

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0111

王兴菊, 梁佳佳, 刘唐琼, 等. 湖库型水源地水华风险评价模型研究与应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1128-1138.
WANG X J, LIANG J J, LIU T Q, et al. Study and application of bloom risk assessment model in lake and reservoir water source[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1128-1138. (in Chinese)

湖库型水源地水华风险评价模型研究与应用

王兴菊¹, 梁佳佳¹, 刘唐琼¹, 赵然杭¹, 田茂勤², 李树梁²

(1. 山东大学土建与水利学院, 济南 250061; 2. 济南市水利工程服务中心, 济南 250000)

摘要: 在研究水华风险过程中, 综合考虑内源和外源两个层面构建水华风险评价指标体系, 针对水质评价及影响因子具有模糊不确定性, 利用可变模糊集理论构建一种湖库型水源地水华风险可变模糊评价模型。该模型借助相对差异函数刻画水华风险的模糊性, 通过变化参数组合, 克服单一模型的局限性。将该模型应用于乔店水库水华风险评价。结果表明, 乔店水库水华风险级别特征值为 3.19, 呈Ⅲ级风险; 其中由外源因素和内源因素引起的风险等级分别为Ⅱ级风险和Ⅳ级风险, 表明引发水华的内源风险不可忽视。该评价结果与实地调研结论相吻合, 进一步验证该评价模型的可靠性, 弥补仅考虑外源风险的不足。该指标体系和模型可推广应用于其他类似湖库, 对精准防治水华提供理论支撑。

关键词: 水华; 内源污染; 外源污染; 可变模糊集; 水源地; 风险评价

中图分类号: TV214;X826 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



近年来, 湖库型水源地水华问题对水质产生不利影响, 备受国内外学者关注^[1]。藻类植物的过量增殖会产生微囊藻毒素(MCs)、蛋白结合态BMAA毒素^[2]等毒性很强的次生代谢产物, 通过食物链严重影响人类健康。大量浮游藻类聚集在水表面会降低水体透明度, 导致生态系统遭到破坏、水源水质受到污染等一系列连锁反应。因此, 研究水华风险程度对水源地管理和水质改善具有重要意义。

湖库型水源地水华受营养盐含量、环境条件及水文特征等内源因素和外源因素综合影响^[3]。目前, 研究学者多从风速、降雨^[4]、土地利用类型^[5]、营养盐含量^[6]等外源层面进行水华研究, 对水温、清淤频率等内源因素对藻类生长的影响研究较少^[7], 尚未见进行内-外源全方位水华风险评价的研究。Du等^[7]利用偏最小二乘路径模型分析研究了巢湖水源地中底泥与水华之间的因果关系, 证实了水源地中

底泥内源释放对水华存在的影响同样不可忽视。因此, 为使评价结果更具全面性, 从内源和外源层面综合考虑, 量化描述水华风险。

目前关于湖库型水源地水华风险评价的方法多采用专家意见法^[8]、EFDC模型^[9]、贝叶斯网络法和综合卫星观测法^[10]等。由于水华风险评价涉及因素较广, 需将定性因素和定量因素的分析综合集成^[11], 上述方法多适用于操作性强的定量指标。水华风险评价指标具有模糊属性^[12], 呈区间形式的指标评价标准可充分考虑模糊性, 以上评价方法适用于评价标准成点的情况^[13]。因此, 为提高水华风险评价的可信度和可靠性, 采用可变模糊评价方法。

综上所述, 水华风险受内源和外源等因素综合影响。基于内源和外源两个层面建立评价指标体系, 以湖库型水源地为研究对象, 构建水华风险可变模糊评价模型, 并以乔店水库为例进行应用研究, 以为精准防控水华提供科学理论依据和参考。

收稿日期: 2022-06-06 修回日期: 2022-09-16 网络出版时间: 2022-11-17

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221116.1411.004.html>

基金项目: 山东省水利科研与技术推广项目(SDSLKY201807; SDSLKY201902); 山东省利用亚行贷款项目

作者简介: 王兴菊(1967-), 女, 山东邹城人, 教授, 主要从事湿地水文与生态环境管理研究。E-mail: xjw@sdu.edu.cn

通信作者: 赵然杭(1968-), 男, 山东沂水人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源开发利用与生态环境管理研究。E-mail: ranhang-z@sdu.edu.cn

1 研究方法

1.1 评价指标体系构建

水华是指藻类植物快速疯长和聚集所引发的现象^[14]。根据相关研究^[15],水华主要在适宜的生物环境、营养盐含量、湖泊形态、气候条件及水动力特征等内源因素和外源因素共同作用下发生。内源因素指水体内部通过物理、化学和生物作用对水华产生影响的因素,主要体现在内部生物环境以及流

速、水位、流态等水动力特征方面。例如,水力滞留时间的长短影响了浮游藻类聚集生长的水流环境。外源因素指水体以外对水华产生影响的因素,主要体现在气象条件以及入水体的营养盐负荷方面。

为保证水源地水华风险评价结果客观合理,在筛选指标过程中结合湖库型水源地水环境管理属性,严格遵循独立性、代表性、可操作性原则,综合考虑内源和外源的关键影响因素,构建了水华风险评价指标体系,见图1。

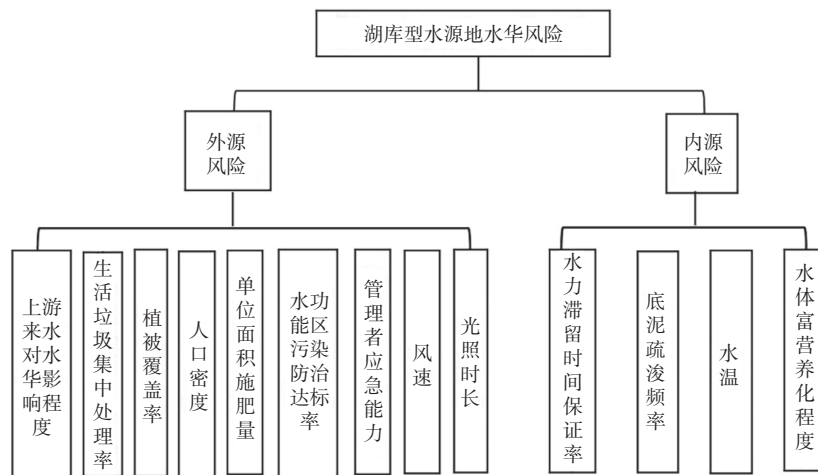


图1 湖库型水源地水华风险评价指标体系

Fig. 1 Chart of bloom risk assessment index system in lake reservoir type water source area

1.1.1 评价指标分析

外源影响指标。上游来水对华影响程度用于衡量外界来水为藻类植物生长所携带的营养盐情况。该值越大,研究区域发生水华的风险就越高。生活垃圾集中处理率指经处理的生活垃圾占总量的百分比。生活垃圾中富含大量的氮磷元素,如果没有集中处理,那么会随地表、地下径流进入库区,为藻类植物生长提供养分支持。植被覆盖率用于衡量水源地水土流失情况。在全球范围内,近40%的水资源由于土地利用情况发生了变化而受到面源污染的危害^[16]。面源污染又会造成水体富营养,因此植被覆盖率越低,发生水华的风险越高。人口密度为研究地单位面积人口数,该值越大说明人口越密集,区域水环境压力也就越大。单位面积施肥量指研究区域单位面积农田化肥、农药的施用量。一般而言,该值越大,说明水体越趋于富营养化,水华风险也就越高。保护区污染防治达标率是指水源地管理者对水体污染防治工作力度。在《中华人民共和国水污染防治法》和《饮用水水源保护区划分技术规范》基础上,依照划分水源地保护区范围

的原则和实际管理办法,对保护区污染防治达标率做出评判。管理者应急能力是指水源地突发水质污染事故时管理者的应急处置情况。按照《全国重要饮用水水源地安全保障评估指南》要求,把研究区域《饮用水源突发事件应急预案》编写是否完善、应急物资是否储备、应急演练是否充分作为应急能力的评判标准。风速用来衡量在研究区域内蓝藻颗粒是否会发生聚集,形成水华现象。风力扰动对形成水华的影响不可忽视^[17],当风速较低时水面无明显波浪,易发生水华。光照为藻类植物提供代谢能量,是其生长繁殖的主要能量来源^[18]。光照为藻类植物提供代谢能量,是其生长繁殖的主要能量来源^[18]。

内源影响指标。水力滞留时间保证率用来衡量水体避免发生水华的自净能力。研究^[19]发现水流速度缓慢时,极易引发水华现象。依据生态学角度和《流域综合管理指南》^[20],湖库型水源地水力滞留时间以300d为界,滞留时间表达式为

$$T_{HR} = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

式中: T_{HR} 为水力滞留时间, d ; V 为水体容量, m^3 ; Q 为进入水体流量或流出流量, m^3/s 。

底泥疏浚频率指单位时间内研究区域的清淤次数。由于底泥在水体内部承担氮磷营养盐载体以及水生动植物物质交换和能量循环媒介的角色^[21], 当受到外界条件影响时, 底泥中的氮磷营养元素会通过释放、扩散、再悬浮等过程转移到上覆水, 继而产生水华风险。

文献 [22] 表明, 水温决定了生物细胞内酶反映速度, 在 20~30 °C 的温度范围对藻类植物生长具有明显影响。

水体富营养化指标用于衡量水体是否为藻类植物大量繁殖提供充足的 N、P 等营养物质^[23]。其程

度判定选用综合营养状态指数法, 计算公式为

$$I_{TL}(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j I_{TL}(j) \quad (2)$$

式中: $I_{TL}(\Sigma)$ 为综合营养状态指数; W_j 为各营养状态指数的权重, $j = 1, 2, \dots, m$; $I_{TL}(j)$ 为各营养状态指数。

1.1.2 评价指标等级标准确定

根据《中国湖泊环境》^[24] 及《流域综合管理指南》^[25], 并参考了相关研究^[26] 将水华风险等级分为 I~V 级, 分别为 I 级(无风险)、II 级(低风险)、III 级(中风险)、IV 级(较高风险)、V 级(高风险), 将各个指标标准值也相应划分为 5 个等级, 分级标准见表 1。

表 1 水华风险评价指标体系等级标准

Tab. 1 Grade standard of bloom risk assessment index system

水华风险评价指标		风险等级				
		I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
外源指标	上游来水对水华影响程度	≥0~<0.2	≥0.2~<0.4	≥0.4~<0.6	≥0.6~<0.8	≥0.8~<1.0
	生活垃圾集中处理率/%	≥80~<100	≥60~<80	≥40~<60	≥20~<40	≥0~<20
	植被覆盖率/%	≥40~<100	≥30~<40	≥20~<30	≥10~<20	≥0~<10
	人口密度/(人·km ⁻²)	≥0~<250	≥250~<2 000	≥2 000~<3 750	≥3 750~<5 500	≥5 500~<10 000
	单位面积施肥量/(t·hm ⁻²)	≥0~<0.10	≥0.10~<0.25	≥0.25~<0.40	≥0.40~<0.50	≥0.50~<1.00
	水功能区污染防治达标率/%	≥90~<100	≥75~<90	≥75~<60	≥45~<60	≥0~<45
	管理者应急能力/%	≥80~<100	≥60~<80	≥40~<60	≥20~<40	≥0~<20
	风速/(m·s ⁻¹)	≥3.88~<4.80	≥2.96~<3.88	≥2.04~<2.96	≥1.12~<2.04	≥0.20~<1.12
内源指标	光照时长/h	≥0~<2 000	≥2 000~<2 340	≥2 340~<2 670	≥2 670~<3 000	≥3 000~<5 000
	水力滞留时间保证率/%	≥0~<20	≥20~<40	≥40~<60	≥60~<80	≥80~<100
	底泥疏浚率/(次·a ⁻¹)	≥10~<30	≥5~<10	≥2~<5	≥1~<2	≥0~<1
	水温/°C	≥0~<4	≥4~<11	≥11~<15	≥12~<20	≥20~<30
	水体富营养状态指数	≥0~<30	≥30~<50	≥50~<60	≥60~<70	≥70~<100

1.2 层次分析法确定权重

指标权重的确定是水华风险评价的关键。目前确定权重多采用层次分析法、专家咨询法、熵权法和变异系数法等方法, 且方法各有利弊。水华风险评价是一个相对复杂的系统问题, 其影响因素有主有次、互相关联, 加上对研究对象的考虑, 为尽可能保证获得的权重准确可靠, 评价采用层次分析法。层次分析法通过将复杂问题划分为多个层次, 并在此基础上对定性和定量指标模糊量化, 从而计算出不同层次下的排序。该方法计算过程主要分为 3 步: 利用 9 标度法对两两指标重要程度进行对比, 构建判断矩阵; 对判断矩阵进行一致性检验; 确定各指标权重。

1.3 评价模型构建

可变模糊评价是一种可改变模型参数组合, 并通过构建相对差异函数模型对受多种复杂因素影响的对象进行定量化评价的方法^[27]。

1.3.1 可变模糊评价理论

赋予论域 U 上模糊概念 A , 对于 U 中任意元素 $u(u \in U)$ 是处于中间过渡段 0 和 1 的两个端点的数, 且在 $[0, 1]$ 连续区间内满足的映射关系为

$$\begin{cases} \mu_A(u): U \rightarrow [0, 1] \\ u \mapsto \mu_A(u) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mu_A(u)$ 为 A 的相对隶属函数, 表示各指标对每个评价等级的隶属程度。

设 u 对表示对立模糊属性 A (吸引)与 A^c (排斥)

的相对隶属度分别为 $\mu_A(u)$ 和 $\mu_{A^c}(u)$, 且满足 $D_A(u) = \mu_A(u) - \mu_{A^c}(u)$ 的关系, 其中 $D_A(u)$ 表示 u 对 A 的相对差异度。由于 $\mu_A(u) + \mu_{A^c}(u) = 1$, 则 u 对 A 的相对差异度与相对隶属度之间满足 $\mu_A(u) = (1 + D_A(u))/2$ 的关系。

令

$$V = \{(u, D) | u \in U, D_A(u) = \mu_A(u) - \mu_{A^c}(u), D \in [-1, 1]\} \quad (4)$$

$$A_+ = \{u | u \in U, 0 < D_A(u) \leq 1\} \quad (5)$$

$$A_- = \{u | u \in U, -1 < D_A(u) \leq 0\} \quad (6)$$

$$A_0 = \{u | u \in U, D_A(u) = 0\} \quad (7)$$

式中: V 为可变模糊集合; A_+ 、 A_- 、 A_0 分别为可变模糊集合 V 的吸引域、排斥域和渐变式质变界。

1.3.2 相对差异函数模型

根据可变模糊集合 V 定义可知 $[c, a]$ 与 $[b, d]$ 均处于 $-1 < D_A(u) \leq 0$ 范围内, 即排斥域; $[a, b]$ 处于 $0 < D_A(u) \leq 1$ 范围内, 即吸引域。其中, 区间 $[a, b]$ 、 $[c, d]$ 及点 M 的位置关系见图 2。



图 2 区间 $[a, b]$ 、 $[c, d]$ 及点 M 的位置关系

Fig. 2 Position diagram of interval $[a, b]$, $[c, d]$ and point M

当指标特征值 x 落入 M 点左侧时, 相对差异函数模型为

$$\begin{cases} D_A(u) = [\frac{x-a}{M-a}]; x \in (a, M) \\ D_A(u) = -[\frac{x-a}{c-a}]; x \in [c, a) \end{cases} \quad (8)$$

x 落入 M 点右侧时, 相对差异函数模型为

$$\begin{cases} D_A(u) = [\frac{x-b}{M-b}]; x \in [M, b) \\ D_A(u) = -[\frac{x-b}{d-b}]; x \in (b, d) \end{cases} \quad (9)$$

$$D_A(u) = -1; x \notin (c, d) \quad (10)$$

式中: β 为非负指数(一般 $\beta=1$)。且上述公式满足:

当 $x=a$ 、 $x=b$ 时, $D_A(u)=0$;

当 $x=M$ 时, $D_A(u)=1$;

当 $x=c$ 、 $x=d$ 时, $D_A(u)=-1$ 。

当相对差异度 $D_A(u)$ 确定后, 即可求解相对隶属度 $\mu_A(u)$ 。

1.3.3 可变模糊评价模型

设水华风险评价指标体系中 m 个指标组成的样本集合为

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \quad (11)$$

样本集中各指标分 c 个级别, 则 $m \times c$ 阶指标标准特征值矩阵为

$$Y = (y_{ih}) \quad (12)$$

式中: y_{ih} 为指标 i 在 h 等级处的标准值; $i=1, 2, \dots, m$; $h=1, 2, \dots, c$ 。

参照指标标准值矩阵和待评价区域的实际情况确定水华风险的可变集合吸引域矩阵 $I_{ab} = ([a_{ih}, b_{ih}])$ 、范围矩阵 $I_{cd} = ([c_{ih}, d_{ih}])$ 和点值矩阵 $M = (M_{ih})$ 。

通过判断样本特征值 x_i 位于 M_{ih} 的左侧还是右侧, 再以此选用式(8)至(10)计算水华风险指标对 h 级的相对隶属度 $\mu_A(x_i)_h$ 矩阵, 表达式为

$$U = (\mu_A(x_i)_h) \quad (13)$$

根据水华风险可变模糊评价模型, 各级别综合相对隶属度:

$$u_A = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [w_i(1-\mu_A(x_i)_h)]^p}{\sum_{i=1}^m [w_i\mu_A(x_i)_h]^p} \right\}^{\frac{a}{p}}} \quad (14)$$

式中: w_i 为指标 i 权重值; a 为优化准则参数; p 为距离参数。参数变换通常有 4 种组合: (1) $a=1, p=1$; (2) $a=1, p=2$; (3) $a=2, p=1$; (4) $a=2, p=2$ 。

对 4 种组合得到的综合相对隶属度矩阵分别进行归一化计算。

由于计算结果为模糊向量而非点值^[28], 因此应用过程中提出了级别特征值。对水华发生风险即无风险、低风险、中风险、较高风险、高风险分别赋值“1、2、3、4、5”, 利用加权平均法计算级别特征值, 表达式为

$$H = U_{1 \times 5} S_{1 \times 5}^T \quad (15)$$

式中: H 为综合级别特征值; U 为等级隶属度; S 为 V 中相应因素的级分。

将级别特征值分为 5 级, 分别对应水华风险等级水平, 具体见表 2。

表 2 水华风险等级划分

Tab. 2 Classification of bloom risk levels

风险等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
分值	$\geq 1 \sim < 1.5$	$\geq 1.5 \sim < 2.5$	$\geq 2.5 \sim < 3.5$	$\geq 3.5 \sim < 4.5$	$\geq 4.5 \sim < 5$

2 实例应用

2.1 研究区域选择及数据来源

乔店水库位于济南市莱芜钢城区, 大汶河支流辛庄河上, 地处东经 $117^\circ 51' 34''$, 北纬 $36^\circ 11' 32''$, 是一座集防洪、城市供水、农业灌溉等综合利用的中型水库, 被列为全国重要饮用水水源地名录。库区水质相对优良, 多年平均水质达标率 100%, 是济南市重要的饮用水水资源。其处于河谷中, 受地形影响, 降水及上游来水的季节特征十分明显, 继而造成全年库区水力滞留时间较长。据历史资料统计,

75%左右的降水量集中在6至9月,同期上游来水量占全年上游总来水量的80%以上。水库地处农村,居民生活废弃物排放、农药化肥不恰当施用等现状对水源地水体富营养化造成了一定影响。其中,水体氮磷指标含量较蓄水前后存在明显抬升。

近年来,乔店水库频受水华问题的困扰,尽管为避免水华采取了截污限排等一系列的科学防控措施,但水库局部依旧显现小面积蓝藻生长迹象,其表层叶绿素质量浓度逐年上升,峰值曾高达26.4 μg/L,表明引发水华的内源风险不可忽视。因此,选用乔店水库水源地这一典型案例进行水华风险评价,对研究区域及类似湖库型水源地有效防控水华具有重要意义。

研究所用气象、水文、土地利用类型等数据来源于2019—2020年的《济南市统计年鉴》《中国统

计年鉴》以及乔店水库服务中心。指标特征值依托式(1)、(2)和ArcGIS技术进行分析计算,由于2019与2020年数据变幅不大,因此以均值的形式体现。

2.2 指标权重计算

通过咨询相关专家以及参考相关文献^[29-30],认为水体富营养化对水华影响显著,因此将该指标权重设为最大。对各指标间相对重要程度进行赋值,构造判断矩阵,将判断矩阵的最大特征值所对应的特征向量归一化后即为每一层指标对上一层级的权重。经分析,权重结果满足一致性检验,指标权重数据见表3。

2.3 可变模糊综合评价

根据表1可得乔店水库水华风险各评价指标标准值区间矩阵 I_{ab} 为

$$I_{ab} = \begin{pmatrix} [0,0.2] & [0.2,0.4] & [0.4,0.6] & [0.6,0.8] & [0.8,1] \\ [80,100] & [60,80] & [40,60] & [20,40] & [0,20] \\ [40,100] & [30,40] & [20,30] & [10,20] & [0,10] \\ [0,250] & [250,2\ 000] & [2\ 000,3\ 750] & [3\ 750,5\ 500] & [5\ 500,10\ 000] \\ [0,0.1] & [0.1,0.25] & [0.25,0.4] & [0.4,0.5] & [0.5,1] \\ [90,100] & [75,90] & [60,75] & [45,60] & [0,45] \\ [80,100] & [60,80] & [40,60] & [20,40] & [0,20] \\ [3.88,4.8] & [2.96,3.88] & [2.04,2.96] & [1.12,2.04] & [0.2,1.12] \\ [0,2\ 000] & [2\ 000,2\ 340] & [2\ 340,2\ 670] & [2\ 670,3\ 000] & [3\ 000,5\ 000] \\ [0,20] & [20,40] & [40,60] & [60,80] & [80,100] \\ [10,30] & [5,10] & [2,5] & [1,2] & [0,1] \\ [0,4] & [4,11] & [11,15] & [15,20] & [20,30] \\ [0,30] & [30,50] & [50,60] & [60,70] & [70,100] \end{pmatrix}$$

利用 I_{ab} 矩阵确定范围值区间 $[c_{ih},d_{ih}]$,由于1级和c级左右两侧无相邻级别,因此 $c_{i1}=a_{i1},d_{i1}=b_{i1}$,故

$$I_{cd} = \begin{pmatrix} [0,0.4] & [0,0.6] & [0.2,0.8] & [0.4,1] & [0.6,1] \\ [60,100] & [40,100] & [20,80] & [0,60] & [0,40] \\ [30,100] & [20,100] & [10,40] & [0,30] & [0,20] \\ [0,2\ 000] & [0,3\ 750] & [250,5\ 500] & [2\ 000,10\ 000] & [3\ 750,10\ 000] \\ [0,0.25] & [0,0.4] & [0.1,0.5] & [0.25,1] & [0.4,1] \\ [75,100] & [60,100] & [45,90] & [0,75] & [0,60] \\ [60,100] & [40,100] & [20,80] & [0,60] & [0,40] \\ [2.96,4.8] & [2.04,4.8] & [1.12,3.88] & [0.2,2.96] & [0.2,2.04] \\ [0,2\ 340] & [0,2\ 670] & [2\ 000,3\ 000] & [2\ 340,5\ 000] & [2\ 670,5\ 000] \\ [0,40] & [0,60] & [20,80] & [40,100] & [60,100] \\ [5,30] & [2,30] & [1,10] & [0,5] & [0,2] \\ [0,11] & [0,15] & [4,20] & [11,30] & [15,30] \\ [0,50] & [0,60] & [30,70] & [50,100] & [60,100] \end{pmatrix}$$

依据水华风险评价各指标的物理分析和实际情况,确定各指标在级别 h 的 M 矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 0.2 & 0.5 & 0.8 & 1 \\ 100 & 80 & 50 & 20 & 0 \\ 100 & 40 & 25 & 10 & 0 \\ 0 & 250 & 2\ 875 & 5\ 500 & 10\ 000 \\ 0 & 0.1 & 0.325 & 0.5 & 1 \\ 100 & 90 & 67.5 & 45 & 0 \\ 100 & 80 & 50 & 20 & 0 \\ 4.8 & 3.88 & 2.5 & 1.12 & 0.2 \\ 0 & 2\ 000 & 2\ 505 & 3\ 000 & 5\ 000 \\ 0 & 20 & 50 & 80 & 100 \\ 30 & 10 & 3.5 & 1 & 0 \\ 0 & 4 & 13 & 20 & 30 \\ 0 & 30 & 55 & 70 & 100 \end{pmatrix}$$

表 3 乔店水库水华风险评价指标特征值及权重
Tab. 3 Characteristic value and weight of risk assessment index of bloom in Qiaodian Reservoir

准则层	权重	指标层	指标特征值	权重	一致性检验
外源风险	0.5	上游来水对水华影响程度	0.51	0.2047	$I_c=0.047$ $R_c=0.032$
		生活垃圾集中处理率/%	100.00	0.0635	
		植被覆盖率/%	35.00	0.0419	
		人口密度/(人·km ⁻²)	192.26	0.0635	
		单位面积施肥量/(t·hm ²)	0.60	0.0892	
		水功能区污染防治达标率/%	100.00	0.1255	
		管理者应急能力/%	100.00	0.1255	
		风速/(m·s ⁻¹)	2.87	0.0272	
		光照时长/h	2443.80	0.2590	
内源风险	0.5	水力滞留时间保证率/%	70.60	0.2813	$I_c=0.025$ $R_c=0.028$
		底泥疏浚率/(次·a ⁻¹)	0	0.1830	
		水温/℃	12.53	0.2132	
		水体富营养状态指数	26.67	0.3225	

通过判断表 3 中水华风险评价指标特征值位于 M_{ih} 点的左侧还是右侧, 选用式 (8)~(10) 计算样本的相对隶属度矩阵, 再根据建立的水华风险可变模糊评价模型, 继而获得乔店水库水华风险等级值。经计算, 乔店水库水华风险评价级别特征值为 3.19,

呈 III 级风险(中风险), 即水中可见悬浮的藻类颗粒, 计算结果见表 4。外源风险等级和内源风险等级以及单因素风险等级计算过程同上, 计算结果见表 5 和表 6。

表 4 乔店水库水华风险综合相对隶属度与风险等级
Tab. 4 Comprehensive relative membership and risk grade of bloom risk in Qiaodian Reservoir

风险评价	模型参数	综合相对隶属度向量	级别特征值	级别特征均值	风险等级
乔店水库水华风险等级	$a=1, p=1$	(0.21, 0.15, 0.27, 0.21, 0.16)	2.97	3.19	III 级风险
	$a=1, p=2$	(0.06, 0.03, 0.34, 0.31, 0.26)	3.69		
	$a=2, p=1$	(0.22, 0.10, 0.34, 0.21, 0.13)	2.94		
	$a=2, p=2$	(0.17, 0.09, 0.31, 0.25, 0.18)	3.17		

表 5 引发乔店水库水华的外源风险和内源风险评价等级
Tab. 5 Evaluation grade of exogenous and endogenous risk for causing Qiaodian Reservoir bloom

风险评价	模型参数	综合相对隶属度向量	级别特征值	级别特征均值	风险等级
外源风险	$a=1, p=1$	(0.31, 0.18, 0.37, 0.11, 0.03)	2.38	2.41	II 级风险
	$a=1, p=2$	(0.26, 0.17, 0.41, 0.12, 0.05)	2.53		
	$a=2, p=1$	(0.35, 0.11, 0.49, 0.05, 0.00)	2.24		
	$a=2, p=2$	(0.23, 0.10, 0.60, 0.05, 0.02)	2.49		
内源风险	$a=1, p=1$	(0.13, 0.12, 0.18, 0.28, 0.28)	3.47	3.54	IV 级风险
	$a=1, p=2$	(0.17, 0.14, 0.18, 0.26, 0.25)	3.28		
	$a=2, p=1$	(0.07, 0.06, 0.15, 0.35, 0.36)	3.86		
	$a=2, p=2$	(0.13, 0.09, 0.15, 0.34, 0.29)	3.55		

表 6 引发乔店水库水华的单因素风险等级
Tab. 6 Single factor risk level for triggering Qiaodian Reservoir bloom

指标层	$\alpha=1$	$\alpha=1$	$\alpha=2$	$\alpha=2$	级别特征均值	风险等级
	$p=1$	$p=2$	$p=1$	$p=2$		
上游来水对水华影响程度	3.02	3.04	3.02	3.04	3.03	Ⅲ级
生活垃圾集中处理率	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	I级
植被覆盖率	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	Ⅱ级
人口密度	1.38	1.28	1.28	1.28	1.31	I级
单位面积施肥量	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	Ⅳ级
水功能区污染防治达标率	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	I级
管理者应急能力	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	I级
风速	2.58	2.53	2.54	2.53	2.55	Ⅲ级
光照时长	2.86	2.57	2.88	2.85	2.79	Ⅲ级
水力滞留时间保证率	2.56	2.55	4.31	4.41	2.88	Ⅲ级
底泥疏浚频率	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	V级
水温	3.31	3.35	3.25	3.35	3.32	Ⅲ级
水体富营养化程度	1.44	1.39	1.39	1.39	1.40	I级

2.4 结果分析与讨论

2.4.1 结果分析

根据表 5 至 6 可以看出,引发乔店水库水华的外源风险评价级别特征值为 2.41,呈Ⅱ级风险(低风险)。从数据来看,单位面积施肥量、上游来水对水华影响和光照时长是影响外源风险高低的关键指标,其风险级别特征均值分别为 4.50、3.03 和 2.79。现场调研发现,库区周边尚存大面积农耕地,农药、化肥的不合理施用引起的农业面源污染随降雨径流进入库区,为水华发生提供养分支持。因此,该评价结果与实际引发水华的外源风险情况吻合。

引发乔店水库水华的内源风险评价级别特征值为 3.54,呈Ⅳ级风险(较高风险)。究其原因,内源风险与乔店水库淤积、水温和水力滞留时间有较大的关系,其风险级别特征均值分别为 5.00、3.32 和 2.88。现场调研发现,建库以来,乔店水库未进行清淤,淤积严重,其内源污染物随时间推移发生潜在性演变,易引起水华现象发生。加上乔店水库水动力条件弱,即水力滞留时间长,易造成藻类植物在水体表层漂浮堆积。因此,评价结果与实际引发水华的内源风险情况吻合。

2.4.2 讨论

在评价指标方面:湖库型水源地水华风险受内源和外源等诸多因素综合影响,而现有水华风险评价方面的文献^[4-6]主要从引发水华的外源层面研究,对内源因素考虑较少,更没有内外源因素综合评价的研究。首次构建了基于内源和外源的水华风险

多维评价指标体系,对乔店水库进行实例评价,评价结果与实际情况一致。风险等级呈Ⅲ级,由外源因素和内源因素引起的风险等级分别为Ⅱ级和Ⅳ级,表明引发水华的内源风险不可忽视。单因素风险等级在Ⅲ级及以上的包括内源指标中底泥疏浚频率、水温和水力滞留时间保证率以及外源指标中单位面积施肥量、上游来水对水华影响程度、光照时长和风速等 7 项指标,进一步表明水华风险波动受内外源风险综合影响。因此,内外源全方位水华风险评价指标体系,相较于仅考虑外源风险因素或内源风险因素,使评价结果更为准确。

在评价模型方面:基于内源和外源多维评价指标体系构建了湖库型水源地水华风险可变模糊评价模型,解决水华风险受多种因素耦合而难以量化描述的难题。与文献[8-10]相比,通过变化参数 α 与 p 组合,综合 1 种线性与 3 种非线性模型,克服单一模型的局限性,且评价指标标准采用区间值表示,相较于标准成点的情况避免了所得数据接近时不易区分相邻两类差异的问题,充分考虑水华风险系统的模糊性与非线性,提高评价结果的科学性和准确性。

提出的方法对水库型水源地应用效果较好,后续可进一步推广应用到湖泊型水源地及一般湖库。基于当前众多湖库型水源地存在的水华风险影响因素构建了评价指标体系,然而浮游生物也是产生水华风险的影响因素之一,受技术限制并未展开分析,后续可对评价指标体系作进一步完善。对于可

变模糊评价模型而言,权重是确保结果可靠的关键因素,应用过程中可进一步提升权重设置的合理性。

3 结论与建议

构建的基于内源和外源的水华风险多维评价指标体系,进行全方位水华风险评价,相较于仅考虑外源风险因素或内源风险因素,该评价指标体系使结果更为准确,提高了评价结果的可信度和可靠性,并对其他类似湖库水华风险评价指标选取具有借鉴意义。

建立的可变模糊评价模型能更好地评价湖库型水源地水华风险。基于水华风险内-外源多维评价指标体系,对水华风险进行全方位评价;构建相对差异函数以刻画水华风险的模糊性,通过变换参数形成4种不同的评价模型以体现水华风险评价系统的非线性,使评价结果更为准确。

综上,对水源地水华防治提出如下建议:未来水源地管理机构应调整管控方向,以削弱内源负荷为主线,坚持阻截陆域面源污染,强化水量循环调度。在内源污染方面通过对水源地水体-悬浮物-沉积物中关键污染物的指标检测,开展污染物吸附释放与迁移转化的机理研究,进一步为修复水源地水质提供理论基础。

参考文献(References):

[1] 邱晓鹏,黄廷林,周石磊,等.强降雨对水源水库夏季蓝藻水华的影响[J]. *西安理工大学学报*, 2020, 36(3): 349-356. (QIU X P, HUANG T L, ZHOU S L, et al. Effects of heavy rainfall in summer on cyanobacterial blooms in source water reservoir[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2020, 36(3): 349-356. (in Chinese)) DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.012.

[2] 陈咏梅,赵以军,陈默,等.武汉官桥湖蓝藻毒素BMAA的生物累积与健康风险评估[J]. *水生态学杂志*, 2019, 40(4): 22-29. (CHEN Y M, ZHAO Y J, CHEN M, et al. Bioaccumulation and health risk assessment of the cyanobacterial neurotoxin BMAA in Guanqiao Lake, Wuhan[J]. *Journal of Water Ecology*, 2019, 40(4): 22-29. (in Chinese)) DOI: 10.15928/j.1674-3075.2019.04.004.

[3] 王中锋.基于动态朴素贝叶斯分类器的明渠水华风险评估模型[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(2): 89-94, 108. (WANG Z F. Risk assessment model for algal bloom of open channel based on dynamic naive Bayes classifier[J]. *South-to-North Water Transfer*

and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 89-94, 108. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.013.

- [4] 吴东浩,贾更华,吴浩云.2007-2019年太湖藻型和草型湖区叶绿素 a 变化特征及影响因子[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(5): 1364-1375. (WU D H, JIA G H, WU H Y. Chlorophyll- a concentration variation characteristics of the algae-dominant and macrophyte-dominant areas in Lake Taihu and its driving factors, 2007-2019[J]. *Lake Science*, 2021, 33(5): 1364-1375. (in Chinese)) DOI: 10.18307/2021.0506.
- [5] 易玉敏,祝家能,刘鹏.湖库型水源地富营养状况及土地利用对水质的影响[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2021, 41(5): 139-148. (YI Y M, ZHU J N, LIU P. Effects of eutrophic status and land-use types on water quality in lake and reservoir water source reserves[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Science)*, 2021, 41(5): 139-148. (in Chinese)) DOI: 10.11929/j.swfu.202007058.
- [6] NAMSRAI J, USMA A, MD M, et al. Seasonal and long-term connections between trophic status, sestonic chlorophyll, nutrients, organic matter, and monsoon rainfall in a multipurpose reservoir[J]. *Water*, 2021, 13(13): 1720. DOI: 10.3390/W13131720.
- [7] DU Y X, AN S L, HE H, et al. Production and transformation of organic matter driven by algal blooms in a shallow lake: Role of sediments.[J]. *Water Research*, 2022, 219: 118560-118560. DOI: 10.1016/J.WATRES.2022.118560.
- [8] 段文秀,朱广伟,刘俊杰,等.水源型水库水生态安全评价方法探索[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(9): 4135-4145. (DUAN W X, ZHU G W, LIU J J, et al. An evaluation method for ecological security of water resource reservoirs[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(9): 4135-4145. (in Chinese)) DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0461.
- [9] 邢贞相,张丽慧,纪毅,等.基于EFDC模型五大连池水质模拟和富营养化评价研究[J]. *东北农业大学学报*, 2018, 49(5): 88-98. (XING Z X, ZHANG L H, JI Y, et al. Study on water quality simulation and eutrophication assessment in Wudalianchi based on EFDC model[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2018, 49(5): 88-98. (in Chinese)) DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2018.05.011.
- [10] CLARK M J, SCHAEFFER A B, DARLING A J, et al. Satellite monitoring of cyanobacterial harmful algal bloom frequency in recreational waters and drinking water sources[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 80: 84-95. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.04.046.
- [11] 王红瑞,钱龙霞,赵自阳,等.水资源风险分析理论

- 及评估方法[J]. *水利学报*, 2019, 50(8): 980-989. ((WANG H R, QIAN L X, ZHAO Z Y, et al. Theory and assessment method of water resources risk[J]. *Journal of Water Conservancy*, 2019, 50(8): 980-989. (in Chinese)) DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20190177](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20190177).)
- [12] 殷雪妍, 宋思敏, 严广寒, 等. 洞庭湖水生态风险评价模型构建及应用[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(S1): 45-53. (YIN X Y, SONG S M, YAN G H, et al. Construction and application of aquatic ecological risk assessment model for Dongting Lake[J]. *Water Conservancy and Hydropower Technology (English and Chinese)*, 2022, 53(S1): 45-53. (in Chinese)) DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2022.S1.006](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2022.S1.006).)
- [13] 张彦来, 任春平, 武鹏林. 改进可变模糊算法在水资源承载力评价中的应用[J]. *人民长江*, 2019, 50(1): 89-94. (ZHANG Y L, REN C P, WU P L. Application of modified variable fuzzy algorithm in evaluation of water resources carrying capacity[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(1): 89-94. (in Chinese)) DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.01.017](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.01.017).)
- [14] 曾一恒, 沈旭舟, 张佳磊, 等. 分层异重流对香溪河浮游植物叶绿素a空间分布的影响[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 2(2): 426-435. (ZENG Y H, SHEN X Z, ZHANG J L, et al. Effects of stratified density flow on the spatial distribution of chlorophyll-a in phytoplankton in Xiangxi River[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 2(2): 426-435. (in Chinese))
- [15] 张虎军, 宋挺, 朱冰川, 等. 太湖蓝藻水华暴发程度年度预测[J]. *中国环境监测*, 2022, 38(1): 157-164. (ZHANG H J, SONG T, ZHU B C, et al. Annual forecast of the extent of cyanobacteria bloom in Taihu Lake[J]. *China Environmental Monitoring*, 2022, 38(1): 157-164. (in Chinese)) DOI: [10.19316/j.issn.1002-6002.2022.01.15](https://doi.org/10.19316/j.issn.1002-6002.2022.01.15).)
- [16] 种潇. 三峡库区饮用水源地水环境安全评判体系的研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017. (CHONG X. The security evaluation system of water environment in Three Gorges Reservoir [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017. (in Chinese)) DOI: [10.7666/d.Y3263002](https://doi.org/10.7666/d.Y3263002).)
- [17] 杭鑫, 徐敏, 谢小萍, 等. 富营养化状态下太湖蓝藻水华气象条件影响的评估[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(7): 294-301. (HANG X, XU M, XIE X P, et al. Assessment of the influence of meteorological conditions on cyanobacteria bloom in Taihu Lake under eutrophication[J]. *Science, Technology and Engineering*, 2019, 19(7): 294-301. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2019.07.049](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2019.07.049).)
- [18] 李建, 尹炜, 贾海燕, 等. 汉江中下游硅藻水华研究进展与展望[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(5): 136-144. (LI J, YIN W, JIA H Y, et al. Research progress on diatom bloom in the middle and lower Hanjiang River: Review and advances[J]. *Journal of Water Ecology*, 2020, 41(5): 136-144. (in Chinese)) DOI: [10.15928/j.1674-3075.2020.05.016](https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.2020.05.016).)
- [19] 董磊, 吴敏, 林莉, 等. 南水北调中线工程对丹江口水库浮游植物群落结构影响[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(S1): 1-7. (DONG L, WU M, LIN L, et al. Influence of the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project on the characteristics of community structure of planktonic algae in Danjiangkou Reservoir[J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 44(S1): 1-7. (in Chinese)) DOI: [10.19672/j.cnki.1003-6504.2021.S1.001](https://doi.org/10.19672/j.cnki.1003-6504.2021.S1.001).)
- [20] 袁静, 汪金成, 钱宝. 三峡库区及其支流水质评价方法选择及应用[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(7): 39-42. (YUAN J, WANG J C, QIAN B. Selection and application of water quality evaluation method in Three Gorges Reservoir Area and its tributaries[J]. *Hydropower Energy Science*, 2019, 37(7): 39-42. (in Chinese))
- [21] 刘昔, 邓兆林, 张露, 等. 洪湖沉积物内源污染及其氮磷释放特征[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(1): 80-88. (LIU X, DENG Z L, ZHANG L, et al. Sediment endogenous pollution and release characteristics of Honghu Lake[J]. *Environmental Science Research*, 2022, 35(1): 80-88. (in Chinese)) DOI: [10.13198/j.issn.1001-6929.2021.09.22](https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.09.22).)
- [22] 郭诗君, 王小军, 韩品磊, 等. 丹江口水库叶绿素a浓度的时空特征及影响因子分析[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(2): 366-376. (GUO S J, WANG X J, HAN P L, et al. Spatiotemporal characteristics of layered chlorophyll-a concentration and influencing factors in Danjiangkou Reservoir[J]. *Lake Science*, 2021, 33(2): 366-376. (in Chinese)) DOI: [10.18307/2021.0206](https://doi.org/10.18307/2021.0206).)
- [23] 韩景, 吴巍巍. 太湖及下游水源地安全评价指标体系和方法研究[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(S2): 329-333. (HAN J, WU W W. Study on safety evaluation index system and method of Taihu Lake and its downstream water sources areas[J]. *Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2020, 51(S2): 329-333. (in Chinese)) DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2020.S2.062](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2020.S2.062).)
- [24] 王艳分, 倪兆奎, 林日彭, 等. 洞庭湖水环境演变特征及关键影响因素识别[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(7): 2554-2559. (WANG Y F, NI Z K, LIN R P, et

- al. Evolution characteristics of the Dongting Lake water environment and revealing its key influent factors[J]. *Journal of Environmental Science*, 2018, 38(7): 2554-2559. (in Chinese) DOI: [10.13671/j.hjkxxb.2018.0152](https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2018.0152).
- [25] 万鹏, 丁文静. 关于流域综合整治系统化方案编制的思考[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(11): 113-117,124. (WAN P, DING W J. Thoughts on systematic programming of watershed comprehensive regulation[J]. *China Water Supply and Drainage*, 2019, 35(11): 113-117,124. (in Chinese)) DOI: [10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2019.11.022](https://doi.org/10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2019.11.022).
- [26] 王凯. 城市内河水体健康评价指标体系研究[D]. 南京:南京师范大学, 2020. (WANG K. Study on the index system of urban inland water health evaluation [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2020. (in Chinese)) DOI: [10.27245/d.cnki.gnjsu.2020.002267](https://doi.org/10.27245/d.cnki.gnjsu.2020.002267).
- [27] 王兴菊, 孙杰豪, 赵然杭, 等. 基于可变模糊集理论的跨流域调水工程水资源优化调度[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(6): 85-92. (WANG X J, SUN J H, ZHAO R H, et al. Optimal water resources dispatching of inter-basin water diversion project based on variable fuzzy set theory[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(6): 85-92. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0118](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0118).
- [28] 谭琨, 严直慧, 赵祖军, 等. 基于模糊评价的喀斯特山区文山市资源环境承载力评价[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 218-227. (TAN K, YAN Z H, ZHAO Z J, et al. An evaluation of resource and environmental carrying capacity of Wenshan City in karst area based on fuzzy model[J]. *Research on Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1): 218-227. (in Chinese)) DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2021.01.028](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2021.01.028).
- [29] 朱广伟, 程新良, 吴志旭, 等. 千岛湖水体营养盐时空变化及水环境挑战[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(4): 852-863. (ZHU G W, CHENG X L, WU Z X, et al. Spatio-temporal variation of nutrient concentrations and environmental challenges of Qiandaohu Reservoir, China[J]. *Environmental Science Research*, 2022, 35(4): 852-863. (in Chinese)) DOI: [10.13198/j.issn.1001-6929.2022.02.08](https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2022.02.08).
- [30] 钱瑞, 彭福利, 薛坤, 等. 大型湖库滨岸带蓝藻水华堆积风险评估: 以巢湖为例[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(1): 49-60. (QIAN R, PENG F L, XUE K, et al. Assessing the risks of harmful algal bloom accumulation at littoral zone of large lakes and reservoirs: An example from Lake Chaohu[J]. *Lake Science*, 2022, 34(1): 49-60. (in Chinese))

Study and application of bloom risk assessment model in lake and reservoir water source

WANG Xingju¹, LIANG Jiajia¹, LIU Tangqiong¹, ZHAO Ranhang¹, TIAN Maoqin², LI Shuliang²

(1. Department of Civil Engineering and Water Conservancy, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Jinan Water Conservancy Project Service Center, Jinan 250000, China)

Abstract: In recent years, water bloom occurrence frequency in water sources is increasing gradually. The excessive proliferation of algae not only intensifies the accumulation of toxins in the water body but also leads to a series of chain reactions such as water pollution, which seriously affects human life and health through the food chain. In the long run, the ecosystem will be seriously damaged, attracting the attention of scholars at home and abroad. Therefore, the study of the degree of bloom risk has an important impact on the management and the improvement of water quality.

The risk of water bloom in water source areas is affected by many factors, such as internal and external factors. A relatively comprehensive evaluation index system of water bloom risk in water source areas had been constructed from the internal and external levels, which could overcome the limitations caused by only considering external risks. Given the fuzzy characteristics and uncertainties of water quality assessment and impact factors, a variable fuzzy assessment model of water bloom risk in water source areas was constructed by the variable fuzzy set theory. The model could describe the fuzziness of water bloom risk with the help of a relative difference function. Through the transformation of different parameter combinations, the limitation of only a single model was overcome, and the risk of water bloom in lake reservoir-type water source areas was difficult to be quantitatively described because the coupling of multiple factors was solved.

The model was applied to the risk assessment of water bloom in Qiaodian Reservoir. The results showed that the characteristic value of the water bloom risk level was 3.19 (grade III risk). The characteristic value of risk level caused by external factors was 2.41 (grade II risk). Among them, the amount of fertilizer per unit area, the impact of upstream water on water bloom and the duration of light were the key indicators that affected the level of exogenous risk. The characteristic value of risk level caused by endogenous factors was 3.54 (grade IV risk), which was closely related to the sedimentation, water temperature and hydraulic retention time of Qiaodian Reservoir.

The constructed variable fuzzy evaluation model formed 4 different evaluation models by changing the combination of parameters, which further reflected the nonlinearity of the water bloom risk evaluation system. The multi-dimensional evaluation index system of water bloom risk in the water source area was comprehensively evaluated, which improved the reliability and reliability of the evaluation results. The application results of the example showed that it was consistent with the research conclusion, indicating that the endogenous risk of causing water bloom could not be ignored. The result of the single factor risk grade further showed that the risk fluctuation of water bloom was comprehensively affected by internal and external risks. Therefore, the index system and model can be applied to other similar lake reservoir-type water source areas to provide scientific theoretical support for precise prevention and control of water bloom. In the future, the water source managers should adjust the control direction by giving priority to the treatment of internal pollution, strengthening the control of non-point source pollution, then adjusting the hydraulic cycle, and improving the self-purification capacity of water bodies.

Key words: algal bloom; endogenous pollution; exogenous pollution; variable fuzzy set; water source; risk assessment

推行草原森林河流湖泊湿地休养生息