



目次

北京市2014~2020年PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>时空分布与健康效应评估..... 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)

京津冀地区高分辨率PM<sub>2.5</sub>浓度时空变化模拟与分析..... 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)

京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对PM<sub>2.5</sub>污染影响..... 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 王瑞鹏 (4095)

太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析..... 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)

嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析..... 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏崢 (4116)

基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析..... 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)

新乡市大气PM<sub>2.5</sub>载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险..... 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)

黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化..... 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)

天津市2020年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源..... 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐逸 (4158)

中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素..... 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)

乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究..... 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)

珠江三角洲海岸背景区大气VOCs污染特征与来源..... 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)

永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析..... 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)

汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别..... 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)

环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估..... 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)

柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价..... 张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)

雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价..... 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)

龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价..... 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)

硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源..... 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)

包头南海湿地磷形态及污染源定量识别..... 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)

城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析..... 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)

水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析..... 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)

锰砂人工湿地对污染物的强化去除..... 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)

4种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果..... 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)

输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应..... 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)

木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性..... 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)

海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用..... 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)

纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)生长的拮抗效应及其作用机制..... 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)

螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析..... 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)

螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响..... 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)

溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响..... 池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)

间歇梯度曝气下缩短SRT强化短程SNEDPR系统脱氮除磷..... 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)

生物膜系统中部分反硝化实现特性..... 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)

厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响..... 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)

不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)

中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的Meta分析..... 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)

青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价..... 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)

电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价..... 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)

改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响..... 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海滨, 李春燕, 程琼仪 (4441)

组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响..... 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)

不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响..... 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)

1株草螺属植物内生菌R-13的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响..... 鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)

不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应..... 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)

高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征..... 刘晓华, 魏天兴 (4489)

餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验..... 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)

秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系..... 马宸菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制..... 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响..... 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)

氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米N<sub>2</sub>O排放的影响..... 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)

负载NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N生物炭对土壤N<sub>2</sub>O-N排放和NH<sub>3</sub>-N挥发的影响..... 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)

微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响..... 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)

1985~2019年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析..... 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)

《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)

# 微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响

张秀玲<sup>1</sup>, 鄢紫薇<sup>1</sup>, 王峰<sup>2</sup>, 王玺<sup>1</sup>, 徐晗<sup>1</sup>, 胡荣桂<sup>1</sup>, 严昶<sup>3</sup>, 林杉<sup>1\*</sup>

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070; 2. 湖北省生态环境科学研究院, 武汉 430072; 3. 湖北省农业生态环境保护站, 武汉 430070)

**摘要:** 为探究微塑料污染对土壤有机碳矿化的影响, 采集湖北当阳橘园土壤, 进行室内有机碳矿化培养, 研究添加微塑料和秸秆条件下土壤有机碳矿化特征及酶活性变化. 结果表明, 秸秆和微塑料混施显著影响了土壤有机碳矿化, 但仅添加微塑料对土壤有机碳矿化无显著影响. 与单施秸秆相比, 低量微塑料与秸秆混施处理 (PP1 + S) 显著促进了有机碳矿化, 有机碳累积矿化量增加了 8.20%, 而中高量微塑料与秸秆混施处理 (PP2 + S 和 PP3 + S) 显著降低了有机碳累积矿化量, 其中, 高量微塑料与秸秆混施对土壤有机碳矿化抑制最明显, 降低了 10.13%. 添加微塑料显著降低了  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性, 高量微塑料添加对酶活性的抑制最显著, 与对照相比, 在第 1、6 和 35 d 分别降低了 20.52%、43.93% 和 17.79%; 但是, 添加秸秆缓解了微塑料输入对土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性抑制作用. 有机碳矿化速率与 DOC、MBC 含量和  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性均呈显著正相关.

**关键词:** 微塑料; 秸秆; 有机碳矿化; 橘园土壤;  $\beta$ -葡萄糖苷酶

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4558-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202102042

## Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard

ZHANG Xiu-ling<sup>1</sup>, YAN Zi-wei<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>2</sup>, WANG Xi<sup>1</sup>, XU Han<sup>1</sup>, HU Rong-gui<sup>1</sup>, YAN Chang<sup>3</sup>, LIN Shan<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Arable Land Conservation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, College of Recourses and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Provincial Academy of Eco-environmental Sciences, Wuhan 430072, China; 3. Hubei Agricultural Ecological Environment Protection Station, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** To investigate the effects of microplastics on soil organic carbon mineralization and the changes in soil enzyme activities, an incubation experiment was conducted whereby single applications of either microplastics or straw, and combined application of both, were added to Dangyang citrus orchard soil. The results showed that the combined application of straw and microplastics significantly affected organic carbon mineralization in the soil, but the single addition of microplastics had no significant effect. Compared with straw alone, the application of a small combined amount of microplastics and straw significantly increased soil organic carbon mineralization by 8.20%, while medium and high amounts of the combined application significantly inhibited soil organic carbon mineralization. The lowest amount of organic carbon mineralization occurred with the highest amount of combined microplastics and straw, 10.13% lower than with straw alone. The addition of microplastics significantly reduced the activity of  $\beta$ -glucosidase. In particular, a high amount of microplastics significantly decreased the activity of  $\beta$ -glucosidase, compared with the control, by 20.52%, 43.93%, and 17.79% on the day 1, 6, and 35, respectively. However, straw application alleviated the inhibition effect of microplastic application on soil  $\beta$ -glucosidase activity. The soil organic carbon mineralization rate was significantly positively correlated with DOC, MBC and  $\beta$ -glucosidase activity.

**Key words:** microplastics; straw; organic carbon mineralization; citrus orchard soil;  $\beta$ -glucosidase activity

塑料及塑料制品在工业、农业和日常生活中被大量生产和使用, 给人们带来了便利的同时, 也对环境造成严重污染<sup>[1]</sup>. 有报道认为, 我国是塑料垃圾的排放大国, 仅沿海地区的年排放塑料垃圾就高达 132 ~ 353 万 t, 居全球首位<sup>[2]</sup>. 塑料制品经过一系列的途径分解为粒径小于 5 mm 的微塑料, 因其难以降解, 微塑料污染现已成为一个严重的全球性环境问题. 目前大多数微塑料研究多集中在海洋环境<sup>[3, 4]</sup>, 但针对陆地环境研究还较少, 有研究发现, 陆地上存在的微塑料是海洋中的 4 ~ 23 倍<sup>[5]</sup>. Fuller 等<sup>[6]</sup>的研究表明在高污染土壤微塑料含量占比高

达 7%, 土壤可能是比海洋更大的微塑料储藏库. 因此, 土壤理化性质及生物化学循环对微塑料响应研究显得尤为重要, 但是, 土壤中微塑料污染的研究目前较为缺失, 亟待科研工作者开展相关工作.

土壤中的微塑料主要来源于地膜使用、污泥和有机肥施用、污水灌溉和大气沉降等过程<sup>[7, 8]</sup>. Rillig<sup>[9]</sup>较早提出需关注土壤微塑料污染, 他指出微

收稿日期: 2021-02-05; 修订日期: 2021-03-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200106)

作者简介: 张秀玲(1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤微塑料污染, E-mail: 781730609@qq.com

\* 通信作者, E-mail: linsan@mail.hzau.edu.cn

塑料累积会对土壤理化性质、土壤生态功能和作物生长产生影响. 微塑料添加会影响土壤中可溶性有机质(DOM)含量, Liu 等<sup>[10]</sup>的研究发现高浓度的聚丙烯微塑料添加显著增加了土壤 DOM 含量, 而低浓度的聚丙烯微塑料添加对土壤 DOM 影响不显著. 微塑料具有很强的疏水性, 会改变土壤孔隙度和通气性, 同时它也是有机污染物和致病菌的载体, 影响土壤中生物的活性<sup>[11]</sup>. 有机碳矿化是在微生物参与下分解和利用土壤中的活性有机组分并释放出 CO<sub>2</sub> 的过程, 其矿化速率与 DOM 含量和微生物活性具有显著相关性<sup>[12]</sup>. 有研究发现添加微塑料处理的土壤容重、团聚体、持水能力和微生物活性与对照相比有显著差异<sup>[13]</sup>, 而微塑料导致的土壤容重等性质的改变可能影响土壤其他方面, 从而影响土壤有机碳矿化速率及 CO<sub>2</sub> 释放. 目前针对微塑料对土壤性质影响的研究较少, 更多特征及机制还不够明确.

秸秆覆盖是提高果园生产力有效措施之一. 我国作为农业大国, 秸秆资源丰富, 据统计, 2016 年我国秸秆产量约 9.84 亿 t<sup>[14]</sup>. 有研究表明, 秸秆输入可使我国表层土壤有机碳含量增加 0.81 g·kg<sup>-1</sup><sup>[15]</sup>. 秸秆添加会增加土壤中的有机质, 为微生物生长繁殖提供丰富的基质和良好的环境, 促进有机碳的矿化<sup>[16]</sup>. 不少地区果园采用地膜覆盖技术来减少水土流失, 提高果园生产力<sup>[17,18]</sup>. 农地膜等

塑料制品的使用是土壤中微塑料的重要来源, 微塑料在土壤中累积会破坏良好生态环境, 降低土壤微生物群落多样性<sup>[19]</sup>, 进而可能对果园土壤碳氮循环造成不利影响. 因此, 对于秸秆输入后, 微塑料污染对果园土壤的影响亟待进一步研究.

基于此, 为研究微塑料和秸秆添加对土壤有机碳矿化的影响, 本文以橘园土壤为研究对象, 通过室内培养试验, 观测微塑料和秸秆添加后有机碳矿化特征, 分析有机碳矿化与土壤理化性质之间的关系, 以此探究土壤微塑料污染与土壤性质的相互作用机制.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

土壤采自湖北省当阳市半月镇春光村的柑橘园(N 30°39'48", E 111°48'24"), 该地区属于亚热带季风气候, 年均气温 16.4℃, 年均降雨量为 936 ~ 1 048 mm, 海拔高度 78.93 m, 土壤类型为黄棕壤. 采集 0 ~ 20 cm 土壤, 剔除有机残体和石头, 取部分鲜样 -4℃ 保存测土壤理化性质, 其余风干过 2 mm 筛做培养试验. 微塑料为聚丙烯(PP)粉末, 过 0.15 mm 筛, 密度 0.90 ~ 0.91 g·cm<sup>-3</sup>, 去离子水冲洗 3 次烘干后备用. 秸秆为小麦秸秆, 过 1 mm 筛. 秸秆的总碳、总氮含量分别为 412.10 g·kg<sup>-1</sup> 和 6.02 g·kg<sup>-1</sup>. 土壤的基本性质如表 1.

表 1 土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of soils

土壤类型	pH	TC /g·kg <sup>-1</sup>	TN /g·kg <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N /mg·kg <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N /mg·kg <sup>-1</sup>	DOC /mg·kg <sup>-1</sup>
黄棕壤	4.59 ± 0.65	10.96 ± 0.74	1.78 ± 0.24	23.18 ± 0.68	14.52 ± 0.45	23.73 ± 0.56

### 1.2 试验设计

本试验设置 8 个处理: 空白对照(不添加微塑料和秸秆, CK); 添加低量微塑料(0.25% 干土重, PP1); 添加中量微塑料(2% 干土重, PP2); 添加高量微塑料(7% 干土重, PP3); 添加秸秆(1% 干土重, S); 低量微塑料和秸秆混施(0.25% 微塑料与 1% 秸秆混施, PP1 + S); 中量微塑料和秸秆混施(2% 微塑料与 1% 秸秆混施, PP2 + S); 高量微塑料和秸秆混施(7% 微塑料与 1% 秸秆混施, PP3 + S). 微塑料添加梯度参照文献<sup>[13]</sup>, 等于低于目前报道土壤环境中最高微塑料浓度 7%<sup>[6]</sup>. 每个处理 3 个重复. 在正式培养前将风干土调成质量分数 18% 的含水率, 在 25℃ 恒温培养箱预培养一周, 以激活微生物. 在预培养后, 将微塑料和秸秆按上述比例与土壤充分混合, 并调节含水率为 21%. 每个培养瓶装 380 g 土壤, 瓶口用带有小针孔的保鲜膜密封, 以便于气体交换, 将培养瓶放入 25℃ 恒温培养箱培养

35 d. 每隔 1 d 用称重法补充水分, 以保持试验期间含水率稳定.

### 1.3 样品采集和测定方法

有机碳矿化气体采集参照孙贇等<sup>[20]</sup>的方法. 在培养的第 1、2、3、4、6、7、8、10、12、15、18、21、23、28 和 35 d 采集气体. 采样前打开保鲜膜敞口 20 min, 使得培养中气体与周围空气充分交换, 之后用带有两支玻璃管的橡胶塞密封瓶口, 其中一支管连接密封气球置于瓶内, 用来调节采样瓶内的气压, 另一支管连接导气管用来采集瓶内气体. 用带有三通阀的注射器采集培养瓶上部空间气体, 作为初始气体浓度, 记录采样时间, 密闭静置培养 1 h 后, 反复推拉注射器以混匀瓶中气体, 然后立即抽气并移至预真空的集气瓶中, 再次记录采样时间. 采集后的气体样品用改进的气相色谱仪(Agilent 7890A)分析.

在试验的第 1、3、6、10、15、21、28 和 35 d 采

集土壤样品和分析. 土壤可溶性有机碳(DOC)含量采用德国 Elementer Vario TOC 仪液体模块测定. 土壤微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸法测定.  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性采用 96 微孔酶标板荧光分析法.

#### 1.4 数据统计分析

有机碳矿化速率[以  $\text{CO}_2\text{-C}$  计]计算公式<sup>[20]</sup>如下:

$$F = \rho \times \frac{V}{m} \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{T} \times \alpha$$

式中,  $F$  为有机碳矿化速率 [ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ],  $\rho$  为标准状况下气体的密度;  $V$  为培养瓶顶空体积, L;  $m$  为土样干重, g;  $\Delta c/\Delta t$  为在一定时间内的气体浓度变化速率;  $T$  为热力学温度;  $\alpha$  为  $\text{CO}_2$  换算到 C (12/44) 的转换因子.

有机碳矿化量计算公式如下:

$$M = \sum \frac{F_{i+1} + F_i}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

式中,  $M$  为有机碳矿化累积量 (以  $\text{CO}_2\text{-C}$  计,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $F$  为有机碳矿化速率 [ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ],  $i$  为采样次数,  $t$  为采样天数, d.

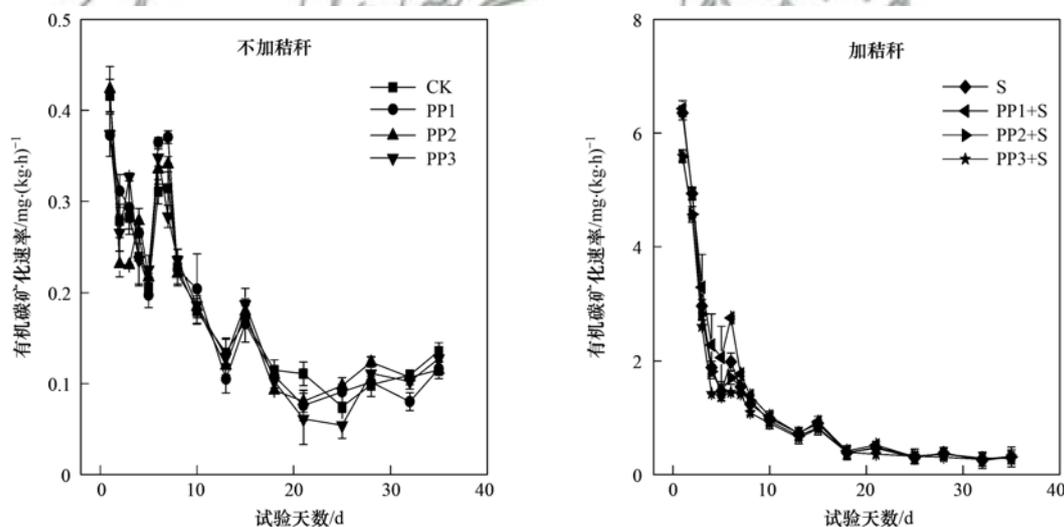


图1 不同处理下土壤有机碳矿化速率

Fig. 1 Mineralization rate of soil organic carbon under different treatments

只添加微塑料对土壤有机碳累积矿化量影响不显著,添加秸秆后各处理有机碳累积矿化量显著高于对照(图2),单施秸秆处理(S)有机碳累积矿化量是对照处理(CK)的6.93倍.与单施秸秆相比,低量微塑料与秸秆混施处理(PP1+S)显著促进了有机碳矿化,有机碳累积矿化量增加了8.20%, ( $P < 0.05$ ),而中、高量微塑料与秸秆混施处理(PP2+S和PP3+S)显著降低了有机碳累积矿化量( $P < 0.05$ ),分别减少了5.60%和10.13%,高量微塑料与秸秆混施土壤有机碳累积矿化量最低,为  $832.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .从表2也可以看出,微塑料与秸秆的交互

采用 Excel 2010 对数据进行预处理,利用 SPSS 22 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 Duncan 多重比较检验法分析处理间的差异,相关性热图是使用 R 包“corrplot”绘制,显著性水平设置为 0.05.用 Origin 9.0 进行绘图.

## 2 结果与分析

### 2.1 微塑料和秸秆添加对土壤有机碳矿化的影响

秸秆和微塑料混施显著影响了土壤有机碳矿化,而仅添加微塑料对有机碳矿化无显著影响(图1).在整个培养期间,添加秸秆各处理有机碳矿化速率均显著高于对照,而仅添加微塑料处理与对照无明显差异.有机碳矿化速率均在培养前期处于较高水平,后期降至较低水平并保持稳定.在第6d有机碳矿化速率出现明显峰值,仅添加微塑料的各处理峰值无明显差异,而低量微塑料与秸秆混施处理(PP1+S)有机碳矿化速率峰值显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),为  $2.76 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ,中、高量微塑料与秸秆混施处理(PP2+S和PP3+S)较单施秸秆处理(S)降低了有机碳矿化速率.

作用对土壤有机碳矿化影响显著( $P < 0.001$ ).

表2 微塑料、秸秆及两者相互作用对有机碳矿化影响<sup>1)</sup>

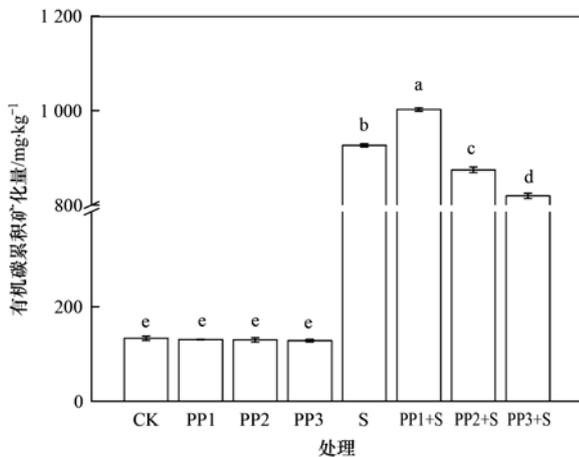
Table 2 Impact of microplastics, straw and their interaction on soil organic carbon mineralization

影响因子	$F$	$P$
微塑料	0.052	0.984
秸秆	59 338.948	< 0.001 **
微塑料 × 秸秆	509.089	< 0.001 **

1) \*\* 表示不同影响因子的差异极显著性,  $P < 0.001$

### 2.2 微塑料和秸秆对土壤 DOC 含量影响

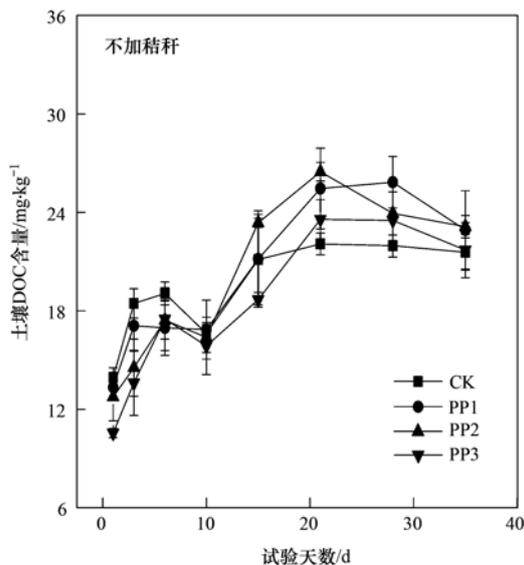
在是否添加秸秆条件下,土壤 DOC 含量变化趋



不同小写字母表示不同处理间的差异显著性,  $P < 0.05$

图2 不同处理下有机碳累积矿化量

Fig. 2 Cumulative mineralization of soil organic carbon under different treatments



势存在明显差异(图3). 未加秸秆的各处理土壤 DOC 含量呈先上升后下降的趋势, 添加秸秆后各处理土壤 DOC 含量呈先降低再升高后降低的趋势. 从 DOC 平均含量来看, 添加高量微塑料处理(PP3 和 PP3 + S)在有无秸秆添加条件下均显著降低了土壤 DOC 平均含量, 分别降低了 5.53% 和 7.22% (表 3,  $P < 0.05$ ), 低量和中量微塑料处理(PP1 和 PP2)在无秸秆添加条件下与对照(CK)无显著差异, 而添加秸秆后, 低量和中量微塑料处理(PP1 + S 和 PP2 + S)较单施秸秆处理(S)显著降低了土壤 DOC 平均含量, 分别降低了 13.40% 和 7.65% ( $P < 0.05$ ).

### 2.3 微塑料和秸秆添加对土壤 MBC 含量的影响

在培养过程中土壤 MBC 含量呈现上下波动的趋势(图4). 添加秸秆各处理均显著增加了土壤 MBC 平均含量, 与未加秸秆处理(CK、PP1、PP2 和

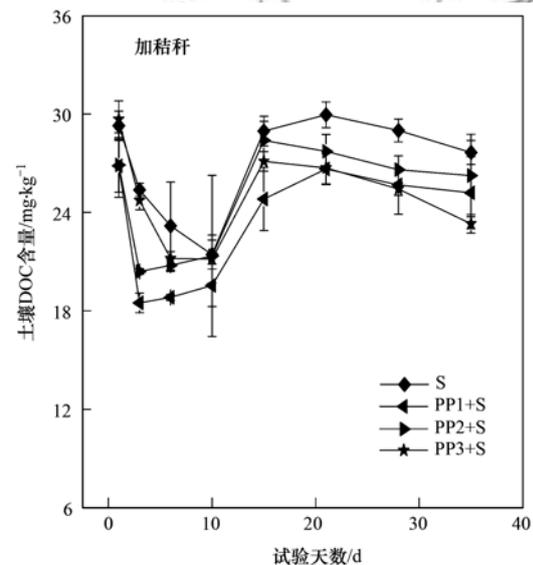


图3 土壤 DOC 含量动态变化

Fig. 3 Temporal variation of soil DOC contents

表3 不同处理土壤 DOC 和 MBC 平均含量<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 3 Mean DOC and MBC contents of soils under different treatments/mg·kg<sup>-1</sup>

试验处理	DOC	MBC
CK	19.18 ± 0.64d	98.75 ± 5.51de
PP1	19.96 ± 0.55d	119.69 ± 3.08bc
PP2	19.75 ± 0.43d	86.21 ± 6.64e
PP3	18.12 ± 0.65e	99.12 ± 8.30de
S	26.85 ± 0.45a	135.63 ± 5.97ab
PP1 + S	23.25 ± 0.54c	154.50 ± 12.33a
PP2 + S	24.80 ± 0.69b	135.12 ± 18.46ab
PP3 + S	24.91 ± 0.28b	127.28 ± 9.02b

1) 不同小写字母表示不同处理间的差异显著水平,  $P < 0.05$

PP3) 相比, S、PP1 + S、PP2 + S 和 PP3 + S 处理 MBC 平均含量分别增加了 37.34%、29.08%、56.73% 和 28.41% (表 3,  $P < 0.05$ ). 与对照相比,

添加低量微塑料处理 MBC 平均含量显著增加了 21.21%, 而中量和高量微塑料处理与对照无显著差异 ( $P > 0.05$ ). 与单施秸秆相比, 低量微塑料与秸秆混施增加了土壤 MBC 平均含量, 而中量和高量微塑料和秸秆混施降低了土壤 MBC 平均含量, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ ).

### 2.4 微塑料和秸秆添加对 $\beta$ -葡萄糖苷酶活性的影响

仅添加微塑料处理,  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性在培养前期(第 1 和 6 d)显著降低 ( $P < 0.05$ ), 尤其添加高量微塑料处理, 与对照相比显著降低了 20.52% 和 43.93%, 培养后期添加高量微塑料降低了  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性, 但影响不显著(图5). 秸秆对  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性有显著促进作用, 添加秸秆的各处理  $\beta$ -葡萄

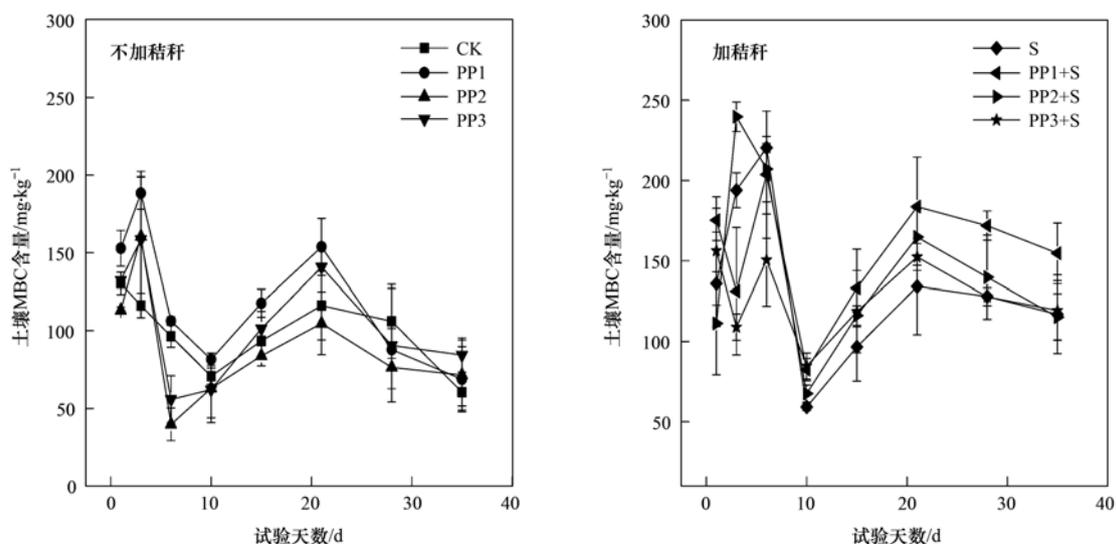
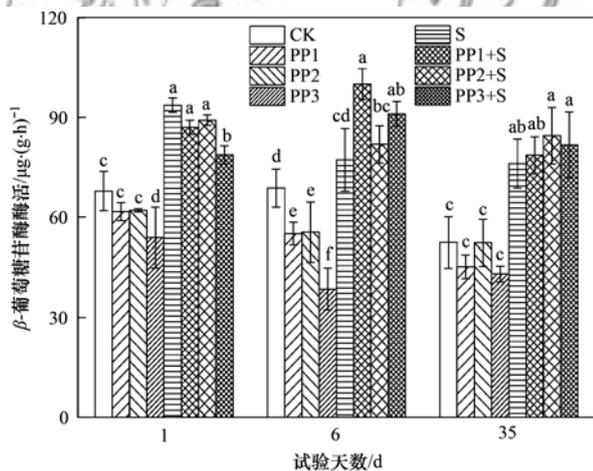


图4 土壤MBC含量动态变化

Fig. 4 Temporal variation of soil MBC contents

糖苷酶活性均高于未加秸秆处理, S 处理  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性较 CK 处理在第 1、6 和 35 d 分别增加了 38.12%、12.37% 和 45.17%。微塑料和秸秆混施在第 6 d 显著提高了  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性, 尤其是低量微塑料与秸秆混施, 与单施秸秆相比  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性显著增加了 29.49%。由此可见, 微塑料抑制了土壤中的  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性, 而微塑料与秸秆混施增强了  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性。



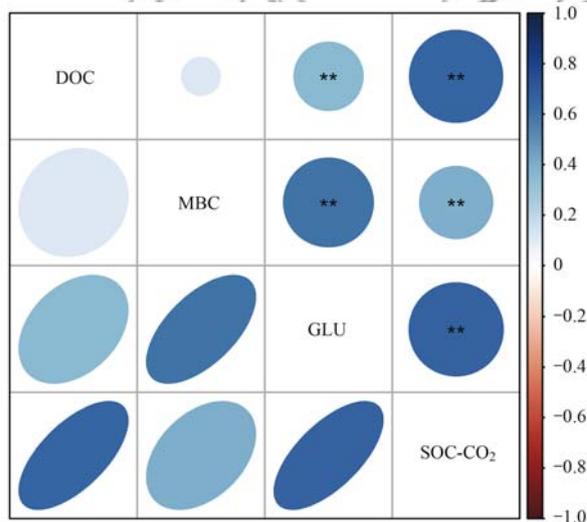
不同小写字母表示不同处理间的差异显著性,  $P < 0.05$

图5 微塑料和秸秆对土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性的影响Fig. 5 Effect of microplastics and straw on  $\beta$ -glucosidase activity in soil

## 2.5 有机碳矿化速率与土壤活性有机碳和 $\beta$ -葡萄糖苷酶活性的关系

有机碳矿化速率 ( $\text{SOC-CO}_2$ ) 与土壤活性有机碳和  $\beta$ -葡萄糖苷酶 (GLU) 活性相关性如图 6 所示, 从中可以看出, 有机碳矿化速率与 DOC、MBC 含量和  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。DOC 和 MBC 含量均与  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性呈显著正相关,

而 DOC 和 MBC 含量之间无显著相关性 ( $P > 0.05$ )。



正圆和椭圆的大小代表相关系数大小, 正圆越大相关性越强, 椭圆越接近正圆相关性越小, \* 代表不同因子间的相关性显著水平,  $P < 0.05$ , \*\* 代表不同因子间的相关性显著水平,  $P < 0.01$

图6 土壤有机碳矿化与 DOC、MBC 和  $\beta$ -葡萄糖苷酶间的相关性Fig. 6 Correlation between soil organic carbon mineralization, DOC, MBC, and  $\beta$ -glucosidase in soil

## 3 讨论

### 3.1 微塑料和秸秆添加对有机碳矿化的影响

有机碳矿化是碳循环的重要组成部分, 受温度、水分、有机碳含量以及土壤营养状况等诸多因子影响<sup>[21,22]</sup>。本研究表明, 只添加微塑料对土壤有机碳矿化无显著影响, 而微塑料与秸秆混施显著影响了土壤有机碳矿化 (图 1), 这表明了微塑料和秸秆对有机碳矿化有显著的交互作用。秸秆添加后显著增加了土壤 DOC 和 MBC 含量 (表 3), 促进了土壤有

机碳矿化,这与何甜甜等<sup>[23]</sup>的研究结果相同,秸秆添加增加了土壤活性有机碳,为微生物提供了丰富的碳源,促进了有机物的分解<sup>[24-26]</sup>. 有机碳矿化速率与 DOC 和 MBC 含量呈显著正相关(图 6),这也说明 DOC 和 MBC 含量增加会促进有机碳矿化. 不同水平的微塑料和秸秆混施对土壤有机碳矿化影响存在差异,与单施秸秆相比,低量微塑料与秸秆混施显著促进了有机碳矿化,而高量微塑料与秸秆混施抑制了有机碳矿化(图 1). Zang 等<sup>[27]</sup>的研究发现添加 PVC 微塑料会促进土壤 CO<sub>2</sub> 排放,这可能是由于微塑料添加后影响了土壤孔隙度和通气性<sup>[28]</sup>. 以往的研究表明孔隙度、比表面积和团聚体结构与土壤微生物活性呈正相关<sup>[29,30]</sup>,由于微塑料具有疏水性,少量的微塑料添加会增加孔隙度,但大量的微塑料积累会阻塞土壤孔隙. 微塑料会促进土壤团聚体的形成,尤其是有机碳颗粒,使其免受微生物分解,从而降低有机碳的矿化<sup>[31]</sup>. 有研究分析了聚丙烯纤维、聚酰胺珠、聚酯纤维和聚乙烯碎片这 4 种微塑料累积对土壤生物物理环境的影响<sup>[13]</sup>,发现这 4 种微塑料均降低了土壤容重,改变了土壤结构,从而进一步影响了土壤微生物生存的微环境,降低了微生物活性. 土壤微生物在碳氮循环过程中发挥重要作用,塑料在土壤中残留会影响微生物群落组成,不同粒径微塑料对土壤微生物群落的影响存在差异,大的颗粒微塑料降低了微生物群落结构多样性,小颗粒则相反<sup>[32-34]</sup>. 微塑料具有吸附有机污染物的特性,其在土壤中累积会增强有机污染物的毒性,降低土壤微生物活性<sup>[35,36]</sup>,本研究中,相比于单施秸秆,高量微塑料与秸秆混施降低了 MBC 含量(图 4).

### 3.2 微塑料添加对 $\beta$ -葡萄糖苷酶活性影响

$\beta$ -葡萄糖苷酶可以催化纤维素降解,将纤维素二糖水解为葡萄糖,增加有机碳矿化基质,在本研究中添加微塑料显著降低了  $\beta$ -葡萄糖苷酶的活性(图 5),这与 Qian 等<sup>[37]</sup>的研究结果一致,这可能由于微塑料污染物抑制了微生物分泌酶,同时土壤有机物质的减少,降低了微生物活性<sup>[38]</sup>. 添加秸秆为土壤输入碳源,给微生物生长活动提供一定的能量,加速微生物繁殖,从而引起土壤中部分酶活性的提高<sup>[39]</sup>,这将有助于缓解微塑料污染对  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性的抑制作用,在本试验中得出与未添加秸秆相比,微塑料与秸秆混施均显著提高了  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性.

微塑料对土壤有机碳矿化的影响存在一定的差异,这可能与微塑料种类、粒径、剂量和土壤性质有关. 由于本研究的局限性,未分析土壤中的微生物群落结构及相关基因等指标,有关微塑料对土壤有机

碳矿化影响的机制还不够明确. 本试验是基于一种土壤类型(黄棕壤)的室内模拟培养,研究得出微塑料对土壤有机碳矿化无显著影响,而对土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性有抑制作用,由于微塑料对土壤碳氮循环的影响受土壤容重、土壤质地和土壤持水能力等影响,本研究结果是否适用于其他类型土壤,还需要大量的研究验证. 此外,由于不同微塑料自身特性差异较大,本研究只选用一种常见微塑料类型,尽管如此,本研究的分析结果也可为微塑料污染与土壤碳循环相互作用机制提供参考依据.

## 4 结论

(1) 不同水平微塑料和秸秆混施对土壤有机碳矿化影响差异显著. 低量微塑料与秸秆添加促进了有机碳矿化,而高量微塑料添加抑制了有机碳矿化.

(2) 添加秸秆提高了柑橘园土壤中 DOC 和 MBC 含量,促进土壤有机碳矿化.

(3) 添加微塑料显著降低了土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶的活性,另一方面,秸秆添加又缓解了微塑料污染对  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性的抑制作用.

### 参考文献:

- [1] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science Advances*, 2017, **3**, doi: 10.1126/sciadv.1700782.
- [2] Jambeck J R, Geyer R, Wilcox C, *et al.* Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015, **347**(6223): 768-771.
- [3] Holland E R, Mallory M L, Shutler D. Plastics and other anthropogenic debris in freshwater birds from Canada [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **571**: 251-258.
- [4] Wright S L, Thompson R C, Galloway T S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **178**: 483-492.
- [5] Nizzetto L, Futter M, Langaas S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(20): 10777-10779.
- [6] Fuller S, Gautam A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(11): 5774-5780.
- [7] 任欣伟,唐景春,于宸,等. 土壤微塑料污染及生态效应研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(6): 1045-1058.  
Ren X W, Tang J C, Yu C, *et al.* Advances in research on the ecological effects of microplastic pollution on soil ecosystems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(6): 1045-1058.
- [8] Qi R M, Jones D L, Li Z, *et al.* Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: a critical review [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134722.
- [9] Rillig M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(12): 6453-6454.
- [10] 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.
- [11] de Souza Machado A A, Kloas W, Zarfl C, *et al.* Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(4): 1405-1416.
- [12] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. *生态学报*, 2010, **30**(5): 1217-1226.
- Li S J, Qiu L P, Zhang X C. Mineralization of soil organic carbon and its relations with soil physical and chemical properties on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(5): 1217-1226.
- [13] de Souza Machado A A, Lau C W, Till J, *et al.* Impacts of microplastics on the soil biophysical environment [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(17): 9656-9665.
- [14] 石祖梁, 李想, 王久臣, 等. 中国秸秆资源空间分布特征及利用模式[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, **28**(S1): 202-205.
- Shi Z L, Li X, Wang J C, *et al.* The spatial distribution characteristics and utilization model of crop straw in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, **28**(S1): 202-205.
- [15] Zhao X, Zhang R, Xue J F, *et al.* Management-induced changes to soil organic carbon in China: a meta-analysis[J]. *Advances in Agronomy*, 2015, **134**: 1-50.
- [16] 高燕, 张延, 郭亚飞, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳周转的影响[J]. *土壤与作物*, 2019, **8**(1): 93-101.
- Gao Y, Zhang Y, Guo Y F, *et al.* Effect of residue return patterns on soil organic carbon turnover-A review[J]. *Soils and Crops*, 2019, **8**(1): 93-101.
- [17] 周卫东. 苹果园两种不同覆盖方式效果试验[J]. *西北园艺(果树)*, 2020, (5): 47-48.
- [18] 蔡铭阳, 谢永生, 索改弟, 等. 地膜-秸秆双重覆盖模式下果园土壤养分含量研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, **34**(6): 184-190, 196.
- Cai M Y, Xie Y S, Suo G D, *et al.* The research of film-straw mulching pattern on soil nutrient content in an apple orchard[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, **34**(6): 184-190, 196.
- [19] 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.
- [20] 孙赞, 何志龙, 林杉, 等. 不同生物质炭对酸化茶园土壤 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(12): 2544-2552.
- Sun Y, He Z L, Lin S, *et al.* Effects of different biochars on N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emission from acidified tea field soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(12): 2544-2552.
- [21] 刘志伟, 朱孟涛, 郭文杰, 等. 秸秆直接还田与炭化还田下土壤有机碳稳定性和温室气体排放潜力的对比研究[J]. *土壤通报*, 2017, **48**(6): 1371-1378.
- Liu Z W, Zhu M T, Guo W J, *et al.* Comparison of soil organic carbon stability and greenhouse gas emissions potential under straw or straw-derived biochar amendment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, **48**(6): 1371-1378.
- [22] 刘颖川, 杨凯, 叶哲隆, 等. 青海东部地区地膜覆盖条件下土壤有机碳矿化对温度变化的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, **34**(11): 143-148.
- Liu Y C, Yang K, Ye Z L, *et al.* Responses of soil organic carbon mineralization to temperature change under the plastic film mulching in eastern Qinghai[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, **34**(11): 143-148.
- [23] 何甜甜, 王静, 符云鹏, 等. 等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 450-458.
- He T T, Wang J, Fu Y P, *et al.* Effects of adding straw and biochar with equal carbon content on soil respiration and microbial biomass carbon and nitrogen [ J ]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 450-458.
- [24] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(11): 2362-2367.
- Li C F, Kou Z K, Zhang Z S, *et al.* Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(11): 2362-2367.
- [25] 刘军, 唐志敏, 刘建国, 等. 长期连作及秸秆还田对棉田土壤微生物量及种群结构的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(8): 1418-1422.
- Liu J, Tang Z M, Liu J G, *et al.* Effects of cotton continuous cropping and returning stalks to soil on the quantities and community structure of soil microbes [ J ]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(8): 1418-1422.
- [26] 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.
- [27] Zang H D, Zhou J, Marshall M R, *et al.* Microplastics in the agroecosystem: are they an emerging threat to the plant-soil system? [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **148**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107926.
- [28] Yang X M, Bento C P M, Chen H, *et al.* Influence of microplastic addition on glyphosate decay and soil microbial activities in Chinese loess soil [ J ]. *Environmental Pollution*, 2018, **242**: 338-347.
- [29] Girvan M S, Bullimore J, Pretty J N, *et al.* Soil type is the primary determinant of the composition of the total and active bacterial communities in arable soils [ J ]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(3): 1800-1809.
- [30] Najam N, Kaur A. Impact on soil properties by the use of sewage for irrigation [ J ]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, **9**(44), doi: 10.17485/ijst/2016/v9i44/105262.
- [31] Tian X M, Fan H, Wang J Q, *et al.* Effect of polymer materials on soil structure and organic carbon under drip irrigation [ J ]. *Geoderma*, 2019, **340**: 94-103.
- [32] Wang J, Lv S H, Zhang M Y, *et al.* Effects of plastic film residues on occurrence of phthalates and microbial activity in soils [ J ]. *Chemosphere*, 2016, **151**: 171-177.
- [33] Jiang N, Jin L F, Teixeira da Silva J A, *et al.* Activities of enzymes directly related with sucrose and citric acid metabolism in citrus fruit in response to soil plastic film mulch[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, **168**: 73-80.
- [34] 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.
- [35] Chen H L, Yao J, Wang F, *et al.* Study on the toxic effects of diphenol compounds on soil microbial activity by a combination of

- methods[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **167**(1-3): 846-851.
- [36] 杨杰, 仓龙, 邱炜, 等. 不同土壤环境因素对微塑料吸附四环素的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(11): 2503-2510.  
Yang J, Cang L, Qiu W, *et al.* Effects of different soil environmental factors on tetracycline adsorption of microplastics [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(11): 2503-2510.
- [37] Qian H F, Zhang M, Liu G F, *et al.* Effects of soil residual plastic film on soil microbial community structure and fertility [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2018, **229**(8), doi: 10.1007/s11270-018-3916-9.
- [38] Xie H J, Shi Y J, Zhang J, *et al.* Degradation of phthalate esters (PAEs) in soil and the effects of PAEs on soil microcosm activity [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2010, **85**(8): 1108-1116.
- [39] 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 等. 不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 970-977.  
Wang J F, Tong Y Y, Zhu Z K, *et al.* Transformation and distribution of soil organic carbon and the microbial characteristics in response to different exogenous carbon input levels in paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 970-977.

## 《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2020年12月29日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续19次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.



## CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM <sub>2.5</sub> -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N <sub>2</sub> O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China, 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)