

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	李源遽, 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, 程铖, 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, 唐迦, 肖致美, 高璟赞, 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)
超低排放高湿度气总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, 黄压, 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, 杨垠晖, 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, 朱奔, 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 (CaO ₂) 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 ($\delta^{15}\text{N}$ -NO ₃ ⁻ , $\delta^{18}\text{O}$ -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	李韧, 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	刘晓蕾, 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, 郑朝辉, 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 <i>Shigella flexneri</i> 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 N ₂ O 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	魏宾斌, 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)
种植业面源污染防控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)	

基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策

刘晓蕾, 李安婕*

(北京师范大学环境学院, 水沙科学教育部重点实验室, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 磷是一种不可再生资源, 采用鸟粪石沉淀法回收剩余污泥中磷已有工程应用。但目前用于释放剩余污泥中碳氮磷便于后续回收的方案很多, 不同方案对后续鸟粪石磷回收的影响不同。为了有助于剩余污泥磷回收工艺的决策, 本研究以鸟粪石磷回收为目标, 选取 6 种常见的剩余污泥处理方案, 构建 3 层 6 指标的决策层次分析结构, 运用 PROMETHEE II 偏好关系排序方法, 对 6 种污泥处理方案进行整体评价, 从产品品质优先和时间经济优先两个角度出发, 选择综合效益最高的方案。在产品品质优先条件下, 酶水解以及酶-厌氧处理工艺最优; 在时间经济优先条件下, 热水解以及热-厌氧处理工艺最优。本研究为通过鸟粪石沉淀法回收剩余污泥中的磷, 提供了方案参考以及有效的方案选择办法。

关键词: 鸟粪石沉淀法; 磷回收; 污泥预处理; PROMETHEE II; 决策分析

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3725-06 DOI: 10.13227/j.hjks.201912183

Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method

LIU Xiao-lei, LI An-jie*

(Key Laboratory of Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Phosphorus is a non-renewable resource. The recovery of phosphorus from excess sludge by the struvite precipitation process has been applied on a full-scale. However, different sludge pretreatment methods have been used to release carbon, nitrogen, and phosphate from excess sludge, which could affect the subsequent struvite precipitation process. In this study, the decision-level analytical structure of the 3-layer and 6-index was constructed to evaluate the effects of six excess sludge treatment processes on struvite recovery. According to the preference ranking organization method for the enrichment of evaluations II (PROMETHEE II) decision-making analysis, enzymatic hydrolysis or enzymatic hydrolysis-anaerobic fermentation was the better sludge treatment choice for struvite recovery under the "product quality" priority case, while thermal hydrolysis or thermal hydrolysis-anaerobic fermentation could be better under the "time and economy" priority case. This study provides a recommendation for the selection and design of excess sludge treatment for struvite recovery.

Key words: struvite precipitation process; phosphorus recovery; sludge pretreatment; PROMETHEE II; decision-making

磷资源在自然界呈直线式流动, 难以再生, 呈日益枯竭的状态^[1]。污水排放前需进行生物除磷处理, 而这一工艺会生成大量富磷剩余污泥^[2]。如能有效利用剩余污泥中的磷资源, 既可有效实现污泥的减量化、稳定化和无害化^[3], 亦可以一定程度上缓解磷矿库存压力。

目前, 以鸟粪石沉淀法回收污泥上清液中氮磷的方法已有广泛应用^[4], 而找到从剩余污泥中充分释放磷和氮的污泥预处理方案是有效回收氮磷的第一步^[5]。根据技术特性, 常用于污泥破解的预处理技术可分为物理、化学和生物处理^[6]。目前不同污泥预处理方案在国内外已有较多研究, 物理方法中热水解可有效改善污泥的脱水性能及提高污泥的厌氧性能^[7]; 有研究发现^[8], 在污泥热水解处理过程中加入蒸汽蓄热器, 可以更好地利用废气能量, 减少了 66.8% 的热能需求; 游离亚硝酸水解是一种能够

以较低成本提高污泥水解和污泥厌氧效果的污泥化学预处理方法^[9], Wei 等^[10]的研究发现, 游离亚硝酸预处理可使脱水污泥的体积减少 16%~17%; 而酶水解可在低温、短时间的条件下对污泥进行处理, 且产生的污染物质较少^[11], 耿娜瑶^[12]研究了淀粉酶、蛋白酶和纤维素酶这 3 种酶对厌氧污泥水解的促进作用, 发现淀粉酶效果最为明显, 可以有效促进污泥胞外聚合物的水解作用。采用常用的物理、化学及生物这 3 种污泥预处理技术以及结合后续厌氧消化的方法(酶水解、酶-厌氧水解、热水解、热-厌氧水解、厌氧水解和游离亚硝酸-厌氧水解), 对剩余污泥碳氮磷的释放效果不同, 对后续鸟粪石磷回收也各

收稿日期: 2019-12-23; 修订日期: 2020-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478042, 51778056)

作者简介: 刘晓蕾(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水与污泥处理及资源化, E-mail: 398937940@qq.com

* 通信作者, E-mail: liaj@bnu.edu.cn

有优缺点^[13],如何根据实际情况和需求,选择最适合的剩余污泥处理工艺用于鸟粪石磷回收,有待研究.

本研究从剩余污泥处理方案在成本、实施难度以及鸟粪石最终产物品质等方面考虑,通过基于层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)的PROMETHEE II(preference ranking organization method enrichment evaluations II)完全偏好关系排序法,对6种剩余污泥处理方案各指标的优劣程度进行系统梳理,进而选择综合效益最高的方案.

1 材料与方法

1.1 污泥水解方法

本实验中所用到剩余污泥来自于西王集团淀粉废水处理厂(中国,山东),是淀粉废水生物处理后的剩余污泥.剩余污泥预处理方法如下.

酶水解:在污泥溶液中依次加入 EDTA-2Na 和蛋白酶(Amano,日本),在振荡培养箱中水解反应 3 h^[14].热水解:将污泥溶液用高温高压反应釜在 150℃ 条件下反应 30 min^[15].游离亚硝酸水解:在污泥溶液中加入适量 NaNO₂,调节 pH 至 5 以保证反应体系中亚硝酸根质量浓度为 250 mg·L⁻¹,在振荡培养箱中水解反应 24 h^[16].厌氧水解:将经过酶水解、热水解和游离亚硝酸水解得到的污泥水解液转移到厌氧发酵瓶中,加入适量厌氧种泥并通入 N₂,在恒温振荡培养箱中 30℃,100 r·min⁻¹ 培养 7~9 d.游离亚硝酸-厌氧水解需每隔 24 h 用稀盐酸调节 pH 到 5.将上述反应完成后的水解产物离心分离固液相,上清液将用于后续的磷回收实验中.

1.2 磷回收方法

取污泥水解液上清液于锥形瓶中,按照 Mg:N:P 摩尔比为 1.4:1:1 的比例向水解液中加入 MgCl₂ 和 NH₄Cl^[17],因氨氮过量可以提高鸟粪石纯度^[18],因此实验过程中仅在氨氮质量浓度不足时进行补充添加 NH₄Cl,同时用饱和氢氧化钠溶液调节 pH 至 9.5 左右.放在恒温振荡培养箱中,以 25℃,120 r·min⁻¹ 的条件进行 30 min 沉淀反应,然后静置 30 min.反应完成后,以离心方式(6 000 r·min⁻¹, 8~10 min)分离固液相,将沉淀物烘干(40℃, 48 h).各种水解方式得到的污泥水解液中氮磷质量浓度参见文献[13],按照镁、氮和磷摩尔比例计算得出,仅酶水解、酶-厌氧水解和热水解这 3 种水解方式需外加 NH₄Cl,添加氨氮质量浓度分别为 221.66、52.73 和 105.86 mg·L⁻¹,一定程度上增加了生成鸟粪石的成本.

1.3 基于 AHP 的 PROMETHEE II 偏好排序法

层次分析法是一种在国内外多领域得以应用的方法^[19],它将对影响决策的因素,在从目标、准则和方案进行层次区分后,再加以定性和定量的方法.这一方法使决策过程条理化、层次化,简化问题,同时可通过求特征向量的方式来确定权重^[20].

PROMETHEE II 是一种多准则分析中的完全偏好关系排序方法^[21],该方法基于方案之间的两两比较进行多目标决策,是一种建立在级别不劣于关系上的排序方法.这种方法要求决策者将决策目标分为若干参数属性,对每一项参数进行各个方案判断评分^[22],建立起决策矩阵,以确定参数间相对重要程度,即权重.权重的确定使用 AHP 进行计算.

在本研究中,首先通过 AHP 对决策问题层次结构进行描述,如图 1 所示,将决策目标(A)设置为最优方案,时间经济、技术参数和产品品质这 3 个方面的属性(B),这 3 个属性又通过所需时间、预处理成本、外加氮量、操作难度、鸟粪石产量及鸟粪石纯度这 6 项指标(C)通过评分法进行评价,对 6 种污泥处理方案(酶水解、酶-厌氧水解、热水解、热-厌氧水解、厌氧水解和游离亚硝酸-厌氧水解)进行选择.

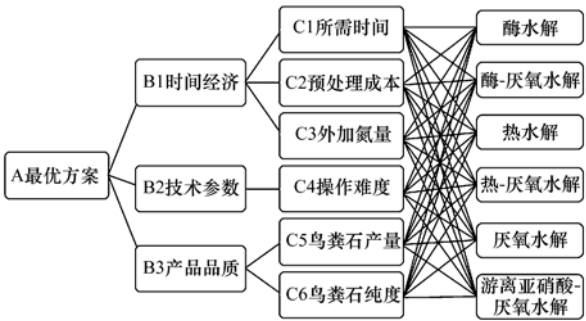


图 1 污泥预处理方案决策问题层次结构

Fig. 1 Hierarchical structure of the decision-making problem of the sludge pretreatment scheme

对每一项参数进行各个方案判断评分,建立决策矩阵,采用数字 1~9 来表示两两比较的重要程度^[23],详细情况如表 1^[24],得出成对比较矩阵即式(1).

表 1 标准 *i* 和 *j* 之间的标度及其相对重要性

Table 1 Scale between the standard <i>i</i> and <i>j</i> and its relative importance	
标度	偏好判断
1	<i>i</i> 与 <i>j</i> 同等重要
3	<i>i</i> 比 <i>j</i> 稍显重要
5	<i>i</i> 比 <i>j</i> 明显重要
7	<i>i</i> 比 <i>j</i> 强烈重要
9	<i>i</i> 比 <i>j</i> 极端重要
2、4、6、8	上述两两判断中值
倒数	将因子 <i>i</i> 与 <i>j</i> 进行比较以得到 a_{ij} , 则对因子 <i>j</i> 和 <i>i</i> 的判断为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

$$A = a_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, a_{ij} 为方案 i 和 j 比较标度。

通过判断矩阵 A 的特征根问题求解特征向量 W , 如式(2), 特征向量经过归一化处理后, 就得到某一层各元素对上一层次的权重, 式中的 $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵 A 的最大特征值. 计算过程中需要对矩阵进行一致性检验, 检验公式如式(3):

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (2)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}; \quad CR = CI/RI \quad (3)$$

式中, CI (consistence index) 为一致指标; n 为矩阵维数; $\lambda_{\max}$ 为矩阵最大特征值; RI 为随机指标 (维数 ≤ 2 时, $RI = 0$; 维数为 3 时, $RI = 0.58$; 维数为 4 时, $RI = 0.9, \dots$); CR (consistence rate) 为一致性比率, 当 $CR < 0.1$ 时, 矩阵具有一致性。

若研究问题有多个层次, 那么总层次 (设有 k 层) 的相应权重和一致性检验方式如式(4):

$$\begin{cases} W = W_1 \times W_2 \times \cdots \times W_k \\ CI = W_i \times CI_i \\ RI = W_i \times RI_i \\ CR = CI/RI \end{cases} \quad (4)$$

本研究中采用无差异区间的线性偏好函数作为 PROMETHEE II 参数属性的偏好函数, 如式(5)所示。

$$P_k(a_i, a_j) = P_i(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q, \\ \frac{d-p}{p-q}, & q < d \leq p, \\ 1, & d > q. \end{cases} \quad (5)$$

式中, d 为不同方案相同参数属性的优劣程度. 由于指标参数采用评分方式, 所以偏好函数参数的 q 与 p 分别设置为 0 和 3。

最终, 结合权重 W , 多准则偏好优序指数公式有:

$$\pi(a_i, a_j) = \sum_{k=1}^m W_k P_k(a_i, a_j) \quad (6)$$

a_i 的偏好优序级别有正方向和负方向, 有如下形式:

$$\begin{cases} \Phi^+(a_i) = \sum_{j=1}^n \pi(a_i, a_j), \\ \Phi^-(a_i) = \sum_{j=1}^n \pi(a_j, a_i), \\ \Phi(a_i) = \Phi^+(a_i) - \Phi^-(a_i). \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\Phi^+(a_i)$ 为方案 a_i 优于其他方案的程度; $\Phi^-(a_i)$ 为方案 a_i 劣于其他方案的程度. 而 $\Phi(a_i)$ 为综合优序级别值, 决定方案间的优序关系, 根据式(7)可以得到方案集的完全排序。

2 结果与讨论

2.1 磷回收实验结果

磷回收实验中产物纯度计算方式如式(8)所示^[25]。

$$\text{纯度} = \frac{n_{\text{氮}} \times M_{\text{鸟粪石}}}{m_{\text{沉淀物}}} \times 100\% \quad (8)$$

式中, $m_{\text{沉淀物}}$ 是沉淀物质量, $n_{\text{氮}}$ 是氮的量 (mol), $M_{\text{鸟粪石}}$ 是鸟粪石 ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 的摩尔质量. 经计算, 磷回收实验中得到的鸟粪石产物纯度与产量如图 2 所示, 不同预处理方式得到的沉淀物中鸟粪石的纯度和产量均有不同, 可知酶水解、酶-厌氧、热水解和热-厌氧这 4 种水解方式得到的鸟粪石纯度较高, 均在 80% 以上, 而另外两种则纯度较低, 低于 60%. 从产量方面来看, 酶水解和酶-厌氧得到的鸟粪石产量显然较高, 剩下依次为热-厌氧、厌氧水解、热水解和游离亚硝酸水解. 推测产量与不同水解方式对污泥中磷释放影响效果有关。

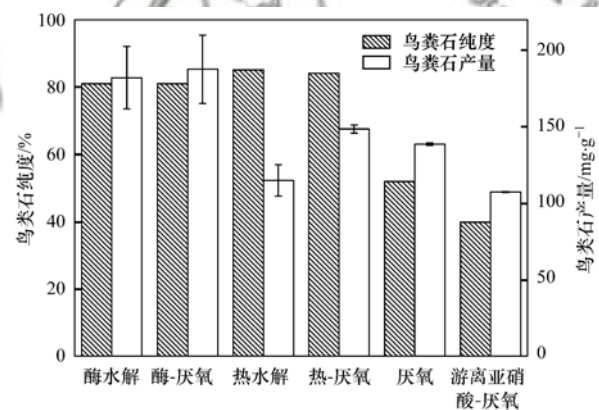


图 2 剩余污泥水解液磷回收沉淀物中鸟粪石的品质

Fig. 2 Quality of struvite in phosphorus recovery sediment from the hydrolysate of excess sludge

2.2 PROMETHEE II 分析方法优选污泥处理方案

结合实际实验过程中具体时间、成本损耗、操作情况以及图 2 中磷回收实验结果, 对 6 种污泥水解方案评分方式见表 2。

6 种污泥预处理方式针对 6 种不同指标的评分结果如表 3。

根据表 1 和式(1)范例, 本实验中分别考虑产品品质和时间经济两个方面的因素对方案选取的影响, 因此 A-B 决策矩阵分为两种: 优先考虑产品品质 [式(9)] 和优先考虑时间经济 [式(10)], 如下所示:

$$A_{A-B\text{产品品质}} = \begin{vmatrix} 1 & 9 & 1/2 \\ 1/9 & 1 & 1/9 \\ 2 & 9 & 1 \end{vmatrix} \quad (9)$$

$$A_{A-B\text{时间经济}} = \begin{vmatrix} 1 & 9 & 2 \\ 1/9 & 1 & 1/9 \\ 1/2 & 9 & 1 \end{vmatrix} \quad (10)$$

使用 MATLAB 计算 $A_{A-B\text{产品品质}}$, 得到 $\lambda_{\max} = 3.053\ 6$, 特征向量归一化处理后, $W = (0.366\ 6, 0.051\ 3, 0.582\ 1)$, 通过式(3)可计算出, 总体一致性指数为: $CI = 0.026\ 8$, 维数为 3, $RI = 0.58$, 经式(3)可得, $CR = 0.046 < 0.1$, 矩阵 A 符合一致性^[26], 层次排序有效. 然后, 进行余下层次单排序和层次总排序计算, 构造 B-C 判断矩阵如式(11), 经过式(3)

和式(4)共同计算, $A-C1$ 整体一致性指数为: $CI_{A-C1} = 0.005$, $RI_{A-C1} = 0.21$, $CR = 0.024 < 0.1$ (符合一致性); 同理计算 $A_{A-B\text{时间经济}}$, 得到 $\lambda_{\max} = 3.053\ 6$, 特征向量归一化处理后, $W = (0.582\ 1, 0.051\ 3, 0.366\ 6)$, 后经上述重复检验, 矩阵亦符合一致性. 最终通过 MATLAB 获得各层次参数的平均权重系数, 见表 4.

$$A_{B-C1} = \begin{vmatrix} 1 & 1/9 & 1/3 \\ 9 & 1 & 5 \\ 3 & 1/5 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A_{B-C2} = 1 \text{ 时}$$

$$A_{B-C3} = \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{vmatrix} \quad (11)$$

表 2 污泥处理方式指标评价标准

Table 2 Evaluation criteria of sludge treatment plan indicators

评分	等级	C1 (所需时间)/h	C2 (预处理成本)	C3 (外加氮量) /mg·L ⁻¹	C4 (操作难度)	C5 (鸟粪石产量;以 SS 计) /mg·g ⁻¹	C6 (鸟粪石纯度)
9	优	0~50	成本低廉	<50	易	>180	0.90~1.00
7	良	50~100	成本较低	50~100	较易	140~180	0.80~0.90
5	中	100~150	成本一般	100~150	一般	100~140	0.70~0.80
3	差	150~200	成本较高	150~200	较难	50~100	0.60~0.70
1	劣	>200	成本高昂	>200	难	<50	<0.6

表 3 各种预处理方式评分结果

Table 3 Evaluation of sludge treatment plan indicators

磷回收方案	B1 时间和经济			B2 技术参数		B3 产品品质	
	C1 所需时间	C2 预处理成本	C3 外加氮量	C4 操作难度	C5 鸟粪石产量	C6 鸟粪石纯度	
酶水解	9	1	1	9	9	7	
酶-厌氧	3	1	7	7	9	7	
热水解	9	7	5	7	5	7	
热-厌氧	3	5	9	5	7	7	
厌氧水解	3	7	9	7	5	1	
游离亚硝酸-厌氧	1	7	9	5	5	1	

表 4 各层次参数的平均权重系数

Table 4 Average weight coefficient of influencing factors at each level

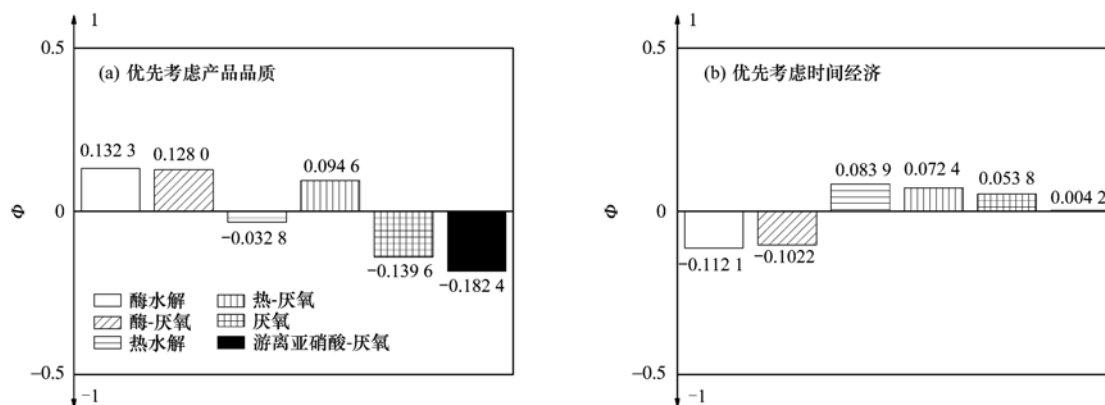
产品品质优先				时间经济优先			
B		C		B		C	
参数	权重	参数	权重	参数	权重	参数	权重
B1	0.366 6	C1	0.025 8	B1	0.582 1	C1	0.040 9
		C2	0.275 5			C2	0.437 4
		C3	0.065 3			C3	0.103 7
B2	0.051 3	C4	0.051 3	B2	0.051 3	C4	0.051 3
B3	0.582 1	C5	0.436 6	B3	0.366 6	C5	0.275 0
		C6	0.145 5			C6	0.091 6

运用 PROMETHEE II 进行分析, 根据式(5)偏好函数计算得出 $P_k(a_i, a_j)$, 再进一步通过式(6)得到方案之间的优先指数 $\pi(a_i, a_j)$, 优先指数用来表示一个方案优于另一个方案的可能性. 例如, $\pi(a_i,$

$a_j)$ 表示 a_i 方案相较 a_j 方案来说更优的可能性. 最后通过式(7), 分别得到产品品质优先和时间经济优先条件下 6 种备选方案的 Φ 值, Φ 值作为综合优先序级别值, 值的大小能够直接反映各种方案的优劣

情况^[27]. 经过式(6)和式(7)计算, 6 个方案的综合优序级别值如图 3 所示, 从而得到备选方案的全排序, 在优先考虑产品品质的条件[图 3(a)]: 酶水解 > 酶-厌氧 > 热-厌氧 > 热水解 > 厌氧水解 > 游离亚

硝酸-厌氧; 在优先考虑时间经济的条件[图 3(b)]: 热水解 > 热-厌氧 > 厌氧水解 > 游离亚硝酸-厌氧 > 酶-厌氧 > 酶水解. PROMETHEE II 的具体计算步骤在文献[28]中有详细说明.



Φ 值为综合优序级别值, 直接反应方案的优劣情况

图 3 PROMETHEE II 对污泥处理方案选择的分析结果

Fig. 3 PROMETHEE II analytical result for sludge treatment plans

3 结论

(1) 本文将 AHP-PROMETHEE II 法应用到污泥处理方案决策分析过程中, 为鸟粪石法回收污泥中的磷选择最佳污泥预处理方案. 使用层次分析法对不同污泥处理方案指标体系以及各指标权重值进行确定, 再通过 PROMETHEE II 分析方法从时间经济、技术参数和产品品质几个方面对 6 种不同污泥处理方案进行综合评价.

(2) 在优先考虑产品品质的条件下, 即综合考虑鸟粪石产量和鸟粪石纯度的情况下, 采用酶水解以及酶-厌氧水解的方案更好; 在优先考虑时间经济的条件下, 即综合考虑所需时间、预处理成本和外加氮量的情况下, 采用热水解以及热-厌氧水解的方案更好.

(3) AHP-PROMETHEE II 法可为复杂的多层次多属性方案提供有效可靠的决策依据, 兼顾决策者的不同侧重以及实际情况, 最终得到方案全排序, 确定最优工程应用方案.

参考文献:

- [1] 郝晓地, 李季, 李爽, 等. 从污水中技术回收氮不具经济性[J]. 中国给水排水, 2017, 33(20): 28-33.
Hao X D, Li J, Li S, et al. Nitrogen recovery from wastewater: no benefit in economy[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(20): 28-33.
- [2] 薛涛, 黄霞, 郝王娟. 剩余污泥热处理过程中磷、氮和有机碳的释放特性[J]. 中国给水排水, 2006, 22(23): 22-25.
Xue T, Huang X, Hao W J. Characteristics of phosphorus, nitrogen and total organic carbon release in thermal excess sludge treatment process[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(23): 22-25.
- [3] 畅萧, 曾薇, 王保贵, 等. 从剩余污泥厌氧发酵上清液中以

鸟粪石形式回收磷[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 4169-4176.

Chang X, Zeng W, Wang B G, et al. Recovery of phosphorus in the form of struvite from the anaerobic fermentation supernatant of excess sludge[J]. Environmental Science, 2019, 40(9): 4169-4176.

- [4] 成雪君, 王学江, 王浩, 等. 载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5139-5145.

Cheng X J, Wang X J, Wang H, et al. Simultaneous recovery of nutrients from wastewater by mesoporous MgO-loaded natural zeolital[J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5139-5145.

- [5] Bi W, Li Y Y, Hu Y Y. Recovery of phosphorus and nitrogen from alkaline hydrolysis supernatant of excess sludge by magnesium ammonium phosphate[J]. Bioresource Technology, 2014, 166: 1-8.

- [6] 袁悦, 谭学军, 郑舍予. 基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3216-3222.

Yuan Y, Tan X J, Zheng S Y. Evaluation of organic matter release and economy for various pretreatments of sewage sludge[J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 3216-3222.

- [7] 王治军, 王伟, 李芬芳. 污泥热水解技术的发展及应用[J]. 中国给水排水, 2003, 19(10): 25-27.

- [8] García-Cascallana J, Borge-Díez D, Gómez X. Enhancing the efficiency of thermal hydrolysis process in wastewater treatment plants by the use of steam accumulation[J]. International journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16(7): 3403-3418.

- [9] Xu Q X, Liu X R, Zhao J W, et al. Feasibility of enhancing short-chain fatty acids production from sludge anaerobic fermentation at free nitrous acid pretreatment: role and significance of tea saponin[J]. Bioresource Technology, 2018, 254: 194-202.

- [10] Wei W, Wang Q L, Zhang L G, et al. Free nitrous acid pretreatment of waste activated sludge enhances volatile solids destruction and improves sludge dewaterability in continuous anaerobic digestion[J]. Water Research, 2018, 130: 13-19.

- [11] 李玉龙, 曹海军, 纪豪, 等. 双酶协同水解剩余污泥条件优化[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(11): 6649-6654.
- Li Y L, Cao H J, Ji H, *et al.* Effect of double enzyme hydrolysis of residual sludge and optimize [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(11): 6649-6654.
- [12] 耿娜瑶. 酶促厌氧污泥水解研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- Geng Y N. A study of enhanced hydrolysis of anaerobic sludge by enzymes[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- [13] Liu X L, Li A J, Ma L S, *et al.* A comparison on phosphorus release and struvite recovery from waste activated sludge by different treatment methods[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2020, **148**: 104878.
- [14] Liu H B, Xiao H, Yin B, *et al.* Enhanced volatile fatty acid production by a modified biological pretreatment in anaerobic fermentation of waste activated sludge[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **284**: 194-201.
- [15] Pilli S, Yan S, Tyagi R D, *et al.* Thermal Pretreatment of sewage sludge to enhance anaerobic digestion: a review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2015, **45**(6): 669-702.
- [16] Zhang L G, Duan H R, Ye L, *et al.* Increasing capacity of an anaerobic sludge digester through FNA pre-treatment of thickened waste activated sludge[J]. Water Research, 2019, **149**: 406-413.
- [17] Jin P K, Ren W A, Liang C G, *et al.* The study on the separate collection and nutrients recovery of urine in municipal wastewater [J]. Desalination and Water Treatment, 2014, **52**(25-27): 5031-5036.
- [18] Stratful I, Scrimshaw M D, Lester J N. Conditions influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate[J]. Water Research, 2001, **35**(17): 4191-4199.
- [19] 李吉鹏, 马丽, 陆志强. 运用模糊层次分析法优选制浆造纸废水深度处理方案[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(11): 4089-4096.
- Li J P, Ma L, Lu Z Q. Selection of advanced wastewater treatment process for pulp and paper industry based on the fuzzy analytical hierarchy process methods [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(11): 4089-4096.
- [20] 王建军, 杨德礼. 基于 AHP-PROMETHEE II 的外包信息系统脆弱性评价模型[J]. 管理工程学报, 2010, **24**(2): 94-99.
- Wang J J, Yang D L. An evaluation model for outsourcing information systems vulnerability based on AHP and PROMETHEE II [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2010, **24**(2): 94-99.
- [21] 李安婕, 全向春, 王龔, 等. 基于 PROMETHEE II 法的污染场地土壤修复技术筛选及应用[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(10): 3767-3773.
- Li A J, Quan X C, Wang Y, *et al.* Selection of contaminated site soil remediation technology based on PROMETHEE II [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(10): 3767-3773.
- [22] Brans J P, Mareschal B. The PROMCALC & GAIA decision support system for multicriteria decision aid [J]. Decision Support Systems, 1994, **12**(4-5): 297-310.
- [23] 聂曦, 张琦, 姚群. 层次分析法在生活垃圾处置方案优选中的应用[J]. 工业安全与环保, 2004, **30**(12): 18-20, 17.
- Nie X, Zhang Q, Yao Q. Application of analytical hierarchy process in program optimization of municipal solid waste [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2004, **30**(12): 18-20, 17.
- [24] Kessili A, Benmamar S. Prioritizing sewer rehabilitation projects using AHP-PROMETHEE II ranking method[J]. Water Science & Technology, 2016, **73**(2): 283-291.
- [25] Hao X D, Wang C C, Lan L, *et al.* Struvite formation, analytical methods and effects of pH and Ca^{2+} [J]. Water Science & Technology, 2008, **58**(8): 1687-1692.
- [26] Saaty T L. Decision making for leaders[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1995, SMC-15(3): 450-452.
- [27] 许志煥, 赵金辉. 基于 PROMETHEE 法的电镀废水处理技术评价[J]. 电镀与环保, 2016, **36**(1): 51-54.
- Xu Z H, Zhao J H. Evaluation of electroplating wastewater treatment technology based on PROMETHEE method [J]. Electroplating & Pollution Control, 2016, **36**(1): 51-54.
- [28] Brans J P, Vincke P. A preference ranking organisation method: (The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making) [J]. Management Science, 1985, **31**(6): 647-656.

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 Ebirur 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)