

百方知库
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 O₃ 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, 徐敏(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, 刁海玲, 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)

气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, 刘彦廷, 王洪涛, 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/硫酸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 *Pseudomonas putida* 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, 郇丹(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)

内源磷 PHA 的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 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, 职音, 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(N₂O)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 CH₄ 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发展 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)

汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析

谢经朝^{1,2}, 赵秀兰^{1,2*}, 何丙辉¹, 李章安³

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716; 3. 重庆市开州区环境监测站, 开州 405400)

摘要: 为把握汉丰湖流域农业面源污染现状, 探明其首要污染源和重点控制区域, 应用排污系数法估算了汉丰湖流域 2015 年种植业源、畜禽养殖业源和农村生活源 TN、TP 污染物的贡献量, 利用 GIS 空间分析法研究了其排放的空间分布特征. 结果表明, 2015 年汉丰湖流域农业面源污染 TN 和 TP 的总负荷量分别为 2 721.42 t 和 492.04 t; 等标污染负荷量以南河子流域最大, 汉丰湖子流域最小; 不同类型农业面源等标污染负荷总量差异很大, 以肥料源和畜禽养殖业源为主要来源, 其中肥料源等标污染贡献率为 76.92%, 是汉丰湖流域首要污染源; 各乡镇中, 敦好镇、铁桥镇和白桥镇的等标污染负荷量较高, 均高于 $350 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 为重点控制乡镇. 等标污染负荷评价及聚类分析结果表明, 汉丰湖流域农业面源有种植业源-畜禽养殖业复合主导型、肥料源-畜禽养殖业复合主导型、种植业源严重污染型和肥料源复合主导型这 4 种污染类型.

关键词: 汉丰湖流域; 农业面源污染; 排污系数法; 等标污染负荷; 空间分布特征

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1760-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.201808192

Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin

XIE Jing-chao^{1,2}, ZHAO Xiu-lan^{1,2*}, HE Bing-hui¹, LI Zhang-an³

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment of Chongqing, Chongqing 400716, China; 3. Environmental Monitoring Station in Kaizhou District, Kaizhou 405400, China)

Abstract: To understand the status of agricultural non-point source pollution and to find out the primary pollution sources and the key control areas in the Hanfeng Lake Basin, the discharges of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) from farming, livestock and poultry breeding, and rural living in thirty-two counties in 2015 were estimated using the pollutant discharge coefficient method. The spatial distribution characteristics of the quality and intensity of the TN and TP emissions from these sources were investigated using the GIS spatial analysis method. Pollution evaluation and source analysis were also carried out using the equivalent pollution load method. The results show that the total loads of TN and TP in the Hanfeng Lake Basin are 2 721.42 t and 492.04 t, respectively. The discharge of pollutants is the largest in the Nanhe Basin and the smallest in the area around Hanfeng Lake. The total pollutant loads from the agricultural non-point sources varied greatly, with fertilizer application and livestock and poultry breeding being the main sources. The contribution from fertilizer application is 76.92%, which represents the primary source of TN and TP pollution in the Hanfeng Lake Basin. Among the townships, the equivalent pollution loads of Dunhao, Tiejiao, and Baiqiao are higher than $350 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$; thus, these are the key control towns. According to the results of the equivalent pollution method and cluster analysis, the 32 counties were divided into four types of pollution areas. These areas are planting-livestock breeding dominant area, fertilizer-livestock breeding dominant area, fertilizer dominant area, and heavily polluted planting dominant area.

Key words: Hanfeng Lake Basin; agricultural non-point source pollution; pollutant discharge coefficient; equivalent pollution load; spatial distribution characteristics

水体富营养化一直是国内外环境科学领域关注的热点^[1,2], 也是我国三峡水库当前亟待解决的环境问题之一^[3]. 有研究表明, 湖、库水体富营养化程度与氮磷含量明显相关^[4], 农业生产活动中大量氮、磷等污染物进入地表水体^[5], 是引起湖泊、水库等水体富营养化的重要原因之一^[6]. 英国农业面源污染是主要污染源^[7], 点源污染严格控制后, 水体的水质依然没有得到很好的恢复^[8], 农业面源污染也是全美河流的第一大污染源^[9], 丹麦 270 条河流 94% 的氮负荷和 52% 的磷负荷是由农业面源污染引起^[10]. 在我国, 农业面源污染形势也非常严

峻, 《第一次全国污染源普查公报》显示, 我国农业源(含畜禽养殖业、水产养殖业、种植业)已成为污染源之首, 其氮磷排放量分别占总排放量的 57.2% 和 67.4%^[11], 太湖流域^[12]、宝象河流域^[13]、巢湖流域^[14] 面源污染对总氮(TN)的贡献率分别达 83%、74% 和 52.5%, 对总磷(TP)的贡献率分别达 84%、68% 和 35.9%; 延河流域^[15] 及长江流域^[16]

收稿日期: 2018-08-24; 修订日期: 2018-10-26

基金项目: 国务院三峡工程建设委员会办公室生态与环境系统重点支流水质监测项目

作者简介: 谢经朝(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: 2460653508@qq.com

* 通信作者, E-mail: zxl@swu.edu.cn

等水环境的农业面源问题也备受关注。进行农业面源污染负荷和贡献强度估算对掌握区域水环境主要污染物来源以及面源污染控制具有重要意义。

农业面源污染具有时空的不确定性和随机性, 估算和评价农业面源污染具有较大难度^[17]。目前, 国内外农业面源污染负荷主要的估算方法有径流分割法^[18]、输出系数法^[19]、模型法^[20]和排污系数法^[21]等, 估算方法的选择通常以掌握资料的完整度为依据, 其中排污系数法相对简单、参数要求不高、应用性强, 通常用于监测数据较少的情况下对氮磷负荷进行估算^[22]。对农业面源污染源解析的方法主要有模型法^[23]、平均浓度法^[24]、GIS 空间分析法^[25]、清单法^[26]和等标污染负荷法^[27]等, 其中, 等标污染负荷法是根据环境水体水质的功能要求来评价污染物的威胁, 不仅考虑了排放来源特征, 也考虑到对环境水质的危害程度。

本研究应用排污系数法估算了开州区汉丰湖流域种植业源、养殖业源及农村生活污染源的氮磷贡献量, 采用 GIS 技术分析了其空间分异特征, 采用等标污染负荷、聚类分析方法探讨了流域污染特征和控制的重点区域及污染类型, 以为汉丰湖农业面源污染防治提供科学依据, 进而为三峡库区农业面源污染的综合治理奠定基础。

1 材料与与方法

1.1 研究区概况

汉丰湖位于三峡水库一级支流小江(澎溪河)的上游, 地处三峡水库区的腹地地带, 位于开州区东河与南河交汇处, 设计常年水位为 170~175 m (吴淞高程), 库周长为 36.4 km, 水域面积 14.8 km², 呈“Y”字形沿县城东西延展, 蓄水量 8 000 万 m³。汉丰湖流域有 3 条主要河流, 分别为东河、南河和桃溪河, 其中桃溪河是南河的一条支流。开州区是一个农业大区, 2015 年全区耕地面积共 1 008 km², 共 42 个乡镇, 其中汉丰湖流域有 32 个乡镇。汉丰湖流域总面积约 3 000 km², 耕地面积约 750 km², 户籍人口 168.35 万人, 农业人口 114.12 万人, 占总人口的 67.8%, 常住人口约 105.20 万人, 畜禽养殖类型主要以猪、肉牛和鸡为主。根据自然环境特征及水系情况, 将汉丰湖流域分成桃溪河子流域、南河子流域、东河子流域及汉丰湖子流域这 4 个区域, 其分布见图 1。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

本研究数据主要来源于相关年鉴、年报、文献^[28~30]以及其他相关更新调查, 调查以乡镇为基



图 1 汉丰湖流域水系及子流域划分示意

Fig. 1 Map of the water system and sub watershed in the Hanfeng Lake Basin

本单元。

1.2.2 污染排放估算方法

利用排污系数法估算种植业源(肥料和作物秸秆)、畜禽养殖业和农村生活源的氮磷负荷, 方法见参考文献^[31], 生活污水和生活垃圾的排放系数、污染物平均含量和平均质量浓度、入河系数以及肥料的利用率和平均入河系数、秸秆的综合利用率和入河系数取值均参考文献^[32], 有机肥和秸秆的养分含量参考文献^[33], 具体估算方法如下。

(1) 种植业污染源贡献量的指标核算

化肥污染源贡献量:

$$\text{化肥污染源贡献量} = \text{化肥施用量(折纯量)} \times (1 - \text{化肥利用率}) \times \text{入河系数}$$

根据开州区农业技术推广中心 2014 年肥料利用率试验, 全区肥料常规施用区氮肥、磷肥利用率分别为 29.47%、15.77%^[34]。

根据湖北省和重庆市农业环境监测站监测结果, 氮、磷的入河系数分别为 0.1007 和 0.0599。以氮肥、磷肥的折纯量分别计算 TN、TP 的贡献量, 不考虑化肥的 COD、BOD₅ 的贡献量。

有机肥污染源贡献量:

$$\text{有机肥污染源贡献量} = \text{有机肥施用量} \times (1 -$$

有机肥利用率) × 有机肥养分含量 × 入河系数

作物秸秆源污染贡献量:

作物秸秆污染源贡献量 = 某作物产量 × 某作物秸秆产出系数 × (1 - 秸秆利用率) × 秸秆养分含量 × 入河系数

作物种类有水稻、玉米、小麦、油菜、烤烟、花生、高粱、甘蔗、芝麻、薯类、向日葵、蚕豆等, 秸秆产出系数参考文献[35].

(2) 畜禽养殖业污染源贡献量指标核算

畜禽养殖污染源贡献量 = 养殖总量 × 畜禽粪便排放系数 × 粪便中污染物平均含量 × 污染物入河系数

式中, 养殖总量用畜禽存栏量计算, 存栏量可看作当年中一个相对稳定的饲养量, 一般畜禽的增补量与出栏量大约相同; 畜禽粪便排放系数、畜禽粪便中污染物平均含量及其入河系数由原国家环保总局推荐^[36].

(3) 生活污染源贡献量指标核算

生活污水污染源贡献量:

生活污水污染源贡献量 = 乡镇人口总数 × 农村生活污水排放系数 × 污水污染物平均质量浓度 × 入河系数.

重庆市农村人均生活污水排放量为 0.67 L·d⁻¹, 污水中 TN 和 TP 平均质量浓度分别取 44.14 mg·L⁻¹ 和 4.49 mg·L⁻¹, 入河系数取 0.30.

生活垃圾污染源贡献量:

生活垃圾污染源贡献量 = 乡镇人口总数 × 农村生活垃圾排放系数 × 垃圾渗滤液平均含量 × 入河系数.

重庆市农村人均生活垃圾排放量为 0.67 kg·d⁻¹, 垃圾渗滤液 TN 和 TP 平均含量分别取 1.00 mg·kg⁻¹ 和 0.2 mg·kg⁻¹, 入河系数取 0.20.

1.2.3 污染负荷评价方法

采用等标污染负荷来综合评价不同污染物或污染源对环境潜在污染能力的大小, 将不同污染物在同一尺度上进行比较, 以确定主要污染源或主要污染物. 某污染物等标污染负荷为单位时间内贡献的含该污染物的废水等标体积, 计算公式如下:

$$P_i = \frac{Q_i}{c_{oi}} \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$K_i = \frac{P_j}{\sum P_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$A_n = \frac{P_n}{S_n} \quad (3)$$

式中, P_i 为污染物 i 的等标污染负荷量, $m^3 \cdot a^{-1}$;

Q_i 为污染物 i 的贡献量, $t \cdot a^{-1}$; c_{oi} 为污染物 i 基于水环境功能分区的水质控制类别标准值^[37], $mg \cdot L^{-1}$; K_i 为污染物 i 的等标污染负荷比; A_n 为乡镇 n 的等标排放系数; P_n 为乡镇 n 的污染物等标污染负荷量之和; S_n 为乡镇 n 的耕地面积, hm^2 .

根据重庆市水环境功能区划修编报告^[38], 汉丰湖流域现状水质为Ⅲ类, 水质管理目标Ⅲ类, 因此 TN 和 TP 分别取 1 $mg \cdot L^{-1}$ 和 0.05 $mg \cdot L^{-1}$ 进行核算.

1.2.4 污染类型划分方法

污染类型划分采用聚类分析进行, 聚类对象为不同乡镇各污染源的等标污染负荷量, 所用软件为 SPSS 21.0.

2 结果与讨论

2.1 农业面源氮磷贡献量及贡献强度估算

2015 年汉丰湖流域农业面源污染 TN 和 TP 总贡献量分别为 2 721.42 t 和 492.04 t, TN 贡献量约为 TP 的 6 倍, TN/TP 比在 5 ~ 10 之间, 与三峡库区以往研究结果相似^[39, 40], 这主要由于土壤固磷作用强于固氮, 土壤中以硝态氮和铵态氮形式存在的氮移动性强, 易淋溶下移^[41]. TN 和 TP 年均贡献强度分别为 314.97 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 180.80 $kg \cdot hm^{-2}$, 与其他流域相比相对较大, 如三峡库区香溪河流域 TN 和 TP 的年均贡献强度分别为 44.5 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 2.14 $kg \cdot hm^{-2}$ ^[42], 海河流域分别为 139.7 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 29.8 $kg \cdot hm^{-2}$ ^[43], 这主要因为开州区是农业大区, 耕地面积大, 常驻农业人口数量较多, 人类活动向土壤输入氮磷较多引起.

汉丰湖流域肥料源、养殖业源、作物秸秆源和农村生活源 TN 的贡献量分别为 2 112.12、535.05、70.79 和 3.46 t, TP 的贡献量分别为 374.72、108.58、8.38 和 0.36 t. 各类污染源贡献率见图 2, 4 种农业面源污染来源中, 肥料源贡献量最多, 占 TN 和 TP 总贡献量的比例分别为 77.61% 和 76.16%, 高于丹江口水库^[44] 和太湖流域^[45, 46] 等肥料源的贡献量; 其次为畜禽养殖业源, 所占比例分别为 19.66% 和 22.07%, 农村生活源氮磷贡献量最小, 这主要与开州区施肥强度较大有关. 2015 年汉丰湖流域各乡镇共施用化肥 46 389.27 t, 施用有机肥 17 862.84 t, 化肥施用强度为 613.32 $kg \cdot hm^{-2}$, 是国际上为防止水体污染而设置的化肥施用安全上限 (225 $kg \cdot hm^{-2}$) 的 2.73 倍, 是我国化肥施用强度 (250 $kg \cdot hm^{-2}$) 的 2.45 倍^[47]. 2012 年开州区农业污染普查结果表明, 化肥源 TN 和 TP 贡献量分别占农业源的 82.7% 和 81.8%, 畜禽养殖

业的 TN 和 TP 分别占农业源的 17.3% 和 18.2%^[48], 本次调查的结果肥料源的贡献比例略低, 畜禽养殖的贡献率略高, 但均反映出开州区农

业面源污染来源主要有 2 个方面, 即畜禽养殖业和种植业, 这与蔡金洲等^[49]对三峡库区农业面源污染源解析中的结论一致。

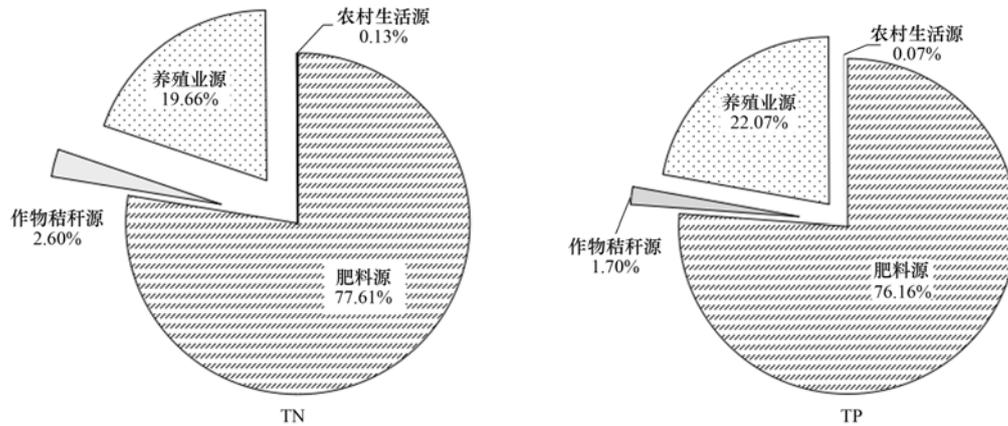


图 2 各类农业面源污染源排放的贡献

Fig. 2 Contribution of various agricultural non-point source pollution sources

2.2 农业面源氮磷贡献量及强度的空间分布

2.2.1 各子流域氮磷贡献量及贡献强度空间分布特征

各子流域氮磷贡献量及强度见表 1。桃溪河子流域、南河子流域、东河子流域及汉丰湖子流域 TN 的贡献率分别为 27.63%、35.13%、31% 和 6.24%, 以南河子流域最大, 汉丰湖子流域最小; TP 的贡献率

分别为 25.98%、34.39%、34.61% 和 5.02%, 以东河子流域最大, 也以汉丰湖子流域最小。

各子流域 TN 贡献强度分别为 275.94、324.71、328.09 和 424.47 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, TP 的贡献强度分别为 46.91、57.46、66.23 和 61.76 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 表明尽管汉丰湖子流域 TN 和 TP 的贡献量最低, 但 TN 的贡献强度却最高, TP 的贡献强度也较高。

表 1 各子流域 TN、TP 总贡献量、强度和贡献率

Table 1 Total contribution, intensity, and contribution of TN and TP in each sub-basin

片区	耕地面积 /hm ²	贡献量/t		贡献强度/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$		贡献率/%	
		TN	TP	TN	TP	TN	TP
桃溪河子流域	2 724.57	751.83	127.82	275.94	46.91	27.63	25.98
南河子流域	2 944.63	956.16	169.2	324.71	57.46	35.13	34.39
东河子流域	2 571.04	843.54	170.29	328.09	66.23	31.00	34.61
汉丰湖子流域	400.24	169.89	24.72	424.47	61.76	6.24	5.02
合计	8 640.48	2 721.42	492.03	—	—	100	100

2.2.2 各乡镇氮磷贡献量及贡献强度空间分布特征

各乡镇氮磷贡献量空间分布见图 3。TN 贡献量较大的乡镇依次为铁桥镇 > 白桥镇 > 中和镇 > 敦好镇, 这 4 个乡镇 TN 贡献量占各乡镇总 TN 贡献量的 26.35%; TP 贡献量较大的乡镇依次是敦好镇 > 白桥镇 > 铁桥镇 > 南雅镇 > 温泉镇, 这 5 个乡镇总 TP 贡献量占各乡镇总 TP 贡献量的 34.70%; 氮磷贡献量较小的乡镇分别为满月乡 > 文峰街道 > 白泉乡 > 关面乡 > 汉丰街道 > 云枫街道和满月乡 > 文峰街道 > 关面乡 > 汉丰街道 > 云枫街道, 占总量的比例分别为 4.16% 和 2.61%。

各乡镇氮磷贡献强度空间分布见图 4。各乡镇 TN 和 TP 贡献强度变幅分别为 8.61 ~ 129.54 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 1.18 ~ 14.95 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 平均贡献强度分

别为 35.98 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 6.50 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。TN 贡献强度较大的乡镇依次为镇东街道 > 云枫街道 > 文峰街道 > 白桥镇 > 丰乐街道, 其中有 4 个乡镇街道在汉丰湖子流域, TP 贡献强度较大的乡镇依次为丰乐街道 > 白桥镇 > 镇东街道 > 和谦镇 > 铁桥镇。表明, 尽管镇东街道、云枫街道、文峰街道和白桥镇氮磷贡献很小, 但贡献强度较大, 也主要是因为化肥的过量施用引起, 因此控制肥料施用量是控制其氮磷贡献强度的关键。

综合图 3 和图 4 看出, 汉丰湖流域农业源氮磷贡献量和贡献强度在空间上呈现较强的区域性分布, 即北部氮磷贡献量和强度较小, 中部和南部较大, 这是因为北部属大巴山南坡, 多为中山槽谷, 农业活动强度弱, 而南部为低山丘陵区, 多为平坝浅丘, 农业活动强度大引起。北部中山槽谷地貌的

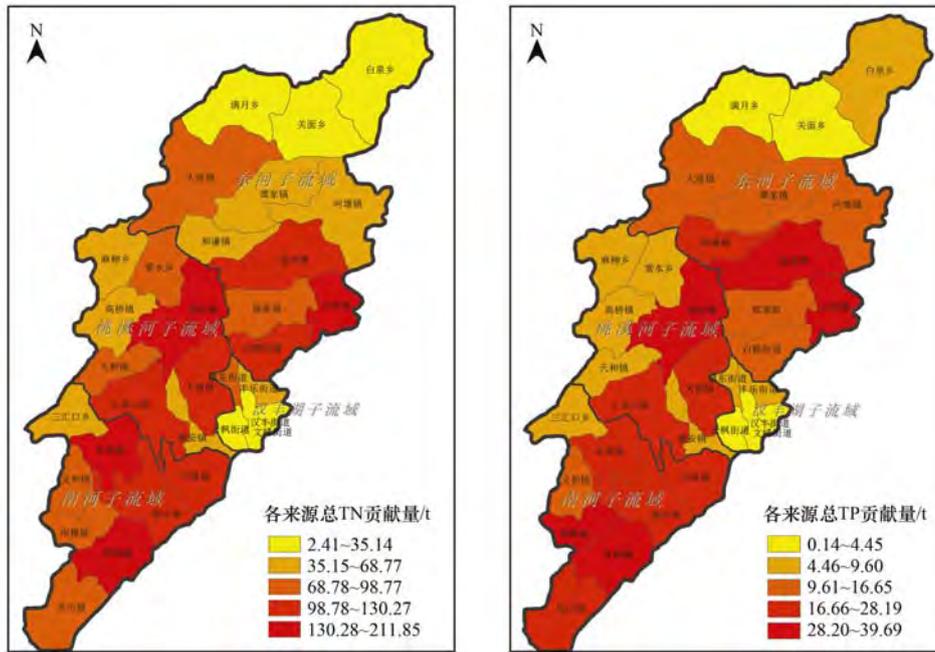


图 3 汉丰湖流域各乡镇 TN、TP 贡献量空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of TN and TP emissions from various towns in the Hanfeng Lake Basin

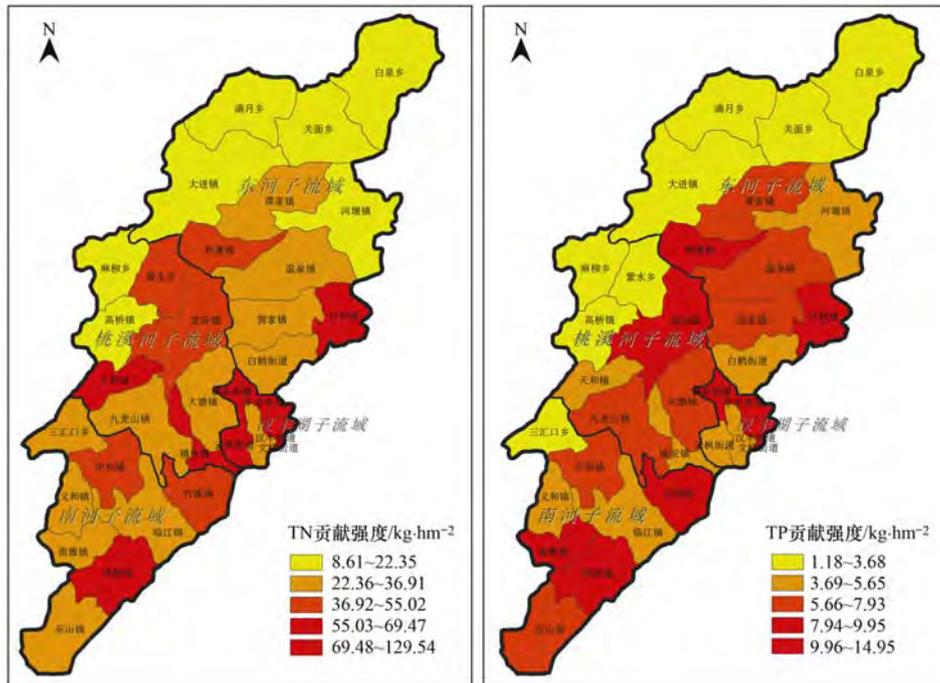


图 4 汉丰湖流域各乡镇 TN、TP 贡献强度空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of TN and TP emission intensity of towns in the Hanfeng Lake Basin

满月、美面、白泉 3 个乡，氮磷贡献量和强度均较低。

2.2.3 各类农业源氮磷贡献的空间分布特征

各类农业源氮磷贡献量见表 2。各子流域中，各农业源氮磷贡献均以汉丰湖子流域最低，桃溪河子流域、南河子流域和东河子流域这 3 个子流域作物秸秆源和农村生活源的氮磷贡献量相差不大，畜禽养殖源对氮磷贡献量依次为南河子流域 > 东河子流域 > 桃溪河子流域，肥料源对 TN 贡献量依次为

南河子流域 > 桃溪河子流域 > 东河子流域，而对 TP 贡献量依次为东河子流域 > 南河子流域 > 桃溪河子流域。

各乡镇中，肥料源对 TN 贡献量相对较大的乡镇依次是白桥镇 > 敦好镇 > 铁桥镇 > 九龍山镇 > 竹溪镇，这 5 个乡镇肥料源 TN 贡献量占各乡镇肥料总 TN 贡献量的 32.45%，对 TP 贡献量相对较大的乡镇依次为敦好镇 > 白桥镇 > 南雅镇 > 九龍山镇，这 4 个乡镇肥料 TP 贡献量占肥料源总 TP 贡献量

的 33.20%。

作物秸秆源对 TN 贡献量相对较大的乡镇依次是敦好镇 > 天和镇 > 大进镇 = 九龙山镇 > 临江镇, 这 5 个乡镇作物秸秆源 TN 贡献量占作物秸秆源总 TN 贡献量的 28.78%; 对 TP 贡献量相对较大的乡镇依次为敦好镇 > 天和镇 = 大进镇 > 九龙山镇 = 临江镇, 这 5 个乡镇作物秸秆源 TP 贡献量占作物秸秆源总 TP 贡献量的 28.52%。

畜禽养殖源对 TN 贡献量相对较大的乡镇依次是铁桥镇 > 中和镇 > 郭家镇 > 大德镇, 这 4 个乡镇畜禽养殖源 TN 贡献量占各乡镇畜禽养殖源总 TN 贡献量的 40.12%; 对 TP 贡献量相对较大的乡镇依次是铁桥镇 > 郭家镇 > 中和镇 > 大德镇, 这 4 个乡镇畜禽养殖源 TP 贡献量占各乡镇畜禽养殖源总 TP

贡献量的 42.76%。

农村生活源对氮磷贡献量主要与农村人口有关, 各乡镇相差较小, 以临江镇、白鹤街道、中和镇、铁桥镇对 TN 贡献量较大, 临江镇对 TP 贡献量最大。

综合分析各乡镇氮磷总贡献量和各类农业源氮磷贡献量的空间分异性可知, 氮磷贡献量较大的几个乡镇中, 白桥镇(化肥施用 3 516.22 t)和敦好镇(化肥施用 3 780.91 t)主要由于肥料施用较多引起, 且敦好镇磷肥施用量也较大; 中和镇(化肥施用 2 184.56 t)和铁桥镇(化肥施用 2 624.60 t)肥料施用相对较少, 而生猪养殖量较大, 铁桥镇(生猪 35 350 头)和中和镇(生猪 22 000 头)饲养生猪量占汉丰湖流域生猪饲养量的 26%, 因此氮磷贡献量较大, 且铁桥镇氮肥施用较多。

表 2 汉丰湖流域各乡镇各类农业源 TN 和 TP 贡献量

Table 2 Contribution of TN and TP from various agricultural sources in the Hanfeng Lake Basin

位置	乡镇	TN 贡献量/t				TP 贡献量/t			
		肥料施用	作物秸秆	畜禽养殖	农村生活	肥料施用	作物秸秆	畜禽养殖	农村生活
桃溪河子流域	天和镇	75.87	4.14	9.72	0.06	5.38	0.47	1.96	0.01
	敦好镇	149.94	4.44	1.51	0.16	38.85	0.53	0.30	0.02
	紫水乡	76.23	1.78	20.66	0.10	3.49	0.21	4.16	0.01
	大德镇	79.87	3.23	40.63	0.17	19.37	0.39	8.18	0.02
	镇安镇	49.58	1.75	13.22	0.07	2.70	0.21	2.66	0.01
	高桥镇	33.25	2.33	6.13	0.12	3.60	0.27	1.23	0.01
	麻柳乡	49.97	1.58	—	0.10	7.39	0.19	—	0.01
	九龙山镇	121.08	3.96	—	0.17	25.73	0.47	—	0.02
	合计	635.81	23.21	91.86	0.95	106.50	2.73	18.49	0.10
南河子流域	竹溪镇	115.09	2.58	5.60	0.14	17.94	0.31	1.13	0.01
	临江镇	92.58	3.87	33.52	0.29	12.64	0.46	6.75	0.03
	铁桥镇	130.30	3.10	78.27	0.18	19.81	0.37	15.76	0.02
	巫山镇	77.76	2.22	11.25	0.10	16.45	0.27	2.26	0.01
	南雅镇	71.94	2.67	14.09	0.14	26.65	0.32	1.95	0.01
	义和镇	70.27	2.33	22.90	0.11	9.30	0.28	4.40	0.01
	中和镇	103.41	3.21	50.53	0.19	14.80	0.38	10.82	0.02
	三汇口乡	46.37	1.76	9.31	0.07	4.44	0.21	1.39	—
	合计	707.73	21.75	225.46	1.22	122.02	2.59	44.46	0.13
东河子流域	大进镇	54.16	3.96	25.48	0.13	7.49	0.46	5.13	0.01
	和谦镇	44.27	1.58	22.83	0.10	15.02	0.19	4.60	0.01
	温泉镇	70.86	3.36	32.77	0.17	21.54	0.40	6.60	0.02
	郭家镇	42.47	2.08	45.17	0.13	4.49	0.25	11.67	0.01
	白鹤街道	82.26	2.67	29.58	0.22	9.69	0.33	6.61	0.02
	满月乡	24.16	1.21	9.74	0.04	2.59	0.14	1.72	—
	关面乡	16.02	0.85	—	0.03	2.21	0.10	—	—
	白泉乡	19.45	1.00	2.66	0.03	4.49	0.11	0.53	—
	谭家镇	45.47	2.08	6.92	0.08	11.54	0.25	0.69	0.01
	白桥镇	168.95	1.92	20.92	0.10	33.17	0.23	4.21	0.01
河堰镇	45.48	2.65	9.45	0.11	11.54	0.31	1.90	0.01	
合计	613.55	23.35	205.52	1.13	123.75	2.76	43.66	0.12	
汉丰湖子流域	汉丰街道	9.69	0.56	—	0.03	1.98	0.06	—	—
	文峰街道	18.25	0.12	7.09	0.02	2.44	0.01	1.43	—
	云枫街道	2.39	0.02	—	—	0.14	—	—	—
	镇东街道	83.45	1.28	3.77	0.06	9.17	0.15	0.28	0.01
	丰乐街道	41.26	0.51	1.35	0.05	8.71	0.06	0.27	0.01
	合计	155.04	2.49	12.21	0.15	22.44	0.29	1.98	0.02
总计	2 112.12	70.79	535.05	3.46	374.72	8.38	108.58	0.36	

2.3 汉丰湖流域农业面源污染特征评价

由表3和图5可知,2015年汉丰湖流域农业面源污染等标污染负荷总量为 $5\,181.92\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$,其中TN等标负荷量占等标负荷总量的52.52%,略高于TP等标负荷量.各污染源中,肥料源、作物秸秆源、畜禽养殖业源和农村生活源等标负荷总量分别为 $3\,985.87$ 、 112.79 、 $1\,078.00$ 和 $5.26\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$,以肥料源等标负荷量最多,占流域污染物等标负荷总量的76.92%,TN和TP的负荷量也主要来源于肥料源,畜禽养殖源次之,作物秸秆源和农村生活源相对较少,分别仅占2.18%和0.10%,说明肥料源是汉丰湖流域首要污染源.

各子流域中,桃溪河子流域、南河子流域、东河子流域和汉丰湖子流域的等标负荷总量分别为 $1\,391.07$ 、 $1\,802.20$ 、 $1\,695.09$ 和 $293.56\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$,即南河子流域的等标污染负荷量最大,汉丰湖子流域与其他子流域差异较大,且等标污染负荷量最小,仅占全流域的5.67%.各乡镇等标负荷总量差异较大,以桃溪河子流域的敦好镇、南河子流域的铁桥镇和东河子流域的白桥镇等标污染负荷量较高,均高于 $350\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$,这3个乡镇的等标负荷比之和为21.73%,为重点控制乡镇.

汉丰湖流域各乡镇等标污染排放系数差异大,变化范围为 $0.014\sim 0.200\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,各子流域中以汉丰湖子流域平均排放系数最大,为 $0.132\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,说明汉丰湖子流域面源污染压力较大.各乡镇中,镇东街道等标污染排放系数最大,为 $0.200\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,其次为铁桥镇、白桥镇、文峰街道、云枫街道、镇东街道和丰乐街道,即等标污染

排放系数较大的乡镇基本集中于汉丰湖子流域,面源污染承载压力较大.

表3 汉丰湖流域不同污染源污染物等标负荷量及等标排放比

Table 3 Emission and equivalent emission of pollutants from different sources in the Hanfeng Lake Basin

污染源	等标污染负荷量/ $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$		等标排放比/%	
	TN	TP	TN	TP
肥料源	2 112.12	1 873.75	77.61	76.15
作物秸秆源	70.79	42.00	2.60	1.71
养殖业源	535.05	542.95	19.66	22.07
农村生活源	3.46	1.80	0.13	0.07
合计	2 721.42	2 460.50	100.00	100.00

2.4 汉丰湖流域农业面源污染类型划分

运用聚类分析方法对各乡镇等标污染负荷总量进行聚类分析,结果见表4和图6.汉丰湖流域农业面源主要分为4种污染类型,图7为各污染类型空间分布情况.Ⅰ类为种植业源-畜禽养殖源复合主导型,该类型各乡镇种植业源和畜禽养殖源的贡献率分别约为79.63%和20.26%,主要分布在汉丰湖外围乡镇,如麻柳乡、义和镇、巫山镇等22个乡镇.Ⅱ类为肥料源-畜禽养殖源复合主导型,该类型畜禽养殖源贡献率最高,为33.21%,肥料源贡献率为64.71%,作物秸秆贡献率相对较低,该类型的乡镇大都是畜禽养殖大镇,包括中和镇、临江镇、大德镇、温泉镇等7个乡镇,主要分布在东河和南河子流域,畜禽粪污的产生量较大,这类乡镇在控制施肥量的同时,要着重关注畜禽养殖粪污的处理方式,降低面源污染排污风险.Ⅲ类为种植业源严重污染型,包括敦好镇和九龙山镇,该类型的2个乡镇分布在桃溪河子流域,种植业源贡献率高达99.42%,其中肥料

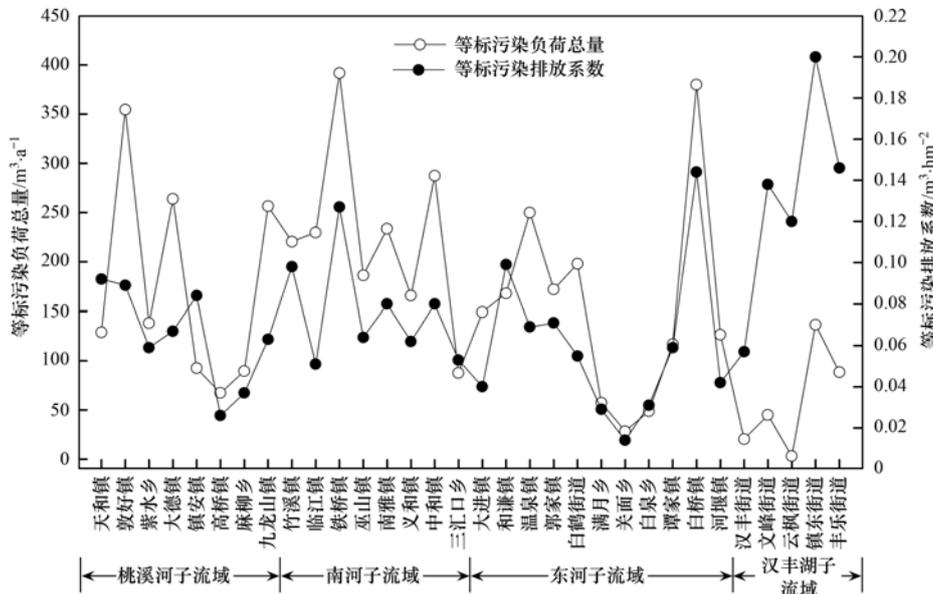


图5 汉丰湖流域等标排污总量及等标污染排放系数

Fig. 5 Amount of equivalent pollutant discharge and equivalent emission coefficients of the Hanfeng Lake Basin

源贡献率为 97.23%，严格把控农田施肥量是降低面源污染排污风险的关键。IV类为肥料源复合主导型，该类型只有白桥镇，属于东河子流域，

其肥料源等标污染负荷量是最多的，畜禽养殖源的贡献率为 11.05%，应要重点控制白桥镇施肥量，兼顾畜禽养殖的排污处理。

表 4 各分区不同评价指标的平均值及其贡献率

Table 4 Average values and contributions of different evaluation indexes in different districts

分区	不同污染源平均值/ $m^3 \cdot a^{-1}$				不同污染源贡献率/%			
	肥料源	作物秸秆源	畜禽养殖源	农村生活源	肥料源	作物秸秆源	畜禽养殖源	农村生活源
I	84.13	2.82	22.12	0.12	77.05	2.58	20.26	0.11
II	155.09	4.71	79.61	0.28	64.71	1.97	33.21	0.12
III	296.96	6.70	1.51	0.27	97.23	2.19	0.49	0.09
IV	334.80	3.07	41.97	0.15	88.11	0.81	11.05	0.04

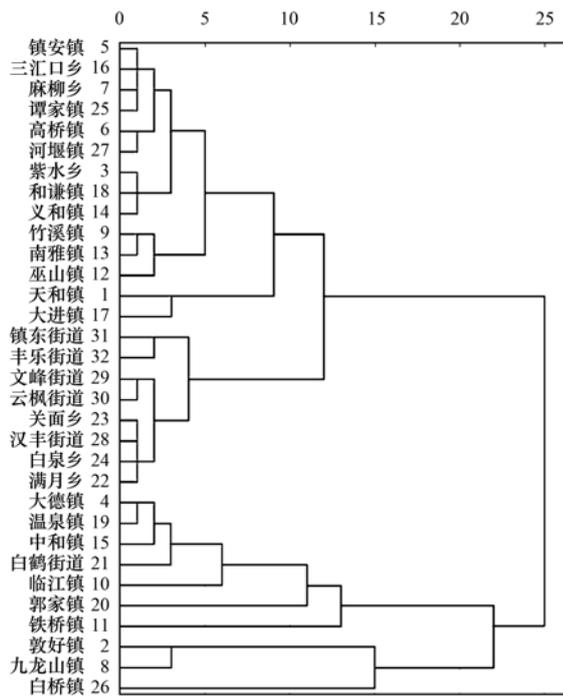


图 6 32 个乡镇基于等标污染负荷量聚类树形图

Fig. 6 Cluster dendrogram of 32 regions according to their equivalent pollution loading

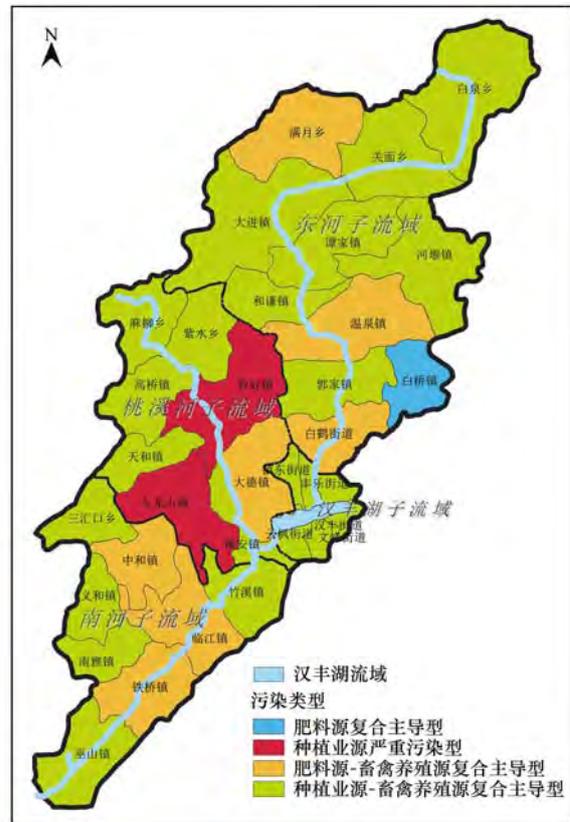


图 7 汉丰湖流域不同污染类型空间分布示意

Fig. 7 Spatial distribution of different pollution types in the Hanfeng Lake Basin

3 结论

(1) 汉丰湖流域农业面源污染 TN 和 TP 总贡献量分别为 2 721.42 t 和 492.04 t，等标污染负荷量以南河子流域最大，汉丰湖子流域最小。各乡镇中，敦好镇、铁桥镇和白桥镇等标污染负荷量相对较高，均高于 $350 m^3 \cdot a^{-1}$ ，这 3 个乡镇的等标排放比之和为 21.73%，为重点控制乡镇。

(2) 汉丰湖流域不同类型农业面源等标污染负荷量差异很大，肥料源等标污染贡献率为 76.92%，畜禽养殖源次之，肥料源是汉丰湖流域首要污染源。

(3) 汉丰湖流域农业面源污染分 4 个类型。I 类是种植业源-畜禽养殖源复合主导型，其种植业源和畜禽养殖业源的等标贡献率分别为 79.63% 和 20.26%，包括紫水乡等 22 个乡镇；II 类是肥料源-

畜禽养殖源复合主导型，其肥料源和畜禽养殖业源的等标贡献率分别为 64.71% 和 33.21%，包括铁桥镇等 7 个乡镇；III 类是种植业源严重污染型，其种植业源的等标贡献率为 99.42%，包括敦好镇和九龙山镇；IV 类为肥料源复合主导型，该类型肥料源的等标贡献率为 88.11%，只包括白桥镇。

参考文献:

[1] Bouwman L, Goldewijk K K, van der Hoek K W, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(52): 20882-20887.

[2] Park Y, Cho K H, Park J, et al. Development of early-warning protocol for predicting chlorophyll-a concentration using machine

- learning models in freshwater and estuarine reservoirs, Korea [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 31-41.
- [3] 华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 等. 三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 138-146.
- Hua L L, Li W C, Zhai L M, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus emissions in the Gufu River small watershed of the Three Georges Reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 138-146.
- [4] Zhang W Q, Jin X, Liu D, *et al.* Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment for a typical arid river—Fuyang River in northern China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **55**: 41-48.
- [5] 杨林章, 吴永红. 农业面源污染防控与水环境保护[J]. *中国科学院院刊*, 2018, **33**(2): 168-176.
- Yang L Z, Wu Y H. Prevention and control of agricultural non-point source pollution and aquatic environmental Protection [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, **33**(2): 168-176.
- [6] Rissman A R, Carpenter S R. Progress on nonpoint pollution: barriers & opportunities [J]. *Daedalus*, 2015, **144**(3): 35-47.
- [7] Holden J, Haygarth P M, MacDonald J, *et al.* Agriculture's impacts on water quality [EB/OL]. <http://www.theukwaterpartnership.org/wp-content/uploads/2015/04/agriculture-water-quality-report.pdf>.
- [8] Withers P J A, Neal C, Jarvie H P, *et al.* Agriculture and eutrophication: where do we go from here? [J]. *Sustainability*, 2014, **6**(9): 5853-5875.
- [9] 周文婷, 邵瑞华, 马千里, 等. 高州水库集水区污染源分布特征及污染负荷研究[J]. *水生态学杂志*, 2017, **38**(3): 23-31.
- Zhou W T, Shao R H, Ma Q L, *et al.* Pollution load assessment in the catchment area of Gaozhou Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, **38**(3): 23-31.
- [10] 王静, 郭熙盛, 吕国安, 等. 农业面源污染研究进展及其发展态势分析[J]. *江苏农业科学*, 2016, **44**(9): 21-24.
- Wang J, Guo X S, Lv G A, *et al.* Research progress of agricultural non-point source pollution and its development [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, **44**(9): 21-24.
- [11] 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, 2010-02-11.
- [12] 张红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. *水资源保护*, 2010, **26**(3): 87-90.
- Zhang H J, Chen F. Non-point pollution statistics and control measures in Taihu Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2010, **26**(3): 87-90.
- [13] 任玮, 代超, 郭怀成. 基于改进输出系数模型的云南宝象河流域非点源污染负荷估算[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(8): 2400-2408.
- Ren W, Dai C, Guo H C. Estimation of pollution load from non-point source in Baoxianghe watershed based, Yunnan Province on improved export coefficient model [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(8): 2400-2408.
- [14] 王雪蕾, 王新新, 朱利, 等. 巢湖流域氮磷面源污染与水华空间分布遥感解析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(5): 1511-1519.
- Wang X L, Wang X X, Zhu L, *et al.* Spatial analysis on diffuse pollution and algal bloom characteristic with remote sensing in Chao Lake Basin [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(5): 1511-1519.
- [15] Wu L, Gao J E, Ma X Y, *et al.* Application of modified export coefficient method on the load estimation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution of soil and water loss in semiarid regions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(14): 10647-10660.
- [16] Wang X, Hao F H, Cheng H G, *et al.* Estimating non-point source pollutant loads for the large-scale basin of the Yangtze River in China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **63**(5): 1079-1092.
- [17] 程先, 陈利顶, 孙然好. 考虑降水和地形的京津冀水库流域非点源污染负荷估算[J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(4): 265-272.
- Cheng X, Chen L D, Sun R H. Estimation of non-point source pollution loads of Beijing-Tianjin-Hebei region considering precipitation and topography [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(4): 265-272.
- [18] 代俊峰, 全秋慧, 方荣杰, 等. 漓江流域上游非点源污染负荷估算[J]. *水利水电科技进展*, 2017, **37**(5): 57-63.
- Dai J F, Quan Q H, Fang R J, *et al.* Estimation of non-point source pollution load in upstream of Lijiang River [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, **37**(5): 57-63.
- [19] 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 等. 程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 77-88.
- Chen X K, Liu X B, Peng W Q, *et al.* Estimation of and control strategies for pollution loads from non-point sources in the Chenghai Watershed [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 77-88.
- [20] 黄国如, 李开明, 曾向辉, 等. 流域非点源污染负荷核算[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [21] 宋大平, 左强, 刘本生, 等. 农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评估研究——以淮河流域为例[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(6): 1219-1231.
- Song D P, Zuo Q, Liu B S, *et al.* Estimation of spatio-temporal variability and health risks of nitrogen emissions from agricultural non-point source pollution: a case study of the Huaihe River Basin, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(6): 1219-1231.
- [22] 胡芸芸, 王永东, 李廷轩, 等. 沱江流域农业面源污染排放特征解析[J]. *中国农业科学*, 2015, **48**(18): 3654-3665.
- Hu Y Y, Wang Y D, Li T X, *et al.* Characteristics analysis of agricultural nonpoint source pollution on Tuojiang River Basin [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, **48**(18): 3654-3665.
- [23] 马广文, 王圣瑞, 王业耀, 等. 鄱阳湖流域面源污染负荷模拟与氮和磷时空分布特征[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(5): 1285-1291.
- Ma G W, Wang S R, Wang Y Y, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorus and diffuse source pollution load simulation of Poyang Lake Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1285-1291.
- [24] 李家科, 李怀恩, 董雯, 等. 渭河关中段典型支流非点源污染监测与负荷估算[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(7): 1470-1478.
- Li J K, Li H E, Dong W, *et al.* Monitoring and load estimation of non-point source pollution on typical tributaries in the Guanzhong reach of the Weihe River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(7): 1470-1478.
- [25] 王磊, 香宝, 苏本营, 等. 京津冀地区农业面源污染风险时空差异研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(7): 1254-1265.
- Wang L, Xiang B, Su B Y, *et al.* Spatial-temporal variation of

- agricultural non-point source pollution risk in Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(7): 1254-1265.
- [26] 胡静锋. 重庆市农业面源污染测算与空间特征解析[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, **38**(1): 135-144.
- Hu J F. Measurement and spatial feature analysis of agricultural non-point source pollution in Chongqing[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, **38**(1): 135-144.
- [27] 史小春, 敖天其, 黎小东, 等. 涪江流域(射洪境内)面源污染综合评价[J]. *水土保持研究*, 2018, **25**(4): 375-379.
- Shi X C, Ao T Q, Li X D, *et al.* Comprehensive evaluation on the non-point source pollution of Fujiang Basin (Shehong Territory) [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25**(4): 375-379.
- [28] 邓江华, 赵宏兵, 贾红杰. 开州区农业面源污染治理的调查与思考[J]. *农业与技术*, 2016, **36**(22): 258.
- [29] 许辉霞, 贾红杰, 王余富, 等. 开县特色效益农业发展思考[J]. *南方农业*, 2016, **10**(19): 76-77.
- [30] 开县统计局, 国家统计局开县调查队. 开县 2015 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 重庆: 重庆市开州区人民政府, 2016.
- [31] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查产排污系数手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [32] 陈玉成, 杨志敏, 陈庆华, 等. 基于“压力-响应”态势的重庆市农业面源污染的源解析[J]. *中国农业科学*, 2008, **41**(8): 2362-2369.
- Chen Y C, Yang Z M, Chen Q H, *et al.* Source apportionment of agricultural non-point source pollution in Chongqing based on pressure-response system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, **41**(8): 2362-2369.
- [33] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分数据集[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999. 123-140.
- [34] 许辉霞, 张业顺, 高雪, 等. 开州区生态涵养发展与农业面源污染治理探析[J]. *南方农业*, 2016, **10**(30): 86-87.
- [35] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料资源[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [36] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [37] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [38] 重庆市水利局. 重庆市水功能区划修编报告(2010)[R]. 重庆: 重庆市水利局, 2010.
- [39] 杨彦兰, 申丽娟, 谢德体, 等. 基于输出系数模型的三峡库区(重庆段)农业面源污染负荷估算[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2015, **37**(3): 112-119.
- Yang Y L, Shen L J, Xie D T, *et al.* Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Three Gorges Reservoir area (Chongqing) based on the export coefficient modeling approach[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2015, **37**(3): 112-119.
- [40] 李娜, 韩维峥, 沈梦楠, 等. 基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(8): 224-230.
- Li N, Han W Z, Shen M N, *et al.* Load evaluation of non-point source pollutants from reservoir based on export coefficient modeling[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(8): 224-230.
- [41] 卢少勇, 张萍, 潘成荣, 等. 洞庭湖农业面源污染排放特征及控制对策研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(6): 2278-2286.
- Lu S Y, Zhang P, Pan C R, *et al.* Agricultural non-point source pollution discharge characteristic and its control measures of Dongtinghu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2278-2286.
- [42] 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.
- [43] 邱斌, 李萍萍, 钟晨宇, 等. 海河流域农村非点源污染现状及空间特征分析[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(3): 564-570.
- Qiu B, Li P P, Zhong C Y, *et al.* Characteristics and spatial distribution of the rural non-point source pollution in Haihe River Basin[J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(3): 564-570.
- [44] 王国重, 李中原, 左其亭, 等. 丹江口水库水源区农业面源污染物流失量估算[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(3): 415-422.
- Wang G Z, Li Z Y, Zuo Q T, *et al.* Estimation of agricultural non-point source pollutant loss in catchment areas of Danjiangkou Reservoir[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(3): 415-422.
- [45] 洪燕婷, 仇蕾. 太湖流域农业面源污染防治措施研究分析[J]. *环境科技*, 2015, **28**(3): 17-21, 26.
- Hong Y T, Qiu L. Analysis of prevention and control measures on agricultural non-point Source pollution in Taihu Basin [J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, **28**(3): 17-21, 26.
- [46] 彭兆弟, 李胜生, 刘庄, 等. 太湖流域跨界区农业面源污染特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, **32**(3): 458-465.
- Peng Z D, Liu S S, Liu Z, *et al.* Characteristics of transboundary non-point source agricultural pollution in the Taihu Valley[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(3): 458-465.
- [47] 刘钦善. 中国化肥面源污染环境风险时空变化[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(7): 1247-1253.
- Liu Q P. Spatio-temporal changes of fertilization environmental risk of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(7): 1247-1253.
- [48] 许辉霞, 贾红杰, 王余富, 等. 开县农业面源污染现状及治理措施建议[J]. *南方农业*, 2016, **10**(22): 56-57.
- [49] 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.

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 Yun-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)