

目次

2018~2020年北京市大气PM _{2.5} 污染特征及改善原因	刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明	(2409)
京津冀城市群冬季二次PM _{2.5} 的时空分布特征	姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹	(2421)
COVID-19管控前后不同污染阶段PM _{2.5} 中二次无机离子变化特征	姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹	(2430)
基于在线观测的太原市冬季PM _{2.5} 中金属元素污染水平及来源解析	崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明	(2441)
青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源	王红磊, 刘思晗, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双	(2450)
湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	虎晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小雅, 郭送军	(2461)
2021年夏季新乡市城区臭氧超标日污染特征及敏感性	侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启	(2472)
台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅	(2481)
天津市空气污染的健康影响分析	华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂	(2492)
2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析	杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮	(2502)
1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析	王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞	(2518)
长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应	钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军	(2528)
宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价	李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰	(2539)
微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析	陆嘉玮, 徐晨辉, 胡纯, 刘树仁, 李方	(2551)
黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇	(2562)
三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险	张雪, 朱波	(2574)
霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价	刘海, 赵国红	(2583)
基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析	刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明	(2592)
河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥	(2601)
饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向	钟婷婷, 林涛, 刘威	(2613)
镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制	张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandiyar Shahab	(2622)
纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑	郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞	(2635)
富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷的吸附性能与机制	何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂	(2646)
富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制	欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 卞晓彤	(2661)
污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制	周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣	(2671)
森林生态系统对大气氮沉降降低的响应	谢丹妮, 仰东星, 段雷	(2681)
气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响	张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲	(2694)
西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析	徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春	(2704)
不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响	马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇	(2715)
氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响	刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波	(2724)
互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响	李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞	(2735)
黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征	姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼	(2746)
黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征	许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮	(2756)
短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响	简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉	(2767)
福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应	车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明	(2775)
中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议	赵晓峰, 雷梅, 陈同斌	(2786)
基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展	龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬	(2799)
河北省土壤化学元素的背景值与基准值	张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达	(2817)
非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析	邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华	(2829)
基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价	余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀	(2838)
长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险	李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元	(2849)
贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征	马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峰, 王惠艳, 彭敏, 张富贵	(2856)
贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估	马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇	(2868)
山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价	郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉	(2879)
P对小麦Cd和As吸收与转运的影响	王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅	(2889)
施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响	李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯	(2899)
广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析	马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚	(2908)
五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征	罗正明, 刘晋仙, 胡现秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰	(2918)
天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响	于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜琿璘, 王英成	(2928)
紫云英还田与化肥减量施肥对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响	张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭	(2936)
长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响	胡颖榕, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森	(2945)
高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响	张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进	(2955)
菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征	赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰	(2965)
中国碳排放及影响因素的市域尺度分析	吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘	(2974)
碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验	房琪, 李绍萍	(2983)
垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例	陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽	(2995)
1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量化分析	苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡	(3003)
《环境科学》征订启事(2480)	《环境科学》征稿简则(2538)	信息(2766, 2798, 2927)

黄土旱塬 24 a 不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征

姚志霞¹, 周怀平², 解文艳², 杨振兴², 陈浩宁¹, 文永莉¹, 程曼^{1*}

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 山西农业大学资源环境学院, 晋中 030031)

摘要: 探索黄土旱塬区农田土壤碳、氮和磷生物地球化学循环特征, 可为农作物高效生产和土地可持续利用提供科学依据和技术支撑. 以山西寿阳 24 a 玉米旱作试验田为对象, 研究长期秸秆覆盖还田、直接还田、过腹还田和不还田对土壤元素和胞外酶活性化学计量比的影响, 并计算向量角度和长度用于指示微生物面临的资源限制情况, 向量角大于 45° 和小于 45° 分别表示微生物受磷限制和氮限制, 偏离 45° 越大表示限制程度越大, 向量长度越长表示微生物受碳限制越严重. 结果表明: ① 长期秸秆还田土壤 C/N 和 C/P 分布在 9.81 ~ 14.28 和 14.58 ~ 21.92 之间, 均值分别为 12.36 和 17.51, 分别较试验初期降低了 6.0% 和 4.2%; 土壤 N/P 分布在 1.27 ~ 1.57 之间, 均值为 1.42, 较初期提高了 2.2%. 土壤 C/N 和 C/P 均呈现出先降低后升高的变化趋势, 土壤 N/P 基本呈现出持平趋势, 且不同秸秆还田处理之间土壤元素计量比均无显著性差异. ② 相比 24 a 长期不还田处理, 长期秸秆覆盖还田处理土壤 β -1,4-葡萄糖苷酶 (BG) 和 β -1,4-N-乙酰葡萄糖苷酶 (NAG) 活性显著提高了 134.4% 和 107.5% ($P < 0.05$), 长期秸秆直接还田土壤 BG 和碱性磷酸酶 (AP) 活性显著降低了 59.3% 和 59.5% ($P < 0.05$), 长期过腹还田下土壤 NAG 活性显著提高了 102.8% ($P < 0.05$). 长期秸秆还田处理下土壤微生物整体面临碳限制和磷限制, 长期秸秆覆盖还田加剧了微生物碳限制, 秸秆过腹还田处理可以缓解碳限制程度. 相比 24 a 长期不还田处理, 过腹还田处理可以显著降低土壤酶计量碳氮比 ($EEA_{C/N}$, $P < 0.05$), 直接还田处理可以显著提高土壤酶计量碳磷比 ($EEA_{C/P}$, $P < 0.05$), 3 种秸秆还田方式对土壤酶计量氮磷比 ($EEA_{N/P}$) 均无显著影响. 向量角度整体大于 45°, 向量长度较初期增加了 3.8% ~ 20.1%. ③ 相关性分析表明, 碳、氮投入与 BG 活性显著负相关; 有效氮与 NAG、AP 活性和 $EEA_{C/N}$ 存在显著相关; C/P 与 $EEA_{C/N}$ 显著正相关; N/P 与 NAG 活性、AP 活性、 $EEA_{C/N}$ 和 $EEA_{C/P}$ 之间存在显著相关性; $EEA_{N/P}$ 与任何环境因子之间都不存在显著相关性. 长期不同秸秆还田处理下土壤 N、P 元素的有效性、N/P 对土壤胞外酶活性和其化学计量特征均产生了显著的影响, 在以后的土壤高效培育和农业生产活动中, 应更多关注农田土壤中有有机碳的提升和氮、磷有效性的促进.

关键词: 长期秸秆还田; 土壤养分; 胞外酶活性; 化学计量比; 资源限制

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-2746-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.20220517

Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China

YAO Zhi-xia¹, ZHOU Huai-ping², XIE Wen-yan², YANG Zhen-xing², CHEN Hao-ning¹, WEN Yong-li¹, CHENG Man^{1*}

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030031, China)

Abstract: Exploring the biogeochemical cycle characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in farmland in the dryland of the loess plateau can provide scientific basis and technical support for efficient crop production and sustainable land use. Here, based on a long-term (24 year) straw return field experiment in Shouyang, Shanxi province, the effects of different straw return regimes, i. e., straw mulching (SM), direct straw return (DS), animal-digested straw return (AS), and non-straw return (CK), on the stoichiometric ratio of soil elements and extracellular enzyme activities were studied. The vector angle and length were calculated to indicate the resource constraints faced by microorganisms. The vector angle was greater than 45° and less than 45°, indicating that microorganisms were limited by phosphorus and nitrogen, respectively. The greater the deviation from 45°, the greater the degree of limitation, and the longer the vector length, the more severely limited by carbon. The results showed that ① the soil C/N and C/P of long-term straw returning ranged from 9.81 to 14.28 and from 14.58 to 21.92, with the mean values of 12.36 and 17.51, respectively, which were 6.0% and 4.2% lower than that at the initial stage of the experiment. The soil N/P was distributed between 1.27 and 1.57, with an average of 1.42, which was 2.2% higher than that in the initial stage. The soil C/N and C/P ratios showed a trend of first decreasing and then increasing, the soil N/P ratio basically showed a flat trend, and there was no significant difference in soil element metering ratios between different straw returning treatments. ② Compared with the 24-year long-term non-straw return treatment, the activities of β -1,4-glucosidase (BG) and β -1,4-N-acetylglucosaminidase (NAG) in the soil of the long-term straw mulching treatment increased by 134.4% and 107.5% ($P < 0.05$), the activities of BG and alkaline phosphatase (AP) in the soil of the long-term straw mulching treatment decreased by 59.3% and 59.5% ($P < 0.05$), respectively, and the activities of NAG in the soil of the long-term straw mulching treatment increased by 102.8% ($P < 0.05$). Under the long-term straw returning treatment, soil microorganisms were faced with carbon and phosphorus limitation as a whole. Long-term straw mulching aggravated microbial carbon limitation, and animal-digested straw return could alleviate the degree of carbon limitation. Compared with that in the 24-year long-term non-straw return treatment, soil $EEA_{C/N}$ could be significantly

收稿日期: 2022-05-17; 修订日期: 2022-07-27

基金项目: 山西省自然科学研究项目 (202203021211317, 202103021224124); 国家科技基础资源调查专项 (2021FY00501-1); 耕地质量长期监测数据整合项目; 国家重点研发计划项目 (2021YFD1900705)

作者简介: 姚志霞 (1997 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤元素的生物地球化学循环, E-mail: yzx13513695804@163.com

* 通信作者, E-mail: chengman@sxu.edu.cn

reduced by the animal-digested straw return treatment, and soil $EEA_{C/P}$ could be increased by the direct straw return treatment. The three straw returning methods had no significant indigenous effect on soil $EEA_{N/P}$. The overall vector angle was greater than 45° , and the vector length increased by 3.8%-20.1% compared with that in the initial stage. ③ Correlation analysis showed that C and N inputs were significantly negatively correlated with BG activity; available nitrogen was significantly correlated with NAG activity, AP activity, and $EEA_{C/N}$; C/P was significantly positively correlated with $EEA_{C/N}$; there were significant correlations between N/P and NAG activity, AP activity, $EEA_{C/N}$, and $EEA_{C/P}$; and there was no significant correlation between $EEA_{N/P}$ and any environmental factors. In conclusion, the availability of soil nitrogen and phosphorus elements and N/P ratio had significant effects on soil extracellular enzyme activity and stoichiometric characteristics under different long-term straw returning treatments. In the future, more attention should be paid to the improvement of organic carbon and the promotion of nitrogen and phosphorus availability in farmland soil in soil-efficient cultivation and agricultural production activities.

Key words: long-term straw return; soil nutrient; extracellular enzyme activity; stoichiometric ratio; resource constraints

土壤酶活性是反映土壤肥力和养分循环的重要生物学指标之一^[1], 作为水解酶代表的 β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)、 β -1,4-N-乙酰葡萄糖氨糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)和碱性磷酸酶(AP)与土壤中C、N、P元素的周转与代谢密切相关. 生态化学计量学是研究生态系统中各元素间平衡的科学, 研究土壤C、N、P生态化学计量特征对于揭示土壤养分的有效性、限制性、循环和平衡机制等具有重要指示作用^[2,3]. 近年来, 随着生态化学计量研究的深入, 土壤中与元素循环相关的水解酶活性之间的比值日益受到研究者的重视^[4]. Sinsabaugh等^[5]在全球尺度上研究发现, 参与土壤C、N、P循环的土壤酶化学计量比 $\ln BG : [\ln(NAG + LAP)] : \ln AP$ 趋于1:1:1, 这意味着在全球尺度上土壤酶C:N:P相对稳定. 然而, 在特定的生态系统中, 土壤微生物的生长受到环境胁迫和养分限制等的影响, 进而影响酶的表达和活性, 土壤酶化学计量比可能不遵循1:1:1的关系^[6]. “资源分配理论”指出, 微生物会将更多的能量和养分分配于获取限制性资源酶的生产^[7]. Yuan等^[8]在中国北方半干旱草原上进行氮添加试验发现, 氮添加使微生物由氮限制转为碳限制, 从而导致土壤BG活性显著提高($P < 0.001$), NAG和LAP活性降低, 土壤BG:(NAG+LAP)值从0.91变为1.08. 可见, 分析特定环境条件下土壤胞外酶的化学计量特征, 对土壤生态系统养分周转和限制状况非常重要.

作物秸秆作为可再生资源, 主要由纤维素、木质素和半纤维素等组成, 其氮、磷和钾等矿质营养元素含量比较丰富^[9]. 秸秆还田是农业废弃物再利用的有效措施, 对农业生产和土壤高效利用具有重要的价值. 徐虎等^[10]经过22 a定位试验表明, 长期秸秆还田可显著提高0~20 cm土壤有机碳含量. 李守华^[11]经过10 a长期定位试验发现, 连续秸秆还田可有效增加15~20 cm土壤有效磷含量. Zhao等^[12]经过30 a定位试验表明, 长期秸秆还田可以显著提高土壤全氮含量和土壤C/N. 江叶枫等^[13]研究表明, 与不还田相比, 秸秆还田处理土壤N/P显著提高. 同时, 有研究表明, 长期秸秆还田可以显著

提高土壤BG、NAG活性^[12,14]和AP活性^[15]. 长期秸秆还田中, 外源有机物的持续输入和作物消耗养分等势必会改变土壤元素计量, 并使得土壤胞外酶与底物之间的互馈关系变得非常复杂. 基于生态化学计量学, 从微生物资源限制角度出发, 研究长期秸秆还田土壤元素计量与酶计量, 可以深入探索农田土壤元素平衡和限制状况. 目前, 秸秆还田方式和年限对土壤胞外酶化学计量特征的影响的研究还鲜见报道. 本研究依托山西寿阳国家野外观测试验站, 分析长期秸秆覆盖还田、直接还田、过腹还田和还不还田处理下土壤C、N、P和胞外酶活性及其化学计量特征, 深入探讨土壤元素及其计量比、胞外酶活性及其计量比与土壤有效养分的关联, 以期为玉米秸秆科学资源化利用提供理论支撑, 并为旱地土壤的长期可持续管理及高效利用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长期定位试验位于山西省寿阳县野外科学观测试验站内($113^\circ 06' E$, $37^\circ 58' N$), 海拔1 130 m, 年均气温 $7.4^\circ C$, $\geq 10^\circ C$ 积温 $3\ 400^\circ C$, 无霜期约130 d, 年蒸发量1 600~1 800 mm, 年日照时长2 858.3 h, 年均降水量501.1 mm, 70%左右的降水集中在6~9月, 干燥度1.3, 属暖温带半湿润偏旱区. 试验地块基本平坦, 土层深厚, 地下水埋深在50 m以下. 土壤为褐土性土, 成土母质为马兰黄土, 属黄土旱塬地. 试验初始时耕层土壤基本性质为: ω [有机碳(SOC)] $13.81\ g\cdot kg^{-1}$, ω [全氮(TN)] $1.05\ g\cdot kg^{-1}$, ω [全磷(TP)] $0.76\ g\cdot kg^{-1}$, ω [有效氮(AN)] $117.69\ mg\cdot kg^{-1}$, ω [有效磷(AP)] $4.84\ mg\cdot kg^{-1}$, pH 8.3.

1.2 试验设计

本试验设置以下4个处理: ①秸秆覆盖还田: 在前茬玉米收获后, 将上茬覆盖未腐解的秸秆铡碎, 结合秋季深耕翻直接还田, 次年整地直接播种再进行整秆均匀覆盖; ②秸秆直接还田: 在前茬玉米收获后, 将玉米秸秆铡碎为15 cm长, 结合秋季深耕翻直接还田, 次年整地后直接播种; ③秸秆过腹还田: 在

前茬玉米收获后,将腐熟湿牛粪均匀撒在地面,结合秋季深耕翻直接还田,次年整地后直接播种;④秸秆不还田,空白对照,在前茬玉米收获后,将秸秆全部移出.每个处理小区面积 54 m².

本试验从 1992 年 4 月开始,1993~1997 年玉米品种为“烟单 14 号”,1998~2003 年为“晋单 34 号”,2004~2011 年为“强盛 31 号”,2012~2016 年为“晋单 81 号”.玉米播种时间在 4 月 15~25 日,收获时间为 9 月 20 日至 10 月 10 日,种植密度为 49 500~52 500 株·hm⁻².各小区栽培管理措施一致,田间管理措施主要是除草和防治病虫害.各小区统一施肥,在前茬玉米收获后结合秋季深耕翻施肥,玉米生长期间不施肥,无补充灌溉.所有处理施肥量为 N 150 kg·hm⁻²、P₂O₅ 84 kg·hm⁻²,施用氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为普通过磷酸钙(含 P₂O₅ 14%);秸秆还田量为 6 000 kg·hm⁻²,过腹还田牛粪(湿)45 000 kg·hm⁻².所有处理均采用秋施肥,结合秋深耕翻地,条施深施肥,施肥深度 10~30 cm,化肥全部底施,不追肥.

1.3 样品采集及测定方法

每个试验处理区分为 3 个小区,每个小区 18 m²,每年 10 月 5 日左右收获玉米.分别于 2001、2006 和 2016 年将玉米收获后,在各处理的小区内,使用直径为 5 cm 的土钻采用对角线法采集 0~20 cm 土层土壤混合样品.将采集的样品装入封口袋,带回实验室,去除石块、动植物残体等,分为两份,一份过 2 mm 筛后,于 -20℃ 的冰箱内保存,供土壤酶活性测定;另一份置于实验室内自然风干、去杂、过 0.149 mm 筛后供土壤 SOC、TN 和 TP 等的测定.

土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法测定,土壤全氮采用凯氏定氮法测定,有效氮采用扩散法,土壤全磷采用硫酸高氯酸消煮-钼锑抗比色法,土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法^[16].与碳循环相关的土壤 β-1,4-葡萄糖苷酶(BG)、与氮循环相关的土壤 β-1,4-N-乙酰葡萄糖氨糖苷酶(NAG)以及与磷转化相关的碱性磷酸酶(AP)均采用微孔板荧光法^[17],其底物分别为 4-Methylumbelliferyl-β-D-glucopyranoside、4-Methylumbelliferyl N-acetyl-β-D-

glucosaminide 和 4-Methylumbelliferyl phosphate.酶活性计算参考 Deforest^[18] 的研究,单位为 nmol·(h·g)⁻¹.土壤元素碳氮比(C/N)、碳磷比(C/P)和氮磷比(N/P)分别通过 SOC:TN、SOC:TP 和 TN:TP 计算得到,土壤胞外酶计量比 EEA_{C/N}、EEA_{C/P}和 EEA_{N/P}分别采用 lnBG:lnNAG、lnBG:lnAP 和 lnNAG:lnAP 计算得出.酶化学计量比的向量长度(Vector L)和角度(Vector A)用于量化微生物受碳限制和受氮或磷限制的相对情况,Vector L 越长,表示微生物受碳限制越大;Vector A < 45°和 Vector A > 45°分别表示土壤微生物受氮限制和磷限制的相对程度,偏离程度越大,限制越强.

向量角(Vector A)和向量长度(Vector L)的计算公式^[19]如下:

$$\text{Vector L} = \text{SQRT}[(\text{BG:AP})^2 + (\text{BG:NAG})^2] \quad (1)$$

$$\text{Vector A} = \text{Degrees}[\text{atan2}(\text{BG:AP}, \text{BG:NAG})] \quad (2)$$

式中,SQRT 为开方运算函数;Degrees 为角度转换函数;Atan2 为反正切函数.

本研究中外源有机碳、氮和磷输入主要来自作物残茬(根系+秸秆残茬)秸秆还田及有机粪肥.除了秸秆直接还田外,其他管理方式下在作物收获时地上部分均随籽粒全部移走,其有机碳和氮、磷投入主要来自作物地下部分根系、残茬和肥料.表 1 为长期不同秸秆还田处理在初始年至 2001、2006 和 2016 年的碳、氮、磷投入量.其中,作物来源的有机碳、氮和磷投入计算公式^[20]为:

$$E_{\text{input}} = [(Y_g + Y_s) \times R \times \text{Dr} + \text{Rs} \times Y_s] \times (1 - W) \times E_{\text{crop}} / 1\,000 \quad (3)$$

式中, E_{input} 为作物来源的有机碳、氮和磷投入,kg·hm⁻², Y_g 为作物籽粒产量,kg·hm⁻², Y_s 为秸秆产量,kg·hm⁻²;R 为光合作用进入地下部分的碳的比例;Dr 为玉米根系生物量平均分布在 0~40 cm 土层的比例;Rs 为作物收割留茬占秸秆的比例;W 为玉米地上部分风干样的含水量,g·kg⁻¹;E_{crop} 为玉米地上部分风干样的含碳量、含氮量和含磷量,g·kg⁻¹.

本文中所有数据利用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件进行处理,作图用 Origin 2018 完成.采用

表 1 长期不同秸秆还田处理土壤碳、氮、磷投入量/kg·hm⁻²

Table 1 Input amount of soil carbon,nitrogen,and phosphorus under different long-term straw returning treatments/kg·hm⁻²

处理	碳投入			氮投入			磷投入		
	2001 年	2006 年	2016 年	2001 年	2006 年	2016 年	2001 年	2006 年	2016 年
覆盖还田	11 520	19 350	39 790	1 040	1 620	2 860	430	650	1 070
直接还田	33 990	56 700	119 350	1 720	2 750	5 260	510	790	1 370
过腹还田	66 380	101 650	172 500	2 200	3 370	5 690	2 390	3 590	5 780
不还田	10 000	16 550	35 600	990	1 530	2 730	420	640	1 060

Duncan 多重比较分析土壤化学性质和酶活性及计量比的差异显著性,所有结果均以“平均值 ± 标准误差”表示. 利用 Pearson 相关分析进行土壤元素及其计量比、胞外酶活性及其计量比与土壤有效养分的相关性分析.

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田处理土壤元素计量比变化特征

1992 年为试验初始年,于 2001 年、2006 年和 2016 年测定各还田处理土壤的有机碳、全量和有效氮、磷含量,结果如表 2 所示.

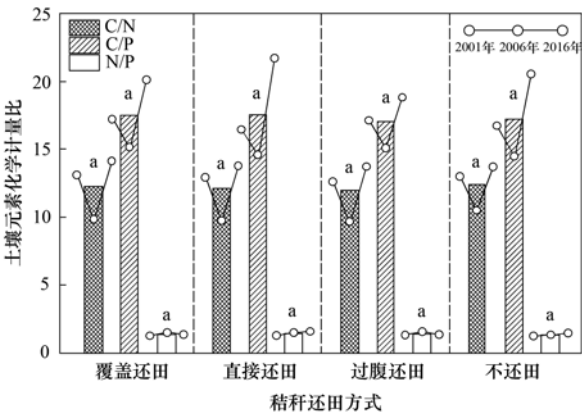
图 1 为长期不同秸秆还田对土壤碳、氮和磷计量比的影响. 试验初期(1992 年)土壤 C/N 和

C/P 分别为 13.15 和 18.28. 长期不同秸秆还田处理土壤 C/N 和 C/P 范围分别为 9.81 ~ 14.28 和 14.58 ~ 21.92,均值分别为 12.36 和 17.51. 不同秸秆还田方式下土壤 C/N 和 C/P 随时间推移均呈现出先降低后升高的变化趋势,土壤 C/N 和 C/P 均值在 4 种还田处理间均无显著性差异. 试验初期土壤 N/P 为 1.39,长期秸秆还田处理土壤 N/P 变化范围在 1.27 ~ 1.57 之间,均值为 1.42. 长期不同秸秆还田处理土壤 N/P 随时间推移基本保持不变,且土壤 N/P 均值在不同还田处理间均无显著性差异. 由以上可知,长期不同秸秆还田处理,可以提高土壤 C/N 和 C/P,对土壤 N/P 的影响较小.

表 2 长期不同秸秆还田处理土壤养分含量¹⁾

Table 2 Variation characteristics of soil nutrients under different long-term straw returning treatments						
处理	年份	$\omega(\text{SOC})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TN})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{有效氮})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TP})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{有效磷})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
初始值	1992	13.81	1.05	117.69	0.76	4.84
	2001	14.03	1.06	103.30	0.80	14.40
	2006	11.90	1.20	82.60	0.77	19.46
	2016	16.53	1.16	59.33	0.81	32.11
	均值	14.15A	1.14AB	81.74A	0.79AB	21.99A
覆盖还田	2001	13.66	1.04	98.00	0.82	16.64
	2006	11.87	1.20	91.10	0.81	25.56
	2016	17.73	1.27	59.33	0.81	32.30
	均值	14.42A	1.17AB	82.81A	0.81B	24.83A
	2001	14.55	1.14	99.20	0.84	27.23
过腹还田	2006	13.63	1.39	82.20	0.90	56.04
	2016	17.60	1.27	72.31	0.93	73.72
	均值	15.26A	1.27B	84.57A	0.89C	52.33B
不还田	2001	13.20	1.01	78.50	0.78	14.60
	2006	10.97	1.04	69.00	0.75	17.09
	2016	15.46	1.12	53.77	0.75	28.88
	均值	13.21A	1.06A	67.09A	0.76A	20.19A

1) 不同大写字母表示不同秸秆还田处理间差异显著($P < 0.05$)



不同小写字母表示不同还田处理间差异显著($P < 0.05$)

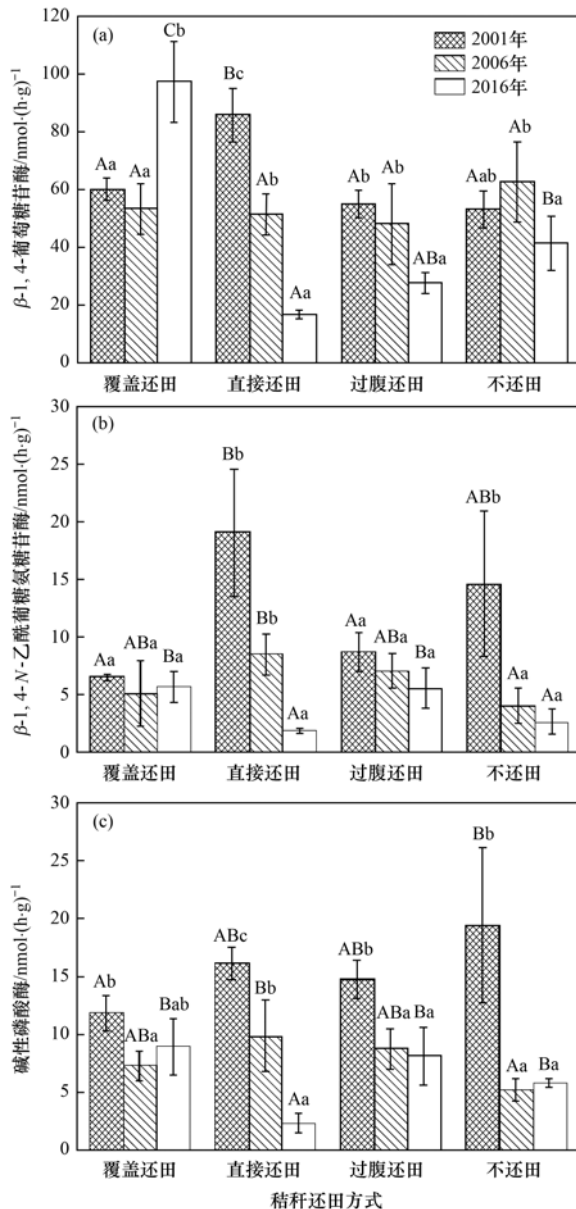
图 1 长期不同秸秆还田对土壤碳、氮和磷计量比的影响

Fig. 1 Effects of different long-term straw returning on the ratios of soil carbon, nitrogen, and phosphorus

2.2 不同秸秆还田处理土壤胞外酶及计量比变化特征

从图 2 中可知,长期不同秸秆还田处理土壤 BG 活性为 16.88 ~ 97.20 $\text{nmol}\cdot(\text{h}\cdot\text{g})^{-1}$,秸秆直接还田和过腹还田处理土壤 BG 活性随时间推移呈下降趋势,秸秆覆盖还田土壤 BG 表现为 2016 年显著高于其他两个年份. 2016 年覆盖还田处理土壤 BG 活性为 97.20 $\text{nmol}\cdot(\text{h}\cdot\text{g})^{-1}$,显著高于其他 3 种还田处理. 不同秸秆还田处理土壤 NAG 和 AP 活性范围分别为 2.02 ~ 19.14 $\text{nmol}\cdot(\text{h}\cdot\text{g})^{-1}$ 和 2.36 ~ 19.38 $\text{nmol}\cdot(\text{h}\cdot\text{g})^{-1}$,二者在秸秆直接还田处理和过腹还田处理均随时间的推移呈下降趋势,土壤 AP 活性在秸秆覆盖还田表现为 2001 年显著高于 2016 年. 2016 年土壤 NAG 活性表现为覆盖还田

和过腹还田处理显著高于直接还田和不还田处理,土壤 AP 活性为直接还田处理显著低于其他 3 种处理. 综上,与不还田相比,长期秸秆覆盖还田显著提高了土壤 BG 活性和 NAG 活性 ($P < 0.05$),长期秸秆直接还田显著降低了土壤 BG 活性和 AP 活性 ($P < 0.05$),长期过腹还田可以显著提高土壤 NAG 活性 ($P < 0.05$).



不同大写字母表示同一年份不同秸秆还田处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同还田方式不同年份间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图2 长期不同秸秆还田对土壤胞外酶活性的影响

Fig. 2 Effects of different long-term straw returning on soil extracellular enzyme activities

长期不同秸秆还田处理土壤酶化学计量比的变化如图 3 所示. 1992 年土壤 $\text{EEA}_{\text{C/N}}$ 、 $\text{EEA}_{\text{C/P}}$ 和 $\text{EEA}_{\text{N/P}}$ 分别为 1.34、1.81 和 1.36, 长期不同秸秆还田处理 $\text{EEA}_{\text{C/N}}$ 、 $\text{EEA}_{\text{C/P}}$ 和 $\text{EEA}_{\text{N/P}}$ 分布在 1.48 ~

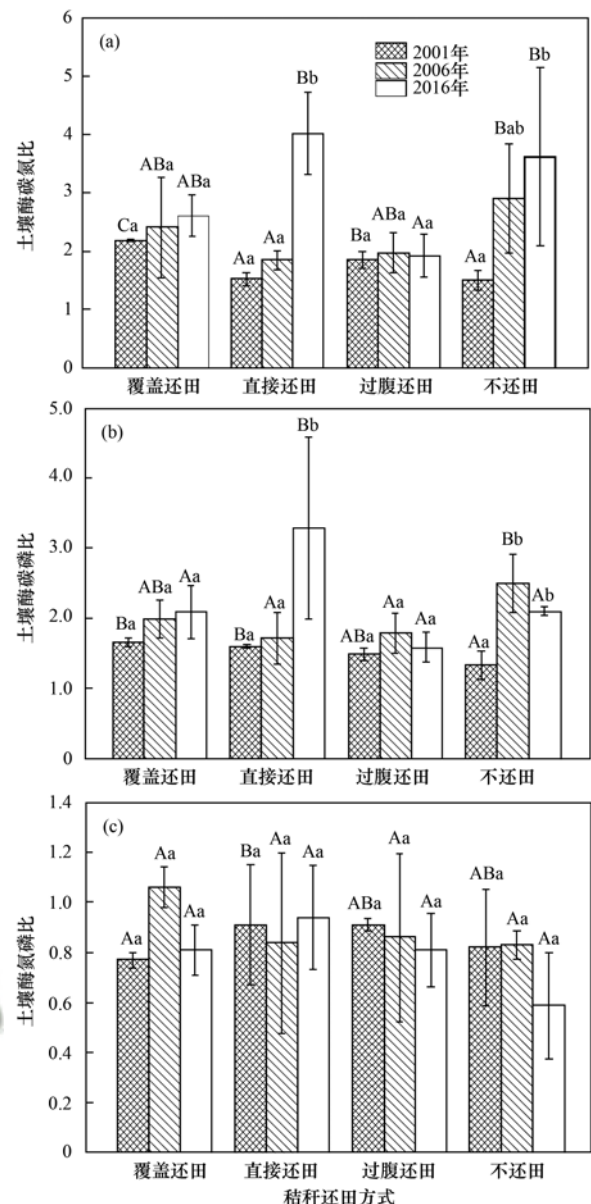


图3 长期不同秸秆还田对土壤胞外酶化学计量比的影响

Fig. 3 Effect of different long-term straw returning on the stoichiometric ratio of soil extracellular enzymes

4.02、1.34 ~ 3.29 和 0.59 ~ 1.06 之间, 均值分别为 2.35、1.93 和 0.84. 不同年份之间, 秸秆覆盖还田和过腹还田土壤 $\text{EEA}_{\text{C/N}}$ 、 $\text{EEA}_{\text{C/P}}$ 和 $\text{EEA}_{\text{N/P}}$ 均无显著性差异. 长期秸秆直接还田和不还田处理土壤 $\text{EEA}_{\text{C/N}}$ 和 $\text{EEA}_{\text{C/P}}$ 均为 2016 年显著高于处理前期, 其中长期秸秆直接还田 2016 年土壤 $\text{EEA}_{\text{C/N}}$ 分别是 2006 年和 2001 年的 2.20 倍和 2.66 倍, 2016 年 $\text{EEA}_{\text{C/P}}$ 分别是 2006 年和 2001 年的 1.91 倍和 2.06 倍, 土壤 $\text{EEA}_{\text{N/P}}$ 在时间上变化无显著差异. 经过 24 a 长期秸秆还田, 2016 年土壤 $\text{EEA}_{\text{C/N}}$ 表现为直接还田和不还田处理较高, 覆盖还田次之, 过腹还田最低; 土壤 $\text{EEA}_{\text{C/P}}$ 则表现为直接还田显著高于其他 3 种处理; 土壤 $\text{EEA}_{\text{N/P}}$ 在 4 种处理方式下无显著差异. 综上可看出, 过腹还田可以显著降低土壤

EEA_{C/N} ($P < 0.05$), 直接还田可以显著提高土壤 EEA_{C/P} ($P < 0.05$), 3 种秸秆还田方式对土壤 EEA_{N/P} 均无显著影响。

2.3 不同秸秆还田处理土壤胞外酶计量的向量变化特征

图 4 表明,1992 年土壤酶化学计量的向量角度小于 45°,经过长期不同秸秆还田处理向量角度总体大于 45°,且不同处理不同年份之间向量角度均无显著性差异,这说明本研究区域试验前土壤微生物主要受氮的限制,实施秸秆还田后,土壤微生物整体受磷的限制[图 4(a)].图 4(b) 显示,秸秆覆盖还田土壤酶计量的向量长度表现为:2016 年 >

2006 年 > 2001 年,这说明在秸秆覆盖还田处理随着时间的推移,土壤微生物受到碳的限制增强.土壤酶计量的向量长度在 2001 年表现为,覆盖还田处理最高,直接还田和过腹还田处理居中,不还田处理最低;2006 年表现出直接还田和过腹还田处理显著低于不还田处理;2016 年秸秆覆盖还田、直接还田和不还田处理基本一致,过腹还田处理较不还田处理显著降低 11.4%.以上结果表明,长期秸秆还田土壤微生物整体面临碳限制和磷限制,秸秆覆盖还田处理土壤微生物受碳的限制程度逐渐增强,秸秆过腹还田处理微生物代谢受碳的限制程度相对减弱。

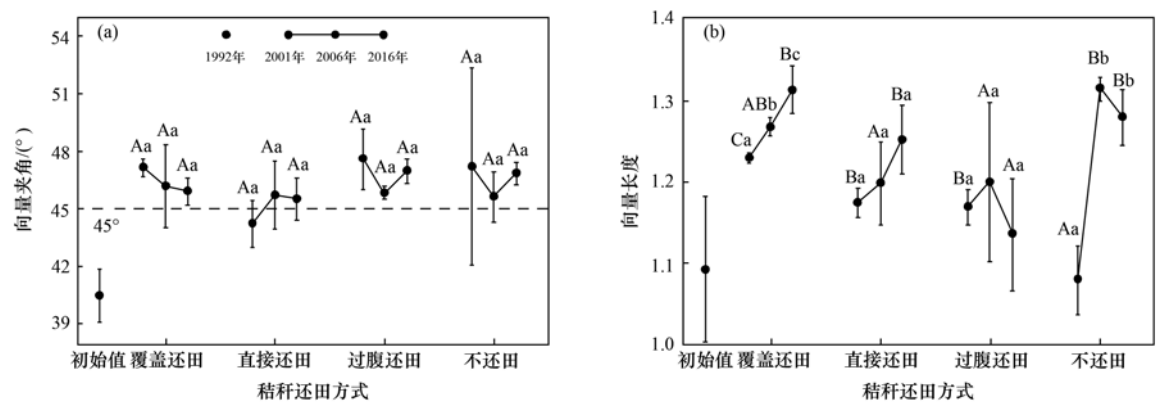


图 4 长期不同秸秆还田土壤酶化学计量的向量变化特征

Fig. 4 Vector variation characteristics of soil enzyme stoichiometry with different long-term straw returning treatments

2.4 土壤元素及其计量比、胞外酶活性及其计量比与土壤有效养分的关联分析

对土壤元素及其计量比、胞外酶活性及其计量比与土壤有效养分进行 Pearson 相关分析,结果如表 3 所示. BG 活性与碳投入和氮投入呈显著负相关,NAG 和 AP 活性与土壤有效氮呈显著

正相关,与土壤 N/P 呈显著或极显著负相关. EEA_{C/N} 与有效氮呈极显著负相关,相关系数为 -0.741;与 C/P 和 N/P 均呈显著正相关,相关系数分别为 0.616 和 0.596. EEA_{C/P} 与有效氮呈显著负相关,相关系数为 0.630;与 N/P 呈显著正相关,相关系数为 0.595.

表 3 土壤元素及其计量比、胞外酶活性及其计量比与土壤有效养分的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis of soil elements, soil extracellular enzyme activities, and their stoichiometric ratios

	β -1,4-葡萄糖苷酶	β -1,4-N-乙酰葡萄糖氨糖苷酶	碱性磷酸酶	土壤酶碳氮比	土壤酶碳磷比	土壤酶氮磷比
有机碳	-0.319	-0.291	-0.250	0.373	0.267	-0.374
全氮	-0.485	-0.444	-0.510	0.168	0.242	-0.034
有效氮	0.250	0.588 *	0.635 *	-0.741 **	-0.630 *	0.506
全磷	-0.238	0.092	0.073	-0.400	-0.302	0.274
有效磷	-0.436	-0.300	-0.318	-0.018	-0.033	-0.089
碳氮比	0.003	0.018	0.107	0.248	0.082	-0.355
碳磷比	-0.253	-0.370	-0.317	0.616 *	0.438	-0.561
氮磷比	-0.449	-0.679 *	-0.760 **	0.596 *	0.595 *	-0.309
碳投入	-0.609 *	-0.283	-0.358	0.100	0.171	0.005
氮投入	-0.605 *	-0.445	-0.556	0.367	0.409	-0.142
磷投入	-0.447	-0.206	-0.169	-0.153	-0.169	-0.054

1) * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)

3 讨论

3.1 土壤元素化学计量比对不同秸秆还田方式的响应

土壤 C/N 可以衡量土壤碳氮矿化能力、有机质分解速率和营养平衡状况,是反映土壤质量变化的敏感指标^[3]. C、N 和 P 不平衡性增加或降低会引起土壤 C/N、C/P 和 N/P 的变化^[21]. 本研究 24 a 秸秆还田试验土壤 C/N 为 12.36 (均值),高于中国土壤平均值(11.9)^[22],符合我国农田土壤 C/N 变化范围(7~13)^[23],并且土壤有机质矿化速率表现出相对缓慢的特点^[24]. 长期秸秆还田下土壤 C/N 低于试验初期(13.15),这说明长期不同秸秆还田促进了土壤有机质分解. 土壤 C/P 是 P 有效性高低或可获得性大小的表征参数,C/P 越小,土壤中 P 的有效性就越高^[25]. 本研究区长期秸秆还田土壤 C/P 均值(17.51)低于全国平均水平(61)^[22],说明本区域土壤微生物分解有机质释放有效磷的潜力较大,提高了土壤有效磷含量^[26]. 在整个还田过程中,土壤中 C 的含量先降低后升高,而土壤 N 和 P 含量变化微小,相对稳定(表 2),所以土壤 C/N 和 C/P 呈现出先降低后升高的变化趋势. 土壤 N/P 可以有效预测养分限制类型^[25]. 长期不同秸秆还田处理土壤 N/P 差异不显著,说明随着秸秆还田的推进,有机物料的输入、N 肥 P 肥的施用和作物吸收等,N 和 P 的输入和输出过程对土壤中 N 和 P 的影响基本一致,土壤中 N 和 P 的变化基本协同. 综上,长期来看,将秸秆以过腹还田、覆盖还田和直接还田等方式归还土壤中,可以改变土壤养分结构,提高土壤 C/N 和 C/P,促进土壤有机质分解.

3.2 土壤胞外酶及其化学计量比对不同秸秆还田的响应

土壤酶活性可以反映微生物对代谢资源的需求状况,而土壤胞外酶化学计量比通常用来表征土壤微生物的相对资源限制^[27]. 本研究中土壤酶 C:N:P 大致为 2.35:1.00:1.22,而全球尺度土壤酶 C:N:P 约为 1:1:1^[5],表明长期秸秆还田处理下研究区土壤中可利用的 C、P 元素相对缺乏,土壤微生物为获取限制性养分以满足自身生长和代谢需求而对特定胞外酶的分泌势必会改变土壤酶计量比^[28]. 本文结果显示,与不还田处理相比,2016 年秸秆覆盖还田处理提高了土壤 BG 活性和 NAG 活性,且加剧了土壤微生物的碳限制程度. 这一方面可能是秸秆覆盖过程随着淋溶等作用进入土壤中的可溶性有机物质促进微生物的生长^[29],进而增加了土壤相关酶的活性;另一方面是秸秆覆盖过程中土壤温度和水份条

件相对良好^[30],间接地改变了土壤微生物生长条件,进而影响土壤酶活性. 这与王元基^[31]对果园中 13 a 的玉米秸秆覆盖研究结果相契合. 长期秸秆过腹还田处理提高了土壤 NAG 活性,显著降低了土壤 $EEA_{C/N}$. 牛粪 C/N 较低,N 素含量丰富,作为有机肥输入农田土壤,分解后增加了土壤微生物的数量,提高了微生物的活性^[32],刺激了土壤中的 NAG 活性. 另外,在图 4 中发现过腹还田处理微生物碳限制有回缓趋势,且根据表 2 来看,过腹还田处理土壤有机碳含量在不同处理间最高,这可能与牛粪的持续输入显著提高了土壤有机碳含量有关^[15],从而降低了 BG 活性,进而导致土壤 $EEA_{C/N}$ 降低.

相比于不还田处理,2016 年秸秆直接还田处理降低了土壤 BG 活性和 AP 活性,提高了土壤 $EEA_{C/P}$. 图 2 显示,直接还田处理下土壤 BG 和 AP 活性均显著低于不还田处理,根据图 4 可知本区域微生物整体受 C 和 P 的限制,由此可以确定,长期秸秆直接还田过程中,土壤微生物 C 源和与 C 和 P 循环相关的酶促反应底物供应不足,土壤微生物的生长受限,最终使土壤 BG 和 AP 活性降低^[33]. 另一方面,土壤酶活性的表达是微生物群落响应底物计量变化的策略,秸秆中木质素和纤维素等其他化学组成可能会导致微生物群落结构发生改变^[34],从而干扰酶计量与元素计量之间的关系,导致土壤 $EEA_{C/P}$ 发生变化. 此外,近来也有研究指出,编码水解酶的微生物功能基因相对丰度的变化也可以调整特定的细胞外酶活性^[31,35]. 本文中长期不同秸秆还田对土壤 $EEA_{N/P}$ 无显著影响,可能是土壤中的微生物群落结构和功能并未发生很大变化,微生物释放的与 N 和 P 循环相关的水解酶能够适应不同还田方式产生的特殊生境,从而使 $EEA_{N/P}$ 无明显差异. 也可能是这两种酶活性的变化相对一致,并未使土壤酶计量比发生显著的变化. 综上,由胞外酶活性及其化学计量和向量特征可知,长期秸秆还田土壤微生物整体面临磷限制和碳限制,长期秸秆覆盖还田加剧了微生物碳限制,秸秆过腹还田可以缓解碳限制程度.

另外,土壤酶活性与土壤其它生物化学性质间的关系表现为:施肥影响甚至改变土壤养分循环,同时也影响在这些转化过程中起作用的酶的活性和数量^[36]. 施有机肥增加了土壤微生物量与酶活性,这些增加的酶活性在土壤生态系统中会促进养分循环^[31]. 施无机肥则是通过增加养分投入,提高作物生产力,增加作物根系分泌物,从而向微生物提供一定量 C 源,且化肥中无机氮能调节土壤 C/N,为提高酶活性创造条件^[37]. 长期施用无机肥对土壤酶活

性的影响存在一定的不确定性,有的是负的,有的是正的. 农药对土壤酶活性也有不同程度的抑制作用^[36]. 施肥对土壤酶活性的影响一般只能维持几个月,只有长期施用肥料和农药导致土壤的化学性质发生较大变化时,才会对土壤酶活性产生持久影响.

3.3 秸秆还田下土壤酶计量变化的驱动机制

土壤养分可通过影响微生物的生长而间接作用于土壤酶,使不同的土壤养分和土壤酶活性间存在不同程度的相关性^[38]. 本研究中,土壤 BG 活性与 C 投入和 N 投入呈显著负相关,其原因可能是 C 和 N 是微生物组成的主要元素,它们之间一定的比例有利于微生物生长,进而有利于外源 C 的固定. 土壤 NAG 和 AP 活性均与有效氮呈显著正相关,这与吕来新等^[39]的研究结果一致,表明 N 的有效性与 NAG 和 AP 活性是协同增加的;而 NAG 和 AP 活性均与土壤 N/P 呈显著或极显著负相关,说明 N/P 可能是控制土壤 NAG 和 AP 活性的重要因素之一,这与以往的研究结果相契合^[6,40]. 生长速率理论指出^[41],土壤中充足的 P 素有助于微生物的快速生长. N/P 降低将意味着土壤 P 素的补充,这可以有效缓解本区域由于长期秸秆还田而造成的 P 限制,生物生长速率提高也将增加对养分的需求,这也将促进更高的 NAG 和 AP 活性. $EEA_{C/N}$ 和 $EEA_{C/P}$ 均与有效氮存在负相关关系,有效氮的含量增加时, NAG 和 AP 活性会间接提升,说明微生物群落结构和功能受土壤 N 的有效性的控制,酶活性随之发生改变. $EEA_{C/N}$ 与 C/P 和 N/P 均呈显著正相关, $EEA_{C/P}$ 与 N/P 呈显著正相关,这与张鹏等^[40]的研究结果一致,而乔航等^[42]的研究发现 $EEA_{C/N}$ 与 N/P 呈正相关, $EEA_{C/P}$ 与 C/N 呈正相关,原因可能是其研究样地土壤类型为红壤,与本研究区域土壤性质存在差异. 可见,不同秸秆还田处理下,土壤胞外酶化学计量特征会受到土壤中 N、P 有效性的调控,这将为今后的农业活动提供更为科学的理论依据.

4 结论

(1) 长期不同秸秆还田处理土壤 C/N 和 C/P 先降低后升高,土壤 N/P 基本持平. 不同还田处理间土壤元素计量比差异不显著.

(2) 土壤胞外酶计量比和向量特征揭示,长期秸秆还田处理下土壤微生物整体面临磷限制和碳限制,长期秸秆覆盖还田加剧了微生物碳限制,秸秆过腹还田处理可以缓解碳限制程度.

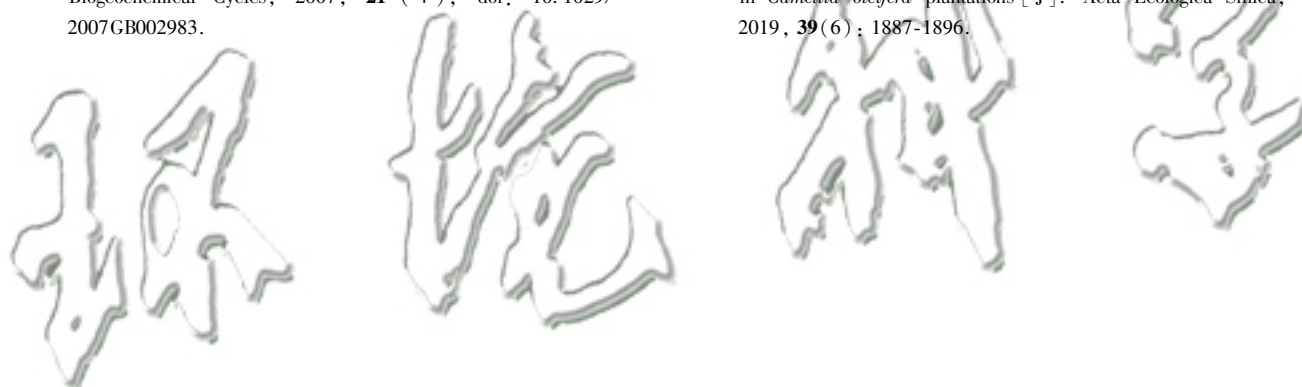
(3) 相关性分析结果表明,长期不同秸秆还田处理下 N、P 有效性、N/P 对土壤胞外酶活性及其化学计量特征均产生了显著的影响.

参考文献:

- [1] 杨琼会,樊红柱,李富程,等. 成都平原冲积水稻土土壤酶活性对轮作模式与长期秸秆还田的响应[J]. 西南农业学报, 2021, **34**(3): 508-513.
- Yang Q H, Fan H Z, Li F C, *et al.* Response of soil enzyme activity to rotation patterns and long-term straw returning in alluvial paddy soil of Chengdu Plain [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, **34**(3): 508-513.
- [2] 张旭冉,张卫青,王海茹,等. 克氏针茅草原土壤生态化学计量特征对放牧强度的响应[J]. 生态学报, 2021, **41**(13): 5309-5316.
- Zhang X R, Zhang W Q, Wang H R, *et al.* Response of soil ecological stoichiometric characteristics to grazing intensity in *Stipa kirschnii* grassland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(13): 5309-5316.
- [3] 张晗,欧阳真程,赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(3): 939-951.
- Zhang H, Ouyang Z C, Zhao X M. Effects of different land use types on ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in farmland soils in Jiangxi Province, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(3): 939-951.
- [4] 高雨秋,戴晓琴,王建雷,等. 亚热带人工林下植被根际土壤酶化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2019, **43**(3): 258-272.
- Gao Y Q, Dai X Q, Wang J L, *et al.* Characteristics of soil enzymes stoichiometry in rhizosphere of understory vegetation in subtropical forest plantations [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, **43**(3): 258-272.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Yuan X B, Niu D C, Gherardi L A, *et al.* Linkages of stoichiometric imbalances to soil microbial respiration with increasing nitrogen addition: evidence from a long-term grassland experiment [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, **138**, doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107580.
- [9] 王保君,金海刚,张红梅,等. 浙北地区秸秆全量还田下氮肥用量对单季晚粳稻生长和土壤养分、碳库的影响[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(2): 60-66.
- Wang B J, Jin H G, Zhang H M, *et al.* Effects of nitrogen application on late single season japonica rice growth, soil nutrient and carbon pool under full straw returning in Northern Zhejiang Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(2): 60-66.
- [10] 徐虎,蔡岸冬,周怀平,等. 长期秸秆还田显著降低褐土层有机碳储量[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, **27**(5): 768-776.
- Xu H, Cai A D, Zhou H P, *et al.* Long-term straw incorporation

- significantly reduced subsoil organic carbon stock in cinnamon soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, **27** (5): 768-776.
- [11] 李守华. 长期秸秆还田对提高小麦-玉米轮作耕层土壤养分及产量分析[J]. *中国农学通报*, 2022, **38**(14): 60-64.
- Li S H. Effect of long-term straw returning on topsoil nutrients and crop yield under wheat-maize rotation [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, **38**(14): 60-64.
- [12] Zhao S C, Li K J, Zhou W, *et al.* Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **216**: 82-88.
- [13] 江叶枫, 叶英聪, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤氮磷生态化学计量空间变异特征及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2017, **54** (6): 1527-1539.
- Jiang Y F, Ye Y C, Guo X, *et al.* Spatial variability of ecological stoichiometry of soil nitrogen and phosphorus in farmlands of Jiangxi Province and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(6): 1527-1539.
- [14] 贺美, 王立刚, 王迎春, 等. 黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(9): 1942-1951.
- He M, Wang L G, Wang Y C, *et al.* Response of the active carbon pool and enzymatic activity of soils to maize straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37** (9): 1942-1951.
- [15] 程曼, 解文艳, 杨振兴, 等. 黄土旱塬长期秸秆还田对土壤养分、酶活性及玉米产量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, **27**(10): 1528-1536.
- Cheng M, Xie W Y, Yang Z X, *et al.* Effects of long-term straw return on corn yield, soil nutrient contents and enzyme activities in dryland of the Loess Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, **27**(10): 1528-1536.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] Marx M C, Wood M, Jarvis S C. A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(12-13): 1633-1640.
- [18] Deforest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and L-DOPA[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(6): 1180-1186.
- [19] 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.
- [20] 黄少辉, 杨军芳, 杨云马, 等. 长期不同施肥措施下华北潮土土壤有机碳的固存变化[J]. *华北农学报*, 2019, **34**(S1): 168-175.
- Huang S H, Yang J F, Yang Y M, *et al.* Soil organic carbon sequestration under long term fertilization practices in fluvo-aquic soil of North China Plain[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, **34**(S1): 168-175.
- [21] Zhao F Z, Sun J, Ren C J, *et al.* Land use change influences soil C, N and P stoichiometry under 'Grain-to-Green Program' in China [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**, doi: 10.1038/srep10195.
- [22] 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.
- [23] 许泉, 芮雯奕, 刘家龙, 等. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异[J]. *生态与农村环境学报*, 2006, **22**(3): 57-60.
- Xu Q, Rui W Y, Liu J L, *et al.* Spatial variation of coupling characteristics of soil carbon and nitrogen in farmland of China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, **22**(3): 57-60.
- [24] 程欢, 宫渊波, 吴强, 等. 川西亚高山/高山典型土壤类型有机碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J]. *自然资源学报*, 2018, **33**(1): 161-172.
- Cheng H, Gong Y B, Wu Q, *et al.* Content and ecological stoichiometry characteristics of organic carbon, nitrogen and phosphorus of typical soils in sub-alpine/alpine mountain of western Sichuan [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33** (1): 161-172.
- [25] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, **28**(8): 3937-3947.
- Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(8): 3937-3947.
- [26] 谢明君, 李广, 闫丽娟, 等. 黄土丘陵区春小麦水分调控下植物—土壤碳氮磷化学计量学及其稳态性特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, **40**(1): 184-192, 202.
- Xie M J, Li G, Yan L J, *et al.* Stoichiometry and steady-state characteristics of plant-soil carbon, nitrogen and phosphorus under water regulation of spring wheat in Loess Hilly Region [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, **40**(1): 184-192, 202.
- [27] 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.
- [28] 史丽娟, 王辉民, 付晓莉, 等. 中亚热带典型人工林土壤酶活性及其化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(6): 1980-1988.
- Shi L J, Wang H M, Fu X L, *et al.* Soil enzyme activities and their stoichiometry of typical plantations in mid-subtropical China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(6): 1980-1988.
- [29] 马子宗. 覆盖方式对渭北旱塬春玉米水肥利用效率及土壤酶活性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- Ma Z Z. Effects of covering methods on spring water and fertilizer use efficiency and soil enzyme activities in Weiwei dry plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.
- [30] 付鑫. 旱作冬小麦农田秸秆覆盖的土壤生态效应及对作物产量形成的影响[D]. 西安: 西北大学, 2019.
- Fu X. Effect of straw mulching on soil ecological properties and crop production in a dryland winter wheat field [D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [31] 王元基. 覆盖模式下黄土高原苹果园土壤质量提升效应的微生物学机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- Wang Y J. The microbiological mechanism of soil quality improvement effect under mulching pattern in apple orchard on Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.
- [32] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, **32** (9): 130-135.
- Li X H, Guo H H, Zhu Z L, *et al.* Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(9): 130-135.
- [33] 刘仁, 陈伏生, 方向民, 等. 凋落物添加和移除对杉木人工林土壤水解酶活性及其化学计量学的影响[J]. *生态学报*, 2020, **40**(16): 5739-5750.
- Liu R, Chen F S, Fang X M, *et al.* Effects of litter addition and

- removal on soil hydrolytic enzyme activities and ecoenzymatic stoichiometry in Chinese fir plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(16): 5739-5750.
- [34] Liang X, Yuan J, Yang E, *et al.* Responses of soil organic carbon decomposition and microbial community to the addition of plant residues with different C:N ratio[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2017, **82**: 50-55.
- [35] Chen J, Sinsabaugh R L. Linking microbial functional gene abundance and soil extracellular enzyme activity: implications for soil carbon dynamics [J]. *Global Change Biology*, 2021, **27**(7): 1322-1325.
- [36] 樊军. 黄土高原旱地长期定位试验土壤酶活性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
- [37] 肖琼, 王齐齐, 邹磊, 等. 施肥对中国农田土壤微生物群落结构与酶活性影响的整合分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, **24**(6): 1598-1609.
- Xiao Q, Wang Q Q, Wu L, *et al.* Fertilization impacts on soil microbial communities and enzyme activities across China's croplands: a meta-analysis [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, **24**(6): 1598-1609.
- [38] Koch O, Tschirko D, Kandeler E. Temperature sensitivity of microbial respiration, nitrogen mineralization, and potential soil enzyme activities in organic alpine soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, **21**(4), doi: 10.1029/2007GB002983.
- [39] 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 等. 红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1960-1967.
- lv L X, Song L, Liu Z L, *et al.* Response of soil enzyme activity and chemical properties to nitrogen addition in a Korean Pine Plantation [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1960-1967.
- [40] 张鹏, 王国梁. 黄土高原刺槐林土壤酶化学计量沿着环境梯度变化[J]. *水土保持研究*, 2020, **27**(1): 161-167.
- Zhang P, Wang G L. Changes of soil enzyme in *Robinia pseudoacacia* forest along environmental gradient on the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(1): 161-167.
- [41] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. *植物生态学报*, 2005, **29**(6): 1007-1019.
- Zeng D H, Chen G S. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, **29**(6): 1007-1019.
- [42] 乔航, 莫小勤, 罗艳华, 等. 不同林龄油茶人工林土壤酶化学计量及其影响因素[J]. *生态学报*, 2019, **39**(6): 1887-1896.
- Qiao H, Mo X Q, Luo Y H, *et al.* Patterns of soil ecoenzymatic stoichiometry and its influencing factors during stand development in *Camellia oleifera* plantations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(6): 1887-1896.



CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM _{2.5} in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i>	(2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i>	(2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i>	(2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM _{2.5} in Winter in Urban Taiyuan, China: Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i>	(2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i>	(2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i>	(2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i>	(2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i>	(2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i>	(2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i>	(2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i>	(2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong, <i>et al.</i>	(2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i>	(2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite/Activated Carbon Composite Under Batch Experiments: Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i>	(2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i>	(2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i>	(2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei, <i>et al.</i>	(2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i>	(2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i>	(2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i>	(2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i>	(2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwuling Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i>	(2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i>	(2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i>	(2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-chuan, <i>et al.</i>	(2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i>	(2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i>	(2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i>	(2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i>	(2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i>	(2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i>	(2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i>	(2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i>	(2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i>	(2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i>	(2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i>	(2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i>	(2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i>	(2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i>	(2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i>	(2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i>	(2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i>	(2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity: Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping, <i>et al.</i>	(2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i>	(2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i>	(3003)