

## 白洋淀水环境风险受体脆弱性评价

王欢欢, 尹心安, 田凯, 刘世存, 赵彦伟, 孙家君

### 引用本文:

王欢欢, 尹心安, 田凯, 等. 白洋淀水环境风险受体脆弱性评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2606-2612.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0554>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 中国硝酸盐脆弱区划分与面源污染阻控

马林, 卢洁, 赵浩, 柏兆海, 胡春胜

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2387-2391 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1369>

### 亚砷酸盐提高藻与蚤培养基下纳米二氧化钛的稳定性

李金丽, 李梦婷, 黄兵, 王振红, 罗专溪

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 376-381 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1031>

### 农产品重金属超标风险:发生过程与预警防控

郭书海, 吴波, 张玲妍, 陈能场

农业环境科学学报. 2018, 37(1): 1-8 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0006>

### 长期秸秆还田和地下水位对土壤镉积累及有效性的影响

吴佳琪, 黄运湘, 尹力初, 梁玉文, 黄玲, 向艳艳, 施强

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1957-1963 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0486>

### 改性玉米秸秆吸附磷的动力学和热力学特征研究

韩珏, 李佳欣, 崔红艳, 吕纬, 白淑琴

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2008-2014 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0316>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王欢欢, 尹心安, 田凯, 等. 白洋淀水环境风险受体脆弱性评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2606–2612.

WANG Huan-huan, YIN Xin-an, TIAN Kai, et al. Vulnerability assessment of water environmental risk targets in Baiyangdian Lake[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(11): 2606–2612.



开放科学 OSID

# 白洋淀水环境风险受体脆弱性评价

王欢欢<sup>1</sup>, 尹心安<sup>1</sup>, 田凯<sup>1</sup>, 刘世存<sup>1</sup>, 赵彦伟<sup>1\*</sup>, 孙家君<sup>2</sup>

(1. 水环境模拟国家重点实验室, 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 中国雄安集团生态建设投资有限公司, 河北 保定 071700)

**摘要:**白洋淀是“华北明珠”,也是雄安新区的重要生态依托,开展水环境风险受体脆弱性研究,可为白洋淀水环境保护与水环境风险管理提供依据。从风险受体敏感性和缓冲能力两方面,选取14项指标,构建了白洋淀水环境风险受体脆弱性评价指标体系,提出了脆弱性评价与分级方法,并对白洋淀水环境风险受体脆弱性进行了评价。结果表明,淀区以较低和低度脆弱为主,东北部、西北部和中部的部分区域脆弱度较高。研究表明,应通过控制污染、生态补水、水生植被种植、微地形改造等措施提高缓冲能力,从而降低脆弱度。

**关键词:**白洋淀; 风险受体; 脆弱性; 评价指标

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)11-2606-07 doi:10.11654/jaes.2020-0554

## Vulnerability assessment of water environmental risk targets in Baiyangdian Lake

WANG Huan-huan<sup>1</sup>, YIN Xin-an<sup>1</sup>, TIAN Kai<sup>1</sup>, LIU Shi-cun<sup>1</sup>, ZHAO Yan-wei<sup>1\*</sup>, SUN Jia-jun<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. China Xiong'an Group Ecological Construction Investment Co. Ltd, Baoding 071700, China)

**Abstract:** Baiyangdian Lake is the “Pearl of North China” and an important ecological support for Xiong'an New Area. The vulnerability assessment of water environmental risk targets can provide a basis for the water environmental protection and the risk management of water pollution accidents in Baiyangdian Lake. In terms of the sensitivity and buffering ability of risk targets, 14 indicators were selected to build an indicator system to evaluate the vulnerability of water environmental risk targets, and a method of vulnerability assessment and classification was proposed to evaluate the vulnerability of the risk target. The results showed that Baiyangdian Lake overall exhibited lower and low vulnerability, while the northeast, northwest, and middle parts of Baiyangdian Lake exhibited higher vulnerability. Measures should be taken to improve the buffering capacity and reduce the vulnerability by controlling pollution, strengthening ecological water compensation, planting aquatic vegetation, and reconstructing micro-slope.

**Keywords:** Baiyangdian Lake; risk target; vulnerability; assessment index

白洋淀是“华北之肾”,被誉为“华北明珠”,主要位于河北省保定市安新县内,是华北平原唯一的天然湖泊,具有缓洪、治涝和蓄水灌溉等重要功能,对调节小气

候、改善区域温湿状况、补充地下水、维护华北平原生态平衡发挥不可忽视的作用<sup>[1]</sup>。白洋淀也是雄安新区生态建设的重要依托,雄安新区是国家级新区,是千年大计、

收稿日期: 2020-05-15 录用日期: 2020-07-14

作者简介: 王欢欢(1996—),女,浙江杭州人,硕士研究生,从事环境评价、规划与管理研究。E-mail: 13868112371@163.com

\*通信作者: 赵彦伟 E-mail: awei1974@bnu.edu.cn

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110001);北京市科技计划课题(Z181100009618030)

Project supported: The Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (2018ZX07110001); Beijing Municipal Science & Technology Commission (Z181100009618030)

国家大事,其目标是打造城市建设与发展的典范,具有极高的发展定位,这也对白洋淀的污染控制与风险管控提出了更高的要求。因此,开展白洋淀环境风险受体脆弱性研究,明确其空间分布特征,可以为白洋淀的水环境保护与生态安全保障提供重要依据,并直接支持雄安新区的环境风险管理和环境污染风险应急体系建设。

环境风险受体脆弱性评价旨在通过评估风险受体在环境污染事故中可能经受的伤害及伤害程度,来辨识潜在风险问题。近年来,随着环境污染事故日益增加,环境风险受体脆弱性评价研究受到广泛关注,国内外以区域人地系统为对象,针对环境风险受体脆弱性评价开展了比较深入的研究。Tixier等<sup>[2]</sup>构建了包括人、自然环境、设施的区域环境风险受体脆弱性指标体系;Collins等<sup>[3]</sup>从污染事故危害性和社会经济脆弱性两个维度研究了区域环境风险受体脆弱性;薛鹏丽等<sup>[4]</sup>综合考虑社会经济脆弱性和生态系统脆弱性,构建了上海市环境污染事故风险受体脆弱性评价指标体系;杨小林等<sup>[5]</sup>选取受体暴露性和抗逆力两类指标,评价了河南省风险受体的脆弱性,明确了其空间分布特征;He等<sup>[6]</sup>综合考虑自然、社会、经济、环境污染和人类健康,对我国的环境风险受体脆弱性进行了评价。经过多年的发展,已经基本形成系统的区域环境风险受体脆弱性评价指标体系与方法,推动了脆弱性评价在实践中的应用。但目前脆弱性评价多以城市、区域为对象,对湖泊水域脆弱性评价的研究相对缺乏。湖泊水域是人类赖以生存的重要生态空间,在人类的生存发展中发挥着重要的生态环境功能,但湖泊水域多是水环境污染事故的潜在受体,更容易受到水环境污染事故的损害,因此,亟待开展湖泊水环境风险脆弱性评价研究。

本文综合考虑敏感性和缓冲能力,构建评价指标体系,基于RS与GIS平台,对白洋淀水环境风险受体脆弱性进行评价,明确风险受体脆弱性的空间分布特征,为突发水环境污染事故风险防控和管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

白洋淀(115°38'~116°07'E,38°43'~39°02'N)是华北平原最大的淡水湖泊,淀区主要由白洋淀、烧车淀、马棚淀、藻苣淀等143个淀泊和3700多条沟壕组成(图1),总面积366 km<sup>2</sup>,水面面积150 km<sup>2</sup>,平均水位7.5 m,平均水深2.3 m。白洋淀还是大清河水系中重要的蓄水枢纽,自然生态资源丰富,动植物种类多,生境异质性高,发挥重要的生态功能,淀内分布有自

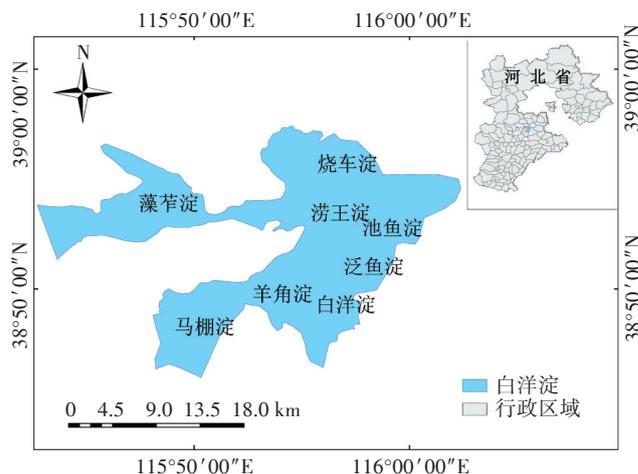


图1 白洋淀地理位置图

Figure 1 Location of Baiyangdian Lake

然保护区、重点湿地等各类敏感目标。

### 1.2 数据来源

本文数据主要为自然环境数据。其中,水质、水生物、高程数据通过实地监测和测量获得,土地利用类型数据由遥感影像解译获得,旅游区分布、水质保护目标、自然保护区数据来源于相关规划,具体数据来源见表1,监测指标的统计值见表2,水质、水生物采样点分布和土地利用类型见图2。数据处理基于GIS软件平台进行,评价单元为30 m×30 m 栅格。

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 指标体系建立

环境风险受体是环境污染风险事故的潜在承受体,指环境风险因子在环境转运过程中,可能影响的人群、社会和生态环境系统<sup>[7]</sup>。研究区中,自然生态系统是水环境污染事故发生时的主要受损者,其状态决定了水环境风险受体的脆弱性。考虑研究区实际

表1 数据来源

Table 1 The data source

数据类型 Data types	数据来源 Data Sources
水质	2019年9月和11月共2次实地监测获取,监测指标包括TN、TP、COD、BOD、NH <sub>3</sub> -N、DO
水生物	浮游动植物、底栖动物由2019年9月和11月共2次实地监测获取,监测指标包括种类、密度、数量等,水生植被数据通过遥感解译结合现场实测获取
高程	实地测量
土地利用类型	2019年高分二号夏季遥感影像解译获取
旅游区分布	《河北省安新县白洋淀旅游区旅游发展总体规划(2009—2020)》
水质保护目标	《白洋淀生态环境治理和保护规划(2018—2035)》
自然保护区	《河北省湿地自然保护区规划》

表2 采样点各监测指标统计值

Table 2 Statistical values of monitoring indicators at sampling points

水质 Water quality		水生物 Aquatic organisms		
指标 Indicators	平均值±标准差 Mean±SD	指标 Indicators	平均值±标准差 Mean±SD	
TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	2.31±2.23	浮游动物	物种数	10.14±3.37
TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.09±0.04		数量/(ind·L <sup>-1</sup> )	7 984.57±5 110.40
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	20.21±4.18	浮游植物	物种数	23.21±6.49
BOD/(mg·L <sup>-1</sup> )	4.02±1.08		密度/(×10 <sup>4</sup> ·L <sup>-1</sup> )	2 497.83±3 615.65
NH <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.26±0.23	底栖动物	数量/(ind·m <sup>-2</sup> )	403.20±764.01
DO/(mg·L <sup>-1</sup> )	6.39±1.49		生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	16.60±19.21

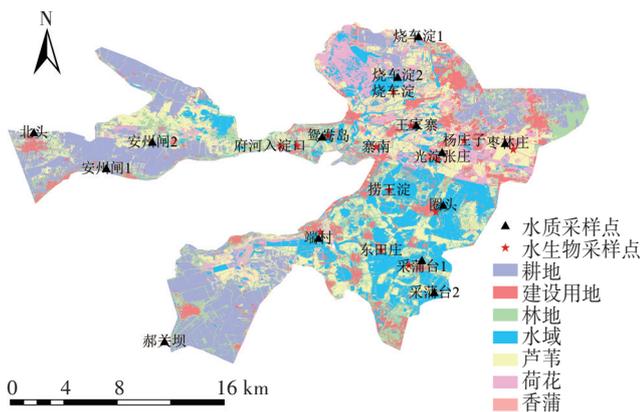


图2 土地利用类型及采样点分布示意图

Figure 2 Schematic diagram of land use type and sampling point distribution

及数据获取的可行性,遵循科学性、全面性、主导性、定性与定量相结合的原则,选取敏感性和缓冲能力2个层面的14项指标(表3),构建水环境风险受体脆弱性评价指标体系。

敏感性是风险受体对水环境污染事故的敏感程度,指在不考虑人类活动影响的前提下,水污染事故发生的可能性大小、可能发生的区域及程度。敏感性指标中,水质保护目标由水环境功能区划决定,不同的功能分区要求的水环境质量保护目标不同<sup>[8]</sup>,敏感性不同;与人口集中区距离越近,水体越容易受到干扰,敏感程度越高;旅游区功能分区不同,保护与管理要求不同,敏感性不同;涉水自然保护区对水污染事故敏感,评价区域内涉水自然保护区越多,等级越高,越接近核心区,受体敏感性越高<sup>[9]</sup>;浮游动物E/O指数表示水体富营养化程度,E/O指数越大,富营养化程度越高,敏感性越高<sup>[10]</sup>;浮游植物密度、底栖动物多样性表征生态系统结构与水体生物学状况,结合白洋淀实际,浮游植物密度越高,富营养化程度越高<sup>[11]</sup>,底栖动物多样性越高,分别对应的敏感性也越高。

缓冲能力的大小取决于风险受体纳污能力和自身恢复能力。缓冲能力指标中,水质现状表征水环境质量状况,反映水体纳污能力,水质状况越好,纳污能力越强,缓冲能力越强;水深、水体连通性、河网密度<sup>[12]</sup>表示水体物理环境状况,反映水体对污染物的稀释能力,水越深、水体连通性越好、河网密度越大,稀释能力越强,缓冲能力越强;水生植被类型与盖度表征生态系统内部稳定性,反映风险受体受到扰动时的恢复能力<sup>[13]</sup>,植被越多、水生植被盖度越高,恢复能力越强,缓冲能力越强;不同土地利用类型对水污染的缓冲能力不同,分别赋予不同分值<sup>[5]</sup>。各指标的计算见表3。

### 1.3.2 评价方法

采用极差法进行指标标准化,采用线性加权法分别评价水环境风险受体敏感性和缓冲能力,并基于此进行脆弱性评价并分级。

#### (1) 指标标准化

由于不同指标的量级不同,评价前首先对所有数据进行标准化处理,标准化公式为:

$$\begin{cases} p_{ij} = (x_{ij} - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) & (\text{评价指标为正向指标}) \\ p_{ij} = (x_{\max} - x_{ij}) / (x_{\max} - x_{\min}) & (\text{评价指标为负向指标}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $p_{ij}$ 为各指标标准化结果; $x_{ij}$ 为实际值; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为最大值和最小值。

#### (2) 敏感性/缓冲能力评价

采用线性加权组合法,分别计算风险受体的敏感度和缓冲能力指数,具体计算公式为:

$$SI(ACI) = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (2)$$

式中: $SI$ 、 $ACI$ 分别为风险受体敏感度指数和缓冲能力指数; $n$ 为评价指标的个数; $W_i$ 为第*i*个评价指标的权重系数; $X_i$ 为第*i*个评价指标的数值。

采用层次分析法确定各指标权重,其中判断矩阵

表3 白洋淀淀区水环境风险受体脆弱性指标体系及权重

Table 3 Indicators system and weight of water environmental risk target vulnerability evaluation

目标层 Target layer	准则层 Rule layer	指标层 Index layer	计算方法及说明 Calculation method and description	权重 Weight
白洋淀水环境风险受体脆弱性	敏感性	水质保护目标	对不同水质保护目标分级赋值,规划的生态功能区为3,其余为1	0.078 3
		与人口集中区距离	基于GIS平台,通过邻域分析,获取与各人口集中分布区的最近直线距离	0.132 1
		旅游区	根据旅游区功能分区分级赋值,生态观光区为5,养生区为4,休闲观光带为3,旅游度假区为2,深度休闲区为1,其他为0	0.168 1
		自然保护区	根据分区分级赋值,核心区为5,缓冲区为3,实验区为1,其他为0	0.187 5
		浮游动物E/O指数	浮游动物中富营养型种(E)与贫营养型种(O)种数的比值	0.094 5
		浮游植物密度	单位面积内浮游植物数量	0.137 8
		底栖动物多样性	Shannon-Wiener多样性指数 $H = -\sum_{i=1}^n (n_i/N) \log_2 (n_i/N)$ 。H表示多样性指数; $n_i$ 表示第i种的个体数;N表示所有种类的个体数	0.201 7
	缓冲能力	水质现状	用水质平均污染指数表示,公式为 $WQI = 1/n \sum_{i=1}^n P_i$ 。n为污染物个数, $P_i$ 为第i种污染物标准指数	0.067 9
		水深	由高程数据结合现场数据计算获得	0.062 5
		水体连通性	水体是否物理连通,连通水体赋值为1,孤立水体赋值为0	0.137 0
		河网密度	基于GIS平台,提取水系后,利用线统计计算单位面积内的沟渠、河道总长度	0.126 6
		水生植被类型	根据水生植被主要覆盖类型分级赋值,荷花为5,香蒲为3,芦苇为1,其他为0	0.209 1
		水生植被盖度	基于GIS平台,利用栅格计算器计算栅格内水生植被的垂直投影面积	0.162 7
		土地利用类型	根据不同的土地利用类型赋值,湿地为5,林地为4,水域为3,耕地为2,建设用地区为1,其他为0	0.234 2

由专家判断法获取。该方法是一种定性和定量相结合、系统化、层次化的分析方法,主要解决多因素相互关联、相互制约,且缺少定量数据的系统分析问题<sup>[14]</sup>。赋权结果如表3所示。

### (3)脆弱性评价

风险受体的脆弱性由敏感性和缓冲能力共同决定,风险受体的敏感程度越高,缓冲能力越弱,脆弱性就越大,反之,脆弱性就越小<sup>[7,15]</sup>,因此脆弱性计算公式为:

$$VI = SI/ACI \quad (3)$$

式中:VI为水环境风险受体脆弱度指数;SI、ACI分别为风险受体敏感度指数和缓冲能力指数。

### (4)评价分级

敏感性指数、缓冲能力指数取值区间为[0, 1],脆弱性指数取值区间为(0, +∞)。参考以往研究<sup>[16-18]</sup>,结合研究区实际情况,将敏感性均分为5级,即低度敏感(<0.2)、较低敏感(0.2~0.4)、中度敏感(0.4~0.6)、较高敏感(0.6~0.8)、高度敏感(0.8~1);将缓冲能力均分为5级,即弱缓冲能力(<0.2)、较弱缓冲能力(0.2~0.4)、中缓冲能力(0.4~0.6)、较强缓冲能力(0.6~0.8)、强缓冲能力(0.8~1);采用自然断点法将脆弱性分为5级<sup>[17]</sup>,即低度脆弱(<1.2)、较低脆弱(1.2~2.1)、中度脆

弱(2.1~3.4)、较高脆弱(3.4~5.4)、高度脆弱(>5.4)。

## 2 结果与分析

### 2.1 敏感性/缓冲能力评价结果

根据公式(1)、公式(2)分别评价白洋淀淀区水环境风险受体敏感性和缓冲能力,敏感度指数为0.186 9~0.790 8,空间分布如图3所示,缓冲能力指数为0.019 6~0.880 8,空间分布如图4所示。

由图3可知,白洋淀风险受体敏感性以较低敏感和中度敏感为主,低度敏感区极少。其中,较低敏感区主要分布在淀区边缘区域;中度敏感区分布广泛,在淀区的西北部、北部、中部、西南部区域均有所分布;较高敏感区主要位于淀区中部,该区域敏感目标集中,敏感性高于其他区域。总体上,白洋淀水环境风险受体敏感性由外向内升高。

由图4可知,水环境风险受体较强和强缓冲能力区域少,主要分布在白洋淀北部的烧车淀和王家寨周边。中度缓冲能力区也较少,分布分散,在北部烧车淀等区域分布较多。较弱缓冲能力区域占比较大,多分布在淀区南部的羊角淀、白洋淀、泛鱼淀等区域,少数分布在西北部及北部。弱缓冲能力区主要分布在淀区西北部、西南部及东北部的边缘区域。总体上,

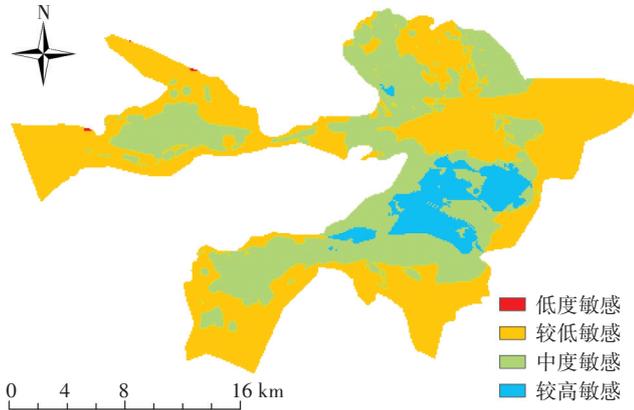


图3 敏感性空间分布图

Figure 3 The spatial distribution of sensitivity

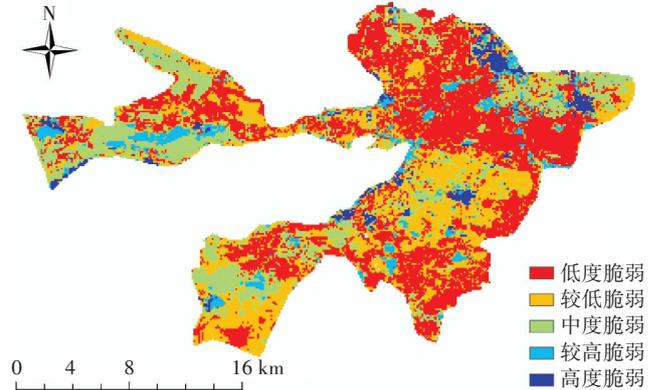


图5 脆弱性空间分布图

Figure 5 The spatial distribution of vulnerability

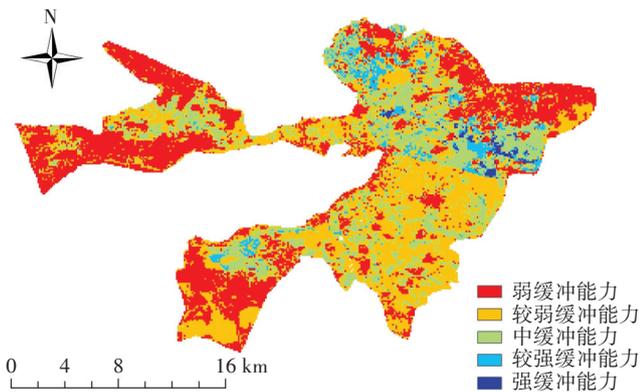


图4 缓冲能力空间分布图

Figure 4 The spatial distribution of buffering capacity

白洋淀水环境风险受体以弱缓冲能力和较弱缓冲能力为主。

## 2.2 脆弱性评价结果

根据公式(3)评价白洋淀水环境风险受体脆弱性,脆弱度指数为0.285 5~15.545 2,空间分布如图5所示。由图5可知,白洋淀水环境风险受体脆弱性差异大,淀区东北部脆弱性指数最高,该区域为中度敏感,缓冲能力低于其他区域,导致脆弱性高。其次是淀区西北部及西南部,这两个区域缓冲能力较弱,脆弱性较高。淀区中部大部分区域脆弱性较低,该区域敏感性较强,但有一定缓冲能力。淀区北部、东南部的大部分区域脆弱性低于其他区域,该区域缓冲能力相对较强,脆弱性低。总体上,白洋淀水环境风险受体脆弱性不高,以低度和较低脆弱区为主,高度脆弱区集中在东北部、西北部和中部的少部分区域。

## 3 讨论

对评价结果进行分析可知,白洋淀水环境风险受体脆弱性的空间分布与土地利用类型、植被分布格局呈现出相关性。白洋淀东北部人口集中,以建设用地和耕地为主,人类活动干扰相对严重<sup>[19]</sup>,脆弱度最高。淀区西北部、西南部和中部的部分地区表现为较高脆弱,所对应的土地类型基本为建设用地,且植被覆盖度低,水质状况差,水体连通性差,缓冲能力弱。中度脆弱区所在区域主要土地利用类型为耕地,敏感程度不高,有作物覆盖,生态系统较稳定,具有一定的缓冲能力,脆弱度不高。较低脆弱区对应的土地类型基本为水域,水较深,且有植被分布,能对水体污染物起到稀释降解作用,缓冲作用较强,脆弱度较低。低度脆弱区基本为荷花、芦苇、香蒲等挺水植物覆盖较好的区域,该区域水质状况相对较好,常年维持一定水深,连通性较好,稀释缓冲能力强,水生植被盖度较高,生态系统结构稳定,自我恢复能力强,脆弱性低。

白洋淀是雄安新区建设的主要生态载体,新区规划中赋予其较高生态定位,是生态上需要保护的区域,无法通过降低敏感性来降低脆弱性,白洋淀脆弱性的降低应该通过提升缓冲能力来实现。结合缓冲能力评价结果,对于淀区高度脆弱、较高脆弱和中度脆弱区域,可通过控制入淀河流及淀区内污染,改善水质,加强生态补水,恢复淀区水面面积,提升缓冲能力。对于较低脆弱区域,应加强芦苇、香蒲、荷花、轮藻和篦齿眼子菜的植物群落组合的种植,提高缓冲能力<sup>[20]</sup>。水生植物密度影响水质净化效果,水生植被为高密度香蒲、中密度芦苇时,净化效果明显<sup>[21]</sup>,种植时

应匹配不同的密度。淀区围堤围埝众多,有1 700处,阻碍了物理连通性,应加强拆除与微地形改造。

白洋淀是以自然生态系统为主的区域,其自然生态环境相对较好,生态系统结构相对完整,新区的规划建设也对其生态保护提出了更高的要求。因此,本文主要考虑白洋淀的自然特征,构建包括敏感性和缓冲能力的指标体系,评价了白洋淀对水环境风险的脆弱性。但环境风险受体实际是包含社会、生态环境及人群的复杂系统,脆弱性评价除了需要考虑系统内部指标外,还需考虑外部压力指标<sup>[22]</sup>。本文通过与人口集中区距离这一指标反映系统外部压力,但随着新区发展建设,淀外人口逐渐增加,产业将逐步发展,交通体系日趋完善,系统外部压力会不断增加。未来应考虑将更多的人口密度、社会经济及产业发展的相关指标纳入指标体系。同时,本文采用自然断点法对脆弱性指数进行分级。这种方法是一种根据数值统计分布规律来分级分类的方法,具有类中差异最小化,类间差异最大化的优势,但对脆弱性分级不够精确。未来应基于网格化调查成果,进行更精细化的分级。

#### 4 结论

结合白洋淀实际,考虑人口、旅游区、自然保护区、水环境、水生态等因素及对脆弱性的影响,选取敏感性和缓冲能力两类共14项指标,构建白洋淀水环境风险受体脆弱性评价指标体系,提出了水环境风险受体脆弱性评价与分级方法。

评价结果表明,白洋淀水环境风险受体敏感性以较低和中度敏感为主,在淀区中广泛分布;缓冲能力以弱和较弱缓冲能力为主,集中分布在淀区南部的羊角淀、白洋淀、泛鱼淀等区域,少数分布在西北部、西南部及东北部的边缘区域;脆弱性以较低和低度脆弱为主,高脆弱性区域集中在淀区东北部、西北部和中部的小部分区域,低脆弱性区域在淀区分布广,主要在北部、东南部。未来应加强污染控制、生态补水、水生植被种植、微地形改造等,提高缓冲能力,降低脆弱度。

#### 参考文献:

- [1] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 308-311.  
WANG Su-min, DOU Hong-shen. The lakes of China[M]. Beijing: Science Press, 1998: 308-311.
- [2] Tixier J, Dandrieux A, Dusserre G, et al. Environmental vulnerability assessment in the vicinity of an industrial site in the frame of ARAMIS European project[J]. *Journal of Hazardous Material*, 2006, 130(3): 251-264.
- [3] Collins T W, Grineski S E, Aguilar M L. Vulnerability to hazards in the Ciudad Juarez-EIPaso metropolis: A model for spatial risk assessment in transnational context[J]. *Global Environmental Change*, 2009, 29: 448-461.
- [4] 薛鹏丽, 曾维华. 上海市环境污染事故风险受体脆弱性评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11): 2556-2561.  
XUE Peng-li, ZENG Wei-hua. Evaluation on the vulnerability of environmental accident risk targets in Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11): 2556-2561.
- [5] 杨小林, 顾令爽, 李义玲, 等. 基于动态综合评价的区域环境风险差异化管理[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2382-2391.  
YANG Xiao-lin, GU Ling-shuang, LI Yi-ling, et al. Differentiated management strategies for the regional environmental risk based on dynamic comprehensive assessment[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(6): 2382-2391.
- [6] He L, Shen J, Zhang Y. Ecological vulnerability assessment for ecological conservation and environmental management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 1115-1125.
- [7] 杨小林, 程书波, 李义玲. 基于客观赋权法的长江流域环境污染事故风险受体脆弱性时空变异特征研究[J]. 地理与地理信息科学, 2015, 31(2): 119-124.  
YANG Xiao-lin, CHENG Shu-bo, LI Yi-ling. A study on the temporal and spatial variation of vulnerability of environmental pollution accident risk receptor in the Yangtze river basin based on objective weighting method[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, 31(2): 119-124.
- [8] 郭书海, 吴波. 水生态功能区划流程: 双关系树框架与概念模型[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 4051-4056.  
GUO Shu-hai, WU bo. A process of aquatic ecological function regionalization: The dual tree framework and conceptual model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(12): 4051-4056.
- [9] 李君轶, 杨敏. 基于敏感性的我国自然保护区生态旅游开发研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(4): 150-154.  
LI Jun-yi, YANG Min. Study on ecotourism development of nature reserve of China based on sensitiveness[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(4): 150-154.
- [10] 王庆, 侯磊, 陈实, 等. 珠江口磨刀门轮虫群落结构特征与水质生态学评价[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 824-833.  
WANG Qing, HOU Lei, CHEN Shi, et al. Community structure of rotifers and ecological assessment of water quality in Modao men of the Pearl River Estuary[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(5): 824-833.
- [11] 韩谓, 潘保柱, 赵耿楠, 等. 长江源区浮游植物群落结构及分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11): 2621-2631.  
HAN Xu, PAN Bao-zhu, ZHAO Geng-nan, et al. Phytoplankton community structure and distribution characteristics in the source region of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(11): 2621-2631.
- [12] 陈桃, 包安明, 郭浩, 等. 中亚跨境流域生态脆弱性评价及其时空特征分析——以阿姆河流域为例[J]. 自然资源学报, 2019, 34

- (12):2643-2657.
- CHEN Tao, BAO An-ming, GUO Hao, et al. Assessment of ecological vulnerability of transboundary watershed in central Asia and analysis of its temporal and spatial characteristics: A case study of the Amu Darya River basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(12): 2643-2657.
- [13] 汪秀芳, 叶碎高, 薛淋淋. 大型水生植物在维持水生生态系统健康中的作用[J]. *生态科学*, 2014, 33(3):613-618.
- WANG Xiu-fang, YE Sui-gao, XUE Lin-lin. The roles of macrophytes in maintenance of aqua-ecosystem health[J]. *Ecological Science*, 2014, 33(3):613-618.
- [14] Saaty T. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1980.
- [15] 冷苏娅, 蒋世杰, 潘杰, 等. 京津冀协同发展背景下的区域综合环境风险评估研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1):60-69.
- LENG Su-ya, JIANG Shi-jie, PAN Jie, et al. Regional integrated environmental risk assessment in collaborative development of Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2017, 53(1):60-69.
- [16] 何彦龙, 袁一鸣, 王腾, 等. 基于GIS的长江口海域生态系统脆弱性综合评价[J]. *生态学报*, 2019, 39(11):3918-3925.
- HE Yan-long, YUAN Yi-ming, WANG Teng, et al. Integrated assessment of marine ecological vulnerability in the Yangtze River Estuary using GIS[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11):3918-3925.
- [17] 姚昆, 周兵, 李小菊, 等. 基于AHP-PCA熵权模型的大渡河流域中上游地区生态环境脆弱性评价[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 265-271.
- YAO Kun, ZHOU Bing, LI Xiao-ju, et al. Evaluation of ecological environment vulnerability in the upper-middle reaches of Dadu River basin based on AHP-PCA entropy weight model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(5):265-271.
- [18] 王辉, 宋长春, 宋艳宇. 三江平原湿地生态风险评价的尺度依存性及区域生态风险评价方案制定[J]. *湿地科学*, 2018, 16(2):106-113.
- WANG Hui, SONG Chang-chun, SONG Yan-yu. Scale-dependence of ecological risk assessment and scheme formulation for regional ecological risk assessment of wetlands in Sanjiang Plain[J]. *Wetland Science*, 2018, 16(2):106-113.
- [19] Xia L L, Liu R Z, Zao Y W. Correlation analysis of landscape pattern and water quality in Baiyangdian Watershed[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13:2188-2196.
- [20] 白雪梅, 何连生, 李必才, 等. 利用水生植物组合净化白洋淀富营养化水体研究[J]. *湿地科学*, 2013, 11(4):495-498.
- BAI Xue-mei, HE Lian-sheng, LI Bi-cai, et al. Application of combined aquatic plants to control eutrophic water in Baiyangdian Lake [J]. *Wetland Science*, 2013, 11(4):495-498.
- [21] 梁淑轩, 张振冉, 王云晓, 等. 白洋淀典型挺水植物净化水质效果[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(11):3048-3052.
- LIANG Shu-xuan, ZHANG Zhen-ran, WANG Yun-xiao, et al. Purification of typical emergent aquatic plant on eutrophicated water in Lake Baiyangdian[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(11):3048-3052.
- [22] 沈珍瑶, 杨志峰, 曹瑜. 环境脆弱性研究述评[J]. *地质科技情报*, 2003, 22(3):91-94.
- SHEN Zhen-yao, YANG Zhi-feng, CAO Yu. Review on environment vulnerability research[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2003, 22(3):91-94.