

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

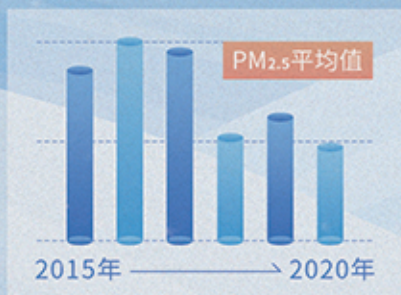
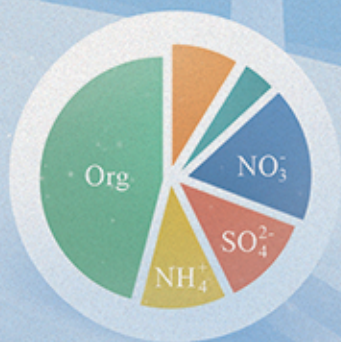
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡罗模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响

王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平*

(内蒙古科技大学能源与环境学院, 包头 014010)

摘要: 为探究不同丰度(土壤干重的 0.5%、1%、2%)和不同类型(PP、PVC、PE)微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响, 采用室内土柱模拟的方法, 阐明了不同丰度及不同类型微塑料对土壤水分累积入渗时间、土壤含水率、湿润锋和蒸发特性等的影响, 其中 A1, A2, A3, Q1, Q2, Q3 和 Z1, Z2, Z3 分别代表 PE、PVC 和 PP 在 0.5%、1% 和 2% 丰度下的实验编号。结果表明, 不同类型和不同丰度下的微塑料对土壤水分入渗和蒸发存在显著差异, 同类型条件下随着微塑料丰度增大, 累积入渗时间显著增加, 而类型不同丰度相同微塑料赋存条件下, PP 实验组累积入渗时间 > PVC 实验组累积入渗时间 > PE 实验组累积入渗时间 > 空白实验组累积入渗时间; 赋存微塑料条件下土壤含水率最大值基本呈现于土层深度 10~25 cm 处, 空白组 CK 出现在 20~25 cm 处; 相同入渗时间内土壤湿润锋运移距离和湿润锋运移速率随微塑料丰度增加而减小, 当入渗时间为 60 min 时, A1、A2、A3, Q1、Q2、Q3 和 Z1、Z2、Z3 湿润锋运移距离较 CK 分别减少 4.38%、8.76%、10.58%、7.30%、10.22%、14.60% 和 10.95%、13.14%、15.33%, 其中 PP 微塑料的影响最为显著; 微塑料赋存对土壤水分蒸发产生抑制作用, 同类型微塑料下土壤的累积蒸发量随丰度的增加而减小, 在蒸发 27 h 时, 添加 2% 丰度下 PP、PVC 和 PE 微塑料的实验土柱累积蒸发量比 CK 分别减小 22.9%、19.4% 和 13.3%, Rose 蒸发模型更能较真实地反映微塑料赋存情况下土壤累积蒸发量随时间的变化情况。研究可为微塑料赋存条件下土壤水分运移的变化研究提供理论基础。

关键词: 微塑料; 土壤; 湿润锋; 含水率; 入渗; 蒸发

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4394-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111292

Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation

WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, YANG Wen-huan, LI Wei-ping*

(School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: In order to explore the influences of microplastics with different abundances (0.5%, 1%, and 2% of the dry weight of the soil) and different types (PP, PVC, and PE) on the moisture infiltration and evaporation of the soil, we adopted the method of indoor soil column simulation to elaborate the influences of the microplastics with different abundances and different types on the moisture accumulated infiltration time, moisture containing rate, wetting front, and evaporation characteristics, among which the A1, A2, and A3; Q1, Q2, and Q3; and Z1, Z2, and Z3 respectively represented the experimental number of PE, PVC, and PP under the abundances of 0.5%, 1%, and 2%. The influences of the microplastics with different types and different abundances on the moisture infiltration and evaporation of the soil showed obvious differentiation. Under the same types of conditions, when the abundances of the microplastics increased, the accumulated infiltration time also increased significantly. However, under the occurrence condition of the microplastics of different types but the same abundances, the accumulated infiltration time of the PP experiment group > that of the PVC experiment group > that of the PE experiment group > that of the blank experiment group. Under the occurrence condition of microplastics, the maximum moisture rate of the soil basically appeared at the depth from 10 to 25 cm, and the CK of the blank group appeared at the depth from 20-25 cm. Within the same infiltration time, when the abundances of the microplastics increased, the moving distance and the moving rate of wetting front of the soil decreased accordingly. When the infiltration time was 60 minutes, the wetting moving distances of A1, A2, and A3; Q1, Q2, and Q3; and Z1, Z2, and Z3, respectively, decreased 4.38%, 8.76%, and 10.58%; 7.30%, 10.22%, and 14.60%; and 10.95%, 13.14%, and 15.33% compared to those of the CK groups, among which the influence of PP microplastics was the most significant. The occurrence of the microplastics had a prohibition function to the moisture evaporation of the soil; when the microplastics had the same types, the accumulated amount of the soil decreased with the increase in abundance. When evaporating for 27 hours, the accumulated evaporation amount of the experiment soil column of PP, PVC, and PE microplastics with the added abundances of 2% respectively decreased 22.9%, 19.4%, and 13.3% compared to that in the CK. The Rose evaporation model relatively truly reflected the changing situation of the soil accumulated evaporation amount with time under the occurrence situation of the microplastics. This research can provide a theoretical basis for the changing study of the soil moisture movement under the occurrence condition of microplastics.

Key words: microplastics; soil; wetting front; moisture content; infiltration; evaporation

近年来,微塑料因其分布广、危害大和迁移转化途径复杂^[1-3]等原因越来越受到国内外学者关注。目前关于微塑料的污染研究主要集中在水环境中,但作为水环境微塑料“源”,陆地环境微塑料“汇”的土壤微塑料污染也越来越受到人们重视^[4]。有研究表明,陆地中的微塑料丰度可达海洋的 23 倍之多,而全球每年输入土壤的微塑料数量远超向海洋输入的量^[5-7]。以内蒙古河套灌区为例,根据已有研究数据,河套灌区农作土壤中微塑料类型繁多,且

最高丰度已达到 6 070 个·kg⁻¹^[3], 约是河北的 10 倍,上海的 100 倍^[8];而随着大块塑料通过风化和降解等作用逐步转化成微塑料,土壤中的微塑料污染日趋严重已成必然。已有研究发现,土壤中的微

收稿日期: 2021-11-29; 修订日期: 2021-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007119); 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT22066)

作者简介: 王志超(1988~),男,博士,讲师,主要研究方向为微塑料污染防治, E-mail: wzc5658@126.com

* 通信作者, E-mail: sjlwp@163.com

料污染不仅会显著影响土壤的物理和化学特性^[9],更会抑制小麦根和茎的伸长^[10],显著降低黄瓜幼苗总根长^[11],进而对作物生长及产量造成影响^[12].同时,因微塑料比表面积大而产生的较强吸附特性,使微塑料表面更易吸附重金属、多氯联苯、多环芳烃和有机氯农药等污染物,增加了其对土壤生物的危害风险^[13-17].因此,土壤作为人类赖以生存的根基,对保障国家粮食安全起到至关重要的作用,土壤中微塑料的污染问题不容忽视.

土壤水分入渗是降水和灌溉水通过土壤表面进入土壤内部的过程,土壤水分蒸发则是土壤水以水蒸气形式散失到大气中的过程,入渗决定了有多少水进入土壤,蒸发过程决定了有多少水流出土壤,两者都是农田水分循环的重要内容^[18].土壤水分入渗和蒸发主要受土壤结构、土壤质地、气象条件、初始含水率和耕种措施等因素的影响,两者直接影响了土壤含水率,决定了农田水资源的有效利用程度,进而影响作物的水分利用效率.目前在不同农膜残留、不同覆盖物和不同盐分等对土壤水分入渗及蒸发的影响等方面研究较多,如随着土壤中残膜量增多,砂壤土和砂土入渗速率变慢,土壤湿润锋运移相同距离所需时间均显著增加;增加麦秆覆盖量将明显降低土壤蒸发量;土壤含盐量增加会导致土壤蒸发速率显著降低^[19].尽管土壤中微塑料是否会隔断部分土壤毛管孔隙,是否会影响土壤水分运移等方面的研究较少,但已有研究表明,微塑料可以影响土壤植物的生长,土壤干重 1% 丰度下的 LDPE 微塑料和可生物降解塑料地膜碎片对小麦的生长具有干扰作用,对小麦种子及幼苗的生长具有明显的抑制作用^[20],并且微塑料可以被土壤植物吸附并积累; Bosker 等^[21]以不同粒径的微塑料为研究对象,通过实验发现水芹种子发芽率明显受到微塑料的抑制,使种子发芽率从对照的 78% 下降到 17%,而且粒径越大的微塑料其影响更大^[22];有研究显示微塑料还能破坏水稻组织,诱导脂质过氧化,破坏细胞膜,抑制作物根活性,降低水稻净光合速率,并使其叶绿素荧光和叶绿素 a 含量降低,从而降低水稻生物量^[23].另外, Liu 等^[24]的研究发现,纳米级微塑料可被水稻根系吸收并转运至地上组织部分,从而可能通过食物链将微塑料的量积累到一个更高的水平.虽然微塑料对作物生长影响的机制还不清晰,但很大一部分原因是由于微塑料影响了土壤水分的入渗和蒸发,导致土壤中的水、热、气和肥等不能正常供给作物生长,进而对作物生长起到抑制作用.

本研究基于室内土柱模拟实验,探究不同丰度(0.5%、1%、2%)和不同类型[聚乙烯(PE)、聚氯

乙烯(PVC)、聚丙烯(PP)]微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响,以期为微塑料对土壤水分运移的影响提供理论依据和技术参考,也可微塑料大量赋存背景下干旱半干旱区水土资源高效利用提供科技支撑.

1 材料与方法

1.1 实验材料

备试土壤采集于内蒙古自治区河套灌区,为尽量减小原状土壤中微塑料的本底值,选取未耕种过且人为扰动小的土壤样品进行采集,采集深度为地面以下 50 ~ 150 cm,去除大粒径杂质后带回实验室,将土样风干、碾碎,最后过 2 mm 筛,确保土质均质.利用纳米激光粒度仪(NANOPHOXTM, Symaptec 公司,德国)进行颗粒分析,其中黏粒(粒径小于 0.002 mm)占比为 1.32%,粉粒(粒径 0.01 ~ 0.50 mm)占比为 18.60%,砂粒(粒径 0.50 ~ 1.0 mm)占比为 80.08%,土质属于砂壤土.所使用微塑料为广东特塑朗化工有限公司制造,微塑料粒径为 150 μm,形状为球状.

1.2 实验设计与方法

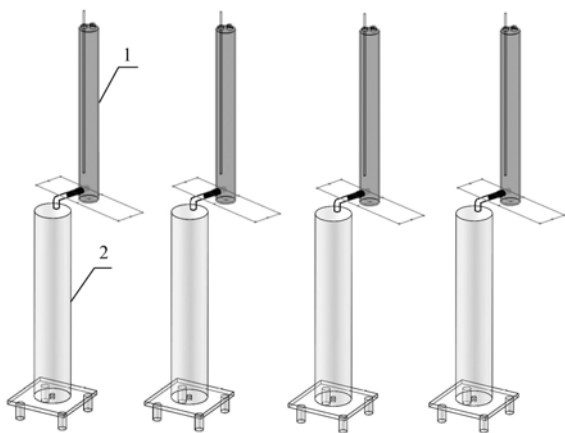
实验共设置 3 种微塑料丰度、3 种微塑料类型和 1 个对照处理,共计 10 个处理,每个处理 3 次重复(见表 1).选用内径为 10 cm、高度为 50 cm 的透明有机玻璃柱进行实验,其柱壁贴软卷尺,底部 5 cm 为反滤层,并设有排气孔,装土高度 35 cm.装土前在土柱底部铺设一层纱布,为避免优势流对实验结果的影响,实验前在土柱内侧涂抹一层凡士林.按照不同实验设置将微塑料和土壤均匀混合,按照 1.5 g·cm⁻³土壤容重装土,每 5 cm 分层装入,层间打毛.

表 1 实验设计变量		
Table 1 Experimental design variable		
处理编号	微塑料占土壤质量分数/%	微塑料类型
CK	0	无
A1	0.5	PE
A2	1.0	PE
A3	2.0	PE
Q1	0.5	PVC
Q2	1.0	PVC
Q3	2.0	PVC
Z1	0.5	PP
Z2	1.0	PP
Z3	2.0	PP

采用一维定水头法测定土壤水分入渗过程,通过马氏瓶供水,水头高度控制在 10 cm,实验前用流量计控制实验组中的流量使其保持一致.入渗实验开始后,观察湿润锋的运移以及马氏瓶的水位情况

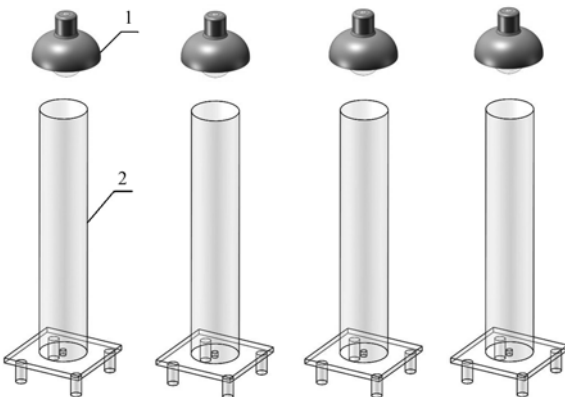
(图 1),按照前密后疏的原则,记录相应时间下湿润锋的运移情况及马氏瓶的水位刻度.当湿润锋到达土柱深度 30 cm 处时停止供水,记录累积入渗时间,并用防水塑料膜封住土柱管口,入渗过程结束.在湿润锋停止运移后,用小型土钻从土壤深度 0~5、5~10、10~15、15~20、20~25 和 25~30 cm 处取土,用烘干法测含水率.为防止水分蒸发,将所有的土柱用塑料薄膜封口,静置 24 h.

将所有的土柱放置在环境相对稳定的室内,打开红外线灯(275 W)作为光源进行蒸发实验(图 2),灯底部与土柱表土距离均为 30 cm,昼夜照射,采用称重法,在蒸发开始后 1、2、3、4、6、8、10、12 和 15~27 h 测定土柱蒸发量,同步测量蒸发皿的水面蒸发,蒸发实验期间室温在 18~23℃,日平均湿度约为 35%,平均水面蒸发量为 1.75 mm·h⁻¹.



1. 马氏瓶, 2. 透明有机玻璃柱
图 1 入渗实验装置示意

Fig. 1 Diagram of infiltration test device



1. 275 W 红外线灯, 2. 透明有机玻璃柱
图 2 蒸发实验装置示意

Fig. 2 Evaporation experiment device

1.3 土壤水分蒸发模型

为进一步研究不同丰度及类型微塑料对土壤水分蒸发的影响,采用 Black 模型和 Rose 模型进行拟合,拟合公式如下.

(1) Black 蒸发模型 Black 蒸发模型^[25]广泛应用于蒸发下边界没有水分持续补给时土壤累积蒸发量随时间的变化情况,其表达式为:

$$E = F + Bt_0^{1/2} \quad (1)$$

式中, E 为累积蒸发量,g; t_0 为蒸发历时,h; F 和 B 为蒸发参数.

(2) Rose 蒸发模型 Rose 蒸发模型^[26]也具有形式简单的特点,蒸发下边界没有水分持续补给时应用广泛,其表达式为:

$$E = Ct_0 + Dt_0^{1/2} \quad (2)$$

式中, t_0 为蒸发历时, C 为稳定蒸发参数; D 为水分扩散参数.

1.4 数据处理

采用 Excel 2017 进行数据处理,Origin 8.0 进行制图,SPSS 17.0 进行方差分析.

2 结果与讨论

2.1 不同丰度及类型微塑料对累积入渗时间、土壤含水率的影响

不同丰度和类型微塑料对累积入渗时间有显著影响(图 3).同种类型不同丰度微塑料赋存条件下,随着微塑料丰度增大累积入渗时间显著增加($P < 0.05$),其中 A2 和 A3 较 A1 分别增长了 2.7% 和 5.4%,Q2 和 Q3 较 Q1 分别增长了 2.0% 和 7.4%,Z2 和 Z3 较 Z1 分别增长了 5.1% 和 6.5%,表明微塑料丰度增加会延长土壤内水分的运移路径,进而增大累积入渗时间.而类型不同丰度相同微塑料赋存条件下,PP 实验组累积入渗时间 > PVC 实验组累积入渗时间 > PE 实验组累积入渗时间,其中无微塑料赋存的空白实验组用时最少(72 min),丰度 2% 的 PP 实验组用时最多(82 min);而丰度 0.5% 条件下,Q1 和 Z1 累积入渗时间较 A1 分别增长了 0.7% 和 4.1%,丰度 1% 条件下,Q2 和 Z2 累积入渗时间较 A2 分别增长了 7.3%

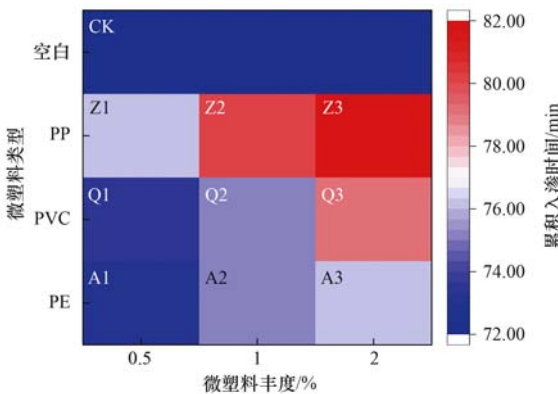


图 3 微塑料对累积入渗时间的影响

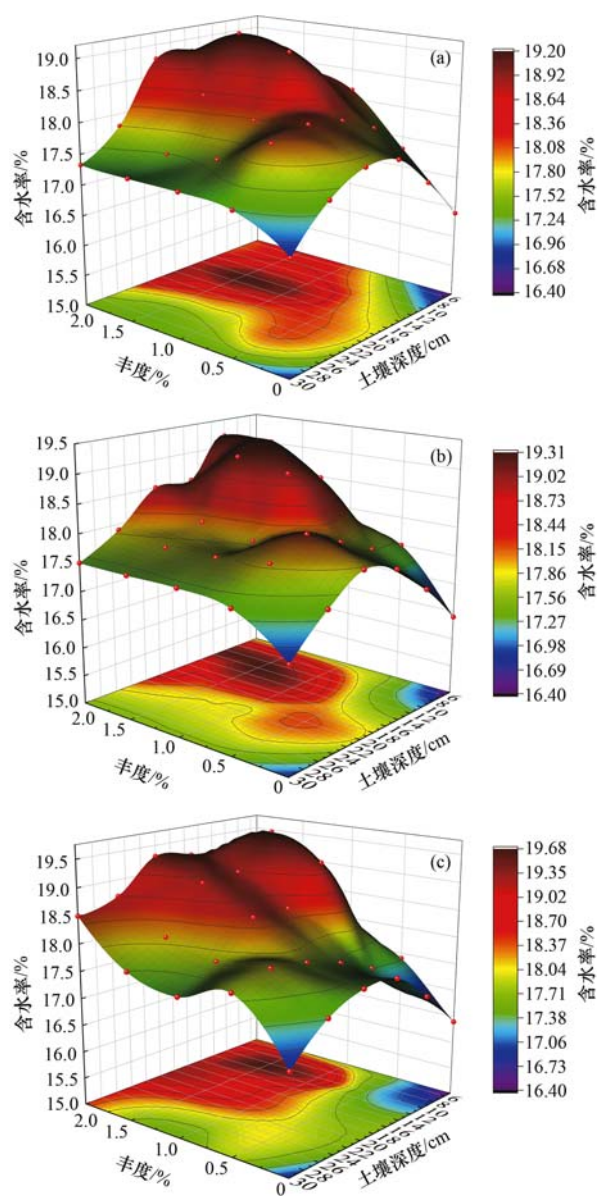
Fig. 3 Effect of microplastics on cumulative infiltration time

和 0.4%, 丰度 2% 条件下, Q3 和 Z3 累积入渗时间较 A3 分别增长了 6.5% 和 2.6%。上述研究结果表明土壤中微塑料赋存对累积入渗时间的影响, 不仅受微塑料丰度的影响, 也与微塑料类型密不可分; 其中 PP 微塑料对其影响最大, PE 微塑料对其影响最小。造成这种结果的原因可能是不同类型的微塑料具有不同的表面能^[27], 表面能越低, 疏水性越大, 疏水性越大的微塑料, 则水分在土壤中的运移速度越慢; 另外, 根据周蕊等^[28]的研究, 微塑料表面的粗糙程度也会对疏水性产生影响, 一般来说提高粗糙度则使疏水性变大, 故对不同类型微塑料在土壤中的累积入渗时间产生了较大差异。

不同特征微塑料赋存对土壤含水率的影响如图 4 所示。从中可知, 3 种类型微塑料赋存土壤含水率在不同土层深度上均随着微塑料丰度增大而增加, 在土壤深度 15 cm 处, 0.5%、1.0% 和 2.0% 丰度情况下 PP 微塑料含水率分别为 17.70%、18.50% 和 19.23%, 说明在相同深度土层上土壤含水率随微塑料的丰度增加而增大, 产生这种现象的原因可能是土壤中赋存的微塑料对土壤孔隙造成阻塞而使水分积蓄在该区域, 从而使得土壤含水率升高。另外, 微塑料赋存土壤含水率在不同土层深度上也呈现出差异性, 主要表现为土壤含水率最大值基本呈现于土层深度 10~25 cm 处, 其中有微塑料赋存的实验组在 0.5%、1%、2% 丰度下, 最大值分别出现在 15~20、10~15 和 15~20 cm 处, 而土层深度 0~5、5~10 和 25~30 cm 处含水率则相对较低, CK 的最大值则出现在 20~25 cm 处, 这可能是由于在水分入渗过程中微塑料具有一定的疏水性, 减缓了水分在土壤中的下渗速度, 故在实验结束后取土时还有水分贮留在土柱中下部, 从而导致所测量处的含水率较高。

2.2 不同丰度及类型微塑料对湿润锋的影响

微塑料赋存显著减缓了湿润锋的运移速度, 不同丰度微塑料赋存土壤湿润锋到达土柱底部的时间皆大于空白对照实验(图 5)。在入渗初期, 微塑料对湿润锋运移的影响很小, 不同处理湿润锋曲线几乎重合; 随着入渗的进行, 不同丰度微塑料赋存土壤湿润锋表现出差异性, 基本呈现出在相同入渗时间内微塑料丰度越大湿润锋运移距离越小的规律。当湿润锋运移到土壤中下层时, 以入渗时间为 60 min 为例, A1、A2、A3、Q1、Q2、Q3 和 Z1、Z2、Z3 湿润锋运移距离较 CK 分别减少 4.38%、8.76%、10.58%、7.30%、10.22%、14.60% 和 10.95%、13.14%、15.33%。微塑料类型亦对湿润锋的运移产生影响, 其中 PP 微塑料的影响最为显著, 而 PVC

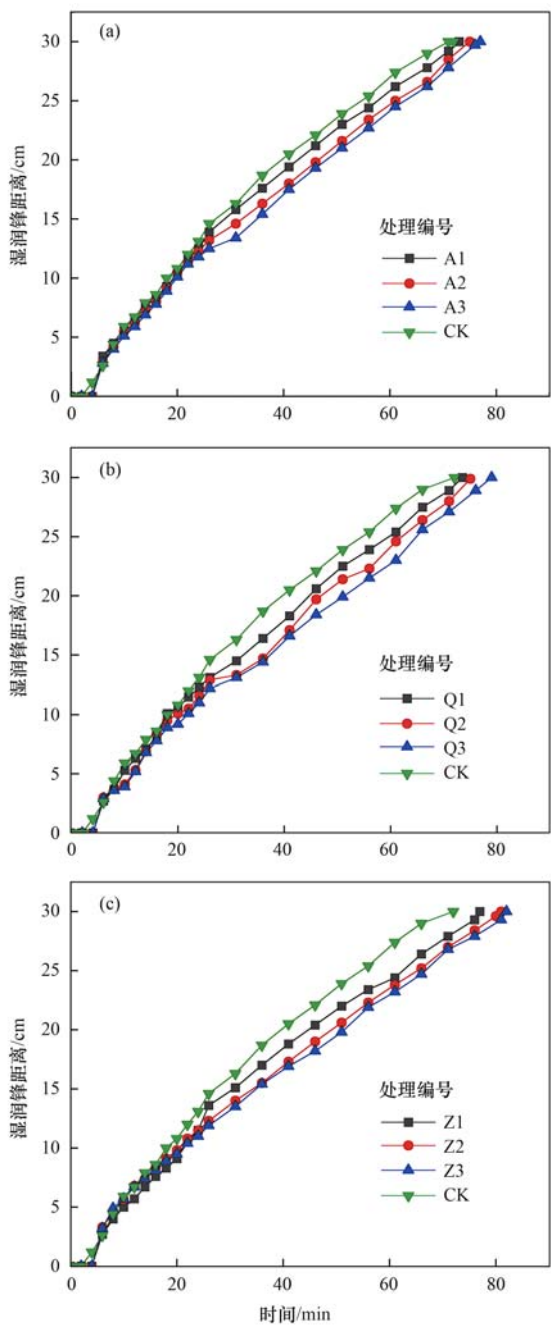


(a) PE 微塑料土壤含水率随土层深度及丰度变化, (b) PVC 微塑料土壤含水率随土层深度及丰度变化, (c) PP 微塑料土壤含水率随土层深度变化

图 4 微塑料对土壤含水率的影响

Fig. 4 Effect of microplastics on soil moisture content

与 PE 微塑料的影响均小于 PP 微塑料, 当入渗时间为 60 min 时, 即微塑料赋存土壤的湿润锋运移距离均小于 CK (27.4 cm), 在丰度相同情况下, 湿润锋的平均运移距离为: PP 实验组 < PVC 实验组 < PE 实验组。在微塑料丰度为 0.5% 条件下, 湿润锋运移距离为: PP (24.4 cm) < PVC (25.4 cm) < PE (26.2 cm) < CK (27.4 cm); 丰度 1% 条件下, PE 与 PVC 微塑料对于湿润锋运移的影响相似, 湿润锋运移距离为: PP (23.8 cm) < PVC (24.6 cm) < PE (25.0 cm) < CK (27.4 cm); 丰度 2% 条件下, 湿润锋运移距离为: PP (23.2 cm) < PVC (23.4 cm) < PE (24.5 cm) < CK (27.4 cm)。



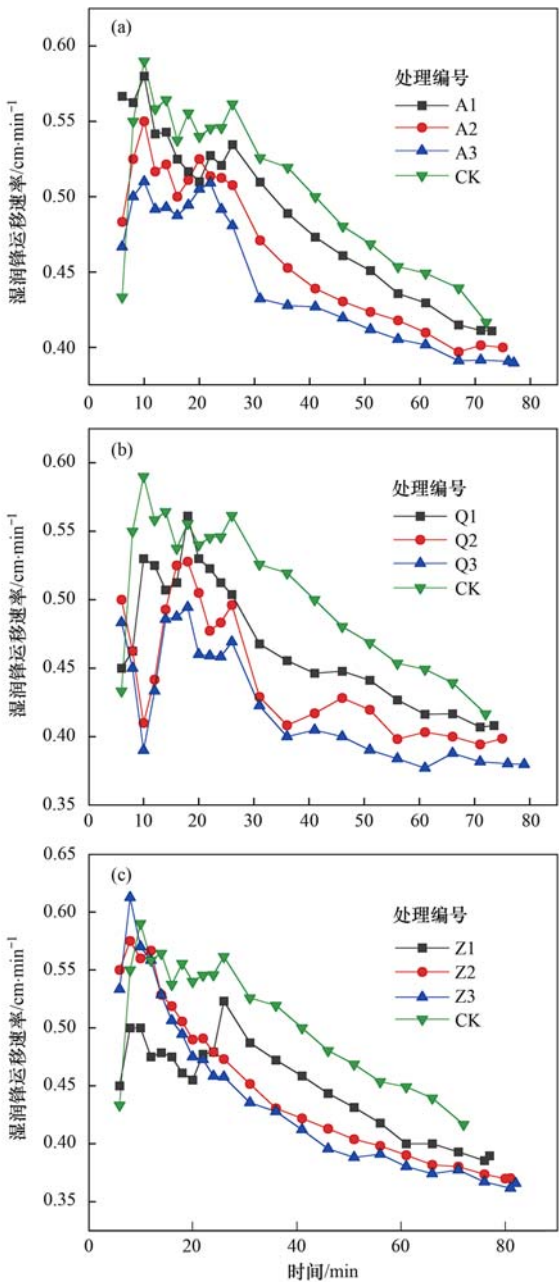
(a) PE 微塑料对湿润锋运移距离的影响, (b) PVC 微塑料对湿润锋运移距离的影响, (c) PP 微塑料对湿润锋运移距离的影响

图 5 微塑料对湿润锋运移距离的影响

Fig. 5 Effect of microplastics on transport distance of wetting front

微塑料对湿润锋运移速率的影响如图 6 所示, 其中湿润锋运移速率为湿润锋运移距离及所用时间计算而得. 从中可知, 不同处理湿润锋运移速率都表现为先急剧上升, 而后在运移 10 ~ 25 min 时上下波动, 从 25 min 后开始逐渐下降; 但不同处理间湿润锋运移速率的降低程度有所差异, 具体表现为与未赋存微塑料的 CK 处理相比, 赋存微塑料的实验组湿润锋运移速率降低更为剧烈, 且基本表现出湿润锋降低速率与微塑料丰度呈正相关. 当湿润锋运移到土壤中下层, 以入渗时间 45 min 为例, CK、A1、

A2、A3、Q1、Q2、Q3 和 Z1、Z2、Z3 湿润锋的运移速率 ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) 分别为: 0.480 4、0.460 9、0.430 4、0.422 0、0.447 8、0.428 2、0.410 0 和 0.443 4、0.413 0、0.395 6. 在同丰度不同类型微塑料条件下, 3 种微塑料对湿润锋运移速率的影响亦不相同, 运移速率基本表现为: $\text{CK} > \text{PE} > \text{PVC} > \text{PP}$. 同样在入渗开始 45 min 时, 同丰度不同类型微塑料实验组中, A1、Q1 和 Z1 湿润锋运移速率分别比 CK 低 4.06%、6.78% 和 7.72%, A2、Q2 和 Z2 湿润锋运移速率较 CK 低 10.41%、10.87% 和 14.03%, A3、Q2 和 Z3 湿润锋运移速率分别比 CK



(a) PE 微塑料对湿润锋运移速率的影响, (b) PVC 微塑料对湿润锋运移速率的影响, (c) PP 微塑料对湿润锋运移速率的影响

图 6 微塑料对湿润锋运移速率的影响

Fig. 6 Effect of microplastics on transport distance of wetting front

低 12.16%、14.65% 和 17.65%。

2.3 不同丰度及类型微塑料对土壤蒸发特性的影响

本实验结果表明,连续蒸发 27 h 后各处理间的累积蒸发量有显著差异,其中空白实验组(CK)的累积蒸发量显著大于赋存微塑料的处理(图 7)。丰度为 0.5%、1% 和 2% 情况下,Z1、A1、Q1、Z2、A2、Q2 和 Z3、A3、Q3 累积蒸发量分别比空白实验组(CK)降低了 2.01%、9.02%、10.55%、7.57%、15.35%、18.74% 和 13.3%、22.96%、19.41%,表明土壤水分累积蒸发量随土壤中微塑料丰度增大而减小,微塑料的加入减缓了土壤中水分的蒸发速率,且随着丰度的增大减缓程度也逐渐增大。微塑料类型对土壤水分蒸发的影响则与其丰度大小相关,在中低丰度(0.5% 和 1%) 条件下,PVC 微塑料对土壤水分蒸发影响最大,其次是 PP 微塑料,对土壤水分蒸发影响最小的为 PE 微塑料;而在高丰度(2%) 条件下则是 PP 微塑料对土壤水分蒸发影响最大,其次是 PVC 微塑料,影响最小的为 PE 微塑料,此时赋存 PP、PVC 和 PE 微塑料的土壤累积蒸发量分别比空白实验组减小了 22.9%、19.4% 和 13.3%。这与 Wan 等^[29]的实验结果不同,其结果显示小粒径(2 mm)和高浓度(1%) 的微塑料可以增大土壤水分蒸发速率,使其蒸发速率提高 25.90%~30.20%;造成这种结果可能是因为 Wan 等^[29]的实验采用烘箱进行蒸发模拟实验,添加微塑料的实验组在蒸发过程中土壤表面出现干裂等情况,使蒸发作用加快,累积蒸发量增加;也有可能是因为土壤质地的不同,造成了实验结果

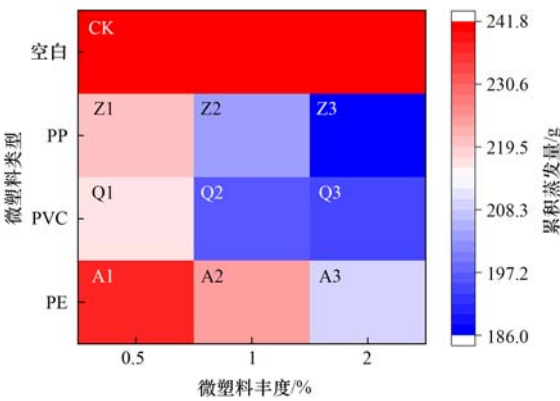


图 7 微塑料对累积蒸发量的影响
Fig. 7 Effects of different types and abundances of microplastics on total evaporation

出现较大差异。

通过 Black 和 Rose 蒸发模型进行拟合,拟合结果见表 2,由 Black 和 Rose 模型模拟可知,两者 RMSE 均值皆随微塑料浓度增加而增大,同时两者在 0.5%、1%、2% 实验组中的 R^2 均值为 0.954 6、0.954 4、0.953 7 和 0.985 0、0.982 8、0.982 4,表明随着微塑料浓度的增加两个模型的拟合精度都呈降低趋势。在赋存微塑料的情况下,Rose 蒸发模型拟合后的 RMSE 均小于 Black 蒸发模型,决定系数 R^2 均大于 Black 蒸发模型,表明在赋存同类型同丰度的微塑料后,Rose 蒸发模型的拟合精度要优于 Black 蒸发模型。综合对比两个模型 R^2 和 RMSE 参数后可以得出结论,Rose 蒸发模型更能较真实地反映微塑料赋存情况下土壤累积蒸发量随时间的变化情况。

表 2 不同微塑料条件下 Black 与 Rose 蒸发模型拟合效果

Table 2 Fitting effect of Black and Rose evaporation models under different microplastics conditions

处理编号	Black 蒸发模型				Rose 蒸发模型			
	<i>F</i>	<i>B</i>	RMSE	R^2	<i>C</i>	<i>D</i>	RMSE	R^2
CK	-7.464 7	6.836 7	272.369 0	0.963 7	0.114 3	1.428 3	29.000 5	0.996 1
A1	-27.790 1	6.326 8	251.364 2	0.948 2	0.070 1	3.050 5	22.157 2	0.964 7
A2	-28.782 2	5.808 1	270.388 9	0.933 0	0.074 9	2.378 8	35.087 1	0.955 2
A3	-23.537 6	5.137 1	281.086 9	0.945 3	0.059 9	2.377 9	45.499 2	0.962 1
Q1	-43.153 1	6.218 0	213.884 8	0.965 4	0.101 5	1.381 4	15.500 2	0.993 6
Q2	-44.419 0	5.672 3	243.714 1	0.963 3	0.108 3	0.567 1	15.304 0	0.997 0
Q3	-44.469 0	9.260 7	252.766 8	0.950 8	0.109 4	0.477 0	39.194 6	0.993 1
Z1	-45.711 6	6.629 0	259.509 8	0.963 2	0.111 0	1.389 1	22.799 1	0.996 7
Z2	-41.466 7	6.260 7	220.187 6	0.966 9	0.099 8	1.537 9	22.154 1	0.996 4
Z3	-39.243 9	5.948 9	282.916 9	0.965 1	0.093 5	1.511 9	27.092 3	0.992 2

1) *F* 和 *B* 为蒸发参数, *C* 为稳定蒸发参数, *D* 为水分扩散参数, RMSE 为均方根差, R^2 为拟合优度

3 结论

(1)微塑料丰度和类型对累积入渗时间、土壤含水率有显著影响。随着微塑料丰度增大,累积入渗时间显著增加,其中累积入渗时间 A2 和 A3 较 A1

分别增长了 2.7% 和 5.4%,Q2 和 Q3 较 Q1 分别增长了 2.0% 和 7.4%,Z2 和 Z3 较 Z1 分别增长了 5.1% 和 6.5%;而累积入渗时间同样受微塑料类型影响,类型不同丰度相同微塑料赋存条件下,PP 实验组累积入渗时间 > PVC 实验组累积入渗时间 >

PE 实验组累积入渗时间 > 空白实验组累积入渗时间。微塑料赋存土壤含水率在不同土层深度上均随着微塑料丰度增大而增加,土壤含水率最大值基本呈现于土层深度 10 ~ 25 cm 处,空白组的含水率最大值出现在土壤深度 20 ~ 25 cm 处。

(2)微塑料赋存显著减小了土壤湿润锋运移速率。随着微塑料丰度的增大,相同入渗时间内土壤湿润锋运移距离越小,湿润锋运移速率降低更为明显;当入渗时间为 60 min 时,A1、A2、A3、Q1、Q2、Q3 和 Z1、Z2、Z3 湿润锋运移距离较 CK 分别减少 4.38%、8.76%、10.58%、7.30%、10.22%、14.60% 和 10.95%、13.14%、15.33%,其中 PP 微塑料的影响最为显著,PVC 微塑料次之,对湿润锋运移速率影响最小的为 PE 微塑料。

(3)微塑料赋存对土壤水分蒸发产生抑制作用。同类型微塑料下土壤的累积蒸发量随丰度的增加而减小,在蒸发 27 h 时,低丰度下(0.5% 和 1%) PVC 微塑料对土壤水分蒸发影响最大,其次是 PP 微塑料,对土壤水分蒸发影响最小的为 PE 微塑料。高丰度下(2%) PP、PVC 和 PE 微塑料的实验土柱累积蒸发量比 CK 分别减小 22.9%、19.4% 和 13.3%。通过对比 Black 蒸发模型和 Rose 蒸发模型的拟合效果,Rose 蒸发模型更能较真实地反映微塑料赋存情况下土壤累积蒸发量随时间的变化情况。

参考文献:

- [1] Huang Y, Liu Q, Jia W Q, *et al.* Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114096.
- [2] Liu M T, Lu S B, Song Y, *et al.* Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **242**, doi: 10.1016/j.envpol.2018.07.051.
- [3] 王志超, 孟青, 于玲红, 等. 内蒙古河套灌区农田土壤中微塑料的赋存特征[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(3): 204-209.
- Wang Z C, Meng Q, Yu L H, *et al.* Occurrence characteristics of microplastics in farmland soil of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(3): 204-209.
- [4] 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.
- [5] 徐湘博, 孙明星, 张林秀, 等. 土壤微塑料污染研究进展与展望[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, **38**(1): 1-9.
- Xu X B, Sun M X, Zhang L X, *et al.* Research progress and prospect of soil microplastic pollution[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, **38**(1): 1-9.
- [6] 杨光蓉, 陈历睿, 林敦梅. 土壤微塑料污染现状、来源、环境命运及生态效应[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(1): 353-365.
- Yang G R, Chen L R, Lin D M. Status, sources, environmental fate and ecological consequences of microplastic pollution in soil[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 353-365.
- [7] 朱莹, 曹森, 罗景阳, 等. 微塑料的环境影响行为及其在我国分布状况[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(9): 1437-1447.
- Zhu Y, Cao M, Luo J Y, *et al.* Distribution and potential risks of microplastics in China: a review[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(9): 1437-1447.
- [8] De Souza Machado A A, Lau C W, Kloas W, *et al.* Microplastics can change soil properties and affect plant performance[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(10): 6044-6052.
- [9] 侯军华, 檀文炳, 余红, 等. 土壤环境中微塑料的污染现状及其影响研究进展[J]. *环境工程*, 2020, **38**(2): 16-27, 15.
- Hou J H, Tan W B, Yu H, *et al.* Microplastics in soil ecosystem: a review on sources, fate and ecological impact[J]. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(2): 16-27, 15.
- [10] 廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 等. 微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4661-4667.
- Liao Y C, Naziygul·J, Li M, *et al.* Effects of microplastics on the growth, physiology, and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4661-4667.
- [11] 李贞霞, 李庆飞, 李瑞静, 等. 黄瓜幼苗对微塑料和镉污染的生理响应[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(5): 973-981.
- Li Z X, Li Q F, Li R J, *et al.* Physiological response of cucumber seedlings to microplastics and cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(5): 973-981.
- [12] 刘莹莹, 张旗, 崔文智, 等. 聚乙烯微塑料对绿豆发芽的毒性研究[J]. *环境与发展*, 2019, **31**(5): 123-125.
- Liu Y Y, Zhang Q, Cui W Z, *et al.* Toxicity of polyethylene microplastics to seed germination of mung bean[J]. *Environment and Development*, 2019, **31**(5): 123-125.
- [13] 徐笠, 李海霞, 韩丽花, 等. 微塑料对典型污染物吸附解吸的研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2021, **29**(6): 961-969.
- Xu L, Li H X, Han L H, *et al.* Research progress on the adsorption and desorption of typical pollutants on microplastics[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, **29**(6): 961-969.
- [14] Nizzetto L, Futter M, Langaas S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(20): 10777-10779.
- [15] Okoffo E D, O'Brien S, Ribeiro F, *et al.* Plastic particles in soil: state of the knowledge on sources, occurrence and distribution, analytical methods and ecological impacts [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2021, **23**(2): 240-274.
- [16] Rillig M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(12): 6453-6454.
- [17] Chouchene K, Ksibi M. Microplastics as an emerging hazard to terrestrial and marine ecosystems: sources, occurrence and analytical methods[J]. *E3S Web of Conferences*, 2021, **265**, doi: 10.1051/E3SCONF/202126505003.
- [18] 李帅霖, 王霞, 王朔, 等. 生物炭施用方式及用量对土壤水

- 分入渗与蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(14): 135-144.
- Li S L, Wang X, Wang S, *et al.* Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(14): 135-144.
- [19] 王志超, 李仙岳, 史海滨, 等. 农膜残留对砂壤土和砂土水分入渗和蒸发的影响[J]. 农业机械学报, 2017, **48**(1): 198-205.
- Wang Z C, Li X Y, Shi H B, *et al.* Effects of residual plastic film on infiltration and evaporation for sandy loam and sandy soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, **48**(1): 198-205.
- [20] Qi Y L, Yang X M, Pelaez A M, *et al.* Macro -and micro-plastics in soil-plant system; effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth[J]. Science of the Total Environment, 2018, **645**: 1048-1056.
- [21] Bosker T, Bouwman L J, Brun N R, *et al.* Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*[J]. Chemosphere, 2019, **226**: 774-781.
- [22] 刘旭. 典型黑土区耕地土壤微塑料空间分布特征[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- Liu X. Spatial distribution of microplastics in mollisol farmland of Northeast China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019.
- [23] Dong Y M, Gao M L, Song Z G, *et al.* Microplastic particles increase arsenic toxicity to rice seedlings [J]. Environmental Pollution, 2020, **259**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113892.
- [24] Liu Y Y, Guo R, Zhang S W, *et al.* Uptake and translocation of nano/microplastics by rice seedlings: evidence from a hydroponic experiment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **421**, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.126700.
- [25] 刘旭. 科尔沁沙地坨甸相间地区土壤蒸发的野外试验与动态模拟[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- Liu X. Test and simulation analysis for soil evaporation dynamics in dune-meadow-dune area in Horqin Sand [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.
- [26] Celik H K, Karayel D, Caglayan N, *et al.* Rapid prototyping and flow simulation applications in design of agricultural irrigation equipment; case study for a sample in-line drip emitter [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2011, **6**(1): 47-56.
- [27] 杨雅斌, 张迎霜, 杜海玲, 等. 环境对改性塑料表面亲/疏水转变的作用机制[J]. 化工进展, 2021, doi: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-0787.
- Yang Y B, Zhang Y X, Du H L, *et al.* Mechanism of environmental effect on hydrophilic/hydrophobic conversion of modified plastics surface[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, doi: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-0787.
- [28] 周蕊, 金海云, 高乃奎, 等. 表面粗糙度对硅橡胶材料表面超疏水性的影响[J]. 中国表面工程, 2009, **22**(6): 30-35.
- Zhou R, Jin H Y, Gao N K, *et al.* Influence of surface roughness on superhydrophobicity of silicone rubber surface[J]. China Surface Engineering, 2009, **22**(6): 30-35.
- [29] Wan Y, Wu C X, Xue Q, *et al.* Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil[J]. Science of the Total Environment, 2019, **654**: 576-582.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)