

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按	(403)
我国化学品的风险评价及风险管理	王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 (404)
土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用	吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)
中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素	黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)
关中地区冬季PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析	田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)
利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分	刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)
南京夏季市区VOCs特征及O ₃ 生成潜势的相关性分析	杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)
北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系	孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)
重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究	段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)
三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征	张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)
长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析	谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)
青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程	孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)
西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估	郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)
坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价	余成,陈爽,张路 (499)
近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征	沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)
舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征	郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)
模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究	李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)
中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究	王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)
江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献	韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)
巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征	奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)
合肥城郊典型农田溪流系统沉积物磷形态及释放风险分析	裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)
桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征	朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)
苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态	李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)
洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析	李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)
三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响	江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)
pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响	王辉,孙波,关小红 (588)
EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响	周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)
镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能	王婷,朱春山,胡承志 (602)
微生物对砷的氧化还原竞争	杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)
处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征	曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)
污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应	景明,王磊 (622)
异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析	邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 (630)
基于新一代测序技术的A ² O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析	田美,刘汉湖,申欣 (638)
1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性	孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)
纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究	舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)
3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性	徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)
合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究	范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)
芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性	吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)
芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能	张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)
季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响	林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)
增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响	陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)
基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征	王幼奇,白一茹,王建军 (710)
不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制	朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)
紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素	王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)
几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)
河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征	吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 (740)
湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响	罗鹏程,李航,王曙光 (750)
溴酸盐对水生生物的急性毒性效应	王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)
自组装哑铃状Fe ₃ O ₄ 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解	黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)
盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N ₂ O产生的影响	李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)
污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价:以指标权重评分法为例	丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)
《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)	

污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价：以指标权重评分法为例

丁文杰¹, 陈文和², 邓明佳², 罗辉², 李琳^{1*}, 刘俊新¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 广州越堡水泥有限公司, 广州 510800)

摘要: 利用水泥窑协同处置污泥可同时实现污泥的无害化、减量化和资源化。水泥回转窑处置污泥时须先对污泥进行干化使其含水率达到要求。污泥受热干化时会释放恶臭物质, 易引发恶臭污染, 对周围环境和居民生活造成影响。以污泥直接干化产生的尾气为对象, 基于目前国内外恶臭污染相关规定, 综合考虑污泥直接干化产生的尾气中物质浓度、嗅阈值、阈限值、气味安全级别以及饱和蒸气压, 通过指标权重评分方法筛选出污泥直接干化产生尾气中的主要恶臭污染物。以恶臭污染潜力为评价目标, 风险指标和臭气排放强度为评价指标, 通过韦伯-费希纳定律构建污泥直接干化产生尾气的恶臭污染潜力分级评价模型, 形成适合污泥直接干化产生尾气的恶臭污染潜力分级评价方法。

关键词: 污泥直接干化; 干化尾气; 恶臭污染潜力; 指标权重; 韦伯-费希纳定律

中图分类号: X512 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0782-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.050

Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method

DING Wen-jie¹, CHEN Wen-he², DENG Ming-jia², LUO Hui², LI Lin^{1*}, LIU Jun-xin¹

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Guangzhou Heidelberg Yuexiu Cement Co., Ltd., Guangzhou 510800, China)

Abstract: Co-processing of sewage sludge using the cement kiln can realize sludge harmless treatment, quantity reduction, stabilization and reutilization. The moisture content should be reduced to below 30% to meet the requirement of combustion. Thermal drying is an effective way for sludge desiccation. Odors and volatile organic compounds are generated and released during the sludge drying process, which could lead to odor pollution. The main odor pollutants were selected by the multi-index integrated assessment method. The concentration, olfactory threshold, threshold limit value, smell security level and saturated vapor pressure were considered as indexes based on the related regulations in China and foreign countries. Taking the pollution potential as the evaluation target, and the risk index and odor emission intensity as evaluation indexes, the odor pollution potential rated evaluation model of the pollutants was built according to the Weber-Fechner law. The aim of the present study is to form the rating evaluation method of odor potential pollution capacity suitable for the directly drying process of sludge.

Key words: directly drying of sludge; odor; pollution potential; integrated assessment; Weber-Fischna law

预计到 2015 年年底,我国污水处理厂总数将突破 4 000 座,剩余污泥总量将突破 3 500 万 t^[1]。污泥的处理处置成为亟待解决的问题。利用水泥窑协同处理污水厂污泥可实现污泥处置的无害化、减量化和资源化^[2]。但是,在焚烧处置前,须对污泥进行干化使污泥的含水率达到焚烧要求。在污泥干化过程中,会释放出大量的挥发性有机物、硫化物、胺类等物质,易引发恶臭污染^[3~5]。恶臭污染评价体系的建立有助于制定合理的治理措施,控制恶臭污染。以往的恶臭污染评价方法主要以臭气浓度、臭气强度、恶臭物质浓度的测定为基础,测定方法包括嗅觉测定法及仪器测定法^[6~9]。臭气强度的测定主观性大且重复性差^[10],基于臭气强度的评价手段不能全面反映恶臭污染特征;污泥干化产生尾气中污染

物种类复杂,臭气浓度不能直接反映恶臭物质的危害性。另外,污泥干化产生尾气的恶臭污染评价目前还没有相关研究报道。本研究以某水泥厂利用窑尾气直接干化污泥产生的尾气为对象,通过测定尾气中物质的成分和浓度,采用指标权重评分筛选出尾气中的主要恶臭污染物。根据主要恶臭污染物构建污泥直接干化产生尾气的恶臭污染潜力分级评价指标体系,基于韦伯-费希纳定律对污泥直接干化产生尾气的恶臭污染潜力进行分级评价,形成针对污

收稿日期: 2015-05-27; 修订日期: 2015-09-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2010ZX07319-001-03)

作者简介: 丁文杰(1985~),男,博士研究生,主要研究方向为恶臭及 VOCs 气体净化机制与技术研究及应用, E-mail: dingwenjie2005@126.com

* 通讯联系人, E-mail: leel@rcees.ac.cn

泥直接干化产生尾气的恶臭污染潜力分级评价方法,以期为水泥窑协同处置污泥过程中产生臭气的污染防控工作提供技术支持。

1 恶臭污染潜力分级评价方法构建

基于污泥直接干化过程中恶臭气体排放特征的现场调研,通过指标权重评分方法筛选出主要的恶臭污染物。考虑污泥直接干化过程中臭气的排放强度以及恶臭污染物的风险指标构建臭气污染潜力评价指标体系,对筛选的恶臭污染物的污染潜力评价指标进行分级。采用韦伯-费希纳定律对污泥直接干化过程产生臭气的恶臭污染潜力进行分级计算,得出恶臭污染潜力等级划分(图1)。其中,目标层为污泥直接干化过程产生臭气的恶臭污染潜力,通过模型计算得到;指标层包括恶臭污染物的风险指标和臭气排放强度。风险指标由恶臭物质的浓度、嗅阈值、阈限值、恶臭强度以及其毒理效应等因素综合计算确定。臭气排放速率和浓度确定臭气排放强度(图2)。

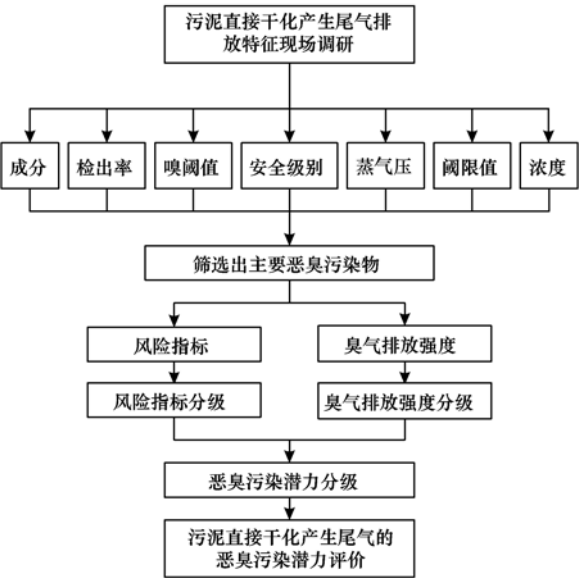


图1 污泥直接干化过程产生臭气的恶臭污染潜力评价流程示意

Fig. 1 Flow chart of potential pollution capacity evaluation for odor gas released from directly drying process of sludge

1.1 主要恶臭污染物的筛选

1.1.1 筛选原则

针对窑尾气直接干化污泥过程产生污染物质的特殊性和复杂性,注重恶臭污染物对环境的影响和健康效应,以及经济技术可行性,同时参考国内外现有的经验和资料^[11-13],确定以下筛选原则。

(1)已有排放控制标准的恶臭物质优先考虑。

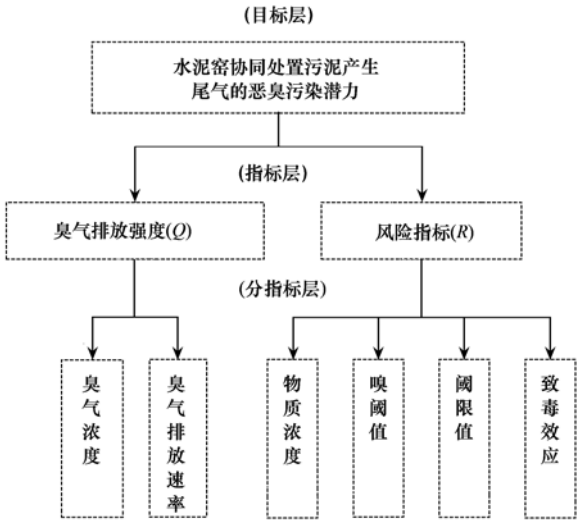


图2 污泥直接干化过程产生臭气的恶臭污染潜力分级评价指标体系

Fig. 2 Index system of potential pollution capacity evaluation for odor gas released from directly drying process of sludge

我国《恶臭污染物控制标准》(GB 14554-93)^[14]中规定了硫化氢、氨、甲硫醚、甲硫醇、苯乙烯、二硫化碳、二甲二硫、三甲胺等8种典型恶臭污染物的排放限值。

(2)污泥直接干化过程中排放浓度高,排放量大,的气态污染物。

(3)环境影响突出、毒性较大的物质。

(4)参照国外的污泥干化或水泥窑协同处置污泥过程中恶臭物质控制的相关标准和规定。

(5)国内已具备一定的基础条件,可以监测的恶臭物质。

1.1.2 指标确定

参照筛选原则,确定筛选参数指标为物质浓度、嗅阈值、检出率、蒸气压及气味安全级别。

物质浓度:指的是恶臭污染物的质量浓度或体积分数,单位为 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 或 $\times 10^{-6}$ 。

嗅阈值:人的感觉器官能够嗅觉到的最低嗅觉浓度。某种物质的嗅阈值越低,表明其越能被人的嗅觉器官感受到,越能引起不愉快感。

检出率:在环境污染状况的调查中,某种恶臭物质在所调查的污染源中出现的次数与总调查次数的比值。物质检出率越高,其在污染源中存在的可能性越大,影响面也越广。

蒸气压:判断污染物进入环境空气中的可能性及环境迁移的重要参数,蒸气压越大,污染物挥发进入空气中的可能性越大,对环境的影响越大。蒸气压的计算根据安托万方程:

$$\lg P = \left(A - \frac{B}{t + C} \right) \times 133.322 \quad (1)$$

式中, P : 蒸气压(Pa); t : 温度(℃); A 、 B 和 C : 相关参数, 参照文献[15]给出的值。

气味安全级别是衡量物质气味对人体影响程度的指标。参照已有的计算方法和划分标准^[16], 将阈限值(TLV)与嗅阈值的比值作为气味安全倍数, 根据气味安全倍数划分气味安全级别。阈限值是美国政府工业卫生专家会议(ACGIH)制订的车间空气中有害物质的容许浓度^[17,18]。即每周 40 h(每天 8 h, 5 d)工作时间内所接触的有害物质的时间加权

平均浓度限制。在阈限值表中规定有 3 种限值, 即时间加权平均浓度(TWA)、短时间接触阈限值(TLV-STE)以及阈限值上限(TLV-C)。本研究采用时间加权平均浓度(TWA)。

1.1.3 指标分级评分

将筛选的指标进行相应分级, 给出各个级的评分。其中, 物质浓度、嗅阈值、检出率和蒸气压均分为 10 级, 采用 10 分制。按照 Ammore 和 Hautala 提出的划分标准, 气味安全级别分为 5 个等级, 为统一各参数的评分标准, 气味安全级别也采用 10 分值, 即每级 2 分, 分值如表 1 所示。

表 1 主要恶臭污染物筛选指标评分

Table 1 Index rating of the main odor pollutants

质量浓度/mg·m ⁻³	评分	嗅阈值 × 10 ⁻⁶	评分	检出率/%	评分	蒸气压 × 133.322/Pa	评分	安全倍数	评分
> 10	10	10 ⁻⁶	10	100	10	> 1000	10	> 1 000	10
1 ~ 10	9	10 ⁻⁵	9	90 ~ 100	9	800 ~ 1 000	9	50 ~ 1 000	8
0.1 ~ 1	8	10 ⁻⁴	8	80 ~ 90	8	600 ~ 800	8	5 ~ 50	6
0.05 ~ 0.1	7	10 ⁻³	7	70 ~ 80	7	400 ~ 600	7	0.5 ~ 5	4
0.01 ~ 0.05	6	10 ⁻²	6	60 ~ 70	6	200 ~ 400	6	< 0.5	2
5 × 10 ⁻³ ~ 0.01	5	0.1 ~ 0.5	5	50 ~ 60	5	100 ~ 200	5		
2 × 10 ⁻³ ~ 5 × 10 ⁻³	4	0.5 ~ 1	4	40 ~ 50	4	50 ~ 100	4		
1 × 10 ⁻³ ~ 2 × 10 ⁻³	3	1 ~ 10	3	30 ~ 40	3	10 ~ 50	3		
5 × 10 ⁻⁴ ~ 1 × 10 ⁻³	2	10 ~ 100	2	10 ~ 30	2	1 ~ 10	2		
< 5 × 10 ⁻⁴	1	> 100	1	< 10	1	< 1	1		

1.1.4 综合分值计算

综合分值根据各指标的评分及其权重系数 W_i

计算式(2), 且权重系数 W_i 满足 $\sum_{i=1}^5 W_i = 1$ 。

$$S_{cj} = I_{1j}W_1 + I_{2j}W_2 + I_{3j}W_3 + I_{4j}W_4 + I_{5j}W_5 \quad (2)$$

式中, S_{cj} : 第 j 种物质的综合评分; I_{1j} : 第 j 种物质浓度指标的评分; W_1 : 其权重系数, $W_1 = 0.225$; I_{2j} : 第 j 种物质的嗅阈值指标评分; W_2 : 嗅阈值权重系数, $W_2 = 0.225$; I_{3j} : 第 j 种物质的检出频率指标评分; W_3 : 检出频率权重系数, $W_3 = 0.1$; I_{4j} : 第 j 种物质的气体安全级别指标评分; W_4 : 气体安全级别权重系数, $W_4 = 0.225$; I_{5j} : 第 j 种物质饱和蒸气压指标评分; W_5 : 饱和蒸气压权重系数, $W_5 = 0.225$ 。

某物质的综合分值越高, 其对环境的危害越大。综合评分高于平均分的物质即为优先控制的污染物。

1.2 恶臭污染潜力评价方法选择

韦伯-费希纳定律(Weber-Fischna, W-F)是定量描述人类感觉强度与外界环境刺激强度关系的心理物理学公式, 可以确定各种感觉阈限和测量刺激的物理量和心理学的关系。W-F 能确切地表达人体产生的反应量与客观环境刺激量之间的函数关系。用

函数关系表示 W-F 定律即为:

$$I = k \lg C \quad (3)$$

式中, C : 刺激量; I : 人的感觉量; k : 韦伯常数。

近年来, 在环境领域中, W-F 作为一种指导思想和方法被引入了环境评价中^[19~22]。

该模型基于以下的假设: ① 将 W-F 定律中外界环境刺激量 C 视为区域生态环境中某评价指标的量; ② 将 W-F 定律中人体对刺激量产生的反应量 I 视为该指标对人体的危害程度; ③ k 由该指标的性质所决定的, 视为各项指标的权重。

臭味是由气体中物质对嗅觉的刺激而被感知, 因此, 本评价方法引用 W-F 定律, 构建污泥干化尾气的恶臭污染潜力计算模型。

2 污泥干化尾气恶臭污染潜力评价

2.1 风险指标计算及其等级划分

2.1.1 风险指标计算

风险指标可衡量气体成分对人体和周围环境的危害程度。某种物质的风险指标计算如下式:

$$R_i = \alpha_i T_i \quad (4)$$

式中, T_i 表示阈限值的无量纲化数值, T_i 的计算如下:

$$T_i = \frac{t_i}{c_{0i}}$$

(5)

式中, t_i : i 恶臭污染物的阈限值 ($\times 10^{-6}$); c_{0i} : i 物质的嗅阈值浓度 ($\times 10^{-6}$).

α_i 是 i 物质的综合权重, 由该物质的主观权重 β 和客观权重 λ 共同决定. i 物质的主观权重 β 指的是物质的致毒效应, 参照文献 [23], 对恶臭污染物的主观权重进行确定: 高浓度引发死亡的主观权重系数为 0.5, 高浓度引发麻痹、器官病变或功能障碍为 0.3, 高浓度引发皮炎或不适为 0.2.

物质的客观权重 λ 由该物质的嗅阈值稀释倍数决定, 嗅阈值稀释倍数的计算如下式:

$$F_i = \frac{C_i}{C_{0i}}$$

(6)

式中, F_i : 嗅阈值稀释倍数; C_i : 恶臭物质检出质量浓度; C_{0i} : 恶臭物质的嗅阈值. 将所有在恶臭污染源中检出的恶臭污染物的嗅阈值稀释倍数归一化, 计算各物质的恶臭客观权重:

$$\lambda_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i}$$

(7)

式中, λ_i : i 恶臭污染物的恶臭客观权重, F_i : i 恶臭污染物的嗅阈值稀释倍数.

i 物质的综合权重充分考虑了该物质的致毒效应、检出浓度以及嗅阈值, 能客观评价某种物质在检出物质中的污染严重性, 物质的综合权重通过下式计算:

$$\alpha_i = \frac{\beta_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \beta_i \lambda_i}$$

(8)

式中, α_i : i 物质的综合权重; β_i : i 物质的主观权重; λ_i : i 物质的客观权重, 由式 (5) 和 (6) 计算得出. 主要恶臭污染物的风险指标通过式 (9) 计算:

$$R = \sum_{i=1}^m \alpha_i T_i \quad (m \text{ 种污染物})$$

(9)

2.1.2 风险指标等级划分

本评价方法中, 将风险指标划分为 5 级, 每个等级的等级阈值按式 (10) 计算:

$$R_k = \sum_{j=1}^m w_j y_{jk}$$

(10)

$$(j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, 3, 4, 5)$$

式中, R_k : 风险指标的等级阈值, 共 5 级; y_{jk} : 第 j 项污染物的 k 级标准值无量纲化, 其值为 j 项污染物 k 级标准值 ($\times 10^{-6}$) 与 j 项污染物的嗅阈值 ($\times 10^{-6}$) 的商. 污染物的 k 级标准值无量纲化值参见表 2 中

恶臭强度和污染物浓度关系. 该关系是根据日本的《恶臭防止法》和《恶臭污染评估技术及环境基准》中的相关恶臭污染物浓度与强度对应关系计算得到^[23,24].

表 2 某些污染物的等级阈值无量纲化值

Table 2 Dimensionless threshold values for levels of some contaminants

物质	划分等级				
	1	2	3	4	5
硫化氢	1.22	13.66	153.66	1 756.10	19 756.10
二氧化硫	0.25	4.17	41.67	166.67	833.33
二甲苯	7.56	29.51	113.41	439.02	1 707.32
甲苯	2.79	14.45	74.88	387.82	2 008.70
氨	0.10	0.39	1.57	6.22	24.73
二硫化碳	1.00	2.95	8.76	25.90	76.62

2.2 臭气排放强度计算及其等级划分

臭气排放强度表示单位时间内臭气的排放量和臭气浓度的乘积, 臭气排放强度计算公式为:

$$Q_T = O \times Q$$

(11)

式中, Q_T : 臭气排放强度 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); O : 臭气浓度, 表示臭气的稀释倍数, 无量纲; Q : 气体排放量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). 参照《恶臭污染评估技术及环境基准》划分臭气排放强度等级^[23]. 为了统一标准, 划分为 5 个等级 (表 3).

表 3 臭气排放强度标准等级划分

Table 3 Rating of odor gas emission intensity

标准分级	阈值/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	污染范围/km
5	1×10^{13}	> 10
4	5×10^{11}	4 ~ 9
3	1×10^9	2 ~ 4
2	2×10^5	1 ~ 2
1	3×10^3	无污染

2.3 臭气的恶臭污染潜力计算及等级划分

2.3.1 指标值标准化

根据式 (12), 对各项指标进行标准化处理.

$$S_i = \frac{M_i}{S_{i1}}$$

(12)

式中, S_i : 第 i 个评估指标的标准化值; M_i : i 项评估指标 (风险指标或臭气排放强度) 的数值; S_{i1} : i 评估指标无环境污染时的标准阈值, 本研究定为 1 级标准阈值.

2.3.2 恶臭污染潜力评价指标权重计算

风险指标和臭气排放强度对恶臭污染潜力的影响不同, 在进行评价计算前需确定指标层的权重, 权重值越大, 相应指标对恶臭污染潜力的贡献越大. 本方法中, 通过贡献率法来确定风险指标和臭气排放强度的权重系数:

$$\varphi_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^m S_i} \quad (13)$$

式中, S_i : i 指标的标准化值, 其计算式为(12)所示; m 表示指标个数. 计算得到指标层的权重向量为:

$$W = \{\varphi_1, \varphi_2\} \quad (14)$$

式中, φ_1 : 风险指标的权重系数; φ_2 : 臭气排放强度的权重系数. 为了便于利用韦伯-费希纳定律进行计算, 指标层的权重采用向量表示.

2.3.3 指标层恶臭污染潜力计算及等级划分

在本研究中, 基于韦伯-费希纳定律构建恶臭污染潜力评价模型. 目标层恶臭污染潜力的计算由恶臭气体的风险指标和臭气排放强度确定, 各项指标的恶臭污染潜力计算式如下:

$$p_i = \varphi_i \times \lg(S_i + 1) \quad (i = 1, 2) \quad (15)$$

式中, p_i : i 指标的恶臭污染潜力; φ_i : i 指标的权重系数, 计算见式(13); S_i : i 指标的标准化值, 标准化值计算见式(12), 引入 $S_i + 1$ 是为了避免出现负值的复杂情况, 对比较结果不会产生影响.

基于以下假设: ① 将 W-F 定律中外界环境刺激量 S_i 视为污泥干化过程中产生恶臭气体的某一评价指标的标准化值; ② 将 W-F 定律中人体对刺激量产生的反应量 p_i 视为该指标对人体的危害程度, 在本研究中, 指臭气的恶臭污染潜力; ③ φ_i 是由该指标的性质所决定的, 在本研究中, 为各项指标的权重.

对各指标的恶臭污染潜力进行分级, 通过下式得到各指标的污染潜力等级阈值:

$$p_{ik} = \varphi_i \times \lg(S_{ik} + 1) \quad (i = 1, 2; k = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (16)$$

式中, p_{ik} : i 指标第 k 级的恶臭污染潜力; φ_i : i 指标的权重系数; S_{ik} : i 指标第 k 级的标准化值.

2.3.4 目标层臭气污染潜力计算及等级划分

通过式(14)得到各指标的恶臭污染潜力, 根据指标的污染潜力值, 通过式(17)计算污泥直接干化产生尾气的恶臭污染潜力:

$$P = \sum_{i=1}^2 p_i \quad (i = 1, 2) \quad (17)$$

式中, P : 水泥窑协同处置污泥产生臭气的恶臭污染潜力; p_i : i 指标的恶臭污染潜力, 在城市污泥直接干化过程中臭气产生评价中, 包含风险指标和臭气排放强度两个指标, 故 $i = 1, 2$.

根据主要恶臭污染物的风险指标和臭气排放强度计算出臭气的恶臭污染潜力后, 需对其级别进行

确定. 污泥直接干化过程产生臭气的恶臭污染潜力分为 5 级, 分别为: I 级表示无污染, II 级表示轻污染, III 级表示污染, IV 级表示明显污染, V 级表示严重污染. 各等级的阈值由下式确定:

$$P_k = \sum_{i=1}^2 p_{ik} \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (18)$$

式中, P_k : 目标层 k 等级恶臭污染潜力值; p_{ik} : i 指标 k 等级的恶臭污染潜力. 计算出的污染潜力等级阈值, 根据某一污染源的恶臭物质的恶臭污染潜力值即可判断其恶臭污染潜力等级, 根据臭气排放强度可知道相应的污染影响范围(表 4).

3 污泥直接干化过程产生臭气的恶臭污染潜力分级评价案例

3.1 污泥直接干化产生臭气监测分析

以某水泥厂利用窑尾气直接干化污泥产生的干化尾气为对象, 进行污泥直接干化产生尾气的恶臭污染潜力分级评价. 干化尾气的主要成分及浓度参照以往的监测和分析结果^[25]. 在污泥直接干化产生的尾气中, 硫化氢、甲硫醚、二甲二硫这 3 种恶臭物质因低于检出限而未检出. 甲硫醇和二硫化碳用专用检知管能检出, 但由于浓度极低, 不能定量. 这 5 种物质属于《中华人民共和国恶臭污染物排放标准》(GB 14554-93) 中规定的典型恶臭物质, 因此, 在本评价方法中, 这 5 种物质的浓度采用的是检测限的浓度.

3.2 水泥窑协同处置污泥主要恶臭污染物筛选

按照上述的计算方法, 得到干化尾气中各物质的综合评分如表 4 所示. 其中, 二氧化硫的综合分值最高. 综合分值的平均分为 4.44, 超过平均分的物质有 8 种, 分别是二氧化硫、间二甲苯、甲苯、氨、乙苯、萘、苯乙烯、苯(表 4). 二硫化碳评分为 4.33, 接近平均值, 由于其嗅阈值低(嗅阈值: 0.21×10^{-6}), 气味刺激性大, 易被人感知, 产生的恶臭影响较大. 尽管其浓度低, 在确定主要恶臭污染物时将

表 4 污泥直接干化过程中产生的恶臭污染物综合分值

Table 4 Comprehensive scores of the pollutants released in the directly drying process of sludge directly drying

物质	综合 分值	物质	综合 分值	物质	综合 分值
二氧化硫	7.08	苯乙烯	4.88	氯仿	3.48
间二甲苯	6.55	苯	4.83	1,2-二氯乙烷	3.25
甲苯	6.40	二硫化碳	4.33	1,4-二氯苯	3.13
氨	6.00	1,2,4-三甲苯	4.03	正丙苯	3.03
乙苯	5.43	氯苯	3.58	1,3-二氯苯	2.80
萘	5.00	二氯甲烷	3.80	1,2,3-三氯丙烷	2.35

二硫化碳也纳入其中。故主要恶臭污染物为二氧化硫、间二甲苯、甲苯、氨、乙苯、萘、苯乙烯、苯、二硫化碳。

3.3 指标分级及标准化特征值

根据风险指标和臭气排放强度分级方法,将污泥直接干化产生的尾气中主要恶臭污染物的风险指

标和臭气排放强度分为 5 个等级,确定各等级标准值(表 5)。

污泥直接干化过程中,臭气排放量为 $3 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,为 $83.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,臭气浓度均值为 6 555。计算风险指标值、臭气排放强度以及指标标准化的值,确定风险指标和臭气排放强度的权重(表 6)。

表 5 评价指标等级划分

评价指标	1	2	3	4	5
风险指标	0.31	4.39	42.30	169.14	841.54
臭气排放强度	3.00×10^3	2.00×10^5	1.00×10^7	5.00×10^9	1.00×10^{11}

表 6 污泥直接干化过程产生臭气的恶臭污染潜力评价指标权重

Table 6 Index weight in the evaluation for the odor potential pollution capacity during directly drying process of sludge			
指标	指标特征值	指标标准化值	指标权重
风险指标	22.64	71.92	0.28
恶臭排放强度	$5.46 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	182.00	0.72

结合污泥直接干化过程臭气产生评价模型中指标等级划分(表 5)及指标权重(表 6),根据式(16)、

(18)计算污泥直接干化过程臭气产生恶臭污染潜力等级标准,得到结果如表 7 所示。

3.4 污泥直接干化过程产生臭气的恶臭污染潜力评价

污泥直接干化过程臭气产生评价模型中,风险指标和臭气排放强度的权重如表 6 所示,构成权重向量为:

$$W = \{0.28, 0.72\}$$

表 7 污泥直接干化过程臭气产生恶臭污染潜力等级标准划分

Table 7 Rating of the odor potential pollution capacity during directly drying process of sludge					
标准等级	I (无污染)	II (轻污染)	III (污染)	IV (明显污染)	V (严重污染)
恶臭污染潜力	0.30	1.64	3.13	5.23	6.36

风险指标和臭气排放的标准化值构成向量为:

$$U = \{71.92, 182.00\}$$

最后的得到污泥直接干化过程中臭气产生的加权恶臭污染潜力综合评价值:

$$P = (0.28, 0.72) \left[\frac{\lg(71.62 + 1)}{\lg(182.00 + 1)} \right] = 2.89$$

将计算出的潜力值对比表 7 的恶臭污染潜力分级标准,结果表明,污泥直接干化过程中产生臭气的恶臭污染潜力为Ⅲ级(污染),根据臭气排放强度标准等级划分(表 3)可知,若臭气外排将会对周边环境(2~4 km)造成影响。

4 结论

指标权重评分的方法筛选出污泥直接干化过程中产生的主要恶臭污染物,优控污染物为二氧化硫、间二甲苯、甲苯、氨、乙苯、萘、苯乙烯、苯、二硫化碳。基于韦伯-费希纳定律建立臭气的恶臭污染潜力分级评价方法,该评价方法可量化反映水泥窑协同处置污泥臭气产生的恶臭污染状况。案例分析结果显示,利用本方法计算得到污泥直接干化产生

尾气的恶臭污染潜力值为 2.89,潜在恶臭污染能力属于Ⅲ级(污染),可能影响的范围为 2~4 km。

参考文献:

[1] 熊运贵,张科,丁文杰,等. 污泥间接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征[J]. 环境化学, 2014, 33(6): 1046-1047.

[2] 张小雄,陈文和,邓明佳,等. 利用水泥窑协同处置城市污水处理厂污泥[J]. 中国水泥, 2011, (2): 51-54.

[3] Deng W Y, Yan J H, Li X D, et al. Emission characteristics of volatile compounds during sludges drying process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162(1): 186-192.

[4] Shanableh A, Jomaa S. Production and transformation of volatile fatty acids from sludge subjected to hydrothermal treatment[J]. Water Science and Technology, 2001, 44(10): 129-135.

[5] Weng H X, Ji Z Q, Chu Y, et al. Benzene series in sewage sludge from China and its release characteristics during drying process[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(3): 561-569.

[6] 郭静,梁娟,匡颖,等. 污水处理厂恶臭污染状况分析与评价[J]. 中国给水排水, 2002, 18(2): 41-42.

[7] 王灿,胡洪营,席劲璞. 城市污水处理厂恶臭污染及其评价体系[J]. 给水排水, 2005, 31(9): 15-19.

[8] 胡利明,姜姗姗,黄德寅,等. Fluent 软件在凝析油炼制场

- 所恶臭污染评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 2013, **13**(2): 102-106.
- [9] 赵岩, 陆文静, 王洪涛, 等. 城市固体废物处理处置设施恶臭污染评估指标体系研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(7): 1804-1810.
- [10] Yamanaka T, Sagara K, Kotani H, *et al.* Psychological bias caused by notification of odor name in sensory evaluation test of odor[J]. Building and Environment, 2009, **44**(7): 1350-1355.
- [11] 环境保护部. 国家污染物环境健康风险名录[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [12] 路鹏, 苏昭辉, 王亘, 等. 填埋场大气中化合物分析与恶臭指示物筛选[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 936-942.
- [13] 李伟芳. 国内恶臭污染物优先控制的筛选研究[J]. 上海环境科学, 2012, **31**(1): 1-4.
- [14] GB 14554-93, 恶臭污染物排放标准[S].
- [15] Yaws C L, Yang H C. To estimate vapor pressure easily[J]. Hydrocarbon Processing, 1989, **68**(10): 65-70.
- [16] Amoores J E, Hautala E. Odor as an aid to chemical safety: Odor thresholds compared with threshold limit values and volatilities for 214 industrial chemicals in air and water dilution[J]. Journal of Applied Toxicology, 1983, **3**(6): 272-290.
- [17] ACGIH. Threshold limit values for chemical substances and physical agents in the workroom environment[S].
- [18] ACGIH. 2010 年工作场所化学物质阈限值名单[J]. 职业卫生与应急救援, 2010, **28**(6): 289-292.
- [19] 李祚泳, 彭荔红. 基于韦伯-费希纳推广定律的环境空气质量标准[J]. 中国环境监测, 2003, **19**(4): 17-19.
- [20] 薛文博, 易爱华, 张增强, 等. 基于韦伯-费希纳定律的一种新型环境质量评价法[J]. 中国环境监测, 2006, **22**(6): 57-58.
- [21] 邹梓, 林剑, 陈娟, 等. 垃圾填埋场臭气评价方法研究[J]. 地球与环境, 2010, **38**(1): 75-78.
- [22] 于露, 李凡修. 韦伯-费希纳定律在区域生态环境质量评价中的应用[J]. 油气田环境保护, 2011, **21**(3): 8-10.
- [23] 邹克华. 恶臭污染评估技术及环境基准[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [24] Japan Ministry of Environment. Offensive odor control[EB/OL]. <http://www.env.go.jp/en/air/index.html>.
- [25] 陈文和, 邓明佳, 罗辉, 等. 污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 2897-2902.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行