

目次

基于时间序列分解的京津冀区域PM _{2.5} 和O ₃ 空间分布特征	姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹 (2487)
基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析	周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕 (2497)
基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测	杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪 (2507)
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估	符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利 (2516)
京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估	高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬 (2525)
2022年北京市城区PM _{2.5} 水溶性离子含量及其变化特征	陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献 (2537)
郑州市冬春季PM _{2.5} 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估	陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛 (2548)
淄博市供暖前后PM _{2.5} 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险	孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文 (2558)
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析	李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元 (2571)
天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析	卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发 (2581)
基于空间尺度效应的山东省PM _{2.5} 浓度时空变化及空间分异地理探测	徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫 (2596)
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势	武婷, 崔焱文, 肖成德, 翟增秀, 韩萌 (2613)
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析	张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮 (2622)
景观格局对河流水质影响的尺度效应Meta分析	王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏娟, 陈丁江 (2631)
白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源	孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升 (2640)
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析	胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹 (2651)
庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价	刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红 (2665)
农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价	王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红 (2678)
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征	韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁 (2686)
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析	金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥 (2694)
再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征	贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚 (2707)
水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响	梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯 (2715)
银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系	蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟 (2727)
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析	张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然 (2741)
市政污水中吗啡来源辨析	邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高 (2748)
滦河流域生态环境动态遥感评价	李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪 (2757)
黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素	王奕洪, 孙学堂 (2767)
基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例	蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦 (2780)
贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因	李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬 (2793)
2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子	周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛 (2806)
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻 (2817)
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响	武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平 (2828)
西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响	江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家 (2840)
不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析	黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤 (2848)
基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测	胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏 (2859)
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响	孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟 (2871)
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性	周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰 (2881)
控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵 (2891)
生物炭对黄绵土中NO ₃ -N运移过程影响及模拟	白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇 (2905)
中国农田土壤重金属污染分析与评价	杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛 (2913)
城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望	王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰 (2926)
场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展	陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川 (2939)
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析	戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明 (2952)
拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价	韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成 (2962)
银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析	于路加, 马海军, 王翠平 (2971)
基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估	陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨菡, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (2983)
西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型	唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧 (2995)
贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划	韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波 (3005)
柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应	刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒 (3016)
改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响	肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明 (3027)
生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响	郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅 (3037)
基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应	姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋 (3047)
微塑料对土壤N ₂ O排放及氮素转化的影响研究进展	刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博 (3059)
土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响	戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3069)
养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征	宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华 (3078)
聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响	李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平 (3088)
鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测	俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽 (3098)
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径	徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡 (3107)
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析	徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪 (3119)

生物炭对黄绵土中 NO_3^- -N运移过程影响及模拟

白一茹¹, 刘旭¹, 张钰涵¹, 张睿媛¹, 马艳¹, 王幼奇^{2,3*}

(1. 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021; 3. 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021)

摘要: 为探究不同施加量生物炭对黄绵土 NO_3^- -N运移过程及特征的影响, 以生物炭与黄绵土质量比分别为0%(T0)、1%(T1)、2%(T2)、3%(T3)、4%(T4)和5%(T5)的6组混合土样为研究对象, 以 NO_3^- -N为示踪物质, 通过室内土柱溶质运移模拟试验, 研究了不同生物炭施加量对黄绵土中 NO_3^- -N运移过程影响并进行模型模拟. 结果表明, NO_3^- -N在黄绵土中的穿透曲线随生物炭施加量增加明显右移, 峰值逐渐降低. 初始穿透时间、完全穿透时间及穿透总历时均随生物炭施加量增大而增加, T1、T2、T3、T4和T5处理 NO_3^- 穿透总历时分别是T0的1.26、2.31、2.72、3.22和3.57倍. 两区模型(TRM)的 $R^2 > 0.997$, $\text{RMSE} < 2.083$, 相较于对流-弥散方程(CDE), TRM模型拟合精度更高, 能较好地模拟不同含量生物炭施加后的黄绵土中 NO_3^- -N运移过程. 对TRM模型拟合参数进行分析发现, 随生物炭施加量增加, 平均孔隙流速、水动力弥散系数和可动区含水比率均逐渐减小, 而弥散度和质量交换系数呈现增加的趋势. 研究显示, 生物炭有效增强了黄绵土对 NO_3^- -N的固持能力, 减少了 NO_3^- -N向地下水体的渗漏, 对保持土壤肥力与防止地下水污染具有重要作用.

关键词: 生物炭; 硝态氮; 穿透曲线; 对流-弥散方程(CDE); 两区模型(TRM)

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2905-08 DOI: 10.13227/j.hjks.202305075

Effect of Biochar on NO_3^- -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation

BAI Yi-ru¹, LIU Xu¹, ZHANG Yu-han¹, ZHANG Rui-yuan¹, MA Yan¹, WANG You-qi^{2,3*}

(1. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The objective of this study was to explore the effects of different amounts of biochar on the migration process and characteristics of NO_3^- -N in loessial soil. In this study, six groups of mixed soil samples with biochar and loessial soil mass ratios of 0% (T0), 1% (T1), 2% (T2), 3% (T3), 4% (T4), and 5% (T5) were used as research objects. NO_3^- -N was used as the tracer. Through the indoor soil column solute transport simulation tests, the effects of different biochar application amounts on the NO_3^- -N transport process in loessial soil were simulated and studied. The results showed that the breakthrough curve of NO_3^- -N in loessial soil shifted to the right with the increasing of biochar application, and the peak value gradually decreased. The initial penetration time, complete penetration time, and total penetration time increased with the increasing of biochar application amount. The total penetration time of NO_3^- in the T1, T2, T3, T4, and T5 treatments was 1.26, 2.31, 2.72, 3.22, and 3.57 times that of T0, respectively. The R^2 was > 0.997 and RMSE was < 2.083 of the two-zone model (TRM). Compared with the convection-dispersion equation (CDE), the TRM model had higher fitting accuracy and could better simulate the NO_3^- -N migration process in loessial soil after the application of different contents of biochar. The analysis of the fitting parameters of the TRM model showed that the average pore velocity, hydrodynamic dispersion coefficient, and water content ratio in the movable zone gradually decreased with the increasing of biochar application, whereas the dispersion and mass exchange coefficient showed an increasing trend. The results showed that biochar application could effectively enhance the ability of loessial soil to fix NO_3^- -N, reduce the leakage of NO_3^- -N to groundwater, and play an important role in maintaining soil fertility and preventing groundwater pollution.

Key words: biochar; nitrate nitrogen; penetration curve; convection dispersion equation(CDE); two region model(TRM)

为保障国家粮食安全, 我国每年都有大量的氮肥被投入到农田生态系统中, 2021年全国农用氮肥施用量为1 745.3万 $\text{t}^{[1]}$, 氮肥的过量施用会使得大量氮素以活性氮形式(NO_3^- -N和 NH_4^+ -N)运移进入地表水或地下水中^[2].《第二次全国污染源普查公报》显示, 2017年全国农业面源水污染排放量中总氮为141.49万 t , 其中种植业总氮流失71.95万 t 占总排放量的50.85%.土壤氮素的运移淋失不仅造成了土壤质量的下降^[3,4], 而且污染了地表水及地下水^[5,6], 对人体及整个生态系统造成直接或间接的威胁.其中氮肥中的 NO_3^- -N溶解度大, 易溶于水, 且不易被土壤胶体吸附, 相较于 NH_4^+ -N更易从土壤中流失^[7,8]. NO_3^- -N的运移淋失是导致水资源污染的重要

原因之一, 因此研究 NO_3^- -N在土壤中的运移过程及规律对土壤养分的调控及农业面源污染防治具有重要的理论及现实意义^[9~11].

生物炭作为土壤改良剂具有微观孔隙发育好、比表面积大的特点^[12,13], 能够吸附土壤中未被作物利用的营养元素, 延缓养分在土壤中的释放, 促进作物根系生长和提高作物产量^[14~17], 同时在一定程度上减少养分流失, 削减环境污染的风险^[18,19].已有

收稿日期: 2023-05-08; 修订日期: 2023-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(2023AAC03046); 国家自然科学基金项目(41867003); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG02011)

作者简介: 白一茹(1984~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤污染物迁移及修复, E-mail: yr0823@163.com

* 通信作者, E-mail: wyq0563@163.com

研究表明,生物炭能够增强土壤持氮能力,有效地减少土壤氮素的淋失^[20-22].尹秀玲等^[23]研究发现,玉米秸秆生物炭添加量为2%时可显著增强暗棕壤对氮的结合能力和减少氮素流失.Zheng等^[24]研究发现,添加芦竹生物炭会显著减少土壤中氮素的淋失.张雪莲等^[25]研究表明,化肥配施生物炭能有效阻控耕层 NO_3^- -N向下层土壤淋溶迁移.朱启林等^[26]研究指出,生物炭对土壤 NO_3^- -N具有较高的固持能力,同时配施秸秆可以降低 NO_3^- -N淋失.虽然生物炭对土壤氮素的保持和减少淋失作用已有一定的研究,但针对不同生物炭施加量条件下黄绵土中 NO_3^- -N的运移特征研究较少,尤其是溶质运移模型模拟方面比较缺乏.

黄绵土质地疏松,土壤结构易被侵蚀破坏,养分和有机质含量较低,保水保肥能力较差^[27-30].基于此,本研究通过土柱溶质运移试验,对比分析了 NO_3^- -N在不同生物炭施加量下土壤的溶质穿透曲线,并采用对流-弥散方程(CDE)和两区模型(TRM)对溶质运移过程进行模型模拟并获得相关参数,通过明确不同生物炭施加量对黄绵土 NO_3^- -N运移过程的影响,以期减少宁南山区黄绵土养分流失和防治农业面源污染提供数据参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤于2022年10月取自宁夏回族自治区彭阳县王洼水保试验站附近($36^{\circ}06'N$, $106^{\circ}39'E$)表层土壤(0~10 cm),土壤容重为 $1.43 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,土壤砂粒、粉粒和黏粒含量分别为18.29%、72.93%和8.78%,属黄绵土.采集的土壤样品经自然风干及剔

除杂物后,再研磨过2 mm筛备用,风干土初始含水率 $0.007 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$.本试验所用生物炭由陕西亿鑫生物能源科技有限开发公司提供,为杂木黑炭,炭化时间5~8 h,炭化温度 $500\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$,电导率为 $744.56 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,pH为8.85,全氮量为 $2.26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全碳量为 $178.02 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,经研磨后过2 mm筛备用.

1.2 试验方法

本试验前先将生物炭与备用土样按照质量比均匀混合,在充分考虑农业生产中生物炭的实际用量及参照相关研究的基础上^[29-31],确定各处理质量比分别为:0(T0)、1%(T1)、2%(T2)、3%(T3)、4%(T4)和5%(T5),利用有机玻璃柱(其直径为5 cm,高度为20 cm)进行溶质运移试验,装置如图1所示.土柱底部平铺滤纸,防止土壤颗粒损失造成装土不均和堵塞出流孔口.将不同处理的土样按2 cm每层分层装入土柱内,总高度10 cm,容重为 $1.43 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,层与层之间进行打毛,以使土壤层间充分结合,装填更加均匀.土柱上部为供水口,下部为多孔玻璃构成的溶液淋出口,试验时于注水口处放置滤纸以防注水破坏上部土体结构.采用马氏瓶供水并维持水头恒定,试验开始时使用蒸馏水淋洗土柱直至无 NO_3^- -N淋出,随后停止供水并立即排去土柱表层积水;紧接着将马氏瓶内蒸馏水替换为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ KNO_3 溶液,水头高度为5 cm,同时用10 mL量筒在土柱下端承接出流液,每满10 mL接1次,并记录所用时间,用于计算土壤饱和导水率,用紫外分光光度法测定出流液 NO_3^- -N浓度,直至出流液 NO_3^- -N连续3个浓度差值小于1%,此时认为完全穿透,进而根据试验数据进行方程拟合和溶质运移参数计算.

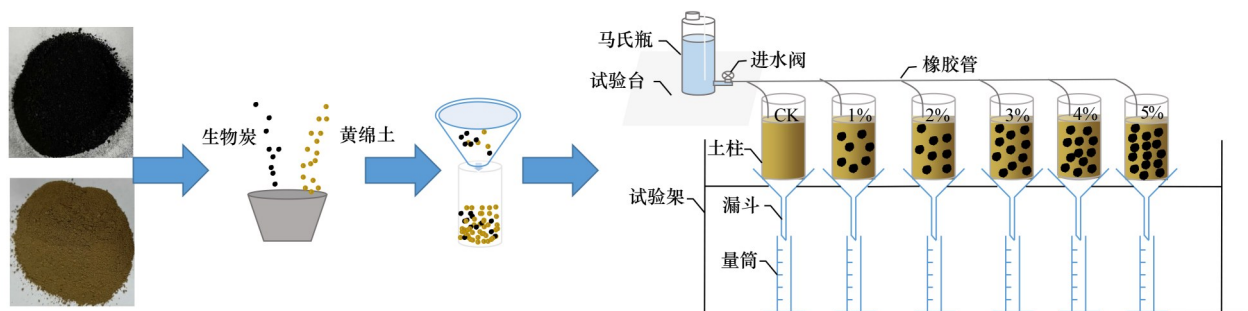


图1 溶质运移装置示意

Fig. 1 Solute transport device

1.3 基本理论及指标计算

1.3.1 饱和导水率计算

土壤饱和导水率是指单位水势梯度下通过饱和土壤的水通量,是反映土壤水分运动及溶质运移的重要指标.定水头法测得土壤饱和导水率的计算公式为:

$$K_s = \frac{Q \times L}{A \times H \times t} \quad (1)$$

式中, K_s 为土壤饱和导水率, $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$; Q 为出流量, mL; L 为土柱高度, cm; A 为水流流经横截面积, cm^2 ; H 为渗流路径总水头差, cm; t 为渗透时间, min;

1.3.2 溶质运移模型

土壤溶质穿透曲线(breakthrough curve, BTC)是反映出流液的相对浓度与孔隙体积变化的关系曲线, 可以描述溶质在土壤中混合置换和转移的特征, 是研究土壤运移机制的一个重要途径. 本试验以 NO_3^- -N 为示踪物质, 研究一维稳态水流下饱和土壤的溶质运移过程.

运用 CXTFIT 程序求解溶质运移参数, 一维饱和和 CDE 方程^[32]表示为:

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2)$$

式中, c 为溶质浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; t 为时间, h ; D 为弥散系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$, 包括扩散和水动力学弥散; v 为土壤孔隙流速, $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$; R 为阻滞系数; x 为溶质迁移的距离, cm , $x \geq 0$.

稳定水流条件下 TRM 模型^[33, 34]为:

$$\theta_m \frac{\partial c_m}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \theta_m D \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - v_m \theta_m \frac{\partial c_m}{\partial x} \quad (3)$$

$$\theta_m \frac{\partial c_m}{\partial t} = \omega (c_m - c_{im}) \quad (4)$$

$$\theta = \theta_m + \theta_{im} \quad (5)$$

$$\beta = \theta_m / \theta \quad (6)$$

式中, θ 为土壤体积含水量, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; θ_m 和 θ_{im} 分别为可动区和不可动区的体积含水量, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; c_m 和 c_{im} 为可动区和不可动区的溶质浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$; v_m 为可动区的平均孔隙流速, $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$; ω 为两区之间的质量交换系数, h^{-1} ; β 为可动区水体含量比率.

弥散度(λ)通过 D 、 L 和 v 计算获得^[35, 36]:

$$\lambda = \frac{D}{v} \quad (7)$$

1.4 数据处理与分析

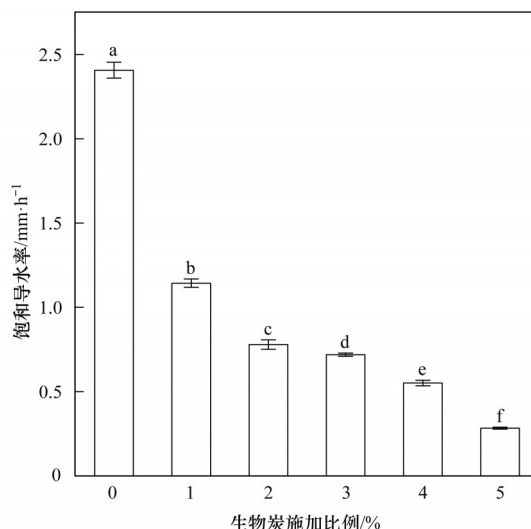
本文应用 CXTFIT 程序对施加不同含量生物炭的溶质穿透曲线进行 CDE 及 TRM 模型的模拟分析, 通过对试验数据的拟合得到模型参数 v 、 D 、 λ 及决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE. 应用 Office 2010 处理试验数据, 利用 SPSS 22.0 进行差异性分析与统计检验, 采用 Origin 2022 软件作图.

2 结果与分析

2.1 生物炭含量对饱和导水率的影响

不同生物炭施加量下各处理土壤 K_s 变化情况如图 2 所示. 从中可知, 当生物炭施加量从 0 增加至 5% 时, 黄绵土 K_s 逐渐减小; 对各处理 K_s 进行比较发现 T1、T2、T3、T4 和 T5 处理分别较 T0 减少了 52.49%、67.62%、70.13%、77.10% 和 88.23%, 同时各处理间 K_s 均存在显著差异 ($P < 0.05$). 从分析结果可知, 生物炭明显降低了黄绵土饱和导水率, 有效

减缓了土壤水分的渗漏.



不同小写字母表示不同处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$)

图2 不同生物炭施加比例对土壤饱和导水率的影响

Fig. 2 Effect of different biochar application ratios on soil saturated hydraulic conductivity

2.2 不同生物炭施加量下黄绵土穿透曲线特征

图 3 为不同生物炭施加量下黄绵土 NO_3^- -N 的 BTC 曲线变化情况. 从中可知, 各处理 BTC 曲线均呈现“S”型曲线特征. 但不同处理条件下的“S”型穿透曲线形状及变化趋势存在差异, 具体表现为随生物炭施加量增加, NO_3^- -N 穿透曲线逐渐右移, 其相对浓度随时间的增加而逐渐升高的趋势放缓, 拖尾特征明显, 表明生物炭的施加对黄绵土中 NO_3^- -N 运移过程具有一定的迟滞效应. 除 T0 和 T1 处理穿透曲线的峰值接近 1, 其余各处理的穿透曲线峰值均明显小于 1, 说明随生物炭施加量的增多, 黄绵土固定了部分 NO_3^- -N, 起到了保肥的作用.

2.3 生物炭含量对穿透时间的影响

初始穿透时间(t_e)、完全穿透时间(t_s)及穿透总历时(t_t)均为溶质穿透的重要特征参数, 由土壤的孔隙水流速和水动力弥散系数共同决定^[37]. 表 1 为不同生物炭施加量下 NO_3^- -N 穿透时间, 从表 1 可知, t_e 、 t_s 和 t_t 均与生物炭施加量成正相关, 即生物炭施加量越大, 溶质初始穿透和完全穿透时间越长, 穿透过程历时也越长. 对数据进一步分析发现, T1 处理间的 t_e 和 t_s 较 T0 处理增大了 2.5 倍以上, t_t 增加 1 倍多, T1、T2、T3、T4 和 T5 处理穿透总历时分别是 T0 的 1.26、2.31、2.72、3.22 和 3.57 倍. 表明生物炭施加有效地减缓了 NO_3^- -N 在黄绵土中的运移速度, 降低了 NO_3^- -N 污染地下水体的风险. 同时, T1、T2 和 T3 处理的 t_e 变化较小, 而 T4 和 T5 处理 t_e 增幅较大, 说明均匀增加的生物炭施加量对 NO_3^- -N 的 t_e 影响是不一致的, 生物炭施加量较大时(T4 和 T5), 对 t_e 的变

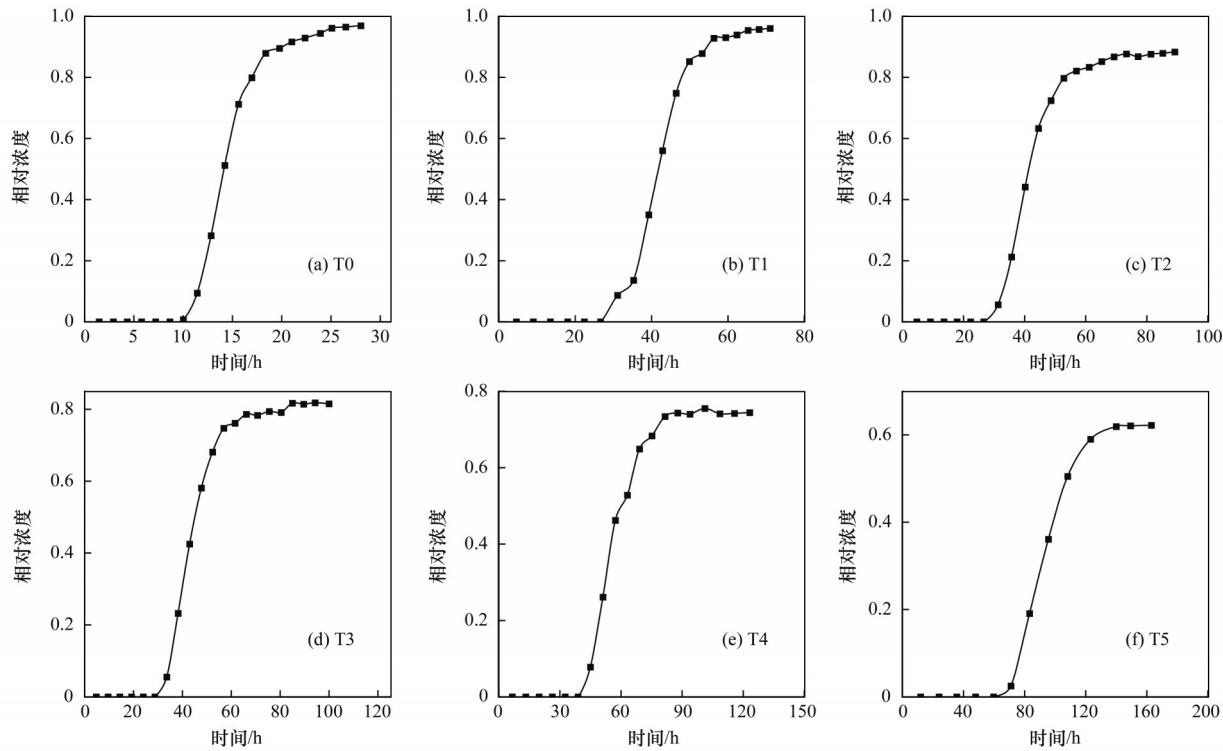


图3 不同生物炭施加量下黄绵土NO₃-N穿透曲线

Fig. 3 NO₃-N breakthrough curves of soil with different biochar contents

化影响较大. 结果表明, 生物炭的使用和施加量的增加延长了NO₃-N在黄绵土中的 t_e 、 t_s 和 t_t , 增强了土壤对NO₃-N固持能力, 减少了相同情况下的NO₃-N渗漏量, 有利于土壤氮素保持和防止地下水的氮素污染.

表1 不同生物炭施加量的NO₃-N穿透时间/h
Table 1 NO₃-N penetration time of different biochar application amounts/h

处理	初始穿透时间(t_e)	完全穿透时间(t_s)	穿透总历时(t_t)
T0	10.02	25.1	15.08
T1	31.1	65.25	34.15
T2	31.35	81.32	49.97
T3	33.58	89.67	56.09
T4	44.95	108.52	63.57
T5	71.08	140	68.92

2.4 不同生物炭施加量下运移模型参数对比及分析

为进一步探讨不同生物炭施加量对黄绵土NO₃-N运移特征的影响, 并研究分析不同溶质运移数学模型的适用性, 利用CDE方程和TRM模型对不同处理的穿透曲线进行模型模拟, 并对主要参数进行拟合. 由表2中CDE方程和TRM模型对 v 的拟合值变化趋势可知, 生物炭降低了黄绵土孔隙水流速, 并且施加量越大, 孔隙水流速越小. 这可能是由于生物炭施加后土壤孔径减小, 水流通道变窄. CDE方程推求出的 D 无明显规律, T1、T2和T5较T0小,

T3和T4比T0大, 而TRM拟合穿透曲线求得 D 值变化趋势均随生物炭施加量增加不断减小, 表明NO₃-N在穿过程中机械弥散作用逐渐减弱.

λ 用以表征溶质在孔隙介质中的弥散能力, 其大小与孔隙介质的平均粒径和均匀度间密切相关, 数量上等于 D 和 v 的比值, λ 越大孔隙介质的溶质扩散能力就越强^[37]. CDE方程的 λ 值除T1处理外, 其余各处理 λ 值均大于T0处理, 而经生物炭处理的TRM模型的 λ 值均大于T0, 除T5处理外, 基本呈现随生物炭施加量增加而增大的趋势. TRM模型的 β 值随着生物炭量的增加不断减小, 从0.889降至0.083; ω 值除T1处理外, 均随着生物炭的增加不断增大. 表2显示, CDE方程的 R^2 值在0.929~0.994之间, 而TRM模型的 R^2 均大于0.997, 这表明TRM能较好地模拟不同生物炭施加量下黄绵土NO₃-N的运移过程. RMSE值越小则表明模拟值和观测值之间的差异越小, 模型拟合效果越好. CDE方程和TRM模型的模拟结果显示, TRM的RMSE值为0.533~2.083, 而CDE方程RMSE值为3.419~9.212, TRM模型的模拟结果明显较好, 模拟值与真实值的误差最小, 拟合度最高.

为更直观地对比实测、CDE方程及TRM模型模拟的溶质穿透曲线之间的区别和联系, 将T0、T1、T2、T3、T4和T5处理的3种溶质穿透曲线绘成图4. 从中可知, CDE方程模型拟合曲线与实测曲线存在

表 2 NO₃⁻-N 穿透曲线拟合得到的相关模型参数
Table 2 Relevant model parameters obtained by NO₃⁻-N penetration curve fitting

参数	模型名称	T0	T1	T2	T3	T4	T5
$v/\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$	CDE	0.694	0.238	0.230	0.205	0.151	0.082
	TRM	0.651	0.211	0.187	0.139	0.029	0.009
$D/\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$	CDE	0.163	0.047	0.142	0.225	0.212	0.113
	TRM	0.069	0.026	0.023	0.019	0.005	0.001
λ/cm	CDE	0.235	0.199	0.616	1.101	1.408	1.374
	TRM	0.106	0.124	0.122	0.139	0.182	0.156
β	TRM	0.889	0.867	0.738	0.586	0.163	0.083
ω/h^{-1}	TRM	0.024	0.009	0.028	0.034	0.032	0.051
R^2	CDE	0.992	0.994	0.970	0.951	0.929	0.947
	TRM	1.000	0.999	1.000	0.999	0.997	0.999
RMSE	CDE	3.846	3.419	6.994	8.266	9.212	6.639
	TRM	0.537	1.647	0.533	0.944	2.083	0.842

不同程度的偏离，且生物炭施加量越大，偏离现象更为明显，其中 T2、T3、T4 和 T5 处理尤为明显；CDE 方程模拟的曲线显示，穿透前期和后期高于实测值，穿透中期低于实测值。图 4 表明，TRM 模型拟合曲线与实测曲线在穿透全过程中保持着较高的拟合度，无明显疏离现象。这表明施加生物炭处理的黄绵土中 NO₃⁻-N 运移方式既包括可动区的对流弥散形式，又不可忽略土壤水相对不可动区水体的溶质扩散形式^[37]。上述分析进一步表明，与 CDE 方程相比，TRM 模型可以更好地模拟不同生物炭施加量下黄绵土 NO₃⁻-N 的运移过程及规律，拟合结果可信度较高。

3 讨论

随着生物炭施加量的增加黄绵土 K_s 逐渐减小，这与张皓钰等^[38]对生物炭显著降低黄绵土 K_s 的研究结论一致。原因在于生物炭的密度相较于土壤密度小，在定容重条件下，施加生物炭会堵塞部分土壤大孔隙，改变土壤的孔隙直径及分布状况，减弱其连通性，使得作为水分通道的土壤有效孔隙数量减少^[39]。BTC 曲线右移，产生拖尾延长现象，可能是由于生物炭颗粒施加后，虽然小孔隙增多，但可供水分流动和互相连通的孔隙减少^[40]，使得饱和土壤的孔隙结构更为复杂，大小和分布不均的土壤孔隙致使各孔隙水流流速不一，进而在土壤剖面形成了不均衡的溶质锋，因此造成穿透曲线拖尾延长。T2、T3、T4 和 T5 处理的穿透曲线峰值明显小于 1，说明在试验过程中部分溶质损失或被保存在土壤中，造成这种情况的原因有以下 3 点：一是试验测定过程存在一定的损失量以及测量误差，使得测量值小于实际值^[41]；二是生物炭粒径相较土壤颗粒较小，与黄绵土混合后土壤黏粒含量相当于增加，一定程度

上填充了土壤孔隙，增加了不动水区范围，溶质 NO₃⁻-N 在扩散到不动水区后出现积累；三是生物炭会促进硝态氮向其他氮形态的转化或抑制其他氮形态向硝态氮转化，从而减少土壤中可用于运移淋失的硝态氮含量^[42]，使得穿透曲线峰值小于 1，且生物炭施加量越大，穿透曲线峰值越小。结果表明生物炭的施加有利于土壤 NO₃⁻-N 的保持，能够防止土壤氮素流失。这与肖茜等^[43]和 Sika 等^[44]在生物炭施加显著降低土壤氮素流失的研究结果一致。

CDE 方程和 TRM 模型模拟结果显示， v 均随生物炭用量增加减小；CDE 方程模拟参数 D 值无明显变化规律，TRM 模型的 D 值随生物炭含量增加逐渐减小，与观测到的实际情况相符；CDE 方程和 TRM 模型模拟的参数 λ 总体随生物炭含量增大而增大，与实际观测结果一致；这表明生物炭施加量越大，机械弥散作用逐渐减弱；土壤溶质弥散度越大，即 NO₃⁻-N 在土壤中充分扩散的能力就越强。这可能是由于水动力弥散作用由对流弥散和扩散共同引起溶质的分散^[37]，生物炭增强了土壤孔隙复杂程度，部分土壤孔隙堵塞且水流通道弯曲度增大，不连通孔隙区增加，所以孔隙流速降低，对流弥散减弱，扩散增强。但当施加量达到 5% 时，可能由于生物炭施加量过大导致土壤孔隙粒径过小，进而降低土壤溶质扩散能力。

可动区含水量比率 β 表示均衡条件下，可动区域中溶质所占土体总质量的百分比^[45]。TRM 模型的模拟结果显示，随着生物炭量的增加， β 值不断减小，表明随着生物炭含量的增加，混合土样中不可动区水体的含水率增加，土壤不可动区域增加。 ω 是表征可动区和不可动区域之间溶质交换程度的参数^[45]。 ω 值总体呈现随生物炭增加不断增大的趋势，由 T2 的 0.028 增至 T5 的 0.051，数值整体偏小，说明

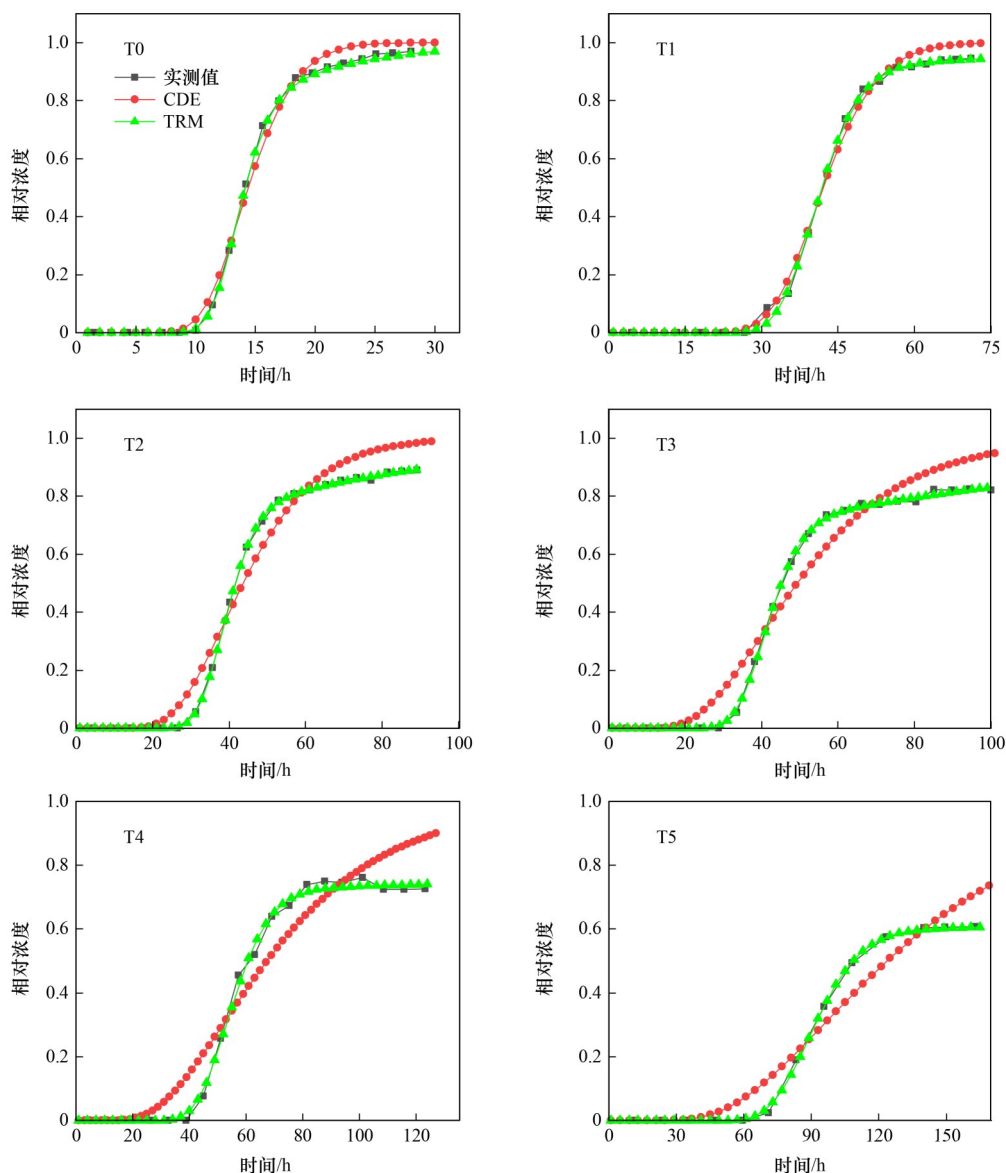


图4 基于CDE和TRM模型拟合的穿透曲线对比

Fig. 4 Comparison of fitted breakthrough curves by convection-dispersion equation (CDE) and two-region model (TRM)

生物炭的施加促进了可动区与不可动区域之间溶质交换程度,使得原本较低的溶质交换略有增强,促进了 NO_3^- -N向土壤微孔和死孔的扩散,证明生物炭的施加能够促进 NO_3^- -N在土壤中充分存储和扩散潜力,有利于黄绵土增强持氮能力.综合以上分析,TRM模拟预测效果在本研究中适用性较好.

4 结论

(1) 黄绵土饱和导水率随生物炭施加量增加而减小; NO_3^- -N的穿透曲线随生物炭施加量增加明显右移,峰值降低;初始穿透时间、完全穿透时间及穿透总历时均随生物炭施加量增大而增加.表明生物炭含量增加可以有效阻止了 NO_3^- -N向地下水体的渗漏,降低了地下水污染风险,增强土壤持氮能力.

(2) 相较于CDE方程,TRM模型的拟合精度更

高,其能较好模拟生物炭添加条件下黄绵土中 NO_3^- -N迁移过程.

(3) TRM模型参数拟合结果显示,随生物炭施加量的增加,土壤孔隙流速、水动力弥散系数、可动区含水比率均逐渐减小,而弥散度和质量交换系数呈现增加的趋势.

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴-2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook-2022[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [2] Huang T, Ju X T, Yang H. Nitrate leaching in a winter wheat-summer maize rotation on a calcareous soil as affected by nitrogen and straw management[J]. Scientific Reports, 2017, 7, doi: 10.1038/srep42247.
- [3] 雷豪杰, 李贵春, 丁武汉, 等. 设施菜地土壤氮素运移及淋溶损失模拟评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29

- (1): 38-52.
- Lei H J, Li G C, Ding W H, *et al.* Modeling nitrogen transport and leaching process in a greenhouse vegetable field [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, **29**(1): 38-52.
- [4] 王伟, 于兴修, 汉强, 等. 丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4212-4219.
- Wang W, Yu X X, Han Q, *et al.* Change of soil nitrogen leaching with summer maize growing periods under plastic film mulched cultivation in Danjiangkou reservoir area, China[J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4212-4219.
- [5] 刘君, 陈宗宇. 利用稳定同位素追踪石家庄市地下水中的硝酸盐来源[J]. 环境科学, 2009, **30**(6): 1602-1607.
- Liu J, Chen Z Y. Using stable isotope to trace the sources of nitrate in groundwater in Shijiazhuang[J]. Environmental Science, 2009, **30**(6): 1602-1607.
- [6] Liu M Y, Min L L, Wu L, *et al.* Evaluating nitrate transport and accumulation in the deep vadose zone of the intensive agricultural region, North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2022, **825**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153894.
- [7] Piirainen S, Domisch T, Moilanen M, *et al.* Long-term effects of ash fertilization on runoff water quality from drained peatland forests [J]. Forest Ecology and Management, 2013, **287**: 53-66.
- [8] 李欢玮, 赵广举, 李明, 等. 黄土高原沟壑区典型城郊流域地表水硝酸盐来源示踪[J]. 环境科学, 2023, **44**(2): 761-769.
- Li H W, Zhao G J, Li M, *et al.* Identification of nitrate source of surface water in a typical peri-urban watershed in the tableland of the Loess Plateau, China[J]. Environmental Science, 2023, **44**(2): 761-769.
- [9] 张林, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 792-799.
- Zhang L, Huang Z L, Xiao W F, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus output in runoff and rainfall runoff in Lanlingxi watershed, Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 792-799.
- [10] 王宏, 徐娅玲, 张奇, 等. 沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4547-4554.
- Wang H, Xu Y L, Zhang Q, *et al.* Emission characteristics of nitrogen and phosphorus in a typical agricultural small watershed in Tuojiang River Basin[J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4547-4554.
- [11] 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 等. 青岛市农区地下水硝态氮污染源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3232-3241.
- Kou X Y, Ding J J, Li Y Z, *et al.* Identifying the sources of groundwater NO_3^- -N in agricultural region of Qingdao [J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3232-3241.
- [12] Tan X F, Liu Y G, Zeng G M, *et al.* Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions [J]. Chemosphere, 2015, **125**: 70-85.
- [13] Zhang Y F, Wang J M, Feng Y. The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: a review [J]. CATENA, 2021, **202**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105284.
- [14] 褚军, 薛建辉, 金梅娟, 等. 生物炭对农业面源污染氮、磷流失的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(4): 409-415.
- Chu J, Xue J H, Jin M J, *et al.* Review of researches on effects of biochar in reducing nitrogen and phosphorus losses with agricultural non Point source pollution[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, **30**(4): 409-415.
- [15] McDonald M R, Bakker C, Motior M R. Evaluation of wood biochar and compost soil amendment on cabbage yield and quality [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2019, **99**(5): 624-638.
- [16] 陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 等. 生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N_2O 排放及其功能基因的影响[J]. 环境科学, 2023, **44**(6): 3418-3425.
- Chen Q Q, Wang Z J, Chen Y Z, *et al.* Effects of biochar amendment on N_2O emission and its functional genes in pepper growing soil in tropical areas[J]. Environmental Science, 2023, **44**(6): 3418-3425.
- [17] 刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 等. 生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响[J]. 环境科学, 2023, **44**(7): 4162-4169.
- Liu X Y, Wang D M, Zhang Z Z, *et al.* Effect of biochar with phosphorus fertilizer on soil nutrients, enzyme activity, and nutrient uptake of alfalfa [J]. Environmental Science, 2023, **44**(7): 4162-4169.
- [18] 连神海, 张树楠, 刘锋, 等. 不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3692-3698.
- Lian S H, Zhang S N, Liu F, *et al.* Phosphorus adsorption characteristics of different biochar types and its influencing factors [J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3692-3698.
- [19] 吴志娟, 毕二平. 生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 2154-2160.
- Wu Z J, Bi E P. Enhanced sorption of cetirizine to loessial soil amended with biochar[J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 2154-2160.
- [20] 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 等. 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 762-769.
- Xiong Y T, Yuan X Y, Zhou H H, *et al.* Effects of biochar addition on soil nitrogen mineralization and leaching characteristics in riparian zone of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 762-769.
- [21] 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 等. 基于 Meta-analysis 的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4658-4668.
- Jiang Z X, Cui S, Zhang X, *et al.* Influence of biochar application on soil nitrate leaching and phosphate retention: a synthetic meta-analysis[J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4658-4668.
- [22] 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 等. 生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5383-5390.
- Si L L, Zhou J J, Wu L H, *et al.* Dynamics and runoff losses of nitrogen in paddy field surface water under combined application of biochar and slow/controlled-release fertilizer [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5383-5390.
- [23] 尹秀玲, 张璐, 贾丽, 等. 玉米秸秆生物炭对暗棕壤性质和氮磷吸附特性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2016, **38**(4): 439-445.
- Yin X L, Zhang L, Jia L, *et al.* Effects of corn straw biochar on properties of dark brown soil and adsorption characteristics of nitrogen and phosphorus in dark brown soil [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2016, **38**(4): 439-445.
- [24] Zheng H, Wang Z Y, Deng X, *et al.* Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil [J]. Geoderma, 2013, **206**(9): 32-39.
- [25] 张雪莲, 廖洪, 李昌伟, 等. 田间条件下生物炭与化肥配施对土壤氮磷纵向迁移、结球生菜产量品质及土壤微生物数量的影响[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(1): 21-28.

- Zhang X L, Liao H, Li C W, *et al.* Effects of simultaneous application of biochar and chemical fertilizer on the vertical migration of nitrogen and phosphorus, lettuce yield and quality and soil microbial quantity under field conditions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(1): 21-28.
- [26] 朱启林, 刘丽君, 张雪彬, 等. 生物炭和秸秆添加对海南热带水稻土氮素淋溶的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, **35**(4): 193-199.
- Zhu Q L, Liu L J, Zhang X B, *et al.* Effect of biochar and straw addition on nitrogen leaching of tropical paddy soil in Hainan [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(4): 193-199.
- [27] 孟书翰, 厉晓峰, 杨佳慧, 等. 黄绵土细沟水流输沙能力对地表冲刷流量的响应[J]. *水土保持学报*, 2022, **36**(6): 63-69, 81.
- Meng S H, Li X F, Yang J H, *et al.* Response of sediment transport capacity of rill flow to surface scouring discharge in loess soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(6): 63-69, 81.
- [28] 刘旭, 白一茹, 马娴, 等. 生物炭对黄绵土水分吸渗特征及水力学参数的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, **37**(3): 77-84.
- Liu X, Bai Y R, Ma X, *et al.* Effects of biochar on water absorption characteristics and hydraulic parameters of loessial soil [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, **37**(3): 77-84.
- [29] 涂坤, 胡斐南, 许晨阳, 等. 小麦秸秆及其生物炭添加对黄绵土表面电学性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, **36**(1): 360-367.
- Tu K, Hu F N, Xu C Y, *et al.* Effect of wheat straw and its biochar addition on surface electrochemical characteristics of loessal soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(1): 360-367.
- [30] 吴媛媛, 杨明义, 张风宝, 等. 添加生物炭对黄绵土耕层土壤可蚀性的影响[J]. *土壤学报*, 2016, **53**(1): 81-92.
- Wu Y Y, Yang M Y, Zhang F B, *et al.* Effect of biochar application on erodibility of plow layer soil on loess slopes [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(1): 81-92.
- [31] 李淑芹, 刘宇轩, 张美桃, 等. 不同改良剂对河套灌区盐碱土入渗特性及水盐分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, **37**(1): 296-303.
- Li S Q, Liu Y X, Zhang M T, *et al.* Effects of different amendments on infiltration characteristics and soil water and salt distribution of saline-alkali soil in Hetao irrigation district [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, **37**(1): 296-303.
- [32] 刘艳丽, 周蓓蓓, 王全九, 等. 纳米碳对黄绵土水分运动及溶质迁移特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, **29**(1): 21-25.
- Liu Y L, Zhou B B, Wang Q J, *et al.* Effects of Nano-carbon on water movement and solute transport in loessial soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(1): 21-25.
- [33] 郭志萍, 李斌, 孙西欢, 等. 不同生态修复模式下土壤水文性质及其对溶质运移的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(12): 4251-4260.
- Guo Z P, Li B, Sun X H, *et al.* Soil hydrological properties and their effects on solute transport under different ecological restoration models in coal mining area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(12): 4251-4260.
- [34] 周蓓蓓. 土石混合介质水分溶质运移的试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- Zhou P P. Experimental Study on the water movement and solute transport of the soil-stone mixtures [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009.
- [35] 李荣磊, 陈留美, 邵明安, 等. 黄土高原不同土质和植被类型下Cl⁻运移特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2021, **58**(5): 1190-1201.
- Li R L, Chen L M, Shao M A, *et al.* Cl⁻ Transport and its influencing factors in soil as affected by soil texture and vegetation cover in Loess Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, **58**(5): 1190-1201.
- [36] Zhen Q, Zheng J Y, He H H, *et al.* Effects of Pisha sandstone content on solute transport in a sandy soil [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 2214-2220.
- [37] 丛伟, 张兴昌, 封晔. 不同CDE模型对硒在黄绵土中运移特性的模拟研究[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(3): 220-224.
- Cong W, Zhang X C, Feng Y. Characteristics of selenium transport in the loessal soil fitted with deterministic equilibrium and nonequilibrium CDE models [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(3): 220-224.
- [38] 张皓钰, 刘竞, 易军, 等. 生物质炭短期添加对不同类型土壤水力性质的影响[J]. *土壤*, 2022, **54**(2): 396-405.
- Zhang H Y, Liu J, Yi J, *et al.* Effects of short-termed biochar application on hydraulic properties of different types of soils [J]. *Soils*, 2022, **54**(2): 396-405.
- [39] Blanco-Canqui H. Biochar and soil physical properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, **81**(4): 687-711.
- [40] 解倩, 王丽梅, 齐瑞鹏, 等. 生物炭对黄绵土水分入渗和持水性能的影响[J]. *地球环境学报*, 2016, **7**(1): 65-76, 86.
- Xie Q, Wang L M, Qi R P, *et al.* Effects of biochar on water infiltration and water holding capacity of loessial soil [J]. *Journal of Earth Environment*, 2016, **7**(1): 65-76, 86.
- [41] 李宏艳, 王金生, 滕彦国, 等. 土壤中重金属迁移数值仿真与参数灵敏度分析[J]. *系统仿真实报*, 2007, **19**(4): 720-724, 728.
- Li H Y, Wang J Q, Teng Y G, *et al.* Numerical simulation of heavy metal transport in soil environment and sensitivity analysis [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, **19**(4): 720-724, 728.
- [42] 周咏春, 郭思伯, 李丹阳, 等. 新鲜和老化生物炭对土壤氮淋失及油菜氮吸收的影响[J]. *环境科学研究*, 2023, **36**(3): 581-589.
- Zhou Y C, Guo S B, Li D Y, *et al.* Effects of fresh and aged biochar on soil nitrogen leaching and nitrogen uptake of rapeseed [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, **36**(3): 581-589.
- [43] 肖茜, 张洪培, 沈玉芳, 等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(16): 128-134.
- Xiao Q, Zhang H P, Shen Y F, *et al.* Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(16): 128-134.
- [44] Sika M P, Hardie A G. Effect of pine wood biochar on ammonium nitrate leaching and availability in a South African sandy soil [J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, **65**(1): 113-119.
- [45] 吴军虎, 任敏. 羟丙基甲基纤维素作土壤改良剂对土壤溶质运移的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(5): 141-147.
- Wu J H, Ren M. Effect of hydroxypropyl methyl cellulose as soil modifier on solute migration in soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(5): 141-147.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>	(2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>	(2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>	(2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>	(2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>	(2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>	(2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>	(2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>	(2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>	(2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>	(2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>	(2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>	(2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>	(2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>	(2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>	(2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>	(2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>	(2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>	(2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>	(2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>	(2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>	(2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying	(2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>	(2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>	(2793)
Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>	(2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>	(2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>	(2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>	(2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>	(2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>	(2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>	(2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i>	(2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>	(2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>	(2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>	(2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>	(2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>	(2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>	(2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>	(2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping	(2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>	(2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>	(3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>	(3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>	(3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>	(3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>	(3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>	(3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>	(3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>	(3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>	(3119)