

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



2019

Vol.40 No.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚 (1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣 (1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰 (1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚 (1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余 (1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉 (1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰 (1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊 (1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀 (1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰 (1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲 (1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣 (1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰 (1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超 (1645)
南昌市扬尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任 (1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰 (1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌 (1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新 (1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬 (1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫 (1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高 (1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠 (1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民 (1726)
湛江湾沉积物中六六六 (HCHs)、滴滴涕 (DDTs) 有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中 (1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳 (1742)
溶解性有机物 (DOM) 与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析 (EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪 (1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安 (1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生 (1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏 (1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳 (1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华 (1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲 (1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓 (1811)
金属有机框架 MIL-53 (Fe) 可见光催化还原水中 U (VI)	闫增元, 习海玲, 袁立永 (1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞 (1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政 (1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖 (1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕 (1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂 (1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟 (1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚 (1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启 (1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹 (1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良 (1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳 (1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand (1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔 (1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪 (1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮 (N ₂ O) 浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波 (1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋 (1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹 (1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣 (1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥 (1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青 (1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏 (1990)
《环境科学》征订启事 (1612)	《环境科学》征稿简则 (1787)
信息 (1663, 1796, 1833)	

中国市政污泥中磷的含量与形态分布

王超¹, 刘清伟², 职音², 程柳¹, 王宁¹, 李彩丹¹, 毛宇翔^{1*}

(1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454003; 2. 焦作市环境监测站, 焦作 454003)

摘要: 于2016年采集了全国46个城市的市政污泥样品, 运用SMT法测定了污泥中不同形态磷的含量。结果表明, 我国市政污泥中总磷(TP)、无机磷(IP)、非磷灰石态无机磷(NAIP)、磷灰石态无机磷(AP)、有机磷(OP)和生物有效磷(NAIP + OP)的平均含量分别为 (17.32 ± 5.13) 、 (11.71 ± 4.01) 、 (9.18 ± 3.44) 、 (3.03 ± 2.74) 、 (4.54 ± 4.23) 和 $(13.72 \pm 4.36) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中IP是污泥中磷的主要存在形态, 占TP含量的60%以上; NAIP是主要的无机磷形态, 占IP含量的66%以上。污泥中生物有效磷占TP含量的比例介于66.8%~96.1%之间, 二者呈现极显著正相关关系($r=0.942$, $P<0.01$)。市政污泥磷含量和排放量总体上呈现东高西低的空间分布规律。2016年随污泥处置排入环境的磷达到了 $1.04 \times 10^5 \text{ t}$, 其中 $1.95 \times 10^4 \text{ t}$ 随污泥农用进入土壤, $4.69 \times 10^4 \text{ t}$ 进入填埋场, $1.47 \times 10^4 \text{ t}$ 进入建筑材料中, $2.34 \times 10^4 \text{ t}$ 经垃圾焚烧进入焚烧灰, 4.50 t 被直接倾倒丢弃。与历史数据对比发现, 我国市政污泥中总磷的含量呈现先升高、后降低的变化趋势。

关键词: 市政污泥; 磷; 形态分布; 生物有效磷; 污泥处置

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1922-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809078

Contents and Forms of Phosphorous in the Municipal Sewage Sludge of China

WANG Chao¹, LIU Qing-wei², ZHI Yin², CHENG Liu¹, WANG Ning¹, LI Cai-dan¹, MAO Yu-xiang^{1*}

(1. School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Jiaozuo Environmental Monitoring Station, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Municipal sludge samples (SS) were collected from 46 cities in China in 2016. The forms in which phosphorus occurred in the SS were evaluated using the Standards, Measurements and Testing (SMT) Program. The results showed that the average contents of total phosphorus (TP), inorganic phosphorus (IP), non-apatite inorganic phosphorus (NAIP), apatite phosphorus (AP), organic phosphorus (OP), and bioavailable phosphorus (NAIP + OP) in the SS were (17.32 ± 5.13) , (11.71 ± 4.01) , (9.18 ± 3.44) , (3.03 ± 2.74) , (4.54 ± 4.23) , and $(13.72 \pm 4.36) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. IP was the main form of phosphorus in the SS, accounting for more than 60% of the TP content. NAIP was the main form of IP, accounting for more than 66% of the IP content. There was a highly significant positive correlation between TP and bioavailable phosphorus in the SS ($r=0.942$, $P<0.01$), and bioavailable phosphorus accounted for 66.8%-96.1% of the TP content. The contents of phosphorus in the SS and the amounts of phosphorus discharged via SS disposal showed a decreasing trend from the east to the west of China. In 2016, the amount of phosphorus discharged into the environment via SS disposal amounted to 1.04×10^5 tons, of which $1.95 \times 10^4 \text{ t}$ entered the soil through SS land application, $4.69 \times 10^4 \text{ t}$ entered landfill sites, $1.47 \times 10^4 \text{ t}$ entered building materials, $2.34 \times 10^4 \text{ t}$ ended up in incineration ash, and 4.50 t were directly dumped or discarded. The phosphorus content of the SS of China presented a temporal trend of first increasing and then decreasing.

Key words: municipal sludge; phosphorus; occurrence forms; bioavailable phosphorus; sludge disposal

随着我国城市化进程的加快, 城市污水处理行业发展迅速, 截至2015年, 我国共建成城镇污水处理厂6910座^[1], 污水处理厂处理能力达 $1.4 \times 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 全年累计处理污水量达 $4.10 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ^[2]。污水处理过程中会产生大量成分复杂的污泥, 2015年全国污水处理厂的湿污泥(以含水率80%计)产生量为 $3.02 \times 10^7 \text{ t}$, 预计到2020年污泥产量将突破 $6.00 \times 10^7 \text{ t}$ ^[3]。

污泥中含有大量的有机质、氮、磷、钾等植物营养物质, 土地利用能够充分利用污泥中的营养物质^[4], 减少化学肥料的施用量, 逐渐成为污泥处置的首选方式。另一方面, 污泥的长期施用会导致磷在土壤中的过量富集, 增加磷向地表水流失的风险^[5]。磷作为营养元素, 对于植物的可利用性和造

成水体富营养化的风险不仅和磷的总量有关, 更大程度上和磷元素在环境中存在的形态密切相关^[6]。磷形态的分级与其提取方法是相辅相成的, 自从20世纪30年代以来, 人们根据各自研究目的的不同, 提出了不同的磷形态分级分离方法^[7], 这些分离方法起初是针对沉积物中的磷形态分析而建立的, 对污泥样品也表现出了良好的适用性^[8]。王超等^[9]对南京市江心洲污水处理厂不同处理阶段污泥进行磷形态研究, 发现污泥中磷主要以无机磷形态存在, 无机磷中非磷灰石态无机磷是主要的赋存形态; 沈

收稿日期: 2018-09-10; 修订日期: 2018-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(21377035); 河南省高校科技创新人才支持计划项目(15HASTIT045)

作者简介: 王超(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制技术, E-mail: 18300601581@163.com

* 通信作者, E-mail: yuxiangmao@hpu.edu.cn

雪莲等^[10]以上海市两家污水处理厂为对象, 对比分析了 SMT 法与碱性过硫酸钾消解法 (APPD) 对污泥总磷的提取效果, 发现 SMT 法对污泥磷的提取较 APPD 法更为彻底, 且无机磷为污泥中磷的主要形态, 深度脱水污泥含磷量较其他处理阶段污泥大幅降低. 对于不同地域的污水处理厂, 其原污水来源和构成会有很大差别, 污水处理厂所采用的处理工艺的差别, 也会影响到污泥中磷含量和形态. 为从整体上掌握我国市政污泥磷形态, 并为污泥的合理处置和施用管理提供科学参考和理论依据, 有必要从全国各地收集污泥样品, 开展磷形态的研究.

1 材料与方法

1.1 污泥样品

本研究所用污泥样品采自全国 30 个省市的 46 个污水处理厂 (天津、香港、澳门、台湾数据暂缺), 详细情况参见文献[11], 其中安徽合肥的污泥样品为后续采集的. 采样时间集中在 2016 年 4 ~ 8 月之间. 污泥样品在现场冷冻后, 置于保温箱中快递回实验室, 经过冷冻干燥、研磨后, 置于干燥箱中密封保存.

1.2 测定方法

污泥中磷形态的测定采用欧洲标准测试测量组织提出的 SMT 协议. 如图 1 所示, SMT 法^[12, 13]将污泥中的总磷 (TP) 分为无机磷 (IP) 和有机磷 (OP), 又将无机磷分为非磷灰石态无机磷 (NAIP) 和磷灰石态无机磷 (AP), 其中 NAIP 是与铁、锰、铝的氧化物及氢氧化物结合的磷, 不稳定态磷也包含其中, AP 是包括与 Ca 结合的各种磷. 每个提取

步骤中上清液磷含量均以正磷酸盐形态用抗坏血酸法^[14]测定而得.

1.3 质量控制

(1) 空白实验 在进行样品分析前, 所有玻璃器皿用 30% 盐酸浸泡 2 h, 每批次样品测定时均设置空白实验, 确保实验过程中没有污染干扰.

(2) 平行样品 所有样品均做平行样处理, 每个样品设置 3 个平行样, 共得到 230 组不同形态实验结果, 其中有 96% 的样品测定值的相对标准偏差在 5% 以内, 仅有 4% 的测定值的相对标准偏差在 5% ~ 10% 之间.

1.4 数据收集与统计

为了解我国城市污水处理厂污泥中磷含量的时间演变特征, 对公开报道的相关资料进行筛选和整理, 筛选出了源自 60 篇文献的 399 个样本, 统计出 2001 年以前^[15]、2001 ~ 2005 年^[16~32]、2006 ~ 2010 年^[33~50] 和 2011 ~ 2015 年^[51~74] 全国污泥中磷的平均含量. 将我国城市根据地理位置划分为东部、中部、西部、南方和北方^[75], 以了解我国市政污泥中磷含量的空间分布特征.

2 结果与讨论

2.1 污泥中总磷含量及空间分布

各省、自治区、直辖市污水处理厂污泥中总磷含量的算数平均值见图 2. 可以看出, 我国市政污泥中总磷含量范围为 $7.10 \sim 27.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 服从正态分布 (S-W 检验, 统计量 = 0.955, $df = 30$, Sig. = 0.237), 算数平均值为 $(17.32 \pm 5.13) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数为 29.6%, 磷含量最高的为北京市 [$(27.60 \pm 0.42) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$], 最低的为辽宁省 [$(7.10 \pm 0.04) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$]. 从市政污泥中总磷含量的频数分布直方图中可以看出 (图 3), 我国市政污泥中总磷含量呈现正态分布, 大多 (76.7%) 集中在 $10 \sim 25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间.

将我国城市按地理位置划分为东部、中部、西部、南方和北方, 其污泥中总磷含量按照中位值 (图 4) 高低排列为东部 > 中部 > 西部, 南方 > 北方. 城市污水中磷的来源主要包括人体排泄物、各种洗涤剂和杂排水^[76], 其中人体排泄物中的磷约占生活污水中磷的 50%, 另有不超过 30% 的磷来自于洗涤剂^[77]. 我国市政污泥中磷含量由东向西逐渐减小, 南方大于北方, 主要原因可能是洗涤剂的用量东部大于西部, 南方大于北方^[75].

2.2 中国市政污泥磷含量的时间变化趋势

从表 1 可以看出, 我国 (香港、澳门、台湾资料暂缺) 市政污泥中 TP 的含量在 2006 年以前呈现持

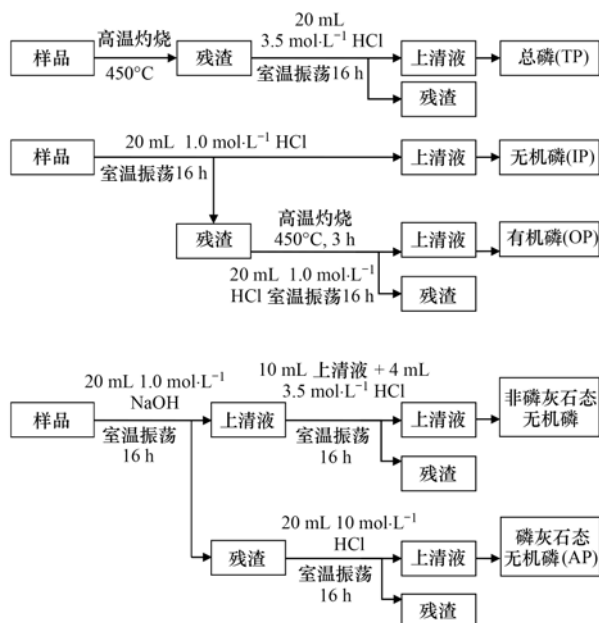


图 1 磷形态分级提取的 SMT 流程

Fig. 1 SMT protocol for the fractionation of phosphorus forms

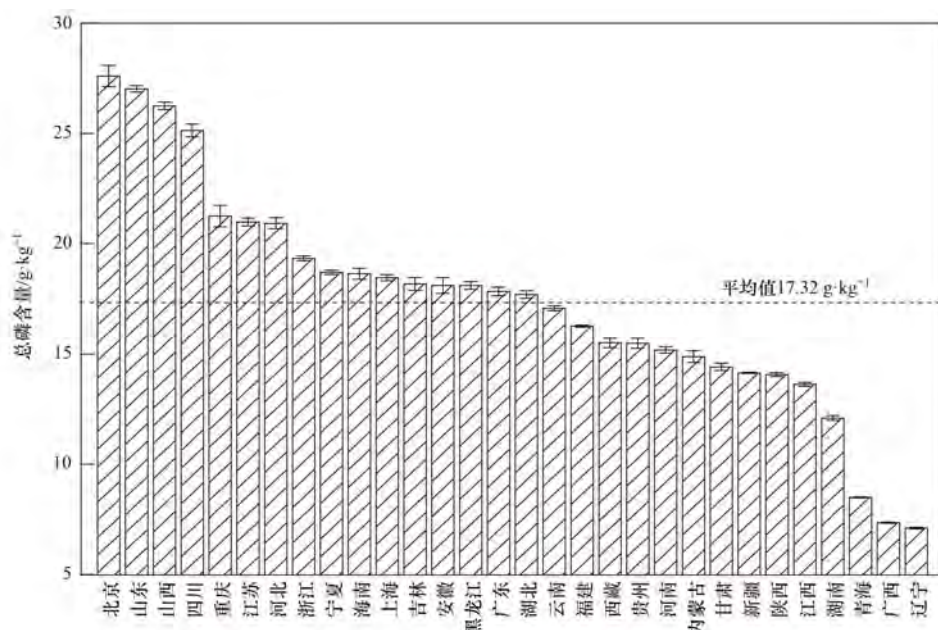


图2 市政污泥中磷的含量

Fig. 2 Phosphorus contents in municipal sewage sludge

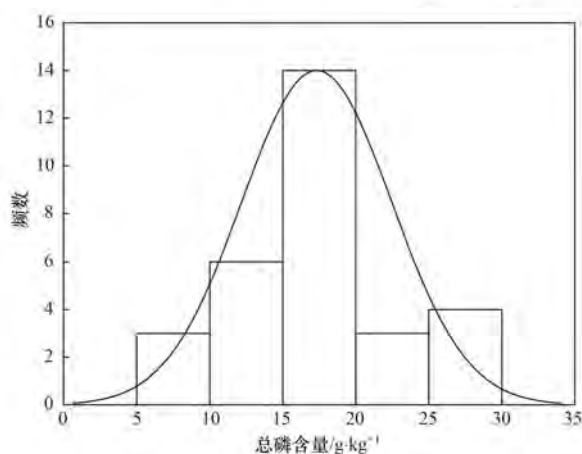


图3 总磷含量的频数分布直方图

Fig. 3 Frequency distribution histogram of TP

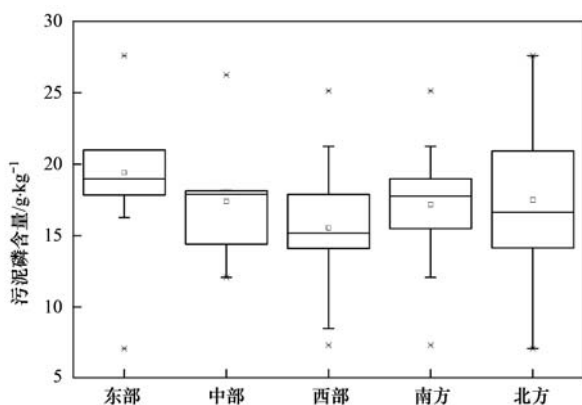


图4 不同地区污泥样品中的磷含量

Fig. 4 Phosphorus content in sewage sludge from different regions

续上升的趋势,自2007年开始则略有下降.近年来,我国对城市污水中磷的排放限制日趋严格,国家《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)^[78]对磷酸

盐的要求(一级标准 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 二级标准 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)明显高于1988年的标准^[79](一级标准 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 二级标准 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),而且实施范围也扩大到一切排污单位,这就驱使污水处理厂提高污水中磷的去除率,从而有更多的磷转移到剩余污泥中,造成污泥中磷含量不断上升.我国最早的洗涤剂禁磷从1996年太湖地区开始,经过10年发展,有13个省市的部分区域实现了禁磷,但是全国禁磷面积仅90余万 km^2 ,不到国土面积的1/10,而这些禁磷区并未对所有的洗涤剂实行禁磷^[80],这可能是2006年以前市政污泥中磷的含量持续升高的原因.从2007年我国市政污泥中总磷的含量略有下降,可能归因于我国近年来人均食物磷素消费量下降^[81]、对洗涤剂磷含量标准的日益严格以及禁磷区的逐渐扩大^[82].

2.3 市政污泥中磷的形态分布

我国市政污泥中不同形态磷含量如图5.我国市政污泥中IP、NAIP、OP含量均服从正态分布(S-W检验, $df = 30$, 统计量分别为0.969、0.986、0.972, Sig. 分别为0.518、0.948、0.602),AP含量服从对数正态分布(S-W检验, 统计量 = 0.983, $df = 30$, Sig. = 0.748).不同地区市政污泥中各形态磷含量均存在较大差异,其中IP含量范围为 $4.11 \sim 20.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、均值为 $(11.71 \pm 4.01) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,山东最高 $[(20.59 \pm 0.17) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}]$,辽宁最低 $[(4.11 \pm 0.04) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}]$;IP是污泥中磷的主要存在形态,有76.7%的市政污泥IP含量占TP含量的比例高于60%,IP/TP比例最高的是新疆

表 1 我国不同时期市政污泥中 TP 含量

Table 1 TP content of municipal sewage sludge for different time periods in China						
年份	2001 年以前	2001 ~ 2005	2006	2007 ~ 2010	2011 ~ 2015	2016
TP 含量范围/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.2 ~ 46.1	5.8 ~ 36.1	6.0 ~ 37.4	8.8 ~ 57.2	9.3 ~ 39.6	7.1 ~ 27.6
TP 平均含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	14.3	17.0	22.2	19.8	17.8	17.3

(82.3%), 最低的是安徽(49.8%)。

NAIP 含量范围为 $2.23 \sim 16.06 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $(9.18 \pm 3.44) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 北京最高 [$(16.06 \pm 0.31) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$], 辽宁最低 [$(2.23 \pm 0.06) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$]; NAIP 是主要的无机磷形态, 有 90% 的市政污泥 NAIP 含量占到 IP 含量的 66% 以上, NAIP/IP 比例最高的是广东(90.5%), 最低的是新疆(39.9%)。

AP 含量范围为 $1.59 \sim 7.31 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $(3.03 \pm 2.74) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 山东最高 [(7.31 ± 0.13)

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$], 广西最低 [$(1.59 \pm 0.05) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$]; AP 含量占 IP 含量的 11.3% ~ 59.19%, 只有贵州(42.4%)、青海(43.1%)、辽宁(54.7%)、新疆(59.2%)的比例高于 40%, 其余地区均在 40% 以下。

OP 含量范围为 $1.71 \sim 8.12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $(4.54 \pm 4.23) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 安徽最高 [$(8.12 \pm 0.47) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$], 新疆、广西最低 [$(1.71 \pm 0.03) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$], OP 的含量多占 TP 含量的 40% 以内。

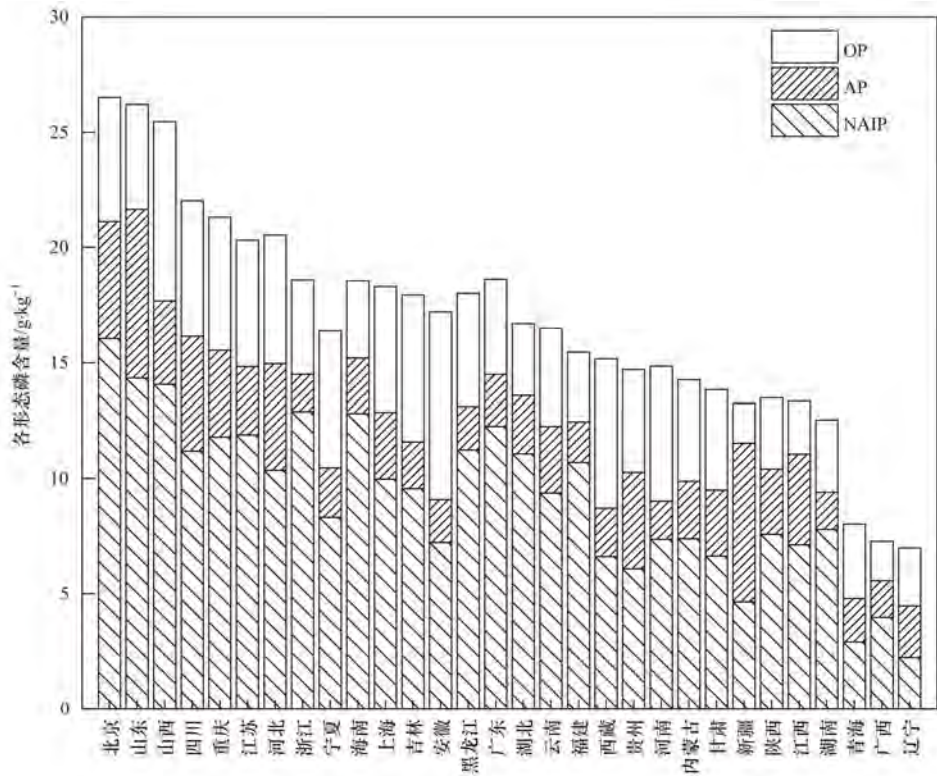


图 5 市政污泥中各形态磷含量
Fig. 5 Phosphorus content in municipal sludge

生物有效磷是指能够以溶解态磷酸盐释放, 并被植物生长所吸收利用的那部分磷^[83]. 与铁、铝结合的 NAIP 是潜在的活性磷, 在一定条件下能进入水体被生物利用^[9, 84]. OP 在微生物作用下矿化分解释放出来的磷可能会与污泥中的 Fe^{3+} 结合, 转化为铁结合态磷, 部分可被生物利用^[9, 12]. 根据 Ruban 等^[12]的观点, NAIP 和 OP 的含量之和可粗略认为是潜在的生物有效磷。

我国市政污泥中生物有效磷 (NAIP + OP) 的含量范围为 $4.74 \sim 21.85 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $(13.72 \pm 4.36) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 山西最高 [$(21.85 \pm 0.42) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$],

辽宁最低 [$(4.74 \pm 0.01) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$]; 有 96.7% 的市政污泥生物有效磷含量占到 TP 含量的 66.8% 以上, 广东最高(91.9%), 辽宁最低(44.9%)。我国市政污泥中生物有效磷占 TP 比例较高, 说明污泥中大部分的磷可以被生物利用. 一方面, 污泥经过适当处理可用作肥料, 减少化学肥料的使用, 节约资源; 另一方面, 污泥施用过量或处置不当, 可能会造成磷的二次污染。

污泥中不同形态磷含量之间的相关性分析结果如表 2. 可以看出污泥中 TP 的含量与其他各形态磷的含量均存在显著的相关性 ($P < 0.01$). 其中 TP

表 2 污泥中不同形态磷之间的相关系数矩阵¹⁾

	TP	IP	NAIP	AP	OP	NAIP + OP
TP	1					
IP	0.951 **	1				
NAIP	0.919 **	0.945 **	1			
AP	0.600 **	0.648 **	0.377 **	1		
OP	0.562 **	0.301 *	0.393 **	0.061	1	
NAIP + OP	0.942 **	0.878 **	0.954 **	0.331 *	0.651 **	1

1) **表示显著相关性在 0.01 水平(双尾检验); *表示显著相关性在 0.05 水平(双尾检验)

与 NAIP 的相关性最强,其次是 TP 与 AP 和 TP 与 OP.

TP、IP 与生物有效磷的相关关系如图 6,二者与生物有效磷之间均呈极显著正相关关系($r_1 = 0.942$, $r_2 = 0.878$, $P < 0.01$),污泥中 TP、IP 含量越高,其生物有效磷的含量也越高,这与王琦^[85]等对太湖沉积物中总磷与生物有效磷关系分析中得出的结论一致. TP、IP 与生物有效磷的这种相关性,

意味着可以利用回归方程和 TP、IP 的含量,来估算污泥中生物有效磷的含量.

在不同形态磷与生物有效磷的相关分析中可以看出,NAIP 与生物有效磷之间也存在极显著正相关关系($r = 0.954$, $P < 0.01$),而 OP、AP 与生物有效磷的相关系数较低.这说明污泥中 NAIP 对生物可利用磷的影响较大,可以从污泥中 NAIP 含量的高低,来判断污泥的潜在农用价值.

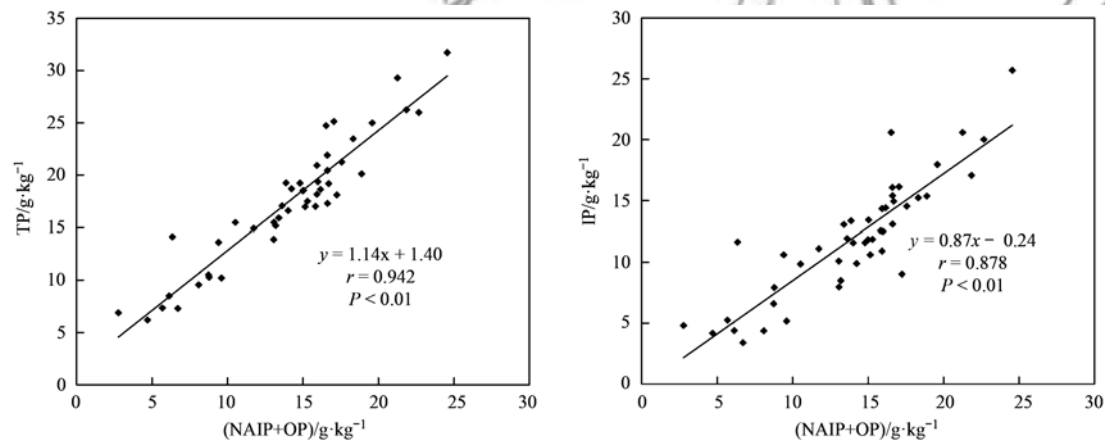


图 6 TP、IP 与生物有效磷(NAIP + OP)的关系

Fig. 6 Relationship between TP, IP, and bioavailable phosphorus (NAIP + OP)

2.4 我国市政污泥磷的排放量与去向分析

根据 2016 年中国环境年鉴^[86],全国城镇污水处理厂污泥产生量为 3.02×10^7 t(以含水率 80%计),市政污泥中磷平均含量按算术平均值($17.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)计算,全国市政污泥中携带的磷含量为 1.04×10^5 t.将各个省份干污泥的产生量乘以不同地区污泥中总磷的平均含量,得到各地区污泥中磷的总量,定义为污泥中磷的排放量.我国各省份污泥磷排放量较高的是山东(1.43×10^4 t)、江苏(1.34×10^4 t)、浙江(1.33×10^4 t)、广东(1.12×10^4 t)、河北(8.13×10^3 t)这 5 个地区,这些地区污泥中磷的排放量加起来相当于全国污泥中磷排放量的 53.5%;而宁夏(5.29×10^2 t)、广西(4.85×10^2 t)、海南(2.96×10^2 t)、青海(1.59×10^2 t)和西藏(1.95×10 t)等地区污泥中磷的排放量最少,其污泥中磷的排放量加起来仅占全国污泥中磷排放量的

1.3%.由图 7 可以看出,污泥中磷排放量呈现东部地区最高,由东向西逐渐降低的趋势,主要原因是

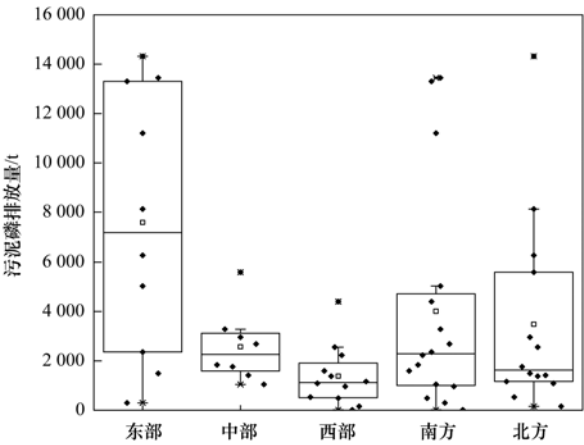


图 7 我国市政污泥磷排放量的区域分布

Fig. 7 Regional distribution of phosphorus emissions from municipal sludge in China

东部沿海地区 GDP 高(污泥磷排放量与 GDP 正相关,如图 8, $r=0.899$, $P<0.01$)、人口密集(污泥磷排放量与人口正相关, $r=0.697$, $P<0.01$)、污

泥产量大,而西部地区地广人稀、GDP 低、污泥的产量小.从磷资源回收的角度看,应优先考虑东部沿海地区的城市污泥.

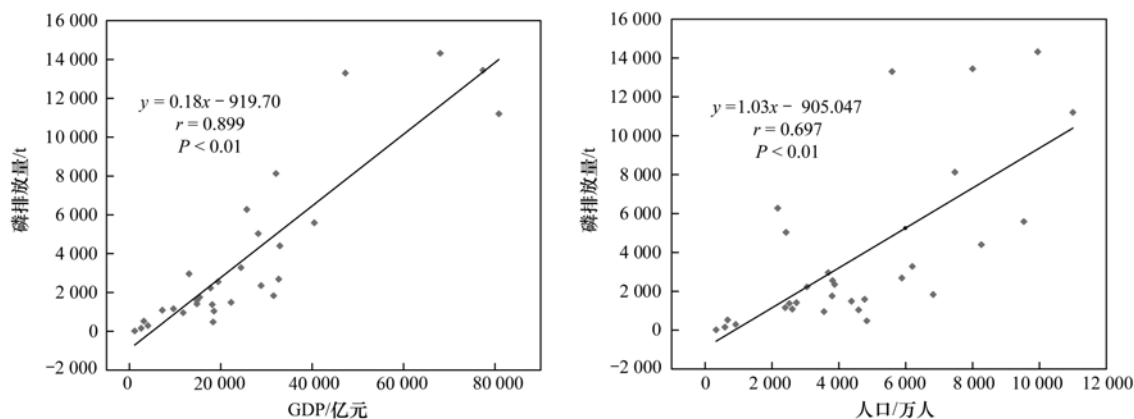


图 8 磷排放量与 GDP、人口的关系

Fig. 8 Relationship between GDP, population, and phosphorus emissions

我国市政污泥处置方式主要有土地利用、填埋处置、建筑材料利用和焚烧处置,另外还有极少量污泥被倾倒丢弃.2015 年我国城镇污水处理厂污泥磷的去向如图 9 所示.仅有 1.95×10^4 t 磷通过污泥农用而进入土壤,仅占到总含量的 18.65%,这意味着当前我国市政污泥中的磷大部分未得到资源化利用,有着很大的提升空间.经填埋处置的污泥中磷的含量达到 4.69×10^4 t, 占总含量的 44.92%;经污泥焚烧进入焚烧灰的磷约 2.34×10^4 t, 该部分磷最后亦随焚烧灰进入填埋场.进入填埋场后,污泥磷会暂时被从环境中隔离开来,然而填埋过程中,污泥磷会进入渗滤液,造成渗滤液中磷含量严重超标^[87],处置不当可能会造成填埋场周围的土壤和水体污染.另有 1.47×10^4 t 磷经由污泥的建材化利用而进入相关建材产品,对环境影响很小,有极少量(约 4.50t)磷随污泥直接倾倒丢弃.

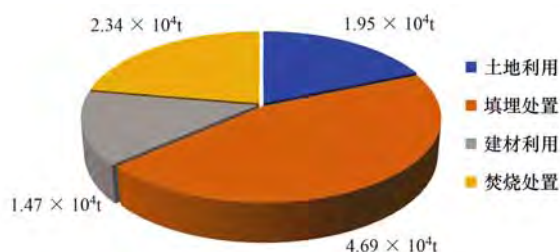


图 9 我国市政污泥磷的最终去向

Fig. 9 Fate of phosphorus in municipal sewage sludge in China

3 结论

(1)我国市政污泥中总磷含量范围为 $7.10 \sim 27.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $17.32 \pm 5.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 不同地区污泥中 TP 含量差异较大, 整体趋势是从东向西逐渐减少, 与历史数据对比发现, 市政污泥中 TP 的含量先升高后降低的演变趋势.

(2)IP 是市政污泥中磷的主要存在形态, 其含量占到 TP 含量的 60% 以上; NAIP 是主要的 IP 形态, 含量绝大部分占到 IP 含量的 66% 以上; 污泥中 AP 和 OP 含量稍低, 大部分为 TP 含量的 30% 和 40% 以内; 生物有效磷占 TP 含量的 66.8% ~ 96.1%, 且与 TP 呈现极显著的正相关关系 ($r=0.942$, $p<0.01$).

(3)2015 年全国市政污泥中携带的磷含量为 10.5 万 t, 大部分的磷随污泥进入填埋场所, 仅有 18.65% 的磷被土地利用; 不同地区污泥中磷的排放量呈现东高西低的空间分布规律.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 2015 年中国环境统计年报 [R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 2015 年中国环境状况公报 [R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2015.
- [3] 戴晓虎. 我国城镇污泥处理处置现状及思考[J]. 给水排水, 2012, 38(2): 1-5.
- [4] 乔显亮, 骆永明, 吴胜春. 污泥的土地利用及其环境影响[J]. 土壤, 2000, 32(2): 79-85.
Qiao X L, Luo L M, Wu S C. Land use of sewage sludge and its environmental impact[J]. Soils, 2000, 32(2): 79-85.
- [5] O'Connor G A, Sarkar D, Brinton S R, et al. Phytoavailability of biosolids phosphorus [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(2): 703-712.
- [6] 冯士龙. 城市污水厂污泥中磷的形态分布和释放特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [7] 庞燕. 五大湖沉积物磷形态及其磷吸附特征研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2004.
- [8] Medeiros J G, Cid B P, Gómez E F. Analytical phosphorus fractionation in sewage sludge and sediment samples [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2005, 381(4): 873-878.
- [9] 王超, 冯士龙, 王沛芳, 等. 污泥中磷的形态与生物可利用磷的分布及相互关系[J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1593-1597.
Wang C, Feng S L, Wang P F, et al. Distribution of phosphorus

- fractions and bio-available phosphorus forms and their relationships in sewage sludge [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(6): 1593-1597.
- [10] 沈雪莲, 周振, 任伟超, 等. 城镇污水处理厂污泥中磷的形态分布及生物可利用性分析[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(3): 1200-1204.
Shen X L, Zhou Z, Ren W C, *et al.* Fractionation and bioavailability of phosphorus in sludge from municipal wastewater treatment plants [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(3): 1200-1204.
- [11] 王宁, 刘清伟, 职音, 等. 中国城市污泥中汞含量的时空分布特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2296-2305.
Wang N, Liu Q W, Zhi Y, *et al.* Spatial and temporal variation of mercury in municipal sewage sludge in China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2296-2305.
- [12] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments-A synthesis of recent works [J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, **370**(2-3): 224-228.
- [13] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(1): 51-56.
- [14] 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.
- [15] 李艳霞, 陈同斌, 罗维, 等. 中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用 [J]. *生态学报*, 2003, **23**(11): 2464-2474.
Li Y X, Chen T B, Luo W, *et al.* Contents of organic matter and major nutrients and the ecological effect related to land application of sewage sludge in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(11): 2464-2474.
- [16] 李贵宝, 尹澄清, 林永标, 等. 城市污泥对退化森林生态系统土壤的人工熟化研究 [J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(2): 159-162.
Li G B, Yin C Q, Lin Y B, *et al.* Artificial improvement of soil fertility in a regraded forest ecosystem by using municipal sewage sludge [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(2): 159-162.
- [17] 孙建周. 污泥再利用的研究与设备开发 [D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [18] 王新, 陈涛, 梁仁禄, 等. 污泥土地利用对农作物及土壤的影响研究 [J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(2): 163-166.
Wang X, Chen T, Liang R L, *et al.* Effects of land utilization of sewage sludge on crops and soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(2): 163-166.
- [19] 黄亚军. 污水处理厂污泥处理与利用研究 [D]. 重庆: 西南农业大学, 2003.
- [20] 周莉菊. 污泥中铅在绿化中的迁移行为研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
- [21] 闫双堆. 城市污泥垃圾复混肥的土壤和作物效应研究 [D]. 晋中: 山西农业大学, 2005.
- [22] 邵海林, 李娜, 王晓红. 生活垃圾和污泥对草坪草生长的影响 [J]. *太原科技*, 2005(S2): 3-5.
Shao H L, Li N, Wang X H. Effects of municipal household garbage and sewage sludge on lawn grass and soil nutrients [J]. *Taiyuan Science & Technology*, 2005(S2): 3-5.
- [23] 王军辉. 污水厂污泥在园林绿化上的应用研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- [24] 张幸涛. 城市污泥的减量化和资源化研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [25] 汪常青, 鲁明星, 梁浩, 等. 武汉市排水污泥特性及其农利用可行性分析 [J]. *湖北农业科学*, 2006, **45**(4): 451-455.
Wang C Q, Lu M X, Liang H, *et al.* Characteristics of the Wuhan draining water sludge and its feasibility used in agriculture [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2006, **45**(4): 451-455.
- [26] 陈萍丽. 重庆市城市污泥特性及其农利用安全性研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [27] 杨玉荣. 保定市污泥中有害物的转化去除及资源化利用研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2006.
- [28] 陶俊杰. 城市污水处理厂剩余污泥农利用技术的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
- [29] 潘美英. 城市生活污水污泥好氧发酵工艺条件研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [30] 和苗苗, 俞一统, 华玉妹, 等. 生物淋滤法对污泥中 Zn Cu 的去除效果及污泥养分损失研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(5): 1359-1364.
He M M, Yu Y T, Hua Y M, *et al.* Removal of heavy metals in sewage sludge and losses of nutrition during bioleaching [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(5): 1359-1364.
- [31] 张勤, 姚天举, 胡坚, 等. 城市低有机质污泥的好氧堆肥研究 [J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(13): 94-97.
Zhang Q, Yao T J, Hu J, *et al.* Study on aerobic composting of low organic sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, **22**(13): 94-97.
- [32] 郑翔翔. 江苏省城市污水处理厂污泥处置技术政策研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [33] 郭广慧, 杨军, 陈同斌, 等. 中国城市污泥的有机质和养分含量及其变化趋势 [J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(13): 120-121.
Guo G H, Yang J, Chen T B, *et al.* Concentrations and variation of organic matter and nutrients in municipal sludge of China [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, **25**(13): 120-121.
- [34] 付克强. 城市污泥与湖泊底泥土地利用效应研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2007.
- [35] 孙峰. 污泥理化性质与污泥处置的环境风险 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [36] 徐兴华. 城市污泥农用的农学和环境效应研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [37] 花莉. 城市污泥堆肥资源化过程与污染物控制机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [38] 杨翠. 城市污泥施用对作物与土壤影响研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [39] 胡慧蓉, 叶秋函, 武淑文, 等. 昆明市政污泥中植物养分含量与林地利用探讨 [J]. *环境科学导刊*, 2009, **28**(6): 83-86.
Hu H R, Ye Q H, Wu S W, *et al.* Nutrient content and forest land application of municipal sludge in Kunming [J]. *Environmental Science Survey*, 2009, **28**(6): 83-86.
- [40] 李淑更. 脱水污泥的土地资源化利用及其环境效应的试验研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- [41] 何祥亮, 周晓铁, 孙世群. 合肥市污水处理厂污泥的土地资源化可行性分析 [J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2008, **31**(4): 511-514.
He X L, Zhou X T, Sun S Q. Feasibility analysis of application of Hefei City's sewage sludge to soil [J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2008, **31**(4): 511-514.
- [42] 丁武泉. 重庆污水处理厂污泥特性分析 [J]. *安徽农业科学*, 2008, **36**(26): 11508-11509.
Ding Wuquan. Analysis of characteristics of sludge in Chongqing wastewater treatment plant [J]. *Journal of Anhui Agricultural*

- Sciences, 2008, **36**(26): 11508-11509.
- [43] 葛晓燕, 孙雪萍, 庄惠生. 洛阳市城市污水处理厂污泥成分及土地利用可行性分析[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2010, **20**(1): 5-7, 20.
- Ge X Y, Sun X P, Zhuang H S. Luoyang sewage plant's sludge composition analysis and the feasibility of its application to soil [J]. Journal of Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, **20**(1): 5-7, 20.
- [44] 袁绍春, 张智, 王敏, 等. 镇江市主城区污泥处理处置规划研究[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(10): 19-22.
- Yuan S C, Zhang Z, Wang M, et al. Planning study on sludge treatment and disposal in Zhenjiang main city zone [J]. China Water & Wastewater, 2012, **28**(10): 19-22.
- [45] 李瑞, 吴龙华, 杨俊波, 等. 贵州省典型城市污水处理厂污泥养分与重金属含量调查[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(4): 787-796.
- Li R, Wu L H, Yang J B, et al. Major nutrients and heavy metals of municipal sewage sludge in Guizhou province [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(4): 787-796.
- [46] 谭国栋. 城市污泥特性分析及其在生态修复中的应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [47] 何洁, 张旭, 肖丹, 等. 昆明市污水处理厂污泥的土地利用可行性研究[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(17): 103-105.
- He J, Zhang X, Xiao D, et al. Feasibility of land application of sewage sludge from Kunming wastewater treatment plants [J]. China Water & Wastewater, 2010, **26**(17): 103-105.
- [48] 庄明明. 不同添加材料对生活污泥中营养成分及重金属的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2011.
- [49] 韦小颖, 郭朝晖, 肖细元. 污泥中重金属的环境活性及生态风险评估[J]. 水土保持通报, 2012, **32**(4): 203-207.
- Wei X Y, Guo Z H, Xiao X Y. Environmental availability and ecological risks of heavy metals in sewage sludge [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, **32**(4): 203-207.
- [50] 卢怡, 杨光. 昆明市污水处理厂污泥成分及利用方式分析[J]. 南方农业学报, 2013, **44**(10): 1681-1684.
- Lu Y, Yang G. Sludge components and use types of wastewater treatment factories in Kunming City [J]. Journal of Southern Agriculture, 2013, **44**(10): 1681-1684.
- [51] 包苏俊, 刘长青, 张峰, 等. 青岛城市污水厂污泥有机质、养分及重金属含量[J]. 城市环境与城市生态, 2011, **24**(6): 37-39.
- Bao S J, Liu C Q, Zhang F, et al. Organic matter, nutrient and heavy metals in sludge of sewage treatment plants of Qingdao City [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2011, **24**(6): 37-39.
- [52] 邹通. 污泥对风沙土养分与重金属效应的淋溶模拟研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2012.
- [53] 刘新安. 西安城市污水处理厂污泥在市政园林绿化中的应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- [54] 赵幅平, 丁园, 史蓉蓉, 等. 南昌地区城市污水处理厂污泥性质分析[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2013, **27**(1): 47-52.
- Zhao G P, Ding Y, Shi R R, et al. Properties of municipal sewage sludge in Nanchang area [J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2013, **27**(1): 47-52.
- [55] 周丽丽. 剩余污泥重金属脱除及资源化利用新工艺[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2012.
- [56] 梁强, 徐凤, 姚蔚泉, 等. 石河子污水处理厂污泥理化性质及养分含量测定研究[J]. 城镇供水, 2012, (5): 79-82.
- [57] 李琼. 城市污泥农用的可行性及风险评估研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2012.
- [58] 刘颂颂. 东莞市城市污泥植物处理及农林业利用研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2012.
- [59] 杨建芳, 刘洪涛, 陈同斌, 等. 广西壮族自治区城镇污泥特性与处置方向[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(3): 87-89.
- Yang J L, Liu H T, Chen T B, et al. Characterization and disposal direction of sewage sludge from Guangxi Zhuang Autonomous Region in China [J]. China Water & Wastewater, 2013, **29**(3): 87-89.
- [60] 李霞. 城市污泥在科尔沁沙地土壤改良中的应用及风险分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [61] 袁栖. 兰州地区剩余污泥高温厌氧处理试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
- [62] 张军, 张征世, 王敦球, 等. 广西城市污水厂污泥分析及其土地利用潜在生态风险评价[J]. 环境工程, 2014, **32**(1): 108-112.
- Zhang J, Zhang Z S, Wang D Q, et al. Physicochemical property and potential ecological risk assessment of heavy metals in sludge from sewage plants in Guangxi [J]. Environmental Engineering, 2014, **32**(1): 108-112.
- [63] 杨璇, 苏玉萍, 王君琴, 等. 福州市污水处理厂污泥性质和土地利用前景分析[J]. 海峡科学, 2012, (9): 3-5.
- [64] 杨海霞. 污泥制肥工艺及优化条件的实现[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [65] 王凌玮. 城市生活污泥对农田深层土改良效果的初步探究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [66] 任欣欣, 卜玉山, 张仙瑞, 等. 两种城市污泥的小白菜效应研究[J]. 天津农业科学, 2014, **20**(6): 77-82.
- Ren X X, Bu Y S, Zhang X R, et al. Effects of two kinds of sewage sludge on Pak-choi [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2014, **20**(6): 77-82.
- [67] 董志新, 卜玉山, 刘秀珍, 等. 不同有机物料对土壤养分和酶活性的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2014, **34**(3): 220-225.
- Dong Z X, Bu Y S, Liu X Z, et al. Effects of different organic material on soil nutrients and enzyme activity [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2014, **34**(3): 220-225.
- [68] 赵君. 贵阳市污水处理厂污染物特性分析[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2014.
- [69] 李桃. 山西省部分地区城市污泥的特性及其安全农业利用[D]. 晋中: 山西农业大学, 2016.
- [70] 刘清云, 丘锦荣, 周志洪, 等. 珠三角城市污泥中壬基酚及重金属特征分析[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(6): 2072-2078.
- Liu Q Y, Qiu J R, Zhou Z H, et al. Residual nonylphenol and heavy metals in sewage sludge from wastewater treatment plants in Pearl River Delta region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(6): 2072-2078.
- [71] 于坤, 于宏兵, 唐利红, 等. 赤峰地区污水厂污泥修复沙漠化土地的可行性研究[J]. 中国给水排水, 2015, **31**(17): 65-68.
- Yu K, Yu H B, Tang L H, et al. Feasibility study of remediation of desertified land by sludge from urban sewage treatment plant in Chifeng region [J]. China Water & Wastewater, 2015, **31**(17): 65-68.
- [72] 陈晓红. 广州城市污泥间接农用效果研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [73] 程晓波. 城市污水厂污泥堆肥施用及重金属形态与吸附的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [74] 马闯, 郭静, 张宏忠, 等. 河南省城市污泥土地利用潜力研究[J]. 中国给水排水, 2016, **32**(1): 71-73.

- Ma C, Guo J, Zhang H Z, *et al.* Land application potential of sewage sludge in Henan province [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(1): 71-73.
- [75] 马学文, 翁焕新, 章金骏. 中国城市污泥重金属和养分的区域特性及变化[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(8): 1306-1313.
- Ma X W, Weng H X, Zhang J J. Regional characteristics and trend of heavy metals and nutrients of sewage sludge in China [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(8): 1306-1313.
- [76] 宋志伟, 李发生, 韩梅. 武汉市水体中磷污染情况的调查研究及现状分析[J]. *能源环境保护*, 2003, **17**(6): 46-48, 57.
- Song Z W, Li F S, Han M. Investigation and study on the condition of phosphorus pollution in water body of Wuhan City [J]. *Energy Environmental Protection*, 2003, **17**(6): 46-48, 57.
- [77] 朱平, 周凯, 董程, 等. 浅谈城镇污水中的磷污染[J]. *天津科技*, 2013, **40**(1): 37-38.
- [78] GB 8978-1996, 污水综合排放标准[S].
- [79] GB 8978-1988, 污水综合排放标准[S].
- [80] 季耿善. 水域富营养化及对我国洗涤剂“禁磷”的讨论和发展建议报告(上)[J]. *环境保护*, 2007(22): 40-45.
- [81] 王慧娜, 赵小锋, 唐立娜, 等. 城市居民食物磷素消费变化及其环境负荷——以厦门市为例[J]. *生态学报*, 2013, **33**(14): 4495-4504.
- Wang H N, Zhao X F, Tang L N, *et al.* Changes in phosphorus consumption and its environmental loads from food by residents in Xiamen City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(14): 4495-4504.
- [82] 杨瑾. 预防赤潮发生洗涤剂禁磷刻不容缓[J]. *海洋开发与管理*, 2004, **21**(1): 22-25.
- Yang J. To prevent the red tide, no time to delay to wipe out the phosphor off the scour [J]. *Ocean Development and Management*, 2004, **21**(1): 22-25.
- [83] Sonzogni W C, Chapra S C, Armstrong D E, *et al.* Bioavailability of phosphorus inputs to lakes [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1982, **11**(4): 555-563.
- [84] Zhu M Y, Zhu G W, Li W, *et al.* Estimation of the algal-available phosphorus pool in sediments of a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) using profiled SMT fractional analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **173**: 216-223.
- [85] 王琦, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖不同营养水平湖区沉积物磷形态与生物可利用磷的分布及相互关系[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(2): 120-126.
- Wang Q, Jiang X, Jin X C, *et al.* Distribution of phosphorus fractions and bio-available phosphorus forms and their relationship in the sediments from different regions of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(2): 120-126.
- [86] 《中国环境年鉴》编辑委员会. 中国环境年鉴 2016[G]. 北京: 中国环境年鉴社, 2016.
- [87] 谈勇, 杨伟宏. 污泥填埋对邻近水域水质的影响研究[J]. *滁州学院学报*, 2009, **11**(1): 48-52.
- Tan Y, Yang W H. The influence of sludge landfill on the water quality of the adjacent water area [J]. *Journal of Chuzhou University*, 2009, **11**(1): 48-52.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)