中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

基于降水量的白洋淀最低水位预测研究

赵春雷，钱拴，黄强，吴国明，孟成真

引用本文:
赵春雷, 钱拴, 黄强, 等. 基于降水量的白洋淀最低水位预测研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1238–1244.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180781

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

府河–白洋淀硝酸盐来源判定及迁移转化规律

Sources, migration and transformation of nitrate in Fuhe River and Baiyangdian Lake, China

中国生态农业学报. 2017, 25(8): 1236–1244 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.161187

白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系

Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake Basin

中国生态农业学报. 2017, 25(4): 467–477 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160784

基于CMORPH CRT产品的太行山区降水时空格局

Spatial and temporal precipitation patterns using the CMOPRH CRT product over the Taihang Mountains

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(2): 305–316 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190746

河北典型样带土地利用生态安全格局研究

Ecological security pattern of land use in a typical transect of Hebei Province

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1767–1778 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190247

基于BP神经网络的农田大气氨浓度预测

Prediction of atmospheric ammonia concentration in farmlands using BP neural network

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(4): 519–528 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181057

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 8 月 第 27 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2019, 27(8): 1238−1244

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180781

赵春雷, 钱拴, 黄强, 吴国明, 孟成真. 基于降水量的白洋淀最低水位预测研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1238−1244
ZHAO C L, QIAN S, HUANG Q, WU G M, MENG C Z. Prediction of minimum water level in Baiyangdian Lake based on precipitation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(8): 1238−1244

基于降水量的白洋淀最低水位预测研究*

赵春雷[1,2], 钱 拴[3**], 黄 强[4], 吴国明[1], 孟成真[1]

(1. 河北省气象科学研究所 石家庄 050021; 2. 河北省气象与生态环境重点实验室 石家庄 050021; 3. 国家气象中心 北京 100081; 4. 安新县气象局 安新 071600)

摘 要: 为了每年能够提前预测未来 10 月份至翌年 4 月份的白洋淀最低水位, 指导水资源管理和防灾减灾, 利用白洋淀区域多个气象站点雨季不同时段的平均降水量和白洋淀水位资料, 采取历史资料回归和机器学习方法, 对白洋淀水位随区域降水量的变化规律进行了分析, 研究建立了一种利用当年雨季平均降水量和当年雨季前水位预测当年雨季后至翌年雨季前白洋淀最低水位的方法。通过建立最低水位预测模型对已有的数据进行验证, 发现所建的模型模拟和预测的结果误差在 5%以下, 精度较高。根据 2018 年 5 月白洋淀水位和白洋淀区域 2018 年 7—8 月、7—9 月平均降水量预测的 2018 年 10 月至 2019 年 4 月白洋淀的最低水位分别为 8.52 m 和 8.38 m, 根据最新监测的 2018 年 10 月至 2019 年 2 月 20 日的最低水位实况, 预测误差在 4%以下, 预测精度较高。因此, 所建模型能够提前 3~7 个月动态预测白洋淀即将出现的最低水位, 可为提高雄安新区区域水资源综合管理水平、统筹分配区域水资源、合理安排补水等提供科学依据。

关键词: 白洋淀; 降水量; 最低水位; 水位预测; 雄安新区

中图分类号: P339

文章编号: 2096-6237(2019)08-1238-07 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Prediction of minimum water level in Baiyangdian Lake based on precipitation*

ZHAO Chunlei[1,2], QIAN Shuan[3**], HUANG Qiang[4], WU Guoming[1], MENG Chengzhen[1]

(1. Hebei Institute of Meteorological Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei, Shijiazhuang 050021, China; 3. National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 4. Anxin Meteorological Station of Hebei, Anxin 071600, China)

Abstract: The planning outline of Xiong'an New Area clearly states that the proportion of blue-green space in the Xiong'an New Area will be stable at 70% in the future. Baiyangdian Lake is the largest wetland and water body in the Xiong'an New Area. Understanding and predicting changes in this water body is of great significance to ensure the production of domestic water and ecological security of the Xiong'an New Area. In order to predict the lowest water level of Baiyangdian Lake from October to April of the next year, and to guide water resources management and disaster prevention and mitigation of the Xiong'an New Area, a historical data regression method and a machine learning method were used to analyze the water level variation in the Baiyangdian Lake with different regional precipitation. It was found that the lowest water level of Baiyangdian

* 中国气象局 2018 年生态文明建设气象保障服务示范项目资助
** 通信作者: 钱拴, 主要从事国家级农业与生态气象研究和服务工作。E-mail: qians@cma.gov.cn
赵春雷, 主要从事应用气象与 3S 技术研究。E-mail: z920604@163.com
收稿日期: 2018-08-30 接受日期: 2019-02-21
* This study was supported by the Demonstration Project of Ecological Civilization Construction of Meteorological Support Service of China Meteorological Administration in 2018.
** Corresponding author, E-mail: qians@cma.gov.cn.
Received Aug. 30, 2018; accepted Feb. 21, 2019

Lake from October to April was highly correlated with both the mean precipitation in the current rainy season and the water level in May of that year. Based on this result, a method was established to predict the lowest water level in Baiyangdian Lake from the current rainy season until the next rainy season by using the precipitation data in the current rainy season and the water level before the current rainy season. According to the precipitation and water level data in Baiyangdian Lake from 2001 to 2017, the prediction model for the lowest water level was established. Furthermore, gradient descent algorithm was adopted for machine learning and training. After model verification, the lowest water level prediction model was developed based on the average rainfall from July to August/July to September and the water level in May as the prediction factors. The model was verified using the collected data; the fit of the model was acceptable as the simulated and predicted result errors were both below 5%. According to the Baiyangdian Lake water level in May 2018 and the average precipitation data of July to August/July to September 2018, the lowest water level of Baiyangdian Lake from October 2018 to April 2019 would be between 8.52 m and 8.38 m, which was higher than the lowest ecological water level of Baiyangdian Lake. According to the latest minimum water level from October 2018 to February 20, 2019, the model predicted result errors were below 4%. Thus, our model can predict the lowest water level of Baiyangdian Lake 3–7 months in advance, which provides a significant scientific basis to improve the comprehensive management and the rational allocation of water resources in the Xiong'an New Area.

Keywords: Baiyangdian; Precipitation; Lowest water level; Water level prediction; Xiong'an New Area

白洋淀是华北地区最大的淡水湖，是中国北方具有代表性的湖泊和草本沼泽型湿地，汇集了南、西、北的 8 条河流，然后从淀泊东面大清河经独流减河流入渤海。白洋淀对华北地区的生态环境有重要影响，被誉为“华北之肾”，具有调节气候、涵养水源、净化污染物、维护生物多样性等多种自然生态服务功能。特别是 2017 年随着国家设立国家级新区——雄安新区的战略规划的实施，白洋淀作为雄安新区的核心水域，承载着更为特殊的生态、生产、生活服务功能。但是，白洋淀水位和面积变化很大，20 世纪 50—70 年代内涝、80 年代一度干涸，均给白洋淀及其周围和下游地区造成了较大影响，因此研究白洋淀水位和面积变化规律、提前预测其变化，对于确保雄安新区生产生活用水、生态安全等均有重大的意义。

国内外有关湿地、水体的水位监测、分析、预测研究有很多，但大多是针对特定地点的湿地、水体研究[1-3]。Pan 等[4-6]开展了河流水位和流量的遥感监测估测研究，给出了遥感获得水位的定量方法。李祥等[1]通过对白洋淀湿地及周边地区的 11 个气象站观测资料研究，证明了白洋淀的湿地气候对气温变化具有一定的减缓作用。但是近半个世纪以来，白洋淀受人类活动和气候变化的影响，入淀水量持续减少[2]。另有研究表明，华北地区的年降水量呈明显的下降趋势，1997 年、1999 年显著偏少，1980 年代至 2000 年代华北处于年降水量偏少阶段[3]。20 世纪 50 年代白洋淀的平均入淀水量为 18.27 亿 m^3，到了 80 年代锐减为 1.47 亿 m^3，仅为 50 年代的 8%。到了 2000 年以后，入淀水量进一步减少，相较 20 世纪 90 年代又下降了近 55%。白洋淀面积已由 20 世纪 50 年代的 561 km^2 锐减至 2008 年的 366 km^2[7]。白洋淀流域的水量减少和水质的恶化，使得淀区的生态功能降低，对白洋淀周围的社会、经济和生态环境造成了严重的影响。韩美清等[8]利用 2006 年 3 月相关数据的研究结果表明：白洋淀流域生态环境状况指数属“一般”级别，表现为植被覆盖度中等，生物多样性一般。近年来，针对白洋淀流域气候因素和淀区水域变化方面的研究已经取得了一定的成果。胡珊珊等[9]采用气候弹性系数和水文模拟方法，研究了气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流量的影响，得出了白洋淀上游区的年径流呈下降趋势，而人类活动对径流的减少起主导作用。高彦春等[10]运用 Mann-Kendall 趋势检验、突变检验和小波分析法，对白洋淀流域 1957—2012 年 7 个气象站点气温、降水和 3 个典型水文站点径流量的变化趋势、突变点及周期性变化进行了分析，结果显示白洋淀径流变化不仅受气温和降水的影响，还受到水利工程建设、各类农业措施等多种因素的影响。此外，赵翔等[11]在分析白洋淀生态系统功能的基础上，利用水量面积法、最低年平均水位法、年保证率设定法和功能法等 4 种方法对其最低生态水位进行分析和计算，认为 7.30 m 作为白洋淀最低生态水位是合理的；赵志轩[12]探讨了白洋淀湿地生态水文过程耦合作用机制及综合调控的思路和方法；张素珍[13]对白洋淀湿地生态功能也进行相应的评价。但这些研究只限于对白洋淀水域变化与影响因子之间的关系研究，通过降水量来预测最低水位的研究几乎处于空白。Wu 等[14]提出了基于支持向量回归预测水位的方法；黄政等[15]提出基于相似性搜索的水位预测方法，用历史水位数据预测未来的水位；DONG 等[16]提出了利用一种把灰色系统理论和马尔可夫理

论相结合的 Grey Markov 模型(GMM)来预测河口区水文站的最大水位。为此，本研究在上述研究的基础上，针对白洋淀湿地缺少水位预测方法的情况，研究白洋淀年度和季节水位的变化规律、降水影响等，建立可预测每年冬春季最低水位的一种模型，用于每年对白洋淀未来的最低水位做出预测，对淀区提前做好未来流域水资源综合管理、及早做好抗旱防涝、减少灾害损失等具有重要的指导意义。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

白洋淀地处38°43′~39°02′N, 115°38′~116°07′E。位于大清河水系中部的大型平原洼淀，东西长29.6 km，南北宽28.5 km，在水位10.5 m(大沽高程，下同)时，总面积366 km^2，容积10.5亿m^3。由白洋淀、藻苇淀、马棚淀、腰葫芦淀等143个大小不等的淀泊组成，淀中有丰富的水生生物如浮游生物、底栖动物、鱼类和水生植物、鸟类、鱼、虾等。白洋淀行政区隶属保定市的安新县、高阳县、雄县、容城县和沧州市的任丘市管辖，其中保定市占总面积的93%，当水位8.8 m(大沽高程)时，85.6%的水域分布于安新县境内[13]。2017年雄安新区成立，白洋淀及雄安新区和周边气象监测站点位置如图1所示。

1.2 数据与分析

降水量数据来源于河北省气象信息中心，所选站点包括易县、高碑店、容城、徐水、保定、高阳、安新、任丘、满城、雄县、定兴、清苑县，时间为1971年至2017年。本次分析的降水量数据由上述各站的雨季(6—9月)降水量取平均值，区域内雨季平均降水量如图2所示。

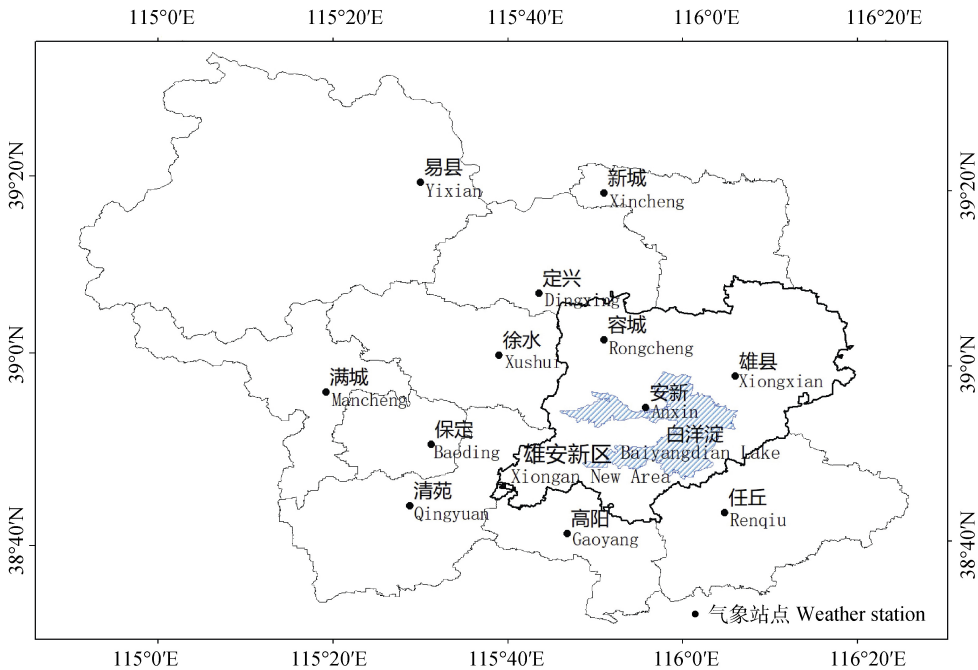

图 1 白洋淀区域气象监测站点分布图

Fig. 1 Location of Baiyangdian Lake and distribution of region meteorological observation stations

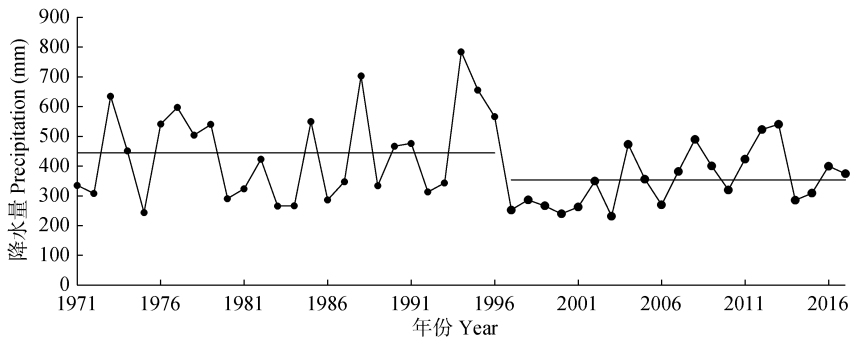

图 2 1971—2017 年白洋淀区域雨季平均降水量

Fig. 2 Average precipitation during the rainy season in the area of Baiyangdian Lake from 1971 to 2017

通过对区域降水量分析得到：1971—1996 年白洋淀区域 6—9 月份降水量较多，平均为 444.2 mm，并且波动较大，最多的 1994 年与最小的 1975 年相差 540.3 mm；自 1997 年至今白洋淀区域降水量减少，平均为 354.0 mm，且波动变小。白洋淀水位高度数据来源于安新县水利局。2001—2017 年 5 月份水位、当年 10 月至翌年 4 月最低水位和雨季不同时段平均降水量如表 1 所示。

表 1　2001—2017 年白洋淀区域雨季不同时间的降水量及水位

Table 1　Average precipitation during different periods of rainy season and water level in Baiyangdian Lake from 2001 to 2017

年份 Year	5 月份水位 Water level in May (m)	10 月份至翌年 4 月最低水位 Lowest water level from October to April of next year (m)	雨季不同时段降水量 Precipitation during different periods of rainy season (mm)					
			6—7 月 June–July	6—8 月 June–August	6—9 月 June–September	7—8 月 July–August	7—9 月 July–September	8—9 月 August–September
2001	6.39	5.96	178.84	255.99	262.36	186.82	193.19	83.52
2002	6.05	5.70	210.12	278.47	349.55	164.41	235.49	139.43
2003	6.21	5.73	114.91	171.59	231.68	131.68	191.77	116.77
2004	6.98	7.39	323.82	399.49	472.86	261.80	335.17	149.04
2005	7.24	6.97	218.17	323.29	356.02	279.83	312.56	137.85
2006	6.82	6.40	184.65	266.08	269.52	203.92	207.36	84.87
2007	6.57	6.31	207.34	306.50	381.39	234.55	309.44	174.05
2008	7.09	7.41	266.59	386.67	489.85	252.21	355.39	223.26
2009	7.15	7.14	228.23	354.32	400.01	262.63	308.32	171.78
2010	7.08	6.71	88.18	235.83	319.99	196.58	280.74	231.81
2011	6.92	6.95	245.51	366.98	423.48	323.90	380.40	177.97
2012	7.47	8.23	341.68	429.92	522.63	338.87	431.58	180.95
2013	8.39	8.25	331.52	445.46	540.79	318.13	413.46	209.27
2014	8.29	7.91	136.75	221.16	285.10	177.08	241.02	148.35
2015	7.81	7.78	157.68	223.52	308.75	205.68	290.91	151.07
2016	8.09	8.39	335.31	379.15	399.76	325.38	345.99	64.45
2017	8.12	7.91	209.70	367.31	374.16	294.99	301.84	164.46

2　研究方法

2.1　水位预测模型

线性回归模型是常用的预测模型，可以根据给定的变量来预测目标变量的值。利用表 1 中 10 月至翌年 4 月最低水位与雨季不同时段平均降水量、5 月份水位进行相关分析，结果如表 2。从表 2 可以看到，10 月至翌年 4 月最低水位与当年 6—7 月、6—8 月、6—9 月、7—8 月、7—9 月平均降水量相关系数分别为 0.567、0.601、0.595、0.704、0.706，分别通过 0.05、0.05、0.05、0.01、0.01 显著性检验；与 5 月份水位的相关系数为 0.924，通过 0.001 显著性检验。可见最低水位受雨季平均降水量和 5 月份水位两个因素的影响都比较显著，为此构建如下二元回归模型：

$$F(x_1, x_2) = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + b \tag{1}$$

式中：β_1 和 β_2 为模型参数，x_1 和 x_2 为输入模型的变量，b 为模型的偏置。$F(x_1, x_2)$ 是预测年份的 10 月份至翌年 4 月份之间白洋淀最低水位，x_1 是当年多站点的雨季平均降水量，x_2 是当年 5 月份的白洋淀水位高程。因为水位高程数据(0~10 m)与降水量数据(100~1 000 mm)的值相差较大，所以需要先将其进行归一化处理，然后利用梯度下降法[17]求出参数 β_1、β_2 和 b 的最优解，并将经过归一化数据的参数还原，得出最终结果。

2.1.1　数据的归一化

数据归一化目的是为了加快模型的收敛速度，提升模型的精度。常用的归一化方法主要有 min-max 标准化(Min-Max normalization)和 *Z*-score 标准化(Zero-mean normalization)两种。本文采用 *Z*-score 标准化，该方法给予原始数据的均值(mean)和标准差(standard deviation)进行数据的标准化。经过处理的数据符合标准正态分布，即均值为 0，标准差为 1，其转换函数为：

$$x_{\text{nor}}^{(i)} = \frac{x_i - \mu_x}{\delta_x} \tag{2}$$

表 2 白洋淀区域雨季不同时段降水量和 5 月份水位与 10 月份至翌年 4 月份最低水位相关性

Table 2 Correlation between precipitation in different period, water level in May and the lowest water level from October to April in Baiyangdian Lake area

	不同时段平均降水量 Average precipitation during different periods (mm)						5 月份水位 Water level in May (m)
	6—7 月 June–July	6—8 月 June–August	6—9 月 June–September	7—8 月 July–August	7—9 月 Jul–September	8—9 月 August–September	
相关系数 R Correlation coefficient	0.567*	0.601*	0.595*	0.704**	0.706**	0.229	0.924**

*、**分别表示通过 0.05、0.01 的显著性检验。* and ** mean significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

式中: μ_x 为数据的均值, 在本文中指平均降水量的均值和最低水位的均值; δ_x 为平均降水量的标准差和最低水位的标准差。

2.1.2 梯度下降法

梯度下降法是迭代法的一种, 用于求解最小二乘问题。在求解机器学习算法的模型参数, 即无约束优化问题时, 梯度下降(gradient descent)是最常采用的方法之一。其一般步骤: 确认优化模型的假设函数和损失函数, 初始化算法相关参数, 再利用梯度下降一步步迭代得到最小化损失函数和模型对应的参数值。

1)损失函数

代价函数或损失函数(cost function 或 loss function)是用来评价假设模型拟合的精确度。在训练数据集上, 模型的拟合越好, 代价函数就越小。在机器学习中, 训练的目的就是要选择合适的参数, 让代价函数达到最小。

在回归模型 $F(x_1,x_2)=\beta_1x_1+\beta_2x_2+b$ 中, 代价函数 $J(\beta_1,\beta_2)$ 的定义如下:

$$J(\beta_1,\beta_2)=\frac{1}{2m}\sum_{i=1}^{m}\left[F(x^i)-y^i\right]^2 \tag{3}$$

$J(\beta_1,\beta_2)$ 的值可理解为假设函数估算值和样本真实输出值之差平方和的平均值。

2)梯度下降

梯度下降法是使得代价函数达到最小。从几何上来说, 在一个代价函数 $J(\beta_1,\beta_2)$ 的曲面上, 任意给定一个起始点 (β_1,β_2), 沿着梯度下降的方向, 即对代价函数 $J(\beta_1,\beta_2)$ 中的 β_1 和 β_2 分别求偏导数的方向, 按照一定的步长 α (learning rate, 学习效率)进行不断迭代, 直到 β_1,β_2 收敛。其迭代过程如下:

$$\beta_k:=\beta_k-\alpha\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left[F(x^i)-y^i\right]\cdot x_k^i,\ k=1,2 \tag{4}$$

2.1.3 建立水位预测模型

根据表 2 中的相关性分析结果, 白洋淀 10 月份至翌年 4 月份最低水位与 7—8 月平均降水量和 7—9 月平均降水量显著相关(P<0.01), 相关系数分别为 0.704 和 0.706。5 月份水位和 10 月份至翌年 4 月份最低水位相关系数 R=0.924, 通过了 0.001 的显著性检验。据此, 选用 7—8 月平均降水量、7—9 月平均降水量和 5 月份水位作为预测因子。将 2001—2017 年每年 7—8 月、7—9 月平均降水量 x_1 和 5 月份白洋淀的水位 x_2 以及对应的白洋淀当年 10 月份到翌年 4 月份的最低水位 $F(x_1,x_2)$, 分别输入到模式(1)至模式(4), 进行训练, 经过迭代运算后得到预测模型(表 3)。

2.2 模型检验

当建立一个实际问题的经验回归方程后, 需要对建立的回归模型进行检验。拟合优度检验是为了检测模型结果与实况数据的拟合度, F 检验是为了检测模型中被解释变量与解释变量之间的线性关系在总体上是否显著成立。

2.2.1 拟合优度检验

离散差平方和: $\mathrm{TSS}=\sum(Y_i-\bar{Y})^2$ (5)

归平方和: $\mathrm{SS}=\sum(\hat{Y}_l-\bar{Y})^2$ (6)

残差平方和: $\mathrm{SS}=\sum(Y_i-\hat{Y}_l)^2$ (7)

可决系数: $R^2=\frac{\mathrm{ESS}}{\mathrm{TSS}}=1-\frac{\mathrm{RSS}}{\mathrm{TSS}}$ (8)

表 3 不同因子组合得到的白洋淀水位预测模型

Table 3 Water level prediction models of Baiyangdian Lake from different combinations of factors

模型 Model	因子 Factor		模型 Model	迭代次数 Iteration
	x_1	x_2		
模型 1 Model 1	7—8 月平均降水量 Average precipitation from July to August	5 月水位 Water level in May	$F(x_1, x_2)=0.005x_1+0.977x_2-1.104$	6
模型 2 Model 2	7—9 月平均降水量 Average precipitation from July to September	5 月水位 Water level in May	$F(x_1, x_2)=0.005x_1+1.107x_2-1.853$	4

式中：Y_i 为数据中每年 10 月份至翌年 4 月份实测的最低水位，$\bar{Y}$ 为平均最低水位，$\hat{Y}_l$ 是模型的预测结果。R^2 越接近 1，说明实际观测结果与预测结果越接近，模型拟合度越高。

根据所建立的预测模型 1，得到 TSS=12.651，ESS=13.09，RSS=1.070，其可决系数 $R^2 \approx 0.915$；根据预测模型 2，得到 TSS=12.651，ESS=15.623，RSS=1.044，其可决系数 $R^2 \approx 0.917$。

2.2.2　模型的显著检验——*F* 检验

对检验模型 $F=(x_1,x_2)=\beta_1 x_1+\beta_2 x_2+b$ 中参数 β_k 是否显著不为 0，提出如下原假设与备择假设：$H_0:\beta_1=\beta_2=0; H_1:\beta_k$ 不全为 0。

假设 H_0 成立，检验统计量：

$$F=\frac{\mathrm{ESS}/k}{\mathrm{RSS}/(n-k-1)} \sim F(k,n-k-1) \tag{9}$$

$F(k,n-k-1)$ 中，k 为回归模型中变量的个数，n 为样本的总数。在试验中，k=2，n=17。在给定显著水平 $\alpha=0.01$ 的情况下 $F_{0.01}(2.14)=6.701$，根据上述模型 1 得出 $F \approx 85.677 > F_{0.01}(2.14)$，拒绝 H_0；根据模型 2 得出 $F \approx 104.72 > F_{0.01}(2.14)$，拒绝 H_0。即上述两个模型的线性关系在 99%的水平下均显著成立。

3　结果与分析

通过对 2001—2017 年每年白洋淀当年 10 月份到翌年 4 月份的最低水位 $F(x_1,x_2)$ 与雨季不同时段的平均降水量的相关和显著性分析，确定了 7—8 月、7—9 月时段平均降水量和 5 月份水位为关键因子，并应用机器学习方法建立了最低水位的预测模型 1 和模型 2，模拟结果和实际结果的对比见表 4。

从表 4 可以看出通过回归模型对已有的数据进行验证时，模型 1 和模型 2 平均绝对误差分别为 0.20 m 和 0.17 m，平均相对误差分别为 2.72%和 2.39%，两个模型的拟合度都较好。

表 4　2001—2017 年白洋淀当年 10 月份至翌年 4 月份最低水位模拟值及模拟精度

Table 4　Simulated lowest water level of Baiyangdian Lake during October of current year to April of next year and simulation errors from 2001 to 2017

年份(当年/翌年) Year (current year/next year)	模型 1 Model 1				模型 2 Model 2			
	模拟值 Simulated value (m)	测定值 Actual value (m)	绝对误差(绝对值) Relative error (absolute value)	相对误差 Absolute error (%)	模拟值 Simulated value (m)	测定值 Actual value (m)	绝对误差(绝对值) Relative error (absolute value)	相对误差 Absolute error (%)
2001/2002	6.10	5.96	0.14	2.35	6.08	5.96	0.12	2.01
2002/2003	5.69	5.70	0.01	0.18	5.70	5.70	0.00	0.00
2003/2004	5.70	5.73	0.03	0.52	5.66	5.73	0.07	1.22
2004/2005	6.98	7.39	0.41	5.55	7.05	7.39	0.34	4.60
2005/2006	7.30	6.97	0.33	4.73	7.20	6.97	0.23	3.30
2006/2007	6.58	6.40	0.18	2.81	6.48	6.40	0.08	1.25
2007/2008	6.47	6.31	0.16	2.54	6.54	6.31	0.23	3.65
2008/2009	7.04	7.41	0.37	4.99	7.25	7.41	0.16	2.16
2009/2010	7.14	7.14	0.00	0.00	7.19	7.14	0.05	0.70
2010/2011	6.80	6.71	0.09	1.34	6.90	6.71	0.19	2.83
2011/2012	7.18	6.95	0.23	3.31	7.19	6.95	0.24	3.45
2012/2013	7.76	8.23	0.47	5.71	7.95	8.23	0.28	3.40
2013/2014	8.54	8.25	0.29	3.52	8.76	8.25	0.51	6.18
2014/2015	7.86	7.91	0.05	0.63	7.88	7.91	0.03	0.38
2015/2016	7.52	7.78	0.26	3.34	7.65	7.78	0.13	1.67
2016/2017	8.29	8.39	0.10	1.19	8.16	8.39	0.23	2.74
2017/2018	8.19	7.91	0.28	3.54	7.99	7.91	0.08	1.01
平均误差 Average error			0.20	2.72			0.17	2.39

将 2018 年白洋淀区域 7—8 月、7—9 月平均降水量和 5 月份的水位代入模型 1、模型 2，预测得出 2018 年 10 月份至 2019 年 4 月份间，白洋淀的最低水位分别为 8.52 m、8.38 m。依据赵翔等[11]的研究成果，高于白洋淀最低生态水位 7.30 m。根据 2018 年 10 月至 2019 年 2 月 20 日监测的实际最新出现的最低水位为 8.71 m，模型 1 和模型 2 预测的绝对误差分别为 0.19 m 和 0.33 m，相对误差分别为 2.18%

和 3.79%, 所建两个模型预测精度均较高。

4 结论

研究结果表明, 白洋淀区域雨季过后的枯水期最低水位高度与区域当年雨季平均降水量和 5 月份的初始水位有十分显著的相关关系, 建立的 10 月份至翌年 4 月份白洋淀最低水位预测模型可为开展白洋淀最低水位预测提供一种科学、实用的方法。

1)本研究建立的预测白洋淀非雨季最低水位预测模型, 可以提前 3~7 个月动态预测未来可能出现的最低水位, 预测准确率在 95%以上。

2)根据 2018 年 5 月份白洋淀水位和区域 2018 年 7—8 月、7—9 月平均降水量预测的 2018 年 10 月份至2019年4月份白洋淀的最低水位分别为8.52 m 和 8.38 m, 高于白洋淀的最低生态水位, 相对误差在 4%以下, 预测精度较高, 可为相关部门提前掌握雄安新区 2019 年水资源、科学进行引水、补水等提供参考依据。

3)本研究目前主要考虑了影响白洋淀枯水期水位的主要因素雨季自然降水量和 5 月白洋淀基础水位,主要是提供一种快速、简单、实用的预测白洋淀最低水位方法。未来, 将考虑多种气象要素、径流、补水等因素对白洋淀水位的综合影响, 建立较为复杂的预测模型, 实现动态预测。

参考文献 References

[1] 李祥, 寿绍文, 白艳辉, 等. 1960—2013 年白洋淀湿地气候变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(1): 75–83
LI X, SHOU S W, BAI Y H, et al. Characteristics of climate change from 1960 to 2013 in Baiyangdian wetland[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(1): 75–83

[2] 刘茂峰, 高彦春, 甘国靖. 白洋淀流域年径流变化趋势及气象影响因子分析[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1438–1445
LIU M F, GAO Y C, GAN G J. Long-term trends in annual runoff and the impact of meteorological factors in the Baiyangdian Watershed[J]. Resources Science, 2011, 33(8): 1438–1445

[3] 孙秀博, 李清泉, 魏敏. 1960—2009 年中国年降水量的年际及年代际变化特征[J]. 气象, 2012, 38(12): 1464–1472
SUN X B, LI Q Q, WEI M. Analysis on interannual and interdecadal variability of annual rainfall over China during 1960–2009[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(12): 1464–1472

[4] PAN F F, LIAO J J, LI X W, et al. Application of the inundation area-lake level rating curves constructed from the SRTM DEM to retrieving lake levels from satellite measured inundation areas[J]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 168–176

[5] PAN F F, WANG C, XI X H. Constructing river stage-discharge rating curves using remotely sensed river cross-sectional inundation areas and river bathymetry[J]. Journal of Hydrology, 2016, 540: 670–687

[6] PAN F F, NICHOLS J. Remote sensing of river stage using the cross-sectional inundation area-river stage relationship (IARSR) constructed from digital elevation model data[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(25): 3596–3606

[7] 吕彩霞, 牛存稳, 贾仰文. 气候变化和人类活动对白洋淀入淀水量影响分析[C]//中国水利学会水资源专业委员会 2009 学术年会论文集. 大连: 中国水利学会, 2009
LYU C X, NIU C W, JIA Y W. Assessing the impacts of climate variability and human activities on reservoir inflow of Baiyangdian Lake[C]//Chinese Hydraulic Engineering Society Member Academic Conference in 2009. Dalian: Chinese Hydraulic Engineering Society, 2009

[8] 韩美清, 王路光, 王靖飞, 等. 基于 GIS 的白洋淀流域生态环境评价[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 169–171
HAN M Q, WANG L G, WANG J F, et al. Eco-environmental evaluation of Baiyangdian Watershed using GIS[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(3): 169–171

[9] 胡珊珊, 郑红星, 刘昌明, 等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 62–70
HU S S, ZHENG H X, LIU C M, et al. Assessing the impacts of climate variability and human activities on streamflow in the water source area of Baiyangdian Lake[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 62–70

[10] 高彦春, 王金凤, 封志明. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 467–477
GAO Y C, WANG J F, FENG Z M. Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 467–477

[11] 赵翔, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1033–1040
ZHAO X, CUI B S, YANG Z F. A study of the lowest ecological water level of Baiyangdian Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(5): 1033–1040

[12] 赵志轩. 白洋淀湿地生态水文过程耦合作用机制及综合调控研究[D]. 天津: 天津大学, 2012
ZHAO Z X. Coupling mechanism of eco-hydrological processes and integrated regulation in Baiyangdian Wetland[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012

[13] 张素珍. 白洋淀湿地生态功能评价及保护对策[J]. 石家庄师范专科学校学报, 2003, 5(3): 40–41
ZHANG S Z. Evaluation and protection measures of ecological functions of Baiyangdian Lake marsh[J]. Journal of Shijiazhuang Teachers College, 2003, 5(3): 40–41

[14] WU C L, CHAU K W, LI Y S. River stage prediction based on a distributed support vector regression[J]. Journal of Hydrology, 2008, 358(1/2): 96–111

[15] 黄政, 肖艳. 一种基于相似性搜索的水位预测方法[J]. 计算机与现代化, 2015, (11): 17–21
HUANG Z, XIAO Y. Method of predicting water level based on similarity search[J]. Computer and Modernization, 2015, (11): 17–21

[16] DONG S, CHI K, ZHANG Q Y, et al. The application of a grey Markov model to forecasting annual maximum water levels at hydrological stations[J]. Journal of Ocean University of China, 2012, 11(1): 13–17

[17] BARZILAI J, BORWEIN J M. Two-point step size gradient methods[J]. IMA Journal of Numerical Analysis, 1988, 8(1): 141–148