

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.02.007

北江飞来峡库区流域非点源污染现状评价

陈晓丽¹, 雷勇², 黄国如^{1,3,4}

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510635;
3. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 4. 广东省水利工程安全与
绿色水利工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

摘要:为深入了解北江飞来峡库区流域非点源污染现状,采用等标污染负荷法和聚类分析法对库区流域非点源污染进行了分析。结果表明:飞来峡库区流域57.79%的污染来源于生活污水,38.13%来源于畜禽养殖,应针对这两类污染源中的COD、TN、TP等污染物进行重点防治;库区10个镇区中,位于流域中上游的石灰铺镇和大站镇污染负荷占比分别为19.24%和18.80%,应着重关注这两个镇区的非点源污染情况;10个镇区可聚类为4类,位于流域中上游的石灰铺镇和大站镇属特重污染区,区域单位面积等标污染负荷平均值为218.21 mm/a;位于流域上游的望埠镇和英红区属较重度污染区,单位面积等标污染负荷平均值为163.80 mm/a;另两类区域污染程度则相对较低;需对两类位于流域中上游的高污染镇区的生活污水及畜禽养殖污染进行重点防控。

关键词:非点源污染;等标污染负荷;聚类分析;飞来峡库区

中图分类号:TV697.2;X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)02-0044-05

Evaluation on non-point source pollution in Feilaixia Reservoir Area of Beijiang River//CHEN Xiaoli¹, LEI Yong², HUANG Guoru^{1,3,4} (1. South China University of Technology, School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou 510640, China; 2. Pearl River Hydraulic Research Institute, Ministry of Water Resources, Guangzhou 510635, China; 3. South China University of Technology, State Key Laboratory of Subtropical Building Science, Guangzhou 510640 China; 4. Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and Greenization for Water Conservancy Project, Guangzhou 510640 China)

Abstract: To better understand the non-point source pollution status of Feilaixia Reservoir Area (FRA), equal standard pollution load method and cluster analysis method were applied to analyze the non-point source pollution of FRA. The results show that 57.79% of the pollution in the FRA comes from domestic sewage and 38.13% comes from livestock and poultry breeding, which tells that we should focus on the prevention and control of COD, TN, TP and other pollutants in these two types of pollution sources. Among the 10 townships in the reservoir area, the ratios of pollution loads in Shihuipu and Dazhan were 19.24% and 18.80% respectively. Therefore, attention should be paid to the non-point source pollution in these two townships. The 10 townships can be clustered into 4 categories; Shihuipu and Dazhan located in the middle and upper reaches of the river basin are extremely polluted areas with an average unit area pollution load of 218.21 mm/a, while Wangbu and Yinghong located in the upper reaches of the river basin were heavily polluted areas with an average unit area load of 163.80 mm/a. The other two types of areas have relatively low pollution levels. It is necessary to focus on the prevention and control of domestic sewage and livestock and poultry breeding pollution in two types of high pollution townships located in the middle and upper reaches of the river basin.

Key words: non-point source pollution; equal standard pollution load method; cluster analysis; Feilaixia Reservoir Area

基金项目:广东省水利科技创新项目(2016-22);广东省水资源节约与保护专项(201711031);广东省科技计划(2016A020223007)

作者简介:陈晓丽(1993—),女,博士研究生,研究方向为水文学及水资源。E-mail: 769411975@qq.com

通信作者:黄国如,教授。E-mail: huanggr@scut.edu.cn

针对水体污染问题,长期以来我国政府的工作重心主要放在点源污染治理上,在点源污染得到有效控制的同时忽略了非点源污染治理^[1]。非点源污染的随机性、滞后性、模糊性以及隐蔽性已使其成为我国当前最主要的污染源^[2],对我国污染水体的贡献率正逐年攀升,甚至对人类的健康造成了严重影响和威胁^[3]。因此,必须对非点源污染进行深入的分析研究。

目前,非点源污染的评价方法主要有等标污染负荷法、聚类分析法和改进的理想解法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)等。赵海萍等^[4]、梁倩等^[5]、陆珊等^[6]和闫维凤等^[7]采用等标污染负荷法分别对海河流域南系的漳河上游、河南鹤壁市淇河流域、广西南流江下游流域和河北秦皇岛市的非点源污染情况进行了分区域、分来源的负荷评价,评价结果均为当地相关部门的管理和决策提供了一定的科学依据;Li等^[8]采用等标污染负荷法对漓江的污染负荷进行了评价,结果表明TN和TP为河道内的主要污染物,并建议采用上游水库补给的方式改善水质;崔巍等^[9]和李璇等^[10]则在等标污染负荷的基础上,采用聚类分析法分别对黑龙江哈尔滨市和云南大理洱海流域的非点源污染进行了区域相似度评价,从而合理科学地对研究区的非点源污染重点防治区域进行了筛分;Lu等^[11]在鄱阳湖流域应用等标污染负荷法进行农业非点源污染负荷的空间特征评价,确定了优先控制区,并用聚类分析法将流域内的非点源污染划分为4类,提出了分区管理建议。张双圣等^[12]将层次聚类分析法应用于江苏徐州市云龙湖大尺度、多断面、长时间的大量样本水质评价工作中,完整地反映了水质样本的总体特征;吕川等^[13]采用基于模糊等价矩阵的模糊聚类分析法,得到吉林各市农业非点源污染的动态聚类谱系图,可为吉林非点源污染的控制管理提供定量依据;范丽丽等^[14]采用灰色聚类分析法对太湖8个湖区的水质进行了评价,定量描述了太湖不同湖区水质的优劣程度。应用TOPSIS方法,张汪寿等^[15]和涂刚琴等^[16]分别对北京怀柔区北宅小流域和黔中平寨水库保护区进行了流域非点源污染风险评价,通过评价土地利用因子 L 、径流因子 Q 、距离因子 D ,确定各因子所占权重,从而得到非点源污染风险评价指数,并将流域划分为相应等级的敏感控制区域,定量地为流域内非点源污染的分区管理提供科学方案;Li等^[17]提出了一种基于TOPSIS的改进方法,结合水质指标和相关标准,应用CRITIC方法考虑了指标间的相关性,使得水质评价结果更接近现状,并已在石头门口水库和太湖

流域得到了应用。

鉴于飞来峡库区流域非点源污染的高贡献率且仍缺乏流域内的非点源污染现状评价的研究成果,本文采用等标污染负荷和聚类分析两种方法,对北江飞来峡库区流域的非点源污染现状进行深入评价,以为库区流域的非点源污染防治以及水资源保护提供科学依据。

1 研究区概况及非点源污染现状

飞来峡库区流域地处广东南方湿润地区,属于亚热带季风气候,雨量充沛。库区流域控制面积为2450 km²,横跨英德市以及清城区两个县级行政区,包括飞来峡镇、黎溪镇、连江口镇、大站镇、望埠镇、英红区、英城镇、石灰铺镇、西牛镇以及水边镇10个镇级行政区,流域内人口约为29.5万人。库区流域内年平均降水量1853.3 mm,降水多以锋面雨和地形雨为主,同时也受到台风雨影响。降水量年内分布不均,汛期4—9月的降水量占全年降水量的70%~80%,其中4—6月约占全年降水量的40%~50%。流域年均气温20.8℃,夏季最高气温超过30℃。地形地貌上分为两段,自英德市区至盲仔峡段河谷宽阔,沿河多以冲积平原为主;盲仔峡段至飞来峡段则多为低山丘陵区。图1为飞来峡库区各镇区区位图。



图1 飞来峡库区各镇区区位

2009年飞来峡库区流域总GDP达到91.6亿元,较2003年增长约3倍,流域内总用水量亦从2000年的909.4万m³急剧上升到2009年的7250万m³。自2009年以来,库区流域经济持续增长,总用水量不断攀升。伴随着经济的快速发展,库区水质呈现逐年恶化趋势,非点源污染的潜在威胁日趋严重。据广东省水利水电科学研究院2010年编制的《广东省飞来峡水利枢纽库区污染源普查报告》显示,飞

来峡库区接纳的污染物主要由两部分构成,即上游流域进入库区流域的污染物以及库区流域自身产生的污染物。库区流域内产生的污染物 70% 以上由非点源污染贡献,且非点源污染所占比例呈现逐年增大的态势,说明非点源是飞来峡流域内的重点污染源。此外,林文婧等^[18]的研究结果显示,飞来峡库区流域 85% 的 COD、71% 的 BOD₅、80% 的 TN、84% 的 TP、72% 的油脂以及全部的铜和锌均由非点源污染贡献,也表明库区流域的非点源污染贡献率远远高于点源污染。因此必须对库区流域内的非点源污染现状进行深入的分析评价研究。

2 研究资料和分析方法

本文所涉及的飞来峡库区内各镇区非点源污染数据均来自广东省水利水电科学研究院 2009 年的普查数据,包括 10 个镇区内的生活污水、种植业、水产养殖业以及畜禽养殖业所产生的污染物,即 COD、BOD₅、TN、TP、NH₃-N、动植物油、铜和锌,共 8 种。

采用等标污染负荷法和聚类分析法对飞来峡库区内各镇区非点源污染现状进行分析。等标污染负荷法基本思想是把污染源各种污染物的排放总量分别与对应的环境评价标准进行比较,将排放总量转换成统一的具有相同环境意义的定量数值,从而可以在同一尺度上进行比较和度量,这一过程也称之为参数的等标化。等标污染负荷法操作简单,具有明显的地域区分度,综合性强,适用于非点源污染中各类污染物和污染源的分析比较,以确定重点污染源。等标污染负荷法的基本计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{\rho_0} \quad (1)$$

$$P_j = \sum_{k=1}^{10} \sum_{i=1}^8 P_{ikl_j} \quad (2)$$

$$P_k = \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^8 P_{ijl_k} \quad (3)$$

$$P = \sum_{j=1}^4 P_j \quad \text{或} \quad P = \sum_{k=1}^{10} P_k \quad (4)$$

$$K_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^4 P_{ijl_k}}{P_k} \times 100\% \quad (5)$$

$$K_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{10} P_{ikl_j}}{P_j} \times 100\% \quad (6)$$

$$K_j = \frac{P_j}{P} \times 100\% \quad (7)$$

$$K_k = \frac{P_k}{P} \times 100\% \quad (8)$$

式中: i 为污染物种类,共 8 种; j 为污染来源,共 4 种; k 为镇区,共 10 个; C_i 为 i 污染物的排放量, t/a; ρ_0 为该污染物的排放限值(评价标准), mg/L, 参考 GB8978—1996《污水综合排放标准》及广东省地方标准 DB441597—2015《电镀水污染物排放标准》综合确定各污染物排放限值如下: COD 为 100 mg/L, BOD₅ 为 30 mg/L, TN 为 20 mg/L, TP 为 1 mg/L, NH₃-N 为 15 mg/L, 动植物油为 20 mg/L, 铜为 0.5 mg/L, 锌为 2 mg/L; P_i 为 i 污染物的等标污染负荷量, m³/a; P_j 为 j 污染来源的等标污染负荷量, m³/a; P_k 为 k 镇区的等标污染负荷量, m³/a; P_{ikl_j} 为 j 污染来源下, k 镇区 i 污染物的等标污染负荷量, m³/a; P_{ijl_k} 为 k 镇区 j 污染来源中 i 污染物的等标污染负荷量, m³/a; P 为整个区域的等标污染负荷量, m³/a; K_{ik} 为 i 污染物在 k 镇区的污染负荷比; K_{ij} 为 i 污染物在 j 污染来源中的污染负荷比; K_j 为 j 污染来源负荷占总区域污染的负荷比; K_k 为 k 镇区污染负荷占总区域污染的负荷比。

聚类分析法是将数据分到不同的类或者簇的一个过程,同一个类(簇)中的对象有很大的相似性,而不同类(簇)间的对象有很大的相异性,通常分为样品聚类和变量聚类。样品聚类中,首先将 n 个样品看成 n 类,采用欧式平方距离(squared euclidean distance),将距离最近的两类合并为一个新类,样品减为 $n - 1$ 类,再从中找出最接近的两类加以合并,成为 $n - 2$ 类,不断重复此过程直到所有样品均归为一类。欧式平方距离计算公式为

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2 \quad (9)$$

式中 x_{ik} 、 x_{jk} 分别为第 i 、 j 个样品第 k 个指标的值。

将飞来峡库区 10 个镇区作为样本,4 种污染源的等标污染负荷量作为计算指标,进行飞来峡库区流域非点源污染中同种类型镇区的划分,以便对流域内非点源污染情况相似的区域进行统一防控。

3 结果分析

3.1 等标负荷分析

采用式(5)计算飞来峡库区 10 个镇区中的各类污染物的负荷比,结果如图 2 所示。由图 2 可知,飞来峡镇污染物中 TP 约占 80%, TN 约占 10%, 其原因是飞来峡镇主要以水产养殖业和畜禽养殖业为主, TN、TP 等污染物的产生大多来源于此。英城镇主要以 TP、COD 和 TN 污染为主,由于英城镇建有污水处理厂,生活污水均经过处理之后再排放,不直接散排入河道沟渠,其污染物来源主要为畜禽养殖业和种植业的 TN、COD 以及 TP。其余 8 个镇区均

较为相似,均以 COD、TP 污染为主,还有少部分的 TN、BOD₅ 和 NH₃-N。

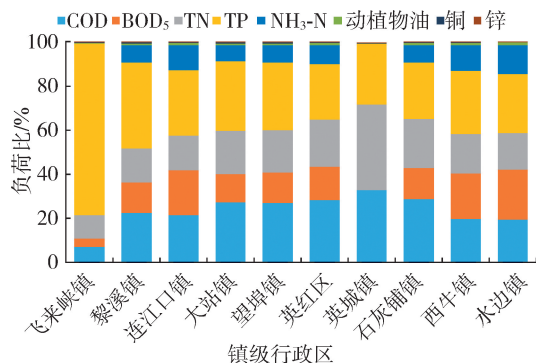


图2 飞来峡库区10个镇区中各类污染物负荷比

利用式(6)可计算得到各类污染物在各污染源中的负荷比,结果如图3所示。

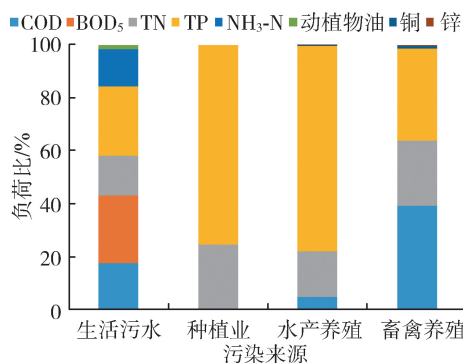


图3 飞来峡库区4种污染源中各类污染物负荷比

由图3可知,生活污水中主要有 TP、BOD₅、COD、TN 和 NH₃-N 等5种主要污染物,还包含少量的动植物油,生活污水所产生的污染物成分复杂多样,需引起广泛关注。而种植业的污染物中,只有 TP 和 TN 两种,占比约分别为 75% 和 25%,均来自于库区流域磷肥和氮肥的过度施用。水产养殖业主要以 TP 污染为主,其负荷比为 77.78%,还有 17.16% 的 TN 污染,另外值得关注的是水产养殖业中还有少量的重金属铜、锌污染。由于铜、锌等微量元素广泛存在于鱼饵中,因此重金属铜、锌污染主要来自于饲料的投放和鱼药的施用等养殖行为。畜禽养殖业中,主要以 COD、TP 和 TN 为主,以及微量的重金属污染。清远飞来峡库区流域畜禽养殖业较发达,主要以走地鸡特色产业为主,还有少部分的生猪养殖,其污染主要来源于走地鸡与生猪的粪便、尿液以及各种废弃物等。从整体来看,BOD₅、NH₃-N 以及动植物油这3类污染物只来源于生活污水,因此,这3类污染物的治理只需针对生活污水重点进行。

利用式(7)可计算得生活污水、种植业、水产养殖业、畜禽养殖业4种污染源负荷占总区域污染的负荷比分别为 57.79%、2.38%、1.69% 和 38.14%。

可见,整个飞来峡库区流域一半以上的非点源污染来源于生活污水散排,还有接近 40% 的非点源污染来自于畜禽养殖业。说明生活污水和畜禽养殖是库区流域的重点污染源,应着重对这两方面污染来源进行源头控制以及污染修复。

利用式(8)可计算得到飞来峡镇、黎溪镇、连江口镇、大站镇、望埠镇、英红区、英城镇、石灰铺镇、西牛镇以及水边镇10个镇区污染负荷占总区域污染的负荷比分别为 4.71%、9.33%、6.87%、18.80%、13.25%、15.30%、0.26%、19.23%、7.24% 和 5.01%。其中,石灰铺镇和大站镇的负荷比最大,且两者均位于流域中上游,所产生的污染会对流域下游河道造成严重影响。结合图2进一步分析可知,一方面,石灰铺镇和大站镇均为人口重镇,生活污水随意排放,导致 COD、TP、TN 等污染物严重超标,再加上污水处理设施不完善甚至没有,直接导致生活污水成为这两个镇区非点源污染的重要来源;另一方面,石灰铺镇和大站镇的畜禽养殖业也较为发达,石灰铺镇的走地鸡和生猪年出栏量分别为 17 万只和 21522 头,大站镇则分别为 65 万只和 20670 头,也使得畜禽养殖业成为两个镇区非点源污染的重点来源。英红区、望埠镇的负荷比则分别为 15.30% 和 13.25%,紧随其后。英城镇的负荷比则是最低的,仅为 0.26%。

3.2 聚类分析

为对各镇区的非点源污染进行更进一步的类别划分和统一管理,以10个镇区各污染源的单位面积等标污染负荷为依据,采用样品聚类中的欧式平方距离对其进行计算分析,结果如图4所示。以图中竖向虚线为界,将10个镇区分为4类。4类别单位面积等标污染负荷的平均值如表1所示。

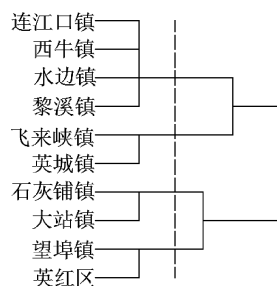


图4 飞来峡库区10个镇区聚类分析结果

表1 4类别单位面积等标污染负荷平均值 mm/a

类别	生活污水	种植业	水产养殖	畜禽养殖	合计
第1类	14.37	0.43	9.62	4.08	28.51
第2类	57.66	4.01	0.03	19.87	81.57
第3类	90.46	2.19	0.00	71.15	163.80
第4类	111.38	3.02	0.01	103.80	218.21

第1类包括飞来峡镇和英城镇,属于轻度污染

区,此类镇区的特征是整体污染程度较低,其单位面积等标负荷平均值仅为 28.51 mm/a。其中,生活污水所占份额最大(50.41%),可着重针对生活污水进行深入治理。第2类包括连江口镇、西牛镇、水边镇和黎溪镇,属重度污染区,此类镇区皆位于流域中下游,生活污水仍为主要污染源,占比70.69%,还有一部分畜禽养殖污染,占比24.36%。第3类包括望埠镇和英红区,属较重度污染区,位于流域上游区域,整体污染程度偏高,生活污水占比55.23%,畜禽养殖业占比43.44%。第4类包括大站镇和石灰铺镇,位于流域中上游,属特重度污染区,其单位面积等标污染负荷平均值高达218.21 mm/a,为第1类的7.7倍,其中,生活污水占比51.04%,畜禽养殖业占比47.57%。可以看出,位于流域上游以及中上游的镇区污染程度特别高,若不进行整治,将对流域中下游河道乃至整个库区流域产生严重影响。因此,必须将中上游流域的生活污水和畜禽养殖作为防控重点,进行深入治理。针对生活污水,建立污水处理厂,进行统一集中处理,达标排放;针对畜禽养殖,建立畜禽生态养殖场,集中处理畜禽粪便,建设沼气池,提高废物利用效率等。

4 结 论

a. 库区4种污染来源负荷比大小排序为生活污水、畜禽养殖、种植业、水产养殖,其中,生活污水占比57.79%,畜禽养殖占比38.13%,应着重对这两方面污染来源进行源头控制以及污染修复。10个镇区的污染负荷比大小排序为石灰铺镇、大站镇、英红区、望埠镇、黎溪镇、西牛镇、连江口镇、水边镇、飞来峡镇、英城镇,其中,石灰铺镇和大站镇负荷比均接近20%,需要引起重视。

b. 飞来峡库区流域10个镇区分为4类,位于流域中上游的镇区污染程度最高,如大站镇和石灰铺镇、望埠镇和英红区等,需对所涉及镇区的生活污水及畜禽养殖污染进行重点防控。

参考文献:

[1] 张丹,杨洪霞,段慧,等.我国非点源污染的基本特征与时空分布规律研究综述[J].四川环境,2014,33(4):140-145. (ZHANG Dan, YANG Hongxia, DUAN Hui, et al. Study on the basic characteristics and spatial and temporal distribution regularities of non-point source pollution in China [J]. Sichuan Environment, 2014, 33(4):140-145. (in Chinese))

[2] 余红,沈珍瑶.非点源污染不确定性研究进展[J].水资源保护,2008,24(1):1-5. (YU Hong, SHEN Zhenyao. Uncertainty of non-point source pollution [J]. Water

Resources Protection, 2008, 24(1):1-5. (in Chinese))

[3] 职锦,郭太龙,廖义善,等.非点源污染对人类健康影响的研究进展[J].生态环境学报,2010,19(6):1459-1464. (ZHI Jin, GUO Tailong, LIAO Yishan, et al. The effect of non-point pollution on human health: a review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(6):1459-1464. (in Chinese))

[4] 赵海萍,陈旺,李清雪,等.漳河上游水质时空分异特征及污染源识别[J].水资源保护,2017,33(4):47-54. (ZHAO Haiping, CHEN Wang, LI Qingxue, et al. Spatio-temporal variation of water quality and pollutant source identification in upper reaches of Zhanghe River [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4):47-54. (in Chinese))

[5] 梁倩,何新生,李海华,等.河南省鹤壁市淇河流域(淇县段)农业非点源污染状况调查及评价研究[J].环境科学与管理,2016,41(10):176-181. (LIANG Qian, HE Xinseng, LI Haihua, et al. Investigation and evaluation of agricultural nonpoint source pollution in Qi County section of Qi River [J]. Environmental Science and Management, 2016, 41(10):176-181. (in Chinese))

[6] 陆珊,代俊峰,周作旺.基于等标污染负荷法的生活和农业污染源分析[J].节水灌溉,2015(2):45-46. (LU Shan, DAI Junfeng, ZHOU Zuowang. Analysis of domestic and agricultural pollutant sources based on equal standard pollution load method [J]. Water Saving Irrigation, 2015(2):45-46. (in Chinese))

[7] 闫维凤,严勇,吕本祥,等.河北省秦皇岛市农业非点源污染现状调查与评价[J].人民珠江,2016,37(3):81-84. (YAN Weifeng, YAN Yong, LYU Benxiang, et al. Survey and evaluation of agricultural non-point pollution in Qinhuangdao City, Hebei Province [J]. Pearl River, 2016, 37(3):81-84. (in Chinese))

[8] LI R, WU Z, LI L, et al. Pollution load and ecological replenishment plan of Lijiang River China [J]. Environmental Engineering & Management Journal, 2017, 16(11):2589-2598.

[9] 崔巍,白音包力皋,陈文学,等.中小河流非点源污染治理负荷估算及分区分类研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2013,11(1):14-19. (CUI Wei, Baiyinbaoligao, CHEN Wenxue, et al. Study on estimation, regionalization and classification of nonpoint source pollution for small and midsize river basins management [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013, 11(1):14-19. (in Chinese))

[10] 李璇,董利民.洱海流域农业非点源污染负荷分析及防治对策[J].湖北农业科学,2011,50(17):3535-3539. (LI Xuan, DONG Limin. Study on the agricultural non-point source pollution load and control measures of Erhai Lake Basin [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(17):3535-3539. (in Chinese))

(下转第53页)

- (3):53-56. (in Chinese))
- [7] 丁耀彬. 基于过渡金属氧化物催化活化过一硫酸盐高级氧化方法及其在有机污染物降解中的应用[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [8] 张成. 基于硫酸根自由基的过硫酸钠高级氧化法氧化降解染料的研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [9] 于辉,金春姬,王鹏远,等. Fe^{2+} 与 Fe^0 活化过二硫酸盐降解活性艳蓝 KN-R[J]. 环境科学研究,2015,28(1):88-95. (YU Hui, JIN Chunji, WANG Pengyuan, et al. Degradation of reactive Brilliant blue KN-R by persulfate activated with Fe^{2+} and Fe^0 [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28 (1): 88-95. (in Chinese))
- [10] LIANG C, LAI M C. Trichloroethylene degradation by zero valent iron activated persulfate oxidation [J]. Environmental Engineering Science, 2008, 25 (7): 1071-1078.
- [11] 丰娇,吴耀国,张娜. 零价铁-Fenton 试剂体系降解有机污染物的研究进展[J]. 化工环保,2012,32(5):413-418. (FENG Jiao, WU Yaoguo, ZHANG Na. Research progresses in degradation of organic pollutants in zero valent iron-fenton reagent system [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2012, 32 (5): 413-418. (in Chinese))
- [12] PETERNEL I, KOPRIVANAC N, LONCARIC B, et al. Iron activated persulfate oxidation of an azo dye in model wastewater: influence of iron activator type on process optimization [J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, 137(6):454-463.
- [13] BREMNER D H, BURGESS A E, HOULLEMARE D, et al. Phenol degradation using hydroxyl radicals generated from zero-valent iron and hydrogen peroxide [J]. Applied Catalysis B Environmental, 2006, 63(1/2):15-19.
- [14] MONTGOMERY D C. Design and analysis of experiments [J]. Journal of the American Statistical Association, 2000, 16(2):241-242.
- [15] OH S Y, KIM H W, PARK J M, et al. Oxidation of polyvinyl alcohol by persulfate activated with heat, Fe^{2+} , and zero-valent iron [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(1):346-351.
- [16] DEAN A, VOSS D. Design and Analysis of Experiments [J]. Springer Texts in Statistics, 1999, 42(3):308.
- (收稿日期:2018-04-01 编辑:王 芳)

(上接第 48 页)

- [11] LU S Y, PING Z, 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.
- [12] 张双圣,刘喜坤,强静,等. 徐州市云龙湖水质评价及污染原因分析 [J]. 水资源保护, 2017, 33 (3): 52-58. (ZHANG Shuangsheng, LIU Xikun, QIANG Jing, et al. Assessment of water quality and analysis of causes of pollution in Yunlong Lake in Xuzhou City [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3):52-58. (in Chinese))
- [13] 吕川,陈明辉,马继力,等. 基于模糊聚类分析的吉林省农业非点源污染负荷现状评价 [J]. 现代农业科技, 2011 (5): 263-265. (LYU Chuan, CHEN Minghui, MA Jili, et al. Evaluation of agricultural nonpoint-source pollution loadings in Jilin Province based on fuzzy cluster analysis [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2011(5):263-265. (in Chinese))
- [14] 范丽丽,邱利,田威,等. 基于马尔科夫模型的太湖水质综合评价 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (2): 50-54. (FAN Lili, QIU Li, TIAN Wei, et al. Comprehensive evaluation of water quality in Taihu Lake based on Markov model [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (2): 50-54. (in Chinese))
- [15] 张汪寿,耿润哲,王晓燕,等. 基于多准则分析的非点源污染评价和分区:以北京怀柔区北宅小流域为例 [J]. 环境科学学报, 2013, 33 (1): 258-266. (ZHANG Wangshou, GEN Runzhe, WANG Xiaoyan, et al. Assessment and zoning of non-point source pollution by multi-criteria analysis: a case study in the watershed of Beizhai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1):258-266. (in Chinese))
- [16] 涂刚琴,刘鸿雁,赵志鹏,等. 黔中平寨水库保护区非点源污染风险评价与敏感区域识别 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (4): 87-93. (TU Gangqin, LIU Hongyan, ZHAO Zhipeng, et al. Risk assessment of non-point source pollution and sensitive region recognition to Pingzhai Reservoir protection areas in central Guizhou [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(4):87-93. (in Chinese))
- [17] LI Z, YANG T, HUANG C S, et al. An improved approach for water quality evaluation: TOPSIS-based informative weighting and ranking (TIWR) approach [J]. Ecological Indicators, 2018, 89:356-364.
- [18] 林文婧,杨慧. 飞来峡水利枢纽库区污染源现状调查及评价 [J]. 吉林水利, 2011 (6): 10-15. (LIN Wenjing, YANG Hui. The investigation and evaluation for the sources of pollution in Feilaixia Reservoir [J]. Jilin Water Resources, 2011(6):10-15. (in Chinese))
- (收稿日期:2018-06-28 编辑:熊水斌)