

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

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

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012 ~ 2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)	

高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律

卓杨¹, 韩芸^{1*}, 程瑶¹, 彭党聪¹, 李玉友^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 日本东北大学大学院工学研究科土木工学专攻, 仙台 980-8579, 日本)

摘要:以城市污水处理厂脱水污泥为对象,探讨其在165℃下经50 min水热预处理的碳、氮、磷、硫转化规律。结果表明,水热预处理可有效水解污泥中有机组分,VSS水解率达43.35%。碳、氮、磷、硫在水热预处理过程中表现出不同的转化规律,蛋白质和碳水化合物的水解率分别为54.36%和65.12%,溶解态有机物的主要组分为溶解态蛋白质(52.18%);不溶态有机氮的水解率54.23%,氨氮占溶解态凯氏氮的22.13%,水解液中的氮主要以有机氮形式存在;总磷水解率为30.52%,磷酸盐占溶解态总磷的79.84%,说明在水热预处理过程中聚磷酸盐在聚磷菌细胞破碎后极易被水解为磷酸盐;总硫水解率为50.03%,硫化物占溶解态总硫的0.50%,而有机硫很难水解为硫化物。通过水热预处理后物质转化及组分分析,旨在为高含固污泥有效处理提供一定的理论参考。

关键词:高含固污泥;水热预处理;物质转化;水解产物;水解液

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2015)03-1006-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.033

Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content

ZHUO Yang¹, HAN Yun^{1*}, CHENG Yao¹, PENG Dang-cong¹, LI Yu-you^{1,2}

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan)

Abstract: The transformation characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur in dewatering sludge from municipal wastewater treatment plant (WWTP) were investigated after thermal hydrolysis pretreatment at 165℃ for 50 min. The results showed that the hydrolysis efficiency of VSS could reach as high as 43.35%. 54.36% of protein and 65.12% of carbohydrate were transferred to dissolved organics, respectively, and the main component of dissolved organic matter in hydrolysate was dissolved protein (52.18%). 54.23% of insoluble organic nitrogen was turned into dissolved nitrogen and 22.13% of dissolved nitrogen in hydrolysate was converted to ammonia. The transformation rate of insoluble phosphorus was 30.52%. Dissolved phosphorus was mostly transformed to phosphate (79.84%) as phosphorus-accumulating bacteria cells were crushed. 50.03% of insoluble organic sulfur was hydrolyzed, and little change was detected in sulfide (0.50%). The analysis results of the organic compounds transformation are valuable for treatment of the thermal hydrolysis pretreated sludge with high solid content.

Key words: sludge with high solid content; thermal hydrolysis pretreatment; substance transformation; hydrolysis product; hydrolysate

城市污水处理厂污泥处理投资大、运行成本高,已成为亟待解决的重要环境问题之一^[1]。传统污泥厌氧消化工艺可将污泥中的有机物转化为沼气,在实现污泥稳定的同时回收能量,是目前污泥处理的主要方法,但普遍存在消化效率低的缺点。水解是厌氧消化的速率控制步骤^[2],水热预处理可有效提高污泥水解及污泥厌氧消化速率^[3,4]。常规含水率污泥(含固率为3%~5%)进行水热预处理时,由于污泥含水率高,大量热量消耗在加热污泥中的水分上,导致能耗过大。如采用高含固污泥(含固率大于10%)进行水热预处理,则可大大提高生物质能转化效率并降低整个工艺能耗^[5,6],同时提高消化池负荷及厌氧消化效率^[7]。

水热预处理是指在高温环境下,污泥中的微生

物细胞壁被破坏,胞内有机物释放至水中并被水解为溶解态有机物,这些溶解态复杂有机物中的一部分可能被水解为小分子有机物甚至无机物,具体指标表现为VSS下降及水解产物的产生。影响水解的主要因素包括温度、时间及含固率等。目前研究得出的水热预处理最佳条件为:160~180℃、30~60 min^[8,9]。综合考虑到水热预处理过程中的能耗及污泥流动性对传质的影响,在处理高含固污泥时其含固率为9%~10%为最佳^[10]。水热预处理对污泥各项指标影响很大,如含固率为9%的污泥经170℃、

收稿日期:2014-07-15; 修订日期:2014-10-29

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07315-001-04);国家自然科学基金项目(51408458)

作者简介:卓杨(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为污泥厌氧消化,E-mail:zy21009@126.com

* 通讯联系人:E-mail:hanyun@xauat.edu.cn

30 min 预处理后 COD 水解率为 40%、VSS 水解率接近 45%。同时水热预处理过程中 VSS 的水解符合一级反应动力学模型,水解速度常数与温度的关系符合 Arrhenius 方程^[11]。荀锐等以 10% 含固率脱水污泥为对象经 170℃ 水热预处理后进行压滤脱水研究发现泥饼的含水率可降至 50% 左右^[12]。

目前的研究多集中在对水热预处理过程中 VSS 水解动力学分析、水热后污泥脱水性能等方面,但关于水解液的组分分析研究较少,而水解液的组分研究对水解过程的认识及水热预处理后污泥的后续利用具有重要意义。本研究对水热预处理前、后的高含固污泥中的碳、氮、磷和硫存在形式及组分构成进行分析,开展水热预处理过程中的组分转化分析,旨在为污泥水热预处理提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验污泥

试验污泥取自西安市某污水处理厂脱水污泥,该厂生物处理工艺为 A²/O,试验期间污水厂处于扩建阶段,脱水污泥中剩余污泥的比例大于 70%。将脱水污泥用自来水稀释至含固率 10% 作为试验污泥。试验污泥主要指标为: TS 101.97 g·L⁻¹、SS 101.05 g·L⁻¹、VS 71.05 g·L⁻¹、VSS 66.00 g·L⁻¹、TCOD 93.56 g·L⁻¹、pH 7.13、VFA 0.25 g·L⁻¹。泥样于 4℃ 冰箱保存待用。

1.2 试验装置

水热预处理设备包括加热装置及水热反应容

器。加热装置使用国华 HH-S 型油浴锅,加热用油为二甲基硅油、加热温度 165℃、加热时间 50 min。水热反应容器采用 KH-200 型不锈钢聚四氟乙烯内衬消解罐,工作温度 <250℃、工作压力 <3 MPa。

通过前期试验研究,考虑到能耗、污泥的 VSS 水解率及流动性、美拉德产物等因素,选定 165℃、50 min 为最佳条件,本试验也是基于此条件进行研究。

1.3 组分转化路径及表征指标

高含固污泥水热预处理过程中有机物的转化路径见图 1。

(1) 常规水解指标 表征污泥中不溶态有机物在水热预处理后的水解效果。通过 VSS 的减量来表征细胞壁被破坏后不溶态有机物的减少量,通过 SCOD 的增量来表征由于胞内有机物被释放及水解至液相后溶解态有机物增加量。

(2) 有机物水解指标 污泥中 VSS 主要组分为蛋白质、碳水化合物、脂肪等。通过对蛋白质、碳水化合物的测定来反映水热预处理前后蛋白质与碳水化合物的变化。测定可挥发有机酸(VFA)来反映水热预处理后有机酸的生成。

(3) 氮和硫的转化分析 有机氮及有机硫(含硫蛋白质特有)在污泥中主要存在于蛋白质中,随着蛋白质的水解,有机氮及有机硫转化至液相并进一步水解为氨氮及硫化物^[13]。通过测定总凯氏氮、溶解态总凯氏氮及氨氮反映水热预处理后氮的转化;通过测定不溶态总硫、溶解态总硫、溶解态硫

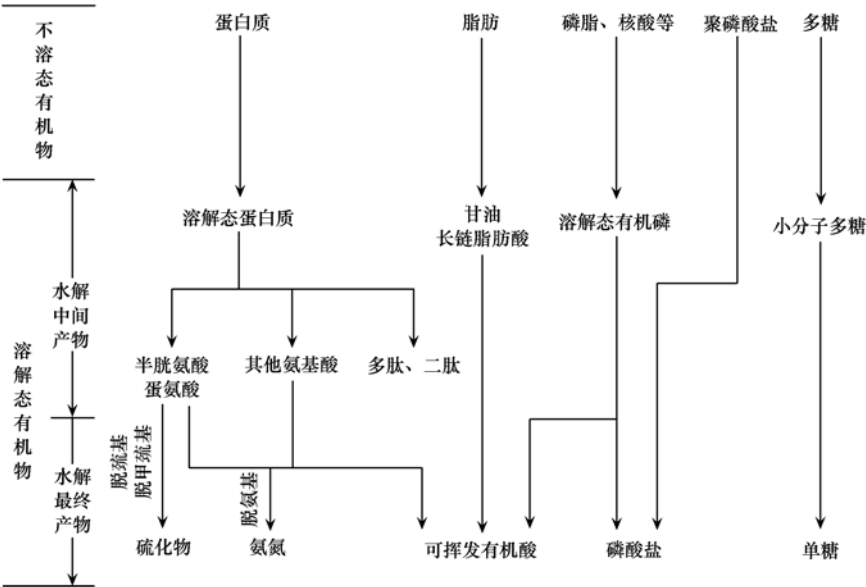


图 1 高含固污泥水热预处理过程中有机物的转化路径

Fig. 1 Organics transformation during thermal hydrolysis pretreatment of sludge with high solid content

化物及不溶态硫化物可以反映水热预处理后硫的转化。

(4) 磷的转化分析 磷在污泥中存在形式为磷脂、核酸及聚磷酸盐(聚磷菌特有)等,分别测定总磷、溶解态总磷及磷酸盐来反映水热预处理后磷的转化。

1.4 测试项目及方法

样品预处理方法:将污泥离心后(Eppendorf 5804R 离心机、 $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 15 min),取上清液经快速定性滤纸过滤测定溶解态指标;取离心后底部污泥进行烘干、研磨,进行不溶态指标的测定。

常规指标测定方法:TS、SS、VS、VSS 采用重量法进行测定;COD 采用重铬酸钾法测定;碱度采用酸碱指示剂滴定法测定;pH 采用上海精科 PHS-3C pH 计测定;碳水化合物采用苯酚-硫酸法测定,以葡萄糖为标准样品^[14];蛋白质采用 Folin-酚法测定,以牛血清蛋白作为标准样品^[15];VFA 采用

BEIFEN Corp. 3420A 气相色谱仪,使用 FID 检测器、BB-WAX123-7033 毛细柱($30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.15\text{ mm}$),测定条件为进样口温度 150°C 、柱箱温度 230°C 、检测器温度 250°C 。

氮指标测定方法:凯氏氮、溶解态凯氏氮及氨氮采用海能 K9860 全自动凯氏定氮仪测定。

硫指标测定方法:不溶态总硫及溶解态总硫经硝酸-高氯酸氧化,然后采用铬酸钼分光光度法测定^[16];硫化物经乙酸锌-NaOH 预处理样品后进行酸化-吹气,然后采用对氨基二甲基苯胺光度法测定^[17]。

磷指标测定方法:总磷、溶解态总磷及磷酸盐测定方法为钼酸铵分光光度法。

1.5 水解率的计算

水解率(以百分数计)表示不溶态物质(VSS、蛋白质、碳水化合物、不溶态总氮、不溶态有机硫、不溶态总磷)经水热预处理后的降低率,水解率的计算见式(1)~(6)。

$$\text{VSS 水解率} = \frac{\text{VSS}_{\text{前}} - \text{VSS}_{\text{后}}}{\text{VSS}_{\text{前}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{蛋白质水解率} = \frac{\text{不溶态蛋白质}_{\text{前}} - \text{不溶态蛋白质}_{\text{后}}}{\text{不溶态蛋白质}_{\text{前}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{碳水化合物水解率} = \frac{\text{不溶态碳水化合物}_{\text{前}} - \text{不溶态碳水化合物}_{\text{后}}}{\text{不溶态碳水化合物}_{\text{前}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{不溶态有机氮水解率} = \frac{\text{不溶态有机氮}_{\text{前}} - \text{不溶态有机氮}_{\text{后}}}{\text{不溶态有机氮}_{\text{前}}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{不溶态有机硫水解率} = \frac{\text{不溶态有机硫}_{\text{前}} - \text{不溶态有机硫}_{\text{后}}}{\text{不溶态有机硫}_{\text{前}}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{不溶态总磷水解率} = \frac{\text{不溶态总磷}_{\text{前}} - \text{不溶态总磷}_{\text{后}}}{\text{不溶态总磷}_{\text{前}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中,下标“前”代表水热预处理前、“后”代表水热预处理后。

2 结果与分析

2.1 水热预处理前、后污泥特性

水热预处理前、后污泥特性见表 1。

2.2 常规水解指标

高含固污泥在 165°C 下经 50 min 水热预处理后 VSS 由 $66.00\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $37.39\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,水解率为 43.35%。对比含固率 13% 的脱水污泥在 170°C 下经 30 min 水热预处理后 VSS 水解率为 43% 的结果^[10],说明水热预处理可以有效水解污泥中的 VSS。水热预处理后蛋白质水解率为 54.36%、碳水化合物水解率为 65.12%,蛋白质和碳水化合物均能被有效水解。水热预处理后 SS 由 $101.05\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$

降至 $65.49\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,减少量为 $35.56\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,污泥中部分固态物质被溶解。

水热预处理后 pH 由 7.13 降至 5.40,说明在水热预处理过程中有酸性物质的产生。水热预处理过程中一部分大分子有机物(如蛋白质、脂肪酸等)水解为酸性物质^[18],从而导致水解液 pH 值降低。

2.3 有机物水解指标

水热预处理后水解液的 SCOD 增加量为 $42.30\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{SCOD}_{\text{增加量}}/\text{VSS}_{\text{减少量}}$ 为 1.48,即水解 1 g VSS 能产生 1.48 g COD,这与朱明权所研究的一般城市污水 COD/VSS 为 1.48 的结论相近^[19]。1 g 细胞的 COD 值为 1.42 g(通式为 $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$ 时),即 1 g 细胞完全水解产生的 COD 为 1.42 g,同理,1 g 蛋白质(通式为 $\text{C}_{16}\text{H}_{24}\text{O}_5\text{N}_4$ 时)的 COD 值为 1.50 g、碳水化合物(通式为 CH_2O 时)为 1.07 g COD、脂肪(通

式为 $C_8H_{16}O$ 时) 为 2.88 g COD . 而不同污泥中蛋白质、碳水化合物、脂肪等的比例不同会对 COD/VSS 值产生影响, 本试验污泥由于蛋白质质量浓度较高而导致该值略高.

表 1 水热预处理前、后污泥特性¹⁾

Table 1 Characteristics of sludge before and after thermal hydrolysis pretreatment								
指标	预处理前	预处理后	水解率/%	指标	预处理前	预处理后	水解率/%	
SS	101.05	65.49	35.19	蛋白质	不溶态	47.52	21.69	54.36
VSS	66.00	37.39	43.35		溶解态	1.87	22.07	
pH	7.13	5.40		碳水化合物	不溶态	13.00	4.54	65.12
SCOD	2.11	44.41			溶解态	0.60	9.26	
VFA	0.25	4.21		有机氮	不溶态	5.98	2.74	54.23
碱度	0.67	4.23			溶解态	0.06	2.51	
不溶态总磷	1.94	1.35	30.52	有机硫	不溶态	1.39	0.70	50.03
溶解态有机磷	0.19	0.11			溶解态	0.11	0.82	
磷酸盐	0.05	0.70		硫化物/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	溶解态	1.88	5.46	
氨氮	0.27	1.06			不溶态	0.00	0.30	

1) 表中单位除 pH、硫化物外, 其余均为 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

在 165°C 下经 50 min 水热预处理后, 污泥的总蛋白质降低了 $5.63\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 水解液的溶解性蛋白质增加 $20.20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 溶解性碳水化合物增加了 $8.66\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 高含固污泥水热预处理后水解液中溶解态有机物组成见图 2. 从中可知, 水热后溶解态有机物主要组分为溶解态蛋白质 (52.18%)、其次为溶解态碳水化合物 (占 20.49%), 两者合计占 70% 以上的 SCOD, 因此水热预处理后溶解性有机物主要是蛋白质及碳水化合物. 这与肖本益等对剩余污泥进行 120°C 热处理后溶解性蛋白质与碳水化合物大量增加的结论相同^[20], 说明常规污泥与高含固污泥在水热预处理过程中对碳转化规律相近.

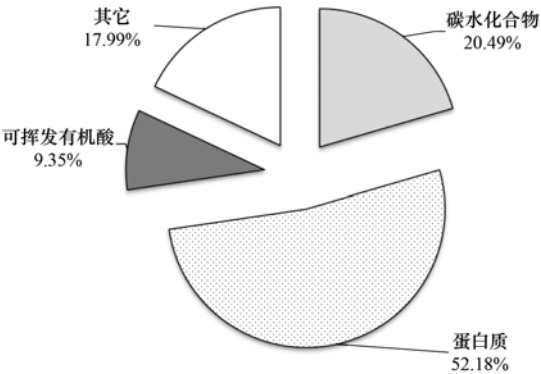


图 2 高含固污泥水热预处理后溶解态有机物组成
Fig. 2 Constitution of dissolved organics after thermal hydrolysis pretreatment

水热预处理后污泥中总碳水化合物的质量浓度没有发生较大变化, 说明多糖在水热预处理中仅仅水解至单糖, 并未水解至 VFA. 预处理后污泥中总蛋白质质量浓度下降了 $5.63\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 是因为一部分蛋白质被完全水解, 生成氨氮、VFA 等^[13]. 预处理

后水解液中 VFA 质量浓度由 $0.25\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至 $4.21\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 占 SCOD 的 9.35%, 其中 C2 ~ C6 脂肪酸的生成量较少, 说明大分子有机物仅少量被水解为简单有机物, 大量以溶解态蛋白质及溶解态碳水化合物形式存在.

2.4 氮转化指标

污泥中氮的主要组成为不溶态有机氮、溶解态有机氮及氨氮. 不溶态有机氮主要为蛋白质, 溶解态有机氮主要包括氨基酸等, 氨氮作为水解过程中的最终产物. 高含固污泥的水热预处理前、后氮的转化见图 3.

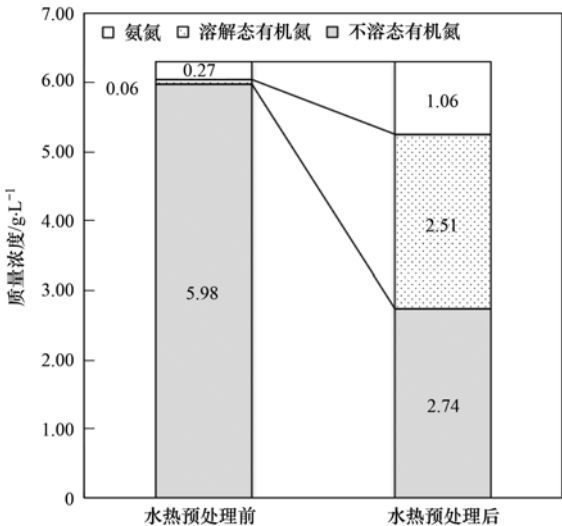


图 3 高含固污泥水热预处理前、后氮的转化

Fig. 3 Transformation of nitrogen before and after thermal hydrolysis pretreatment

污泥中的总氮质量浓度在 165°C 、50 min 水热预处理前后保持平衡. 水解液的溶解态总凯氏氮由 $0.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 $3.57\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮由 $0.27\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增

至 $1.06 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水热预处理后污泥中不溶态有机氮、溶解态有机氮及氨氮分别占总氮的 43.35%、39.35% 及 16.75%，水解液中的氮主要以有机氮的形式存在。不溶态有机氮的水解率为 54.23%，由于不溶态有机氮主要来自于蛋白质，其水解率也与蛋白质水解率数值接近。

水解液中氨氮占溶解态总凯氏氮的比例为 22.13%，水热预处理后仅一部分氨基酸在脱氨基的作用下生成了氨氮，氮在水解液中主要以有机氮的形式存在。这与薛涛等研究水热预处理对剩余污泥的氮释放的影响时发现释放出的氮主要是有机氮的结论相同^[21]，说明常规污泥与高含固污泥在水热预处理过程中对氮转化规律相近。

2.5 磷转化指标

高含固水热污泥预处理前、后磷的转化见图 4。水热预处理后污泥总磷质量浓度仅降低 $0.02 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，预处理前后基本保持平衡。水解液的溶解态总磷由 $0.24 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $0.81 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，总磷的水解率仅 30.52%，低于氮、蛋白质及碳水化合物水解率。这可能由于磷的最终水解产物磷酸盐可以与金属离子结合生成不溶态磷酸盐（如磷酸钙）有关，而这部分未计算在水解率内。

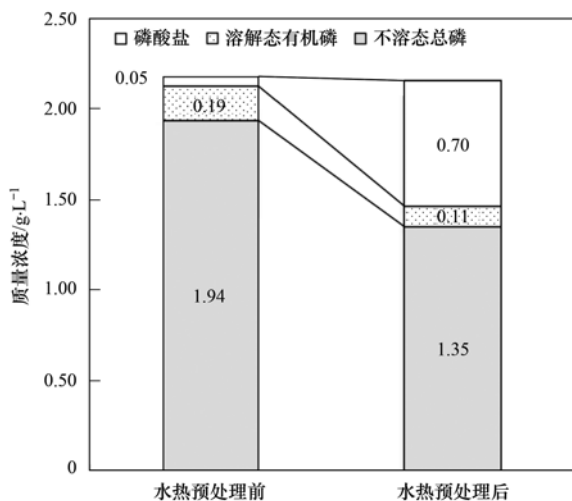


图4 高含固污泥水热预处理前、后磷的转化

Fig. 4 Transformation of phosphorus before and after thermal hydrolysis pretreatment

水热预处理后水解液中磷酸盐由 $0.05 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $0.70 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水热预处理后水解液中溶解态总磷质量浓度为 $0.81 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，有机磷质量浓度为 $0.11 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，磷酸盐质量浓度为 $0.70 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水解液中磷酸盐占溶解态总磷的质量分数为 79.84%，水热处理后水解液中的磷主要存在形态为磷酸盐。这与薛

涛等^[21]研究水热预处理对剩余污泥的磷释放的影响时发现释放出的磷主要是磷酸盐的结论相同，说明常规污泥与高含固污泥在水热预处理过程中对磷转化规律相近。

2.6 硫转化指标

高含固污泥水热预处理前、后硫的转化见图 5。水热预处理前污泥中总硫质量浓度为 $1.50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，折合质量分数约为 1.49%，一般城市污水处理厂污泥总硫质量分数为 0.3% ~ 2.3%^[22]。污泥总硫质量浓度在预处理前后基本保持平衡。水热预处理后溶解态总硫质量浓度由 $0.11 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $0.82 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，不溶态有机硫的水解率为 50.03%，含硫蛋白质中的有机硫可以有效从细胞中释放并水解至液相。

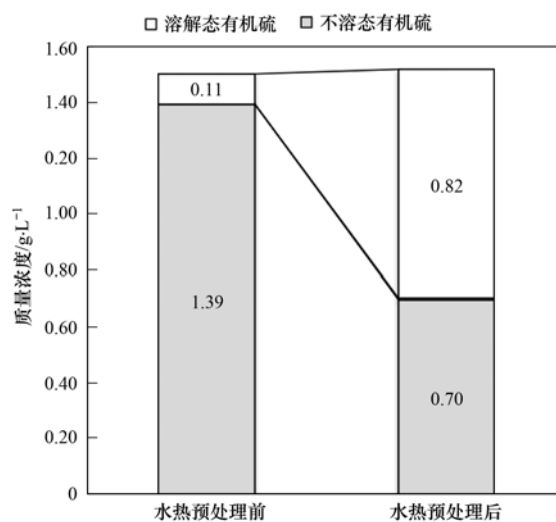


图5 高含固污泥水热预处理前、后硫的转化

Fig. 5 Transformation of sulfur before and after thermal hydrolysis pretreatment of sludge with high solid content

水热预处理后溶解态硫化物由 $1.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增长至 $5.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由于一部分硫化物与金属离子结合生成沉淀，不溶态硫化物由 $0.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水热预处理后总硫化物与溶解态总硫的比例为 0.50%，有机硫很难水解为硫化物，水解液中硫主要以溶解态有机硫形式存在。

3 讨论

3.1 碳的转化

高含固污泥在 165°C 经 50 min 水热预处理后，水解液的主要组分为溶解态蛋白质及溶解态碳水化合物。高含固污泥水热预处理后 VSS 的水解率为 43.35%，而常规污泥厌氧消化的 VSS 去除率约为 40% ~ 50%，水热预处理可以有效加速水解进程，缩

短厌氧消化所需时间。因此,采用水热预处理和提高污泥含固率都可以有效缩短厌氧消化停留时间、减少厌氧消化装备体积,节省污泥厌氧消化工程的基建费用。

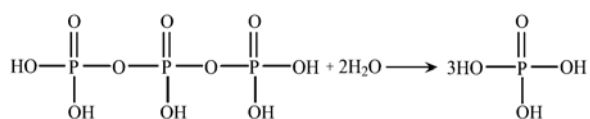
水解液中的大量有机物可被生物快速转化为乙酸,然后被产甲烷菌群转化为甲烷,完成生物质的回收。水解液的 SCOD 质量浓度为 $44.41 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,若经厌氧消化后 80% 的 SCOD 转化为甲烷,沼气中甲烷体积分数为 60%,温度为 35°C 、压力为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的状况下每克 COD 相当于 418 mL 含饱和水蒸气的甲烷^[23],经计算投加每 m^3 水热预处理后高含固污泥的理论沼气产气量为 $24.75 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,远超出常规城市污水处理厂常规含水率污泥消化工程的产气量^[24](投加 m^3 污泥沼气产量 $6 \sim 10 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$),不仅可以满足污泥消化系统自身能量需求,同时可以向系统外输出一部分能量。

3.2 氮的转化

水热预处理后高含固污泥的溶解态总凯氏氮的质量浓度为 $3.57 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。采用水热预处理后高含固污泥进行厌氧消化,厌氧消化池内的水解产酸菌群将水解液内的溶解态有机氮转化为氨氮后,消化池内的氨氮质量浓度将会高于 $3.50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。氨氮在碱性 pH 及温度的作用下会解离出一定量的游离氨,而游离氨会对产甲烷菌群的活性造成一定程度抑制^[7,25]。污泥经厌氧消化后脱水或直接脱水后压滤液均含有大量氨氮,针对压滤液脱氮的研究目前主要集中在厌氧氨氧化方向^[26]。

3.3 磷的转化

水解液中磷酸盐占溶解态总磷的质量分数为 79.84%,虽然不溶态磷的水解率较低,但释放出的磷酸盐比例较高,这是由于聚磷酸盐在细胞中质量分数较高且聚磷酸盐易水解。活性污泥系统中聚磷菌占活性污泥的比例约为 4%^[27],试验污泥取自采用 A²/O 系统的城市污水处理厂,聚磷菌占活性污泥比例较高,约为 5%~17%^[28]。聚磷酸盐易水解为磷酸盐,如三聚磷酸盐水解为磷酸盐,其反应式如下:



水热预处理后聚磷菌细胞内的多聚磷酸盐释放至液相并极易水解为磷酸盐,而磷脂、核酸等还需进一步水解。水热预处理后水解液的磷酸盐质量浓度为 $0.70 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,则在厌氧消化后脱水或直接脱水

压滤液中磷酸盐的质量浓度较高,目前对于压滤液的磷的资源回收相关研究主要集中在鸟粪石结晶法^[29,30]。

3.4 硫的转化

水热预处理后总硫化物与溶解态总硫的质量分数为 0.50%,有机硫很难水解为硫化物,说明水热预处理对含硫氨基酸的脱巯基及脱甲巯基效果有限。在水热预处理中,氨基及硫化物分别由氨基酸脱氨基及含硫氨基酸脱巯基、甲巯基生成,水热预处理后水解液中氨氮较多而硫化物较少,这可能是由于在水热预处理过程中氨基酸脱氨基作用较脱巯基、甲巯基作用更容易发生。高含固污泥在水热预处理后 $0.82 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溶解态总硫在生物作用下有生成大量硫化物的潜力。采用水热预处理后高含固污泥进行厌氧消化,消化池中生成的硫化物若以硫化氢形式存在将会增加沼气脱硫系统的负荷,若未被金属离子共沉淀而以溶解态硫化物的形式存在将会对消化池中的微生物活性产生抑制^[25]。

4 结论

(1)水热预处理可以有效破坏细胞壁、释放并水解有机物至液相,高含固污泥在水热预处理条件为 165°C 、50 min 下的 VSS 水解率为 43.35%。

(2)高含固污泥水热预处理后水解液中溶解态有机物增量中 52.18% 为蛋白质、20.49% 为碳水化合物、9.35% 为 VFA,水热预处理后溶解性有机物主要是蛋白质及碳水化合物。

(3)高含固污泥水热预处理后污泥中蛋白质、碳水化合物水解率分别为 54.36% 和 65.12%、不溶态有机硫、不溶态有机氮和不溶态有机磷水解率分别为 50.03%、54.23% 和 30.52%,碳、氮、磷、硫物质表现出不同的转化规律,水热预处理可以有效加速厌氧消化过程。

(4)高含固污泥水热预处理后水解液中总硫化物占溶解态总硫的 0.50%、氨氮占溶解态凯氏氮的 22.13%、磷酸盐占溶解态总磷的 79.84%。水热预处理中聚磷酸盐在聚磷菌细胞破裂后可以迅速水解,氨基酸仅有一部分水解为氨氮,而有机硫很难水解为硫化物。

参考文献:

- [1] Li H, Li C C, Liu W J, *et al.* Optimized alkaline pretreatment of sludge before anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **123**: 189-194.
- [2] Appels L, Baeyens J, Degève J, *et al.* Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge [J]. *Progress*

- in Energy and Combustion Science, 2008, **34**(6): 755-781.
- [3] 王治军,王伟. 热水解预处理改善污泥的厌氧消化性能[J]. 环境科学, 2005, **26**(1): 68-71.
- [4] 王治军,王伟. 剩余污泥的热水解试验[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(Z1): 56-60.
- [5] 何选明,王春霞,付鹏睿,等. 水热技术在生物质转换中的研究进展[J]. 现代化工, 2014, **34**(1): 26-29.
- [6] 吴静,王广启,曹知平,等. “热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3461-3465.
- [7] Duan N, Dong B, Wu B, *et al.* High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: Feasibility study [J]. Bioresource Technology, 2012, **104**: 150-156.
- [8] Carrère H, Dumas C, Battimelli A. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **183**(1-3): 1-15.
- [9] Kepp U, Machenbach I, Weisz N, *et al.* Enhanced stabilization of sewage sludge through thermal hydrolysis-three years of experience with full scale plant [J]. Water Science and Technology, 2000, **42**(9): 89-96.
- [10] 马俊伟,曹芮,周刚,等. 浓度对高固体污泥热水解特性及流动性的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1583-1589.
- [11] 王治军,王伟. 污泥热水解过程中固体有机物的变化规律[J]. 中国给水排水, 2004, **20**(7): 1-5.
- [12] 荀锐,王伟,乔玮. 水热改性污泥的水分布特征与脱水性能研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 851-856.
- [13] Shanableh A, Joma S. Production and transformation of volatile fatty acids from sludge subjected to hydrothermal treatment [J]. Water Science and Technology, 2001, **44**(10): 129-135.
- [14] Sponza T D. Extracellular polymer substances and properties of flocs in steady and unsteady-state activated sludge systems [J]. Process Biochemistry, 2002, **37**(9): 983-998.
- [15] Tatsuya S, Yoshinori H, Masateru T, *et al.* A bilayer cell-free protein synthesis system for high-throughput screening of gene products [J]. FEBS Letters, 2002, **514**(1): 102-105.
- [16] 单孝全,陈斌,铁军,等. 土壤和河流沉积物中硫的形态分析[J]. 环境科学学报, 1991, **11**(2): 172-177.
- [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.
- [18] 李孟,章蕾,张倩,等. 污泥高温热水解预处理的影响条件及机理研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, **35**(10): 115-119.
- [19] 朱明权. 利用 COD 指标进行活性污泥法系统的设计[J]. 中国给水排水, 1999, **15**(2): 18-24.
- [20] 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.
- [21] 薛涛,黄霞,郝王娟,等. 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.
- [22] Raf D, Jan B, Joris R, *et al.* Evolution of the Total Sulphur Content in Full-Scale Wastewater Sludge Treatment [J]. Environmental Engineering Science, 2009, **26**(4): 867-872.
- [23] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.
- [24] 戴前进,李艺,方先金. 城市污水处理厂不同污泥厌氧消化的产气研究[J]. 给水排水, 2007, **33**(3): 42-45.
- [25] Chen Y, Cheng J J, Creamer K S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(10): 4044-4064.
- [26] 金彪. 污泥消化液采用厌氧氨氧化工艺处理的技术实践[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(22): 57-60.
- [27] Nielsen P H, Thomsen T R, Nielsen J L. Bacterial composition of activated sludge-importance for floc and sludge properties [J]. Water Science and Technology, 2004, **49**(10): 51-58.
- [28] Wong M T, Mino T, Seviour R J, *et al.* In situ identification and characterization of the microbial community structure of full-scale enhanced biological phosphorous removal plants in Japan [J]. Water Research, 2005, **39**(13): 2901-2914.
- [29] Marti N, Ferrer J, Seco A, *et al.* Optimisation of sludge line management to enhance phosphorus recovery in WWTP [J]. Water Research, 2008, **42**(18): 4609-4618.
- [30] Münch E V, Barr K. Controlled struvite crystallization for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams [J]. Water Research, 2001, **35**(1): 151-159.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《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3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 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