

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源	林秋菊, 徐娇, 李梅, 王伟, 史国良, 冯银厂 (2505)
南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析	杨笑影, 曹芳, 林煜棋, 章炎麟 (2519)
西安市PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化特征	黄舍舍, 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩 (2528)
新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响	刘会斌, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 张潇潇, 王威, 阿布力克木·阿不力孜, 买里克扎提·买合木提, 刘伟 (2536)
长秋季生物物质燃烧对PM _{2.5} 中WSOC吸光性的影响	孟德友, 曹芳, 翟晓瑶, 张世春, 章炎麟 (2547)
2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源	王倩 (2555)
南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟 (2565)
郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析	任义君, 马双良, 王思维, 于世杰, 李一丹, 张瑞芹, 尹沙沙 (2577)
上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献	韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 何迪, 王焱, 马志强 (2586)
北京市餐饮业大气污染物排放特征	孙成一, 白画画, 陈雪, 翟翼飞, 高启天, 何万清, 聂磊, 石爱军, 李国傲 (2596)
北京市农业机械排放因子与排放清单	王凯, 樊守彬, 亓浩云 (2602)
北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化	李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 刘李阳, 秦建平 (2609)
基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析	张颖蕾, 崔希民 (2617)
环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟	张毅, 马艳飞, 宋帅, 吕永龙, 张盛, 吴强 (2625)
岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析	周石磊, 孙悦, 苑世超, 彭瑞哲, 刘世崇, 岳奇丞, 张航, 王周强, 李再兴, 罗晓 (2635)
“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析	李悦昭, 陈海洋, 孙文超 (2646)
伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价	姜时欣, 翟付杰, 张超, 王蒙蒙, 单保庆 (2653)
典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析	赵然, 韩志伟, 申春华, 张水, 涂汉, 郭永丽 (2664)
沉积物参与氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响	陈洁, 许海, 詹旭, 许笛, 朱广伟, 朱梦圆, 李鹏飞, 康丽娟 (2671)
丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素	李胜男, 陈豪宇, 彭华, 李芸君, 朱坚, 简燕, 纪雄辉 (2679)
胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用	王振方, 韩子玉, 王梦雪, 马逸驰, 王婷, 王丽卿, 张玮 (2688)
不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较	桑雨璇, 杨珈乐, 熊怡, 尹文博, 汪华, 王和云 (2698)
过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用	张帅, 李大鹏, 丁玉琴, 徐楚天, 许鑫澎, 孙培荣, 赵哲豪, 黄勇 (2706)
基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例	王亚楠, 祝伟, 祁新华, 范水生 (2714)
不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (2727)
高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5	李立, 吴丽颖, 董正玉, 王霖, 张倩, 洪俊明 (2736)
Fe-cyclam/H ₂ O ₂ 体系催化降解罗丹明B机制	余雨清, 陈翔宇, 蔡荣华, 黄歆珏, 陈曼 (2746)
微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO ₂ -NTs为光阳极	卢忆, 周海珊, 彭瑞建, 叶杰旭, 陈建孟, 宋爽, 张士汉 (2754)
缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性	陈凡雨, 徐仲, 尤宏, 柳锋, 李之鹏, 陈其伟, 韩红卫 (2762)
HRT对改良式A ² /O-BAF反硝化除磷脱氮的影响	赵凯亮, 刘安迪, 南彦斌, 梁利民, 王云霞, 陈永志 (2771)
重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化	孙琪, 赵白航, 范飒, 周邦磊, 李玉璋 (2779)
异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除及重金属和盐度的影响	王萌萌, 曹刚, 张迪, 冯乃宪, 潘涌璋 (2787)
火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替	薛嘉俊, 张绍青, 张立秋, 李淑更, 姚海楠, 耿忠轩, 李鸿, 刘晓玲 (2796)
游离胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响	沈琛, 张树军, 彭永臻 (2805)
死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰	苏宇傲, 刘宏波, 毛秋燕, 张慧旻, 张衍, 刘和 (2812)
中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价	陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军 (2822)
土壤环境质量预警体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2834)
不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系	毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 沈倩, 章明奎 (2842)
长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征	宁玉菲, 魏亮, 魏晓梦, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 吴金水 (2852)
生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响	黄洋, 郭晓, 胡学玉 (2861)
基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价	肖冰, 薛培英, 韦亮, 刘成程, 高培培, 樊利敏, 杜佳燕, 刘文菊 (2869)
重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素	胡青青, 沈强, 陈飞, 尹炳, 邹宏光, 庄红娟, 张世文 (2878)
新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果	陈兆进, 李英军, 邵洋, 林立安, 徐鸽, 陈彦, 田伟, 姚伦广, 韩辉 (2889)
三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征	李丽娟, 李昌晓, 陈春桦, 杨治华, 陈雪梅 (2898)
滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布	张宇, 左剑恶, 王丝可, Alisa Salimova, 李爱军, 李玲玲 (2908)
模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响	王愉琬, 马安周, 种国双, 谢飞, 周汉昌, 刘国华, 庄国强 (2918)
水肥气耦合对温室番茄土壤N ₂ O排放及番茄产量的影响	商子惠, 蔡焕杰, 陈慧, 孙亚楠, 李亮, 朱艳, 王晓云 (2924)
矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用	尚誉, 杨丰隆, 宁夏, 董铁茹, 桑楠 (2936)
海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价	汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 覃晓青, 黄洪辉 (2942)
春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析	贺玉晓, 李珂, 任玉芬, 王思琪, 方文颖 (2951)
热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估	蔡朝卉, 楚沉静, 郑浩, 罗先香, 李锋民 (2963)
长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)	蒋自然, 金环环, 王成金, 叶士琳, 黄艳豪 (2972)
《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)	

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用

尚誉¹, 杨丰隆¹, 宁夏¹, 董铁茹², 桑楠^{1*}

(1. 山西大学环境与资源学院, 太原 030006; 2. 山西省环境监控中心, 太原 030027)

摘要: 煤矸石是煤炭开采过程中产生的一种有害固体废弃物, 长期堆积会对周边环境造成严重的危害. 为探究矸石山的生态风险, 本研究通过水培实验方法考察了煤矸石及其下游村庄土壤浸出液在不同稀释浓度(1:27、1:9、1:3和1:1)下对大麦生长发育的影响及遗传损伤效应. 结果表明, 低浓度煤矸石浸出液对大麦幼苗根和芽的生长有轻微促进作用, 而高浓度煤矸石和村庄土壤浸出液则显著抑制其萌发和生长. 随着煤矸石浸出液浓度的升高, 大麦叶片丙二醛(MDA)含量增加, 叶绿素(Chl)呈现先升高后降低的趋势, 而村庄土壤浸出液则表现出较低的毒性效应. 此外, 高浓度的煤矸石和村庄土壤浸出液导致大麦根尖细胞有丝分裂指数的降低和微核发生率的增加, 提示其可能涉及遗传毒性. 本研究结果为煤矸石堆放区及其周边土壤的生态风险评估提供了实验依据.

关键词: 矸石山; 土壤浸出液; 大麦; 生长发育毒性; 遗传损伤

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2936-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910133

Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (*Hordeum vulgare*)

SHANG Yu¹, YANG Feng-long¹, NING Xia¹, DONG Yi-ru², SANG Nan^{1*}

(1. College of Environment and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Environmental Supervision Center of Shanxi Province, Taiyuan 030027, China)

Abstract: Coal gangue is a harmful solid waste product of coal mining. When it accumulates for a long time, it becomes harmful to the surroundings. To investigate the adverse effect of coal gangue on the surrounding environment, this study investigated the effects of coal gangue and its downstream village on the growth toxicity and genotoxicity of barley at different dilution concentrations (1:27, 1:9, 1:3, and 1:1) via hydroponic experiments. As a result, low concentration coal gangue showed a slight promotion effect on the growth of roots and shoots of barley, while coal gangue and village soil, which have a high concentration, could seriously inhibit their germination and growth. At the same time, with the increase of the concentration of coal gangue, malondialdehyde (MDA) in barley leaves increased, and chlorophyll (Chl) increased first and then decreased, while the village soil showed a lower toxic effect. In addition, our results showed that higher concentrations of coal gangue and village soil could decrease the mitotic index and increase the micronucleus rate in root tip cells, indicating that the toxicity mechanism of coal gangue to barley may be involved in genotoxicity. These results provide experimental evidence for the ecological risk assessment of the coal gangue and its surrounding environment.

Key words: coal gangue; soil leachate; barley (*Hordeum vulgare*); growth toxicity; genotoxicity

我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国, 每年因矿山开采产生的固体废弃物占全国工业固废产生量的80%以上^[1]. 煤矸石是在煤炭开采和洗煤过程中产生的一种复杂的工业固体废弃物, 其排放率可达原煤开采量的10%~15%, 此外, 洗煤过程中还可排放10%~15%^[2]. 截止2013年, 中国煤矸石累积堆放量约为45亿t, 规模较大的煤矸石山达2600多座, 每年生产约6.59亿t煤矸石^[3]. 煤矸石的大量排放及露天堆放, 特别是在风化和雨淋条件下能够释放多种污染物(主要是多环芳烃和重金属)^[4,5], 这些污染物进入水体或渗入土壤后, 从而对周边土壤和水环境造成严重危害^[6,7].

有研究表明, 煤矸石的长期堆放会对周边环境土壤和玉米作物造成严重的重金属污染, 且玉米中重金属含量随着土壤中重金属含量的增加而增高^[8]; 用煤矸石的浸出水灌溉栽培小麦的土壤, 会

降低土壤的pH值, 增加土壤中Cr和Pb的积累, 不仅抑制了土壤酶的活性, 还引起了植物的生理功能障碍, 同时促进了小麦对重金属的吸收, 降低了作物产量^[9]. 还有研究报道, 山西省某矸石山堆积区及其周围的土壤可能会给人类带来潜在的致癌风险^[10], 并且会对斑马鱼的发育和甲状腺激素产生破坏^[11]. 大麦是北方常见的作物之一, 被作为模式植物广泛应用于环境毒理学实验中^[12]. 与大多数传统方法相比, 植物生物测定法在检测生态系统中污染物的毒性作用时更为灵敏与简便, 并且植物微核实验是评价环境诱变因子对生物遗传物质造成损伤的

收稿日期: 2019-10-19; 修订日期: 2019-12-23

基金项目: 山西省重点研发计划(社发领域)项目(201903D321078); 山西省高等学校优秀创新团队支持计划项目

作者简介: 尚誉(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境毒理学, E-mail: 406907439@qq.com

* 通信作者, E-mail: sangnan@sxu.edu.cn

有效方式^[13]。

为此,本研究选取大麦为实验作物,采用水培的方式分析、比较煤矸石堆积区及其下游村庄土壤浸出液对其萌发、生长等生理生化指标的影响和遗传毒性,以期评估矸石堆放区生态风险提供基础毒性数据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与处理

本研究选取的采样地点为沁源县沁新煤矿的煤矸石山(36°34'12.24"N, 112°18'55.67"E)和其下游的沁源县下兴居村庄,两采样点相距 1.6 km。沁源县位于山西省东南部,是山西省重点煤炭生产基地。土壤取样点包括 3 个子样本,每个取样点收集 0~20 cm 的表层土壤,包装后在自然干燥条件下移至实验室。将所有土壤样品冷冻干燥并研磨破碎,然后用 20 目筛过滤后储存(4℃)。

1.2 煤矸石及村庄土壤浸出液的制备

取研磨过筛后的煤矸石和村庄土壤各 100 g 于锥形瓶中,分别加入 100 mL 的超纯水($1\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$),密封后置于 HZQ-F100 振荡箱中,在常温条件下振荡 3 d 后静置一晚。次日,将泥水混合物取出在 KDC-40 低速离心机上以 $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下离心 10 min,然后将上清液转移到聚四氟乙烯(PTFE)瓶中,密封保存在 4℃ 的黑暗条件下。

1.3 植物材料的处理

大麦种子(*Hordeum vulgare* L.)购自山西省农业科学院。挑选颗粒饱满的大麦种子数颗,在室温条件下用蒸馏水浸泡 4~6 h。该实验分为 4 个处理组,分别用蒸馏水稀释煤矸石和村庄土壤浸出液至不同浓度(1:27、1:9、1:3 和 1:1),对照组用蒸馏水。然后将所有种子置于(26 ± 0.5)℃ 的温度下,光照:黑暗为 14 h:10 h 的条件下生长。实验设置为 3 个重复,每组 30 粒种子,每隔一段时间适当更换处理液。

1.4 大麦种子萌发实验

大麦种子经浸种后,随机选择 30 粒大小一致的种子置于铺有两层滤纸的培养皿内,随后添加不同浓度的处理液。以种子破白为萌发标准,每隔 24 h 检测种子萌发率。

1.5 大麦生长毒性实验

大麦种子经浸种后,用湿纱布包裹催芽 24 h。当幼苗的根长达到 1~1.5 cm 时,随机挑选 30 粒长势一致的种子置于铺有两层滤纸的培养皿内,随后添加不同浓度的处理液。每隔 24 h 检测大麦幼苗的根长、芽长,计算各处理组的单株平均值,作为该组大麦幼苗的平均根长、芽长。

大麦种子处理 7 d 后,剪下幼苗的根和茎叶部分,用蒸馏水洗净后放置在滤纸上晾干、称重,得到大麦幼苗的根和茎叶的鲜重。计算各处理组的单株平均重量,作为该组大麦幼苗的平均根重和茎叶重。

1.6 丙二醛及叶绿素含量的测定

大麦种子处理 7 d 后,采集幼苗的新鲜叶片以测定其生理生化指标。丙二醛(MDA)含量的测定方法采用硫代巴比妥酸(TBA)加热比色法^[14];叶绿素(Chl)含量的测定方法采用丙酮-乙醇混合提取法^[15]。

1.7 有丝分裂指数(MI)和微核率(MCN)

用不同浓度的煤矸石和村庄土壤浸出液分别处理大麦种子根系 24 h 后,自根尖顶端切下 1 cm 长的幼根放入盛有卡诺固定液(甲醇:乙酸=3:1)的小瓶中固定 24 h,随后转入 70% 的乙醇中保存。通过 Feulgen 法对根尖进行染色后,切去根尖 1 mm 左右,加盖玻片,常规压片,用光学显微镜在 800× 放大倍数下进行观察。每个处理组观察 10 株植物的幼根,每株约 1 000 个细胞,MI 为根尖有丝分裂细胞占细胞总数的百分比,MCN 为根尖细胞中的微核率,以千分比表示^[16]。

1.8 数据统计与分析

采用 Origin8.0 统计软件对数据进行统计分析,数据用平均值±标准误差(SE)表示,用 One-way ANOVA 法检验染毒组与对照组的差异显著性。

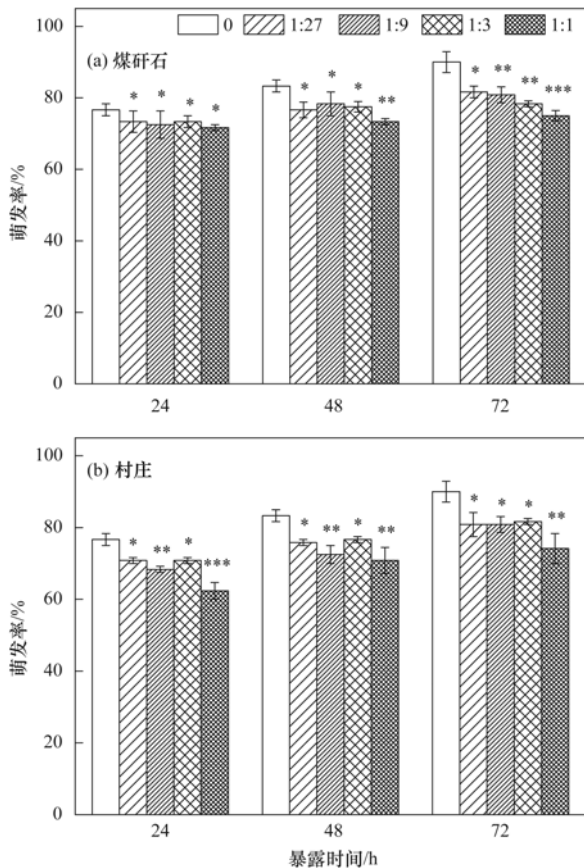
2 结果与分析

2.1 矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦种子萌发率的影响

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦种子萌发率的影响如图 1 所示。不同浓度的浸出液均对大麦种子的萌发率产生了抑制作用,并且随着浸出液浓度的增加,抑制作用增强。染毒 48 h,浓度为 1:1 时,煤矸石处理组萌发率为对照组的 88% ($P<0.01$),村庄土壤处理组萌发率为对照组的 85% ($P<0.01$)。72 h 后,处理浓度为 1:27、1:9、1:3 和 1:1 时,煤矸石处理组萌发率分别为对照组的 91%、90%、87% 和 83%,村庄土壤处理组萌发率分别为对照组的 90%、90%、91% 和 82%。

2.2 矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦幼苗早期生长的影响

图 2 和图 3 为矸石山及其周边村庄土壤的浸出液对大麦幼苗早期生长的影响。图 2 结果显示,染毒 24 h,煤矸石浸出液处理组的芽长[图 2(a)]和根长[图 2(b)]均显著降低($P<0.01$);但随着处理时间的延长,浸出液对其生长的影响逐渐变弱,168 h 时



与CK相比有显著差异,*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$,***表示 $P<0.001$,下同

图1 矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦种子24、48和72 h萌发率的影响

Fig. 1 Effects of soil leachate from coal gangue and its surrounding village on germination rate of barley seeds at 24, 48, and 72 h

仅有1:3和1:1组的芽长明显受到抑制(分别为对照组的83%和75%),而所有处理组的根长与对照相比均无显著性差异。由图3可以看出,村庄土壤浸出液高浓度能够抑制大麦幼苗芽与根系的生长。

图4为矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦幼苗染毒168 h后的芽重和根重变化情况。从图中可以看出,当煤矸石浸出液处理组浓度为1:9时,芽重和根重相比对照组有显著增加,而当浓度达到1:3和1:1时,芽重和根重相比对照均有降低($P<0.05$);随着村庄土壤浸出液处理组浓度的增加,芽重和根重逐渐降低,当浓度为1:1时,芽重和根重分别为对照组的68%和65%,表现出极显著差异($P<0.01$)。

2.3 矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦丙二醛和叶绿素含量的影响

植物叶片具有一定的蒸腾作用,在外界污染物的作用下,会影响植物叶片的生长、氧化损伤和光合作用等一系列生理活动^[17]。由图5(a)可以看出,处理168 h后,随着煤矸石浸出液浓度的升高,叶片

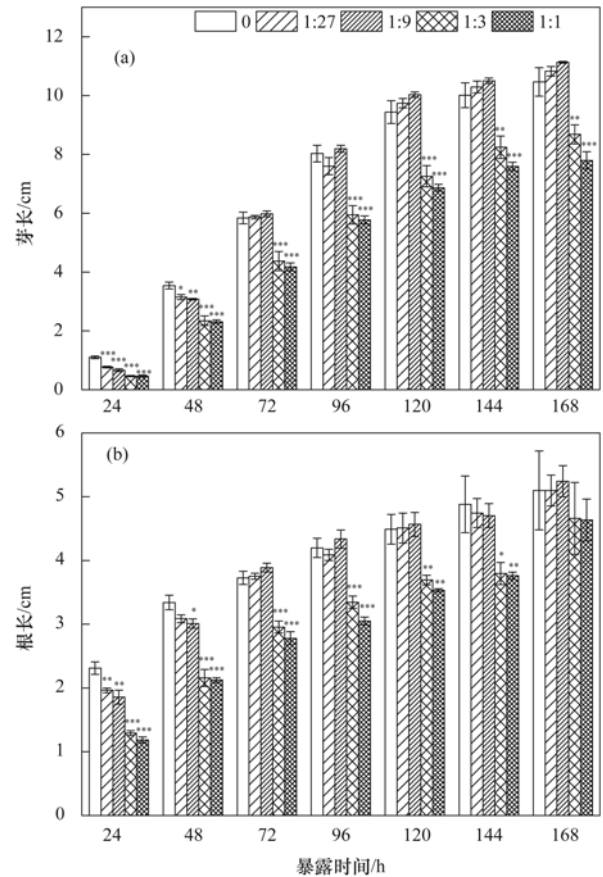


图2 矸石山土壤浸出液对大麦幼苗24、48、72、96、120、144和168 h芽长和根长的影响

Fig. 2 Effects of soil leachate from coal gangue on shoot length and root length of barley at 24, 48, 72, 96, 120, 144, and 168 h

MDA的含量显著上升($P<0.05$),而村庄土壤浸出液对叶片MDA含量影响并不明显。从图5(b)可知,煤矸石浸出液低浓度(1:27和1:9)时促进Chl含量的上升,高浓度(1:1)则显著抑制Chl的含量($P<0.01$);而村庄土壤浸出液对叶片Chl水平的影响较小,仅在高浓度(1:1)表现出抑制作用(达到对照组的83%($P<0.01$))。

2.4 矸石山及其周边村庄土壤浸出液诱导大麦遗传损伤效应

本研究使用有丝分裂指数(MI)和微核(MCN)作为损伤终点考察了对大麦的遗传毒性。如表1所示,煤矸石浸出液处理组MI随着浸出液浓度的增加呈现出先上升后下降的趋势,而村庄土壤浸出液处理组MI仅在高浓度处理时出现下降趋势,浓度1:3和1:1时分别为对照组的67%和46%($P<0.001$)。由表2可知,根尖细胞微核发生率在矸石山和村庄土壤浸出液处理组均呈现出浓度依赖性增加($P<0.01$)。

3 讨论

本研究首先探讨了矸石山及其周边村庄土壤对

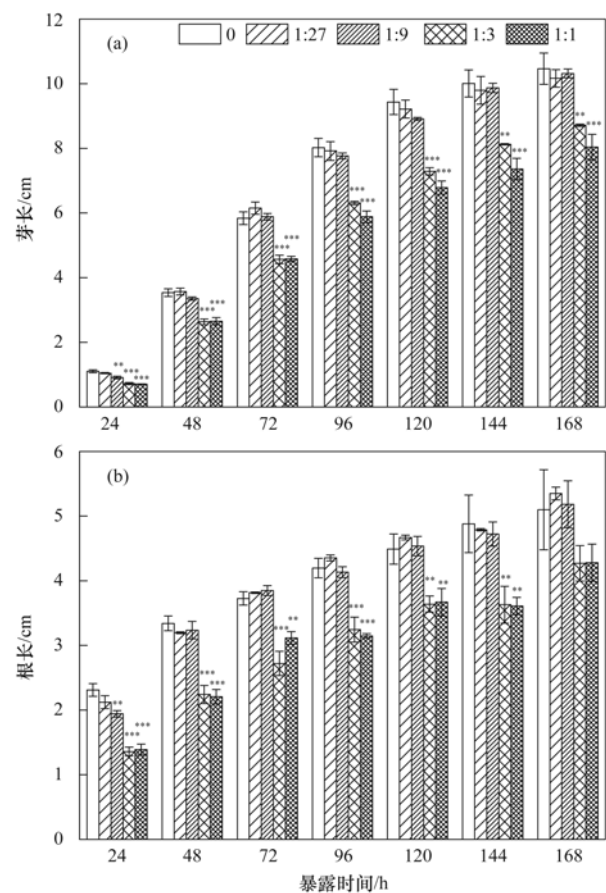


图3 周边村庄土壤浸出液对大麦幼苗24、48、72、96、120、144和168 h 芽长和根长的影响

Fig. 3 Effects of soil leachate from surrounding village on shoot length and root length of barley at 24, 48, 72, 96, 120, 144, and 168 h

表1 矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦根尖细胞有丝分裂指数的影响¹⁾

Table 1 Effects of soil leachate from coal gangue and its surrounding village on the mitotic index (MI) of barley root tips

稀释比例	有丝分裂指数/%	
	煤矸石	村庄
0	15.00 ± 0.23	15.00 ± 0.23
1:27	16.07 ± 1.07	15.33 ± 0.77
1:9	20.93 ± 0.18 ***	15.07 ± 0.64
1:3	17.07 ± 0.90 **	10.07 ± 0.47 ***
1:1	7.87 ± 0.41 ***	6.87 ± 0.37 ***

1) * * 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

表2 矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦根尖细胞微核率的影响

Table 2 Effects of soil leachate from coal gangue and its surrounding village on micronucleus frequency (MCN) of barley root tips

稀释比例	微核率/%	
	煤矸石	村庄
0	1.33 ± 0.33	1.33 ± 0.33
1:27	4.33 ± 0.33 **	3.67 ± 0.33 **
1:9	7.33 ± 0.88 ***	4.67 ± 0.88 **
1:3	12.33 ± 1.20 ***	8.33 ± 0.88 ***
1:1	14.00 ± 1.15 ***	11.67 ± 1.45 ***

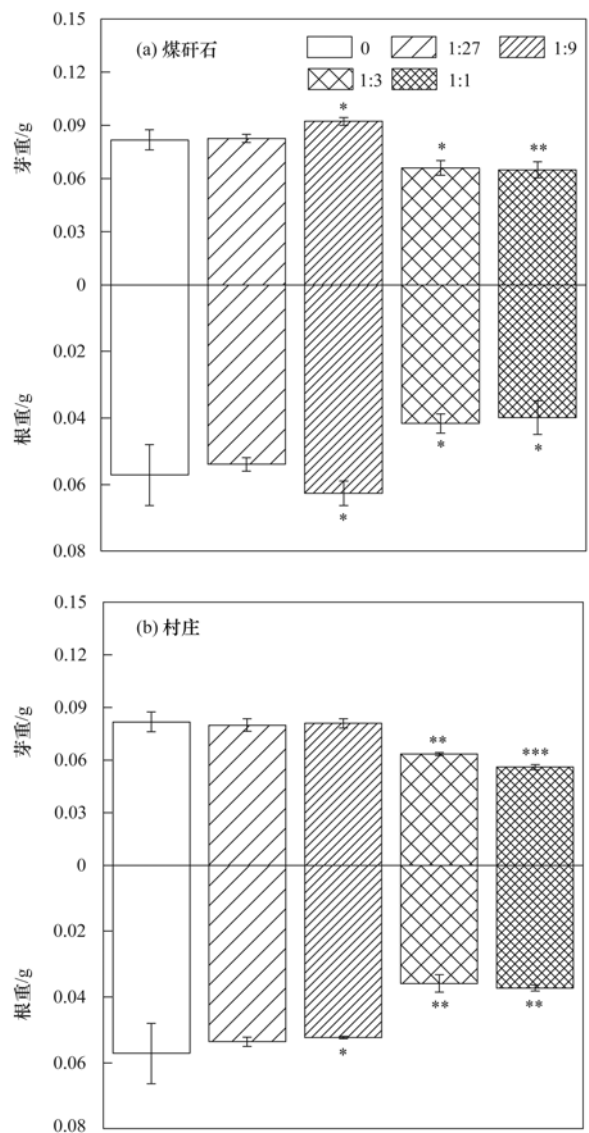


图4 矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦芽重和根重的影响

Fig. 4 Effects of soil leachate from coal gangue and its surrounding village on shoot weight and root weight of barley

大麦种子萌发率的影响. 结果表明, 萌发率在煤矸石和村庄土壤浸出液的处理下均受到不同程度的抑制作用, 且在高浓度下较为显著. 类似地, 李云玲等^[18]研究了煤矸石淋滤液对小麦种子萌发的影响, 结果表明, 煤矸石淋滤液对小麦种子的发芽有一定的抑制作用, 且浓度越高抑制作用越显著. 据报道, 重金属等有害化学物质对种子萌发的影响主要取决于它们穿过种皮到达胚胎组织的能力, 不同植物种皮对不同物质的渗透性也不同^[19]. 造成这一现象的原因可能是高浓度煤矸石和土壤浸出液中所含有的重金属元素破坏了发芽时期大麦种皮的渗透性, 导致煤矸石浸出液进入了植物细胞、扰乱了种子的正常萌发.

在此基础上, 本文又进一步研究了矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦幼苗早期生长的影响, 发现其对于大麦的生长具有双重作用, 即较低浓度

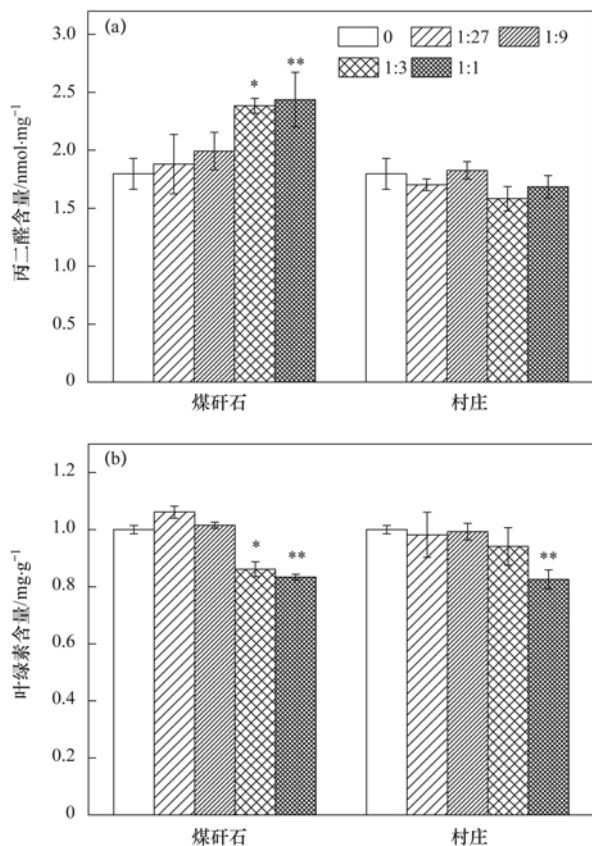


图5 矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦叶片丙二醛和叶绿素含量的影响

Fig. 5 Effects of soil leachate from coal gangue and its surrounding villages on malondialdehyde and chlorophyll content in barley leaves

下促进根长、芽长和根重、芽重,而在较高浓度下对其产生抑制作用.有研究表明,将煤灰用于土壤可促进植物生长并能够提高作物的产量,例如苜蓿、大麦、向日葵和花生^[20].原因可能是煤矸石中某些微量元素有助于植物的生长发育,如果适当地添加,其可以成为增加土壤肥力的宝贵资源^[21].而当这些微量元素浓度过高时,它们会被植物吸收,破坏植物体内的新陈代谢和光合作用,最终降低植物的产量^[9,22].如 Mtisi 等^[23]的报道指出,施用低剂量的粉煤灰能够促进莴苣根系的伸长和生物量的上升,然而高剂量的粉煤灰会导致莴苣的生长和产量显著地降低.

植物的生长发育离不开叶片光合作用的进行,而叶绿素含量的变化能够直接反映植物体对外界环境胁迫的程度.本研究结果进一步显示,矸石山和周边村庄土壤浸出液对叶片叶绿素含量的影响与根重芽重的变化趋势一致.据报道,叶绿素的合成需要多种微量元素的参与,而煤矸石中含有一系列植物生长所必需的元素,其中包括大量营养素,例如磷、钾、硫、钙和镁,以及微量元素铁、锰、铜、锌、钼、镍和硼^[24,25].所以低浓度的煤矸石浸出液能够诱导大麦

叶片中叶绿素含量的上升,但当浸出液浓度过高时,其中的重金属等污染组分就会被植物吸收运输到叶片,进而抑制叶绿素酸酯酶和氨基酮戊酸的合成,从而造成叶绿素含量降低,植物生长受抑^[26].也有研究表明,煤中可能含有高浓度的可溶性盐,当盐分过高时会引起植物的生理压力,进而造成其养分失衡,破坏叶片的光合作用和呼吸作用,从而导致叶片发黄、坏死等一系列不良后果^[23].通常,叶绿素不仅可用来评估植物的非破坏性效应,其含量又被证明与脂质过氧化有关^[27].MDA 是膜脂过氧化的最终分解产物,能够直接反映出植物细胞膜受到损伤的程度,它的含量与植物衰老及逆境伤害有密切关系.本研究显示,村庄土壤浸出液对于大麦叶片 MDA 含量无显著影响,而矸石山土壤浸出液暴露后则导致叶片中 MDA 水平升高,且呈现出显著的剂量-效应关系.这可能是由于浸出液含有大量的可溶性盐和重金属离子,会打破植物体内自由基的平衡,使自由基代谢失调,导致膜脂质过氧化程度上升,从而造成 MDA 含量的上升^[28].

为了深度阐明矸石堆放区土壤浸出液造成大麦幼苗生长发育受抑的机制,本研究又探讨了大麦根尖分生组织细胞的有丝分裂指数和微核发生情况.结果表明,浸出液均对根尖细胞有丝分裂指数造成了“低促高抑”的现象,而对微核率则呈现出明显的剂量依赖性增加.这可能是由于污染组分通过植物根部进入根尖分生区干扰细胞内的有丝分裂过程,同时造成细胞内核的结构发生改变,影响细胞分裂与细胞周期以及植物细胞器功能紊乱,从而抑制根系的伸长^[29].同时,根尖细胞微核率的结果表明,浸出液也会造成根尖细胞染色体的损伤,提示煤矸石堆放对周边环境的潜在生态风险.

4 结论

矸石山及其周边村庄土壤浸出液影响大麦萌发和早期生长过程.矸石山土壤浸出液诱导大麦叶片丙二醛含量上升和叶绿素含量下降,而周边村庄土壤的影响不显著.矸石山及其周边村庄土壤浸出液造成大麦根尖细胞有丝分裂指数先上升后下降和微核发生率增加.这些结果提示,煤矸石堆放可能会导致周边土壤环境污染,引发生态风险.

参考文献:

- [1] Guo X, Ren J, Xie C J, *et al.* A comparison study on the deoxygenation of coal mine methane over coal gangue and coke under microwave heating conditions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, **100**: 45-55.
- [2] Sun Y Z, Fan J S, Qin P, *et al.* Pollution extents of organic substances from a coal gangue dump of Jiulong Coal Mine, China

- [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, **31**(1): 81-89.
- [3] 国家发展和改革委员会. 中国资源综合利用年度报告 (2014)[J]. *再生资源与循环经济*, 2014, **7**(10): 3-8.
- [4] Tong R P, Yang X Y, Su H R, *et al.* Levels, sources and probabilistic health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the agricultural soils from sites neighboring suburban industries in Shanghai[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 1365-1373.
- [5] Fan J S, Sun Y Z, Li X Y, *et al.* Pollution of organic compounds and heavy metals in a coal gangue dump of the Gequan Coal Mine, China[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2013, **32**(3): 241-247.
- [6] Chen W H, Liu Y W, Wang H J, *et al.* Long-term exposure to silica dust and risk of total and cause-specific mortality in Chinese workers: a cohort study[J]. *PLoS Medicine*, 2012, **9**(4): e1001206.
- [7] Field R W, Withers B L. Occupational and environmental causes of lung cancer[J]. *Clinics in Chest Medicine*, 2012, **33**(4): 681-703.
- [8] 李旭华, 王心义, 杨建, 等. 焦作矿区煤矸石山周围土壤和玉米作物重金属污染研究[J]. *环境保护科学*, 2009, **35**(2): 66-69.
- Li X H, Wang X Y, Yang J, *et al.* Review on heavy metal pollution to soil and corn near coal waste rock dump in Jiaozuo diggings[J]. *Environmental Protection Science*, 2009, **35**(2): 66-69.
- [9] Ma S C, Zhang H B, Ma S T, *et al.* Effects of mine wastewater irrigation on activities of soil enzymes and physiological properties, heavy metal uptake and grain yield in winter wheat[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **113**: 483-490.
- [10] Yun Y, Gao R, Yue H F, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)-containing soils from coal gangue stacking areas contribute to epithelial to mesenchymal transition (EMT) modulation on cancer cell metastasis[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 632-640.
- [11] Yang F L, Li G K, Sang N. Embryonic exposure to soil samples from a gangue stacking area induces thyroid hormone disruption in zebrafish[J]. *Chemosphere*, 2019, **236**: 124337.
- [12] Sang N, Li G K, Xin X Y. Municipal landfill leachate induces cytogenetic damage in root tips of *Hordeum vulgare* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, **63**(3): 469-473.
- [13] Yi H L, Si L Y. *Vicia* root-mirconucleus and sister chromatid exchange assays on the genotoxicity of selenium compounds[J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2007, **630**(1-2): 92-96.
- [14] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.
- [15] 张宪政. 植物叶绿素含量测定--丙酮乙醇混合液法[J]. *辽宁农业科学*, 1986, (3): 26-28.
- [16] 卢龙斗, 常重杰. 遗传学实验技术(修订版)[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [17] Anjum S A, Xie X Y, Wang L C, *et al.* Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, **6**(9): 2026-2032.
- [18] 李云玲, 侯沁文, 任嘉红. 煤矸石淋滤液对小麦种子及幼苗的生态毒性研究[J]. *西南林业大学学报*, 2015, **35**(4): 39-45.
- Li Y L, Hou Q W, Ren J H. Ecotoxicity of coal gangue leaching filtrate on wheat seed and seedlings[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2015, **35**(4): 39-45.
- [19] Akinci I E, Akinci S. Effect of chromium toxicity on germination and early seedling growth in melon (*Cucumis melo* L.) [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2010, **9**(29): 4589-4594.
- [20] He H H, Dong Z G, Peng Q, *et al.* Impacts of coal fly ash on plant growth and accumulation of essential nutrients and trace elements by alfalfa (*Medicago sativa*) grown in a loessial soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **197**: 428-439.
- [21] Liu H B, Liu Z L. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, **54**(12): 1331-1340.
- [22] Moteszarezaei B, Ahmadiyan E, Ail Alikhani H, *et al.* The use of coal gangue as a cultivation bed conditioner in forage maize inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, **48**(11): 1266-1279.
- [23] Mtisi M, Gwenzi W. Evaluation of the phytotoxicity of coal ash on lettuce (*Lactuca sativa* L.) germination, growth and metal uptake[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **170**: 750-762.
- [24] Jablonska B, Kityk A V, Busch M, *et al.* The structural and surface properties of natural and modified coal gangue [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **190**: 80-90.
- [25] Li J Y, Wang J M. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **239**: 117946.
- [26] 侯沁文. 煤矸石淋滤液对柳叶空心菜幼苗生长的影响[J]. *长治学院学报*, 2015, **32**(5): 21-26.
- Hou Q W. Effects of coal gangue leaching filtrate to water spinach germination and seedling growth[J]. *Journal of Changzhi University*, 2015, **32**(5): 21-26.
- [27] Pompelli M F, Barata-Luís R, Vitorino H S, *et al.* Photosynthesis, photoprotection and antioxidant activity of purging nut under drought deficit and recovery[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, **34**(8): 1207-1215.
- [28] Yu C L, Deng Q, Jian S Y, *et al.* Effects of fly ash application on plant biomass and element accumulations: a meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **250**: 137-142.
- [29] Martins M N C, De Souza V V, Da Silva Souza T, *et al.* Genotoxic and mutagenic effects of sewage sludge on higher plants[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **124**: 489-496.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Chang, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-meng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xinxiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)