

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.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析 钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)

基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素 高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)

餐饮源有机颗粒物排放特征 李源逵, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)

华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM_{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析 陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)

艾比湖地区气溶胶光学特性分析 张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)

天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势 徐虹, 唐邈, 肖致美, 高璟贇, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)

郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析 李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)

长江三角洲 2010~2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单 朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)

北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性 许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)

广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子 高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)

泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析 李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)

有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)

西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析 樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)

超低排放高湿度气态颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试 胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)

厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征 王坚, 黄屋, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)

基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立 潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)

基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演 黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨根晖, 杜晓晨 (3591)

不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例 刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)

城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为 赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱弈, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)

上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析 许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)

过氧化钙 (CaO₂) 联合生物炭对河道底泥的修复 李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)

基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ - $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪 徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)

三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷 严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)

高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算 高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)

Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附 赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)

微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为 薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)

多孔填料特性对生物膜形成影响 江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)

硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS 李初, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)

单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮 方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)

间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)

基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性 张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)

基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策 刘晓雷, 李安婕 (3725)

零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响 刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)

基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能 戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝婷, 张瑞良, 何欣昱 (3740)

亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移 袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)

四环素胁迫对 *Shigella flexneri* 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程 高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)

羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择 乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)

高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响 侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)

微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用 宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)

三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率 罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)

臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响 方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)

改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响 邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)

有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N₂O 排放的影响 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)

原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素 葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)

羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力 黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)

滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响 蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)

棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响 刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)

不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)

螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响 覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)

种植业面源污染防治技术发展历程分析及趋势预测 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)

《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)

原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素

葛松¹, 孟宪荣², 许伟², 施维林^{1*}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州市环境科学研究所, 苏州 215007)

摘要: 探究了原位电阻热脱附技术加热土壤升温机制及影响因素。利用原位电阻热脱附小试设备, 研究了电流、加热方式、补水及负压对土壤升温 and 能耗的影响。结果表明, 土壤升温主要通过两种机制: 一是电能转化成热能, 通电对土壤直接加热使土壤温度升高, 该升温机制主要存在于两电极之间的土壤; 二是热传导, 电极之间土壤温度最高, 热量逐渐由高温土壤传导至低温土壤, 使电极连线周边土壤温度逐渐升高。加热电流大小, 影响土壤升温速度, 电流越大, 土壤升温越快, 单位能耗越低; 间歇加热方式与连续加热方式相比, 土壤升温速度慢, 达到相同温度所需时间长, 但单位能耗低, 仅是连续加热方式能耗的 45.2%; 加热过程中需不断向电极附近补充水分, 以维持较高电流的持续加热; 抽提负压大, 土壤热损失多, 单位能耗高, 抽提负压对抽提管附近土壤温度影响最明显。在实际工程中, 宜根据时间、成本和效果等选择合适的工艺条件, 以期提高原位电阻热脱附修复污染土壤的效率, 降低能耗, 缩短工期。

关键词: 原位热脱附; 电阻热; 土壤修复; 升温机制; 能耗; 影响因素

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3822-07 DOI: 10.13227/j.hjks.202001092

Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by *in-situ* Electrical Resistance Heating

GE Song¹, MENG Xian-rong², XU Wei², SHI Wei-lin^{1*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Suzhou Environmental Science Research Institute, Suzhou 215007, China)

Abstract: The mechanism and influencing factors of an *in-situ* thermal remediation using electrical resistance heating were investigated. The effects of electrical current, heating method, rehydration, and negative pressure on soil heating and energy consumption were studied using *in-situ* electrical resistance heating equipment. The results showed that there were two main mechanisms for soil heating. Firstly, electric energy was converted into heat energy, whereby direct heating of the soil by electricity increased the soil temperature. This mechanism mainly existed in the soil between two electrodes. The second was heat conduction, whereby the soil temperature between the electrodes was the highest, and the heat gradually transferred from the high-temperature soil to the low-temperature soil, such that the temperature of the soil far away from the electrode connection gradually increased. The heating current affected the rate of increase of the soil temperature. The higher the current was, the faster the soil temperature rate of increase was and the lower the unit energy consumption was. Compared with continuous heating, intermittent heating had a slower heating rate and required a longer time to reach the same temperature. However, the energy consumption per unit was low and only 45.2% of that of continuous heating. During the heating process, water should be continuously added to the soil around the electrode to maintain a high current and continuous heating. The negative pressure of extraction was large, the soil heat loss was large, and the unit energy consumption was high. In actual projects, appropriate technological conditions should be selected according to time, cost, and the removal rate as a means of improving the efficiency of the *in-situ* resistance thermal desorption remediation of contaminated soil, reducing energy consumption, and shortening the time limit.

Key words: *in-situ* thermal desorption; electrical resistance heating; soil remediation; heating mechanism; energy consumption; influencing factors

近年来,随着产业结构不断优化升级,导致大量化工企业搬迁或者关停,遗留下大量污染场地,场地开发流转受到限制,影响了城市发展,同时污染地块对周边居民及生态环境存在较大的安全隐患^[1,2]。自2016年土壤污染防治行动计划开展以来,社会各界对污染场地的修复日益重视。有机污染场地存在污染物埋藏较深、开挖易形成二次污染等特点^[3~5],宜采用土壤原位修复技术,其中原位热脱附修复技术以其灵活性强、操作简单和对土壤扰动小等优势受到广泛关注。

土壤热脱附修复技术是指通过给土壤直接或间

接加热,促使有机污染物挥发并收集去除的技术^[6,7]。热脱附技术分为原位热脱附和异位热脱附,常见的原位热脱附技术有热传导热脱附技术、蒸汽热脱附技术和电阻热脱附技术^[8~12]。其中,原位电阻热脱附技术是通过向土壤中插入电极,将土壤和

收稿日期: 2020-01-20; 修订日期: 2020-02-20

基金项目: 江苏省环保科研课题项目(2016061); 苏州民生科技项目(SS201727); 苏州市民生科技计划项目(SS201721, SS201724, SS201728, SS201727); 苏州市环保科技项目(B201702)

作者简介: 葛松(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染修复治理, E-mail: leaner_gs123@163.com

* 通信作者, E-mail: weilin-shi@163.com

地下水作为电阻, 连通高压电, 形成电流回路, 将电能转化成热能, 使土壤温度升高, 将污染物转化成气体^[13,14], 进而通过抽提将土壤污染物去除^[15,16]. 电阻原位热脱附技术, 相比于其他加热方法, 具有升温速度快, 施工方便、适用于各种复杂地质条件和对土壤扰动小等特点^[17]. 该方法可使土壤加热到 100 ~ 120℃, 对大部分易挥发性有机物 (VOCs) 去除效果良好^[18,19].

Heron 等^[20]通过实验室的 ERH 小试, 讨论了孔隙水沸腾是克服污染物传质过程的主要机制, 其实验中采用两相 230 V 电极最高 8A 的可变电极对 120 cm × 60 cm × 12 cm 的长方体土壤进行加热, 0 ~ 8 d 单独采用蒸汽抽提技术需要几年甚至几十年的 TCE 去除时间; 第 8 ~ 21 d 升温至 85℃, 80 ~ 90℃ 持续加热 28 d 的去除效率达到了 55% 并逐渐减缓; 第 39 ~ 45 d 升温至 100℃ 并维持 5 d 的去除速率达到最高. Han 等^[21]研究了 ERH 技术影响因素, 结果表明水分、盐度是土壤导电性能的主要影响因素, 高电流具有较高的加热效率, 能够使土壤达到更高的温度. Beyke 等^[22]阐述了用于美国肯塔基州的美国能源部帕度卡气体扩散工厂的中试 ERH, 装置包含 7 个 ERH 电极, 其最大深度在 30.48 m (100 英尺), 加热过程持续了 130 d, 去除效率在 98% 以上. Fu 等^[23]也在实验中阐明土壤温度与电流直接相关, 不同位置土壤温升取决于土壤特性.

目前, 国内外关于原位电阻热脱附修复技术研究类报道较少, 大多以应用实例介绍为主, 缺乏详细的过程及机制等基础性研究. 因此本实验拟开展原位电阻热脱附技术关键影响因素研究, 包括电流、加热方式和补水及负压等因素对土壤升温 and 能耗的影响, 探讨原位电阻加热过程中土壤升温机制, 以期原位电阻热脱附修复技术的实际应用提供技术支持.

表 1 供试土壤性质

Table 1 Properties of the test soil

项目	含水率/%	pH [m(水):m(土)=2:1]	有机质/%	颗粒组成(卡庆斯基土壤分类)/%		
				黏粒 (< 0.002 mm)	粉粒 (0.002 ~ 0.05 mm)	砂粒 (> 0.05 mm)
参数值	30	7.8	12	3.86	61.56	34.58

1.3 电极及温度传感器布设

原位电阻热脱附小试设备电极的设置如图 2 (a) 所示, 3 根电极 U、V 和 W 分别距罐体边缘约 5 cm 处, 呈等边三角形分布. 温度传感器 Tem1、Tem2 和 Tem3 设置在电极 V 和电极 W 连线中间及其两侧, 等间距布设, 间距为 5 cm, 具体如图 2(a) 俯视图所示. 温度传感器 Tem1、Tem2 和 Tem3 插入土壤深

1 材料与方法

1.1 实验设备

本研究主要实验设备为原位电阻热脱附小试设备, 包括在线监测系统、电极、温度传感器、抽提管、加热罐、补水箱、冷凝管和活性炭吸附等装置. 设备如图 1 所示. 原位电阻热脱附小试设备采用三相交流电, 电压为 380 V 可变电电压, 一次性可处理 100 kg 土壤.



图 1 原位电阻热脱附小试设备

Fig. 1 In-situ electrical resistance heating equipment

1.2 实验土壤制备

本实验供试土壤采自苏州某场地黏土, 土壤性质见表 1. 土壤采集后, 自然风干, 去除土壤中碎石及植物残体后粉碎过 8 目筛 (孔径 2 mm) 备用.

在原位电阻热脱附小试设备中加入 100 kg 备用土壤, 加入约 30 kg 自来水, 控制土壤含水率 30% 左右. 采取分批加入土壤和水的方法, 尽可能使固液混合均匀. 加盖密封老化 7 d 后, 等待土壤水分分散均匀后取样测定土壤含水率并启动原位电阻热脱附小试设备, 开始原位电阻热脱附土壤升温影响因素研究.

度分别为 30、30 和 40 cm, 具体如图 2(b) 正视图所示. 以 Tem3 作为控制温度, 当 Tem3 到达设定温度后, 电阻热脱附控制系统自动停止加热, 并将温度稳定在设定温度. 实验过程中, 定期记录 Tem1、Tem2 和 Tem3 温度, 并绘制土壤温度变化曲线.

1.4 实验设计

(1) 电流对土壤升温 and 能耗的影响 对两组相

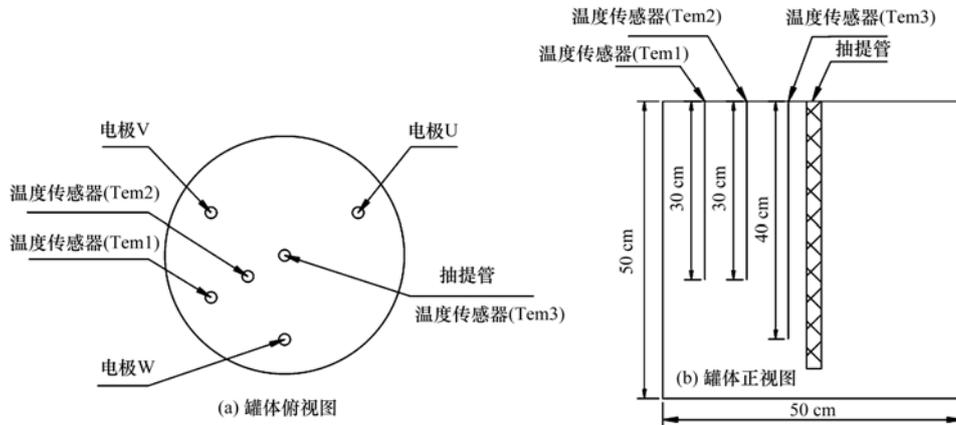


图2 温度传感器布设示意

Fig. 2 Site of the temperature sensor

同的土壤均通过连续加热、持续补水的方式加热,两组实验加热过程中电流分别为 6 A 和 10 A 左右,加热终温均设置为 75℃,负压均为 -1 kPa. 通过监测土壤温度变化,考察电流大小对土壤升温 and 能耗的影响.

(2) 加热方式对土壤升温 and 能耗的影响 对两组相同土壤分别进行连续加热和间歇加热,连续加热实验加热过程电流为 10 A; 间歇加热方式为加热 5 min → 停止 4 min → 补水 1 min. 土壤加热终温均设置为 85℃,负压均为 -1 kPa. 通过监测土壤温度变化,考察加热方式对土壤升温 and 能耗的影响.

(3) 补水对土壤升温 and 能耗的影响 设置土壤初始含水率分别为 30% 和 40%. 前者采用加热时间 5 min → 停止 4 min → 补水 1 min 的间歇加热方式,其中补水量控制在 10 kg 左右,以控制两组实验总水量相当. 后者采用加热时间 5 min → 停止 5 min 的间歇加热方式,土壤加热终温均设置为 85℃,负压均为 -1 kPa. 通过监测土壤温度变化,考察补水对土壤升温 and 能耗的影响.

(4) 负压对土壤升温 and 能耗的影响 对两组相同土壤,采取加热时间 5 min → 停止 4 min → 补水 1 min 间歇方式加热,土壤加热终温均设置为 85℃,负压分别设置为 -1 kPa 和 -3 kPa. 监测土壤温度变化,考察负压对土壤升温 and 能耗的影响.

2 结果与讨论

2.1 电流对土壤升温 and 能耗的影响

图 3 为不同电流条件下,土壤温度 Tem1、Tem2 和 Tem3 处的土壤温度变化曲线,图 4 为对应曲线的一阶导数曲线,从一阶导数曲线可以直观看出土壤升温速度的变化. 对比图 3 可以看出:①高电流和低电流条件下,土壤升温曲线经拟合后均较好地符合某一模型,拟合标准方差均在 0.99 以上,具有很

好的拟合度. ②高电流和低电流条件下,土壤温度均呈现 $Tem2 > Tem1$ 和 $Tem3$. 这是因为 Tem2 位于两个电极连线中间,两电极之间电流最大,产生的热量最多,而 Tem1 和 Tem3 位于两个电极连线两侧,电流减弱,获得的热量则减少. ③高电流条件下, Tem3 到达设定温度所需时间大约为 150 min,而低电流条件下, Tem3 到达设定温度所需时间约为 230 min,说明高电流条件下土壤温度到达设定温度所需时间较于低电流条件下短,这与 Heron 等^[20] 和 Han 等^[21] 的研究结果一致,即电流越高,土壤升温速率越快.

对比图 4 可以看出:①总体来讲,高电流和低电流条件下,土壤升温曲线一阶导数值均为 $Tem2 > Tem1$ 和 $Tem3$,说明 Tem2 土壤升温速度最快. ②原位电阻热脱附设备运行约 40 min 稳定后,高电流土壤升温曲线一阶导数数值均大于低电流土壤升温曲线一阶导数数值,说明 40 min 后,高电流加热土壤升温速度明显高于低电流加热. ③除高电流时 Tem1 升温曲线一阶导数逐渐升高外, Tem2 和 Tem3 处土壤升温曲线一阶导数在高电流和低电流条件下均呈

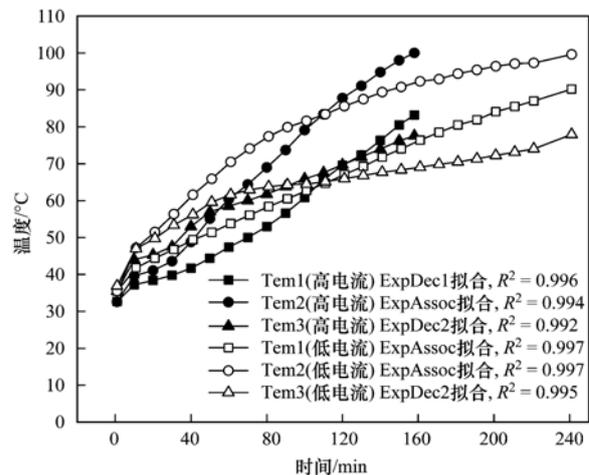


图3 不同电流时 Tem1、Tem2 和 Tem3 处土壤温度变化

Fig. 3 Soil temperature at Tem1, Tem2, and Tem3 variation with different electric currents

下降趋势,直至趋近于零.说明在高电流条件下的实验时间内(约 170 min),Tem1 升温速度逐渐加快,Tem2 和 Tem3 的升温速度逐渐减慢,直至几乎不再升高.这是因为,一方面随着土壤温度升高,土壤中水分不断蒸发,产生的蒸汽被抽提出去而带走大量的热量,导致 Tem2 和 Tem3 处土壤升温速度逐渐降低;另一方面,高电流时 Tem2 处土壤温度远远高于 Tem1 处土壤温度,随着大量蒸汽的产生,加速了热量在土壤中的传导,使得 Tem2 处温度快速传递至 Tem1 处,因此 Tem1 处温度持续快速升高,而 Tem2

处温度升高速度有所降低.

高电流和低电流加热条件下,所消耗的能量见表 2.高电流条件下,土壤温度升高 42.1℃ 用时 160 min,消耗电能 18.8 kW·h,单位能耗为 0.45 kW·h·℃⁻¹;低电流条件下,土壤升高 41℃ 用时 220 min,消耗电能 20 kW·h,单位能耗为 0.49 kW·h. 综上所述可知,高电流加热时,土壤升温速度快,到达设定温度所需时间短,单位能耗低.因此,在电阻原位热脱附修复土壤过程中,宜选用较高电流,以缩短加热时间,降低能耗.

表 2 不同电流下升温及能耗情况

Table 2 Heating and energy consumption of different currents

项目	Tem3 温差/℃	时长/min	能耗/kW·h	单位能耗/kW·h·℃ ⁻¹
高电流	42.1	160	18.80	0.45
低电流	41.0	220	20.00	0.49

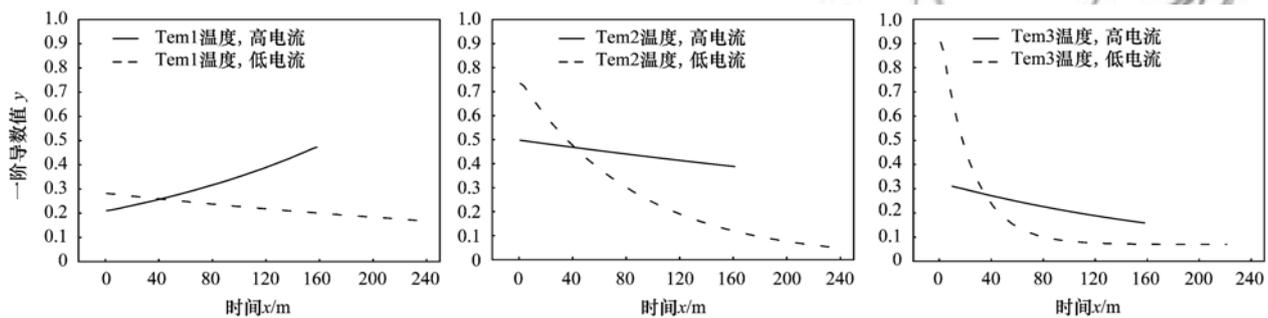


图 4 不同电流时 Tem1、Tem2 和 Tem3 处曲线一阶导数变化

Fig. 4 First derivative of the curve at Tem1, Tem2, and Tem3 variation with different currents

2.2 加热方式对土壤升温 and 能耗的影响

图 5 表示的是不同加热方式下温度与电流的变化情况.从中可知,连续加热实验土壤初始温度低于间歇加热实验,但加热 185 min 后,连续加热实验中 Tem1 和 Tem2 终温明显高于间歇加热实验.相较于连续加热,间歇加热方式条件下 Tem1 和 Tem2 升温速度均较低,这是因为间歇加热时,通电瞬间会产生高电流并持续衰减,同时产生大量热量,当停止通电时,土壤中不再有热量产生,土壤温度变化主要是通电瞬间产生的高热量在土壤中的热传导,而连续加热时,持续通电持续产生热量,因此温度升高较快.连续加热 Tem3 和间歇加热条件下 Tem3 升温曲线几乎平行,说明两者升温速度基本相同,这是因为 Tem3 位于抽提管附近,部分热量随着蒸汽的抽提而散失,连续加热时 Tem3 通过热传导获得的热量多,因抽提随蒸汽损失的热量也多,导致连续加热和间

歇加热条件下, Tem3 升温速度几乎一致.

表 3 为两种加热方式下能耗情况,从中可以看出,连续加热条件下土壤温度升高 42.1℃ 用时 160 min,而间歇加热条件下,土壤升高 38.5℃ 用时 185 min,说明连续加热方式温度升高快,用时短;连续加热方式单位能耗为 0.45 kW·h·℃⁻¹,间歇加热方式单位能耗仅为 0.22 kW·h·℃⁻¹,是连续加热方式能耗的 45.2%.因此,根据对比计算得出了间歇加热方式更节能,但是达到设定温度时间较长.如果工期时间放缓,可采用间歇加热方式,以降低能耗,节省成本;如果首先考虑缩短工期,需要短时间内完成修复,则宜采用高电流连续加热的方式.但是,实际工程项目,需考虑工期,成本,可操作性等各方面因素,根据实际情况及需求确定加热方案.本文的研究结果可以为实际工程加热方案的确定提供参考,但还不足以提出确切的最适宜的加热方案.

表 3 不同加热方式下升温及能耗情况

Table 3 Heating and energy consumption of different heating methods

项目	温差/℃	时长/min	能耗/kW·h	单位能耗/kW·h·℃ ⁻¹
连续加热	42.1	160	18.80	0.45
间歇加热	38.5	185	8.5	0.22

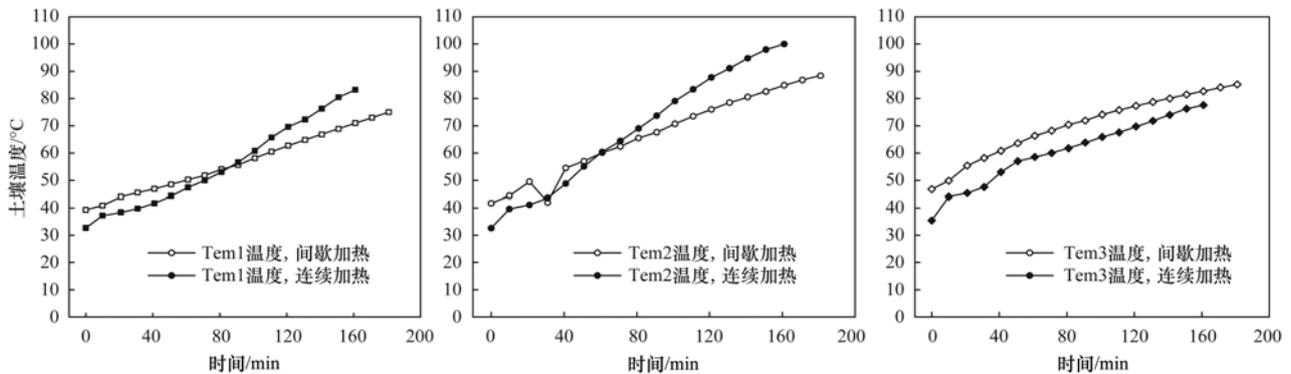


图 5 不同加热方式时土壤温度变化

Fig. 5 Soil temperature change of different heating methods

2.3 补水对土壤升温 and 能耗的影响

图 6 表示为加热过程中补水和不补水条件下, 土壤温度随时间的变化. 加热过程中不补水实验的初始含水率为 40%, Tem1、Tem2 和 Tem3 土壤温度升高均呈现先快后慢的趋势, 主要是因为加热过程中, 水分不断蒸发并被抽提出去, 土壤含水率逐渐降低, 导致土壤电阻增大, 电流减小, 产生的热量减少, 这与张辉^[24]对土壤电阻率的研究结果相一致.

与不补水实验相比, 补水实验的初始含水率为 30%, 加热过程中采用连续补水, 实验中土壤温度升高更快, 达到相同的温度所需时间更短. 这是因为加热过程中连续补水, 可使土壤含水率基本不变, 维持

较高加热电流, 持续产生热量, 因此温度升高较快. 但随着土壤温度的升高, 产生的蒸汽量会增加并因此而导致更多的热量散失, 因此温度升高减缓. 当加热时间较长时, 如果仍想维持较高的升温速度则需要适时调整补水量, 以维持更高电流, 产生更多热量, 弥补热量损失. 正如焦文涛等论述的需要对电极附近补充电解液进行辅助^[21,23,25].

表 4 显示了低含水率连续补水和高含水率不补水土土壤升温及能耗情况, 前者升温快, 用时短, 单位能耗没有明显差异. 需要说明的是, 本实验加热时间短, 随着加热时间延长, 土壤含水率会逐渐降低, 加热电流随之而降低. 因此, 长时间加热, 需要给土壤补充水分以维持加热.

表 4 不同初始含水率的升温及能耗情况

Table 4 Heat and energy consumption of different initial moisture contents

项目	温差/°C	时长/min	能耗/kW·h	单位能耗/kW·h·°C ⁻¹
补水	38.5	185	8.5	0.22
不补水	32.5	235	8.5	0.26

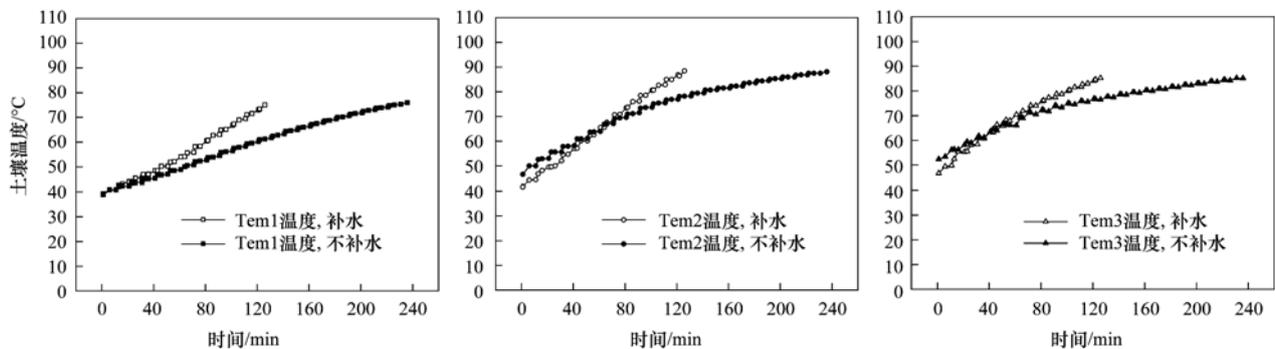


图 6 补水和不补水条件下土壤温度变化

Fig. 6 Soil temperature changes of different initial moisture contents

2.4 负压对土壤温度和能耗的影响

图 7 是不同负压条件下土壤温度变化情况. 从中可以看出, 高负压时 Tem2 温度略高于低负压时 Tem2 温度, 而两种条件下 Tem1 几乎相同, 高负压时的 Tem3 低于低负压时的 Tem3, 这主要是因为

Tem1 远离抽提管, 温度升高主要靠 Tem2 处土壤热传导, 温度变化受负压影响小, 而 Tem3 位于抽提管附近, 高负压导致蒸汽抽提量大, 热量散失多, 因此温度较低.

表 5 为不同负压条件下升温及能耗情况, 对比

发现,高负压条件下单位能耗高于低负压条件. 本实验限于实验设备抽提能力,负压调节范围有限,在实际工程中,负压越高,抽提能力越强,热量损失越多,

单位能耗越高,升温速度越慢,因此,在满足抽提需要的前提下,尽可能选择较低的抽提负压,以降低热量损失,降低能耗.

表 5 不同负压条件下升温及能耗情况

Table 5 Heat and energy consumption of different negative pressure conditions

项目	温差/°C	时长/min	能耗/kW·h	单位能耗/kW·h·°C ⁻¹
-1 kPa 间歇加热	38.3	185	8.5	0.22
-3 kPa 间歇加热	36.5	185	9.1	0.25

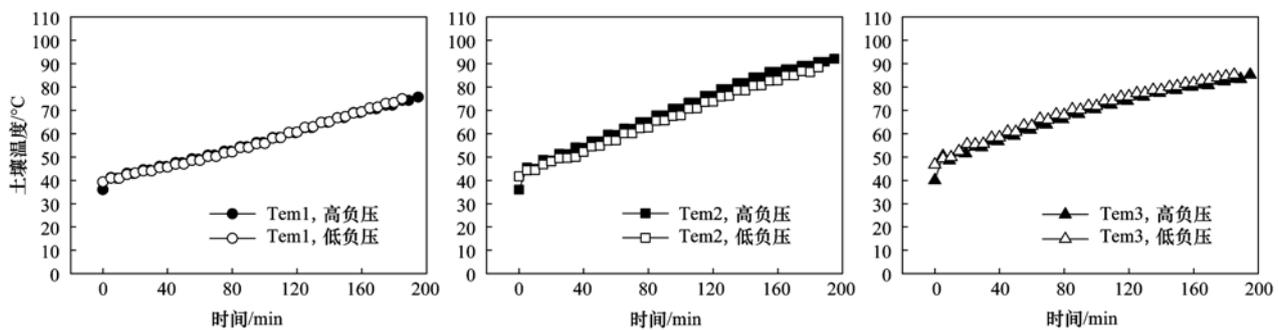


图 7 不同负压条件下土壤温度变化

Fig. 7 Soil temperature changes of different negative pressure conditions

3 结论

(1) 原位电阻加热过程中,土壤升温主要通过两种机制:一是电能转化成热能,通电对土壤直接加热使土壤温度升高,该升温机制主要存在于两电极之间的土壤;二是热传导,电极之间土壤温度升高最快,热量逐渐由高温土壤传导至低温土壤,使电极连线周边土壤温度逐渐升高.

(2) 与低电流加热方式相比,采用高电流加热,土壤温度升高更快,到达设定温度时间越短,且单位能耗更低.

(3) 间歇加热方式通电后短时间内会产生高电流,因而产生大量的热量.与连续加热相比,间歇加热时土壤升温速度慢,但能耗低,只有连续加热时能耗的 45.2%,实际工程应根据工期、成本等因素选择合适的加热方式.

(4) 随着加热时间增加,土壤含水率降低、电流减小、升温速度变缓,长时间加热过程中,需要给土壤补充水分以维持加热.

(5) 负压越高热量损失越多,土壤升温越慢,单位能耗越高.负压对抽提管附近土壤温度影响最大.因此,在实际工程中,在不影响污染物脱附效果的前提下,应尽量选择较小的抽提负压.

参考文献:

[1] 马妍,王盾,徐竹,等.北京市工业污染场地修复现状、问题及对策[J].环境工程,2017,35(10):120-124.
Ma Y, Wang D, Xu Z, et al. Current situation, problems and countermeasures of industrial contaminated sites remediation in Beijing[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(10): 120-

124.
[2] 程曦,胡雪芹,涂震江,等.老工业基地搬迁改造污染场地再开发利用修复规划案例研究[J].中国人口·资源与环境,2017,27(S2):54-57.
Cheng X, Hu X Q, Tu Z J, et al. Case study on remediation planning of contaminated sites for redevelopment of an old industrial area [J]. China Population Resources and Environment, 2017, 27(S2): 54-57.
[3] 赵玲,滕应,骆永明.我国有机氯农药场地污染现状与修复技术研究进展[J].土壤,2018,50(3):435-445.
Zhao L, Teng Y, Luo Y M. Status of organochlorine pesticide contaminated sites in china and advances in site remediation[J]. Soils, 2018, 50(3): 435-445.
[4] 徐鹏,封跃鹏,范洁,等.有机氯农药在我国典型地区土壤中的污染现状及其研究进展[J].农药,2014,53(3):164-166,173.
Xu P, Feng Y P, Fan J, et al. Organochlorine pesticides pollution in soils of typical areas in China: recent advances and future prospects[J]. Agrochemicals, 2014, 53(3): 164-166, 173.
[5] 刘惠,陈奕.有机污染土壤修复技术及案例研究[J].环境工程,2015,33(S1):920-923.
Liu H, Chen Y. Organic contaminated soil treatment technologies and remediation practices [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(S1): 920-923.
[6] Zhao C, Dong Y, Feng Y P, et al. Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review[J]. Chemosphere, 2019, 221: 841-855.
[7] 张学良,廖朋辉,李群,等.复杂有机物污染地块原位热脱附修复技术的研究[J].土壤通报,2018,49(4):993-1000.
Zhang X L, Liao P Y, Li Q, et al. Remediation of complex organic compounds in contaminated plot with in-situ thermal desorption[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(4): 993-1000.
[8] 蒋村,孟宪荣,施维林,等.氯苯污染土壤低温原位热脱附修复[J].环境工程学报,2019,13(7):1720-1726.

- Jiang C, Meng X R, Shi W L, *et al.* In-situ low temperature thermal desorption for remediation of the chlorobenzene contaminated soil [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, **13**(7): 1720-1726.
- [9] 王琰, 李扬, 黄启飞, 等. 温度和停留时间对 DDT 污染土壤热脱附效果的影响[J]. *环境工程*, 2012, **30**(1): 116-120.
Wang Y, Li Y, Huang Q F, *et al.* Effect of temperature and residue time on treatment of DDTs contaminated soil by thermal desorption technology[J]. *Environmental Engineering*, 2012, **30**(1): 116-120.
- [10] 张学良, 李群, 周艳, 等. 某退役溶剂厂有机物污染场地燃气热脱附原位修复效果试验[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(7): 2868-2875.
Zhang X L, Li Q, Zhou Y, *et al.* In-Situ remediation of organics-contaminated site by gas thermal desorption at a retired solvent plant[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(7): 2868-2875.
- [11] 王锦淮. 原位热脱附技术在某有机污染场地修复中试应用[J]. *化学世界*, 2018, **59**(3): 182-186.
Wang J H. Application of in-situ thermal desorption technology for remediation of an organic contaminated site[J]. *Chemical World*, 2018, **59**(3): 182-186.
- [12] 迟克宇, 李传维, 籍龙杰, 等. 原位电热脱附技术在某有机污染场地修复中的应用效果[J]. *环境工程学报*, 2019, **13**(9): 2049-2059.
Chi K Y, Li C W, Ji L J, *et al.* Application effect of in-situ electric thermal desorption technology used in remediation at an organics-contaminated site[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, **13**(9): 2049-2059.
- [13] Martin E J, Mumford K G, Kueper B H, *et al.* Gas formation in sand and clay during electrical resistance heating [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, **110**: 855-862.
- [14] Munholland J L, Mumford K G, Kueper B H. Factors affecting gas migration and contaminant redistribution in heterogeneous porous media subject to electrical resistance heating[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2016, **184**: 14-24.
- [15] 刘伟, 汪华安, 尚浩冉, 等. 有机污染场地原位电热法热脱附修复技术综述[A]. 见:《环境工程》2018 年全国学术年会论文集(下册)[C]. 北京:《工业建筑》杂志社, 2018. 746-750.
- [16] Oberle D, Crownover E, Kluger M, *et al.* In situ remediation of 1,4-dioxane using electrical resistance heating[J]. *Remediation Journal*, 2015, **25**(2): 35-42.
- [17] Friis A K, Heron G, Albrechtsen H J, *et al.* Anaerobic dechlorination and redox activities after full-scale electrical resistance heating (ERH) of a TCE-contaminated aquifer[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006, **88**(3-4): 219-234.
- [18] 缪周伟, 吕树光, 邱兆富, 等. 原位热处理技术修复重质非水相液体污染场地研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2012, **34**(8): 63-68.
Miao Z W, Lv S G, Qiu Z F, *et al.* Progress of in situ thermal treatment technologies for DNAPLs contaminated site remediation [J]. *Environmental Pollution And Control*, 2012, **34**(8): 63-68.
- [19] 刘惠. 污染土壤热脱附技术的应用与发展趋势[J]. *环境与可持续发展*, 2019, **44**(4): 144-148.
Liu H. Application and development trend of thermal desorption technology for contaminated soil [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2019, **44**(4): 144-148.
- [20] Heron G, Van Zutphen M, Christensen T H, *et al.* Soil Heating for enhanced remediation of chlorinated solvents: a laboratory study on resistive heating and vapor extraction in a silty, low-permeable soil contaminated with trichloroethylene [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(10): 1474-1481.
- [21] Han Z Y, Jiao W T, Tian Y, *et al.* Lab-scale removal of PAHs in contaminated soil using electrical resistance heating: Removal efficiency and alteration of soil properties [J]. *Chemosphere*, 2020, **239**: 124496.
- [22] Beyke G, Fleming D. In situ thermal remediation of DNAPL and LNAPL using electrical resistance heating [J]. *Remediation Journal*, 2005, **15**(3): 5-22.
- [23] Fu R B, Wen D D, Xia X Q, *et al.* Electrokinetic remediation of chromium (Cr)-contaminated soil with citric acid (CA) and polyaspartic acid (PASP) as electrolytes [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **316**: 601-608.
- [24] 张辉, 陈太聪. NAPLs 污染土壤电阻率影响因素研究[J]. *工业安全与环保*, 2017, **43**(2): 5-10.
Zhang H, Chen T C. Reserach of the effects of soil contaminated by napls on resistivity [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2017, **43**(2): 5-10.
- [25] 焦文涛, 韩白玉, 吕正勇, 等. 土壤电阻加热技术原位修复有机污染土壤的关键问题与展望[J]. *环境工程学报*, 2019, **13**(9): 2027-2036.
Jiao W T, Han Z Y, Lv Z Y, *et al.* Key issue and expectation of soil electrical resistance heating remediation technology [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, **13**(9): 2027-2036.

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)