险分区 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)

电子垃圾拆解固废渣-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, 张晗, 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 姜霓雯, 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 闫文豪, 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)

《环境科学》征订启事(73) 《环境科学》征稿简则(209) 信息(229, 266, 338)

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^{1,2}, 高小峰^{1,2}, 闫本帅^{1,2}, 梁彩群³, 陈佳瑞³, 王国梁^{1,3}, 刘国彬^{1,3*}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 长期不同施肥处理会改变土壤的理化性质和微生物生物量,但长期不同施肥对黄土高原梯田土壤微生物胞外酶活性变化和养分特征的影响尚不清楚. 本研究以中国科学院安塞水土保持综合试验站长期养分定位试验样地为基础,分析了不施肥(CK)、有机肥与氮肥混施(MN)、有机肥与磷肥混施(MP)、有机肥、氮肥与磷肥混施(MNP)、单施有机肥(M)和氮肥磷肥混施(NP)对土壤微生物生物量以及土壤胞外酶活性的影响. 结果表明,与CK相比,所有施肥处理都显著提高了土壤养分含量和土壤胞外酶活性. 相关分析表明,土壤胞外酶活性与土壤理化性质成极显著的相关关系,冗余分析显示土壤养分和土壤微生物生物量可以分别解释土壤胞外酶活性及其化学计量比变化的79.66%和74.87%,即施肥主要是通过影响土壤肥力间接影响土壤胞外酶活性. 单施有机肥或有机肥配施无机肥(M、MN、MP和MNP)均可以显著提高土壤有机碳(SOC)和土壤总氮(STN)以及碳(C)源酶、氮(N)源酶和磷(P)源酶的含量,但MNP处理会使土壤酸碱度发生改变,对微生物的生命活动产生抑制作用. 矢量分析表明,所有处理的微生物群落均处于磷限制状态,MNP处理虽然可以缓解磷限制的程度,但与M和MP处理之间没有显著性差异. 本研究表明,长期单施有机肥[7500 kg·(hm²·a)⁻¹]可以满足旱地作物生长的养分需求,长期有机肥与磷肥混施可以缓解土壤微生物面临的资源限制,该结果对改善区域氮肥过量提供了新思路.

关键词: 黄土高原; 长期施肥; 化学计量; 胞外酶活性; 梯田

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0521-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202104277

Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau

WU Chun-xiao^{1,2}, GAO Xiao-feng^{1,2}, YAN Ben-shuai^{1,2}, LIANG Cai-qun³, CHEN Jia-rui³, WANG Guo-liang^{1,3}, LIU Guo-bin^{1,3*}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Long-term fertilization has an important effect on soil fertility and soil microbial activity. In order to explore the effects of long-term fertilization on soil extracellular enzyme activities and nutrient characteristics in a terrace on the Loess Plateau, we based our investigation on the long-term nutrient localization plot of Ansai Soil and Water Conservation Experimental Station, Chinese Academy of Sciences. We measured the soil physicochemical properties, microbial biomass, and extracellular enzyme activities of six fertilization treatments, which included no fertilization (CK); manure and nitrogen fertilization (MN); manure and phosphate fertilization (MP); manure, nitrogen, and phosphate fertilization (MNP); manure (M); and nitrogen and phosphate fertilization (NP). The results showed that all fertilization treatments significantly increased soil nutrient content and soil extracellular enzyme activities compared with that in CK. Correlation analysis showed that extracellular enzyme activity and soil physicochemical properties had an extremely significant correlation. The redundancy analysis indicated that soil nutrient and soil microbial biomass could explain 79.66% and 74.87% of the variation in soil extracellular enzyme activity and its stoichiometric ratio, respectively. Thus, the effects of fertilization on soil fertility were primarily through influencing soil extracellular enzyme activities indirectly. M, MN, MP, and MNP significantly improved soil organic carbon (SOC); soil total nitrogen (STN); and carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) source enzyme content; however, MNP changed the soil pH, which had an inhibitory effect on microbial activities. Vector analysis showed that the microbial communities of all treatments were in the condition of P limitation. Although MNP could alleviate the extent of P limitation, there was no significant difference between M and MP. Our study indicated that long-term application of manure [7500 kg·(hm²·a)⁻¹] could meet the nutrient requirements of dryland crop growth, and long-term application of manure combined with phosphorus fertilization could alleviate the resource constraints faced by microorganisms. Consequently, our results provide a new insight into improving regional nitrogen excess.

Key words: Loess Plateau; long-term fertilization; stoichiometry; enzyme activity; terrace

土壤微生物作为陆地生态系统的重要组成部分,通过生长代谢促进了土壤有机质的降解和腐殖质的形成,调控着土壤养分的转化和积累^[1,2]. 土壤微生物产生的胞外酶可以参与土壤中几乎所有的化学反应,并对外界环境条件的变化保持高度的敏感性^[3]. 因此,土壤胞外酶活性的变化可以表征土壤养分的动态特征,在生态系统的生物地球化学平衡

过程中起着至关重要的作用^[4,5].

长期施肥可以改变土壤的养分状况和微生物活性,使土壤胞外酶活性发生改变,但是不同施肥处理

收稿日期: 2021-04-26; 修订日期: 2021-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(42041005)

作者简介: 吴春晓(1996~),女,博士,主要研究方向土壤生态, E-mail: wuchunxiao18@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: gbluu@ms.iswc.ac.cn

对土壤胞外酶活性的影响并不一致^[6]. 长期施用化肥或有机肥会显著提高土壤胞外酶的活性^[7], 但是长期施用磷肥会使土壤中磷(P)源酶活性降低, 氮(N)源酶和碳(C)源酶活性升高^[3], 而 Dong 等^[8]的研究发现施用 P 肥可以提高 N 源酶和 C 源酶的活性. 施肥种类和施肥制度会对土壤胞外酶活性产生不同的影响, 打破生态系统的养分平衡, 并加剧生态系统的养分限制^[9].

生态化学计量学使用元素的化学计量比预测土壤营养的保留状况^[10], 土壤胞外酶化学计量学是将元素化学计量学和微生物养分的吸收和生长联系起来^[11]. Sinsabaugh 等^[12]的研究提出采用与 C、N 和 P 相关的胞外酶化学计量表示对微生物代谢的相对限制, Moorhead 等^[13]的研究提出利用胞外酶化学计量的矢量长度和矢量角度表征微生物群落的相对资源需求. 钟泽坤等^[14]对农田撂荒后土壤微生物养分限制状况研究发现: 土壤微生物 C 限制随撂荒过程逐渐减弱, 且撂荒前期微生物受 N 限制, 后期受 P 限制, 崔继文等^[15]的研究发现习惯施肥和优化施肥会加剧微生物 C 限制, 但有机肥替代化学氮肥可以通过提高土壤的养分含量解除土壤微生物的 C 限制, 并显著减轻土壤微生物的 P 限制. 探究不同施肥处理与土壤微生物资源限制的关系, 对改善农田生态系统功能具有重要意义.

黄土高原位于中国西北部, 水土流失和土地退化严重, 农田肥力低下, 生态环境脆弱. 目前对于土壤胞外酶活性的研究多集中在森林、草地生态系

统, 对农田生态系统关注较少, 但农田生态系统的质量与土壤胞外酶活性息息相关, 且长期施肥与短期施肥对土壤微生物资源限制的影响不同. 因此, 本研究以接近 30 a 的野外定位施肥试验为平台, 分析长期施肥条件下土壤养分和土壤胞外酶活性的变化特征以及长期施肥对土壤微生物资源限制的影响, 以期为黄土高原农田制定合理的施肥制度提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在陕西省延安市安塞水土保持研究站(36° 51' 31" N, 109° 19' 23" E)的墩山梯田养分长期定位试验田进行, 该区域位于黄土沟壑区. 海拔 1 067 ~ 1 309 m, 属于暖温带半湿润向半干旱过渡区, 年均温 8.8℃, 无霜期为 143 ~ 174 d, 年平均降雨量 540 mm, 主要集中在 7 ~ 9 月. 土壤类型为黄绵土(联合国粮农组织的土壤分类标准). 试验样地建立于 1992 年, 采用随机区组设计共 24 个试验小区, 包括 6 个处理(CK、MN、MP、MNP、M 和 NP), 4 个区组重复. 本试验的供试氮肥为尿素、供试磷肥为过磷酸钙, 供试有机肥为羊粪, 各处理具体施肥情况见表 1. 各小区面积为 30 m² (8.75 m × 3.5 m), 小区之间间距为 50 cm, 有水泥和砖堆砌的田埂, 样地四周设置了高 1.5 m 的铁围栏. 样地采用谷子-糜子-谷子-大豆轮作的种植制度, 采用小型机械耕作, 一年一熟, 无灌溉.

表 1 各处理施肥情况/kg·hm⁻²

Table 1 Fertilization of different treatments/kg·hm⁻²

处理	缩写	作物类型	N		P(P ₂ O ₅)	有机肥
			基肥	追肥		
不施肥	CK	糜子	0	0	0	0
有机肥和氮肥混施	MN	糜子	20.8	76.7	0	7 500
有机肥和磷肥混施	MP	糜子	0	0	75	7 500
有机肥、氮肥和磷肥混施	MNP	糜子	20.8	76.7	75	7 500
单施有机肥	M	糜子	0	0	0	7 500
氮肥和磷肥混施	NP	糜子	20.8	76.7	75	0

1.2 样品采集

2019 年 10 月中旬, 在每个施肥处理小区, 使用直径为 5 cm 的土钻按照“S”型采集 5 钻 20 cm 的表层土壤, 并将其均匀混合成一个复合样品, 样品经 2 mm 的筛子筛去根系和其他碎屑, 随后低温运回实验室. 一部分冷藏于 -20℃ 用于测定土壤胞外酶活性; 一部分冷藏于 4℃ 用于测定土壤微生物生物量和土壤水溶性养分; 第三部分自然风干后分成两部分, 分别通过 1 mm 和 0.25 mm 筛用于测定土壤基本理化性质.

1.3 样品指标测定

本研究测定的指标包括: 土壤含水率(SWC)、土壤容重(SBD)、土壤有机碳(SOC)、土壤总氮(STN)、土壤总磷(STP)、土壤微生物生物量碳(MBC)、土壤微生物生物量氮(MBN)、土壤微生物生物量磷(MBP)、水溶性有机碳(DOC)、水溶性有机氮(DON)、土壤有效磷(SAP)和土壤胞外酶活性.

SWC 采用烘干法测定; SBD 采用环刀法测定; 土壤 pH 采用电位法(水土比 = 2.5:1)测定^[16];

SOC 采用 $H_2SO_4-K_2Cr_2O_7$ 氧化容量法测定^[16]; STN 采用凯氏定氮法测定^[16]; STP 采用钼锑抗比色法测定^[16]; DOC 采用元素分析仪(Liqui TOCII, 德国)测定; DON 采用紫外分光光度计双波长法测定; SAP 采用碳酸氢钠浸提和钼锑抗比色法测定^[16]; MBC、

MBN 和 MBP 采用氯仿熏蒸法^[17,18]测定; 5 种土壤胞外酶活性采用 96 微孔荧光法测定^[19], 具体操作参考 German 等^[20]研究的方法, 土壤胞外酶活性以干土计, 单位为 $nmol \cdot (g \cdot h)^{-1}$, 本研究测定的土壤胞外酶活性基本信息见表 2。

表 2 土壤胞外酶基本概况

Table 2 Basic information on the soil extracellular enzymes

胞外酶名称	缩写	合成底物	分类编号	功能
β -1,4-葡萄糖苷酶	BG	4-MUB- β -D-吡喃葡萄糖苷	3.2.1.21	纤维素降解; 水解纤维素二糖中的葡萄糖
β -D-纤维素酶	CBH	4-MUB- β -D-纤维素二糖苷	3.2.1.91	纤维素降解; 水解纤维素分子非还原端的纤维素二糖二聚体
β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶	NAG	4-MUB-N-乙酰基- β -D-氨基葡萄糖苷	3.2.1.52	甲壳素降解; 水解甲壳素中的 N-乙酰氨基葡萄糖
L-亮氨酸- α -氨基肽酶	LAP	L-亮氨酸-7-氨基-4-甲基香豆素	3.4.11.1	蛋白质水解; 从多肽的 N 端水解亮氨酸和其他疏水氨基酸
碱性磷酸酶	AP	4-MUB-磷酸盐	3.1.3.2	从磷酸糖、核苷酸和磷脂中水解磷酸

1.4 数据分析

土壤胞外酶活力的矢量特征计算^[21]; 矢量长度代表土壤微生物所受到的 C 限制, 矢量角度代表 N 限制或者 P 限制, 矢量角大于 45° 表示 P 限制, 小于 45° 表示 N 限制。

$$\text{矢量长度} = \text{SQRT}(X^2 + Y^2)$$

$$\text{矢量角度} = \text{DEGREES}[\text{ATAN2}(X, Y)]$$

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

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

采用 SPSS 20.0 软件对各个指标进行单因素方差(one-way ANOVA)分析, 用 Duncan 法进行多重比较(Multiple comparison, $P < 0.05$); 并对土壤理化性质、土壤养分、土壤微生物生物量、土壤胞外酶活性进行皮尔逊(Pearson)相关分析; 利用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析(Redundancy Analysis,

RDA), 分析土壤胞外酶与土壤理化性质、养分特征和土壤微生物生物量之间的关系; 采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质和养分含量的变化

由表 3 和表 4 可知, 长期施肥条件下各处理的 SOC 和 STN 含量均显著高于 CK 处理, MN、MP、MNP 和 M 处理的 SOC 和 STN 含量之间没有显著差异, 但是显著高于 NP 处理。所有处理的 STP 和 SAP 含量变化一致, 为 $MP > MNP > NP > M$ 或 MN , 且都高于 CK, 所有施肥处理的 SCN 不存在显著性差异, 但是 CK、MN、MP 和 NP 处理的 DCN 显著高于其他处理。CK 处理的 SCP 和 SNP 显著低于其他处理, 但是 CK 的 DCP 和 DNP 却显著高于其他处理。

表 3 不同处理的土壤理化性质¹⁾

Table 3 Soil physicochemical properties of long-term fertilization

处理	SWC /%	SBD / $g \cdot cm^{-3}$	pH	ω (SOC) / $g \cdot kg^{-1}$	ω (STN) / $g \cdot kg^{-1}$	ω (STP) / $g \cdot kg^{-1}$	SCN	SCP	SNP
CK	0.18 \pm 0.004c	1.28 \pm 0.02a	8.6 \pm 0.02a	7.21 \pm 0.19c	0.39 \pm 0.02c	0.58 \pm 0.01d	18.71 \pm 0.52a	12.36 \pm 0.45c	0.66 \pm 0.04c
MN	0.19 \pm 0.009bc	1.15 \pm 0.02b	8.6 \pm 0.03a	14.70 \pm 0.25a	0.87 \pm 0.03a	0.63 \pm 0.00d	16.90 \pm 0.34b	23.26 \pm 0.28a	1.38 \pm 0.04a
MP	0.20 \pm 0.009abc	1.17 \pm 0.05b	8.5 \pm 0.03b	15.42 \pm 0.45a	0.90 \pm 0.02a	1.08 \pm 0.01a	17.18 \pm 0.25b	14.26 \pm 0.34bc	0.83 \pm 0.02b
MNP	0.21 \pm 0.010ab	1.18 \pm 0.03b	8.3 \pm 0.01c	14.72 \pm 0.94a	0.85 \pm 0.04a	1.00 \pm 0.02b	17.21 \pm 0.63b	14.65 \pm 0.79b	0.85 \pm 0.02b
M	0.22 \pm 0.009a	1.15 \pm 0.01b	8.4 \pm 0.01b	15.59 \pm 0.62a	0.86 \pm 0.03a	0.62 \pm 0.01d	18.18 \pm 0.11ab	24.87 \pm 1.09a	1.37 \pm 0.05a
NP	0.18 \pm 0.003bc	1.20 \pm 0.02b	8.5 \pm 0.01b	8.94 \pm 0.28b	0.51 \pm 0.01b	0.91 \pm 0.05c	17.62 \pm 0.37ab	9.93 \pm 0.81d	0.56 \pm 0.04c

1) SCN 表示土壤碳氮比, SCP 表示土壤碳磷比, SNP 表示土壤氮磷比; 数据为均值 \pm 标准误 ($n = 4$), 不同小写字母表示不同施肥处理间同一土壤理化性质差异显著 ($P < 0.05$), 下同

表 4 土壤可溶性养分及其计量比¹⁾

Table 4 Soil dissolved nutrient properties and stoichiometry of long-term fertilization

处理	ω (DOC)/ $mg \cdot kg^{-1}$	ω (DON)/ $mg \cdot kg^{-1}$	ω (SAP)/ $mg \cdot kg^{-1}$	DCN	DCP	DNP
CK	143.57 \pm 25.68c	8.62 \pm 1.45d	2.78 \pm 0.43d	18.17 \pm 3.98a	54.45 \pm 11.93a	3.49 \pm 1.04a
MN	200.57 \pm 26.31abc	14.27 \pm 0.64c	8.66 \pm 0.90d	14.36 \pm 2.45ab	23.78 \pm 3.75b	1.72 \pm 0.23b
MP	244.14 \pm 24.73a	11.22 \pm 0.97cd	160.28 \pm 2.03a	22.49 \pm 3.30a	1.53 \pm 0.16c	0.07 \pm 0.01c
MNP	178.88 \pm 13.37abc	23.35 \pm 1.20b	107.03 \pm 16.68b	7.77 \pm 0.81b	1.81 \pm 0.33c	0.24 \pm 0.05bc
M	231.98 \pm 21.93ab	32.96 \pm 1.51a	10.19 \pm 2.04d	7.03 \pm 0.55b	26.36 \pm 6.22b	3.61 \pm 0.64a
NP	162.54 \pm 28.52bc	11.10 \pm 0.65cd	53.59 \pm 2.44c	14.79 \pm 2.71ab	3.05 \pm 0.53c	0.21 \pm 0.02bc

1) DCN 表示可溶性碳氮比, DCP 表示可溶性碳与土壤有效磷比, DNP 表示可溶性氮与土壤有效磷比

2.2 土壤微生物生物量的变化

长期施肥处理对土壤微生物生物量及其化学计量比产生了显著差异(表5). M 和 MP 处理的 MBC 含量显著高于其他处理, MN 和 MNP 的 MBC 含量显著低于 M 和 MP 的 MBC 含量, 显著高于 NP 和 CK 的 MBC 含量. MN 处理的 MBN 含量和 MNP 处理的 MBP 含量显著高于其他处理,

NP 处理和 CK 处理的 MBN 含量没有显著性差异. MCN 在 M 处理下最高, CK 处理下最低, 对于 MCP, MNP 处理显著低于其他处理, 其他处理之间没有显著性差异, 但是 CK 的 MBN: MBP 远远高于其他处理(MN、MP、MNP、M 和 NP), 除 CK 之外的其他处理的 MBN: MBP 含量没有显著性差异.

表5 土壤微生物生物量及其计量比¹⁾

Table 5 Soil microbial biomass and stoichiometry of long-term fertilization

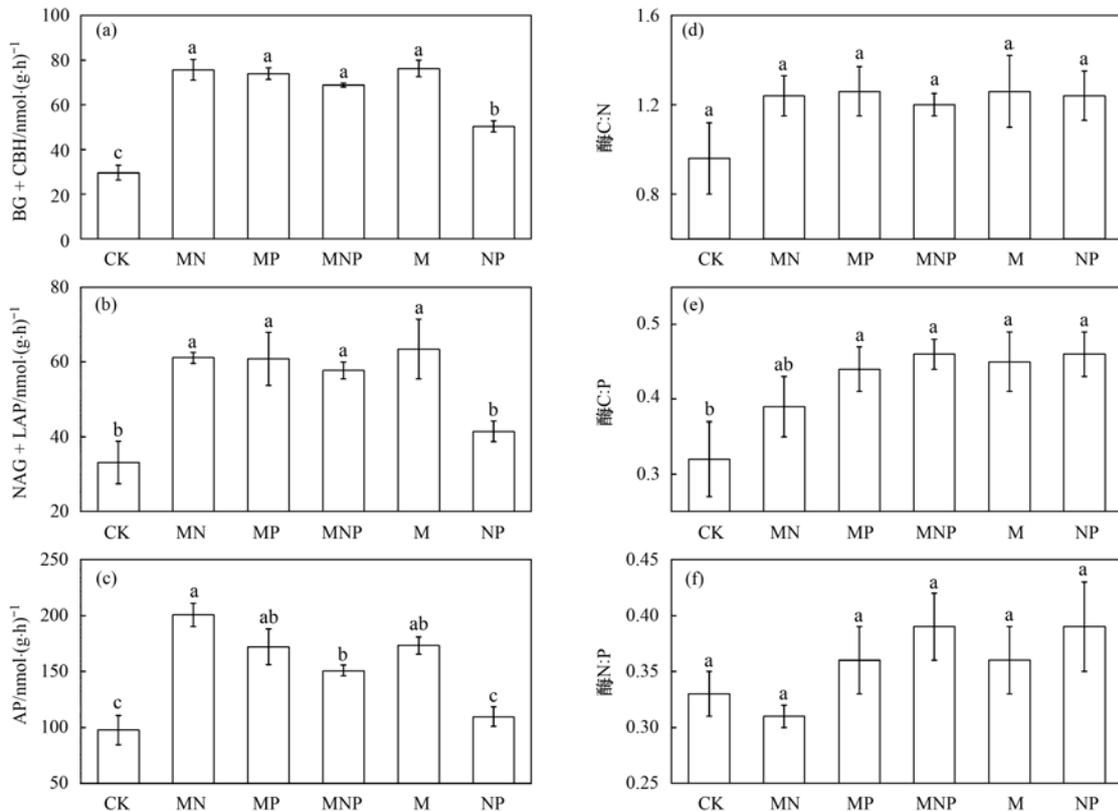
处理	$\omega(\text{MBC})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{MBN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{MBP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	MCN	MCP	MNP
CK	100.91 ± 17.06d	24.01 ± 2.36c	4.67 ± 0.37d	4.37 ± 0.81d	21.50 ± 3.00a	5.30 ± 0.78a
MN	421.48 ± 14.38b	55.38 ± 3.45a	26.89 ± 2.70b	7.65 ± 0.23cd	16.19 ± 1.74a	2.12 ± 0.23b
MP	574.58 ± 32.67a	44.14 ± 2.53b	32.07 ± 2.74b	13.02 ± 0.23ab	18.13 ± 1.17a	1.40 ± 0.11b
MNP	357.27 ± 11.02b	47.37 ± 3.59ab	47.06 ± 4.39a	7.70 ± 0.72cd	7.84 ± 0.91b	1.02 ± 0.04b
M	627.65 ± 75.74a	44.18 ± 4.75b	32.32 ± 1.70b	14.60 ± 2.26a	19.73 ± 2.83a	1.36 ± 0.11b
NP	229.43 ± 31.26c	22.03 ± 1.02c	15.31 ± 1.11c	10.58 ± 1.79bc	15.61 ± 3.30a	1.46 ± 0.10b

1) MCN 表示土壤微生物生物量碳氮比, MCP 表示土壤微生物生物量碳磷比, MNP 表示土壤微生物生物量氮磷比

2.3 土壤胞外酶活性的矢量分析和微生物资源限制

不同施肥处理下的 C、N 和 P 源酶活性都存在显著性差异, MN、MP、MNP 和 M 处理下的 BG + CBH 和 NAG + LAP 显著高于 NP 和 CK, MN、

MP 和 M 处理的 AP 没有显著性差异, 但是显著高于 NP 和 CK 处理[图 1(a) ~ 1(c)]. CK 的酶 C: N 和酶 C: P 均低于其他施肥处理, 各施肥处理的酶 C: N、酶 C: P 和酶 N: P 均没有显著性差异[图 1



CK 表示不施肥处理, MN 表示有机肥和氮肥混施, MP 表示有机肥和磷肥混施, MNP 表示有机肥、氮肥和磷肥混施, M 表示单施有机肥, NP 表示氮肥和磷肥混施; 不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同; BG 表示 β -1,4-葡萄糖苷酶; CBH 表示 β -D-纤维素酶; NAG 表示 β -1,4-N-乙酰葡萄糖胺糖苷酶; LAP 表示 L-亮氨酸- α -氨基肽酶; AP 表示酸性磷酸酶; 酶 C: N 表示 (NG + CBH): (NAG + LAP); 酶 C: P 表示 (BG + CBH): AP; 酶 N: P 表示 (NAG + LAP): AP

图1 土壤胞外酶活性及其计量比

Fig. 1 Soil extracellular enzyme activity and stoichiometry of long-term fertilization

(d) ~1(f)]. 土壤胞外酶活性的矢量分析显示: 所有处理的矢量角均大于 45° , 即全部处于微生物 P 限制状态, 但 MNP 和 NP 处理所受 P 限制较弱, CK 和 MN 所受 P 限制较强. 由矢量长度可知, 各处理均处于微生物 C 限制状态, 但是各处理之间没有显著性差异 (图 2).

2.4 土壤胞外酶活性与土壤养分、土壤微生物生物量的关系

相关分析表明, SBD、SOC 和 TN 与 MBC、MBN、MBP、BG + CBH、NAG + LAP 和 AP 具有显著相关性 ($P < 0.05$), SCP 和 SNP 与 C、N 和 P 源酶活性具有极显著相关关系 ($P < 0.01$) (表 6). 冗余分析显示: 土壤碳氮磷及其化学计量比和土壤微生物生物量及其化学计量比可以分别解释土壤胞外酶活性及其化学计量比变化的 79.66% 和 74.87% (图 3), 表明施肥主要通过改变土壤养分以及土壤微生物数量来改变土壤胞外酶活性.

3 讨论

3.1 长期不同施肥对土壤养分与微生物量的影响

有机肥具有改善土壤质量、提高作物产量和减少环境污染等优点^[22], 因此在农业生产中受到广泛使用. 本研究进一步证实了有机肥可以显著提高 SWC、SOC、TN、DOC 和 DON 的含量 (表 2). 这可能是由于有机肥自身含有大量的 C 和 N 等营养元素^[23], 也有可能是因为有机肥被土壤分解过程中产生了有机酸, 有机酸促进养分的释放和有效性^[24]. 但是, 本研究中 M、MN、MP 和 MNP 处理的 SOC、STN、SOC:STN 和 DOC 含量没有显著差异, 这可能是由于本试验施肥年限较长, 养分累积出现饱和状态.

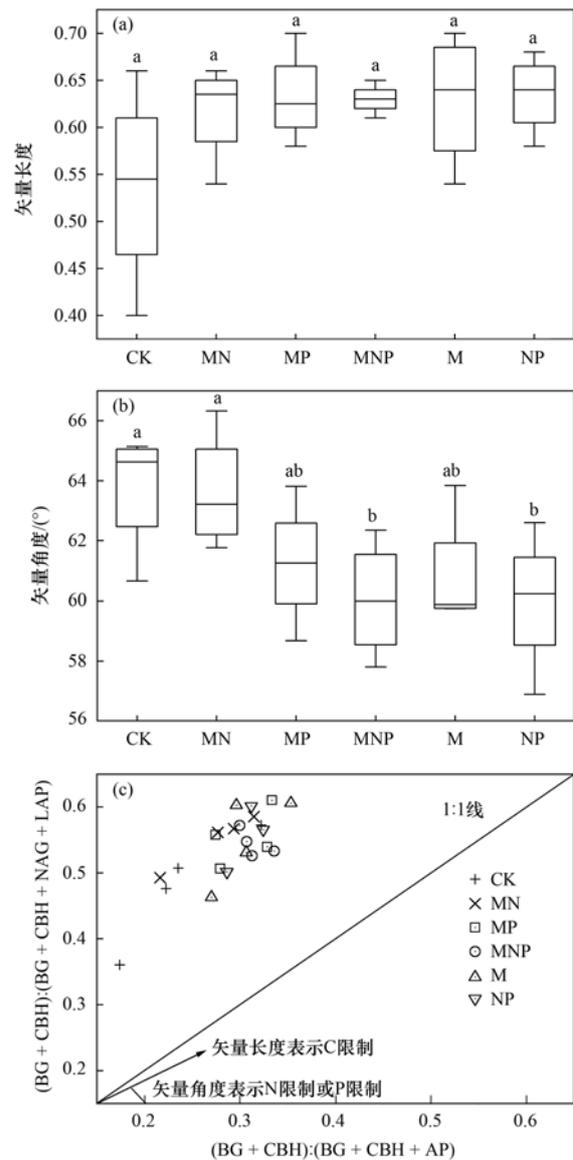


图 2 土壤胞外酶矢量分析

Fig. 2 Vector analysis of soil extracellular enzymes

表 6 土壤理化性质与土壤微生物生物量和土壤胞外酶化学计量比的相关分析¹⁾

Table 6 Correlation analysis of soil physicochemical properties with microbial biomass and soil extracellular enzymes stoichiometric ratio

	SBD	pH	SWC	SOC	STN	STP	SCN	SCP	SNP	DOC	DON	SAP	DCN	DCP	DNP
MBC	-0.551 **	-0.250	0.602 **	0.860 **	0.839 **	0.190	-0.250	0.649 **	0.653 **	0.530 **	0.584 **	0.310	-0.180	-0.370	-0.080
MBN	-0.450 *	-0.090	0.390	0.768 **	0.808 **	0.030	-0.472 *	0.664 **	0.721 **	0.360	0.429 *	0.130	-0.240	-0.250	-0.070
MBP	-0.525 **	-0.643 **	0.545 **	0.752 **	0.781 **	0.466 *	-0.460 *	0.320	0.370	0.310	0.588 **	0.461 *	-0.370	-0.550 **	-0.340
MCN	-0.443 *	-0.300	0.421 *	0.523 **	0.482 *	0.270	-0.060	0.300	0.280	0.370	0.430 *	0.290	-0.120	-0.400	-0.150
MCP	0.260	0.492 *	-0.180	-0.190	-0.250	-0.405 *	0.429 *	0.130	0.070	0.040	-0.100	-0.300	0.180	0.406 *	0.426 *
MNP	0.653 **	0.544 **	-0.390	-0.651 **	-0.660 **	-0.558 **	0.350	-0.210	-0.240	-0.432 *	-0.443 *	-0.466 *	0.190	0.612 **	0.484 *
BG + CBH	-0.721 **	-0.290	0.559 **	0.910 **	0.921 **	0.240	-0.463 *	0.645 **	0.684 **	0.438 *	0.532 **	0.320	-0.280	-0.538 **	-0.290
NAG + LAP	-0.570 **	-0.310	0.290	0.848 **	0.832 **	0.170	-0.240	0.633 **	0.645 **	0.553 **	0.501 *	0.260	-0.140	-0.220	-0.140
AP	-0.549 **	-0.030	0.290	0.800 **	0.829 **	-0.010	-0.407 *	0.721 **	0.770 **	0.582 **	0.370	0.110	0.000	-0.120	-0.070
酶 C:N	-0.270	-0.060	0.439 *	0.220	0.260	0.160	-0.430 *	0.110	0.160	-0.050	0.160	0.130	-0.250	-0.537 **	-0.260
酶 C:P	-0.360	-0.408 *	0.441 *	0.310	0.320	0.426 *	-0.320	0.000	0.010	-0.100	0.260	0.360	-0.380	-0.745 **	-0.466 *
酶 N:P	-0.140	-0.491 *	-0.010	0.120	0.060	0.380	0.160	-0.160	-0.200	-0.030	0.180	0.310	-0.200	-0.260	-0.240

1) * 表示达到显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示达到极显著水平 ($P < 0.01$)

土壤微生物是土壤养分转化的促进者, 也是养分元素循环利用和有机质矿化的主要调控者, 土壤

微生物量高低的变化是反映土壤肥力的重要依据^[25]. 本研究结果表明, M、MN、MP 和 MNP 处理

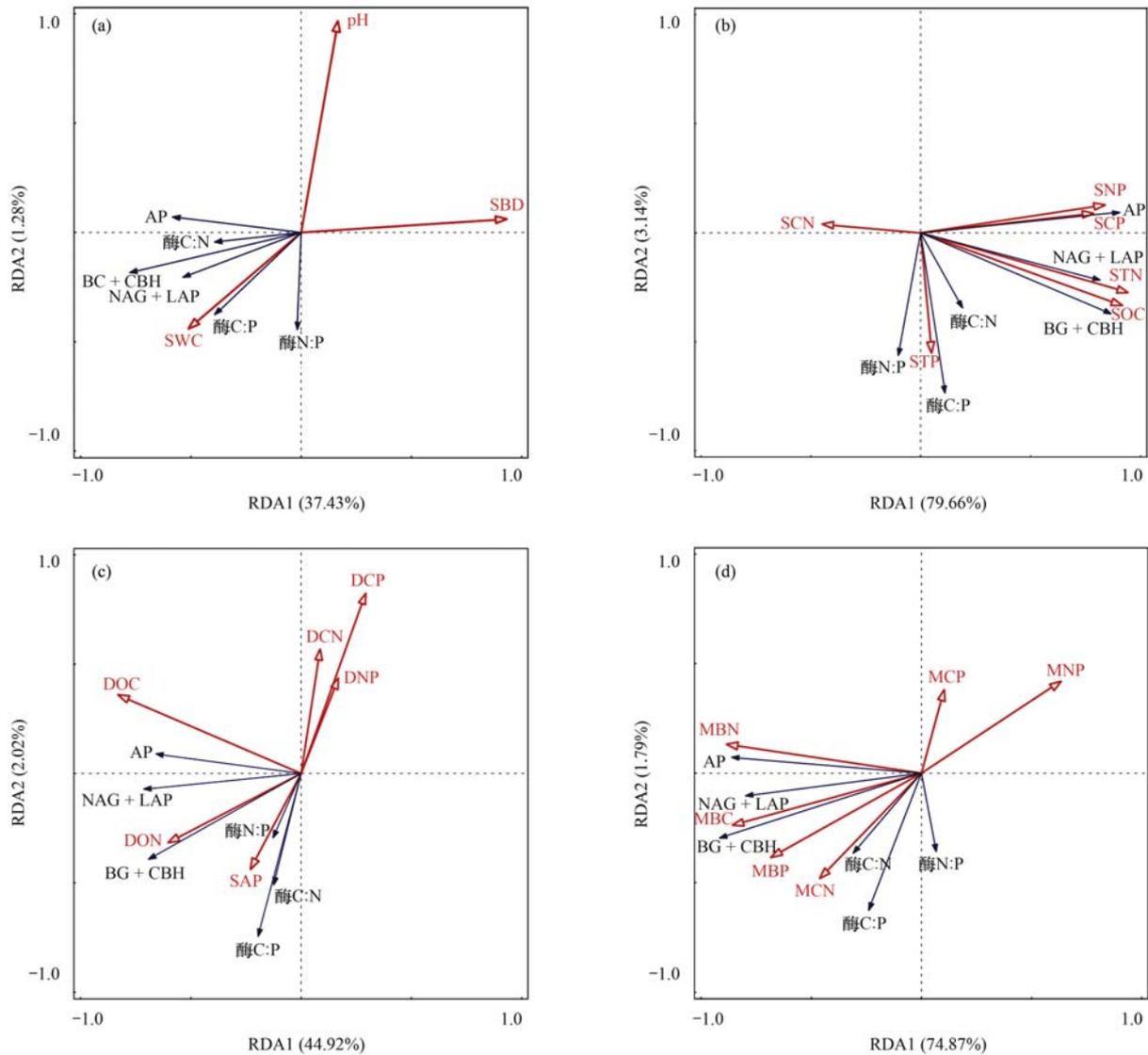


图3 土壤物理性质、土壤养分及其化学计量比、土壤可溶性养分及其化学计量比、土壤微生物生物量及其化学计量比和土壤胞外酶及其化学计量比的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis (RDA) of soil extracellular enzyme stoichiometry, soil physical properties, soil nutrient stoichiometry, soil dissolved nutrient stoichiometry and soil microbial biomass stoichiometry

均可以显著提高土壤 MBC、MBP 和 MBN 含量. 这可能是因为长期施用有机肥能直接向土壤提供大量的 C、N 和 P 等元素,促进了微生物的生长繁殖^[26]. 同时外源氮肥磷肥的施入不仅调节了土壤氮素的供应能力,也改善了磷素的有效性^[27-29],因此导致 4 个处理之间的 MBN: MBP 没有差异性. 其中, MNP 处理的 MBC: MBP 显著小于其他处理可能是因为 NP 的施入加剧了土壤的相对 C 限制,导致 MBC 含量减少,其次可能因为作物的生物量和产量加剧了对土壤 C 源的消耗,加之 P 的施入,导致 MBC: MBP 降低.

3.2 不同施肥处理对酶活性的影响

土壤胞外酶在有机质分解和养分循环过程中发挥着重要作用,资源分配理论指出^[30],微生物在受

到单一元素限制时会增加与该元素对应的胞外酶的合成,以满足自身养分需求. 本研究发现长期施肥处理相比 CK 能显著提高土壤胞外酶的活性,这是因为长期的养分输入改变了土壤的理化性质,增加了土壤真菌和细菌的多样性,衍生了更多的微生物群落,从而导致各个施肥处理下胞外酶活性增加^[31]. 其次,本研究验证了有机肥无机肥混施和化肥混施对土壤酶活性的影响,即有机肥无机肥混施 (MN、MP 和 MNP) 更能提高土壤中的酶活性^[7]. 但是,本研究发现长期有机肥无机肥混施 (MN、MP 和 MNP) 或单施有机肥 (M) 对 C 源酶和 N 源酶的活性没有显著性差异,这可能是由于长期混施有机肥造成土壤养分环境达到相对一致的水平,因为有机肥相比化肥可以更明显地促进土壤中团聚体的生成,

改善土壤结构,增加土壤肥力^[32]. 在本研究中,MNP 和 NP 处理的 AP 活性显著低于其他处理,可能是由于 P 肥的添加对 AP 活性的抑制作用,已有研究证实 AP 活性和 SAP 之间存在负相关关系^[33],本研究的结果也证实这一结论. 此外,CK 和 NP 的 N 源酶和 P 源酶活性虽然没有显著差异,但是两者胞外酶活性的变化机制不同,CK 处理是由于养分限制而促进胞外酶活性升高,NP 处理则是微生物为了维持稳态而使胞外酶活性升高^[34,35]. 因此,有必要增加单施 N 肥或 P 肥的处理,以便于更好地理解长期单施化肥对胞外酶活性的影响以及化肥混施对胞外酶活性影响的复杂机制,但是本研究仍然为长期施肥对黄土高原农田土壤胞外酶活性变化提供了参考.

3.3 不同施肥处理对微生物资源限制的影响

土壤胞外酶的化学计量学特征,可以反映微生物代谢情况和营养需求与环境养分有效性之间的平衡,对实施生态系统养分管理措施具有重要指导意义^[12]. 根据相关研究,全球尺度上土壤胞外酶活性的 ECN、ECP 和 ENP 平均值分别为 1.41、0.62 和 0.44^[36],本研究的矢量分析表明,所有施肥处理的矢量角大于 45°,因此都处于 P 限制状态(图 2),又因为 ECP 远远低于全球平均值 0.62,因此所有处理也存在相对 C 限制. MP、MNP、M 和 NP 处理的矢量角度没有显著性差异,说明存在相同程度的 P 限制,其原因可能是每年作物收获带走了土壤养分,造成当年施入的 P 没有保存在土壤内,导致土壤始终处于 P 素亏缺状态^[37,38]. 也有可能是因为施 P 的同时加施 N 或 M 会使土壤 C:P 或 N:P 升高,导致土壤微生物容易受到 P 限制. 因此,本试验中的 P 素处理只是在一定程度上减轻了微生物的 P 限制,并没有解除微生物 P 限制.

3.4 影响土壤胞外酶活性及其化学计量比的因素

土壤胞外酶活性对土壤养分循环、能量流动以及生态系统稳定性具有非常重要的作用. 本研究发现 SOC 和 STN 与土壤 C 源酶、N 源酶和 P 源酶都具有极显著相关关系(表 6),并且土壤全养分与土壤微生物生物量对胞外酶活性及其计量比的变异解释分别为 79.66% 和 74.87%,说明施肥通过改变土壤肥力以及微生物的活性间接影响胞外酶活性. 这与 Wu 等^[38]和田静等^[39]的研究结果一致,因为肥料的施入会改变土壤的 SWC 和 SBD 等物理性质,进而改变土壤的无机组分和化学组成,改变真菌和细菌的群落结构,提高微生物的活性. 但与 Zhang 等^[40]的研究结果不一致,这可能是由于生态系统类型和土地利用方式的不同. 本研究中,并没有发现可溶性养分与土壤胞外酶活性的密切联系,这可能是

因为养分的有效化过程取决于土壤胶体吸收性离子的有效程度,而不是可溶性养分的含量.

4 结论

(1) 长期不同施肥处理显著提高了 SOC、STN、STP、DOC、DON、SAP、MBC、MBN 和 MBP 的含量,以及土壤 BG + CBH、NAG + LAP 和 AP 的活性.

(2) 所有施肥处理都受到 P 限制,MNP 和 NP 处理可以显著降低 P 限制.

(3) 土壤全养分、可溶性养分、土壤微生物生物量可以分别解释土壤胞外酶活性及其计量比变化的 79.66%、44.92% 和 74.87%,SOC 和 TN 含量与胞外酶活性存在极显著性相关关系($P < 0.01$),DOC 和 DON 含量与胞外酶活性存在显著性相关关系($P < 0.05$).

(4) 长期施用 MNP 会使土壤 pH 降低,抑制微生物活动和土壤胞外酶活性.

(5) 所有处理均处于相对 N 饱和状态,每年施用 7 500 kg·hm⁻² 的有机肥可以满足农田作物对 C 和 N 的养分需求,另需外源施加 P 肥以应对长期缺 P 的现状,但是最佳施 P 量还需要进一步探究.

致谢: 特别感谢安塞农田生态系统国家观测站的吴瑞俊等老师对本研究的长期支持.

参考文献:

- [1] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 406-410.
Sun R L, Zhao B Q, Zhu L S, et al. Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(4): 406-410.
- [2] 李娟,赵秉强,李秀英,等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 144-152.
Li J, Zhao B Q, Li X Y, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 144-152.
- [3] 张涵,贡璐,刘旭,等. 氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 403-410.
Zhang H, Gong L, Liu X, et al. Soil enzyme activity in *Picea schrenkiana* and its relationship with environmental factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 403-410.
- [4] 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,等. 长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2852-2860.
Ning Y F, Wei L, Wei X M, et al. Response of extracellular enzyme activities to substrate availability in paddy soil with long-term fertilizer management [J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2852-2860.
- [5] Cui Y X, Wang X, Zhang X C, et al. Soil moisture mediates

- microbial carbon and phosphorus metabolism during vegetation succession in a semiarid region [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **147**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107814.
- [6] Li Y, Nie C, Liu Y H, *et al.* Soil microbial community composition closely associates with specific enzyme activities and soil carbon chemistry in a long-term nitrogen fertilized grassland [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **654**: 264-274.
- [7] Miao F H, Li Y, Cui S, *et al.* Soil extracellular enzyme activities under long-term fertilization management in the croplands of China: a meta-analysis[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2019, **114**(2): 125-138.
- [8] Dong W Y, Zhang X Y, Liu X Y, *et al.* Responses of soil microbial communities and enzyme activities to nitrogen and phosphorus additions in Chinese fir plantations of subtropical China[J]. *Biogeosciences*, 2015, **12**(18): 5537-5546.
- [9] Wang C, Mori T, Mao Q G, *et al.* Long-term phosphorus addition downregulates microbial investments on enzyme productions in a mature tropical forest[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, **20**(2): 921-930.
- [10] Sinsabaugh R L, Hill B H, Shah J J F. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. *Nature*, 2009, **462**(7274): 795-798.
- [11] Sinsabaugh R L, Shah J J F. Ecoenzymatic stoichiometry and ecological theory[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, **43**(1): 313-343.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 崔继文, 徐新朋, 何萍, 等. 氮素有机替代对东北黑土区土壤微生物碳磷资源限制的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, **26**(11): 1953-1966.
- Cui J W, Xu X P, He P, *et al.* Effect of organic nitrogen substitution on soil microbial resources limitation by carbon and phosphorus in black soil of northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(11): 1953-1966.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [17] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, **19**(6): 703-707.
- [18] Brookes P C, Landman A, Pruden G, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, **17**(6): 837-842.
- [19] 赵子文, 王国梁, 吴阳, 等. 黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤氮磷转化酶动力学参数及其温度敏感性[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(8): 2515-2522.
- Zhao Z W, Wang G L, Wu Y, *et al.* Kinetic parameters and temperature sensitivity of soil nitrogen and phosphorus transforming enzymes in *Robinia pseudoacacia* plantations under different vegetation zones on the Loess Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(8): 2515-2522.
- [20] German D P, Marcelo K R B, Stone M M, *et al.* The Michaelis-Menten kinetics of soil extracellular enzymes in response to temperature: a cross-latitudinal study [J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(4): 1468-1479.
- [21] Cui Y X, Fang L C, Guo X B, *et al.* Responses of soil microbial communities to nutrient limitation in the desert-grassland ecological transition zone[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 45-55.
- [22] Chen L, Li F, Li W, *et al.* Organic amendment mitigates the negative impacts of mineral fertilization on bacterial communities in Shajiang black soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, **150**, doi: 10.1016/j.apsoil.2019.103457.
- [23] Amadou A, Song A L, Tang Z X, *et al.* The effects of organic and mineral fertilization on soil enzyme activities and bacterial community in the below- and above-ground parts of wheat [J]. *Agronomy*, 2020, **10**(10), doi: 10.3390/agronomy10101452.
- [24] Liao X, Niu Y H, Liu D Y, *et al.* Four-year continuous residual effects of biochar application to a sandy loam soil on crop yield and N₂O and NO emissions under maize-wheat rotation [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, **302**, doi: 10.1016/j.agee.2020.107109.
- [25] Heidari G, Mohammadi K, Sohrabi Y. Responses of soil microbial biomass and enzyme activities to tillage and fertilization systems in soybean (*Glycine max* L.) Production [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, **7**, doi: 10.3389/fpls.2016.01730.
- [26] Huang Q, Wang J L, Wang C, *et al.* The 19-years inorganic fertilization increased bacterial diversity and altered bacterial community composition and potential functions in a paddy soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, **144**: 60-67.
- [27] Zhu X M, Liu M, Kou Y P, *et al.* Differential effects of N addition on the stoichiometry of microbes and extracellular enzymes in the rhizosphere and bulk soils of an alpine shrubland [J]. *Plant and Soil*, 2020, **449**(1): 285-301.
- [28] Chen W J, Zhou H K, Wu Y, *et al.* Direct and indirect influences of long-term fertilization on microbial carbon and nitrogen cycles in an alpine grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **149**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107922.
- [29] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(9): 1309-1315.
- [30] Allison S D, Vitousek P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(5): 937-944.
- [31] 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 等. 秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3985-3996.
- Jin Y T, Li X F, Cai Y, *et al.* Effects of straw returning with chemical fertilizer on soil enzyme activities and microbial community structure in rice-rape rotation [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3985-3996.
- [32] Geisseler D, Scow K M. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms-A review [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **75**: 54-63.
- [33] Cui Y X, Zhang Y L, Duan C J, *et al.* Ecoenzymatic stoichiometry reveals microbial phosphorus limitation decreases the nitrogen cycling potential of soils in semi-arid agricultural ecosystems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, **197**, doi: 10.

- 1016/j. still. 2019. 104463.
- [34] Chen H, Li D J, Zhao J, *et al.* Nitrogen addition aggravates microbial carbon limitation: evidence from ecoenzymatic stoichiometry[J]. *Geoderma*, 2018, **329**: 61-64.
- [35] 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.
- [36] 喻岚晖, 王杰, 廖李容, 等. 青藏高原退化草甸土壤微生物量、酶化学计量学特征及其影响因素[J]. *草地学报*, 2020, **28**(6): 1702-1710.
- Yu L H, Wang J, Liao L R, *et al.* Soil microbial biomass, enzyme activities and ecological stoichiometric characteristics and influencing factors along degraded meadows on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, **28**(6): 1702-1710.
- [37] Qiu X C, Peng D L, Tian H X, *et al.* Soil ecoenzymatic stoichiometry and microbial resource limitation driven by thinning practices and season types in *Larix principis-rupprechtii* plantations in North China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, **482**, doi: 10.1016/j. foreco. 2020. 118880.
- [38] Wu Y, Chen W J, Li Q, *et al.* Ecoenzymatic stoichiometry and nutrient limitation under a natural secondary succession of vegetation on the Loess Plateau, China[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, **32**(1): 399-409.
- [39] 田静, 盛茂银, 汪攀, 等. 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[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 4278-4286.
- Tian J, Sheng M Y, Wang P, *et al.* Influence of land use change on litter and soil C, N, P stoichiometric characteristics and soil enzyme activity in karst ecosystem, southwest China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 4278-4286.
- [40] 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.



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	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i>	(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 Macroenthos 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 Gangan 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	LU 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)
Nitritation 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, LU 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)