

太湖蓝藻水华灾害灾情评估方法初探*

刘聚涛¹, 杨永生¹, 高俊峰^{2**}, 姜加虎²

(1: 江西省水利科学研究院, 南昌 330029)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 通过对太湖蓝藻水华灾害影响分析, 探讨了太湖蓝藻水华灾害灾情评估指标的选取和评价标准的划分, 并采用模糊评价模型构建太湖蓝藻水华灾害灾情综合评估方法. 评价指标分为影响人口、影响范围、生态环境影响和经济损失四个方面, 其中影响人口指标为受灾人口, 影响范围指标包括蓝藻水华面积发生百分比和影响时间, 生态环境影响指标包括藻细胞浓度、TN 浓度和 TP 浓度, 经济损失指标包括直接经济损失和间接经济损失, 分别将太湖蓝藻水华灾害分为轻灾、中灾、重灾、极重灾和巨灾五个级别. 根据灾害综合评估方法, 以 2007 年 5 月 29 日太湖蓝藻水华灾害事件为实例进行评估, 该次蓝藻水华灾害为巨灾, 与该次事件引起的社会经济影响基本相一致, 表明该方法具有一定的科学性和适用性.

关键词: 蓝藻水华灾害; 灾情; 评估方法; 太湖

Comprehensive evaluation method of cyanobacteria bloom hazard in Lake Taihu

LIU Jutao¹, YANG Yongsheng¹, GAO Junfeng² & JIANG Jiahu²

(1: *Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, P. R. China*)

(2: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

Abstract: According to the analysis of the cyanobacteria bloom disaster effect, this paper discussed the evaluation indices and criteria of the hazard, constructed hazard evaluation method applying fuzzy comprehensive evaluation model. In the indicator layer, the affected population was the population affected by the hazard. The affected area included the percentage of the cyanobacteria bloom area and affected days. The eco-environmental indices included cyanobacteria cell concentration, total nitrogen concentration and total phosphorus concentration. The economic losses included direct loss and indirect loss, and it took the drinking water loss and tourism loss as direct losses and the hazard relief loss as indirect loss. Through the analysis of indicator system, according to the experts' determination, the cyanobacteria bloom hazard classification in Lake Taihu was divided into five classes which were light damage, mid-damage, heavy damage, heavier damage and catastrophic damage. Based on the fuzzy comprehensive evaluation method, this paper evaluated the cyanobacteria bloom hazard events from 2004 to 2008. The results showed that the cyanobacteria bloom hazard event in May 29th, 2007 was catastrophic one, which was consistent with the socio-economic effect. The results proved that the evaluation method could be successfully applied in the scientific research and field operation.

Keywords: Cyanobacteria bloom hazard; hazard degree; comprehensive evaluation method; Lake Taihu

太湖流域作为我国经济水平较高的区域, 蓝藻水华暴发频繁, 造成大量损失, 如 1990 年太湖蓝藻水华暴发, 无锡 46 家企业停产, 直接经济损失高达 1.3 亿元^[1]; 2007 年 5 月 29 日太湖蓝藻水华大规模暴发, 又引起无锡市 200 多万居民饮水危机, 给工业和生活带来了巨大影响. 如何定量地描述灾害灾情, 在灾害发生后能明确灾情级别, 避免引起公众不必要的惊恐, 并为公众和政府提供防灾减灾依据成为蓝藻水华灾害灾情评估的重要课题.

目前, 国内的大部分自然灾害已经建立起了适用于本灾种的灾情综合评估系统^[2]. 由于对蓝藻水华灾

* 国家重点基础研究发展计划项目(2008CB418106)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-YW-14-6)联合资助. 2010-07-05 收稿; 2010-09-06 收修改稿. 刘聚涛, 男, 1983 年生, 博士, 工程师; E-mail: liujutao126@163.com.

** 通讯作者; E-mail: gaojunf@niglas.ac.cn.

害的研究多集中于蓝藻水华发生机理^[3-6],但对蓝藻水华灾害资料的积累较少,蓝藻水华灾害灾情评估方法的研究也相对较少.蓝藻水华灾害灾情评估旨在确定灾害损失程度的大小,并服务于湖泊的灾害管理以及灾后救援工作,如何根据蓝藻水华灾害自身特点,进行蓝藻水华灾害灾情评估具有重要的理论和实践意义.同时,灾后评估能够客观、真实地反映蓝藻水华灾害的损失规模和程度,可以为进一步组织灾后救援工作与恢复重建工作并确定未来的减灾对策提供依据.本文通过对太湖蓝藻水华灾害的分析,构建太湖蓝藻水华灾害灾情评估的指标体系,结合模糊综合评价模型,构建太湖蓝藻水华灾害灾情评估方法.在此基础上,以2007年典型太湖蓝藻水华灾害事件为实例进行评估,以期对蓝藻水华减灾救灾和灾害管理提供依据.

1 太湖蓝藻水华灾害灾情评估方法

1.1 指标选取

随着对灾害研究的逐渐深入,关于灾害灾情评估指标体系已进行了较为充分的研究,但并无统一意见.目前,灾情评估指标主要根据灾害损失的构成加以确定^[7].灾害评估指标的选取主要集中于社会指标和经济指标或者属性指标和货币指标^[7-8]两个方面,其中社会指标主要包括影响人口、区域范围、持续时间等,经济指标包括直接经济损失和间接经济损失两个方面.同时,在灾害的生态环境评估中,通常将灾害引起的生态环境换算成经济损失来定量评估或者建立完备的指标体系进行生态环境影响评估,总体来说,关于灾害的生态环境影响方面的评估尚未有普遍适用的方法和模式,需要进一步研究^[7].

蓝藻水华发生由于通常导致水环境恶化,严重时导致一定经济损失^[9],因此符合灾害的概念^[10].本研究根据太湖蓝藻水华灾害造成的社会、环境和经济影响,通过对蓝藻水华灾害灾情指标体系的分析,将评估问题概化,形成太湖蓝藻水华灾害灾情评估指标体系的层次结构模型,由目标层、准则层和指标层组成.其中,准则层包括灾害影响的社会属性和经济损失,具体包括影响人口、影响范围、生态环境影响和经济损失.

指标的选取过程中,根据指标选取的代表性和可获取性等原则^[11,12],影响人口主要为受灾人口;影响范围为蓝藻水华面积百分比和影响时间;在生态环境影响指标中,选取藻细胞浓度、TN浓度和TP浓度为主要指标;经济损失中,包括直接经济损失和间接经济损失,间接经济损失主要指灾后救灾投入,直接经济损失多借鉴赤潮灾害评估指标来评估.在直接经济损失指标选取过程中,赵冬至等^[13]将赤潮损失分为人口的经济损失、水产养殖业的经济损失、渔业的经济损失和旅游业的经济损失四类;佟蒙蒙^[14]根据我国赤潮发生的实际情况,以赤潮灾害对人类的影响为基础,将赤潮灾害损失分为海产养殖及捕捞业经济损失、人口经济损失、旅游业经济损失和海洋生态破坏经济损失四类.根据太湖生态安全调查与评估报告^①,太湖直接经济损失包括生活用水损失、工业生产损失、农业生产损失和旅游经济损失,但由于工业和农业生产损失的不可测性,多选取太湖蓝藻水华灾害发生产生较大影响的生活用水损失和旅游损失进行计算评估.

1.2 指标含义及其计算方法

根据选取太湖蓝藻水华具体指标,确定各指标含义及其计算方法为:(1)受灾人口:主要包括饮用水源地水产供给人口;(2)蓝藻水华面积百分比,计算方法为:蓝藻水华面积百分比=(湖区)蓝藻水华面积/(湖区)湖泊面积;(3)影响时间:蓝藻水华灾害造成水厂停产或旅游停业的时间,通过实地调查获取;(4)藻细胞浓度、总氮(TN)浓度和总磷(TP)浓度:蓝藻水华暴发时,通过实地监测获取各监测点数据,然后根据实测值进行区域空间插值,再计算蓝藻水华暴发区域藻细胞浓度、TN浓度和TP浓度平均值;(5)直接经济损失:包括生活用水损失和旅游损失.生活用水损失:由于饮用水源地水质污染,市民用矿泉水来替代自来水而增加的投入,计算方法为:生活用水损失=影响人口×影响天数×用水量×(矿泉水价格-自来水价格);旅游损失采用历年旅游人口数据计算旅游人口年均增长率,预测2007年旅游人口数量,结合实际旅游人数求得由于蓝藻水华影响减少的旅游人数,再与人均消费的乘积,求得旅游损失;(6)间接经济损失:主要指救灾投入,即蓝藻水华暴发后,打捞蓝藻所增加的成本以及务工人员误工所消耗费用,计算方法为:救灾投入=投入物力+投入人力.

① 全国重点湖泊水库生态安全调查与评估太湖生态安全调查与评估专题报告.2007.

1.3 评价标准

蓝藻水华面积百分比和藻细胞浓度是根据近几年遥感影像解译和实地调查监测数据,结合专家意见进行划分;TN 浓度和 TP 浓度是根据富营养化分级标准^[15],结合太湖蓝藻水华暴发时各指标浓度来确定;直接经济损失和间接经济损失主要参考赤潮灾害分级^[16]以及其它类型灾种的灾害损失,结合蓝藻水华灾害本身特征来进行划分灾情.太湖蓝藻水华灾害灾情评估各指标评价标准见表 1.

表 1 太湖蓝藻水华灾害灾情评价标准

Tab. 1 Evaluation criteria of cyanobacteria bloom hazard degree in Lake Taihu

项目	轻灾	中灾	重灾	极重灾	巨灾
受灾人口(×10 ⁴ 人)	≤1	(1,10]	(10,50]	(50,100]	>100
蓝藻水华面积百分比(%)	≤5	(5,20]	(20,30]	(30,45]	>45
影响时间(d)	≤1	(1,3]	(3,5]	(5,10]	>10
藻细胞浓度(×10 ⁷ cells/L)	≤0.5	(0.5,1]	(1,5]	(5,10]	>10
TN 浓度(mg/L)	≤1	(1,3]	(3,5]	(5,10]	>10
TP 浓度(mg/L)	≤0.1	(0.1,0.25]	(0.25,0.5]	(0.5,1.2]	>1.2
直接经济损失(元)	≤10 ⁶	(10 ⁶ ,10 ⁷]	(10 ⁷ ,10 ⁸]	(10 ⁸ ,10 ⁹]	>10 ⁹
间接经济损失(×10 ⁴ 元)	≤50	(50,10 ²]	(10 ² ,10 ³]	(10 ³ ,10 ⁴]	>10 ⁴

2 太湖蓝藻水华灾害灾情评估模型

2.1 权重确定方法

指标权重确定的正确与否,直接影响评价结果的准确性.本文采用定性与定量相结合的权重赋值方法即层次分析法(AHP)^[17]来确定权重.该方法在专家确定法的基础上,进行数学分析,判断最大特征值的一致性,当 $CR < 0.10$ 时,认为层次总排序结果具有较满意的一致性并接受该分析结果,从而确定指标的权重集矩阵 W .

2.2 隶属度函数

以隶属度大小来表达隶属度资格时,隶属度数值愈大,隶属资格愈高.常用的求隶属度方法为随等级升高因子标准数值增大的因子的“降半梯形分布图”法^[18],根据隶属度函数求得各评价因子对各评价级别的隶属度矩阵 R .

2.3 综合评估模型

在确定单因素模糊评价隶属度矩阵 R 和权重集矩阵 W 之后,采用模糊综合评价方法^[18]进行计算: $B = W \cdot R = [b_1, b_2, \dots, b_m]$. 根据最大隶属度原则,若 $b_j = \max(b_1, b_2, \dots, b_m)$,则该评价对象级别为第 j 级.

3 太湖典型蓝藻水华灾害灾情评估实例

本研究以 2007 年 5 月 29 日太湖蓝藻水华灾害事件为实例^[19],根据实地调查和监测数据,结合上述蓝藻水华灾害灾情评估方法对该次事件进行评估.

3.1 经济损失计算

3.1.1 直接经济损失 生活用水损失计算:据统计^①,无锡市居民约 200 多万人饮用水受到影响,影响时间为 5 月 29 日至 6 月 4 日,约 5d;在蓝藻水华影响期间,人均用水量约为 208.9L/d^[20],价格为 2.57 元/t,用矿泉水替代,桶装水 18.9L,为 16 元.通过计算可知生活用水损失为 176309.68 × 10⁴元.旅游损失计算:2007 年无锡市旅游人数为 3350.76 × 10⁴人,收入为 418.04 × 10⁸元,海外的为 69.4728 × 10⁴人,收入为 36249 × 10⁴美元^[20],2007 年美元汇率为 7.604:1,则 2007 年人均消费为 1303 元.按照 5-6 月份占全年 5% 旅游人数来计算,由于蓝藻水华灾害影响,在 5-6 月份,不少旅游景点人数下降约为 50%^[21-22],因此 5-6 月份旅游减

① 全国重点湖泊水库生态安全调查与评估太湖生态安全调查与评估专题报告. 2007.

少人数为 85.5×10^4 人;则2007年太湖蓝藻水华灾害暴发产生的旅游损失为 11.14×10^8 元.直接经济损失等于生活用水损失与旅游损失之和,为 28.77×10^8 元.

3.1.2 间接经济损失 自6月13日起,由政府牵头组织开展太湖蓝藻打捞,通过实施人工打捞与机械作业相结合的方法,截至6月20日,全市累计出动3500船次、17000人次,打捞蓝藻28000t^①.船只单次运营成本以1000元/船次,人力成本以100元/人次计,则2007年太湖蓝藻水华灾害发生后救灾投入资金为 520×10^4 元.

3.2 灾情评估

3.2.1 权重确定 在确定太湖蓝藻水华灾害灾情评估指标体系后,根据专家打分法和层次分析法来确定太湖蓝藻水华灾害评估指标体系权重(表2).其中影响范围、生态环境影响、经济损失的判断矩阵的一致性值 $CR = 0.00$,在此基础上进行准则层的判断矩阵的一致性检验, $CR = 0.0019$;指标层和准则层的一致性检验值 $CR < 0.10$,因此该权重确定具有可信性.

3.2.2 隶属度计算 根据隶属度函数,以太湖蓝藻水华面积百分比为例来介绍蓝藻水华面

积百分比对各级别灾害的隶属度计算方法.2007年5月29日,太湖蓝藻水华总面积为 480km^2 ,占太湖总面积的20.32%,其属于重灾区间(20,30],则根据公式,其隶属度分别为中灾和重灾.中灾隶属度 $= (20.32 - 20)/(30 - 20) = 0.032$;重灾隶属度 $= (30 - 20.32)/(30 - 20) = 0.968$.

3.2.3 蓝藻水华灾害灾情评估 根据各指标评价标准,采用隶属度函数分别计算各指标对灾害各级别的隶属度,然后,结合层次分析法计算各指标和准则层权重,分别计算影响人口、影响范围、生态环境影响、经济损失以及综合评估目标对各级别的隶属度.在此基础上,结合各准则层指标权重,应用模糊综合评价模型来评估2007年5月29日太湖蓝藻水华灾害级别(表3).

表3 2007年太湖典型蓝藻水华灾害灾情评估结果

Tab.3 Evaluation results of cyanobacteria bloom hazard degree in Lake Taihu in 2007

评估指标	轻灾	中灾	重灾	极重灾	巨灾	评估结果
影响人口	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	巨灾
影响范围	0.000	0.010	0.990	0.000	0.000	重灾
生态环境影响	0.000	0.000	0.463	0.220	0.316	重灾
经济损失	0.000	0.123	0.108	0.408	0.361	极重灾
灾情综合	0.000	0.059	0.289	0.244	0.408	巨灾

通过对各准则层对各级别灾害的隶属度计算,根据最优隶属度原则,影响人口、影响范围、生态环境影响和经济损失分别隶属于巨灾、重灾、重灾和极重灾,在各单项评估的基础上,进行灾情综合评估,评估结果为巨灾,这与该次蓝藻水华造成巨大的经济损失、广泛的社会影响基本上一致.

在各项评估指标中,影响人口约为 200×10^4 人,在灾害评估中属于巨灾;尽管蓝藻水华发生面积百分比比较小,但由于该事件导致无锡市从5月29日至6月4日停水,影响范围评估总体较重,为重灾;在生态环境影响指标中,根据调查,在蓝藻水华灾害发生期间,无锡贡湖沙渚监测点位的藻类密度达 5.57×10^7 cells/L, TN和TP浓度分别高达 23.4mg/L 和 1.05mg/L ^[23],三者分别隶属于灾情级别的重灾、巨灾和极重灾,生态环境影响综合评估为重灾;在经济损失指标中,直接经济损失和间接经济损失分别为 28.77×10^8 元和 520×10^4

① 全国重点湖泊水库生态安全调查与评估太湖生态安全调查与评估专题报告.2007.

元,分别隶属于灾情级别的极重灾和中灾,经济损失综合评估为极重灾;在影响人口、影响范围、生态环境影响和经济损失评估的基础上,2007年5月29日太湖蓝藻水华灾害灾情评估结果为巨灾。

4 结语

本文通过对太湖蓝藻水华灾害分析,构建太湖蓝藻水华灾害综合评估指标体系,并确定各指标评价标准。在此基础上,采用层次分析法确定各指标层权重,应用降半梯形函数刻画隶属度,并结合模糊综合评价模型构建太湖蓝藻水华灾害灾情评估方法,并以2007年5月29日太湖蓝藻水华灾害事件作为实例进行验证。根据评价结果,2007年5月29日太湖蓝藻水华灾害灾情为巨灾,这与该次蓝藻水华造成巨大的经济损失、广泛的社会影响基本上一致,表明该方法具有一定的可行性和适用性。

在灾害引起的损失评估中,灾害造成的生态环境影响通常转换为经济损失来定量计算或者选取完整的生态环境指标进行单一评估。本研究在进行蓝藻水华灾害评估时,引入生态环境影响指标,选取藻细胞浓度、TN浓度和TP浓度作为生态环境影响指标,结合社会和经济损失指标进行蓝藻水华灾害综合评估,具有一定的创新意义,为蓝藻水华灾害灾情评估进一步研究打下基础。

5 参考文献

- [1] 张振克. 太湖流域湖泊水环境问题、成因与对策. 长江流域资源与环境, 1999, **8**(1): 81-87.
- [2] 郭 虎,熊亚军,扈海波. 北京市雷电灾害灾情综合评估模式. 灾害学, 2008, **23**(1): 14-17.
- [3] Chapman BR, Ferry BW, Ford TW. Phytoplankton communities in water bodies at Dungeness, UK: Analysis of seasonal changes in response to environmental factors. *Hydrobiologia*, 1998, **362**: 161-170.
- [4] James JE. The pathway to noxious cyanobacteria blooms in lakes: The food web as the final turn. *Freshwater Biology*, 1999, **42**: 537-543.
- [5] Paerl HW, Fulton RS, Moisaner PH *et al.* Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria. *Scientific World Journal*, 2001, **1**: 76-113.
- [6] 孔繁翔,高 光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.
- [7] 魏庆朝,张庆珩. 灾害损失及灾害等级的确定. 灾害学, 1996, **11**(1): 1-5.
- [8] 孙绍骋. 灾害评估研究内容与方法探讨. 地理科学进展, 2001, **20**(2): 122-130.
- [9] 范成新,季 江,陈荷生. 太湖富营养化现状、趋势及其综合整治对策. 上海环境科学, 1997, **16**(8): 4-7.
- [10] 张丽萍,张妙仙. 环境灾害学. 北京: 科学出版社, 2007.
- [11] 谢久兵. 基于 MapGIS 的广州市主要陆地地质灾害风险评估模型研究[学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [12] 仲 冰. 云南省新平县滑坡灾害风险评估研究[学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2008.
- [13] 赵冬至,李亚楠. 赤潮灾害经济损失评估技术研究. 见: 赵冬至编. 渤海赤潮灾害监测与评估研究文集. 北京: 海洋出版社, 2000: 144-150.
- [14] 佟蒙蒙. 我国的赤潮的分型分级及赤潮灾害评估体系[学位论文]. 广州: 暨南大学, 2006.
- [15] 窦鸿身,姜加虎. 中国五大淡水湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- [16] 赵 玲,赵东至,张昕阳等. 我国有害赤潮的灾害分级与时空分布. 海洋环境科学, 2003, **22**(5): 15-19.
- [17] 张 从. 环境评价教程. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 10.
- [18] 刘聚涛,高俊峰,姜加虎. 不同模糊评价方法在水环境质量评价中的应用比较. 环境污染与防治, 2010, **31**(1): 21-25.
- [19] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 357-358.
- [20] 江苏省统计局,国家统计局江苏调查总队. 2008 江苏统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [21] 无锡蓝藻祸及旅游业. 南昌游客避开华东游(http://www.xinhuanet.com/chinanews/2007-06/13/content_10284102.htm).
- [22] <http://www.ynet.com/net/view.jsp?oid=21375728>.
- [23] 秦伯强,王小冬,汤祥明等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策. 地球科学进展, 2007, **22**(9): 896-906.