

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.03.003

基于模糊隶属度的白洋淀生态干旱评价函数研究

张丽丽¹ 殷峻暹² 侯召成³

(1.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098;2.中国水利水电科学研究院水资源研究所,北京 100038;
3.南水北调中线干线工程建设管理局信息中心,北京 100038)

摘要:针对白洋淀生态环境日趋恶化、生态系统安全受到威胁的现实,通过构建关于渔业产量和芦苇面积 2 个指标的生态系统健康评价指标体系,计算生态系统健康相对隶属度,进而对生态系统健康相对隶属度与年均水位进行回归分析,结果表明两者呈指数函数关系,函数形式为 $f(x) = e^{1.251x - 11.712}$,以此为基础,确定生态干旱评价函数。结合白洋淀历年水位观测资料,分析白洋淀生态干旱演变趋势及主要成因。分析结果表明:白洋淀生态系统呈持续干旱趋势;入淀水量锐减是造成白洋淀干旱的主要原因,虽然多次实施应急生态补水,但并没有从根本上缓解白洋淀生态系统干旱状态。

关键词:生态干旱;生态健康;模糊评价;白洋淀

中图分类号: P426.616;P941.78

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2010)03-0252-06

湿地是自然界最富生物多样性和生态功能最强的生态系统,它不仅提供丰富的动植物资源,还具有调蓄洪水、调节气候、涵养水源、净化水质等多种生态系统服务功能。水是湿地形成的根本原因,也是湿地生态演化过程的主要控制因子,水决定了湿地生态系统的脆弱性和易变性^[1]。因此,正确认识湿地与水的关系,成为湿地恢复和重建的重要内容。目前,对于湿地的研究主要集中在生态环境需水量的核算及分级标准的确定等方面。崔保山等^[2-3]对湿地生态环境需水量进行了分类,并根据各种类型的特定功能和价值对各自的生态用水量进行了计算与分级。周林飞等^[4]将生态环境需水量分为存量和通量 2 个部分,分析了扎龙湿地生态环境需水量安全阈值,并分为最小、中等和理想 3 个级别。

随着工农业生产的发展,人类对湿地的开发利用程度不断增大,对湿地的破坏日趋严重,直接导致湿地生态环境日益退化,生态环境功能不断降低。湿地及其生态系统退化是一个长期渐进变化过程,但目前生态环境需水量和生态水位的分级标准具有很大的跳跃性,不能反映生态系统变化的连续性特征。鉴于此,本文针对因水量变化引起的湿地生态环境问题,结合白洋淀湿地的实际情况,建立生态系统健康评价指标体系,构建生态干旱评价函数,实现对白洋淀湿地生态干旱的连续评价,分析白洋淀生态干旱变化趋势及主要成因,旨在为湿地生态安全评价提供一条途径,为保护和合理利用湿地资源提供科学依据,为实施白洋淀湿地生态补水提供理论基础。

1 研究区域概况

白洋淀位于河北省东部,属于大清河水系,总面积 366 km²(十方院大沽高程 10.5 m),是华北地区面积最大的淡水湿地,行政上隶属保定市安新县、高阳县、雄县、容城县和沧州市的任丘县管辖,其中保定市安新县内面积占总面积的 93%,当水位为 8.8 m(大沽高程)时,85.6%的水域分布于安新县境内。白洋淀由 140 多个大小不等的湖泊、3 700 多条沟壕组成,其可调蓄水库库容 2.9 亿 m³。

20 世纪 60 年代,白洋淀湿地年均降雨量为 618 mm,2000—2008 年年均降雨量只有 403 mm,减少了约 1/3。

收稿日期:2009-05-18

基金项目:“十一·五”国家科技支撑计划(2006BAB04A07,2008BAB29B08);国家自然科学基金创新研究群体科学基金(50721006);国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2006CB403404);水利部“948”项目(200737)

作者简介:张丽丽(1983—),女(蒙古族),内蒙古赤峰人,博士研究生,主要从事生态水利研究。E-mail:zhangliliyu90@163.com

20 世纪 50 年代,白洋淀年均入淀水量 24.5 亿 m^3 ^[6],到 90 年代下降到 8.47 亿 m^3 ,最近几年几乎为零.由于入淀水量和降水量的减少,使得白洋淀水位持续下降(图 1).20 世纪 50 年代以来,白洋淀 15 个年份发生干淀,特别是 1983—1988 年连续 6 个年份干涸^[7].从图 1(缺少 1944—1949 年水位统计资料,白洋淀干淀水位一律按 5.5 m 统计)可以看出,白洋淀水位变化分为 3 个阶段:20 世纪 60 年代以前,上游雨量充沛,人类活动强度小,白洋淀年均水位达到 8.3 m;60—80 年代干淀以前,年均水位下降到 7.8 m;1991—2008 年,先后 19 次从王快水库、西大洋水库、岳城水库、安格庄水库以及黄河调水向白洋淀补水,累计补水 11.3 亿 m^3 ,白洋淀生态环境恶化有所缓解,但淀水位仍持续下降,年均水位只有 7.3 m.

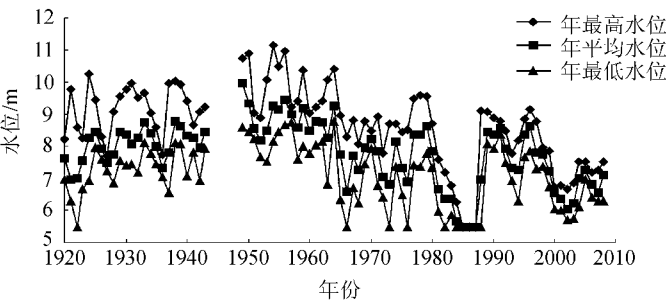


图 1 白洋淀历年水位变化

Fig. 1 Change of water levels of Baiyangdian

20 世纪 60 年代以来,由于淀区周边耕地和农业化肥施用量增加,农业面源污染加剧,加上上游工业和生活污水排放量的增加^[8],加剧了白洋淀水体的富营养化程度,已普遍不能满足功能要求.因此,降水量和入淀水量的逐年减少以及污染排放量的逐年增加,两方面共同作用使得白洋淀水环境持续恶化.

2 白洋淀生态系统健康评价

白洋淀主要产品是鱼和芦苇.芦苇是白洋淀地区的关键物种,素有“金条”之称.从经济角度看,芦苇是当地农民收入的主要来源^[9];从生态角度讲,芦苇湿地对白洋淀生态环境也有着极为重要的作用,已有研究结果^[10]表明,大面积苇地对上游来水中的营养物质有强烈的截留作用,可以净化水体.白洋淀光热适宜,水域辽阔,有利于鱼类等水生物繁殖生长,盛产鱼、虾、蟹、贝,是我国北方重要的淡水水产品基地之一^[11].鉴于白洋淀湿地缺少长系列的生态观测数据,结合已收集资料情况,选取渔业产量和芦苇面积 2 个指标建立评价指标体系,计算不同年份白洋淀湿地生态系统健康相对隶属度,评价生态系统健康状况.

1949—1962 年,白洋淀湿地的芦苇产量稳步上升,1963 年特大洪水使芦苇在 1963 年和 1964 年大幅度减产,之后白洋淀又经历“向洼地要粮,向淀底要地”的灾难,使得大面积的苇田被开垦为耕地^[12],白洋淀苇田面积在 1970 年以后受人类活动影响较大,不能真实反映自然水文情势的变化对芦苇生长的影响.鉴于此,根据 1950—1970 年白洋淀的渔业产量和芦苇面积长系列数据,建立模糊评价矩阵,依据模糊评价原理^[13-14],评价白洋淀湿地生态系统健康状况.

2.1 模糊评价方法

根据白洋淀湿地生态系统特点及资料收集情况,设定评价对象集 $O = \{1950 \text{ 年}, 1951 \text{ 年}, \dots, 1970 \text{ 年}\}$,指标集 $U = \{\text{渔业产量}, \text{苇地面积}\}$,评语集 $V = \{\text{健康}, \text{不健康}\}$,因此,白洋淀生态系统健康评价属于两级模糊评价模式.具体步骤如下:

a. 将原始指标数据进行归一化处理,得到模糊关系判断矩阵.

对于递减型指标,相对隶属度 r_{ij} 的计算公式为

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{\max}} \tag{1}$$

对于递增型指标,相对隶属度 r_{ij} 的计算公式为

$$r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{x_{\max}} \tag{2}$$

本次进行生态系统健康评价选取的 2 个指标均为递减型指标,模糊关系判断矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij})$$

(3)

b. 考虑各指标值权重 w 后 ,建立综合模糊评价矩阵 U :

$$U = WR$$

(4)

因本文生态系统健康评价指标集只有 2 个指标 ,选择等权重处理 .采用欧式距离计算相对隶属度 u_j ,计算公式为

$$u_j = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - 1)]^2}{\sum_{i=1}^m (w_i r_{ij})^2}}$$

(5)

式中 w_i 为指标 i 的权重 .

2.2 模糊评价结果

1950—1970 年白洋淀湿地生态系统健康相对隶属度结果见表 1.

表 1 1950—1970 年生态系统健康相对隶属度

Table 1 Relative membership degrees of ecosystem health from 1950 to 1970

年 份	年均水位/m	相对隶属度	年 份	年均水位/m	相对隶属度	年 份	年均水位/m	相对隶属度
1950	9.32	0.699 6	1957	8.98	0.579 6	1964	9.26	0.420 7
1951	8.54	0.858 6	1958	8.58	0.733 9	1965	7.75	0.354 0
1952	8.18	0.476 0	1959	9.18	0.951 6	1966	6.58	0.044 3
1953	8.48	0.293 0	1960	8.49	0.775 8	1967	7.69	0.081 2
1954	9.27	0.796 2	1961	8.79	0.662 9	1968	7.28	0.033 8
1955	9.16	0.927 1	1962	8.73	0.572 4	1969	7.95	0.034 6
1956	9.45	0.846 9	1963	8.25	0.526 4	1970	8.24	0.049 7

应用 SPSS13.0 分析软件对生态系统健康相对隶属度与年均水位进行回归分析 ,结果表明指数曲线拟合效果最佳 ,拟合优度为 0.610 ,拟合结果见图 2.从图 2 可以看出 ,当年均水位在 6.58~9.45 m 范围内 ,随着年均水位的增加 ,生态系统健康相对隶属度呈指数曲线上升 ,曲线函数形式为 $f(x) = e^{1.251x - 11.712}$.

3 白洋淀生态干旱评价函数

3.1 生态水位模糊集描述

生态水位是一个模糊的概念 ,作为整个论域 U (水位集合)的一个模糊子集 A ,可以用隶属函数加以描述 .对于任何一个元素 $u,u \in U$,可以确定一个映射 :

$$\mu_A : U \rightarrow [0, 1]$$
$$u \rightarrow \mu_A(u) \in [0, 1]$$

式中 $\mu_A(u)$ 为元素 u (水位值)对于模糊子集 A (生态水位子集)的隶属度 ,其物理意义是 :论域 U 中的每个元素对应着闭区间 $[0, 1]$ 中的一个量纲一的数 ,此数表示元素 u 对于生态水位子集 A 的隶属程度 .若 $\mu_A(u) = 1$ 则表示这一水位完全属于生态水位子集 ,若 $\mu_A(u) = 0$ 则表示这一水位完全不属于生态水位子集 .若 $0 < \mu_A(u) < 1$,说明这一水位属于生态水位子集的程度是 $\mu_A(u)$.

3.2 生态干旱评价函数的建立

以生态水位表征生态系统健康程度 ,建立生态水位隶属函数 ,评价不同水位条件下 ,白洋淀生态系统潜在的生态风险 .根据 2.2 节研究结果 ,白洋淀生态系统健康相对隶属度与年均水位存在一定的相关关系 ,符合指数函数形式 ,所以确定生态水位隶属函数形式为 $f(x) = e^{b_0x + b_1}$,根据白洋淀湿地的实际情况 ,确定参数

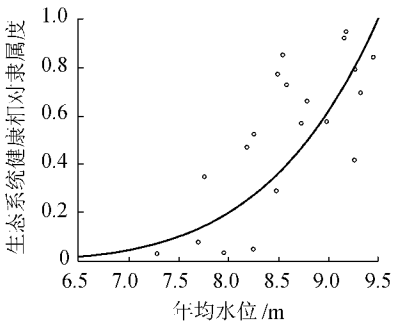


图 2 生态系统健康相对隶属度与年均水位拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves for relative membership degrees of ecosystem health and average water levels

b_0 和 b_1 .

据调查,白洋淀渔业要求水位 8.0 m 以上,苇田大部分在 8.0 m 高程以上,只有少部分在 7.0~8.0 m 之间,芦苇要求水深为 0.5~1.0 m,即水位以 8.5 m 为宜^[15];1970 年以前,白洋淀受人类活动影响较小,生态系统健康基本没有受到破坏,据 1919—1970 年白洋淀长期水位观测资料,年平均水位为 8.24 m.综合考虑以上情况,当白洋淀年均水位高于 8.5 m 时,不会发生干旱,也不会因干旱而危及生态系统安全.鉴于此,确定白洋淀年均水位 8.5 m 隶属于生态水位的隶属度为 1.白洋淀淀底大沽高程为 5.5 m,确定白洋淀水位 5.5 m 隶属于生态水位的隶属度为 0.01.根据 8.5 m 及 5.5 m 2 个年均水位值确定参数 $b_0 = 1.53$, $b_1 = -13$,因此,白洋淀生态水位隶属函数为 $f(x) = e^{1.53x - 13}$,函数分布见图 3.

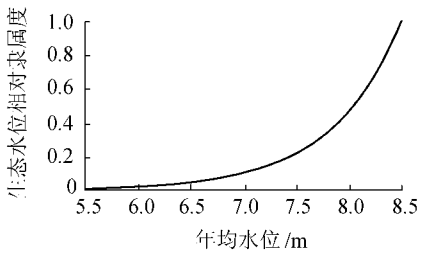


图 3 生态水位隶属函数

Fig. 3 Membership function of ecological water levels

白洋淀生态干旱与水位(水量)直接相关.水位越高,隶属于生态水位的隶属度越大,生态干旱发生的概率就越低,生态系统安全风险越小;反之,水位越低,隶属于生态水位的隶属度越小,生态干旱发生的概率越大,生态系统安全风险越大.因此,可以用生态水位隶属函数描述生态干旱状态,评价生态干旱发生程度,白洋淀生态干旱评价函数可以描述为 $g(x) = 1 - e^{1.53x - 13}$, x 为年均水位.

4 白洋淀生态干旱趋势及成因分析

利用 1920—2008 年白洋淀长系列水位观测资料,根据生态干旱评价函数 $g(x) = 1 - e^{1.53x - 13}$,分析白洋淀历年生态干旱情况及演变趋势.结果如图 4 所示(缺少 1944—1949 年水位统计资料,白洋淀干涸水位一律按 5.5 m 统计;若年均水位高于 8.5 m,白洋淀不存在因水量短缺引起的生态干旱问题,所以年均水位高于 8.5 m 的生态干旱指数全部为 0).由图 4 可知,1920—2008 年,白洋淀生态干旱指数呈上升趋势,生态干旱持续恶化.1920—1970 年,生态干旱指数高于多年平均值的只有 16 个年份,占 32%,且生态干旱年份与非干旱年份交替出现,没有出现生态干旱指数持续偏高的情况.而 1970—2008 年,生态干旱指数高于多年平均值的有 30 个年份,比例接近 77%,且在此期间,白洋淀出现 2 个连续生态干旱期:1983—1988 年及 2000 年至今.1983—1988 年,白洋淀连续 7 年干涸,生态干旱指数接近 1;2000 年以后,尽管对白洋淀多次实施生态补水,但生态干旱指数仍然持续偏高,生态干旱状况没有得到缓解.

引起白洋淀生态干旱的因素不外乎自然和人为两个方面.由图 5 可知,入淀水量^[16]年际变化较大,而白洋淀地区降水量(不是白洋淀流域)年际变化相对较小.1974—2005 年,生态干旱指数与年降水量关系不明显,相关系数只有 -0.20;生态干旱指数与年入淀水量相关关系显著,相关系数为 -0.71,生态干旱指数随着入淀水量增加而下降,随着入淀水量减少而上升.1996 年,入淀水量达到 25 亿 m^3 ,白洋淀生态干旱指数基本为 0;2000 年以后,入淀水量仅有 1.5 亿 m^3 ,生态干旱指数接近 1.由此可以看出,入淀水量锐减是造成白洋淀生态干旱的主要原因.

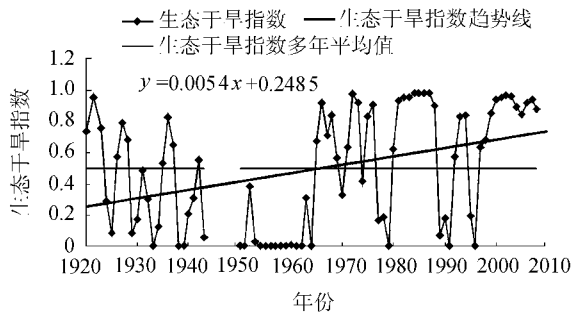


图 4 白洋淀历年生态干旱指数变化
Fig.4 Change of ecological drought indices of Baiyangdian

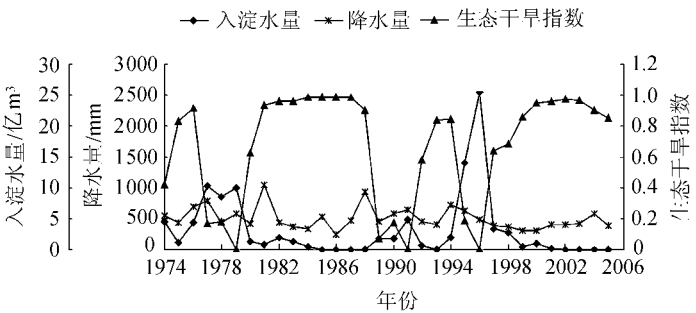


图 5 1974—2005 年白洋淀入淀水量、降水量与生态干旱指数的关系
Fig.5 Relationships between incident water quantity, precipitation and ecological drought index in Baiyangdian from 1974 to 2005

20世纪50年代以来,由于上游修库建坝和工农业引水的增加,使得白洋淀实际入淀水量呈减少趋势^[6],且无论是特枯水年(95%)、枯水年(75%)还是平水年(50%),白洋淀的入淀水量均无法满足生态环境需水要求^[17]。因此,必须考虑通过实施生态补水提高白洋淀湿地的抗干旱能力,减缓由于干旱对湿地生态系统造成的威胁。

5 结 论

a. 构建关于渔业产量和芦苇面积2个指标的生态系统健康评价指标系,计算1950—1970年生态系统健康相对隶属度,然后对白洋淀生态系统健康相对隶属度与年均水位进行回归分析,结果表明符合指数函数关系,拟合优度为0.610,函数形式为 $f(x) = e^{1.251x - 11.712}$ 。

b. 以生态水位表征生态系统健康程度,确定生态水位隶属函数为 $f(x) = e^{1.53x - 13}$,构建白洋淀生态干旱评价函数为 $g(x) = 1 - e^{1.53x - 13}$,实现对白洋淀生态干旱的连续评价。

c. 白洋淀生态干旱趋势分析结果表明,20世纪60年代以后,白洋淀出现2个连续生态干旱期:1981—1988年及2000年至今;目前,白洋淀生态干旱形势严峻,生态干旱状况没有得到缓解。

d. 引起白洋淀生态干旱的主要因素是入淀水量的锐减,因此,实施生态补水调度增加入淀水量,对于缓解白洋淀生态干旱状况具有重要作用。

e. 受资料的限制,白洋淀生态系统健康评价只考虑渔业产量和芦苇面积2个因素,因指标选取的片面性可能会对评价结果产生影响,但对于无资料或少资料地区生态系统健康评价有一定借鉴价值。

f. 因水量只能反映生态系统干旱状态,要实现生态系统安全的全面评价,需要综合考虑水量、水质对白洋淀生态系统的影响,生态安全评价函数还需要不断的完善发展。

参考文献:

- [1] 李加林,赵寒冰,刘闯,等.辽河三角洲湿地生态环境需水量变化研究[J].水土保持学报,2006,20(2):129-134.(LI Jia-lin, ZHAO Han-bing, LIU Chuang, et al. Effects of wetlands changes on eco-environmental water requirement in Liaohe delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2):129-134.(in Chinese))
- [2] 崔保山,李英华,杨志峰.基于管理目标的黄河三角洲湿地生态需水量[J].生态学报,2005,25(3):606-614.(CUI Bao-shan, LI Ying-hua, YANG Zhi-feng. Management-oriented ecological water requirement for wetlands in the Yellow River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3):606-614.(in Chinese))
- [3] 崔保山,杨志峰.湿地生态环境需水量等级划分与实例分析[J].资源科学,2003,25(1):21-28.(CUI Bao-shan, YANG Zhi-feng. The classification and case study on eco-environmental water requirement of wetland[J]. Resources Science, 2003, 25(1):21-28.(in Chinese))
- [4] 周林飞,许士国,李青山,等.扎龙湿地生态环境需水量安全阈值的研究[J].水利学报,2007,38(7):845-851.(ZHOU Lin-fei, XU Shi-guo, LI Qing-shan, et al. Safety threshold of eco-environmental water requirement in wetland[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7):845-851.(in Chinese))
- [5] 金相灿.湖泊环境[M].北京:海洋出版社,1993:14-19.
- [6] 李英华,崔保山,杨志峰.白洋淀水文特征变化对湿地生态环境的影响[J].自然资源学报,2004,19(1):62-68.(LI Ying-hua, CUI Bao-shan, YANG Zhi-feng. Influence of hydrological characteristic change of Baiyangdian on the ecological environment in wetland[J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(1):62-68.(in Chinese))
- [7] 魏昌林,郭学恩,陈雪英.中国南水北调[M].北京:中国农业出版社,2000:40-53.
- [8] 赵建民,付学功,李瑞森.白洋淀水环境承载能力计算分析[J].水科学与工程学报,2007(6):17-20.(ZHAO Jian-min, FU Xue-gong, LI Rui-seng. Calculating and analysis of Baiyangdian water environment carrying capacity[J]. Water Science and Engineering Technology, 2007(6):17-20.(in Chinese))
- [9] 徐卫华,欧阳志云, VAN DUREN I, 等.白洋淀地区近16年芦苇湿地面积变化与水位的关系[J].水土保持学报,2005,18(4):181-184.(XU Wei-hua, OUYANG Zhi-yun, VAN DUREN I, et al. Reed land change and its relationship to water level in Baiyangdian lake since 1987[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 18(4):181-184.(in Chinese))
- [10] YIN Cheng-qing, LAN Zhi-wen. The nutrient retention by ecotone wetlands and their modification for Baiyangdian lake restoration[J]. Water Science and Technology, 1995, 32(3):159-167.
- [11] 李建国,李贵宝,崔慧敏,等.白洋淀芦苇湿地退化及其保护研究[J].南水北调与水利科技,2004,2(3):35-38.(LI Jian-guo,

LI Gui-bao ,CUI Hui-min ,et al. Degradation of reed wetland and protection in Baiyangdian[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology 2004 2(3) 35-38.(in Chinese))

[12] 李建国,李贵宝,刘芳,等.白洋淀芦苇资源及其生态功能与利用[J].南水北调与水利科技,2004,2(5) 37-40.(LI Jian-guo , LI Gui-bao ,LIU Fang ,et al. Reed resources and its ecological function & utilization in Baiyangdian lake[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology ,2004 2(5) 37-40.(in Chinese))

[13] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998.

[14] 陈守煜.系统模糊决策理论与应用[M].大连:大连理工大学出版社,1994.

[15] 张玉田.浅谈白洋淀汛后蓄水位[J].河北水利水电技术,2002(2):21-22.(ZHANG Yu-tian. Talking about Baiyangdian storage level after the flood season[J].Hebei Water Resources and Hydropower Technology ,2002(2) 21-22.(in Chinese))

[16] 梁宝成,孙雪峰.白洋淀水生态系统危机及其预警[J].南水北调与水利科技,2007,5(4):57-60.(LIANG Bao-cheng , SUN Xue-feng. Baiyangdian water eco-system crisis and early warning[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology , 2007 5(4) 57-60.(in Chinese))

[17] 刘立华,程伍群,刘春光.白洋淀当前水量供需状况的研究[J].南水北调与水利科技,2005,3(3):22-23.(LIU Li-hua , CHENG Wu-qun , LIU Chun-guang. Study on the water supply & requirement of the Baiyangdian lake[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology 2005 3(3) 22-23.(in Chinese))

Ecological drought evaluation function of Baiyangdian based on fuzzy membership degree

ZHANG Li-li¹, YIN Jun-xian², HOU Zhao-cheng³

- (1. College of Hydrology and Water Resources , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Department of Water Resources , China Institute of Water Resources and Hydropower Research , Beijing 100038 , China ;
3. Information Center , Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project , Beijing 100038 , China)

Abstract : With regard to the reality of the increasingly deteriorating eco-environment and threatened ecosystem security of the Baiyangdian wetland , an ecosystem health evaluation index system for fishery production and reed areas was established. The relative membership degree of ecosystem health was calculated. The regression analysis for the relative membership degree of ecosystem health and the average annual water level was performed , and they exhibited an exponential function in the form of $f(x) = e^{1.251x - 11.712}$. On this basis , the ecological drought evaluation function was determined. The ecological drought evolution trend and the main causes of deterioration of the Baiyangdian wetland were analyzed according to observed water levels in past years . The results show that the ecosystem of the Baiyangdian wetland has a trend of continuous drought. The main reason lies in the sharp decrease in the quantity of water flowing into Baiyangdian. The drought of the Baiyangdian ecosystem has not been fundamentally relieved despite much supplementation of ecological water.

Key words : ecological drought ; ecological health ; fuzzy evaluation ; Baiyangdian