

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.5  
第40卷 第5期

# 目次

|                                                    |                                                        |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律                     | 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)                               |
| 餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征                         | 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)                                      |
| 泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征                             | 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)                            |
| 郑州-新乡冬季PM <sub>2.5</sub> 中元素浓度特征及其源分析              | 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027) |
| 我国PM <sub>2.5</sub> 浓度分阶段改善目标情景分析                  | 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)                                |
| 安阳市典型工业源PM <sub>2.5</sub> 排放特征及减排潜力估算              | 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)                            |
| 郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单                               | 赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)                          |
| 2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性                        | 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)                                    |
| 兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势                    | 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)                                 |
| 12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征                            | 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)                                   |
| 我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布                             | 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)                           |
| 我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价                        | 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)                          |
| 我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价                             | 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)                         |
| 大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征                       | 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)                                    |
| 干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义                           | 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)                                  |
| 柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素                               | 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)                              |
| 崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素                             | 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)                          |
| 三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析                             | 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)                   |
| 三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力                       | 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)                           |
| 不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素                               | 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)                                  |
| 巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险                         | 李如忠,鲍琴,戴源(2178)                                        |
| 闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析                           | 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)                            |
| 生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应                          | 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)                  |
| 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估                                | 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)                                    |
| 三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征                               | 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)                           |
| 多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析                            | 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2219)                      |
| 不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征                                 | 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)                    |
| 微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响                                | 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)                            |
| 上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析                           | 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)                      |
| 异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系                          | 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)                            |
| 水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析                               | 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)                         |
| 绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应                              | 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)                       |
| 紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能                                | 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)                                      |
| UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制                                | 吕娟,许志伟,王言(2278)                                        |
| 铝代水铁矿协同吸附砷的机制                                      | 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)                         |
| 新型材料磁性氧化铁的除氟效能                                     | 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)                                   |
| 羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制                          | 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)                          |
| 基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化                        | 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)                       |
| 不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征                              | 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)                        |
| 15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能                             | 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)                         |
| 长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响              | 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)                        |
| 厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响                           | 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)                          |
| HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液                             | 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)                      |
| 温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响                 | 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)                            |
| 城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异                            | 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)                                |
| 三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响                              | 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)                              |
| 亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制                            | 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)                            |
| 生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响                             | 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)                               |
| 地膜覆盖和施肥对菜地CH <sub>4</sub> 排放的影响                    | 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)                           |
| 亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响                                | 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)                                |
| 不同施肥模式对热区晚稻田CH <sub>4</sub> 和N <sub>2</sub> O排放的影响 | 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)                    |
| 周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响                                  | 曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)                            |
| 广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价                           | 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)                              |
| 超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力        | 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)                            |
| 种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险                               | 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)                          |
| 土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应                               | 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)                              |
| 某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价                  | 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)                        |
| 《环境科学》征订启事(2018)                                   | 《环境科学》征稿简则(2042)                                       |
| 信息(2114, 2348, 2393)                               |                                                        |

# 生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应

蒋倩文<sup>1,2</sup>, 刘锋<sup>2</sup>, 彭英湘<sup>3\*</sup>, 王华<sup>1\*</sup>, 姚燃<sup>2</sup>, 李红芳<sup>2</sup>, 罗沛<sup>2</sup>, 刘新亮<sup>2</sup>, 吴金水<sup>2</sup>

(1. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 3. 湖南省环境监测中心站, 长沙 410014)

**摘要:**以典型农业小流域——开慧河流域源区为研究对象, 基于研究区农业面源污染的主要排放特征, 建立以生态湿地为主的小流域面源污染生态工程综合治理系统, 重点探讨其对水体氮磷污染物的去除效果. 结果表明, 畜禽养殖业是开慧河流域源区水体氮磷污染物的主要来源, 需要重点防控. 组合生态湿地处理工程对农村分散式生活与养殖混合废水总氮(TN)、总磷(TP)的平均去除率为87.1%和90.9%; 多级人工湿地拦截工程对农田排水与分散式养殖混合废水 TN、TP 的平均去除率为85.7%和84.9%; 景观型生态湿地净化工程对末端汇水区水体中 TN、TP 的去除率在27.1%~67.4%和13.3%~81.5%之间. 整个生态工程综合治理系统对流域 TN 和 TP 污染物的总拦截量分别为5 292 kg·a<sup>-1</sup>和1 054 kg·a<sup>-1</sup>, 占研究区农业面源 TN、TP 总污染负荷的35.3%和43.6%. 因此, 构建的生态工程综合治理系统对流域农业面源氮磷污染具有较好的治理效应, 适合在我国南方小流域水环境治理中推广应用.

**关键词:**小流域; 面源污染; 生态湿地; 生态工程综合治理系统; 去除效果; 氮磷拦截

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2194-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809181

## Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed

JIANG Qian-wen<sup>1,2</sup>, LIU Feng<sup>2</sup>, PENG Ying-xiang<sup>3\*</sup>, WANG Hua<sup>1\*</sup>, YAO Ran<sup>2</sup>, LI Hong-fang<sup>2</sup>, LUO Pei<sup>2</sup>, LIU Xin-liang<sup>2</sup>, WU Jin-shui<sup>2</sup>

(1. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Hunan Environmental Monitoring Center Station, Changsha 410014, China)

**Abstract:** Based on the discharge characteristics of agricultural non-point source pollution in the headstream region of the Kaihui River—a typical small agricultural watershed, an integrated ecological engineering treatment system (IEETS) was constructed with ecological wetland as the core unit to control the pollution. The nitrogen (N) and phosphorus (P) removal performances of the IEETS were discussed in this study. The results showed that the dominant source of N and P in the study area was livestock and poultry breeding, which was urgent to control. The monitoring results indicated that the ecological wetland treatment project resulted in average total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) removal rates of 87.1% and 90.9%, respectively, when treating mixed decentralized domestic and swine wastewater treatment. The multi-stage constructed wetlands had an average of 85.7% of TN and 84.9% of TP removal for mixed farmland drainage and decentralized swine wastewater. The removal rates for landscape-based ecological wetland were within the range of 27.1%–67.4% for TN and 13.3%–81.5% for TP in the catchment terminal water. The total interception amount of TN and TP by the IEETS was 5 292 kg·a<sup>-1</sup> and 1 054 kg·a<sup>-1</sup>, accounting for 35.3% and 43.6% of total pollution loads in the headstream region, respectively. These findings illustrated that the IEETS presents promising treatment results on non-point source pollution, and is suitable for widespread applications to wastewater treatment in small watersheds of southern China.

**Key words:** small watershed; non-point source pollution; ecological wetland; integrated ecological engineering treatment system; removal performance; nitrogen and phosphorus interception

随着社会和经济生活的快速发展, 大量氮、磷等污染物汇入水体, 对河流、湖泊和海湾等生态环境造成了极大地危害. 据第一次全国污染源普查公报显示<sup>[1]</sup>, 我国农业污染源排放的总氮(TN)和总磷(TP)分别占排放总量的57.2%和67.3%, 已超过工业污染源, 成为水环境氮磷污染物的主要来源. 农业面源污染正不断加剧着全球水体富营养化, 已严重危害到河流、湖泊等自然水体的环境安全<sup>[2,3]</sup>. 已有研究表明, 来自种植业、畜禽养殖业和

居民生活等氮磷污染物的排放是造成农业面源污染的重要原因<sup>[4,5]</sup>, 但农业面源污染成因依然复杂, 具有在不确定的时间, 通过不确定途径, 排放不确

收稿日期: 2018-09-21; 修订日期: 2018-12-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800504); 湖南省自然科学基金项目(2017JJ5061); 湖南省重点研发计划项目(2016JC2032, 2017NK2161, 2017NK2383); 中央引导地方科技发展专项(2017CT5010)

作者简介: 蒋倩文(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境与农业生态, E-mail: jiang\_qianwen@163.com

\* 通信作者, E-mail: 18464598@qq.com; wangchina926@hunau.edu.cn

定数量污染物的特性<sup>[6]</sup>. 因此, 解析农业面源污染量及来源成为流域内污染物总量控制的基础, 对建立有效的流域农业面源污染治理措施具有重要意义<sup>[7]</sup>.

针对农业面源污染造成的水体污染, 目前主要治理措施有源头控制、迁移过程拦截、末端治理等<sup>[8,9]</sup>. 其中, 生态湿地处理技术因其具有处理效果好、投资少、易管理等突出优点, 在农村污水处理上得到广泛应用<sup>[10~13]</sup>. 张树楠等<sup>[14]</sup>研究生态沟渠对农业面源污染的阻控效应, 发现其对水体 TN、TP 的平均去除率分别为 64.3%、69.7%; 刘长娥等<sup>[15]</sup>通过复合人工湿地处理低浓度畜禽养殖废水, 发现其对废水 TN、TP 的去除率达到 94.7%、79.4%; Luo 等<sup>[16]</sup>证实绿狐尾藻 (*Myriophyllum aquaticum*) 三级湿地对低、中、高负荷养殖污水中 TN 的去除率在 85.4%~96.1% 之间, 总体处理效果好. 基于流域的基本结构均是由多个源头单元和贯穿其中的水系网络构成, 构建流域环境污染源头综合治理系统, 是治理下游河口、湖泊中水体污染的关键环节<sup>[17]</sup>. 目前, 如何以生态湿地处理技术为主进行技术组合和空间配置优化, 构建能有效解决小流域农业面源污染的全时全程综合治理系统, 还需要进一步研究及示范验证.

本文以典型农业小流域——开慧河流域源区为研究对象, 在调查掌握区内农业面源污染排放特征后, 构建以生态湿地为核心技术的生态工程综合治理系统, 并明确其对小流域氮磷污染物的治理效应, 以期为我国南方小流域农业面源污染的治理提供技术支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

选取位于湖南省长沙县开慧镇的开慧河流域源区为研究对象(图1). 该区域属于典型的亚热带湿润气候, 年平均气温 17.1℃ (-11.3~39.8℃), 年平均降雨量 1 729 mm. 降雨多集中在 4~7 月, 占全年降雨量的 54.5%. 研究区占地面积约 4.4 km<sup>2</sup>, 常住人口 1 959 人. 其主要土地利用类型包括农田、果林、茶园、菜地、村庄、池塘和河道等, 其中农田所占比例最大(32.3%). 区域内农田用地面积达 142 hm<sup>2</sup>, 农田耕作以水稻单熟制为主, 单季稻面积达 113 hm<sup>2</sup>, 双季稻面积为 29 hm<sup>2</sup>. 施肥采用尿素和复合肥(15-15-15), 单季氮素(以 N 计)投入量为 182.1 kg·hm<sup>-2</sup>, 磷素(以 P 计)投入量为 24.8 kg·hm<sup>-2</sup>. 畜禽养殖模式以农户散养为主, 主要有母猪 236 头、生猪 1 943 头和鸡鸭等家禽

1 4291 只. 养殖废水及农村居民生活污水少部分仅经过化粪池简单处理后排入河道, 大部分则未采取任何措施直接就近施入农田或者通过沟渠直接排入河道.

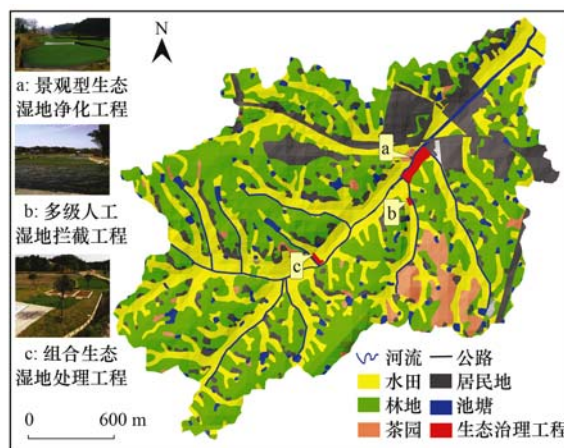


图1 研究区农业面源污染生态工程综合治理系统的分布情况  
Fig. 1 Location of integrated ecological engineering treatment system for agricultural non-point source pollution in the study area

### 1.2 研究区生态工程综合治理系统构建

针对该区域内农业面源氮磷污染的排放特征是以分散式畜禽养殖污染为主, 构建以生态湿地为主体的生态工程综合治理系统, 主要包括下列 3 项生态治理工程: 组合生态湿地处理工程、多级人工湿地拦截工程和景观型生态湿地净化工程, 分别对农村分散式生活与养殖混合废水、农田排水与分散式养殖混合废水和小流域末端汇水进行治理.

#### 1.2.1 组合生态湿地处理工程

针对农村分散式生活污水与养殖废水主要采用了生物滤池、表面流人工湿地和稳定塘串联而成的组合生态湿地处理工程<sup>[18]</sup>. 该湿地利用自然高程差, 建立可自流管网, 不消耗动力, 接收该流域内一村民组(常住人口 48 人)生活污水和养殖废水, 于 2013 年 3 月投入使用. 湿地由一个调节池(长×宽×深=6 m×4 m×0.8 m)、一个水平生物滤池(长×宽×深=7 m×3.5 m×0.6 m)、一个垂直生物滤池(长×宽×深=4 m×2.5 m×1.5 m)、2 级表面流人工湿地(长×宽=26 m×10 m, 30 m×10 m)和一个稳定塘(长×宽=30 m×10 m)处理单元串联组成.

#### 1.2.2 多级人工湿地拦截工程

以表面流人工湿地为主, 构建多级人工湿地拦截工程. 该湿地建在地势低洼的农田附近, 利用可自流管网, 不消耗动力, 接收流域附近农田排水(农田面积约 8.8 hm<sup>2</sup>)与农户分散式养殖废水. 湿地由一个调节池(长×宽×深=18.5 m×4 m×1 m)、2 级表面流人工湿地(长×宽=18.5 m×17 m,

20 m × 17 m) 组成, 2 级湿地均种植绿狐尾藻, 于 2015 年 3 月投入使用。

1.2.3 景观型生态湿地净化工程

在位于开慧河流域源区末端的原有人工湖的基础上加入景观湿地/生态塘/植物浮床净化处理技术, 构建景观型生态湿地净化工程。该湿地于 2015 年 8 月建立, 占地面积约 1 hm<sup>2</sup>, 岸边间种美人蕉、菖蒲、水竹等植物, 湿地内分段种植绿狐尾藻、睡莲和花莲。

1.3 样品采集与分析

2015 年 9 月 ~ 2016 年 8 月, 采集各生态治理工程的进、出水口的水样, 采集频率为 2 次/月, 水样运回实验室后, 4℃ 低温保存, 并在 24 h 内处理样品分析总氮(TN)和总磷(TP)浓度。水样分析方法如下: 总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解后用流动注射仪(AA3, 德国 SEAL 公司)测定; 总磷(TP)采用过硫酸钾消解后, 用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)测定。

1.4 数据处理与统计分析

1.4.1 污染物排放量估算

于 2015 年 8 月采用实地走访和问卷调查的方式对该区域内产业结构、污染源、人口等情况进行调查。区域内农村居民生活、畜禽养殖业、水稻种植业排放状况采用排污系数法估算。根据调研数据, 结合居民生活和畜禽养殖排污系数及农田肥料流失系数等(表 1), 计算研究区农业面源氮磷污染物排放量<sup>[19]</sup>。主要的计算公式如下。

农村居民生活氮磷污染物排放量( $P$ , t·a<sup>-1</sup>)采用式(1)计算:

$$P = Q \times (A_1 + A_2) \times 365 \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中,  $Q$  为流域内居民人数;  $A_1$  和  $A_2$  分别为居民的生活污水和垃圾排污系数[g·(人·d)<sup>-1</sup>]。

畜禽养殖业氮磷污染物排放量( $F$ , t·a<sup>-1</sup>)采用式(2)计算:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i B_i \quad (2)$$

式中,  $f_i$  为对应畜禽年排污系数[kg·(只·a)<sup>-1</sup>];  $B_i$  为各畜禽养殖的数量(只)。

水稻种植业氮磷污染物排放量( $L$ , t·a<sup>-1</sup>)采用式(3)计算:

$$L = (D_1 E_1 + S_1 M_1 + D_2 E_2 + S_2 M_2) \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中,  $D_1$ 、 $D_2$  分别为单季稻、双季稻农田肥料养分投入总量(折纯后以 N、P 计, kg·a<sup>-1</sup>);  $E_1$ 、 $E_2$  为对应农田径流养分流失系数(%);  $S_1$ 、 $S_2$  为对应农田种植面积(hm<sup>2</sup>);  $M_1$ 、 $M_2$  为对应农田单位面积本底流失量(kg·hm<sup>-2</sup>)。

表 1 研究区各类污染源排污系数<sup>1)</sup>

Table 1 Discharge coefficients of different pollution sources in the study area

| 项目   |                            | 污染物   |      |
|------|----------------------------|-------|------|
|      |                            | TN    | TP   |
| 排污系数 | 生活污水/g·(人·d) <sup>-1</sup> | 0.17  | 0.02 |
|      | 生活垃圾/g·(人·d) <sup>-1</sup> | 0.45  | 0.09 |
|      | 母猪/kg·(只·a) <sup>-1</sup>  | 13.24 | 2.01 |
|      | 生猪/kg·(只·a) <sup>-1</sup>  | 4.38  | 0.63 |
|      | 家禽/kg·(只·a) <sup>-1</sup>  | 0.07  | 0.04 |
| 流失系数 | 单季稻/%                      | 1.13  | 0.64 |
|      | 双季稻/%                      | 1.85  | 1.55 |
| 本底流失 | 单季稻/kg·hm <sup>-2</sup>    | 9.63  | 0.33 |
|      | 双季稻/kg·hm <sup>-2</sup>    | 11.64 | 0.63 |

1) 系数来源于第一次全国污染普查排污系数手册, 表中仅列出了研究区域适用的居民生活和畜禽养殖排污系数及农田肥料流失系数

1.4.2 去除效果与拦截量计算

各生态治理工程对氮磷污染物的去除率( $\eta_1$ , %)采用式(4)计算:

$$\eta_1 = \frac{(c_0 - c_1)}{c_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $c_0$  为各生态治理工程进水口 TN 或 TP 的质量浓度(mg·L<sup>-1</sup>);  $c_1$  为各湿地出水口 TN 或 TP 的质量浓度(mg·L<sup>-1</sup>)。

结合各生态治理工程进、出水中 TN 和 TP 的质量浓度和当月各项工程的流量, 各生态治理工程每月对 TN 和 TP 的拦截量( $p$ , kg)、输入量( $m$ , kg)及输出量( $n$ , kg)采用式(5)~(7)计算:

$$m = c_0 \times q \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$n = c_1 \times q \times 10^{-3} \quad (6)$$

$$p = m - n \quad (7)$$

式中,  $q$  表示各项生态治理工程每月的流量, 3 项生态治理工程在监测期间的月流量范围分别为 1 445.9 ~ 4 805.1、1 257.9 ~ 6 268.1 和 17 204.5 ~ 106 560.4 m<sup>3</sup>。

生态工程综合治理系统对 TN 和 TP 的拦截率( $\eta_2$ , %)采用式(8)计算:

$$\eta_2 = \frac{\sum (p_z + p_d + p_j)}{\sum (m_z + m_d + m_j)} \times 100\% \quad (8)$$

式中  $p_z$ 、 $p_d$  和  $p_j$  以及  $m_z$ 、 $m_d$  和  $m_j$  分别代表组合生态湿地、多级人工湿地和景观型生态湿地每月 TN 或 TP 的拦截量及输入量。

该试验数据处理方法采用 SigmaPlot 12.5 作图, 并用 SPSS 22 进行数据统计分析、相关显著性分析。

2 结果与分析

2.1 研究区氮磷污染物排放特征

开慧河流域源区农业面源氮磷污染物排放状况

表明(表 2), 2015 年开慧河流域源区农业面源 TN 和 TP 排放总量(即总污染负荷)分别为  $15.0 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $2.42 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。其中, 畜禽养殖业 TN 和 TP 排放量分别为  $12.7 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $2.25 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ , 水稻种植业 TN 和 TP 排放量分别为  $1.84 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $0.095 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ , 研究区内农村居民生活氮磷排放量最小, 仅为  $0.44 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $0.079 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。研究区 TN 污染物排放量主要来源于畜禽养殖业(84.7%), 其次是水稻种植业(12.3%)和农村居民生活(3.0%)。三大污染源对 TP 排放总量的贡献率大小顺序依次是畜禽养殖业(92.8%)>水稻种植业(3.9%)>农村居民生活(3.3%)。可见, 畜禽养殖业是开慧河流域源区氮磷污染物的主要来源, 为该区域的重点防控对象。

表 2 各类污染源 TN 和 TP 排放量及贡献率(2015 年)

| 污染源    | 污染物排放量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ |       | 贡献率/% |      |
|--------|--------------------------------------|-------|-------|------|
|        | TN                                   | TP    | TN    | TP   |
| 农村居民生活 | 0.44                                 | 0.079 | 3.0   | 3.3  |
| 畜禽养殖业  | 12.7                                 | 2.25  | 84.7  | 92.8 |
| 水稻种植业  | 1.84                                 | 0.095 | 12.3  | 3.9  |
| 总计     | 15.0                                 | 2.42  | 100   | 100  |

2.2 生态治理工程氮磷去除效果分析

2.2.1 组合生态湿地处理工程对农村分散式生活与养殖混合废水的处理效应

2015 年 9 月~2016 年 8 月, 组合生态湿地处

理工程进、出水 TN 和 TP 浓度及其去除率如图 2 所示。进水 TN 和 TP 的浓度范围分别为  $24.4 \sim 262 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $2.2 \sim 45.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 经组合生态湿地处理后, 出水 TN 和 TP 的浓度显著降低( $P<0.01$ ), 其浓度范围分别为  $2.5 \sim 18.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.26 \sim 4.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 除 6 月(TP: $4.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )和 8 月(TP: $2.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 出水水质均达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 B 类标准( $\text{TN}\leq 20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{TP}\leq 1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; GB 18918-2002)。组合生态湿地对 TN 和 TP 去除率分别为 62.7%~97.9% 和 70.4%~96.1%, 年平均去除率达到 87.1% 和 90.9%。该组合生态湿地对 TN、TP 去除效果总体稳定, 适合对农村分散式生活与养殖混合废水的处理。

2.2.2 多级人工湿地拦截工程对农田排水与分散式养殖混合废水的处理效应

多级人工湿地拦截工程的进、出水 TN 和 TP 浓度及其去除率变化情况如图 3 所示。2015 年 9 月~2016 年 8 月, 湿地进水 TN 和 TP 的浓度范围分别为  $10.2 \sim 179 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $7.0 \sim 35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 经处理后, 出水 TN 和 TP 浓度范围分别为  $2.8 \sim 11.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.31 \sim 4.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。该湿地对 TN 和 TP 的去除率分别为 69.4%~96.4% 和 57.7%~97.9%, 年平均去除率达到了 85.7% 和 84.9%, 对农田排水与分散式养殖混合废水有较好地拦截净化效果。

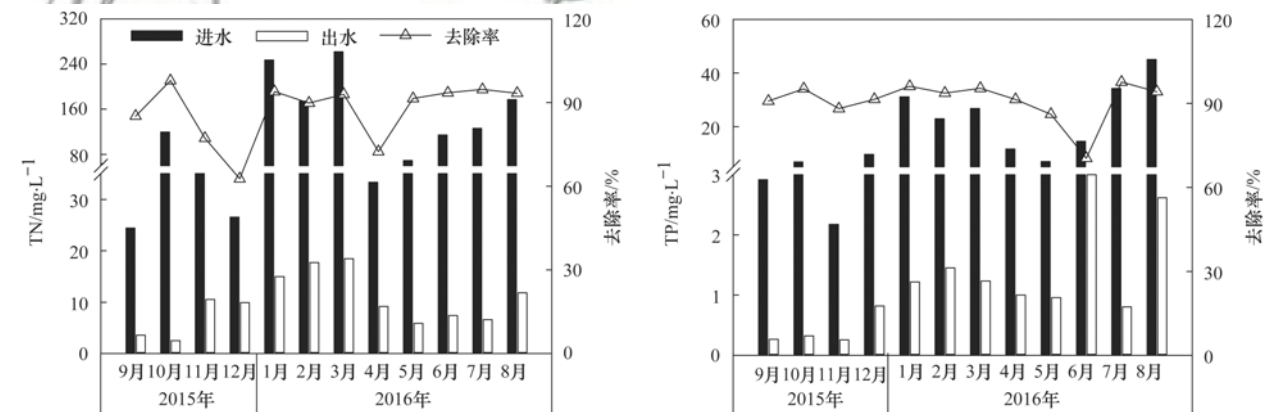


图 2 组合生态湿地进、出水中 TN 和 TP 浓度及其去除率变化

Fig. 2 Changes of TN and TP concentrations in inlet, outlet and their removal rates in the combined ecological wetland

2.2.3 景观型生态湿地净化工程对末端汇水区的水质净化效应

景观型生态湿地净化工程进、出水 TN 和 TP 浓度及其去除率情况见图 4。湿地进水 TN 和 TP 浓度分别为  $3.3 \sim 7.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.13 \sim 2.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。经景观型生态湿地净化处理后, 出水 TN 和 TP 浓度分别为  $1.2 \sim 4.3$ 、 $0.08 \sim 1.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 与进水 TN 和 TP 浓度有相同的变化趋势, 均存在显著正相关关

系( $P<0.01$ ), 表明进水污染情况对出水水质有较大影响。整个监测期间, 景观型生态湿地对 TN、TP 的去除率分别为 27.1%~67.4% 和 13.3%~81.5%, 随季节的变化, 该湿地对水体中氮磷去除能力有较大的波动性。

2.3 生态工程综合治理系统对流域氮磷污染物的拦截量

开慧河流域面源污染生态工程综合治理系统

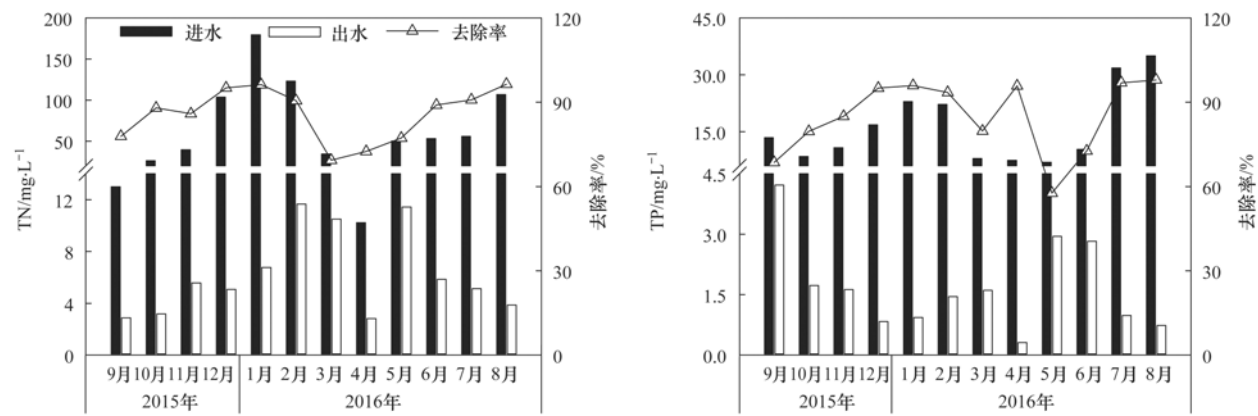


图3 多级人工湿地进、出水 TN 和 TP 质量浓度及其去除率变化

Fig. 3 Changes of TN and TP concentrations in inlet, outlet and their removal rates in the multi-stage constructed wetlands

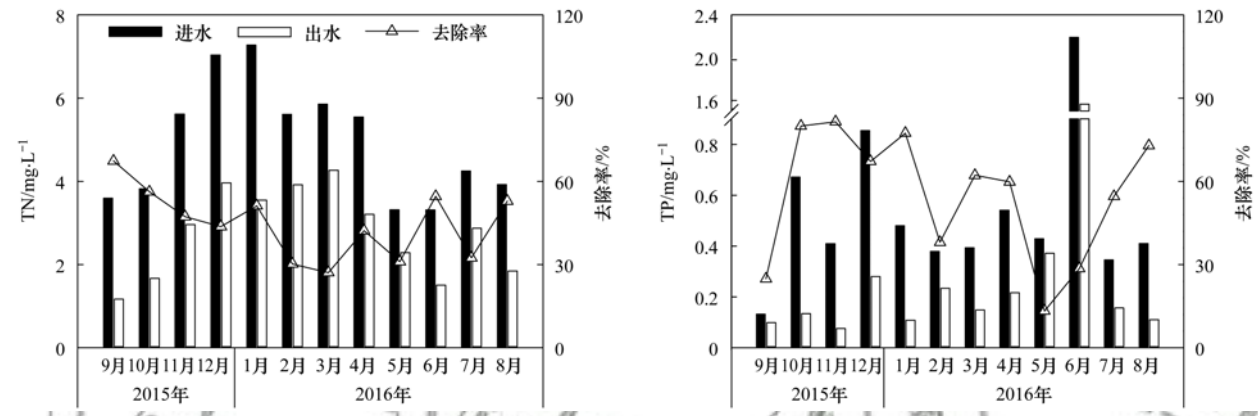


图4 景观型生态湿地进、出水 TN 和 TP 质量浓度及其去除率变化

Fig. 4 Changes of TN and TP concentrations in inlet, outlet and their removal rates in the landscape-based ecological wetland

中,建立的3个生态治理工程对TN和TP的拦截量如表3所示.在2015年9月~2016年8月的1年中,组合生态湿地对农村分散式生活与养殖混合废水的TN和TP拦截量分别为2 827 kg·a<sup>-1</sup>和470 kg·a<sup>-1</sup>;处理农田排水与分散式养殖混合废水的多级人工湿地对TN和TP的拦截量分别为1 510 kg·a<sup>-1</sup>和455 kg·a<sup>-1</sup>;景观型生

态湿地对氮磷污染物的拦截量分别为956 kg·a<sup>-1</sup>和129 kg·a<sup>-1</sup>.整个生态工程综合治理系统对流域TN和TP污染物的总拦截量分别为5 292 kg·a<sup>-1</sup>和1 054 kg·a<sup>-1</sup>,占2015年开慧河流域源区农业面源TN和TP排放总量的35.3%和43.6%,且系统对TN和TP的总拦截率分别达到了74.9%、82.6%.

表3 生态工程综合治理系统对TN和TP的拦截量/kg·a<sup>-1</sup>

| 生态治理工程      | TN    |       |       | TP    |     |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
|             | 输入量   | 输出量   | 拦截量   | 输入量   | 输出量 | 拦截量   |
| 组合生态湿地处理工程  | 3 083 | 256   | 2 827 | 502   | 33  | 470   |
| 多级人工湿地拦截工程  | 1 700 | 190   | 1 510 | 508   | 53  | 455   |
| 景观型生态湿地净化工程 | 2 288 | 1 332 | 956   | 266   | 137 | 129   |
| 总计          | 7 070 | 1 778 | 5 292 | 1 277 | 222 | 1 054 |

3 讨论

农村分散式畜禽养殖业是我国许多农村地区重要的经济来源,但由于养殖户对畜禽养殖废弃物处理随意,常直接排放至沟渠、河流或过量施用到农田,已引起当地严重的水环境污染问题<sup>[20]</sup>.湖南省是我国畜禽养殖大省,部分农村地区畜禽养殖废弃

物引起的流域污染问题非常突出.以本研究区为例,调查结果证实分散式畜禽养殖业是开慧河流域农业面源氮磷污染物的主要来源,其贡献率分别达到84.7%和92.8%,远高于水稻种植业和农村居民生活.农田施肥也是造成水环境农业面源污染的重要因素之一,合理施肥并治理农田氮磷流失造成的水体污染也非常必要.比如,蔡金洲等<sup>[21]</sup>在解析

湖北三峡库区农业面源污染源时发现,该地以种植业污染为主,等标氮磷污染贡献占比达到 56.1%,高于畜禽养殖业(34.4%),这主要是因为该地区氮和磷肥年均施用量为  $485.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $201.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,远高于全国平均水平( $150 \sim 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )<sup>[22]</sup>. 在本研究中,农田氮和磷肥年均施用量(以  $\text{N}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  计)为  $219.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $136.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,对开慧河流域农业面源 TN 和 TP 排放总量的贡献率为 12.3% 和 3.9%,成为开慧河流域面源污染的第二大来源. 尽管开慧河流域源区农村居民生活氮磷排放量占排放总量的比例仅为 3.0% 和 3.3%,但由于农村普遍环保意识较差,缺少相应地生活垃圾和生活污水处理设施,且生活污水中含有相当数量的微生物,其中一些病原体如病菌、病毒、寄生虫等,对人的健康有较大危害<sup>[23]</sup>. 因此,居民生活污水同样不可忽视. 可见,开慧河流域面源污染防治的重点是处理分散式畜禽养殖污染,应该在研究区的养殖密集区进行重点防控,布设生态治理工程,同时注意与农田排水和分散式居民生活污水处理相结合,综合治理.

本研究在开慧河流域源区建立的面源污染生态工程综合治理系统主要包括组合生态湿地处理工程、人工湿地拦截工程和景观生态湿地净化工程. 2015 年 9 月~2016 年 8 月,组合生态湿地处理工程和多级人工湿地拦截工程对混合废水中 TN、TP 的年平均去除率均超过了 80%,高于已有报道的一些人工湿地对养殖污水或农村生活污水的氮磷去除率<sup>[24~25]</sup>. 虽然组合生态湿地处理工程和多级人工湿地拦截工程的进水浓度变化较大,但出水稳定达标,说明它们耐冲击负荷能力强、运行稳定,对小流域农村混合污水具有良好的去除效果. 组合生态湿地处理工程采用了生物滤池-表面流人工湿地-稳定塘组合式工艺对混合污水进行处理. 这与单一的处理工艺相比,能更稳定、有效地处理农村分散式生活和养殖混合污水,优化工艺对氮磷污染物的去除<sup>[26]</sup>. 另一方面,两个湿地工程中种植植物以绿狐尾藻为主,该植物具有生物量大、生长期长、对氮磷吸收能力强等突出优点. 室内模拟试验和野外示范工程运行监测均证实了绿狐尾藻湿地系统对养殖污水的高效脱氮除磷作用<sup>[27,28]</sup>,对绿狐尾藻进行多次收割管理能保持湿地系统的稳定性,并进一步强化湿地系统的氮磷去除能力<sup>[16,29]</sup>. 而且绿狐尾藻根系密集,能够拦截更多的细颗粒,对底泥吸附磷具有促进作用<sup>[30]</sup>,同时根系泌氧及分泌物可以为微生物提供良好的生境环境,植物与微生物联合作用也强化了湿地氮磷去除能力<sup>[31]</sup>.

本研究在河流源区汇水末端设置景观型生态湿地净化工程作为最后屏障,进一步降低氮磷浓度. 监测期间,景观型生态湿地出水 TN 和 TP 浓度明显降低. TN 浓度由超过国家地表水Ⅲ类水质标准的 3.9 倍降低到 1.8 倍;TP 平均浓度由  $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降低到  $0.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其中,出水 TP 浓度有 7 个月达到国家地表水Ⅲ类水质标准( $\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). 流域出水水质得到明显改善,有效防止氮磷污染向下游水体的进一步迁移.

流域农业面源污染治理是一项艰巨复杂的系统工程,因地制宜组合联用多项生态治理技术,对实现流域污染综合治理具有重要意义<sup>[32]</sup>. 总体上,本研究构建的小流域面源污染生态工程综合治理系统对流域氮磷污染物总拦截量分别为  $5292 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $1054 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ,总拦截率分别达到 74.9%、82.6%. 对氮磷污染去除效果明显,特别是以磷指标来看,流域源区出水水质大多数月份达到国家地表水Ⅲ类标准以上. Wang 等<sup>[33]</sup>报道了通过沿河流分布的人工或自然景观缓冲结构(拦截坝、沟渠、湿地和塘及河岸带等)构成的景观缓冲带系统也可以有效地拦截地表径流中的氮,该系统对 TN 的拦截率为 66.1%,使得河道水体中 TN 浓度从  $12.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  下降至  $3.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,证实了构建综合性缓冲带系统是减少流域氮磷污染的有效途径. 陆海明等<sup>[34]</sup>的研究发现,由一系列生态工程措施组成的生态防控体系能有效削减农村饮水水源地小流域的污染物负荷,流域出口 TN 浓度从  $10.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降低到  $2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,TP 浓度由上游水体的 V 类水下降到下游水体的Ⅳ类(湖、库地表水标准),水质得到明显提升. 经统计分析,本研究建立的生态工程综合治理系统拦截的氮磷总量占该区面源污染氮磷排放总量的 35.3% 和 43.6%,且对流域水质改善明显. 因此,利用组合研发的农村混合废水处理技术,以生态湿地为核心的小流域生态工程综合治理系统能有效消减流域氮磷污染物,适合在我国农业小流域氮磷污染的治理中推广应用.

#### 4 结论

(1) 开慧河流域源区农业面源 TN 和 TP 排放总量分别为  $15.0 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $2.42 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,污染来源主要包括畜禽养殖业、水稻种植业和农村居民生活,其中畜禽养殖业是开慧河流域源区氮磷污染的主要来源,为该区域的重点防控对象.

(2) 构建的组合生态湿地处理工程和多级人工湿地拦截工程对农村分散式生活与畜禽养殖混合废水和农田排水与畜禽养殖混合废水中 TN 和 TP 的

平均去除率均在 80% 以上,景观型生态湿地净化工程能有效提升河水水质,流域出水水质基本从劣 V 类提升到Ⅲ类。

(3)通过在小流域尺度上的应用示范,构建的生态工程综合治理系统对氮磷污染物的总拦截量为  $5\,292\text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $1\,054\text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$ ,占研究区农业面源 TN 和 TP 排放总量的 35.3% 和 43.6%,适合作为我国南方小流域面源污染综合治理技术进行推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[EB/OL]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qtjgb/qgqtjgb/201002/t20100211\\_30641.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qtjgb/qgqtjgb/201002/t20100211_30641.html), 2010-02-06.
- [2] 杨林章,冯彦房,施卫明,等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96-101.  
Yang L Z, Feng Y F, Shi W M, *et al.* Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 96-101.
- [3] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, *et al.* Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. Ecological Applications, 1998, 8(3): 559-568.
- [4] 谢经朝,赵秀兰,何丙辉,等. 汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1760-1769.  
Xie J C, Zhao X L, He B H, *et al.* Characteristics analysis of nitrogen and phosphorus emission from agricultural nonpoint sources on Hanfeng lake basin[J]. Environmental Science, 2019, 40(4): 1760-1769.
- [5] 李秀芬,朱金兆,顾晓君,等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4): 81-84.  
Li X F, Zhu J Z, Gu X J, *et al.* Current situation and control of agricultural non-point source pollution[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(4): 81-84.
- [6] 吴永红,胡正义,杨林章. 农业面源污染控制工程的“减源-拦截-修复”(3R)理论与实践[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 1-6.  
Wu Y H, Hu Z Y, Yang L Z. Strategies for controlling agricultural non-point source pollution: reduce-retain-restoration (3R) theory and its practice[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 1-6.
- [7] 付斌,刘宏斌,鲁耀,等. 高原湖泊典型农业小流域氮、磷排放特征研究——以凤羽河小流域为例[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2892-2899.  
Fu B, Liu H B, Lu Y, *et al.* Study on characteristics of nitrogen and phosphorus emission in typical small watershed of plateau lakes: A case study of the Fengyu River Watershed[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(9): 2892-2899.
- [8] 杨林章,施卫明,薛利红,等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 1-8.  
Yang L Z, Shi W M, Xue L H, *et al.* Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in china: general countermeasures and technologies[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(1): 1-8.
- [9] 朱蒋洁,曾艳,陈敬安,等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 四川环境, 2014, 33(3): 153-161.  
Zhu J J, Zeng Y, Chen J A, *et al.* Review of agricultural non-point source pollution control technology[J]. Sichuan Environment, 2014, 33(3): 153-161.
- [10] Mendes L R D, Tonderski K, Iversen B V, *et al.* Phosphorus retention in surface-flow constructed wetlands targeting agricultural drainage water[J]. Ecological Engineering, 2018, 120: 94-103.
- [11] Kasak K, Kill K, Pärn J, *et al.* Efficiency of a newly established in-stream constructed wetland treating diffuse agricultural pollution[J]. Ecological Engineering, 2018, 119: 1-7.
- [12] 陈莹,陈永华,宋胡,等. 表面流-潜流-潜流串联人工湿地对排入星月水库污水的处理效果[J]. 湿地科学, 2018, 16(1): 59-66.  
Chen Y, Chen Y H, Song H, *et al.* Treatment effectiveness of sewage drain into Xingyue reservoir by surface flow constructed wetlands-subsurface flow wetlands-subsurface flow wetlands[J]. Wetland Science, 2018, 16(1): 59-66.
- [13] 王迪,李红芳,刘锋,等. 亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1717-1723.  
Wang D, Li H F, Liu F, *et al.* Interception effect of ecological ditch on nitrogen transport in agricultural runoff in subtropical china[J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1717-1723.
- [14] 张树楠,肖润林,刘锋,等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4516-4522.  
Zhang S N, Xiao R L, Liu F, *et al.* Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches[J]. Environmental Science, 2015, 36(12): 4516-4522.
- [15] 刘长娥,周胜,孙会峰,等. 复合人工湿地处理低浓度畜禽养殖废水的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1416-1424.  
Liu C E, Zhou S, Sun H F, *et al.* Purification performance of combined constructed wetlands on livestock wastewater with low concentration of pollutants[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(7): 1416-1424.
- [16] Luo P, Liu F, Zhang S N, *et al.* Nitrogen removal and recovery from lagoon-pretreated swine wastewater by constructed wetlands under sustainable plant harvesting management[J]. Bioresource Technology, 2018, 258: 247-254.
- [17] Peterson B J, Wollheim W M, Mulholland P J, *et al.* Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams[J]. Science, 2001, 292(5514): 86-90.
- [18] 李红芳,刘锋,黎慧娟,等. 生物滤池/人工湿地/稳定塘工艺处理农村分散污水[J]. 中国给水排水, 2015, 31(2): 84-87.  
Li H F, Liu F, Li H J, *et al.* Combined process of biofilter, constructed wetland and stabilization pond for treatment of rural decentralized sewage[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(2): 84-87.
- [19] 崔超,刘申,翟丽梅,等. 兴山县香溪河流域农业源氮磷排放估算及时空特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 937-946.  
Cui C, Liu S, Zhai L M, *et al.* Estimates and spatio-temporal characteristics of nitrogen and phosphorus discharges from agricultural sources in Xiangxi river basin, Xingshan county[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(5): 937-946.
- [20] 杨凤飞,刘锋,尹黎明,等. 亚热带典型分散式养殖农区的环境污染特征研究[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(1): 113-117.  
Yang F F, Liu F, Yin L M, *et al.* Study on characteristics of environmental pollution in rural area with typical decentralized animal breeding in subtropical region[J]. Research of

- Agricultural Modernization, 2014, **35**(1): 113-117.
- [21] 蔡金洲, 范先鹏, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区农业面源污染解析[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(7): 1421-1430.  
Cai J Z, Fan X P, Huang M, *et al.* Sources analysis of agricultural non-point source pollution in the three gorges reservoir area of Hubei province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(7): 1421-1430.
- [22] 朱兆良, Norse D, 孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.  
Zhu Z L, Norse D, Sun B. Policy for reducing non-point pollution from crop production in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [23] 王书文, 刘庆玉, 焦银珠, 等. 生活污水土壤渗滤就地处理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2006, **32**(3): 5-10.  
Wang S W, Liu Q Y, Jiao Y Z, *et al.* The latest progress in soil infiltration treatment of sewage in situ[J]. Technology of water Treatment, 2006, **32**(3): 5-10.
- [24] Jia H F, Sun Z X, Li G H. A four-stage constructed wetland system for treating polluted water from an urban river [J]. Ecological Engineering, 2014, **71**: 48-55.
- [25] 尹振娟, 杨扬, 卢建, 等. 生物法-人工湿地组合工艺对小城镇混合污水氮素去除效果研究[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(5): 1044-1049.  
Yin Z J, Yang Y, Lu J, *et al.* Studies on the effects of the combined process of A/BCO-CW for treatment of small town mixed sewage[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, **19**(5): 1044-1049.
- [26] Vymazal J. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: a review of a recent development[J]. Water Research, 2013, **47**(14): 4795-4811.
- [27] Liu F, Zhang S N, Wang Y, *et al.* Nitrogen removal and mass balance in newly-formed *Myriophyllum aquaticum* mesocosm during a single 28-day incubation with swine wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Management, 2016, **166**: 596-604.
- [28] Zhang M M, Luo P, Liu F, *et al.* Nitrogen removal and distribution of ammonia-oxidizing and denitrifying genes in an integrated constructed wetland for swine wastewater treatment [J]. Ecological Engineering, 2017, **104**: 30-38.
- [29] Luo P, Liu F, Liu X L, *et al.* Phosphorus removal from lagoon-pretreated swine wastewater by pilot-scale surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum aquaticum* [J]. Science of the Total Environment, 2017, **576**: 490-497.
- [30] 李红芳, 刘锋, 肖润林, 等. 水生植物对生态沟渠底泥磷吸附特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(1): 157-163.  
Li H F, Liu F, Xiao R L, *et al.* Effects of aquatic plants on phosphorus adsorption characteristics by sediments in ecological ditches[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(1): 157-163.
- [31] Huang J, Wang S H, Yan L, *et al.* Plant photosynthesis and its influence on removal efficiencies in constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2010, **36**(8): 1037-1043.
- [32] 袁自力, 吴金水, 谢卫宁, 等. 开慧河生态清淤小流域建设湿地技术应用研究[A]. 见: 中国首届城市水土保持学术研讨会论文集[C]. 深圳: 中国水土保持学会, 中国水土保持学会城市水土保持生态建设专业委员会, 2013.
- [33] Wang X H, Yin C Q, Shan B Q. The role of diversified landscape buffer structures for water quality improvement in an agricultural watershed, North China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, **107**(4): 381-396.
- [34] 陆海明, 邹鹰, 孙金华, 等. 南方农村饮水水源地生态防控体系示范工程——以南京市东龙河小流域为例[J]. 水利水电工程学报, 2011, (3): 59-64.  
Lu H M, Zou Y, Sun J H, *et al.* Demonstration projects of ecological engineering for rural drinking water source area protection in South China: a case study in Donglong stream catchment of Nanjing [J]. Hydro-Science and Engineering, 2011, (3): 59-64.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                   |                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016                                      | ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)       |
| Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering                                             | WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)                   |
| Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China                                                  | SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)         |
| Concentration Characteristics and Source Analysis of PM <sub>2.5</sub> During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang                                                    | YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027) |
| Scenario Analysis of PM <sub>2.5</sub> Concentration Targets and Milestones in China                                                                              | HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)             |
| PM <sub>2.5</sub> Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang                               | DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)              |
| Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City                                           | ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)    |
| Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China                                            | QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)       |
| Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City                                                    | LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)            |
| Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees                                                         | LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)      |
| Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China                                | HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)          |
| Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments                                          | LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)               |
| Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China                                                     | FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)             |
| Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China         | CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)            |
| Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin                                       | YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)      |
| Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment                                                                            | HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)       |
| Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo                                                                   | ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143) |
| Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir           | QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)    |
| Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m                      | LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)       |
| Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods                                                | LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)           |
| Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin | LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)                              |
| Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River                                    | XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)           |
| Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed                                           | JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)    |
| Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin                                                            | ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)                |
| Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area                          | MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)        |
| Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland                                                                      | LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)       |
| Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands                                                                                   | FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)             |
| Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments                                                                                    | HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)         |
| Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai                                                  | WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)                |
| Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China            | WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)           |
| Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification                                                    | LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)         |
| Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>                | BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)        |
| Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite                                                                                                     | FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)                     |
| Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV                                                                                 | LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)                               |
| Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites                                                                 | HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)         |
| Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite                                                                        | FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)          |
| Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems                                                  | QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)      |
| Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control                                             | WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)          |
| Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations                                                             | MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)     |
| Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR                                                                                           | SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)                  |
| Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System                                                      | WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)            |
| Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics                                                   | YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)        |
| Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria                                                                   | LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)          |
| Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater                                 | HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357) |
| Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants                                                       | QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)      |
| Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain                                                                        | WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)                   |
| Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes                                                                  | LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)         |
| Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System                                                                 | LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)           |
| Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH <sub>4</sub> Emissions from a Vegetable Field                                          | NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)      |
| Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods                                                                           | WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)        |
| Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas                                                  | TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)       |
| Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil                                                                      | ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)           |
| Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi                                                   | SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)             |
| Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland                                                                           | ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)             |
| Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.                          | JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)    |
| Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil                                                                                    | SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)                     |
| Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant                         | LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)     |