

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征 朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)

大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响 蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)

近3年太原市夏季降水的化学特征研究 郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)

太原市PM_{2.5}中有机碳和元素碳的污染特征 刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)

青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布 李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)

北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究 王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)

人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征 宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)

春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究 刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)

青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析 李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)

亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析 张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李翎,吴迪,周黔兰,高廷进(438)

长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)

黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究 郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)

苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析 陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)

滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)

城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性 李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)

艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)

工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评估 臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)

山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评估 戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)

UV协同ClO₂去除三氯生及其降解产物的研究 李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)

氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究 康英,段晋明,景传勇(523)

负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究 曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)

磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究 刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)

TiO₂@酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究 王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)

MnO₂/CFP复合电极的制备及电吸附Pb²⁺特性的研究 刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)

吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO₂催化剂 王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)

掺铁TiO₂纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究 项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)

天然矿物负载Fe/Co催化H₂O₂氧化降解阳离子红3R 马楠,刘华波,谢鑫源(576)

臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究 张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)

碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响 韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)

低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究 马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)

O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响 丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)

改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探 周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)

热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究 杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)

不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)

地表臭氧浓度升高对旱作农田N₂O排放的影响 吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)

亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究 刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)

川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素 罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)

黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响 张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)

汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)

土壤电动修复的电极空间构型优化研究 刘芳,付融冰,徐珍(678)

有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险 张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)

水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律 杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)

植物根系体外溶液的提取方法研究:以多环芳烃为例 朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)

垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究 徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)

1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究 刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)

CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应 陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)

锯齿新米虾对Cu²⁺和毒死蜱毒性的生理响应 李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)

同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物 田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)

热水环境中Na⁺活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究 张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)

区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用 樊新刚,米文宝,马振宁(751)

《环境科学》征订启事(401) 《环境科学》征稿简则(437) 信息(489,522,726,735)

热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究

杨世东¹, 陈霞^{1,2}, 刘操³, 肖本益^{2*}

(1. 东北电力大学建筑工程学院, 吉林 132012; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

摘要: 热碱处理是一种重要的污泥预处理方法. 选取污泥浓度、pH、温度和处理时间这 4 个因素, 采用正交试验, 研究了这些因素对污水处理厂污泥融胞、污泥浓度及污泥形态等污泥特性的影响, 以对污泥热碱处理的条件进行优化. 结果表明, 这 4 个因素对污泥融胞、污泥浓度和污泥形态特征影响的显著性均为: pH > 温度 > 时间 > 污泥浓度. 此外, 这 4 个因素对释放单位污泥溶解性化学需氧量 (SCOD) 和减小污泥浓度的最佳组合条件为: 污泥浓度 36.55 g·L⁻¹、pH 12.45、温度 175℃ 和处理时间 60 min, 而对减小污泥粒径和分形维数的最佳组合条件为: 污泥浓度 36.55 g·L⁻¹、pH 12.5、温度 175℃ 和处理时间 45 min.

关键词: 热碱处理; 融胞作用; 污水处理厂污泥; 污泥浓度; 污泥形态; 影响

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0619-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.02.033

Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant

YANG Shi-dong¹, CHEN Xia^{1,2}, LIU Cao³, XIAO Ben-yi^{2*}

(1. School of Civil Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Beijing Water Sciences Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: Alkaline thermal treatment is an important pretreatment method for sewage sludge. In this paper, in order to optimize the alkaline thermal treatment conditions for sludge pretreatment, four pretreatment parameters (sludge concentration, pH, temperature and treatment time) were investigated through orthogonal experiments to determine their effects on the sludge disintegration, sludge concentration and sludge morphology of sewage sludge. The experimental results showed that the significance of the four factors on sludge characteristics was in the order of pH > temperature > treatment time > sludge concentration. Additionally, the optimal conditions of the four factors for the release of soluble chemical oxygen demand (SCOD) of unit sludge and decrease of sludge concentration were as follows: 36.55 g·L⁻¹, pH 12.45, 175℃ and 60 min. While the optimal conditions for the decrease of particle size and fractal dimension were 36.55 g·L⁻¹, pH 12.5, 175℃ and 45 min.

Key words: alkaline thermal treatment; disintegration of sludge; sludge from sewage treatment plant; sludge concentration; sludge morphology; effect

在污水生物处理过程中会产生大量剩余污泥, 污泥产量通常占污水量体积的 0.3% ~ 0.5%, 或者约为污水质量的 1% ~ 2%. 据统计, 目前我国污水处理能力约 1.53 亿 m³·d⁻¹, 年产生含水量 80% 的污泥 3 500 多万 t^[1], 随着今后我国的经济的发展, 污水处理量和污水处理率会不断增加, 随之而产生的剩余污泥量也会越来越多^[2]. 因此, 剩余污泥的处理与处置已成为迫在眉睫的问题.

厌氧消化是一种传统的污泥处理方法, 其中, 水解过程是限速步骤^[3]. 采用适当的预处理可以在较短的时间内将污泥水解, 提高污泥厌氧消化效率^[4]. 近年来, 污泥热碱联合处理法在污泥预处理中得到研究者的广泛关注^[5-10]. 在热碱处理中, 碱可以减弱微生物细胞壁对高温的抵抗力, 使细胞受热时更容易破裂, 从而释放出大量的有机物 (如蛋

白质、碳水化合物等)^[5,6]. 该方法具有操作简单、处理时间短等优点, 并且能获得比单独碱处理或热处理更好的溶出效果^[7,8]. 研究表明, 当热碱处理温度为 170℃、pH 值为 12 时, 污泥中 SCOD 释放量比未经处理污泥增加 83%, 随后将此污泥进行厌氧消化发现其甲烷产量比未处理污泥提高 54%^[9,10]. 在热碱处理过程中污泥的性质会发生改变, 以有利于后续的污泥处理. 研究表明, 在热碱处理过程中对污泥特性影响较大的因素有温度 (20 ~ 210℃)、pH 值 (7 ~ 12.5)、处理时间 (0 ~ 60 min)、污泥浓度

收稿日期: 2014-08-20; 修订日期: 2014-10-09

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07203-001); 国家自然科学基金项目 (51378492, 51108043)

作者简介: 杨世东 (1978 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为城市污水生物处理技术, E-mail: 15981105115@163.com

* 通讯联系人, E-mail: byxiao@cees.ac.cn

(10~40 g·L⁻¹)、加热方式(间接热交换、直接加热等)、加碱种类[NaOH、Ca(OH)₂等]^[11,12]。

然而,目前污泥热碱处理的研究大多仅限于各单因素(如温度、pH值等)和双因素(如温度-pH、温度-时间、pH-时间等)^[13~15],缺乏多种因素的综合影响研究。为了考察热碱处理过程中各因素同时作用对污泥特性的综合影响,本研究采用正交试验同时考察不同污泥浓度、pH、温度和处理时间的组合条件对污泥特性的影响,并找出热碱处理的最优组合条件。

1 材料与方法

1.1 污泥

试验用泥为北京市某污水处理厂的剩余污泥,该污水处理厂采用活性污泥法处理城市污水。自二沉池取得污泥后,采用40目筛网过筛,去除污泥中

的大颗粒物,重力沉降将污泥浓缩到一定浓度,去上清液后使用。污泥特性如下:pH 6.9±0.1,总化学需氧量(TCOD)(10 260±120)mg·L⁻¹,SCOD(75±20)mg·L⁻¹,总悬浮性固体(SS)(14.3±0.2)g·L⁻¹,挥发性悬浮性固体(VSS)(9.6±0.2)g·L⁻¹。

1.2 正交试验

1.2.1 正交试验设计

选择污泥浓度、pH、温度和处理时间4个因素,并取4个水平进行热碱处理正交试验,选择L₉(4⁵)正交表,正交试验设计表如表1所示。

正交试验表中每组试验做3个平行,通过浓缩和稀释调节控制污泥浓度,采用8 mol·L⁻¹ NaOH进行pH调节,污泥加热是将装有污泥的水热反应釜(上海岩征)置于不同温度的马弗炉(Nabertherm P330,德国)中完成,加热时间根据设计要求控制。污泥进行完热碱处理,冷却后进行相关分析。

表1 L₉(4⁵)正交试验表

Table 1 L₉(4⁵) orthogonal experimental program

试验编号	因素				
	污泥浓度/g·L ⁻¹	pH	温度/°C	处理时间/min	空列
1	36.550	7.0	50	10	—
2	36.550	9.0	100	25	—
3	36.550	11.0	175	45	—
4	36.550	12.5	210	60	—
5	20.550	7.0	100	45	—
6	20.550	9.0	50	60	—
7	20.550	11.0	210	10	—
8	20.550	12.5	175	25	—
9	14.050	7.0	175	60	—
10	14.050	9.0	210	45	—
11	14.050	11.0	50	25	—
12	14.050	12.5	100	10	—
13	10.075	7.0	210	25	—
14	10.075	9.0	175	10	—
15	10.075	11.0	100	60	—
16	10.075	12.5	50	45	—

1.2.2 验证试验

为了验证正交试验得出的单位污泥SCOD随温度和pH的变化趋势,进行如下验证试验:采用8 mol·L⁻¹ NaOH分别将污泥pH调节为6.9±0.1、9.0±0.1、10±0.1、11.5±0.1、12.5±0.1,并稳定5 min。再将上述5种不同pH值污泥分别置于20、100、175及210℃处理60 min,冷却后进行相关分析,各做3组平行试验。

1.3 分析方法

COD采用COD分析仪(HACH D2800,美国)测定。SCOD的测定,首先将样品在4 500 r·min⁻¹离心分离10 min,之后用0.45 μm的微孔水系滤膜过滤

之后进行测定。污泥的粒径采用激光粒度分析仪(Malvern Mastersizer 2000,英国)测定,用中值粒径d_{0.5}表示。分形维数根据激光粒度仪的测量数据按照光散射法计算确定^[16]。pH值采用pH计(Sartorius PB-10,德国)测定,SS、VSS等采用标准方法测定^[17]。每个指标做3个平行,其平均值为检测结果。

2 结果与讨论

2.1 不同热碱预处理条件对污泥融胞的影响

热碱处理会破坏污泥的絮体和微生物细胞,从而导致细胞间胞外聚合物和细胞内有机物被释

放^[18]. 污泥的融胞作用可以用溶解性有机物 (SCOD) 的释放来表示,按正交设计表(表 1)进行热碱处理后,单位污泥 SCOD 的变化见表 2,其极差及方差分析见表 3. 从中可知,极差大小为:pH > 温度 > 时间 > 污泥浓度. 结合方差分析结果可

知,这 4 个因素对污泥释放 SCOD 影响的显著性为 pH 值是高度显著,温度和处理时间是显著,污泥浓度是不显著. 因此,这 4 个因素对污泥释放 SCOD 影响的显著性顺序为:pH > 温度 > 时间 > 污泥浓度.

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal experiment

试验编号	SCOD/SS /g·g ⁻¹	SS 减少率 /%	VSS 减少率 /%	粒径 /μm	分形维数
1	0.03	2.87	4.34	42.720	2.275
2	0.20	12.65	17.25	41.062	2.224
3	0.58	37.07	51.27	27.565	1.731
4	0.81	63.89	84.07	28.490	1.904
5	0.18	19.83	25.00	40.414	2.185
6	0.14	12.77	16.72	42.292	2.253
7	0.34	19.59	28.72	39.333	2.157
8	0.84	60.58	79.90	28.700	1.866
9	0.46	33.27	47.76	33.346	2.135
10	0.34	20.11	29.85	36.173	2.115
11	0.29	16.19	20.40	36.365	2.089
12	0.47	30.60	51.99	36.466	2.141
13	0.20	16.87	21.71	38.168	2.201
14	0.24	13.65	18.86	37.843	2.180
15	0.43	22.33	33.10	34.996	2.006
16	0.54	44.17	70.72	29.173	2.015

表 3 污泥 SCOD 正交试验极差及方差分析¹⁾

Table 3 Analysis of range and variance for orthogonal experiment on sludge SCOD

因素	极差	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
污泥浓度	0.052	0.006	3	0.750	9.280	—
pH	0.447	0.524	3	65.500	9.280	**
温度	0.280	0.179	3	22.375	9.280	*
处理时间	0.190	0.078	3	9.750	9.280	*
误差	—	0.010	3	—	—	—

1) —表示 $F_{\text{因}} < F_{0.05}$, 该因素的影响不显著或未有该值; * 表示 $F_{\text{因}} > F_{0.05}$, 该因素的影响显著; ** 表示 $F_{\text{因}} > F_{0.01}$, 该因素的影响高度显著, 下同

根据试验结果,可以得到单位污泥 SCOD 随 4 个因素的变化(图 1). 从图 1 中可知,单位污泥 SCOD 随 pH 的升高或处理时间的延长而升高,此变化趋势与文献[19]一致. 单位污泥 SCOD 随温度的升高呈先升高后降低的变化:当温度低于 175℃ 时, SCOD 随温度升高而增加,而当温度高于 175℃ 时, SCOD 值随温度的升高反而降低. Neyens 等^[20]研究表明:污泥在 175℃ 条件下热处理 60 min 后微生物细胞被破坏,从而释放出大量 SCOD,但当热处理温度高于 175℃ 会限制污泥释放 SCOD. 此外,随着污泥浓度升高,单位污泥 SCOD 有一定增加,但增加幅度不如其它 3 个因素. 图 1 表明,在本试验条件下, 4 个因素对热碱处理释放单位污泥 SCOD 的最佳组

合条件为:污泥浓度 36.55 g·L⁻¹、pH 12.5、温度 175℃ 和处理时间 60 min.

在热碱处理过程中 pH 和温度对污泥释放 SCOD 的影响是高度显著,为了进一步验证 SCOD 随温度和 pH 的变化趋势,进行了验证试验,试验结果见图 2.

从图 2 可以看出,SCOD 随 pH 升高而升高,当温度低于 175℃ 时,SCOD 随温度升高而增加,但当温度高于 175℃ 时,SCOD 值随温度的升高而降低,这个结果与前面结果一致. Dwyer 等^[21]研究表明,高温处理下污泥中还原糖的醛基和氨基酸中的氨基会发生美拉德反应,生成难降解的褐色多聚氮. 210℃ 时污泥的胞内物质多糖被大量释放并在高温

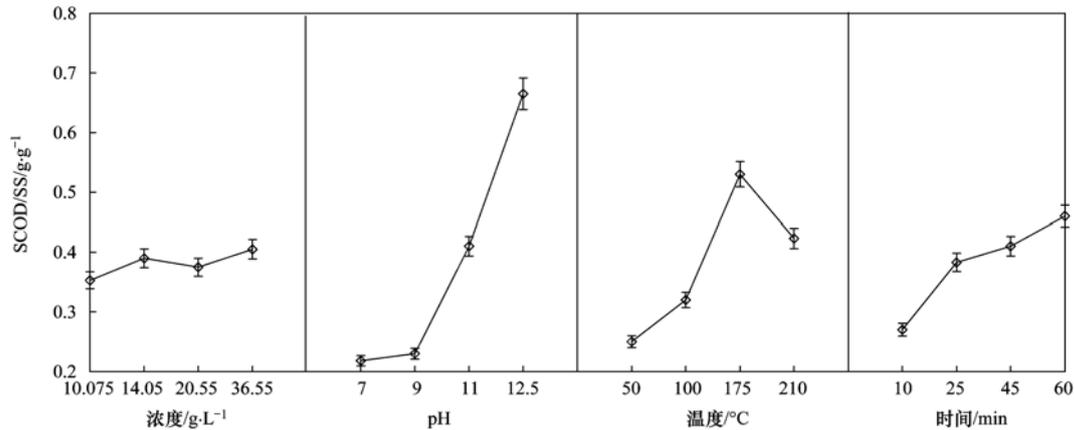


图1 污泥 SCOD 随各因素的变化

Fig. 1 Change of sludge SCOD under different pretreatment conditions

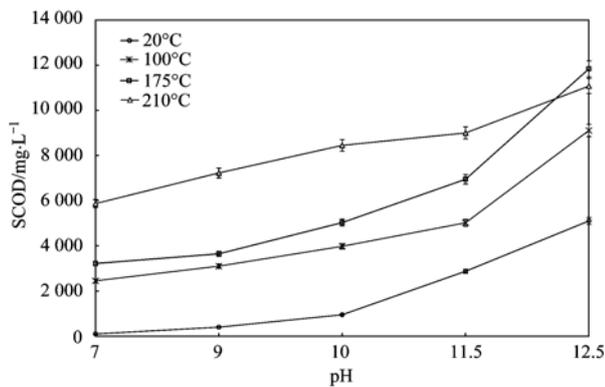


图2 热碱处理对污泥 SCOD 的影响

Fig. 2 Effect of alkaline thermal treatment on sludge SCOD

下生成大量褐色难降解物质,从而导致单位污泥 SCOD 在 210°C 低于 175°C.

2.2 不同热碱预处理条件对污泥浓度的影响

热碱预处理后,污泥中部分不溶性物质转化为溶解性物质,使污泥浓度降低^[22].按正交设计表(表1)进行热碱处理后污泥的 SS 和 VSS 减少率如表2所示,其极差及方差分析见表4.从中可知,污泥 SS 和 VSS 减少率的极差大小均为:pH > 温度 > 时间 > 污泥浓度.结合方差分析结果可知,这4个因素对污泥 SS 和 VSS 影响的显著性均为 pH 值、温度和處理时间是显著,污泥浓度是不显著.因此,这4个因素对污泥 SS 和 VSS 影响的显著性顺序为:

表4 污泥 SS、VSS 正交试验极差及方差分析¹⁾

Table 4 Analysis of range and variance for orthogonal experiment on sludge SS and VSS

因素	极差		偏差平方和		自由度	F 比		F 临界值	显著性	
	SS	VSS	SS	VSS		SS	VSS		SS	VSS
污泥浓度	4.865	3.136	67.201	19.731	3	1.857	0.274	9.280	—	—
pH	35.015	51.000	3 025.245	6 526.428	3	83.607	90.690	9.280	*	*
温度	17.143	21.403	754.799	1 108.236	3	20.860	15.400	9.280	*	*
处理时间	16.387	19.434	615.580	990.264	3	17.012	13.761	9.280	*	*
误差	—	—	36.180	71.960	3	—	—	—	—	—

pH > 温度 > 时间 > 污泥浓度.

根据表2中的试验结果,可以得到污泥 SS、VSS 减少率随4个因素的变化(图3).从图3中可知,SS、VSS 减少率随处理时间延长和污泥浓度升高而升高,但随污泥浓度的增加幅度小,这一变化规律与文献一致^[23].此外,SS、VSS 减少率随温度的升高呈先升高后降低的趋势,此趋势与文献^[24]一致.但是,SS、VSS 减少率却随 pH 的升高呈先降低后升高的趋势.图3表明,在本试验条件下,4个因素对热碱处理降低 SS、VSS 的最佳组合条件为:污泥浓度 36.55 g·L⁻¹、pH 12.5、温度 175°C 和處理

时间 60 min.对比单位污泥 SCOD 和污泥浓度(SS 和 VSS)的变化(表2、图1和图3)可知,4个因素对3个参数的影响相似,这主要是由于污泥 SCOD 的释放来源于污泥絮体和微生物细胞的破裂、融胞所释放的有机物,有机物释放会使一部分不溶性物质转化为溶解性物质,从而降低污泥浓度.

2.3 不同热碱处理条件对污泥形态特征的影响

热碱处理能破坏污泥絮体结构,改变污泥表观形态,减小污泥粒径,并提高污泥的 ξ 电位,从而影响污泥的形态特征^[25].污泥形态特征可以用粒径和分形维数表示.分形维数是一个很重要的参数,

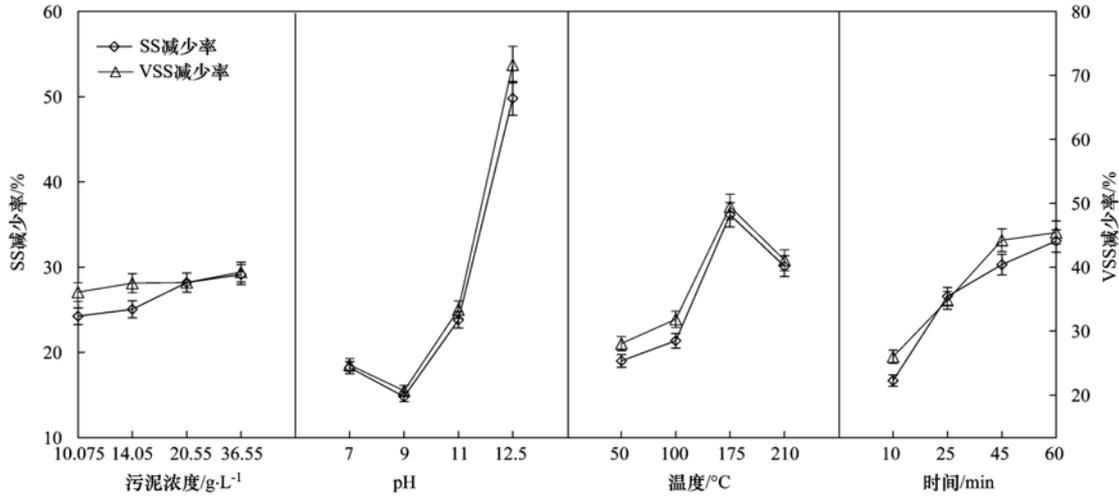


图3 污泥 SS、VSS 减少率随各因素的变化

Fig. 3 Change of sludge SS and VSS under different pretreatment conditions

它影响了絮体的密度,分形维数的提高说明污泥絮体由松散型向致密型过渡^[26]. 采用激光粒度仪测定污泥粒径,并根据光散射法计算污泥絮体的分形维数,试验结果如表 2 所示,其极差及方差分析见表 5. 从中可知,粒径及分形维数的极差大小均为:pH

> 温度 > 时间 > 污泥浓度. 结合方差分析结果可知,这 4 个因素对污泥粒径的影响是显著的,显著性顺序为:pH > 温度 > 时间 > 污泥浓度. 而只有 pH 值对分形维数的影响是显著性的,其它 3 个因素均不显著.

表 5 污泥粒径及分形维数正交试验极差及方差分析¹⁾

Table 5 Analysis of range and variance for orthogonal experiment on sludge particle size and fractal dimension

因素	极差		偏差平方和		自由度	F 比		F 临界值	显著性	
	粒径	分形维数	粒径	分形维数		粒径	分形维数		粒径	分形维数
污泥浓度	2.726	0.087	19.491	0.019	3	36.985	1.900	9.280	*	—
pH	8.636	0.218	192.803	0.173	3	365.850	17.300	9.280	*	*
温度	6.372	0.180	99.459	0.078	3	188.727	7.800	9.280	*	—
处理时间	5.760	0.177	72.136	0.064	3	136.880	6.400	9.280	*	—
误差	—	—	0.530	0.010	3	—	—	—	—	—

根据表 2 中的试验结果,可以得到污泥粒径及分形维数随 4 个因素的变化(图 4). 从图 4 中可知,粒径和分形维数随温度的升高或处理时间的延长均呈先降低后升高的趋势. 而污泥浓度、pH 值对粒径和分形维数的影响有区别,其中粒径随污泥浓度或 pH 值的升高均呈先增大后减小的趋势,然

而分形维数几乎不受污泥浓度影响,但随 pH 的升高而降低. 刘金凤等^[27]研究表明热碱处理能促使污泥固体溶解和水解,减小污泥粒径和分形维数,提高污泥厌氧消化性能. 因此,粒径和分形维数越小表明污泥热碱处理效果越好. 图 4 表明,在本试验条件下,4 个因素对热碱处理减小污泥粒径和分形

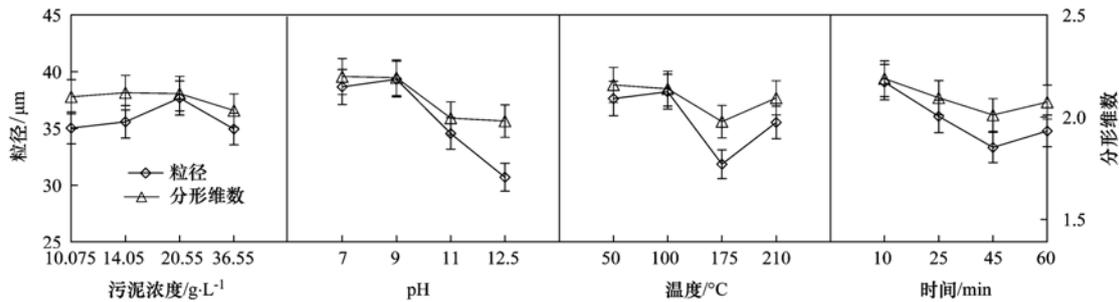


图4 污泥粒径及分形维数随各因素的变化

Fig. 4 Change of sludge particle size and fractal dimension under different pretreatment conditions

维数的最佳组合条件为:污泥浓度 $36.55 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 12.5、温度 175°C 和处理时间 45 min.

3 结论

通过正交试验研究了污泥热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响. 结果表明,研究的4个因素—污泥浓度、pH、温度和处理时间均会影响污泥特性,这些特性包括 SCOD、污泥浓度、粒径和分形维数. 4个因素对单位污泥释放 SCOD 和污泥浓度污泥影响显著性顺序为 pH > 温度 > 时间 > 污泥浓度,最佳组合条件为:污泥浓度 $36.55 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 12.5、温度 175°C 和处理时间 60 min. 而对于粒径和分形维数影响的显著性顺序则为 pH > 温度 > 时间 > 污泥浓度,最佳组合条件为:污泥浓度 $36.55 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 12.5、温度 175°C 和处理时间 45 min.

参考文献:

- [1] 中国住房和城乡建设部. 2013年城乡建设统计公报[M]. 2014.
- [2] 曹秀芹, 陈爱宁, 甘一萍, 等. 污泥厌氧消化技术的研究与进展[J]. 环境工程, 2008, **26**(增刊): 215-219.
- [3] Yu S Y, Zhang G M, Li J Z, *et al.* Effect of endogenous hydrolytic enzymes pretreatment on the anaerobic digestion of sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **146**: 758-761.
- [4] Carrère H, Dumas C, Battimelli A, *et al.* Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **183**(1-3): 1-15.
- [5] 何玉凤, 杨凤林, 胡绍伟, 等. 碱处理促进剩余污泥高温水解的试验研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2260-2265.
- [6] Tyagi V K, Lo S L. Application of physico-chemical pretreatment methods to enhance the sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: an up to date review [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2011, **10**(3): 215-242.
- [7] Oh S E, Yoon J Y, Gurung A, *et al.* Evaluation of electricity generation from ultrasonic and heat/alkaline pretreatment of different sludge types using microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **165**: 21-26.
- [8] 肖本益, 刘俊新. 不同预处理方法对剩余污泥性质的影响研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 327-331.
- [9] Zhong W Z, Li Z X, Yang J L, *et al.* Effect of thermal-alkaline pretreatment on the anaerobic digestion of streptomycin bacterial residues for methane production [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **151**: 436-440.
- [10] Valo A, Carrère H, Delgenès J P. Thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatment of waste activated sludge for anaerobic digestion [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2004, **79**(11): 1197-1203.
- [11] Climent M, Ferrer I, Baeza M M, *et al.* Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, **133**(1-3): 335-342.
- [12] Liu X L, Liu H, Chen J H, *et al.* Enhancement of solubilization and acidification of waste activated sludge by pretreatment [J]. *Waste Management*, 2008, **28**(12): 2614-2622.
- [13] 乔玮, 王伟, 徐衣显, 等. 碱辅助条件下的污泥微波热水解特性研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2678-2683.
- [14] 严媛媛, 陈汉龙, 何群彪, 等. 热碱预处理改善低有机质污泥厌氧消化性能的效果[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(23): 9-13.
- [15] Cho H U, Park S K, Ha J H, *et al.* An innovative sewage sludge reduction by using a combined mesophilic anaerobic and thermophilic aerobic process with thermal-alkaline treatment and sludge recirculation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **129**: 274-282.
- [16] 阮晓东, 刘俊新. 活性污泥絮体的分形结构分析[J]. 环境科学, 2013, **3**(4): 1457-1463.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 105-108.
- [18] 彭晶, 郭泽冲, 侯玲玲, 等. 热碱预处理对剩余污泥发酵产酸效能提升的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, **44**(8): 43-47.
- [19] 盛广宏, 陈蓓蓓, 刘金凤. 热碱处理破解污泥效果研究[J]. 环境科技, 2013, **26**(2): 38-42.
- [20] Neyens E, Baeyens J. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, **98**(1-3): 51-67.
- [21] Dwyer J, Starrenburg D, Tait S, *et al.* Decreasing activated sludge thermal hydrolysis temperature reduces product colour, without decreasing degradability [J]. *Water Research*, 2008, **42**(18): 4699-4709.
- [22] 李洋洋, 李欢, 金宜英, 等. 热碱联合处理用于污泥强化脱水[J]. 高校化学工程学报, 2010, **24**(4): 714-718.
- [23] 袁文祥, 楼紫阳, 叶彩虹, 等. 热处理和pH调节协同作用下污泥调质过程研究[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(9): 2133-2138.
- [24] Park S K, Jang H M, Ha J H, *et al.* Sequential sludge digestion after diverse pre-treatment conditions: Sludge removal, methane production and microbial community changes [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **162**: 331-340.
- [25] Feng G H, Tan W, Zhong N, *et al.* Effects of thermal treatment on physical and expression dewatering characteristics of municipal sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, **247**: 223-230.
- [26] Li Z L, Zhang D J, Lu P L, *et al.* Influencing factors of floc size distribution and fractal dimension of activated sludge [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 3975-3980.
- [27] 刘金凤, 盛广宏, 王诗生. 水热处理对污泥性质的影响[J]. 环境污染与防治, 2013, **35**(11): 71-76.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning (751)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

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