

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.05.011

# 江苏省典型湖泊饮用水源地安全综合评价

杜云彬<sup>1,2</sup>, 陈求稳<sup>2</sup>, 王智源<sup>2</sup>, 王冬梅<sup>3</sup>, 刘俊杰<sup>4</sup>, 陈诚<sup>2</sup>, 杨延梅<sup>1</sup>, 樊兆航<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 南京水利科学研究院生态环境研究所, 江苏 南京 210029; 3. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 4. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029)

**摘要:**为探究变化环境条件对饮用水源地安全的影响,基于水源地安全内涵,从水质、水量、生态、环境风险和建设达标度5个方面,构建了包含水资源量、富营养化指数、底栖动物多样性、人类活动强度等12项指标的江苏省湖泊饮用水源地安全评价指标体系,通过主客观结合的综合权重计算模型确定各指标权重,并利用赋分法对江苏省13个典型湖泊饮用水源地安全状况进行综合评价。结果表明,江苏省典型湖泊饮用水源地整体安全状况较好,影响水源地综合安全的关键指标为水质指标和生态指标。

**关键词:**典型湖泊; 饮用水源地; 安全评价; 指标体系; 组合赋权; 江苏省

**中图分类号:**TV213.4; TU991.15 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)05-0071-08

**Safety evaluation of typical lake drinking water sources in Jiangsu Province** // DU Yunbin<sup>1,2</sup>, CHEN Qiuwen<sup>2</sup>, WANG Zhiyuan<sup>2</sup>, WANG Dongmei<sup>3</sup>, LIU Junjie<sup>4</sup>, CHEN Cheng<sup>2</sup>, YANG Yanmei<sup>1</sup>, FAN Zhaochang<sup>2</sup> (1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Center for Eco-Environmental Research, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Jiangsu Institute of Water Resources and Hydropower Research, Nanjing 210017, China; 4. Jiangsu Province Hydrology & Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** In order to explore the impact of changing environmental conditions on the safety of drinking water sources, based on the connotation of the safety of water sources, a safety evaluation index system of lake drinking water sources in Jiangsu Province with 12 indicators including water resources, eutrophication index, benthic diversity, and human activity intensity has been constructed from 5 aspects of water quality, water quantity, ecology, environmental risks and construction standards. A comprehensive weight calculation model combining subjective and objective is used to determine the weight of each indicator, and a scoring method is used to comprehensively evaluate the safety status of 13 typical lake drinking water sources in Jiangsu Province. The results show that the overall safety status of typical lake drinking water sources in Jiangsu Province is relatively good, and the key indicators affecting the comprehensive safety of water sources are water quality indicators and ecological indicators.

**Key words:** typical lake; drinking water sources; safety evaluation; index system; combination weight; Jiangsu Province

随着经济社会的快速发展和城市化的高速推进,饮用水源地环境风险日益加剧,部分集中式饮用水源地存在供水能力不稳定、水质不稳定、突发性水污染事件时有发生等问题。湖泊饮用水源地具有水体流动弱、水体置换较慢、自净能力差的特点,其综合治理是一项长期、复杂的系统工程。开展湖泊水源地安全评估指标体系研究,全面评估水源地生态

系统健康和供水安全,是提升水源地安全保障度的迫切需求,对加强饮用水源地保护、维护人民生命健康、促进经济社会可持续发展具有重要意义。

国外相关研究主要集中于饮用水安全与水源地健康风险,对水源地安全内涵没有明确的定义。国内研究中,衣强<sup>[1]</sup>认为水源地安全是水源地自身的属性,指水源地的基本情况(水质状况、蓄水情况、

基金项目:国家自然科学基金(51609144);中国科协青年人才托举工程(2018QNRC001);江苏省水利科技项目(2019004,2017001ZB)

作者简介:杜云彬(1996—),男,硕士研究生,研究方向为湖泊水环境保护。E-mail:1115226443@qq.com

通信作者:王智源,高级工程师。E-mail:zywang@nhri.cn

工程安全、管理水平等)能够满足人民的健康生活以及社会的稳定和可持续发展。王丽红等<sup>[2]</sup>提出水源地安全内涵包含两个方面:一是水源地的自然属性,即水源地抵抗外界干扰的能力,如水体自净能力等;二是水源地的社会属性,即水源地在面对人类活动带来的水质污染、水体富营养化等不利影响时做出的反应。近年来,对饮用水源地安全的评价研究逐渐增加。美国国家环保局(USEPA)选取了饮用水源状况及其生态脆弱性两方面的15个指标,用定性的方法对水源地进行总体评价<sup>[3]</sup>; Mehrnoosh等<sup>[4]</sup>利用改进的饮用水水质指数(DWQI)评价了伊朗胡赛斯坦省农村地区的水源地水质状况;申献辰等<sup>[5]</sup>在国内外水质评价方法的基础上,结合国家地表水环境质量标准,提出了一种适用于我国水源地水质评价的指数系统;方国华等<sup>[6]</sup>基于压力-状态-响应模型,选取植被覆盖率、农药化肥施用强度、水体自净能力、环保投资占GDP比例、土壤侵蚀强度和水土流失率6个指标评价了长江江苏段饮用水源地安全风险;周晓铁等<sup>[7]</sup>使用单因子标准指数法与卡尔森指数法对安徽省91个县级以上饮用水源地和31个湖库型水源地水质安全进行了评价。

目前已有的水源地评价大多以水量满足、水质达标为主,并没有充分考虑生态安全、空间稳定、人类活动干扰等要素的相关指标,无法全面准确体现水源地安全内涵,不能满足河湖长制的管理需求。相较于河流型水源地,湖泊水源地具有水体交换周期长、人类活动强度高、水质达标率低等特点。因此,针对湖泊水源地自然属性、生态属性和服务属性的特点,亟须结合水源地水量充足、水质安全、生态健康、功能完整等客观需求,构建适用于湖泊水源地管理要求的安全评价体系。

江苏省是我国淡水湖泊分布最集中的省区之一,境内水网密布,大小湖泊湖荡200余个,湖泊率达到6%,居全国首位<sup>[8]</sup>。湖泊是江苏省重要的饮用水源,全省地级以上湖库型水源地共21个,占地级以上水源地的20.8%。随着近年来社会经济高速发展、城镇化进度加快、人口密度激增,省内大多数湖泊出现了自由水面萎缩、入湖污染负荷上升、湖区水质下降、生态系统退化等问题<sup>[9]</sup>,湖泊饮用水源地安全风险呈总体上升的态势。因此,开展江苏省湖泊饮用水源地安全评价研究,既是长江大保护和江淮生态经济带建设的国家宏观战略需求,也是落实河湖长制和江苏省生态河湖行动计划的重要抓手。本文选取江苏省13个典型湖泊饮用水源地,以2017年为研究年,从水质、水量、生态、环境风险和

建设达标度等5个方面构建江苏省湖泊饮用水源地安全评价体系,通过构建层次分析法和熵权法相结合的综合权重模型确定各指标权重,在收集相关数据的基础上计算安全综合指数,对江苏省典型湖泊饮用水源地安全做出全面准确的评估,以期为湖泊饮用水源地安全评价与管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

以太湖、洪泽湖等13个地级以上湖泊型集中式饮用水源地为研究对象(图1),其中,洪泽湖、微山湖、骆马湖、宝应湖和大纵湖位于苏北地区;高邮湖、邵伯湖位于苏中地区;固城湖、石臼湖、太湖、溧湖、洮湖和阳澄湖位于苏南地区。以上典型湖泊水源地具有较高的地理代表性,能够较全面准确地反映江苏省湖泊饮用水源地的整体安全状况,各典型湖泊饮用水源地基本信息见表1。

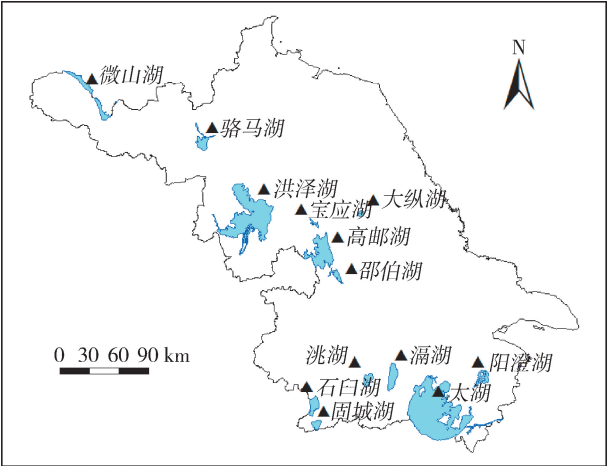


图1 江苏省典型湖泊饮用水源地分布示意图  
Fig.1 Distribution of drinking water sources of typical lakes in Jiangsu Province

### 1.2 数据来源

用于典型湖泊水源地安全评价的水文数据来自江苏省与涉湖各地级市(南京、无锡、常州、苏州、扬州、泰州、宿迁、淮安、盐城、徐州)水资源公报,水质数据为各典型湖泊饮用水源地取水口水质监测数据。水生生物数据通过查阅国内外文献获取,详见参考文献[10-32]。社会特性指标取自江苏省与涉湖各地级市的统计年鉴,其中水质数据、水文数据和社会特性数据年为2017年,水生生物数据年限范围是2008—2018年。

### 1.3 数据处理方法

本文采用改进的极差标准化法<sup>[33]</sup>,避免标准化值出现0的情况,能够有效增加标准化值的科学性。正向指标、负向指标的数据处理公式分别为

表 1 江苏省典型湖泊饮用水源地基本信息

Table 1 Basic information of drinking water sources of typical lakes in Jiangsu Province

| 水源地名称        | 所在湖泊 | 水厂名称       | 供水范围   | 日供水量/万 t |
|--------------|------|------------|--------|----------|
| 固城湖水源地       | 固城湖  | 高淳区水厂      | 高淳区    | 4.60     |
| 骆马湖宿城水源地     | 骆马湖  | 宿迁水厂       | 宿迁市区   | 8.00     |
| 骆马湖嶂山水源地     | 骆马湖  | 新源水厂       | 宿迁市区   | 1.50     |
| 骆马湖窑湾水源地     | 骆马湖  | 徐州市二水厂     | 新沂市    | 80.00    |
| 骆马湖新店水源地     | 骆马湖  | 新沂水厂       | 新沂市    | 10.00    |
| 南四湖徐庄水源地     | 微山湖  | 沛县水厂       | 沛县     | 20.00    |
| 工业园区阳澄湖水源地   | 阳澄湖  | 园区水厂       | 苏州工业园区 | 20.00    |
| 傀儡湖水源地       | 阳澄湖  | 昆山市第三水厂    | 昆山市    | 55.00    |
| 石臼湖备用水源地(备用) | 石臼湖  |            | 南京市区   |          |
| 宝应湖备用水源地(备用) | 宝应湖  |            | 宝应县    |          |
| 高邮湖备用水源地(备用) | 高邮湖  |            | 高邮市    |          |
| 高邮湖菱塘水源地     | 高邮湖  | 湖西水厂       | 高邮市    | 5.00     |
| 邵伯湖备用水源地(备用) | 邵伯湖  |            | 扬州市区   |          |
| 蟒蛇河水源地       | 大纵湖  | 盐城市城西水厂    | 盐城市区   | 16.90    |
| 溧湖备用水源地(备用)  | 溧湖   |            | 武进区    |          |
| 长荡湖涑渚水源地     | 洮湖   | 长荡湖水厂      | 金坛区    | 20.00    |
| 洪泽湖周桥干渠水源地   | 洪泽湖  | 井源水厂       | 洪泽区    | 10.00    |
| 二河市区水源地      | 洪泽湖  | 城南水厂       | 淮安市区   | 9.00     |
| 沙渚水源地        | 太湖   | 南泉水厂       | 无锡市区   | 44.80    |
| 锡东水源地        | 太湖   | 锡东水厂       | 无锡市区   | 23.60    |
| 太湖金墅港水源地     | 太湖   | 白洋湾水厂/相城水厂 | 姑苏区    | 38.83    |
| 太湖镇湖水源地      | 太湖   | 高新区第二水厂    | 高新区    | 28.00    |
| 太湖渔洋山水源地     | 太湖   | 横山水厂/新区水厂  | 姑苏区    | 48.19    |
| 太湖庙港水源地      | 太湖   | 区域水厂       | 吴江区    | 60.00    |

$$Y_i = (1 - a) + a \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

$$Y_i = (1 - a) + a \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中:  $Y_i$  为标准化值;  $X_i$  为第  $i$  项指标原始值;  $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$  分别为该类指标中的最大值和最小值;  $a$  为标准系数, 取 0.9。

#### 1.4 湖泊水源地安全评价指标体系构建

##### 1.4.1 水源地安全要素

本研究从水量、水质、生态、环境风险和建设达标度 5 个要素表征江苏省湖泊饮用水源地安全内涵。①水量: 水源地应具有一定的蓄水量, 满足现状供水要求; 来水和供水之间比例协调, 能保证供水的可持续性; 特枯水文年水源地水量能满足供水需求。②水质: 水源地水质能持续满足供水水质要求; 富营养化等级较低, 没有蓝藻水华暴发风险; 不发生突发风险事件或者发生后对水源地安全供水不构成威胁。③生态: 水源地水生态系统有活力、稳定性强且具有自我恢复性, 生物完整性和多样性高, 生境能满足水生动植物生长需求。④环境风险: 水源地人为干扰小、污染负荷低, 环境风险源数量少、规模小、距离远, 不存在突发污染风险。⑤建设达标度: 水源地建设达标率高, 管理手段信息化程度高, 水源地达标建设投入比例高。

##### 1.4.2 评价指标的选择与筛选

根据水源地安全内涵, 查阅并分析了 1990—2018 年国内外关于地表饮用水源地水质评价、水量评价、生态评价、脆弱性评价和水源地安全综合评价相关的 245 篇文献, 得到 5 类共 73 个指标, 其中 18 个水质指标、17 个水量指标、15 个生态指标、12 个环境风险指标、11 个建设达标度指标。

对 73 个指标进行筛选, 筛选原则为: ①能全面反映湖泊水源地安全的各种属性; ②与研究区域相适应; ③量化方法简便且可操作性强; ④指标间独立性较高。指标筛选步骤有频次分析和独立性分析。频次分析是通过统计所有文献中的指标出现频次, 设置合适的筛选频次, 将超过筛选频次的作为备选指标, 该步骤利用 Excel 2016 进行。相关分析设置相关系数  $r > 0.75$  为限值<sup>[34]</sup>, 以 Pearson 相关性分析方法筛选出相互独立的指标, 该步骤利用 SPSS 24 软件进行。

##### 1.4.3 评价指标权重的计算

目前在水源地安全评价的研究中, 大多单独采用主观赋权法或客观赋权法确定权重。主观赋权法权重的确定由决策者的主观意向决定, 结果易受决策者主观经验的偏差影响。客观赋权法是基于已有数据通过科学的统计和数学的算法确定权重, 结果不受主观因素干扰, 但客观赋权法未考虑到评价指

W\_i = λ α\_i + (1 - λ) β\_i (6)

式中:W<sub>i</sub>为第i项样本的组合赋权;α<sub>i</sub>为层次分析法权重;β<sub>i</sub>为熵权法权重;λ 为偏好系数,取0.5。

1.4.4 评价方法与标准

为了全面反映江苏省典型湖泊水源地安全状况,需要对评价指标进行综合。本文采用综合指数法对江苏省典型湖泊水源地安全评价指标进行综合,计算公式为

I\_A = ∑\_{i=1}^m Y\_i W\_i (7)

式中:I<sub>A</sub> 为安全综合指数;Y<sub>i</sub>为评价指标标准化后的数值,数值范围在0~1之间。

目前在安全评价与生态健康评价研究领域评价标准的确定采用较多的方法主要有专家法和分位数法<sup>[36-37]</sup>。本文采用分位数法确定评价标准,将安全指数最大值的75%分位数以上定义为“安全”,25%分位数以下定义为“不安全”,其余部分定义为“较安全”。

2 结果与分析

2.1 评价指标体系的建立

根据第1.4.2节评价指标的筛选方法进行频次分析。由于各要素层指标数量有较大差距,对水质指标设置6%的筛选频率,水量指标和生态指标设置8%的筛选频率,生态安全指标中的多样性指数均为Shannon-Wiener多样性指数,下文简称为多样性指数,环境风险指标与建设达标度指标选择10%的筛选频率,筛选结果见表2。对于水质指标,各典

标间的差异性,结果与人们较认可的结果往往存在一定的差异<sup>[35]</sup>。因此本文基于主客观结合的原则,使用层次分析法和熵权法相结合的综合权重模型确定各指标权重。

计算层次分析法权重时,以江苏省典型湖泊水源地安全为目标层A,以水质、水量、生态、环境风险和建设达标度为5个准则层(B<sub>1</sub>~B<sub>5</sub>),以12个评价指标为指标层(C<sub>1</sub>~C<sub>12</sub>),通过4位专家的判断构建A-B、B<sub>1</sub>-C、B<sub>2</sub>-C、B<sub>3</sub>-C、B<sub>4</sub>-C和B<sub>5</sub>-C<sub>6</sub>个判断矩阵进行权重计算。若某一准则层下仅有一个指标,以该准则层的权重作为对应指标的权重。

熵权法权重计算分为标准化矩阵构建、信息熵计算与权重确定3步,计算过程如下:

由式(1)~(2)计算的指标归一化值构建标准化矩阵Z;根据式(3)和(4)计算可得第j项指标的信息熵值q<sub>j</sub>和信息效用价值h<sub>j</sub>:

q\_j = -k ∑\_{i=1}^m Z\_{ij} ln Z\_{ij} (3)

其中 k = (ln b)<sup>-1</sup>

h\_j = 1 - q\_j (4)

式中m为样本值。第j个指标的熵权法权重W<sub>sj</sub>为

W\_{sj} = \frac{h\_j}{\sum\_{j=1}^n h\_j} (5)

为最大程度减小单独使用层次分析法或熵权法带来的主客观偏差,引入组合赋权法构建综合权重模型:

表2 江苏省典型湖泊饮用水源地安全评价指标分类及引用频率

Table 2 Classification and citation frequency of safety assessment indexes for drinking water sources in typical lakes in Jiangshu

| 水质安全指标     | 频率 1/% | 水量安全指标     | 频率 2/% | 生态安全指标    | 频率 3/% | 环境风险指标    | 频率 4/% | 建设达标度指标  | 频率 5/% |
|------------|--------|------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|----------|--------|
| 重金属        | 11.4   | 供水保证率      | 9.8    | 鱼类多样性指数   | 9.2    | 人类活动强度    | 12.3   | 人均 GDP   | 11.7   |
| 高锰酸盐指数     | 10.1   | 水量来供比      | 8.5    | 浮游植物多样性指数 | 8.7    | 污染排放强度    | 11.8   | 监测与管理能力  | 10.8   |
| 水质等级       | 9.3    | 人均水资源量     | 8.2    | 底栖动物多样性指数 | 8.3    | 农药使用量     | 9.5    | 硬件设施保障情况 | 9.9    |
| 总磷         | 8.7    | 枯水年来水保证率   | 7.9    | 水温变异度     | 8.1    | 废水排放达标率   | 9.2    | 突发事件应急预案 | 9.7    |
| TLI 富营养化指数 | 8.5    | 多年平均降雨量    | 7.7    | 鱼类物种数     | 7.9    | 化肥施用量     | 8.9    | 经费投入     | 9.5    |
| 氨氮         | 8.1    | 水源地水位变异度   | 7.5    | 珍惜鱼类物种数   | 7.8    | 围网养殖面积    | 7.7    | 法律法规完善度  | 8.7    |
| 砷          | 7.4    | 水量利用率      | 5.5    | 鱼类完整性指数   | 7.5    | 生活垃圾无害处理率 | 7.7    | 水利工程等级   | 8.6    |
| 溶解氧        | 7.2    | 土壤蓄水能力     | 5.5    | 浮游植物完整性指数 | 7.1    | 面源污染      | 7.6    | 防洪安全     | 8.5    |
| 硒          | 6.6    | 水资源开采率     | 5.4    | 植被覆盖率     | 6.2    | 水土流失治理率   | 7.4    | 用水户满意度   | 8.1    |
| 总氮         | 6.0    | 湖库枯水年来水量   | 4.5    | 底栖动物物种数   | 5.6    | 土地利用类型    | 7.4    | 水源地保护区划分 | 7.4    |
| 氯化物        | 4.9    | 湖库设计枯水年来水量 | 4.5    | 生态流量保障度   | 4.7    | 旅游规模      | 5.7    | 安全教育与培训  | 7.1    |
| 石油类        | 3.2    | 产水能力       | 4.1    | 鸟类多样性指数   | 4.5    | 垃圾堆放      | 4.8    |          |        |
| 氟化物        | 2.5    | 水源地开发度     | 3.9    | 景观多样性指数   | 3.4    |           |        |          |        |
| 粪大肠杆菌      | 2.0    | 地区干旱指数     | 3.7    | 浮游植物物种数   | 3.4    |           |        |          |        |
| 氟化物        | 1.6    | 调度及时度      | 3.1    |           |        |           |        |          |        |
| 叶绿素 a      | 1.1    | 消落带变化      | 2.6    |           |        |           |        |          |        |
| 透明度        | 0.8    |            |        |           |        |           |        |          |        |
| 挥发酚        | 0.6    |            |        |           |        |           |        |          |        |

注:频率1~5 分别代表水质安全指标、水量安全指标、生态安全指标、环境风险指标和建设达标度指标的引用频率。

型湖泊水源地的溶解氧、重金属、砷、硒指标含量远低于国家饮用水安全标准限值,故予以剔除;在计算TLI综合富营养指数时已经包含总氮指标,且地表水中氨氮与总氮具有较高的相关性,因此,为避免指标之间相关性较高将总氮指标剔除。对于水量指标,水量来供比和供水保证率均能表示水源地水量安全状况,而水量来供比能更好地反映水源地自然属性,故将供水保证率排除。对于生态指标,鱼类、底栖动物和浮游植物的多样性指数均能反映湖泊生态系统健康状况,但湖泊中底栖动物相对鱼类活动范围较小、生命周期较长、迁移能力较弱,且浮游植物和底栖动物对环境污染的敏感性更强,故剔除鱼类多样性指数。在环境风险指标中,人类活动强度和污染排放强度能从不同角度反映水源地的污染负荷压力,故保留。对于建设达标度指标,人均GDP、监控与管理能力是水源地建设和管理能力的重要体现,人均GDP能够综合反映对水源地建设和保护的经济投入能力,而水源地监控管理能力定义不明、不易量化,故剔除。对初步筛选出的指标进行相关性分析,以相关系数 $|r| > 0.75$ 筛选出具有高度相关性的指标。最终确定氨氮、高锰酸盐指数、TLI综合富营养化指数、总磷、水量来供比、人均水资源量、浮游植物多样性指数、底栖动物多样性指数、水温变异度、人类活动强度、污染排放强度、人均GDP 12个指标,构建江苏省典型湖泊水源地安全评价指标体系。TLI综合富营养化指数、浮游植物多样性指数、底栖动物多样性指数、水温变异度 $T$ 、污染排放强度 $P$ 的计算公式见式(8)~(11);人类活动强度以湖区各区县平均人口密度计。

$$I_{TLI}(\sum) = \sum Z_i I_{TLI} \quad (8)$$

$$H = - \sum S \ln S \quad (9)$$

$$T = T_a - T_b \quad (10)$$

$$P = W_p / G \quad (11)$$

式中: $Z_i$ 为第 $i$ 个参数权重; $I_{TLI}$ 为第 $i$ 个参数的营养指数; $S$ 为某一物种个体数占总个体数的比例; $T_a$ 为当年水温平均值; $T_b$ 为多年水温平均值; $W_p$ 为湖区各区县平均污水排放量; $G$ 为湖区各区县平均国内生产总值。

采用Matlab 2014b计算各指标层次分析法权重和熵权法权重,利用式(6)计算各指标最终权重,最终确定江苏省典型湖泊饮用水源地安全评价指标体系(图2,括号中为权重)。

2.2 评价标准划分

根据式(7)将数据标准化后的最大值与各要素组合权重相乘得到水源地各安全要素的最大值,再

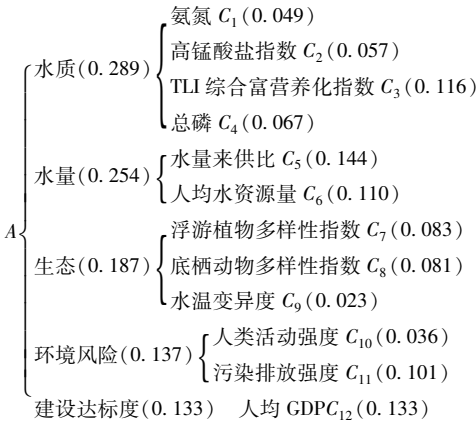


图2 江苏省典型湖泊饮用水源地安全评价指标体系

Fig.2 Safety evaluation index system of drinking water source of typical lakes in Jiangsu Province

按照第1.4.4节中所述分位数法确定江苏省典型湖泊水源地安全等级划分标准,结果见表3。

表3 江苏省典型湖泊饮用水源地安全评价等级划分

Table 3 Classification of safety assessment for drinking water sources of typical lakes in Jiangsu Province

| 安全状况          | 分位数        | 安全综合指数        | 水质安全指数        | 水量安全指数        |
|---------------|------------|---------------|---------------|---------------|
| 不安全           | [0,25%]    | [0,0.250)     | [0,0.072)     | [0,0.064)     |
| 较安全           | [25%,75%]  | [0.250,0.750) | [0.072,0.217) | [0.064,0.191) |
| 安全            | [75%,100%] | [0.750,1.000] | [0.217,0.289] | [0.191,0.254] |
|               |            |               |               |               |
| 生态安全指数        |            | 环境风险安全指数      | 建设达标度安全指数     |               |
| [0,0.047)     |            | [0,0.034)     | [0,0.033)     |               |
| [0.047,0.140) |            | [0.034,0.103) | [0.033,0.100) |               |
| [0.140,0.187] |            | [0.103,0.137] | [0.100,0.133] |               |

2.3 湖泊水源地安全状况评价结果

根据建立的评价指标体系,江苏省典型湖泊水源地安全评价结果见图3。总体上,江苏省典型湖泊水源地均在“较安全”至“安全”级别范围内,没有出现“不安全”的情况。其中,仅有固城湖水源地安全状况为“安全”,其余水源地安全状况皆为“较安全”。由表4可知,各要素安全状况与综合安全状况的评价结果具有较高的一致性。

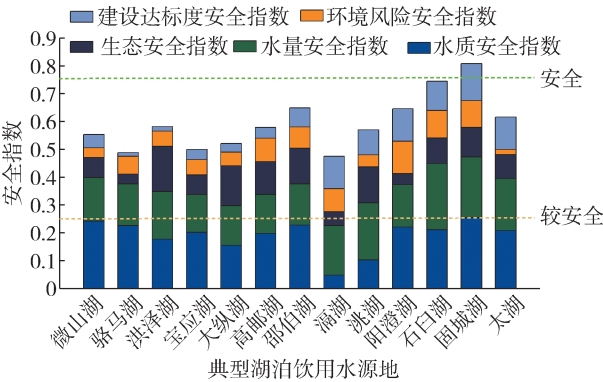


图3 江苏省典型湖泊饮用水源地安全指数

Fig.3 Safety index of drinking water source of typical lakes in Jiangsu Province

表4 江苏省典型湖泊饮用水源地安全等级

Table 4 Safety level of drinking water sources of typical lakes in Jiangsu Province

| 湖泊  | 水质  | 水量  | 生态  | 环境<br>风险 | 建设达<br>标度 | 综合<br>安全 |
|-----|-----|-----|-----|----------|-----------|----------|
| 固城湖 | 安全  | 安全  | 较安全 | 较安全      | 较安全       | 安全       |
| 骆马湖 | 安全  | 较安全 | 不安全 | 较安全      | 较安全       | 较安全      |
| 微山湖 | 安全  | 较安全 | 较安全 | 较安全      | 较安全       | 较安全      |
| 阳澄湖 | 安全  | 较安全 | 不安全 | 安全       | 安全        | 较安全      |
| 石臼湖 | 较安全 | 安全  | 较安全 | 较安全      | 安全        | 较安全      |
| 宝应湖 | 较安全 | 较安全 | 较安全 | 较安全      | 较安全       | 较安全      |
| 高邮湖 | 较安全 | 较安全 | 较安全 | 较安全      | 较安全       | 较安全      |
| 邵伯湖 | 较安全 | 较安全 | 较安全 | 较安全      | 较安全       | 较安全      |
| 大纵湖 | 较安全 | 较安全 | 安全  | 较安全      | 不安全       | 较安全      |
| 溇湖  | 不安全 | 较安全 | 较安全 | 较安全      | 安全        | 较安全      |
| 洮湖  | 较安全 | 安全  | 较安全 | 较安全      | 较安全       | 较安全      |
| 太湖  | 较安全 | 较安全 | 较安全 | 不安全      | 安全        | 较安全      |
| 洪泽湖 | 较安全 | 较安全 | 安全  | 较安全      | 不安全       | 较安全      |

### 3 讨论与建议

在选取的江苏省 13 个典型湖泊水源地中,安全状况为“安全”的水源地仅有固城湖水源地 1 个,其他水源地安全状况均为“较安全”,江苏省湖泊水源地安全状况整体呈现较好的态势。王霞等<sup>[38]</sup>调查发现江苏省 29 个地级以上集中式饮用水源地(包括 4 个湖泊水源地)基本安全。方国华等<sup>[39]</sup>从水质、水量、水体富营养化等角度分析了固城湖水源地安全状况及存在的问题,发现固城湖在水质、水量等方面均处于较安全等级。上述评价结果与本文呈较高的一致性。根据水源地安全评价结果,除溇湖水源地以外的典型湖泊水源地水质安全状况较好,与近年来江苏省水利部门集中开展水源地达标建设有关。溇湖水质安全问题由来已久,在 1980 年代水质基本为Ⅲ类水质,到 1990 年代水质下降到Ⅳ类,2000 年水质变为劣Ⅴ类<sup>[40]</sup>,在何尚卫<sup>[41]</sup>的研究中也将溇湖划为重污染性湖泊。分析发现,溇湖水体污染主要来源是扁担河、夏溪河、武南运河等入湖河流以及围网养殖、农业种植和工业废水<sup>[42]</sup>。另外,江苏省人均可用水量有限,突发水污染事件仍造成水质型缺水风险<sup>[43]</sup>。水源地生态安全方面,仅骆马湖水源地与阳澄湖水源地生态安全级别为不安全,生态风险较高。骆马湖水源地的生态问题主要是大规模采砂活动对水生生物生境的破坏及湖区富营养化程度较高<sup>[25]</sup>,而阳澄湖围网养殖、餐饮与观光旅游开发、船舶通行等人类活动是影响水源地生态健康的主要原因<sup>[26]</sup>。相对于其他湖泊水源地,太湖水源地环境风险相对较高。太湖位于长江三角洲核心地区,人口密集、工业发达,湖区西北部平原入湖河网的生活污水污染负荷较重,湖区北侧的无锡

市惠山区、江阴市东部、常州市与武进区相邻部分区域、昆山市等地区分布大量污染密集型企业,湖区船舶通航量较高也加剧了突发水污染风险<sup>[44]</sup>。本研究以资金投入能力表示水源地建设和管理能力,进而评价水源地建设达标情况,结果表明,位于苏中和苏北地区的大纵湖水源地与洪泽湖水源地建设达标度相对较差,水源地基础设施投资能力较弱<sup>[45]</sup>。由于数据的局限性,本文选取的建设达标度指标不能完全反映水源地监控、预警和应急供水能力,后续研究需要增加该方面的指标。

根据江苏省典型湖泊水源地安全评价结果,本研究针对性地提出以下湖泊水源地安全保护建议:①针对溇湖等水质较差的水源地,应提高水源地所在区域污水处理率,加强入湖河流水环境治理,大力发展生态渔业、建设有机农业生态带,以减少外源污染的输入;②在水源地水量安全方面,通过调整水源地供水区域水资源消费结构、提高水资源利用效率、修建应急水源地等措施为水源地水量安全提供保障;③对于骆马湖等生态状况较差的水源地应从治理与管控两个角度同时出发,一方面加大生态修复力度,另一方面加大对非法采砂、非法养殖等的管控力度;④对于太湖等环境风险较高的湖泊水源地,通过调整流域产业结构、优化岸线开发利用布局和扩大保护区范围等手段降低水源地环境风险;⑤针对水源地建设达标情况,水源地所在区域政府应进一步完善水源地保护区建设方案,在加大水源地建设和管理经济投入的同时,加大执法力度,着重提升水源地监控与预警能力。

### 4 结 语

本研究的局限性主要体现在 2 个方面:①在不同时空尺度下收集到的数据在采样点位、监测手段、检测方法和试验误差方面存在差异;②采用基于统计学的指标筛选方法可能会导致选取的评价指标不能准确反映湖泊饮用水源地的综合安全状况。在后续研究中,一方面需要提升数据获取的准确性、时效性和全面性,另一方面需要进一步改进评价指标的筛选方法。

### 参考文献:

- [1] 衣强. 集中式地表饮用水水源地安全评价方法研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2007.
- [2] 王丽红,王开章,刘锋范,等. 饮用水水源地安全的内涵、现状及对策[J]. 山东农业科学,2007(5):94-96, (WANG Lihong, WANG Kaizhang, LIU Fengfan, et al. Connotation, present status and countermeasures of the

- drinking-water source safety [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2007(5):94-96. (in Chinese))
- [3] SCHULTZ T. A critique of EPA's index of watershed indicators [J]. Journal of environmental management, 2001, 62(4):429-439.
- [4] MEHRNOOSH A, NAJMEH G, KAMYAR Y, et al. A modified drinking water quality index (DWQI) for assessing drinking source water quality in rural communities of Khuzestan Province, Iran [J]. Ecological Indicators, 2015, 53:283-291.
- [5] 申献辰, 杜霞, 邹晓雯. 水源地水质评价指数系统的研究[J]. 水科学进展, 2000, 11(3):260-265. (SHEN Xianchen, DU Xia, ZOU Xiaowen. A study of water quality index system for water supply [J]. Advances in Water Science, 2000, 11(3):260-265. (in Chinese))
- [6] 方国华, 袁婷, 林榕杰. 长江江苏段饮用水水源地生态风险评价[J]. 水资源保护, 2018, 34(6):12-16. (FANG Guohua, YUAN Ting, LIN Rongjie. Ecological risk assessment of drinking water source in Jiangsu section of Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6):12-16. (in Chinese))
- [7] 周晓铁, 韩宁宁, 孙世群, 等. 安徽省河流和湖库型饮用水水源地水质评价[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2):176-180. (ZHOU Xiaotie, HAN Tingting, SUN Shiqun, et al. Assessment of water quality in river-based and lake/reservoir-based drinking water sources in Anhui Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(2):176-180. (in Chinese))
- [8] 中国科学院南京地理研究所湖泊室. 江苏湖泊志[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1982.
- [9] 江苏省水利厅湖长制调研课题组. 江苏省湖泊管理与保护的实践与思考[J]. 水利发展研究, 2018, 18(4):1-6. (The Research Group of Lake Chief System of Jiangsu Province Water Resources Department. Practice and thinking of lake management and protection in Jiangsu Province [J]. Water Resources Development Research, 2018, 18(4):1-6. (in Chinese))
- [10] 葛伟, 马晶晶. 大纵湖浮游植物生态调查[J]. 中国科技纵横, 2017(1):3. (GE Wei, MA Jingjing. Ecological investigation of phytoplankton in Dazong Lake [J]. China Science & Technology Panorama Magazine, 2017(1):3. (in Chinese))
- [11] 刘腾腾. 太湖浮游植物群落结构及与环境因子的相关性[D]. 上海:上海师范大学, 2019.
- [12] 蔡琨, 陆维青, 牛志春, 等. 洮河水系湖泊春季浮游植物群落结构和水质生物学评价[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(3):37-41. (CAI Kun, LU Weiqing, NIU Zhichun, et al. Phytoplankton community structure and biological assessment in lakes of Taoge River system in spring [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2018, 30(3):37-41. (in Chinese))
- [13] 彭凯, 李太民, 刘利, 等. 苏北骆马湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1):183-191. (PENG Kai, LI Taimin, LIU Li, et al. Community structure of phytoplankton and bio-assessment of water quality in Lake Luoma, northern Jiangsu Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(1):183-191. (in Chinese))
- [14] 国超旋, 王冬梅, 胡晓东, 等. 石臼湖江苏段浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(4):23-29. (GUO Chaoxuan, WANG Dongmei, HU Xiaodong, et al. Phytoplankton community structure and its relationship to environmental factors in Shijiu Lake (Jiangsu section) [J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(4):23-29. (in Chinese))
- [15] 任颖. 南水北调东线调蓄湖泊浮游藻类群落特征与环境驱动因子[D]. 济南:山东大学, 2016.
- [16] 吴小伟, 刘平. 扬州境内湖泊浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水资源保护, 2015, 31(5):47-52. (WU Xiaowei, LIU Ping. Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in lakes in Yangzhou [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(5):47-52. (in Chinese))
- [17] 高亚, 潘继征, 李勇, 等. 江苏溇湖北部区整治后浮游植物时空分布及环境因子变化规律[J]. 湖泊科学, 2015, 27(4):649-656. (GAO Ya, PAN Jizheng, LI Yong, et al. Spatiotemporal distribution of phytoplankton and environmental factors in the north part of Lake Gehu (Jiangsu) after multi-treatment [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(4):649-656. (in Chinese))
- [18] 蔡晓钰, 姜宇, 张占恩, 等. 阳澄湖浮游植物调查及其与水体营养化关系分析[J]. 治淮, 2015(6):15-17. (CAI Xiaoyu, JIANG Yu, ZHANG Zhanen, et al. Investigation of phytoplankton in Yangcheng Lake and its relationship with water eutrophication [J]. Harnessing the Huaihe River, 2015(6):15-17. (in Chinese))
- [19] 冷春梅, 王亚楠, 董贯仓, 等. 南四湖浮游植物群落结构特征及季相变化[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2014, 45(2):193-197. (LENG Chunmei, WANG Yanan, DONG Guancang, et al. Community structure characteristics and the seasonal variation of phytoplankton in lake Nansi [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2014, 45(2):193-197. (in Chinese))
- [20] 梁建, 路伟亭. 涡河中下游浮游植物时空分布及成因[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(5):43-48. (LIANG Jian, LU Weiting. Spatial and temporal distributions and the cause analysis of phytoplankton in the middle and lower reaches of Guo River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(5):43-48. (in Chinese))

- [21] 唐雅萍,张哲海,梅卓华,等.南京市主要湖泊浮游植物群落结构分析[J].环境科技,2008(5):14-16. (TANG Yaping,ZHANG Zhehai,MEI Zhuohua,et al. Community structure of phytoplankton in main lakes of Nanjing[J]. Environmental Science and Technology,2008(5):14-16. (in Chinese))
- [22] 王希希,刘凌,王哲,等.大纵湖大型底栖动物群落结构与水质生物学评价[J].环境保护科学,2014,40(2):1-7. (WANG Xixi,LIU Ling,WANG Zhe,et al. Community structure investigation of macrozoobenthos and water quality biological assessment of Dazong Lake [J]. Environmental Protection Science,2014,40(2):1-7. (in Chinese))
- [23] 尹子龙,陆晓平,翁松干,等.固城湖底栖动物群落结构及水质生态评价[J].江苏水利,2018(11):14-19. (YIN Zilong,LU Xiaoping,WENG Songgan,et al. Ecological assessment of zoobenthos community structure and water quality in Gucheng Lake [J]. Jiangsu Water Resources,2018(11):14-19. (in Chinese))
- [24] 索维国,孙文祥,许飞,等.邵伯湖贝类水产种质资源保护区底栖动物多样性与保护对象资源状况探析[J].中国水产,2018(6):62-66. (SUO Weiguo,SUN Wenxiang,XU Fei,et al. Analysis on the diversity of benthic animals and the resources of the protected objects in the Shaobo Lake shellfish aquatic germplasm resources reserve [J]. China Fisheries,2018(6):62-66. (in Chinese))
- [25] 邹伟,李太民,刘利,等.苏北骆马湖大型底栖动物群落结构及水质评价[J].湖泊科学,2017,29(5):1177-1187. (ZOU Wei,LI Taimin,LIU Li,et al. Macrozoobenthic community structure and water quality assessment of Lake Luoma, Jiangsu Province, China [J]. Journal of Lake Sciences,2017,29(5):1177-1187. (in Chinese))
- [26] 刘唱,刘凌,张又,等.阳澄湖大型底栖动物群落结构和空间分布特征[J].水资源保护,2017,33(2):79-87. (LIU Chang,LIU Ling,ZHANG You,et al. Community structure and spatial distribution of macrozoobenthos in Yangcheng Lake, China [J]. Water Resources Protection, 2017,33(2):79-87. (in Chinese))
- [27] 李娣,李旭文,牛志春,等.江苏省不同营养状况湖泊底栖动物群落结构与多样性比较[J].生态毒理学报,2017,12(1):163-172. (LI Di,LI Xuwen,NIU Zhichun,et al. A comparative study on macrobenthic community structure and diversity in different trophic status lakes of Jiangsu Province [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017,12(1):163-172. (in Chinese))
- [28] 熊春晖.漏湖大型底栖动物群落结构及其与环境因子之间关系的研究[D].上海:上海海洋大学,2016.
- [29] 许浩,蔡永久,汤祥明,等.太湖大型底栖动物群落结构与水环境生物评价[J].湖泊科学,2015,27(5):840-852. (XU Hao,CAI Yongjiu,TANG Xiangming,et al. Community structure of macrozoobenthos and the evaluation of water environment in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences,2015,27(5):840-852. (in Chinese))
- [30] 董贯仓,李秀启,师吉华,等.南四湖底栖动物群落结构特征及其与环境因子的关系[J].湖泊科学,2013,25(1):119-130. (DONG Guancang,LI Xiuqi,SHI Jihua,et al. Community characteristics of macrozoobenthos and its relationship to environmental factors in Lake Nansi [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25 (1): 119-130. (in Chinese))
- [31] 张超文,张堂林,朱挺兵,等.洪泽湖大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J].水生生态学杂志,2012,33(3):27-33. (ZHANG Chaowen,ZHANG Tanglin,ZHU Tingbing,et al. Community structure of macrozoobenthos and its relationship with environmental factors in Lake Hongze [J]. Journal of Hydroecology, 2012, 33 (3): 27-33. (in Chinese))
- [32] 胡婷婷.长江下游三水体大型底栖动物群落结构及水质评价[D].芜湖:安徽师范大学,2016.
- [33] 于海洋,张飞,曹雷,等.基于乡镇尺度的土地生态安全时空格局评价研究:以博尔塔拉蒙古自治州为例[J].生态学报,2017,37(19):6355-6369. (YU Haiyang,ZHANG Fei,CAO Lei,et al. Spatial-temporal pattern of land ecological security at a township scale in the bortala mongolian autonomous prefecture [J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(19):6355-6369. (in Chinese))
- [34] BARBOUR M T,GERRITSEN J,GRIFFITH G E,et al. A framework for biological criteria for florida streams using benthic macroinvertebrates [J]. Journal of the North American Benthological Society,1996,15(2):185-211.
- [35] 俞立平,潘云涛,武夷山.科技教育评价中主客观赋权方法比较研究[J].科研管理,2009,30(4):154-161. (YU Liping,PAN Yuntao,WU Yishan. Comparing objective weighting with subjective weighting in Sci-tech education institute assessment [J]. Science Research Management,2009,30(4):154-161. (in Chinese))
- [36] 马玲玲,周林飞,张婷婷,等.基于压力-状态-响应模型的大伙房水库水源地安全评价研究[J].沈阳农业大学学报,2018,49(1):114-120. (MA Lingling,ZHOU Linfei,ZHANG Tingting,et al. Water source security evaluation of Dahuofang Reservoir based on PSR model [J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2018,49(1):114-120. (in Chinese))
- [37] 黄凯,姚垚,王晓宁,等.基于鱼类完整性指数的滦河流域生态系统健康评价[J].环境科学研究,2018,31(5):901-910. (HUANG Kai,YAO Yao,WANG Xiaoning,et al. The ecosystem health assessment based on the fish index of biological integrity in the Luanhe River Basin [J]. Research of Environmental Sciences,2018,31(5):901-910. (in Chinese))

(下转第92页)

- inference approach for pollution source identification of river chemical spills: a tracer experiment based analysis of algorithmic parameters, impacts and comparison with frequentist approaches [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(10): 3813-3825. (in Chinese))
- [11] WEI G, CHI Z, YU L, et al. Source identification of sudden contamination based on the parameter uncertainty analysis [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2016, 18(6): 919-927.
- [12] NEUPAUER R M, WILSON J L. Adjoint-derived location and travel time probabilities for a multidimensional groundwater system [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(6): 1657-1668.
- [13] 程伟平, 廖锡健. 基于逆向概率密度函数的一维污染源排放重构 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2011, 26(4): 460-469. (CHENG Weiping, LIAO Xijian. Recovering the release history of contaminant based on backward probability density function for the one-dimensional convection diffusion equation [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2011, 26(4): 460-469. (in Chinese))
- [14] 王家彪, 雷晓辉, 廖卫红, 等. 基于耦合概率密度方法的河渠突发水污染溯源 [J]. *水利学报*, 2015, 46(11): 1280-1289. (WANG Jiabiao, LEI Xiaohui, LIAO Weihong, et al. Source identification for river sudden water contamination based on coupled probability density function method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(11): 1280-1289. (in Chinese))
- [15] 杨海东. 河渠突发水污染追踪溯源理论与方法 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [16] THOMANN R V, MUELLER J A. *Principal of surface water quality modelling and control* [M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1987.
- [17] NEUPAUER R M, WILSON J L. Adjoint method for obtaining backward location and travel time probabilities of a conservative groundwater contaminant [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(11): 3389-3398.
- [18] JIANG Xiangyuan, LI Shuai. BAS: beetle antennae search algorithm for optimization problems [J]. *International Journal of Robotics and Control*, 2018, 1(1): 1-5.
- [19] 王兴伟, 陈家军, 郑海亮. 南水北调中线京石段突发性水污染事故污染物运移扩散研究 [J]. *水资源保护*, 2015, 31(6): 103-108. (WANG Xingwei, CHEN Jiajun, ZHENG Hailiang. Research on pollutant migration and diffusion in sudden water pollution accident in Beijing-Shijiazhuang Section of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project [J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(6): 103-108. (in Chinese))
- (收稿日期: 2019-10-22 编辑: 熊水斌)

(上接第 78 页)

- [38] 王霞, 王经顺, 张绪美, 等. 江苏省地级以上城市饮用水水源地环境状况调查、评估与管理对策研究 [J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(9): 164-166. (WANG Xia, WANG Jingshun, ZHANG Xumei, et al. Environmental investigation, assessment and management strategies for centralized drinking water sources in Jiangsu Province [J]. *Environmental Science and Management*, 2014, 39(9): 164-166. (in Chinese))
- [39] 方国华, 刘羽, 黄显峰. 南京市固城湖饮用水源地保护措施对策 [J]. *水利经济*, 2014(3): 45-47. (FANG Guohua, LIU Yu, HUANG Xianfeng. Measures for protecting drinking water source of Gucheng Lake in Nanjing [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2014(3): 45-47. (in Chinese))
- [40] 高亚岳, 周俊, 陈志宁, 等. 太湖富营养化进程中沉水植被的演替及重建设想 [J]. *江苏环境科技*, 2008, 21(4): 21-24. (GAO Yayue, ZHOU Jun, CHEN Zhining, et al. Environmental investigation, assessment and management strategies for centralized drinking water Sources in Jiangsu Province [J]. *Jiangsu Environment Science and Technology*, 2008, 21(4): 21-24. (in Chinese))
- [41] 何尚卫. 重污染湖区综合整治后水环境效应研究 [D]. 苏州: 苏州科技学院, 2014.
- [42] 李爱权, 宋晓兰. 太湖富营养化进程及其综合整治对策研究 [J]. *环境科学与管理*, 2013, 38(8): 85-87. (LI Aiquan, SONG Xiaolan. Eutrophication status of Gehu Lake and comprehensive control countermeasures [J]. *Environmental Science and Management*, 2013, 38(8): 85-87. (in Chinese))
- [43] 赵晨, 王远, 谷学明, 等. 基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率 [J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1636-1644. (ZHAO Chen, WANG Yuan, GU Xueming, et al. Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1636-1644. (in Chinese))
- [44] 张姗姗, 张磊, 张落成, 等. 苏南太湖流域污染企业集聚与水环境污染空间耦合关系 [J]. *地理科学*, 2018, 38(6): 954-962. (ZHANG Shanshan, ZHANG Lei, ZHANG Luocheng, et al. Coupling relationship between polluting industrial agglomeration and water environment pollution in southern Jiangsu of Taihu Lake Basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(6): 954-962. (in Chinese))
- [45] 简晓彬, 沈正平, 刘宁宁. 苏北与苏中、苏南经济发展差异的演变及成因探析 [J]. *经济问题探索*, 2007(2): 53-59. (JIAN Xiaobin, SHEN Zhengping, LIU Ningning. The discussion and analysis of the change reason of the area economy development differences between Su Zhou City's North, Center and South Area [J]. *Inquiry Into Economic Issues*, 2007(2): 53-59. (in Chinese))
- (收稿日期: 2020-02-13 编辑: 王 芳)