

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, 肖威德, 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, 胡敏韵, 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, 杨文焕, 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)

微塑料对土壤 N₂O 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*

(华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要: 微塑料(MPs)在土壤环境中的作用和影响逐渐受到关注, 但其对土壤氮素循环及其影响机制并不明确. 氧化亚氮(N₂O)是农田土壤氮素循环中重要的温室气体之一, 其主要来源于微生物参与的氮转化过程. 微塑料对土壤氮转化过程及相关功能酶和基因都能够产生影响, 其在土壤中不断富集可能造成土壤 N₂O 排放规律的改变. 由于微塑料自身的复杂性以及不同试验在时空上的变异, 导致微塑料对土壤氮素转化和 N₂O 排放产生不同影响, 增大了对土壤 N₂O 排放和土壤氮素转化的评估难度. 目前, 微塑料在土壤 N₂O 排放、氮素含量、相关功能酶活性和功能基因丰度的研究上未得出统一的结论, 缺少在更广的尺度(如盆栽尺度)、更多元的角度(如反硝化过程、DNRA 过程等)和更先进的手段上(如同位素技术)探究其影响机制的研究. 因此, 通过归纳微塑料对土壤氮循环影响的不同观点, 能更全面地认识微塑料对土壤氮循环存在的影响, 可为气候变化条件下土壤微塑料富集对土壤氮素循环过程以及 N₂O 排放规律的影响提供一定的理论基础.

关键词: 微塑料(MPs); 氧化亚氮(N₂O); 氮素转化速率; 功能基因; 酶活性

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-3059-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305080

Advances in the Effects of Microplastics on Soil N₂O Emissions and Nitrogen Transformation

LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, NIU Ying-yi, LU Ying, LI Bo*

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Research on microplastics (MPs) is gaining more attention in the soil environment, but their impact on soil microbiota and related nitrogen processes remains poorly understood. Nitrous oxide (N₂O) is one of the important greenhouse gases of the nitrogen cycle in agricultural soil, which mainly originates from microbial-mediated nitrogen (N) transformation processes. Microplastics can influence soil nitrogen transformation, as well as nitrogen-related functional enzymes and genes, and its enrichment may profoundly affect the N₂O emissions in soil. However, because of the complexity of the properties of MPs, variations in experimental conditions, and spatial-temporal scales, the results on the effects of MPs on soil N₂O emissions, nitrogen content, enzymes activities, and nitrogen functional genes remain inconsistent. Additionally, there is a lack of research conducted at broader experimental scales (e.g., pot scale), from diverse perspectives (e.g., denitrification or DNRA), and using advanced techniques (e.g., stable isotope approaches) to elucidate the underlying mechanisms. Therefore, to comprehend the environmental risk of MPs on soil from multiple perspectives, this review summarized the impact of MPs on soil N cycling from previous published research to provide a knowledge basis and gain holistic insights into the potential impact of soil microplastic enrichment on N₂O emission patterns in agricultural soils under climate change conditions.

Key words: microplastics(MPs); nitrous oxide(N₂O); nitrogen transformation rate; functional genes; enzymes activity

微塑料(microplastics, MPs)是指尺寸<5 mm的塑料颗粒, 其来源多样、性质复杂(如形状、大小、密度和种类不同)、降解缓慢并且会在环境中不断富集, 对生物健康和环境安全造成了巨大挑战^[1-5]. 微塑料的研究环境始于海洋, 而陆地生态系统作为微塑料重要的汇, 其数量可能已是海洋的4~23倍^[5], 因此逐渐受到国内外学者的关注^[5-8]. 然而, 微塑料不止能够影响土壤物理化学性质^[9-11], 还能够通过影响土壤中相关微生物和酶, 而进一步影响土壤生物化学循环^[12-16]. 土壤氮循环是地球生物化学循环中的重要一环^[17], 对调控环境变化有着至关重要的作用. 尽管大多数种类的塑料中的活性氮含量可以忽略不计, 但是其对土壤氮循环的影响不可忽视^[14, 17-20].

土壤中的氮素能够通过一系列生物化学过程, 转化为各种形式的活性氮素输入至其他系统中. 其

中 N₂O 活性氮素气体, 是造成全球温室效应的重要因素, 其全球增温潜势是 CO₂ 的近 300 倍^[21]. 截至 2016 年, 全球 N₂O 排放相比工业革命前期(19 世纪 60 年代)增加约 60%, 其中农田的贡献率达 82%, 占全球 N₂O 排放的 33%^[22]. 目前, 微塑料对土壤生态系统的研究大多聚焦于生态毒理学方向, 然而微塑料对土壤 N₂O 排放及氮素转化所带来的潜在风险仍不明确. 因此, 本文通过总结前人的研究成果, 分析微塑料对土壤 N₂O 排放及氮素转化的影响, 归纳了微塑料对土壤 N₂O 排放、氮素转化及其微生物驱动机制, 以期为全球变化背景下土壤氮素的管理与

收稿日期: 2023-05-09; 修订日期: 2023-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807021); 广州市基础研究计划基础与应用基础研究-青年科技人员项目(202201010416); 华南农业大学大学生创新创业训练项目(S202210564164)

作者简介: 刘一戈(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤氮循环, E-mail: liuyige@stu.scau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: boli@scau.edu.cn

温室气体减排提供理论依据。

1 微塑料对N₂O排放及土壤氮素转化速率的影响

1.1 微塑料对土壤氮素含量的影响

由于大多数种类的微塑料属于碳基材料, 其中的活性氮含量可以忽略不计, 但是其引起的土壤结构变化所导致的微生物过程的改变可能会直接影响土壤氮循环过程^[5], 土壤中各形态氮含量的变化能够直接体现氮循环的改变。土壤中的氮主要由有机氮和无机氮组成, 土壤全氮(TN)是二者的总和。无机氮包括土壤

铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和亚硝态氮(NO₂⁻-N); 有机氮包括可溶性有机氮(DON)和微生物氮(MBN)等。此外, 植物可利用的无机氮及部分可溶性有机氮则被称为可利用氮(AN)。

微塑料能够在不同程度上影响土壤中各形态氮素含量(表1)。Hou等^[23]的研究表明质量分数为28%的聚乙烯(polyethylene, PE)微塑料添加显著减少了土壤TN含量。不过这可能是由于微塑料的剂量效应所导致的, 有研究指出在相对低含量的(0.25%~10%)微塑料添加下并未显著改变土壤TN含量^[24~28]。

表1 微塑料对土壤氮素含量的影响¹⁾

Table 1 Effect of MPs on soil nitrogen content

地点 ²⁾	微塑料种类	质量分数/%	大小	对土壤氮素含量的影响	文献
北京	PE	28	<100 μm	显著降低了各尺寸土壤团聚体中的TN	[23]
重庆	PHA、PLA和PBS	3	0.15~0.18 mm	微塑料增加了土壤MBN含量,降低了NO ₃ ⁻ 含量;在不同的土地利用类型中,微塑料对NH ₄ ⁺ 含量的影响不一致	[29]
德国	PET	0.4	8 mm	微塑料促进了DON和NO ₃ ⁻ 含量,对TN和NH ₄ ⁺ 含量无影响	[26]
德国	PHBV	10	—	PHBV处理使土壤MBN含量提高了45%,使DON含量下降了66%	[30]
甘肃	LDPE	0.01、0.1和1	<187.5 μm	原生和老化微塑料都减少了土壤NO ₃ ⁻ 和NH ₄ ⁺ 含量,并且随微塑料浓度增加土壤NO ₃ ⁻ 和NH ₄ ⁺ 含量进一步降低,但随老化微塑料浓度增加,土壤NH ₄ ⁺ 含量不再降低	[31]
广东	PVC、PP、PE、PS和PET	0.25、2和7	100 μm	无论何种含量,PP和PE微塑料都显著增加了土壤NH ₄ ⁺ 含量,且随微塑料含量的增加,PE处理中土壤NH ₄ ⁺ 含量进一步增加,PP处理中土壤NH ₄ ⁺ 含量进一步减少;较高含量的PS微塑料才能显著增加土壤NH ₄ ⁺ 含量;PET微塑料仅在质量分数为0.25%时显著增加了土壤NH ₄ ⁺ 含量;PVC微塑料对NH ₄ ⁺ 含量没有显著改变;PP、PE、PS和PET微塑料显著降低了土壤NO ₃ ⁻ 含量,且在各自质量分数为7%时NO ₃ ⁻ 含量降幅最大;PVC微塑料对NO ₃ ⁻ 含量没有显著改变;微塑料未显著改变土壤TN	[25]
吉林和宁夏	PE和PLA	0.5和1	4.8~5 mm	在25℃下,微塑料添加显著增加了土壤NH ₄ ⁺ 含量,减少了NO ₃ ⁻ 和矿质氮(NO ₃ ⁻ +NH ₄ ⁺)含量;微塑料浓度与NO ₃ ⁻ 和矿质氮含量呈显著的负相关;微塑料添加对DON含量的影响并不一致,可能增加其含量也可能减少其含量	[32]
江苏	PLA	2	20~50 μm	在培养第12~15 d显著降低了土壤NH ₄ ⁺ 含量,但增加了NO ₃ ⁻ 和NO ₂ ⁻ 含量,其他时间未显著影响无机氮含量	[33]
江西	PVC	0.5	<1000 μm	含有30%塑化剂的PVC微塑料和由PVC管制成的微塑料(含塑化剂)在培养第15 d显著提高了NH ₄ ⁺ 含量,但是在之后的培养中没有显著影响土壤NH ₄ ⁺ 含量,土壤NO ₃ ⁻ 含量呈现相反趋势,在整个阶段NO ₃ ⁻ 含量都显著下降	[34]
人造土壤	PET和LDPE	PET: 0.2和0.4 LDPE: 0.2和3	10.1~50.2 μm	低含量(质量分数0.2%)PET、高含量(质量分数0.4%)PET和高含量LDPE增加了土壤NH ₄ ⁺ 含量和NO ₃ ⁻ 含量	[35]
宁夏	LDPE和PLA	1	150~180 μm	原生PLA和老化PLA显著降低了土壤NO ₃ ⁻ 含量及矿质氮总量(矿质氮中主要由硝态氮占主要);无论是否老化,PLA和PE微塑料对NH ₄ ⁺ 含量无显著影响	[36]
日本	PLA/PBS混合物、PBAT和PLA	PLA/PBS混合物、PBAT: 0.2; PLA: 2	<5 mm	在培养的大多数时间,各微塑料处理都降低了土壤NO ₃ ⁻ 含量,仅有PLA处理在培养第28 d未显著影响土壤NO ₃ ⁻ 含量;在培养后期的第14~28 d,大多数微塑料处理降低了土壤NH ₄ ⁺ 含量,仅PLA+PBS处理在培养第28 d显著降低了NH ₄ ⁺ 含量	[37]
陕西	PS	7和28	<180 μm	微塑料添加显著增加了土壤DON含量,尤其在培养第14~30 d之间;在培养的前3 d微塑料显著减少了土壤NO ₃ ⁻ 含量,但是在之后并未影响土壤NO ₃ ⁻ 含量;微塑料添加未显著影响土壤NH ₄ ⁺ 含量	[38]
山东	PE和PLA	0.01和0.1	PE: 2 mm PLA: 106 μm	PS微塑料和纳米微塑料在培养大多数时间未能显著影响土壤NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 和NO ₂ ⁻ 含量;微塑料未影响土壤TN含量	[24]
山东	PE、PS、PA、PLA、PBS和PHBV	0.2和2	39~80 μm	无论何种含量的PLA和PE微塑料都未影响土壤NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 和有机氮含量	[39]

续表 1

地点 ²⁾	微塑料种类	质量分数/%	大小	对土壤氮素含量的影响	文献
山东	PP	7 和 28	<180 μm	质量分数为 2% 的各种类微塑料均未显著改变 NH ₄ ⁺ 含量,但是质量分数为 0.2% 的 PS、PA、PLA、PBS 和 PHB 微塑料显著减少了土壤 NH ₄ ⁺ 含量;质量分数为 0.2% 的 PE、PS 和 PA 微塑料,以及各浓度的 PLA、PBS 和 PHB 微塑料减少土壤 NO ₃ ⁻ 含量	[40]
四川、湖南、江西、浙江和江苏	PE	1	<187.5 μm	在四川和江苏的土壤中,PE 微塑料显著减少了 NO ₃ ⁻ 含量,但是未在江西和浙江土壤中产生影响. 在湖南土壤中原生 PE 微塑料减少了 NO ₃ ⁻ 含量,但是老化 PE 微塑料未影响硝态氮含量;在四川土壤中 PE 微塑料增加了 NH ₄ ⁺ 含量,但是在湖南土壤减少了 NH ₄ ⁺ 含量	[41]
四川	PE	5	290~373 μm 和 520~610 μm	PE 微塑料显著减少了土壤 AN 含量,但是其大小未显著影响 AN 含量	[42]
新疆	PP 和 PE	1	0~1 mm 和 1~5 mm	微塑料添加使 DON 含量增加(PA、PS、PET 和 PVC)或减少(PP),但随着时间的推移,效果会逐渐减弱;NH ₄ ⁺ 和 NO ₃ ⁻ 没有立即受到微塑料的影响,但 NO ₃ ⁻ 含量在一年后增加(PET 和 PVC)或下降(PS);微塑料未显著影响 MBN 含量	[43]
天津	PE、PP、PA、PS、PET 和 PVC	2	10~425 μm	PP 微塑料增加了 NH ₄ ⁺ 含量,减少了 NO ₃ ⁻ 含量;0~1 mm 和 1~5 mm 的微塑料都能导致比 CK 处理更高的 NH ₄ ⁺ 含量,但处理之间的差别并不明显;0~1 mm 的微塑料导致 NO ₃ ⁻ 含量明显降低	[44]
浙江	LDPE 和 PVC	1、5	LDPE: 678 μm PVC: 300 μm	PE 在培养第 1、15 和 22 d 增加了土壤 NO ₃ ⁻ 含量,质量分数为 5% 的 PVC 在第 1 和 22 d 增加了土壤 NO ₃ ⁻ 含量. 在培养第 29 d,微塑料显著降低了土壤 NH ₄ ⁺ 含量,微塑料未现主要影响土壤 TN	[45]
浙江	PE	0、0.1、0.5、1、3、6 和 18	—	微塑料添加增加了土壤 NH ₄ ⁺ 含量,显著降低了土壤 NO ₃ ⁻ 含量,且 NH ₄ ⁺ 含量随微塑料浓度增加而增,NO ₃ ⁻ 含量则相反;微塑料未影响土壤 TN	[46]
广东	PE	1、5 和 10	2~4 mm	PE 处理显著降低了土壤 NO ₃ ⁻ 含量,且各浓度微塑料之间无显著差异;PE 未显著影响土壤 NH ₄ ⁺ 含量;PE 处理未显著影响 TN 含量	[27]
广东	PE	1	500~1 000 μm (占比 12.5%)、250~500 μm (占比 62.5%) 和 50~250 μm (占比 25%) 的混合微塑料	微塑料显著增加了 NO ₃ ⁻ 和 (NO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺) 含量,减少了 NH ₄ ⁺ 含量,微塑料对土壤 TN 含量无显著影响	[28]
荷兰	LDPE、PLA	0.5、1、1.5、2 和 2.5	250~500 μm (占比 60%) 和 500~1 000 μm (占比 40%) 的混合微塑料	在培养第 46 d 时,PLA 微塑料影响了 NO ₃ ⁻ (减少)、DON (增加) 和 AN (降低),但并未对土壤 NH ₄ ⁺ 产生影响,且随 PLA 微塑料浓度增加其变化增强. 在 105 d 时,PLA 微塑料仅能显著影响土壤 NO ₃ ⁻ 和 DON 含量,且只有 2.0% 和 2.5% 的生物可降解微塑料可以显著增加 DON 含量. 无论培养第 46 d 或 105 d,LDPE 微塑料都未显著影响土壤 NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 、DON 和 AN,除在培养第 46 d 时,质量分数为 1% 的 LDPE 微塑料显著增加了 NH ₄ ⁺ 含量	[47]
江苏	PET	0.5	10 μm 和 200 μm	PET 微塑料在水稻种植期未影响土壤 NH ₄ ⁺ 和 NO ₃ ⁻ 含量;在小麦种植期的每个施肥期,微塑料增加了土壤 NH ₄ ⁺ 含量,且在施肥 4 d 后,减少了 NO ₃ ⁻ 含量;微塑料大小没有影响 NH ₄ ⁺ 和 NO ₃ ⁻ 的含量	[48]
江苏	PE、PAN 和 PET	0.5	PE、PAN: 200 μm PET: 200 μm 和 10 μm	在基肥和第二次追肥阶段各种类和大小微塑料未显著影响土壤 NH ₄ ⁺ 含量,但 PE 和 PAN 显著增加了土壤 NO ₃ ⁻ 含量. 在第一次追肥阶段,小尺寸的 PE 和 PET(10 μm)处理显著减少了土壤 NH ₄ ⁺ 含量,减少了 NO ₃ ⁻ 含量,PAN 处理则显著增加了 NH ₄ ⁺ 含量	[49]
江苏	PET	0.5	200 μm	无论水稻种植的何种阶段,PET 微塑料都未显著影响土壤 NH ₄ ⁺ 和 NO ₃ ⁻ 含量	[50]
江苏	PLA	0、0.1、1、5 和 10	40 μm	除质量分数为 0.1% 的 PLA 外,其它质量分数(1%、5% 和 10%)的 PLA 减少了 NO ₃ ⁻ 含量(平均值为 67%),但对 NH ₄ ⁺ 含量没有显著影响	[51]
北威尔士	LDPE	0.1、1 和 10	—	施肥后微塑料处理增加了土壤 NO ₃ ⁻ 和 NH ₄ ⁺ 含量	[52]
北威尔士	PE 和 PHBV	1	1~15 μm	对 NO ₃ ⁻ 和 NH ₄ ⁺ 无显著影响	[53]

1) “—”表示文章中没有相关数据; LDPE: 低密度聚乙烯(low density polyethylene); PA: 聚酰胺树脂(polyamide); PAN: 聚丙烯腈(polyacrylonitrile); PBAT: 聚乙酸对苯二甲酸丁二醇酯(polybutylene adipate terephthalate); PBS: 聚丁二酸-丁二醇酯(polybutylene-succinate); PE: 聚乙烯(polyethylene); PET: 聚酯纤维(polyester); PHBV: 聚羟基丁酸戊酸共聚酯[Poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)]; PLA: 聚乳酸酸(polylactic acid); PP: 聚丙烯(polypropylene); PS: 聚苯乙烯(polystyrene); PVC: 聚氯乙烯(polyvinyl chloride); 2) 地点表示试验土壤取样地点

虽然微塑料并未改变土壤中 TN 含量,却可能对土壤无机氮含量产生了影响(表 1). 有研究表明微

塑料添加会减少土壤中 NO_3^- 含量, 并增加土壤中 NH_4^+ 含量^[25,29,32,46]. 不过, 由于微塑料自身特性及环境因素的影响, 其对土壤无机氮含量的改变并不一致(表1和表2). 例如, 土壤中添加不同种类微塑料可能会对无机氮含量产生影响. 传统微塑料中, 聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)微塑料相较于PE、聚丙烯(polypropylene, PP)、聚苯乙烯(polystyrene, PS)和聚酯纤维(polyester, PET)微塑料对土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 并无影响^[25], 而生物可降解微塑料与传统微塑料对土壤无机氮的影响上则产生了两种不同的观点. Meng等^[47]的研究指出聚乳酸(poly(lactic acid, PLA)微塑料相较于低密度聚乙烯(low density polyethylene, LDPE)微塑料能够更显著影响土壤无机氮变化, 但是也有研究表明生物可降解微塑料较传统微塑料未能更显著影响土壤无机氮含量^[32,39,53].

其次, 微塑料含量也是影响土壤无机氮含量的重要特性之一. 有研究表明, 微塑料含量的增加, 可以增强微塑料对土壤无机氮含量的影响^[25,31,32,46,47]. 例如, Zhang等^[31]的研究发现, 微塑料能降低土壤 NO_3^- 和 NH_4^+ 含量, 且随着微塑料含量的增加, 其降幅会进一步增大. 进一步有研究指出, 只有较高含量的微塑料才能够影响土壤 NO_3^- 或 NH_4^+ 含量^[35,51]. 然而, Feng等^[40]却提出不同的观点, 其发现低浓度微塑料较高浓度微塑料才能影响土壤无机氮含量. 另有 Zhang等^[39]的研究表明微塑料含量对土壤无机氮含量并无影响.

此外, 微塑料的大小、老化程度也会影响土壤无机氮含量的变化. 例如, Li等^[44]的研究发现更小的微塑料会更明显地影响土壤无机氮含量的变化, Zhang等^[31]和 Shi等^[36]的研究发现微塑料老化会导致其对土壤无机氮的影响降低. 另外, 微塑料的研究尺度、研究时长和土壤种类等同样会改变微塑料对土壤无机氮的影响(表1和表2). 中大尺度的试验大多发现微塑料对土壤 NH_4^+ 含量无显著影响^[27,47-51,53], 但对 NO_3^- 含量产生了不同的影响^[27,28,47-53]. 同时, 中大尺度试验中存在的农事操作等因素也会改变无机氮含量的变化, 如在施肥期间微塑料才能显著影响土壤无机氮含量^[48,49,52]. 在研究时长上, Chen等^[33]和 Zhu等^[34]的研究表明, 微塑料在室内培养试验的前期(≤ 15 d)显著改变了土壤无机氮含量, 但是在后期培养中并未发现其对无机氮含量的改变. 在不同地区的土壤中, 微塑料对土壤无机氮含量的影响也不同, Yu等^[41]的研究表明PE微塑料在四川和江苏的土壤中能够显著减少土壤 NO_3^- 含量, 在四川(增加)和湖南(减少)土壤中能够影响土壤 NH_4^+ 含量, 但是在其他地区的土壤(江西和浙江)中则无显著差

异. 甚至在不同的土地利用类型中, 微塑料对土壤 NH_4^+ 含量的影响也不一致^[29].

除对土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 的影响外, 也有研究指出微塑料在添加的第12~15 d可以显著减少土壤 NO_2^- 含量^[33]. 对于土壤有机氮, 不同种类微塑料对其含量的影响也不一致, 聚酰胺树脂(polyamide, PA)、PS、PET和PVC微塑料增加了土壤 DON 含量, 但 PP 和聚羟基丁酸戊酸共聚酯[poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate), PHBV]微塑料减少了土壤 DON 含量^[30,43], 而个别研究发现微塑料可以增加土壤 MBN 含量^[29,30], 减少土壤 AN 含量^[27,51]. 基于室内试验和田间试验的荟萃分析表明, 微塑料添加能够显著减少土壤 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 TN 含量, 增加土壤 NO_2^- 、DON 和 MBN 含量^[54].

当前的研究仍未能就不同种类和含量微塑料对土壤氮素含量造成的影响得出一个确切的结论. 未来微塑料在土壤中的富集存在着更多的不确定性. 比如, 微塑料长时间存在于土壤, 其自身的老化可能减缓了对土壤无机氮含量的影响, 但是更进一步的破碎则可能加深了影响. 综合评估微塑料长期存在于土壤中所带来的土壤氮素含量变化产生的影响应值得关注. 而在不同土壤中所产生的不同变化, 使微塑料在时空上具有相当大的变异. 并且, 当前研究缺少在更大尺度上的研究环境和在不同种类土壤的探索, 这导致其在生态环境中的实际作用与室内研究的结论存在较大的出入, 为评估其生态风险带来了更大的不确定性.

1.2 微塑料对土壤氮素转化过程的影响

土壤氮转化是氮素各转化过程及其速率的组合, 在氮的生物地球化学循环中, 土壤氮转化过程具有“调配器”的作用^[55]. 无机态氮和有机态氮在微生物和酶的作用下的相互转化, 构成了氮循环中最为重要的6个过程: ①固氮; ②氨化作用; ③硝化作用; ④反硝化作用; ⑤厌氧氨氧化(ANAMMOX); ⑥同化, 包括硝酸盐同化、异化还原成铵(dissimilatory nitrite reduction, DNRA)和有机氮矿化^[56]. 当前的研究更多聚焦于对土壤氮养分变化比较重要的几个氮素转化过程, 如硝化和矿化过程, 但缺少对土壤反硝化、固氮、同化(如DNRA)等过程的研究. Shi等^[32,36]的研究发现, 微塑料能够降低土壤净累积氮硝化速率和净累积氮矿化速率, 并且其高含量可能会增加土壤微生物的氧化还原活性官能团, 从而造成了大量的可溶性物质被微生物优先利用, 同时其发现微塑料增加了土壤中DOC含量, 造成了更大的土壤可溶性碳氮比, 而导致了土壤矿物氮的固定^[57]. 另外, Zhu等^[34]的研究也表明,

表 2 微塑料对土壤氮素含量影响的试验参数¹⁾
Table 2 Experimental parameters for the effect of MPs on soil nitrogen content

地点	土壤质地或类型	时长	试验类型	文献
北京	淋溶土	150 d	室内	[23]
重庆	壤土	56 d	室内	[29]
德国	砂壤	40 d	室内	[26]
德国	— ¹⁾	24 d	室内	[30]
甘肃	粉砂质壤土	30 d	室内	[31]
广东	黏土	15 d	室内	[25]
吉林和宁夏	黏土和砂壤	53 d	室内	[32]
江苏	—	70 d	室内	[33]
江西	砂壤	60 d	室内	[34]
澳大利亚 ²⁾	砂壤	42 d	室内	[35]
宁夏	黏壤土	60 d	室内	[36]
日本	砂土	28 d	室内	[37]
陕西	砂壤土	30 d	室内	[38]
山东	壤土	45 d	室内	[24]
山东	—	70 d	室内	[39]
山东	砂壤	120 d	室内	[40]
四川、湖南、江西、浙江和江苏	壤土、粉砂质壤土、粉砂质壤土、粉砂质壤土和粉砂质壤土	28 d	室内	[41]
四川	—	28 d	室内	[42]
天津	—	56 d	室内	[44]
新疆	粉砂质壤土	约 1a	室内	[43]
浙江	水耕人为土	29 d	室内	[45]
浙江	黏壤土	28 d	室内	[46]
广东	氧化土	151 d	盆栽	[27]
广东	—	—	盆栽	[28]
荷兰	砂土	112 d	盆栽	[47]
江苏	湿润淋溶土	349 d	盆栽	[48]
江苏	人为土	152 d	盆栽	[49]
江苏	—	100 d	盆栽	[50]
江苏	—	30 d	盆栽	[51]
北威尔士	砂质黏壤土	约 6 个月	田间	[52]
北威尔士	砂质黏壤土	约 7 个月	田间	[53]

1) “—”表示文章中没有相关信息;2)本供试土壤为人工配比后接种了来自澳大利亚森林土壤中的微生物

含有 30% 塑化剂的 PVC 微塑料和由 PVC 管制成的微塑料(含塑化剂)在整个培养过程中显著降低了土壤潜在硝化率,但是未添加塑化剂或较少塑化剂添加的 PVC 微塑料并未显著影响土壤潜在硝化速率,这表明微塑料中存在的塑化剂也会影响土壤氮素转化过程.此外,有研究发现微塑料同时减少了土壤中 NO₃⁻,并增加了土壤中 NH₄⁺的含量^[25,29,32,46],这可能是微塑料抑制土壤硝化率的表现.但是,有研究表明微塑料改善了土壤的通气性^[26],从而能够促进土壤硝化过程^[45],这同样也为微塑料可能抑制土壤中反硝化过程提供理论支持.

上述研究基本都是根据土壤无机氮的变化而计算出的氮转化率,但土壤无机氮含量受限于多种氮循环过程的影响,因此需要采用更进一步的手段甄别出微塑料对这些路径的影响.此外,目前大多数研究都集中在硝化作用对土壤 N₂O 的排放,而在集

约化农田土壤低 pH、低有机碳条件下反硝化是影响土壤 N₂O 排放的一个重要路径,由于缺乏环境 N₂O 排放数据导致目前微塑料对反硝化过程影响仅局限于推测阶段.不过,在污泥环境中的研究表明,微塑料可能会增加土壤反硝化速率,这可以为微塑料对土壤中反硝化作用的影响提供一定的理论支撑.

1.3 微塑料对土壤 N₂O 排放的影响

以上研究表明,微塑料会对土壤氮素含量和氮素转化过程存在影响,因此其对土壤 N₂O 排放的影响逐渐受到关注(表 3).如 Chen 等^[25]和 Yu 等^[58]的研究指出微塑料可以增加土壤中 N₂O 的排放,而 Ren 等^[19]和 Rillig 等^[26]的研究则发现微塑料添加抑制了土壤 N₂O 的累积排放.更有研究指出,微塑料对土壤 N₂O 累积排放量无显著影响^[46].上述研究都基于室内培养试验,在盆栽和田间尺度上,微塑料对土壤

N₂O 影响的研究仍十分稀少. 尽管如此, 有两项研究仍可以为人们提供相应的观点. Brown 等^[52]的研究发现, 微塑料添加对 N₂O 排放变化并无影响, 这可能是由于整体 N₂O 排放通量较小, 导致试验结果并不显著. Greenfield 等^[53]的研究则指出, 传统微塑料 PE 减少了田间土壤 N₂O 累积排放量, 然而生物可降解微塑料 PHBV 却不会影响土壤 N₂O 的累积排放量.

微塑料对土壤 N₂O 排放的影响并不一致, 其作用机制也有待于探索. Yu 等^[41]的研究认为这种差异可能是由于试验土壤不同而导致的, 其从基因的角度分析了 N₂O 排放的问题, 在 5 个不同地区采集的

水稻土中发现低矿质氮含量的土壤(取自四川)可能限制了微塑料对土壤硝化和反硝化的关键功能基因的影响, 使得微塑料并未影响土壤 N₂O 的排放; 在低 pH 土壤中(取自江西), 微塑料则增加了土壤硝化过程的基因丰度从而增加了土壤硝化过程产生 N₂O 的可能; 另外, 微塑料在不同地区土壤中对反硝化功能基因的影响也因土而异, 如在湖南和江苏地区的水稻土壤中, 微塑料添加增加了 *nirS* 基因丰度, 可能诱发了更高的 N₂O 产生, 但在浙江地区的水稻土壤中, 微塑料的添加减少了 *nosZ* 的基因丰度进而增加土壤 N₂O 的排放.

表 3 微塑料对土壤 N₂O 排放的影响¹⁾
Table 3 Effect of MPs on soil N₂O emissions

地点	土壤质地或类型	时长	试验类型	微塑料种类	质量分数/%	大小	N ₂ O 排放	文献
德国	砂壤	40 d	室内	PET	0.4	8 mm	微塑料抑制了 N ₂ O 累积排放量	[26]
广东	黏土	15 d	室内	PVC、PP、PE、PS 和 PET	0.25、2 和 7	100 μm	微塑料显著增加了土壤 N ₂ O 排放, 随微塑料浓度增加, PVC、PP、PS 和 PET 微塑料处理减少了 N ₂ O 排放增幅, 而 PE 处理增加了 N ₂ O 排放增幅	[25]
日本	砂土	28 d	室内	PLA/PBS 混合物、PBAT 和 PLA	PLA/PBS 混合物、PBAT: 0.2 PLA: 2	<5 mm	PBAT 处理显著增加了土壤累积 N ₂ O 排放, 其他处理未显著影响土壤 N ₂ O 排放	[37]
四川、湖南、江西、浙江和江苏	壤土、粉砂质壤土、粉砂质壤土、粉砂质壤土和粉砂质壤土	28 d	室内	PE	1	<187.5 μm	在湖南、江苏、浙江等地的土壤中, 微塑料显著提高了 N ₂ O 排放; 而在四川和江西土壤中并未产生影响. 同时, 在江苏和浙江的土壤中发现老化微塑料较新微塑料显著提高了土壤 N ₂ O 排放	[41]
天津	黏土	30 d	室内	PE	5	<13 μm 和 <150 μm	微塑料在添加的前期能够减少 N ₂ O 排放, 而在后期则会增加土壤 N ₂ O 排放; 微塑料处理 N ₂ O 累积排放量显著下降	[19]
浙江	黏土	28 d	室内	PE	0、0.1、0.5、1、3、6 和 18	—	无显著影响	[46]
北威尔士	砂质黏壤土	约 6 个月	田间	LDPE	0、0.01、0.1 和 1	—	未显著影响 N ₂ O 排放, N ₂ O 排放通量变化较小	[52]
北威尔士	砂质黏壤土	约 7 个月	田间	PE 和 PHBV	0.01	0~48 μm 和 1~15 μm	PE 微塑料显著降低了土壤 N ₂ O 累积排放量, 但 PHBV 微塑料对 N ₂ O 累积排放量无显著影响	[53]

1) “—”表示文章中没有相关数据; LDPE: 低密度聚乙烯 (low density polyethylene); PBAT: 聚乙酸对苯二甲酸丁二酯 (polybutylene adipate terephthalate); PBS: 聚丁二酸-丁二酯 (polybutylene-succinate); PE: 聚乙烯 (polyethylene); PET: 聚酯纤维 (polyester); PHBV: 聚羟基丁酸戊酸共聚酯 [Poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)]; PLA: 聚乳酸 (polylactic acid); PP: 聚丙烯 (polypropylene); PS: 聚苯乙烯 (polystyrene); PVC: 聚氯乙烯 (polyvinyl chloride)

土壤中产生的 N₂O 主要来源于微生物参与的氮转化过程, 包括硝化、反硝化和硝酸盐异化还原成铵等过程^[59]. 其中硝化和反硝化过程是 N₂O 产生的主要过程. 由微塑料带来的对土壤硝化和反硝化影响可能也会决定土壤中 N₂O 的排放. 如 Chen 等^[25]的研究发现, 微塑料提高了土壤 NH₄⁺ 含量但是减少了土壤 NO₃⁻ 含量. 这是土壤硝化率降低的表现, 此时可能是微塑料所造成的反硝化过程带来的影响增加了土壤 N₂O 产生, 但是该研究却并未

对此进行观察. 但 Rillig 等^[26]的研究表明, 由于微塑料导致土壤通气性的提高造成了对反硝化的抑制, 从而减少了土壤 N₂O 排放. 同样, Greenfield 等^[53]在田间的研究指出 PE 微塑料造成了更低的土壤湿度, 可能会增加土壤通气性, 造成了土壤对反硝化作用的抑制, 从而减少土壤 N₂O 排放. 实际上 N₂O 排放的许多过程的观测缺失使人们不能够准确地判断出 N₂O 的具体排放路径, 因而不能明确微塑料究竟通过何种途径对土壤 N₂O 排放产生

影响. 未来的研究需要更进一步采用稳定同位素的手段, 具体区分出微塑料对 N_2O 的影响途径. 另外, 无论从微尺度或中大尺度上的 N_2O 排放观测还是对 N_2O 排放机制的研究, 目前都处于初步探索阶段. 因此, 需要更多探索微塑料对土壤 N_2O 排放及影响机制的研究.

2 微塑料对土壤氮素相关的微生物的影响及其驱动机制

2.1 微塑料对氮循环功能酶活性的影响

土壤酶活性是驱动土壤氮素循环的重要因素. 在众多土壤氮素循环相关酶活性中, 脲酶(urease, URE)被广泛认为是衡量氮矿化的良好指标^[60]. 有研究发现微塑料能够提高土壤中脲酶的活性, 这种能力同时受到微塑料种类、浓度及污染时长的影响^[32,40,61-63]. 另有研究表明微塑料抑制了脲酶活性^[48,49,64], 或对脲酶活性无影响^[27,33]. 此外, 土壤中反硝化过程的关键酶——硝酸盐还原酶(nitrate reductase, NAR)和亚硝酸盐还原酶(nitrite reductase, NIR)活性也会因微塑料的添加而发生变化. 如纳米微塑料能够增加NAR和NIR的活性^[24], 而聚氨酯(polyurethane, PU)微塑料能够增加土壤NAR活性^[65]. 羟胺还原酶(hydroxylamine reductase, HAR)作为影响硝化过程的酶, 在微塑料处理下没有显著变化^[24]. *N*-乙酰- β -氨基葡萄糖苷酶(β -1,4-nacetylglucosaminidase, NAG)和亮氨酸氨肽酶(leucine aminopeptidase, LAP)作为衡量氮循环的相关酶^[66], 同样也会受到微塑料的影响^[28], 并且微塑料的大小会影响NAG活性的增加或减少^[42]. 更进一步的荟萃分析表明, 微塑料除了能够提高土壤中NAR和URE, 而对HAR无影响外, 还能够提高LAP、几丁质酶(chitinase)和蛋白酶(protease)的活性^[54].

2.2 微塑料对氮循环功能基因丰度的影响

土壤硝化过程是指土壤铵态氮或者有机氮, 在羟基氧化还原酶(功能基因为*hao*)、氨单加氧酶(功能基因为*amoABC*)和亚硝酸盐氧化还原酶(功能基因为*nxrA*)等一系列酶催化下转化为 NO_3^- 的过程. 微塑料能够影响土壤中硝化过程相关功能基因. 有研究发现, 微塑料添加能增加土壤*amoA*基因丰度^[24,50,64], 但是也有研究发现其对土壤*amoA*基因丰度有抑制作用或并无影响^[41,46,67]. 此外, 即使是同一种类微塑料, 不同的研究中对氮循环功能基因的影响也不一致. 例如, Gao等^[46]的研究发现LDPE微塑料显著降低了土壤*amoA*基因丰度, 且随LDPE微塑料浓度增加会增强其对*amoA*基因的影响, 而Rong等^[68]的研究则发现LDPE微塑料

增加了土壤*amoA*基因丰度. 此外, 微塑料添加还可能会促进*amoB*和*nxrA*基因丰度^[24,50], 抑制*amoC*和*hao*基因丰度^[34]. 然而, 荟萃分析的结果表明微塑料对硝化过程的相关功能基因(*amo*和*nxr*)没有明显影响, 但是对反硝化功能基因具有显著的影响^[54].

土壤反硝化过程, 是由*nirK*、*nirS*和*nosZ*等相关功能基因编码的关键酶催化 NO_3^- 最终转化为 N_2O 和 N_2 的过程. 有研究发现微塑料促进了*nirS*^[46,68]、*nirK*^[68]和*nosZ*^[24]基因丰度, 而部分研究则指出微塑料对*nosZ*和*nirK*基因无影响^[46], 甚至抑制了*nirS*和*nirK*的丰度^[24]. 此外, 微塑料还能够影响土壤中*nirA*、*nirD*和*norB*等的反硝化基因丰度^[34]. 这些基因受到了微塑料自身特性和污染时长的影响^[54]. 如Sun等^[69]的研究发现, 短时培养下无论何种微塑料都增加了*nirK*和*nirS*基因丰度, 但长时间培养后不同种类和浓度微塑料之间基因丰度会发生差异, 即低浓度和高浓度聚酯纤维(polyester, PET)微塑料、低浓度的PVC和PLA微塑料能够显著降低*nirK*和*nirS*的基因丰度, 但是高浓度的PVC和PLA微塑料的影响效果则相反.

土壤中氮的固定(*nifD*HK)、矿化(*gdh*)、厌氧氨氧化(AMX)和氨化(*ureABC*)等过程的相关功能基因也会受到微塑料的影响. 有研究发现, 微塑料能够促进土壤中*nifD*HK的基因丰度^[34,68], 并且在河口淤泥中发现生物可降解类微塑料(PLA)较传统微塑料(PP、PVC)能够显著增加氮固定相关酶基因丰度^[67]. 同时, 微塑料还能够增加土壤中AMX和*ureABC*的基因丰度^[24,34], 影响土壤中*gdh*的基因丰度, 但是受到微塑料种类、浓度和污染时间的影响^[69].

Hu等^[70]的研究更进一步区分出了微塑料际(plastispheres)与土壤之间氮循环功能基因丰度的不同, 其指出微塑料对土壤参与氮循环的基因丰度改变很小, 但是PE和生物可降解(PBAT-PLA)的微塑料际刺激了编码氮的固定(*nifAS*)、降解(*ureC*、*GDH2*)和同化硝酸盐还原(*nasAD*、*nirAB*)过程的功能基因丰度, 减少了编码硝化(*amoABC*、*hao*)和反硝化(*nirKS*、*norBC*、*nosZ*)的功能基因丰度, 其中生物可降解微塑料比PE微塑料产生了更大的影响.

2.3 微塑料驱动土壤氮素相关微生物影响机制总结

微塑料改变环境氮循环存在4种潜在影响机制: 抑制功能细菌、增加媒介氧含量、抑制编码基因表达以及改变功能酶活性^[15]. 本研究结果表明, 微塑料的富集能够影响土壤氮循环功能酶活性和功能基因的表达. 从酶活性的角度而言, 微塑料促进了土

壤反硝化过程的两种关键酶 NAR 和 NIR 活性,可能增强了土壤反硝化过程,而微塑料对于脲酶活性的研究结果并不一致,且当前研究并未发现对 HAR 的影响.从基因角度而言,微塑料对硝化过程和反硝化过程功能酶基因丰度的影响并不一致.但是增加了土壤氮固定的相关功能基因丰度,这可能印证了微塑料促使土壤中大量可溶性物质被微生物优先使用,从而增加土壤活性碳氮比,并促进土壤氮固定这一观点.

此外,微塑料可能会增加土壤孔隙中的氧含量,但其本身由于稳定的性质和较低的渗透率,存在物理阻断微生物之间相互作用的可能,也会间接影响土壤微生物群落^[71].有研究表明微塑料引发了群落结构的改变,并可能增强土壤中微生物的相互作用,以促进土壤氮素转化过程^[35,43,72].同时,Zhang 等^[73]的研究表明,微塑料可能具有和土壤阳离子交换容量相似的铵吸附能力.这表明微塑料本身可以吸附环境中的无机营养物,并且其巨大的比表面积能够为微生物提供一定的吸附位点,使得其选择性地富集个别微生物,形成特定的微塑料际^[70,74,75].如 Su 等^[74]在水环境中发现微塑料表面形成的生物膜会造成一个高度缺氧的环境,从而会选择性地吸附反硝化作用者;Hu 等^[70]在土壤环境中发现微塑料刺激了土壤氮循环功能基因的丰度.但是,对于土壤环境中微塑料对氮循环的影响还需要进一步地研究.

3 不足与展望

本研究通过综合分析前人的研究,得出微塑料能够影响土壤氮素转化和 N₂O 排放这一观点.然而对于此方向,目前的研究存在一定的局限性,难以得出一般性结论.首先,当前研究在表观现象上主要聚焦于微塑料对土壤硝化和矿化过程的影响,缺少对土壤中对反硝化和 DNRA 等过程的观察.但在微观机制上,大多数研究采用了基因手段探索了土壤硝化、反硝化和矿化功能基因丰度的变化,而缺少对土壤同化作用、氨化作用相关功能基因的研究,同时缺少对氮循环过程中多种相关功能酶的研究,无法形成表观和机制的相互印证关系.其次,由于微塑料自身特性以及缺少盆栽试验和田间试验的数据,导致其对土壤氮素转化和 N₂O 排放的影响并不统一且代表性不强.考虑到微塑料在田间使用后可能存在的巨大环境风险,并且难以回收,在后续研究中可以建议在盆栽尺度展开试验,并同步结合采用稳定同位素与分子生物学结合的手段对土壤氮素转化的机制进行研究,为气候变化条件下微塑料富集对氮素的生物地球化学循环以及环境的潜在影响

提供理论依据.

参考文献:

- [1] Andrady A L. Microplastics in the marine environment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(8): 1596-1605.
- [2] Rochman C M, Brookson C, Bikker J, *et al.* Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2019, **38**(4): 703-711.
- [3] Koelmans A A, Redondo-Hasselerharm P E, Mohamed Nor N H, *et al.* Risk assessment of microplastic particles[J]. Nature Reviews Materials, 2022, **7**(2): 138-152.
- [4] Kooi M, Koelmans A A. Simplifying microplastic via continuous probability distributions for size, shape, and density [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2019, **6**(9): 551-557.
- [5] Rillig M C, Lehmann A. Microplastic in terrestrial ecosystems[J]. Science, 2020, **368**(6498): 1430-1431.
- [6] Horton A A, Walton A, Spurgeon D J, *et al.* Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities [J]. Science of the Total Environment, 2017, **586**: 127-141.
- [7] Nizzetto L, Futter M, Langaas S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(20): 10777-10779.
- [8] Shen M C, Zeng G M, Zhang Y X, *et al.* Can biotechnology strategies effectively manage environmental (micro) plastics? [J]. Science of the Total Environment, 2019, **697**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134200.
- [9] 朱永官, 朱冬, 许通, 等. (微)塑料污染对土壤生态系统的影响: 进展与思考[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(1): 1-6.
Zhu Y G, Zhu D, Xu T, *et al.* Impacts of (micro) plastics on soil ecosystem: progress and perspective [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(1): 1-6.
- [10] Mbachu O, Jenkins G, Kaparaju P, *et al.* The rise of artificial soil carbon inputs: reviewing microplastic pollution effects in the soil environment [J]. Science of the Total Environment, 2021, **780**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146569.
- [11] Rillig M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(12): 6453-6454.
- [12] Gouin T, Roche N, Lohmann R, *et al.* A thermodynamic approach for assessing the environmental exposure of chemicals absorbed to microplastic [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(4): 1466-1472.
- [13] Iqbal S, Xu J C, Allen S D, *et al.* Unraveling consequences of soil micro- and nano-plastic pollution on soil-plant system: implications for nitrogen (N) cycling and soil microbial activity [J]. Chemosphere, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127578.
- [14] Rillig M C, Leifheit E, Lehmann J. Microplastic effects on carbon cycling processes in soils [J]. PLoS Biology, 2021, **19**(3), doi: 10.1371/journal.pbio.3001130.
- [15] Shen M C, Song B, Zhou C Y, *et al.* Recent advances in impacts of microplastics on nitrogen cycling in the environment: a review [J]. Science of the Total Environment, 2022, **815**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152740.
- [16] Wang X, Xing Y, Lv M J, *et al.* Recent advances on the effects of microplastics on elements cycling in the environment [J]. Science of the Total Environment, 2022, 849, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157884.
- [17] Canfield D E, Glazer A N, Falkowski P G. The evolution and future of earth's nitrogen cycle [J]. Science, 2010, **330**(6001):

- 192-196.
- [18] Yu H, Zhang Z, Zhang Y, *et al.* Effects of microplastics on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in the context of straw incorporation: a comparison with different types of soil [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117733.
- [19] Ren X W, Tang J C, Liu X M, *et al.* Effects of microplastics on greenhouse gas emissions and the microbial community in fertilized soil [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113347.
- [20] Riveros G, Urrutia H, Araya J, *et al.* Microplastic pollution on the soil and its consequences on the nitrogen cycle: a review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29** (6): 7997-8011.
- [21] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2013.
- [22] Tian H Q, Xu R T, Canadell J G, *et al.* A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks [J]. *Nature*, 2020, **586**(7828): 248-256.
- [23] Hou J H, Xu X J, Yu H, *et al.* Comparing the long-term responses of soil microbial structures and diversities to polyethylene microplastics in different aggregate fractions [J]. *Environment International*, 2021, **149**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106398.
- [24] Jiao K Q, Yang B S, Wang H, *et al.* The individual and combined effects of polystyrene and silver nanoparticles on nitrogen transformation and bacterial communities in an agricultural soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **820**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153358.
- [25] Chen X, Xie Y J, Wang J, *et al.* Presence of different microplastics promotes greenhouse gas emissions and alters the microbial community composition of farmland soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **879**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162967.
- [26] Rillig M C, Hoffmann M, Lehmann A, *et al.* Microplastic fibers affect dynamics and intensity of CO₂ and N₂O fluxes from soil differently [J]. *Microplastics and Nanoplastics*, 2021, **1**(1), doi: 10.1186/s43591-021-00004-0.
- [27] Liu Z Q, Liu Z X, Wu L Z, *et al.* Effect of polyethylene microplastics and acid rain on the agricultural soil ecosystem in Southern China [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **303**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119094.
- [28] Fu F, Long B B, Huang Q, *et al.* Integrated effects of residual plastic films on soil-rhizosphere microbe-plant ecosystem [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **445**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130420.
- [29] Zhang G H, Liu D, Lin J J, *et al.* Priming effects induced by degradable microplastics in agricultural soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, **180**, doi: 10.1016/j.soilbio.2023.109006.
- [30] Zhou J, Gui H, Banfield C C, *et al.* The microplastisphere: biodegradable microplastics addition alters soil microbial community structure and function [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, **156**, doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108211.
- [31] Zhang Y X, Li X, Xiao M, *et al.* Effects of microplastics on soil carbon dioxide emissions and the microbial functional genes involved in organic carbon decomposition in agricultural soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150714.
- [32] Shi J, Wang J, Lv J F, *et al.* Microplastic presence significantly alters soil nitrogen transformation and decreases nitrogen bioavailability under contrasting temperatures [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **317**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115473.
- [33] Chen H P, Wang Y H, Sun X, *et al.* Mixing effect of polylactic acid microplastic and straw residue on soil property and ecological function [J]. *Chemosphere*, 2020, **243**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125271.
- [34] Zhu F X, Yan Y Y, Doyle E, *et al.* Microplastics altered soil microbiome and nitrogen cycling: the role of phthalate plasticizer [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **427**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127944.
- [35] Ng E L, Lin S Y, Dungan A M, *et al.* Microplastic pollution alters forest soil microbiome [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **409**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124606.
- [36] Shi J, Wang Z, Peng Y M, *et al.* Microbes drive metabolism, community diversity, and interactions in response to microplastic-induced nutrient imbalance [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **877**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162885.
- [37] Inubushi K, Kakiuchi Y, Suzuki C, *et al.* Effects of biodegradable plastics on soil properties and greenhouse gas production [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, **68**(1): 183-188.
- [38] Liu H F, Yang X M, Liu G B, *et al.* Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil [J]. *Chemosphere*, 2017, **185**: 907-917.
- [39] Zhang S W, Pei L, Zhao Y X, *et al.* Effects of microplastics and nitrogen deposition on soil multifunctionality, particularly C and N cycling [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **451**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131152.
- [40] Feng X Y, Wang Q L, Sun Y H, *et al.* Microplastics change soil properties, heavy metal availability and bacterial community in a Pb-Zn-contaminated soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **424**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127364.
- [41] Yu Y X, Li X, Feng Z Y, *et al.* Polyethylene microplastics alter the microbial functional gene abundances and increase nitrous oxide emissions from paddy soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **432**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128721.
- [42] Ma J, Xu M, Wu J, *et al.* Effects of variable-sized polyethylene microplastics on soil chemical properties and functions and microbial communities in purple soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **868**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161642.
- [43] Zhang X Y, Li Y, Lei J J, *et al.* Time-dependent effects of microplastics on soil bacteriome [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **447**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.130762.
- [44] Li H X, Liu L. Short-term effects of polyethene and polypropylene microplastics on soil phosphorus and nitrogen availability [J]. *Chemosphere*, 2022, **291**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132984.
- [45] Huang S Y, Guo T, Feng Z, *et al.* Polyethylene and polyvinyl chloride microplastics promote soil nitrification and alter the composition of key nitrogen functional bacterial groups [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **453**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131391.
- [46] Gao B, Yao H Y, Li Y Y, *et al.* Microplastic addition alters the microbial community structure and stimulates soil carbon dioxide emissions in vegetable-growing soil [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2021, **40**(2): 352-365.
- [47] Meng F R, Yang X M, Riksen M, *et al.* Effect of different polymers of microplastics on soil organic carbon and nitrogen - a mesocosm experiment [J]. *Environmental Research*, 2022, **204**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111938.
- [48] Han L F, Chen L Y, Chen S, *et al.* Polyester microplastic mitigated NH₃ volatilization from a rice - wheat rotation system:

- does particle size or natural aging effect matter? [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, **10**(6): 2180-2191.
- [49] Chen S, Feng Y F, Han L F, *et al.* Responses of rice (*Oryza sativa* L.) plant growth, grain yield and quality, and soil properties to the microplastic occurrence in paddy soil [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, **22**(8): 2174-2183.
- [50] Han L F, Chen L Y, Li D T, *et al.* Influence of polyethylene terephthalate microplastic and biochar co-existence on paddy soil bacterial community structure and greenhouse gas emission [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **292**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118386.
- [51] Liu R, Liang J W, Yang Y H, *et al.* Effect of polylactic acid microplastics on soil properties, soil microbes and plant growth [J]. *Chemosphere*, 2023, **329**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138504.
- [52] Brown R W, Chadwick D R, Thornton H, *et al.* Field application of pure polyethylene microplastic has no significant short-term effect on soil biological quality and function [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, **165**, doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108496.
- [53] Greenfield L M, Graf M, Rengaraj S, *et al.* Field response of N₂O emissions, microbial communities, soil biochemical processes and winter barley growth to the addition of conventional and biodegradable microplastics [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, **336**, doi: 10.1016/j.agee.2022.10802.
- [54] Su P J, Gao C Y, Zhang X J, *et al.* Microplastics stimulated nitrous oxide emissions primarily through denitrification: a meta-analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **445**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130500.
- [55] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. *土壤学报*, 2016, **53**(2): 292-304.
Wang J, Cheng Y, Cai Z C, *et al.* Effects of long-term fertilization on key processes of soil nitrogen cycling in agricultural soil: a review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(2): 292-304.
- [56] Kuypers M M M, Marchant H K, Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, **16**(5): 263-276.
- [57] Bruun E W, Ambus P, Egsgaard H, *et al.* Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **46**: 73-79.
- [58] Yu Y X, Li X, Fan H X, *et al.* Dose effect of polyethylene microplastics on nitrous oxide emissions from paddy soils cultivated for different periods [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **453**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131445.
- [59] 何美霞, 段鹏鹏, 李德军. 土壤氧化亚氮产生路径及其研究方法进展[J]. *生态学杂志*, 2023, **42**(6): 1497-1508.
He M X, Duan P P, Li D J. Review on the pathways of soil nitrous oxide production and its research methods [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(6): 1497-1508.
- [60] Cordero I, Snell H, Bardgett R D. High throughput method for measuring urease activity in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **134**: 72-77.
- [61] Huang Y, Zhao Y R, Wang J, *et al.* LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.112983.
- [62] Fei Y F, Huang S Y, Zhang H B, *et al.* Response of soil enzyme activities and bacterial communities to the accumulation of microplastics in an acid cropped soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **707**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135634.
- [63] Fan P, Tan W B, Yu H. Effects of different concentrations and types of microplastics on bacteria and fungi in alkaline soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, **229**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.113045.
- [64] Yu H, Fan P, Hou J H, *et al.* Inhibitory effect of microplastics on soil extracellular enzymatic activities by changing soil properties and direct adsorption: An investigation at the aggregate-fraction level [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115544.
- [65] Lian J P, Liu W T, Meng L Z, *et al.* Effects of microplastics derived from polymer-coated fertilizer on maize growth, rhizosphere, and soil properties [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **318**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128571.
- [66] Schimel J. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(4): 549-563.
- [67] Sun X, Tao R D, Xu D Q, *et al.* Role of polyamide microplastic in altering microbial consortium and carbon and nitrogen cycles in a simulated agricultural soil microcosm [J]. *Chemosphere*, 2023, **312**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.137155.
- [68] Rong L L, Zhao L F, Zhao L C, *et al.* LDPE microplastics affect soil microbial communities and nitrogen cycling [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **773**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145640.
- [69] Sun X, Zhang X Y, Xia Y X, *et al.* Simulation of the effects of microplastics on the microbial community structure and nitrogen cycle of paddy soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **818**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151768.
- [70] Hu X J, Gu H D, Sun X X, *et al.* Distinct influence of conventional and biodegradable microplastics on microbe-driving nitrogen cycling processes in soils and plastispheres as evaluated by metagenomic analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **451**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131097.
- [71] Shi J, Sun Y Z, Wang X, *et al.* Microplastics reduce soil microbial network complexity and ecological deterministic selection [J]. *Environmental Microbiology*, 2022, **24**(4): 2157-2169.
- [72] Zhou Z D, Hua J F, Xue J H. Polyethylene microplastic and soil nitrogen dynamics: unraveling the links between functional genes, microbial communities, and transformation processes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **458**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131857.
- [73] Zhang W, Zhang L Y, Hua T, *et al.* The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113440.
- [74] Su X X, Yang L Y, Yang K, *et al.* Estuarine plastisphere as an overlooked source of N₂O production [J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1), doi: 10.1038/s41467-022-31584-x.
- [75] Sun Y Z, Shi J, Wang X, *et al.* Deciphering the mechanisms shaping the plastisphere microbiota in soil [J]. *mSystems*, 2022, **7**(4), doi: 10.1128/mSystems.00352-22.

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)