

流域水环境承载力评价——以白洋淀流域为例

白洁, 王欢欢, 刘世存, 田凯, 赵彦伟, 李春晖

引用本文:

白洁, 王欢欢, 刘世存, 等. 流域水环境承载力评价——以白洋淀流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1070–1076.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0197>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

白洋淀生态环境变化及影响因素分析

刘世存, 王欢欢, 田凯, 赵彦伟, 陈家琪, 李春晖

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1060–1069 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0198>

山东省畜禽粪污土地承载力时空分异特征分析

郑莉, 张晴雯, 张爱平, 刘杏认, 刘士清, 韩聪

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 882–891 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0863>

生态补水驱动下白洋淀生态系统服务演变趋势

杨薇, 孙立鑫, 王烜, 闫胜军, 赵彦伟

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1077–1084 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0241>

海南省畜禽养殖环境承载力及有机肥替代化肥潜力分析

杨旭, 黄艳艳, 刘海林, 茶正早, 罗微, 林清火

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0669>

白洋淀近30年水质时空变化特征

王欢欢, 白洁, 刘世存, 田凯, 赵彦伟, 李春晖

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1051–1059 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0196>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

白洁, 王欢欢, 刘世存, 等. 流域水环境承载力评价——以白洋淀流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1070–1076.
BAI Jie, WANG Huan-huan, LIU Shi-cun, et al. Evaluations of water environment carrying capacity: A case study in the Baiyangdian watershed, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1070–1076.



开放科学 OSID

流域水环境承载力评价——以白洋淀流域为例

白洁, 王欢欢, 刘世存, 田凯, 赵彦伟*, 李春晖

(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)

摘要:流域水环境承载力评价可为流域生态环境治理提供重要依据。以白洋淀流域为例,建立包括水资源、水环境和水生态三要素、共16个指标的水环境承载力评价指标体系与标准,提出基于层次分析法和熵值法的指标权重确定方法以及基于可变模糊识别模型的评价方法,对近20年水环境承载力进行计算与评价。结果表明:1998—2017年白洋淀流域水环境承载力的综合特征值由1.84增加到3.16,水环境承载力呈上升趋势,1998—2012年属较低承载区间,2013—2017年属中等承载区间;从各要素看,水资源和水环境要素的特征值由1.18、1.92分别增加为2.72、3.36,均呈增加趋势,水生态要素的特征值由3.44下降为2.31,呈下降趋势。未来应在推进水污染控制、水资源节约利用的基础上,重点关注水生态的保护、修复。

关键词:水环境承载力;白洋淀流域;层次分析法;熵值法;可变模糊识别模型

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)05-1070-07 doi:10.11654/jaes.2020-0197

Evaluations of water environment carrying capacity: A case study in the Baiyangdian watershed, China

BAI Jie, WANG Huan-huan, LIU Shi-cun, TIAN Kai, ZHAO Yan-wei*, LI Chun-hui

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Evaluation of water environment carrying capacity can provide an important basis for management of the ecological environment. This study took the Baiyangdian watershed as an example and established an evaluation indicator system and standards for the carrying capacity of water resources, the aquatic, and aquatic ecology. It proposed an indicator weight determination method based on an analytic hierarchy process (AHP) and entropy value method and used these to calculate the carrying capacities of water environment in the last 20 years; the results were evaluated using a variable fuzzy recognition model. The results showed that the comprehensive characteristic values of the water environment carrying capacity in the Baiyangdian watershed increased from 1.84 to 3.16 during the period 1998—2017 and showed an upward trend. The carrying capacity was at a low level from 1998—2012 and at a medium level from 2013—2017. Based on different parameters, the characteristic values of water resources and the aquatic environment increased from 1.18 and 1.92 to 2.72 and 3.36 respectively, with an increasing trend, while the characteristic values of aquatic ecological elements decreased from 3.44 to 2.31 with a decreasing trend. The protection and restoration of water ecology based on controlling water pollution and conserving water resources should be the focus in the future.

Keywords: water environment carrying capacity; Baiyangdian watershed; analytic hierarchy process; entropy value method; variable fuzzy recognition model

收稿日期:2020-02-25 录用日期:2020-04-14

作者简介:白洁(1996—),女,山西大同人,硕士研究生,从事环境评价、规划管理研究。E-mail:201921180044@mail.bnu.edu.cn

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

人口增长和社会经济发展引发了水资源过度消耗、水环境质量下降、水生态受损等系列问题,反过来制约社会经济发展,水环境承载力(WECC)的研究受到重视^[1]。水环境承载力评价旨在通过研究水环境、社会、经济等各因素之间的关系,为资源开发利用、社会经济发展提供参考和依据,并可以衡量区域可持续发展的程度^[2]。作为“华北之肾”,白洋淀是雄安新区开发建设的重要依托,在调节气候、控制污染、保护物种多样性和维持生态平衡等方面发挥着巨大作用。白洋淀流域社会经济活动是白洋淀淀区的重要影响源,水环境承载状况直接影响白洋淀的生态建设与修复,开展水环境承载力评价十分必要。

国外主要在可持续发展的范畴内开展水环境承载力相关研究^[3-5],评价对象包括湖泊、城市、区域等。国内研究始于湄洲湾案例^[6],此后针对不同对象从评价指标体系、评价方法等方面开展深入研究^[7-9]。提出的评价方法主要包括指标体系法、多目标模型法、单目标最优化方法、系统动力学方法等^[10-15]。指标体系评价法中的模糊综合评价法明确了评价对象与标准等级间的隶属关系,很好地解决了判断的模糊性和不确定性问题,得到广泛应用。金菊良等^[16]将层次分析法与模糊综合评价结合,构建更加客观稳定的综合评价模型;徐志青等^[17]采用模糊综合评价研究了南京市水环境承载力的动态变化。但该方法采用最大隶

属度原则得出最终的评价级别,容易在评价中丢失隶属度信息,评价因素越多,遗失有效信息和误判的可能性就越大^[18]。利用可变模糊识别理论及模型,对水环境承载力进行评价,可以通过变化模型参数,合理地确定样本指标对各级指标标准区间的相对隶属度,有效解决评价中边界模糊对评价结果的影响问题,可提高对样本等级评价的可信度^[19-20]。

本文以白洋淀流域为例,尝试建立水环境承载力评价指标体系,利用可变模糊识别理论及模型对其近20年的水环境承载力进行评价,明确了水环境承载力变化,为白洋淀水保护和综合管理提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况与数据来源

1.1.1 研究区概况

白洋淀流域地处海河流域中部(图1),地跨山西、河北和北京3省市,包括保定市全市和石家庄市、张家口市、北京市、忻州市及大同市部分县区。流域面积约3.4万km²,占整个海河流域面积的11%。白洋淀共有8条入淀河流,分别是白沟引河(拒马河)、萍河、瀑河、漕河、府河、唐河、孝义河、潞龙河。流域人口密度较大,水资源匮乏,开发强度大,除府河、孝义河有水外,其余入淀河流基本呈断流状态,且受工业、城镇生活与农业非点源污染影响,入淀河流水质

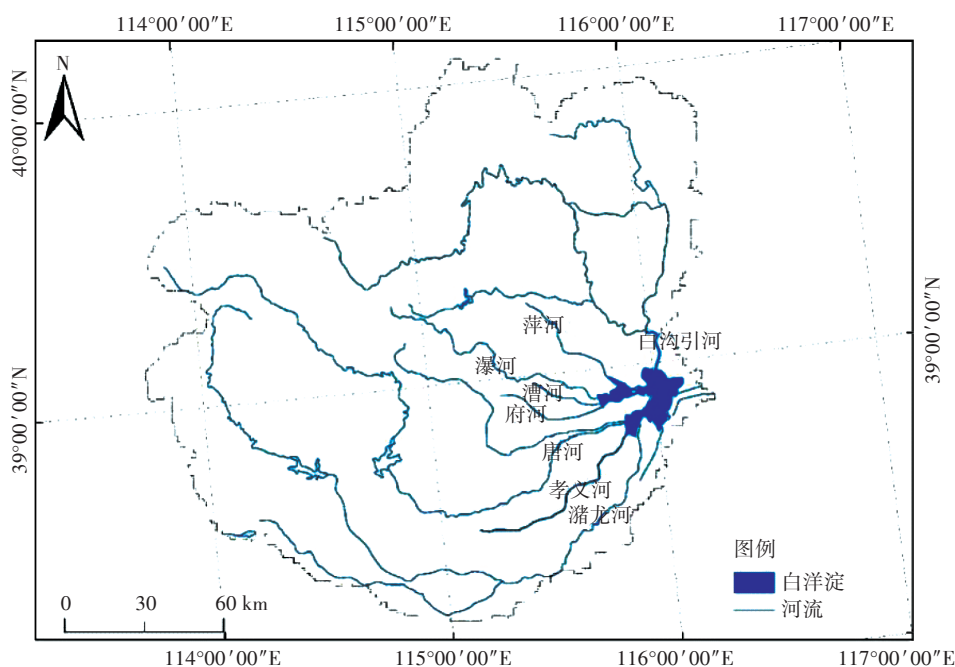


图1 白洋淀流域范围

Figure 1 The site of Baiyangdian watershed

欠佳,基本为Ⅳ~Ⅴ类水平,污染因子为COD、TN、NH₃-N等。同时,入淀河流受闸坝调控影响显著,连通性受阻,再加上生态流量缺乏等因素叠加,水生态状况较差。

1.1.2 数据来源

涉及河北省部分市县的数据主要来自于1998—2017年《保定市社会经济统计年鉴》《保定市水资源公报》《河北省水资源公报》《保定市统计年鉴》《保定市国民经济和社会发展规划统计公报》《河北农村统计年鉴》《保定市环境质量公报》《中国城市统计年鉴》《河北经济年鉴》及保定市人民政府(<http://www.bd.gov.cn/>)、保定市生态环境局(<http://www.bdhb.gov.cn/>)等相关网站,涉及到北京市和山西省部分县区的数据主要来自于实地调研收集和当地的统计资料。

1.2 评价指标体系与标准

水环境是指以水为主体的各种自然和社会因素的统Ⓐ体,水环境承载力是指在一定的自然环境条件和特定的社会经济发展模式下,区域水环境对其社会经济发展的支撑能力^[21],其承载水平与水资源、水环境和水生态禀赋直接相关,更取决于社会经济系统对水资源、水环境和水生态的利用方式与水平,开发与利用方式越合理、利用效率越高,则承载水平越高。因此,水环境承载力评价指标体系构成上,应包括水资源要素、水环境要素与水生态要素的3类指标,且

要反映区域生态环境禀赋与人类社会经济活动的影响。基于以上分析,考虑科学性、系统性、动态性和可操作性的原则,构建包括水资源、水环境和水生态三要素,共16个指标的评价指标体系(表1)。

人均水资源量反映区域水资源禀赋,万元GDP用水量和重复用水率反映水资源利用与节约水平,环境用水占流域生态保护与建设的水资源投入水平,以上4项为水资源要素指标。水环境要素指标共8项,其中水质达标率直接反映水体环境功能现状,万元GDP化学需氧量、氨氮排放量、单位面积化肥使用量、单位面积农药施用量反映流域内生产生活活动对水环境的压力,城镇污水集中处理率、工业废水达标排放率和畜禽养殖场粪便综合利用率反映污染控制与治理水平。水生态要素共选取4项指标,林木覆盖率和建成区绿化覆盖率反映水生态功能状态,建设用地面积占比与水域面积率反映流域内社会经济发展对水生态的侵占。

目前,对于水环境承载力评价,尚无明确统一的标准。不同区域根据其社会经济发展需求对水环境承载力有不同的要求。根据白洋淀流域实际,将水环境承载力指标划分为5个等级:低、较低、中、较高和高。划分标准主要参考国家标准、北京市和河北省相应标准以及相关研究成果,同时参考专家意见进行调整。具体评价分级标准见表1。

表1 白洋淀流域水环境承载力指标与分级标准

Table 1 Indicator system and classification standard of water environment carrying capacity

要素 Elements	指标 Indicators	单位 Unit	分级标准 Classification criteria					权重 Weight
			低 Low	较低 Lower	中 Medium	较高 Higher	高 High	
水资源	万元GDP用水量	m ³	>100	100~75	75~50	50~25	25~0	0.144
	人均水资源量	m ³	≤500	500~1000	1000~2000	2000~3000	≥3000	0.043
	重复用水率	%	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	0.019
	环境用水量占比	%	0~2	2~12	12~22	22~32	32~100	0.301
水环境	万元GDP化学需氧量排放量	kg	>2	2~1.5	1.5~1	1~0.5	0.5~0	0.030
	万元GDP氨氮排放量	kg	>1	0.9~1	0.6~0.9	0.3~0.6	0~0.3	0.070
	单位面积化肥使用量	kg·hm ⁻²	>850	850~650	650~450	450~250	250~0	0.014
	单位面积农药施用量	kg·hm ⁻²	>20	20~15	10~15	5~10	5~0	0.016
	水质达标率	%	0~40	40~60	60~80	80~100	100	0.066
	城镇污水集中处理率	%	0~85	85~90	90~95	95~100	100	0.067
	工业废水达标排放率	%	0~80	80~90	90~96	96~100	100	0.047
	畜禽养殖场粪便综合利用率	%	0~50	50~65	65~80	80~95	95~100	0.043
水生态	建设用地面积占比	%	>25	25~20	20~15	15~10	10~0	0.029
	水域面积率	%	0~2	2~5	5~8	8~11	≥11	0.034
	林木覆盖率	%	0~20	20~30	30~40	40~50	>50	0.040
	建成区绿化覆盖率	%	0~5	5~10	10~50	50~70	>70	0.037

1.3 评价方法

1.3.1 权重确定方法

层次分析法(AHP)是一种较为主观的赋权方法,它可以把复杂问题分解成各个组成因素,形成递阶的层次结构,解决多因素相互关联、相互制约的系统分析问题。计算步骤包括构造判断矩阵、计算权向量、进行一致性检验、确定各指标权重^[22]。熵值法是一种客观赋权方法,它通过计算指标的信息熵,根据指标的相对变化程度对系统整体的影响来决定指标的权重。它的计算步骤包括指标标准化处理、确定指标特征比重、计算指标熵值、确定指标差异系数、确定指标权重^[23]。指标权重采用层次分析法和熵值法的平均权重来确定,结合主客观赋权结果,更为可靠。

1.3.2 可变模糊识别模型

本文采用可变模糊识别模型^[24]进行评价,该模型为:

$$V_A(U) = 1/[1 + d_g/d_b]^a \quad (1)$$

式中: $V_A(U)$ 为识别对象 u (即水环境承载力)对 A (即水环境承载力评价标准)的相对隶属度; a 为优化准则参数, $a=1$ 为最小一乘方准则, $a=2$ 为最小二乘方准则; d_g 为距优距离, $d_g = \left\{ \sum_{i=1}^m \left[w_i (1 - \mu_A(u)_i) \right]^p \right\}^{1/p}$; d_b 为距劣距离, $d_b = \sum_{i=1}^m \left\{ \left[w_i (\mu_A(u)_i) \right]^p \right\}^{1/p}$; p 为距离参数, $p=1$ 为海明距离, $p=2$ 为欧氏距离; w_i 为指标权重; $\mu_A(u)_i$ 为指标 i (即评价指标)对应的相对隶属度向量,由公式 $\mu_A(u)_i = (D_A(u)_i + 1)/2$ 计算得到,其中相对差异度 $D_A(u)_i$ 表示评价等级标准对评价指标的吸引程度。

式中 a 与 p 有4种搭配:①当 $a=1, p=1$ 时,公式可变为 $V_A(U) = \sum_{i=1}^m w_i (\mu_A(u)_i)$,为模糊综合评价模型;②当 $a=2, p=1$ 时,可变为 $V_A(U) = 1/[1 + (1 - d_g)/d_b]^2$,为Sigmoid型函数;③当 $a=1, p=2$ 时,公式可变为: $V_A(U) = d_g/d_b + d_b$,为理想点模型;④当 $a=2, p=2$ 时,公式可变为: $V_A(U) = 1/[1 + d_g/d_b]^2$,为模糊优选模型。

根据 $V_A(U)$ 的计算结果,采用特征值公式,确定各模型下的特征值。 $V_A(U)$ 在不同级别上均存在相对隶属度, h 为 $V_A(U)$ 相应的级别, H_u 为评价对象 u 的特征值。公式如下:

$$H_u = \sum_{h=1}^c [V_A(U) \times h] \quad (2)$$

综上,可变参数的不同组合下共有4种模型,每种模型都可得到相应的特征值,将4种结果平均得到评价对象 u (如水环境承载力)的综合特征值 $\overline{H}_u$ (如 $\overline{H}_{\text{水环境承载力}}$)。可根据陈守煜等^[19-20]提出的判断准则公式(3)进一步划分综合特征值的评价等级:

$$\begin{cases} 1.0 \leq \overline{H}_u \leq 1.5, \text{ 归属于1级} \\ h - 0.5 < \overline{H}_u \leq h, \text{ 归属于} h \text{级, 偏}(h-1) \text{级} \\ h < \overline{H}_u \leq h + 0.5, \text{ 归属于} h \text{级, 偏}(h+1) \text{级} \\ c - 0.5 \leq \overline{H}_u \leq c, \text{ 归属于} c \text{级} \end{cases} \quad (3)$$

本文对水环境承载力划分了5个等级,根据式(3)划分得到的等级标准见表2。

表2 综合特征值等级划分

Table 2 Classification of comprehensive characteristic values

$\overline{H}_u$ 区间 Interval of $\overline{H}_u$	[1~1.5]	(1.5~2.5]	(2.5~3.5]	(3.5~4.5]	(4.5~5]
承载力等级 Grade of carrying capacity	低	较低	中	较高	高

2 结果与讨论

2.1 评价结果

由层次分析法和熵值法确定各指标权重(表1),将收集、计算得到的所有水资源、水环境、水生态各项指标数据(1998—2017年)代入可变模糊识别模型[式(1)、(2)]中,得到水资源、水环境和水生态要素特征值与水环境承载力综合特征值,结合承载力等级划分标准,得到水环境承载力评价结果,如图2所示。

由图2可见,白洋淀流域水环境承载力综合特征值从1998年的1.84提高到2017年的3.16,呈稳步上升趋势。其中,1998—2012年水环境承载力属较低承载区间,2013—2017年水环境承载力属于中承载区间且呈现显著上升。各要素方面,水资源、水环境和水生态要素的特征值分别由1998年为1.18、1.92和3.44变化为2017年的2.72、3.36和2.31;1998—2012年,水资源要素的承载力基本属于低或较低承载区间,水环境要素承载力处于较低承载区间,水生态要素处于中等承载区间,但呈下降趋势;2013—2017年,水资源和水环境要素承载力均提升到中等承载区间,水生态要素承载力继续下降,下降幅度有所减小。水资源要素承载力的提升主要是重复用水率和环境用水量占比这两个指标贡献所致,万元GDP化学需

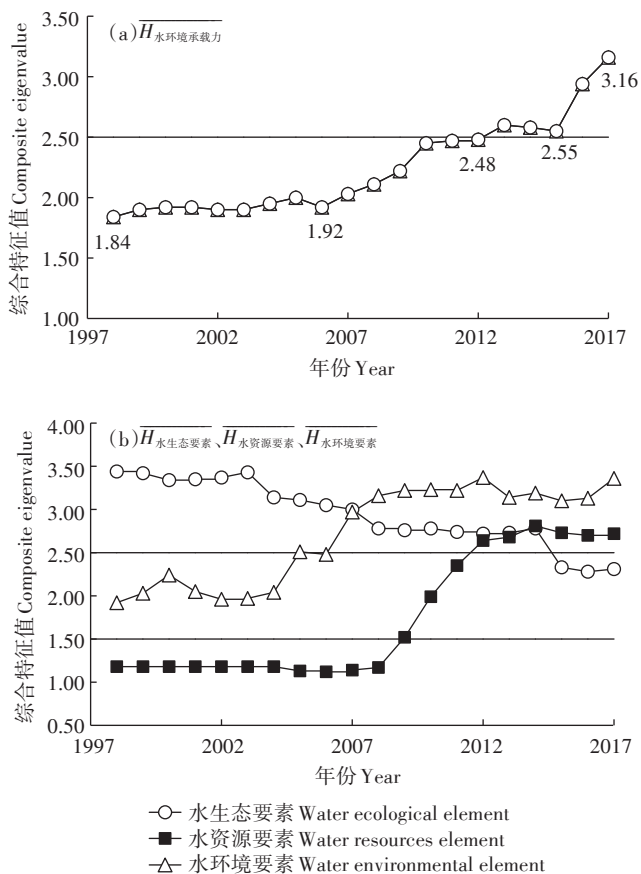


图2 评价结果

Figure 2 Evaluation results

氧量、氨氮排放量的降低和城镇污水集中处理率的提升推动了水环境要素承载力的提升,而建设用地面积增加,水域面积减少,使得水生态承载力有所下降。

2.2 讨论

(1)本文研究结果显示,白洋淀流域水环境承载力从1998年到2017年逐渐提升,从较低提升到中等承载力状态。这种趋势与张彦等^[25]的研究结果基本一致,其研究显示水环境承载力有所提升,但2001—2016年处于较弱承载水平;也与李翀等^[26]的结果基本一致,其结果显示1995—2004年的水环境承载力处于较低水平,但总体呈现出逐年增大的趋势。此二人的研究区域为保定市,代表了白洋淀流域面积的70%以上,研究区域基本与本文一致,本研究与其他相关专家的研究结果也基本一致,结果基本可靠。

造成结果略有不同的原因可能是指标选取和指标分级标准确定的不同。本文选取了水资源、水环境和水生态三方面指标,张彦等^[25]从人口、资源、社会经济和生态环境综合选取,指标部分重合,且突出了社会经济发展指标(如人均GDP、第三产业占比等),本

文未选取社会经济发展类指标,但选取了资源环境效率类指标,反映了社会经济活动对资源环境开发利用的集约化水平;指标分级方面也有不同,本文根据实际情况将水环境承载力分为5级,张彦等^[25]将其分为4级,因此本研究中的2012—2017年,已经逐步过渡到中等承载水平,与上述研究略有差别。李翀等^[26]采用模糊综合评价结合常规加权平均的综合评价法得出结果,数值越接近1越好,没有明确分级,研究结果为大致处于较低水平,与本研究基本一致。

(2)近20年,白洋淀流域水环境承载力呈稳步上升的趋势,2012—2017年明显提升。这主要是由于十八大以来,生态文明理念深入人心,国家加大了大清河流域的污染防治力度,出台了《水污染防治行动计划》(水十条)、《重点流域水污染防治规划(2016—2020年)》《海河流域综合规划(2012—2030年)》等系列文件,且深入开展了环保巡视与督察工作,推动出台了《河北省白洋淀综合整治专项行动方案》等,对白洋淀流域生态环境的保护和治理力度随之加大,水环境承载状况有所提升。而随着雄安新区的成立,有关污染治理、生态保护的标准与目标进一步提升,水资源调配与利用的渠道进一步拓展,北京、河北开展了大清河北洋淀流域水环境治理联合执法行动,京津冀水污染协同治理不断推进,预计水环境承载状态会有大幅提高。

不同于水资源与水环境要素承载状态的提升,水生态要素承载状态却呈现下降趋势。主要原因是水生态要素不同于水资源与水环境要素,流域生态系统的复杂性使得生态响应滞后于生态保护与修复措施的实施,且多年的不合理开发与利用使得水生态受损严重,下行趋势难以很快实现有效控制,实现恢复需要更多的努力与更长的时间。应在加强水资源集约利用的基础上,加强生态补水,保障河湖生态流量,落实城镇生活污水处理厂建设与提标改造,控制污染负荷,同时应科学规划与管理,控制流域开发强度,加强上游山区与平原地区植树造林,退还农业与城市建设侵占的湿地,扩大湿地面积,稳步提升流域生态系统承载能力。

(3)水环境承载力是一个相对模糊且组成复杂的评价主体,从研究方法上看,可变模糊识别模型在模糊集合论静态概念与理论上突破,通过评价得到复合特征值,并据此进行分级以判断水环境承载力的水平。它的优势是将要素的单一区间隶属度拓展到相邻区间的综合隶属度,将多种参数结合起来进行综合

评价,计算过程更为精细,使用该方法得到结果的稳定性和科学性都大大提高^[27-28]。结合本研究可见,该方法能够较为客观地反映水环境承载力的实际状况,避免了其他等级确定方法的缺陷,如利用最大隶属度原则确定等级易造成部分信息丢失,且同一级别内的优劣难以判断,利用可变模糊识别模型可进行比较客观可靠的水环境承载力评价。

3 结论

(1)本文提出了一种比较科学可行的基于可变模糊识别模型的流域水环境承载力评价方法,评价结果表明,1998—2017年,白洋淀流域水环境承载力呈上升趋势,其中,1998—2012年水环境承载力处于较低承载区间,2012—2017年水环境承载力处于中等承载区间,水资源和水环境要素的承载力均有所上升,而水生态要素的承载力有所下降。

(2)未来应进一步加强水资源的集约利用,保障河湖生态流量,加强城镇生活污水处理厂建设与提标改造,控制流域污染负荷,在此基础上,更应科学规划,控制流域开发强度,加强植树造林,退耕与退城还湿,逐步扩大湿地面积,稳步提升流域生态系统承载能力。

参考文献:

- [1] 崔凤军. 城市水环境承载力及其实证研究[J]. 自然资源学报, 1998(1): 58-62.
CUI Feng-jun. The carrying capacity of municipal water environment and its case study[J]. *Journal of Natural Resources*, 1998(1): 58-62.
- [2] 赵卫, 刘景双, 孔凡娥. 水环境承载力研究述评[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 47-50.
ZHAO Wei, LIU Jing-shuang, KONG Fan-e. Review on water environmental carrying capacity[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(1): 47-50.
- [3] Campbell D E. Emergy analysis of human carrying capacity and regional sustainability: An example using the state of Maine[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1998, 51: 531-569.
- [4] Rijsberman M A, Ven F H M V D. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2000, 20(3): 333-345.
- [5] Clarke A L. Assessing the carrying capacity of the Florida keys[J]. *Population & Environment*, 2002, 23: 405-418.
- [6] 曾维华, 王华东, 薛纪渝, 等. 环境承载力理论及其在湄洲湾污染控制规划中的应用[J]. 中国环境科学, 1998(S1): 71-74.
ZENG Wei-hua, WANG Hua-dong, XUE Ji-yu, et al. Theory of environment carrying capacity and its application of environmental planning on Meizhou Bay[J]. *China Environmental Science*, 1998(S1): 71-74.
- [7] 李新, 石建屏, 曹洪. 基于指标体系和层次分析法的洱海流域水环境承载力动态研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1338-1344.
LI Xin, SHI Jian-ping, CAO Hong. Water environment carrying capacity of Erhai Lake based on index system and analytic hierarchy process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(6): 1338-1344.
- [8] 汪嘉杨, 翟庆伟, 郭倩, 等. 太湖流域水环境承载力评价研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1979-1987.
WANG Jia-yang, ZHAI Qing-wei, GUO Qian, et al. Study on water environmental carrying capacity evaluation in Taihu Lake Basin[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(5): 1979-1987.
- [9] 孟菲, 赵海霞, 牛铭杰, 等. 南京市环境承载力评价及其成因分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(9): 4007-4016.
MENG Fei, ZHAO Hai-xia, NIU Ming-jie, et al. Evaluation of environmental carrying capacity in Nanjing City and its cause analysis[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(9): 4007-4016.
- [10] 龙腾锐, 姜文超. 水资源(环境)承载力的研究进展[J]. 水科学进展, 2003(2): 249-253.
LONG Teng-rui, JIANG Wen-chao. Advances in water resources and water environmental carrying capacity[J]. *Advances in Water Science*, 2003(2): 249-253.
- [11] 王俭, 李雪亮, 李法云, 等. 基于系统动力学的辽宁省水环境承载力模拟与预测[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2233-2240.
WANG Jian, LI Xue-liang, LI Fa-yun, et al. Simulation and prediction of water environmental carrying capacity in Liaoning Province based on system dynamics model[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2233-2240.
- [12] 张文国, 杨志峰. 基于指标体系的地下水环境承载力评价[J]. 环境科学学报, 2002(4): 541-544.
ZHANG Wen-guo, YANG Zhi-feng. Assessment on bearing capacity of ground water environment based on indicator system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002(4): 541-544.
- [13] Zhang J, Zhang C L, Shi W L, et al. Quantitative evaluation and optimized utilization of water resources-water environment carrying capacity based on nature-based solutions[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 96-107.
- [14] Wang Y M, Zhou X D, Engel B. Water environment carrying capacity in Bosten Lake Basin[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 574-583.
- [15] 崔丹, 李瑞, 陈岩, 等. 基于结构方程的流域水环境承载力评价: 以湟水流域小峡桥断面上游为例[J]. 环境科学学报, 2019, 39(2): 624-632.
CUI Dan, LI Rui, CHEN Yan, et al. An evaluation of the water environmental carrying capacity using structural equation modeling: A case study of the upstream areas of Xiaoxia Bridge Section in Huangshui River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(2): 624-632.
- [16] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报, 2004(3): 65-70.
JIN Ju-liang, WEI Yi-ming, DING Jing. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (3): 65-70.

- [17] 徐志青, 刘雪瑜, 袁 鹏, 等. 南京市水环境承载力动态变化研究[J]. 环境科学研究, 2019, 32(4): 557-564.
XU Zhi-qing, LIU Xue-yu, YUAN Peng, et al. Dynamic change of water environment carrying capacity in Nanjing City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(4): 557-564.
- [18] 李清龙, 闫新兴. 水环境承载力量化方法研究进展与展望[J]. 地学前缘, 2005(增刊1): 43-48.
LI Qing-long, YAN Xin-xing. Progress and prospect of research on quantifying method of Water Environmental Carrying Capacity (WECC)[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005(Suppl 1): 43-48.
- [19] 陈守煜, 胡吉敏. 可变模糊评价法及在水资源承载能力评价中的应用[J]. 水利学报, 2006(3): 264-271, 277.
CHEN Shou-yu, HU Ji-min. Variable fuzzy assessment method and its application in assessing water resources carrying capacity[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006(3): 264-271, 277.
- [20] 陈守煜. 可变模糊集理论与可变模型集[J]. 数学的实践与认识, 2008(18): 146-153.
CHEN Shou-yu. Theory of variable fuzzy sets and variable model sets [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2008(18): 146-153.
- [21] 贾振邦, 赵智杰, 李继超, 等. 本溪市水环境承载力及指标体系[J]. 环境保护科学, 1995(3): 8-11, 76.
JIA Zhen-bang, ZHAO Zhi-jie, LI Ji-chao, et al. Water environment carrying capacity and index system of Benxi City[J]. *Environmental Protection Science*, 1995(3): 8-11, 76.
- [22] Saaty T. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1980.
- [23] ZOU Zhi-hong, YUN Yi, SUN Jing-nan. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006(18): 1020-1023.
- [24] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
CHEN Shou-yu. Engineering fuzzy set theory and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.
- [25] 张 彦, 李明然, 李新德. GA-NN模型在保定市水环境承载力评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 131-138.
ZHANG Yan, LI Ming-ran, LI Xin-de. Application of GA-NN model in evaluation of water environment carrying capacity in Baoding City [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(5): 131-138.
- [26] 李 翀, 彭 静, 赵奎霞, 等. 保定市水环境承载可持续性分析[J]. 水资源保护, 2007(1): 49-52, 56.
LI Chong, PENG Jing, ZHAO Kui-xia, et al. Assessment on sustainability of water environment carrying capacity for Baoding City[J]. *Water Resources Protection*, 2007(1): 49-52, 56.
- [27] 王文川, 徐冬梅, 陈守煜, 等. 可变模糊集理论研究进展及其在水科学中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(5): 89-94.
WANG Wen-chuan, XU Dong-mei, CHEN Shou-yu, et al. Research advances and applications in water science of variable fuzzy set theory [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(5): 89-94.
- [28] 盖 美, 钟利达, 柯丽娜. 中国海洋资源环境经济系统承载力及协调性的时空演变[J]. 生态学报, 2018, 38(22): 7921-7932.
GAI Mei, ZHONG Li-da, KE Li-na. Spatio-temporal law and coordinated development of the carrying capacity of marine environmental resource and economic system in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(22): 7921-7932.