

基于马尔可夫过程的湖泊生态需水保障不确定性研究

何山, 尹心安, 李浩, 张恩泽

(北京师范大学环境学院 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 湖泊生态需水对维持其基本生态功能具有重要作用, 保障生态需水已成为湖泊生态保护的重要组成部分。目前湖泊生态需水的保障方法都是同一时间尺度下维持一个确定的水量, 但湖泊水位是一个随机过程, 其生态状况与湖泊水位波动密切相关, 随着水位波动, 湖泊生态系统的结构和功能在不断变化, 导致其生态需水量也发生变化, 只确定一个生态水量, 不足以应对湖泊生态需水量未来可能出现的各种情况, 也无法应对未来生态需水保障的不确定性, 亟需对湖泊生态需水进行不确定性研究, 以保障不同时期的生态需水量。以白洋淀为例, 将其水位划分为5个区间, 代表5个水位时期, 再分析各时期的生态环境状况, 得出每个时期有利于湖泊生物多样性的生态需水量。结果表明, 白洋淀在枯水期、偏枯期、平水期、偏丰期、丰水期的生态水位分别为6.347、6.681、7.276、8.617、9.177 m。根据马尔可夫过程, 利用改进加权马尔可夫链模型, 计算出未来湖泊水位处于各个时期的概率, 从而确定湖泊生态需水量的保障程度, 并对未来生态需水保障情况进行预测。

关键词: 生态需水; 白洋淀; 加权马尔可夫

中图分类号: X143, TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2020)05-0013-08

由于世界人口数量的激增以及人类活动逐渐加剧, 相应的供水量急剧增加, 造成湖泊水量和面积减小、生态环境严重恶化 (Shear et al, 2003; 卢书兵等, 2015; 高化雨等, 2019; Jing et al, 2019); 保护湖泊并维持其生态系统健康已经成为当今社会刻不容缓的任务 (Muqi et al, 1998; Xu et al, 2001; 马育军和李小雁, 2016; Zhang et al, 2019; 温超男等, 2020)。保障湖泊生态需水量可以维持其生态系统的良性循环, 满足湖泊生态需水能够维持其基本生态功能。因此, 保障湖泊生态需水量是维护湖泊健康的前提条件 (Liu & Yang, 2002)。

目前, 对湖泊生态需水的研究主要集中在核算方面, 对生态需水保障的关注较少 (Liu & Yang, 2002; Si et al, 2015; Sajedipour et al, 2017; Liu et al, 2019; 杨薇等, 2020)。诸多学者对湖泊生态需水保障措施和方法进行了大量研究 (Hu et al, 2012; 魏晓燕等, 2013; Dai et al, 2016; 张建永等, 2017; 杨泽凡等, 2018)。这些研究大部分都是建立生态需水保障措施体系 (张浩等, 2016; 孔令健, 2019; 郭亚男

等, 2020); 或是假定在固定生态需水的情况下, 利用水库调度或其他方法对湖泊进行补水 (Yang & Cai, 2011), 没有从不同时期考虑生态需水的保障, 也无法预测未来生态需水保障情况。然而, 湖泊不同时期具有不同的主要生态功能, 需要不同的生态需水来保障其相应的生态功能; 另一方面, 相对于以往湖泊生态需水的确定性研究, 对湖泊生态需水进行不确定性研究, 可以更好地应对湖泊未来的各种情况。因此, 建立适用于未来的湖泊生态需水保障方法是当前研究的重点。

本文基于加权马尔可夫链模型, 推测湖泊未来生态需水保障程度, 以实现湖泊生态需水保障的不确定性研究。马尔可夫过程描述了不同状态之间转移规律的随机过程, 适用于随机波动较大的预测, 广泛应用于降雨、径流等水文事件的预测 (Foufoula-georgiou & Lettenmaier, 1987; Tabari et al, 2015; Arya & Zhang, 2017)。在此基础上, 有学者对马尔可夫过程进行修正, 建立了加权马尔可夫链模型, 从而提高预测降雨、径流等水文事件的精确度 (Ali et al, 2018; 杜旭等, 2020); 也有研究将马尔可夫过程用于湖泊极端洪水水位的估计 (Wu et al, 2019)。据此, 本文认为湖泊当前的水位状态与上个时间的水位状态相关, 从而建立湖泊水位序列的马尔可夫过程。

以往研究通常采用一个确定的生态水位值, 有学者认为把湖泊水位保持在这一生态水位值时最为

收稿日期: 2020-05-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0404505); 国家自然科学基金创新研究群体项目 (51721093)。

作者简介: 何山, 1991年生, 女, 博士研究生, 研究方向为河湖水生态保护。E-mail: jinsefengbao@163.com

通信作者: 尹心安, 1981年生, 男, 教授, 主要从事生态水利、水生态系统保护与修复研究。E-mail: yinxinan@bnu.edu.cn

理想(衷平等,2005)。然而,湖泊水位一直处于动态波动中,其生态水位不应该是一个固定值,水位波动有利于维持湖泊生物多样性。有研究表明,在一定情况下,间歇性淹没区的大型底栖动物多样性和丰富度高于持续性淹没区(刘息冕,2013)。因此,在保护湖泊生态系统健康的研究中,水位波动是必然的,需要对不同水位状态下的生态需水进行研究。本文把湖泊水位划为分多个时期,每个时期中都有适合其生物生长的生态需水量。然后根据马尔可夫过程,建立适用于水位的加权马尔可夫链模型,推测出湖泊未来水位可能处于何种时期,从而计算未来生态需水量的保障程度。本文以白洋淀为案例,将不确定性纳入生态需水研究中,并基于马尔可夫过程对白洋淀未来生态需水保障程度进行预测,以更好地应对生态需水保障的不确定性。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

白洋淀(113°39'~116°12'E,38°3'~40°4'N)属大清水系,位于海河流域大清水系的九河下梢,是我国北方最大的浅水草型湖泊,素有“华北之肾”的美誉,具有缓洪滞沥、调节气候、蓄水兴利、渔苇生产、旅游景观、保护生物多样性等多种重要的生态功能(Hu et al,2010;Bai et al,2016);白洋淀总面积为366 km²,平均水深仅为2.84 m,流域多年平均蒸发量为1 500~2 000 mm。白洋淀水位数据由大清河管理处提供,白洋淀水位-水量关系显示,淀内水位6 m时,蓄水总量仅0.18×10⁸ m³;淀内水位8 m时,蓄水总量2.30×10⁸ m³;淀内水位10 m时,蓄水总量8.03×10⁸ m³(衷平等,2005)。

1.2 湖泊水位时期划分

本文将湖泊水位划分出能反映丰枯状况的区间,以概化未来湖泊可能存在的各种情况。首先利用历史数据,对湖泊水位进行划分。参考水文学中径流的划分方法(孙新新等,2006),将湖泊水位分为5个时期,即枯水期、偏枯期、平水期、偏丰期、丰水期,对应5种状态($k=1,2,3,4,5$)。采用均值标准差法(表1第三列),把历史湖泊水位分为与5个时期相对应的5个区间,并确定历史数据各水位所处的状态。

1.3 各时期生态需水量确定

考虑到湖泊水位应该处于动态变化中,且水位波动有利于维持湖泊生物多样性。根据时期划分,湖泊水位应当以不同概率出现在5个时期中。假定

每个时期中都有适合湖泊生物生长的生态需水量,本文将基于生态水位法分析湖泊5个时期的生态需水量(衷平等,2005)。

将湖泊中各种生物的生态数据与湖泊水位数据进行相关性分析(比如灰色关联度法),选取相关性较大的指标作为指示生物指标(衷平等,2005);然后,在每个时期中选取指示生物指标生态状况最佳的年份,以该年份对应的水位作为该时期的生态水位,再通过湖泊水位和水量的对应关系,进一步确定该时期的生态需水量。

1.4 马尔可夫过程

马尔可夫链(Markov Chain)简称马氏链,描述了一种状态序列,其每个状态值取决于前面有限个状态,马氏链是具有马尔可夫性质的随机变量数列(孙新新等,2006)。本研究基于马尔可夫过程的水位数据,得到水位序列的状态转移概率矩阵 A^i (i 为状态转移矩阵的步长),序列过程如下:

$$\begin{aligned} P(X_{t+1} = x | X_t, X_{t-1}, \dots) \\ = P(X_{t+1} = x | X_t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: x 为划分的水位状态, $\{X_{t+1}\}$ 为水位状态空间; $P(X_{t+1} | X_t)$ 为转移概率,即水位状态转移的概率矩阵只依赖于前一个水位状态,与以前的水位状态无关。

1.5 改进加权马尔可夫链模型

由于湖泊水位与其他水文要素(径流量、降雨量、蒸发量等)相同,均是相依的随机变量,其各种滞时的相关关系及强弱可以用各阶自相关系数来描述。因而,当用某时刻前若干时段的状态对该时刻状态进行判断,把该时刻与之前各时刻的相关关系强弱加入判断,再进行加权求和,这样可以充分利用原始数据所包含的信息(王亚雄等,2011)。

当原始水位历史数据采用的是月尺度数据时,可以判断出该水位序列的马尔可夫链具有近似周期性,周期为12。因此,需要考虑12阶的自相关系数。将各阶自相关系数 ρ_i (i 为步长, $i=1,2,\dots,m$; $m=12$) 进行标准化,标准化后的结果作为各步长马尔可夫链的权重 r_i 。

利用某时刻前若干时段的状态,结合其相应的状态转移概率矩阵 A^i ,可以得到该时刻在各种状态的概率 a_k^i , k 为状态 ($k \in E, E$ 为状态空间);最后,将同一状态的概率加权求和作为水位处于该状态的最终概率 p_k ,即:

$$p_k = \sum_{i=1}^m r_i \times a_k^i \quad (2)$$

1.6 湖泊生态需水保障程度

本文用月保障程度和年保障程度来描述湖泊生态需水的保障程度。根据推测出未来水位处于各种时期(或状态)的概率,确定未来最终水位对应的水量 Q 及其所处时期;再与该时期下的生态需水量 E 按照如下公式进行比较,即可得到湖泊生态需水月保障程度:

$$S_m = \begin{cases} Q_m/E_m, & Q_m < E_m \\ 1, & Q_m \geq E_m \end{cases} \quad (3)$$

式中: S_m 为湖泊第 m 月生态需水保障程度; Q_m 为第 m 月水位对应的水量; E_m 为第 m 月水位所处时期对应的生态需水量。潘扎荣和阮晓红(2015)认为河道生态需水保障程度是河道实测径流量大于生态需水量的时间长度与总长度的比值。将此概念运用到湖泊,认为湖泊生态需水年保障程度是某年内湖泊水量大于生态需水量的月份与总月份的比值:

$$W_j = D_j/12 \quad (4)$$

式中: W_j 为湖泊第 j 年生态需水年保障程度; D_j 为第 j 年生态需水得到保障的月份数。

2 结果

2.1 白洋淀水位划分

白洋淀 1950 - 2000 年的历史水位变化过程如图 1 所示。可以看出,白洋淀历史水位呈现逐年下降趋势,并在 1985 - 1987 年出现干淀现象,水位达到最低值 5.2 m,白洋淀生态系统被严重破坏。为了维持生态系统的健康发展,多项补水措施开始实施,包括上游水库间歇性补水、南水北调工程等,使得白洋淀水位在 20 世纪 80 年代后期出现上升趋势。

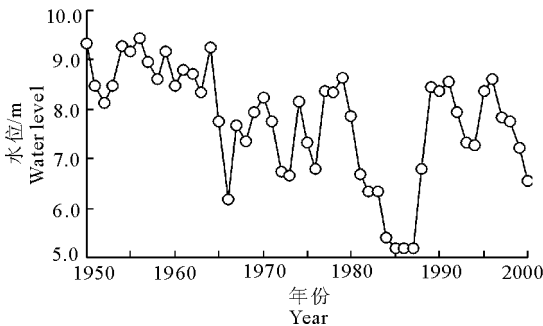


图 1 白洋淀 1950 - 2000 年的水位变化过程

Fig.1 Water level change in Baiyangdian Lake (1950 - 2000)

根据白洋淀 1950 - 2000 年共计 51 年月历史水位数据,得到其历史水位序列的均值 $\bar{x} = 7.702$ m,

标准差 $S = 1.320$ m。由均值标准差法(孙新新等, 2006)可得白洋淀水位时期和状态,如表 1 所示。

表 1 白洋淀水位时期和划分标准

状态	时期	划分标准	数值区间/m
1	枯水期	$\min(x) \leq x < \bar{x} - 1.0S$	[5.200, 6.382)
2	偏枯期	$\bar{x} - 1.0S \leq x < \bar{x} - 0.5S$	[6.382, 7.042)
3	平水期	$\bar{x} - 0.5S \leq x < \bar{x} + 0.5S$	[7.042, 8.362)
4	偏丰期	$\bar{x} + 0.5S \leq x < \bar{x} + 1.0S$	[8.362, 9.021)
5	丰水期	$\bar{x} + 1.0S \leq x \leq \max(x)$	[9.021, 11.150]

2.2 白洋淀各时期生态需水量

根据以往对白洋淀生态数据与水位数据的相关性研究(袁平等, 2005),利用灰色关联度法分析了白洋淀水位数据与芦苇产量、渔业产量、浮游植物种类、维管束植物种类、底栖动物种类、浮游动物种类、野生鸟类种类等生态因素的相关性,得到了白洋淀水位主要跟芦苇产量(关联度大于 0.90)和渔业产量(关联度大于 0.85)相关。因此,选取每个水位时期对应的年份中,芦苇产量和渔业产量最好的年份,由该年份的水位确定生态需水量。根据白洋淀 1950 - 2000 年的历史芦苇产量和渔业产量,计算出 5 个时期芦苇产量和渔业产量最好的年份分别是 1982 年、1981、1994、1996 和 1959 年,从而确定 5 个时期及状态的生态水位(表 2)。通过白洋淀水位和水量的对应关系,利用插值法进一步确定出各个时期的生态需水量。

表 2 白洋淀 5 个状态及时期对应的生态水位和生态需水量

Tab.2 Ecological water demand corresponding to each ecological water level for the five states of Baiyangdian Lake

状态	1	2	3	4	5
时期	枯水期	偏枯期	平水期	偏丰期	丰水期
生态水位/m	6.347	6.681	7.276	8.617	9.177
生态需水量/ 10^8 m ³	0.348	0.561	1.066	3.871	5.555

2.3 状态转移矩阵及马尔可夫链权重确定

首先,需要对历史水位序列进行马氏性检验,通过计算得到统计量 $\chi^2 = 1536$,给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,查表可得分位点 $\chi_{\alpha}^2(16) = 26.296 < 1536$,故白洋淀历史水位序列通过马氏性检验。根据表 1 的划分标准,确定白洋淀历史水位各数据所处的状态,从而确定不同步长的马尔可夫链状态转移概率矩阵。

通过自相关分析得出白洋淀历史水位序列的 12 阶的自相关系数,从而计算得到各种步长的马尔可夫链权重 r_i ,如表 3 所示。

$A^1 =$	$\begin{bmatrix} 0.921 & 0.053 & 0.018 & 0.009 & 0.000 \\ 0.143 & 0.757 & 0.100 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.051 & 0.810 & 0.102 & 0.037 \\ 0.000 & 0.000 & 0.189 & 0.736 & 0.075 \\ 0.000 & 0.000 & 0.026 & 0.237 & 0.737 \end{bmatrix}$	$A^2 =$	$\begin{bmatrix} 0.867 & 0.053 & 0.053 & 0.018 & 0.009 \\ 0.243 & 0.643 & 0.086 & 0.029 & 0.000 \\ 0.000 & 0.088 & 0.708 & 0.144 & 0.060 \\ 0.000 & 0.000 & 0.308 & 0.579 & 0.113 \\ 0.000 & 0.000 & 0.026 & 0.395 & 0.579 \end{bmatrix}$
$A^3 =$	$\begin{bmatrix} 0.821 & 0.063 & 0.063 & 0.036 & 0.018 \\ 0.300 & 0.557 & 0.100 & 0.043 & 0.000 \\ 0.009 & 0.111 & 0.643 & 0.167 & 0.079 \\ 0.000 & 0.000 & 0.377 & 0.484 & 0.138 \\ 0.000 & 0.000 & 0.066 & 0.474 & 0.461 \end{bmatrix}$	$A^4 =$	$\begin{bmatrix} 0.775 & 0.072 & 0.072 & 0.054 & 0.027 \\ 0.357 & 0.471 & 0.143 & 0.029 & 0.000 \\ 0.019 & 0.125 & 0.597 & 0.167 & 0.093 \\ 0.000 & 0.013 & 0.377 & 0.440 & 0.170 \\ 0.000 & 0.000 & 0.118 & 0.539 & 0.342 \end{bmatrix}$
$A^5 =$	$\begin{bmatrix} 0.727 & 0.082 & 0.091 & 0.073 & 0.027 \\ 0.414 & 0.400 & 0.171 & 0.014 & 0.000 \\ 0.028 & 0.139 & 0.546 & 0.190 & 0.097 \\ 0.000 & 0.019 & 0.409 & 0.365 & 0.208 \\ 0.000 & 0.000 & 0.145 & 0.605 & 0.250 \end{bmatrix}$	$A^6 =$	$\begin{bmatrix} 0.679 & 0.092 & 0.110 & 0.083 & 0.037 \\ 0.471 & 0.329 & 0.186 & 0.000 & 0.014 \\ 0.037 & 0.153 & 0.495 & 0.227 & 0.088 \\ 0.000 & 0.019 & 0.428 & 0.327 & 0.226 \\ 0.000 & 0.013 & 0.211 & 0.566 & 0.211 \end{bmatrix}$
$A^7 =$	$\begin{bmatrix} 0.639 & 0.102 & 0.120 & 0.093 & 0.046 \\ 0.500 & 0.271 & 0.200 & 0.014 & 0.014 \\ 0.051 & 0.162 & 0.468 & 0.241 & 0.079 \\ 0.000 & 0.031 & 0.421 & 0.321 & 0.226 \\ 0.000 & 0.000 & 0.276 & 0.513 & 0.211 \end{bmatrix}$	$A^8 =$	$\begin{bmatrix} 0.607 & 0.103 & 0.131 & 0.112 & 0.047 \\ 0.514 & 0.229 & 0.229 & 0.014 & 0.014 \\ 0.060 & 0.176 & 0.426 & 0.269 & 0.069 \\ 0.006 & 0.031 & 0.440 & 0.314 & 0.208 \\ 0.000 & 0.000 & 0.316 & 0.421 & 0.263 \end{bmatrix}$
$A^9 =$	$\begin{bmatrix} 0.589 & 0.103 & 0.150 & 0.112 & 0.047 \\ 0.478 & 0.217 & 0.261 & 0.029 & 0.014 \\ 0.079 & 0.171 & 0.398 & 0.301 & 0.051 \\ 0.013 & 0.044 & 0.440 & 0.289 & 0.214 \\ 0.000 & 0.000 & 0.342 & 0.368 & 0.289 \end{bmatrix}$	$A^{10} =$	$\begin{bmatrix} 0.570 & 0.121 & 0.159 & 0.103 & 0.047 \\ 0.441 & 0.191 & 0.294 & 0.074 & 0.000 \\ 0.097 & 0.157 & 0.431 & 0.269 & 0.046 \\ 0.019 & 0.063 & 0.396 & 0.327 & 0.195 \\ 0.000 & 0.000 & 0.303 & 0.335 & 0.342 \end{bmatrix}$
$A^{11} =$	$\begin{bmatrix} 0.557 & 0.132 & 0.179 & 0.085 & 0.047 \\ 0.412 & 0.206 & 0.265 & 0.118 & 0.000 \\ 0.111 & 0.148 & 0.472 & 0.222 & 0.046 \\ 0.025 & 0.057 & 0.346 & 0.403 & 0.170 \\ 0.000 & 0.013 & 0.289 & 0.316 & 0.382 \end{bmatrix}$	$A^{12} =$	$\begin{bmatrix} 0.552 & 0.124 & 0.200 & 0.076 & 0.048 \\ 0.368 & 0.221 & 0.265 & 0.147 & 0.000 \\ 0.120 & 0.153 & 0.468 & 0.208 & 0.051 \\ 0.038 & 0.038 & 0.352 & 0.428 & 0.145 \\ 0.000 & 0.039 & 0.263 & 0.289 & 0.408 \end{bmatrix}$

表3 白洋淀水位序列的各种步长的马尔可夫链权重

Tab.3 Markov chain weights of various steps for the water level sequences of Baiyangdian Lake

i	1	2	3	4	5	6
r_i	0.321	0.187	0.097	0.050	0.031	0.007
i	7	8	9	10	11	12
r_i	0.033	0.054	0.054	0.010	0.059	0.098

2.4 白洋淀未来水位各时期的概率判断

根据状态转移概率矩阵及2000年12个月水位数据对2001年1月的水位状态进行判断。再根据表3和公式(2),即可得到2001年1月水位处于各状态(k)及各时期的最终概率(p_k)。结果如表4所示。

2.5 白洋淀生态需水保障程度

由表4可知, $\max(p_k) = 0.512$, 对应的 $k = 2$, 即

表4 白洋淀2001年1月的水位状态判断

Tab.4 State estimation of water level for Baiyangdian Lake in January 2001

状态	1	2	3	4	5
时期	枯水期	偏枯期	平水期	偏丰期	丰水期
概率	0.300	0.512	0.146	0.039	0.003

可判断出白洋淀2001年1月的水位为偏枯期(水位范围为6.382~7.042 m)。白洋淀2001年1月水位的实测值为6.580 m,可见表4结果符合实际情况。因此,白洋淀2001年1月水位处于枯水期的概率为0.300,所需生态需水量为 $0.348 \times 10^8 \text{ m}^3$;处于偏枯期的概率为0.512,所需生态需水量为 $0.561 \times 10^8 \text{ m}^3$;处于平水期的概率为0.146,所需生态需水量为 $1.066 \times 10^8 \text{ m}^3$;处于偏丰期的概率为0.039,所

需生态需水量为 $3.871 \times 10^8 \text{ m}^3$; 处于丰水期的概率为 0.003, 所需生态需水量为 $5.555 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据表 1, 将水位范围取中值, 经过计算推测白洋淀 2001 年 1 月的水量为 $0.550 \times 10^8 \text{ m}^3$; 结合白洋淀 2001 年 1 月的实测水量为 $0.490 \times 10^8 \text{ m}^3$, 得到误差是 12.24%, 水文规范规定相对误差小于 20% 的结果已经令人满意(王本德, 1993; 陈守煜, 1997)。结合公式(3)可得白洋淀 2001 年 1 月生态需水月保障程度为 0.981。

3 讨论

3.1 不同时间的白洋淀生态需水保障程度推算

根据以上步骤, 对 2001 年 2-12 月的生态需水保障程度进行计算分析。把 2001 年 1 月的实测值放入水位序列中, 根据 2001 年 2 月之前的 12 个月的数据可以推测出 2001 年 2 月的水位状态和生态需水月保障程度。由此类推可得到 2001 年 3-12 月的生态需水月保障程度, 如表 5 所示。由公式(4)可得白洋淀 2001 年生态需水年保障程度为 0.167。

表 5 白洋淀 2001 年各月的生态需水保障程度

Tab.5 Monthly degree of certainty for the ecological water demand in 2001 for Baiyangdian Lake

月份	1	2	3	4	5	6
S_m	0.981	0.961	0.907	1	0.947	1
月份	7	8	9	10	11	12
S_m	0.960	0.979	0.960	0.955	0.959	0.957

根据本文推测的 2001 年各月白洋淀生态需水的月保障程度, 可以看出 4 月和 6 月生态需水能够得到保障, 其他月份的保障程度均小于 1, 需要对其他月份进行补水, 但其他月份的保障程度均大于 0.9, 可见补水量也不是很大。因此, 湖泊在不同时期需要不同的生态需水量以维持生态系统的健康成长, 需要对湖泊未来生态需水保障程度进行预测, 以提前应对未来出现的各种情况。

通过对年保障程度和月保障程度的对比, 可以看出月保障程度基本上都接近 1, 而年保障程度远远小于 1。运用本文建立的方法继续计算 2002 年各月生态需水月保障程度, 结果如表 6 所示, 由此可得白洋淀 2002 年生态需水年保障程度是 0.167。从 2001 年和 2002 年的结果可以看出, 白洋淀生态需水年保障程度变化不大, 生态需水能够得到保证的时间基本在 4-7 月; 而其他月份生态需水很难得到保证, 尤其是 2002 年 8-12 月的月保障程度均低于 0.9。湖泊水位的年际变化也会影响生态需水保障

结果, 在以后的研究中需进一步定量水位年际变化对生态需水保障的影响。

表 6 白洋淀 2002 年各月的生态需水保障程度

Tab.6 Monthly degree of certainty for the ecological water demand in 2002 for Baiyangdian Lake

月份	1	2	3	4	5	6
S_m	0.963	0.959	0.945	0.926	1	0.999
月份	7	8	9	10	11	12
S_m	1	0.813	0.815	0.825	0.835	0.857

3.2 湖泊生态需水量取决于数据精度和尺度

不确定性存在于多个方面。首先, 湖泊未来水位具有不确定性。湖泊水位是一个随机过程, 其变化会促进湖泊植物结构和功能的改变, 从而导致湖泊生态需水量也处于不断变化之中, 相应地具有一定的不确定性; 白洋淀水位变化受到人类活动的显著影响, 其不确定性问题更加突出。本文主要针对湖泊水位未来存在的不确定性, 量化了白洋淀生态需水保障的不确定性。其次, 不确定性也存在于数据来源方面。湖泊水位有多种数据, 比如年水位数据、月水位数据和日水位数据, 数据精度的不同也会导致水位状态划分的差异以及保障尺度上的不同。对于同一尺度的数据, 其选择时间不同也会造成结果的差异, 比如 30 年的数据系列和 50 年的数据系列会造成研究结果的不同。这些都是未来研究需要考虑的问题, 因此, 不确定性问题存在模型研究的各个方面, 其研究也具有很重要的意义。

3.3 白洋淀生态需水保障措施与建议

根据 2001 年和 2002 年白洋淀生态需水保障程度的结果, 建议着重对经常缺水的月份(8 月至次年 3 月)进行补水, 以保障生态系统基本功能; 强化多水源补水机制, 根据缺水程度对不同月份规划不同的补水源, 以提高补水效率; 对于短期缺水的月份, 可选择就近补水, 以减少补水路径上的水量损失; 对于长期缺水的月份可选择上游水库调度补水, 以保证水量的持续供应。此外, 还应注重生态需水保障的年际差异, 强化预测模型推测白洋淀水量的未来变化趋势, 及时发现未来出现的极端情况, 及早采取应对措施。

3.4 水文生态响应机制有助于核算湖泊生态需水

湖泊中生态系统状态以及生物生长状态与湖泊水位息息相关, 以往的研究由于缺乏生态数据, 只对水位数据进行分析, 这往往是不够的。随着生态数据的逐渐积累, 生态指标也被纳入到湖泊生态需水的研究中。选取湖泊中指示生物指标进行分析, 这

种方法在湖泊生态需水核算方面已得到很好的应用(衷平等,2005)。但目前湖泊生态数据依然不足,与水文数据相比,生态数据大量缺乏,严重制约了湖泊生态环境保护。也有学者提出,只是对水文和生态进行简单经验关系的研究也是有缺陷的,生态系统具有复杂的动态变化过程,需要对生态状态进行分析,建立水文生态的动态响应关系(Bond et al, 2018; Wang et al, 2018; Wheeler et al, 2018)。因此,未来需要着重研究湖泊生态系统的动态过程,建立水文生态动态响应机制,从而更有效地保护湖泊生态系统健康。

4 小结

通过本文建立的方法,可以推测湖泊未来生态需水的月保障程度和年保障程度,从而针对不同情况建立不同的生态需水保障措施,并随未来生态需水保障情况改善保障措施,以更好地应对湖泊生态需水未来保障的不确定性。

(1)根据水位状态的划分,白洋淀在枯水期、偏枯期、平水期、偏丰期、丰水期的生态水位分别为6.347、6.681、7.276、8.617、9.177 m。

(2)白洋淀2001年1月丰枯状态预测结果与实际完全一致,水位预测值的误差为12.24%,小于水文规范规定的20%。

(3)本研究方法应用于白洋淀这类水位季节变化较大且符合季节性变化规律的湖泊是行之有效的,能够为保障这类湖泊的生态需水提供参考依据。

参考文献

陈守煜,1997.中长期水文预报综合分析理论模式与方法[J].水利学报,(4):15-21.

杜旭,谢岩,陈亦平,等,2020.基于先验分布和权马尔科夫链的径流丰枯预测的研究[J].中国电子科学研究院学报,15(3):244-247,262.

高化雨,韩会玲,张晶,等,2019.基于生态脆弱性评价的松花湖湖滨带功能区划研究[J].水生态学杂志,40(6):1-7.

郭亚男,韩亚萍,宋文超,2020.灌河流域生态需水确定及保障措施分析[J].人民黄河,42(2):63-66.

孔令健,2019.阜阳市河湖生态需水及保障措施研究[J].江淮水利科技,(4):38-39.

刘息冕,2013.鄱阳湖自然保护区沙湖大型底栖动物群落结构及其影响因子研究[D].南昌:南昌大学.

卢书兵,杨琳琳,李波,等,2015.华阳河湖群地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].北京师范大学学报

(自然科学版),51(4):412-417.

马育军,李小雁,2016.青海湖流域典型生态系统土壤水分对降水脉动的响应[J].北京师范大学学报(自然科学版),52(3):356-361.

潘扎荣,阮晓红,2015.淮河流域河道内生态需水保障程度时空特征解析[J].水利学报,46(3):280-290.

孙新新,莫淑红,沈冰,等,2006.基于改进马尔可夫链的径流预测模型[J].沈阳农业大学学报,(6):872-877.

王本德,1993.水文中长期预报模糊数学方法[M].大连:大连理工大学出版社.

王亚雄,黄淑娟,刘祖发,等,2011.变化环境下北江下游年径流量的加权马尔可夫链预测[J].生态环境学报,20(4):754-760.

魏晓燕,毛旭锋,吴燕红,2013.基于水足迹的湿地生态需水保障对策[J].水资源保护,29(2):82-85,94.

温超男,黄蔚,陈开宁,等,2020.太湖滨岸带浮游动物群落结构特征与环境因子的典范对应分析[J].水生态学杂志,41(2):36-44.

杨薇,赵彦伟,刘强,等,2020.白洋淀生态需水:进展及展望[J].湖泊科学,32(2):294-308.

杨泽凡,胡鹏,赵勇,等,2018.新区建设背景下白洋淀及入淀河流生态需水评价和保障措施研究[J].中国水利水电科学研究院学报,16(6):563-570.

张浩,郭丽峰,白雪,等,2016.海河流域重要湿地生态需水及保障措施研究[J].中国水利,(7):33-36.

张建业,王晓红,杨晴,等,2017.全国主要河湖生态需水保障对策研究[J].中国水利,(23):8-11.

衷平,杨志峰,崔保山,等,2005.白洋淀湿地生态环境需水量研究[J].环境科学学报,25(8):1119-1126.

Ali Z, Hussain I, Faisal M, et al, 2018. A New Weighting Scheme in Weighted Markov Model for Predicting the Probability of Drought Episodes[J]. Advances in Meteorology, DOI:10.1155/2018/8954656

Arya F K, Zhang L, 2017. Copula-Based Markov Process for Forecasting and Analyzing Risk of Water Quality Time Series[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 22(6), p.04017005.

Bai Y, Jiang B, Alatalo J M, et al, 2016. Impacts of land management on ecosystem service delivery in the Baiyangdian river basin[J]. Environmental Earth Sciences, 75(3):258.

Bond N R, Grigg N J, Roberts J, et al, 2018. Assessment of environmental flow scenarios using state-and-transition models[J]. Freshwater Biology, 63(8): 804-816.

Dai L, Mao J, Wang Y, et al, 2016. Optimal operation of the Three Gorges Reservoir subject to the ecological water level of Dongting Lake[J]. Environmental Earth Sciences, 75(14):1111.

- Foufoulageorgiou E, Lettenmaier D P, 1987. A Markov Renewal Model for rainfall occurrences [J]. *Water Resources Research*, 23(5): 875 - 884.
- Hu G, Xu Z, Dai J, et al, 2010. Distribution of polybrominated diphenyl ethers and decabromodiphenylethane in surface sediments from Fuhe River and Baiyangdian Lake, North China [J]. *Journal of Environmental Sciences-china*, 22(12): 1833 - 1839.
- Hu S, Liu C, Zheng H, et al, 2012. Assessing the impacts of climate variability and human activities on streamflow in the water source area of Baiyangdian Lake [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 22(5): 895 - 905.
- Jing L, Bai S, Li Y, et al, 2019. Dredging project caused short-term positive effects on lake ecosystem health: A five-year follow-up study at the integrated lake ecosystem level [J]. *Science of The Total Environment*, 686(1): 753 - 763.
- Liu D, Wang X, Zhang Y, et al, 2019. A Landscape Connectivity Approach for Determining Minimum Ecological Lake Level: Implications for Lake Restoration [J]. *Water*, 11(11): 2237.
- Liu J, Yang Z, 2002. Ecological and environmental water demand of the lakes in the Haihe-Luanhe Basin of North China [J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 14(2): 234 - 238.
- Muqi X, Jiang Z, Yuyao H, et al, 1998. The ecological degradation and restoration of Baiyangdian Lake, China [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 13(4): 433 - 446.
- Sajedipour S, Zarei H, Oryan S, et al, 2017. Estimation of environmental water requirements via an ecological approach: A case study of Bakhtegan Lake, Iran [J]. *Ecological Engineering*, 100: 246 - 255.
- Shear H, Stadlersalt N, Bertram P, et al, 2003. The development and implementation of indicators of ecosystem health in the great lakes basin [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*; 88(1/3): 119 - 152.
- Si J, Feng Q, Yu T, et al, 2015. Inland river terminal lake preservation: determining basin scale and the ecological water requirement [J]. *Environmental Earth Sciences*, 73(7): 3327 - 3334.
- Tabari H, Zamani R, Rahmati H, et al, 2015. Markov Chains of Different Orders for Streamflow Drought Analysis [J]. *Water Resources Management*, 29(9): 3441 - 3457.
- Wang J, Horne A C, Nathan R, et al, 2018. Vulnerability of water management objectives to the sequencing of wet and dry spells prior to and during drought conditions [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 188(8): 04018049.
- Wheeler K, Wenger S J, Freeman M C, 2018. States and rates: Complementary approaches to developing flow-ecology relationships [J]. *Freshwater Biology*, 63: 906 - 916.
- Wu Y, Xue L, Liu Y, et al, 2019. Uncertainty assessment of extreme flood estimation in the Dongting Lake basin, China [J]. *Hydrology Research*, 50(4): 1162 - 1176.
- Xu F, Dawson R W, Tao S, et al, 2001. A method for lake ecosystem health assessment: an Ecological Modeling Method (EMM) and its application [J]. *Hydrobiologia*, 443(1): 159 - 175.
- Yang Y E, Cai X, 2011. Reservoir Reoperation for Fish Ecosystem Restoration Using Daily Inflows-Case Study of Lake Shelbyville [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(6): 470 - 480.
- Zhang Y H, 2019. Research on ecosystem health assessment indices and thresholds of a large Yangtze-connected lake, Poyang lake [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(5): 11701 - 11716.

(责任编辑 万月华)

Estimating the Ecological Water Demand in Lakes and the Degree of Certainty based on the Markov Process

HE Shan, YIN Xin-an, LI Hao, ZHANG En-ze

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

Abstract: Ecological water demand (EWD) is the water inflow to a lake required to give the depth necessary for maintaining basic ecological functions and sustaining the ecological services provided by the lake. Determining and maintaining the EWD has become an important part of lake management and protection. Previous studies mainly focused on maintaining a single EWD value over time, but the water level of lakes naturally fluctuates and the fluctuations are closely related to lake biodiversity. As water level fluctuates, lake ecosystem functions change synchronously, leading to the variation in the EWD. Methods that ensure one particular EWD are not sufficient to deal with the varying condition of lakes, nor can they deal with the uncertainty of guaranteeing a given EWD. In this study, we took Baiyangdian Lake as a case study and used the improved weighted Markov Chain model to predict the probability of maintaining the EWD of Baiyangdian Lake and to explore the uncertainty of maintaining the EWD. The water level of Baiyangdian Lake was divided into five states: (1) dry (5.200 – 6.382 m), (2) relatively dry (6.382 – 7.042 m), (3) normal (7.042 – 8.362 m), (4) relatively wet (8.362 – 9.021 m) and (5) wet, (9.021 – 11.150 m). After analyzing ecological conditions, the optimal EWD for biological diversity in each state was determined and the results were as follows: dry, 6.347 m; relatively dry, 6.681 m; normal 7.276 m; relatively wet, 8.617 m; wet, 9.177 m. The improved weighted Markov Chain model was then used to calculate the probability of a given water level in January 2001 based on the water level data for Baiyangdian Lake in 2000. The predicted water flow in January 2001 was $0.550 \times 10^8 \text{ m}^3$ and the measured flow was $0.490 \times 10^8 \text{ m}^3$, an error of 12.24%. The degree of certainty for maintaining the EWD in Baiyangdian Lake in January 2001 was 0.981. The annual degree of certainty for EWD in Baiyangdian Lake changed little, with a value of 0.167 in both 2001 and 2002. Our results show that the method used in this study is reliable for predicting future monthly and annual degrees of certainty for the EWD of lakes and to support decision making related to sustaining the EWD in lakes with large seasonal fluctuations in water level.

Key words: ecological water demand; Baiyangdian Lake; weighted Markov