

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.009

岱海湖水位对气候要素与土地利用的响应

刘柏君¹, 夏 军^{2,3}, 黄生志⁴, 朱非林⁵

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 4. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 5. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:利用 Mann-Kendall 检验、Hurst 系数法、基于有序聚类法的 t 检验等方法分析湖区水位演变趋势; 利用 Partial Mantel 检验法, 并通过构建缺失资料地区的湖区水文模型, 探究了典型半干旱区湖泊岱海湖水位对气候要素与土地利用变化的响应。结果表明: 岱海湖水位 1959—2018 年呈现显著下降趋势, 于 1982 年和 2005 年发生突变, 未来水位将呈现持续降低趋势; 岱海湖春季受融雪影响导致水位较高, 秋季受用水影响导致水位较低, 且秋季水位降低在四季中最为明显; 气候变化与水土资源开发利用是影响半干旱区湖泊水位变化的主要因素, 在气候变化条件下, 岱海湖水位对气温变化最为敏感, 对日照变化的响应次之; 由于岱海湖流域降水-产流-下渗机制较为复杂, 岱海湖水位对降水变化的响应具有滞后性, 流域林草面积增加可能是引发岱海湖水位降低的重要因素。

关键词: 水位演变; 气候要素; 水文模型; 土地利用类型; 半干旱区; 岱海湖

中图分类号: TV213.4; P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)06-0064-07

Responses of Daihai Lake water level to climatic factors and land use// LIU Bojun¹, XIA Jun^{2,3}, HUANG Shengzhi⁴, ZHU Feilin⁵ (1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 5. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With Daihai Lake in a typical semi-arid area as an example, the Mann-Kendall test, Hurst coefficient method, and t -test based on the ordered clustering method were used to analyze the evolution trend of water level in the lake, and the Partial Mantel test was employed and a hydrological model for lake area without enough data was constructed to study the response of the lake water level to climate factors and land use change. The results show that the water level of Daihai Lake had a significant downward trend from 1959 to 2018, with abrupt changes occurring in 1982 and 2005, respectively, and the water level will continue to decrease in the future; the water level of Daihai Lake is higher in spring due to snowmelt and lower in autumn due to water consumption, and the decrease of water level in autumn is the most obvious in the four seasons; climate change and water and soil resources use are the main factors affecting the lake water level change in semi-arid area, and the water level of Daihai Lake is the most sensitive to temperature, followed by sunshine under the condition of climate change. Due to the complex mechanism of precipitation, runoff, and infiltration in the Daihai Lake Basin, the water level of Daihai Lake responds with a lag to precipitation change, and the increase of forest and grass area in the lake basin may be an important factor causing the decrease of lake water level.

Key words: water level evolution; climatic factors; hydrological model; land use type; semi-arid area; Daihai Lake

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1508706, 2021YFC3200203); 黑土地保护与利用科技创新工程专项 (XDA28060100)

作者简介: 刘柏君 (1990—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: bojun_l689@126.com

通信作者: 夏军 (1954—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

湖泊在防洪、水资源调蓄与配置、净化水质、保护生态湿地、维护生物多样性等方面具有不可替代的作用^[1-2],使其成为维系区域生态环境健康的关键纽带^[3]。半干旱区湖泊由于本底环境的复杂性,区域水文气象数据通常十分有限^[4],而半干旱区湖泊复杂的水循环过程使湖泊水位对气候变化和人类活动的响应更为显著^[5],探究气候要素与土地利用触发湖泊水文过程异常的可能性是当前的重要命题^[6-7]。刘美萍等^[8]认为,气候暖干化是内蒙古查干淖尔湖水量、面积和水位波动的主要原因;张宇瑾等^[9]发现,乌梁素海在降水减少和流域水利工程建设的影响下,流域入湖水量有明显降低的特征;Satgé 等^[10]认为,农业活动是导致半干旱区 Poopó 湖干涸的主要因素之一;魏学^[11]分析了半干旱地区达里诺尔湖湖面演变过程,其变化与降水量、气温、蒸发均呈现显著正相关关系;曹国亮等^[12]通过分析艾丁湖湖泊面积、湖容、湖面蒸发变化特征发现,气温变化是影响干旱区湖泊面积变化的决定性因素;霍天赐等^[13]认为自然变化和人类活动分别是输水前、输水后台特玛湖水域面积变化的主要影响因素;梁旭等^[14]认为,湿地、林地等对岱海湖水质改善具有积极的作用;Cao 等^[15]模拟发现,入湖径流、湖面蒸发和湖面降水共同影响了呼伦湖水位的升降。综合来看,半干旱区湖泊水位变化规律不尽相同,而引起水位变化的驱动因素也有很大差异,开展半干旱区湖泊水位对气候要素与土地利用的响应关系研究,对于湖泊综合管理具有重要意义。本文以典型半干旱区湖泊岱海湖为研究对象,分析湖区水位演变趋势,探究湖泊水位对气候要素与土地利用变化的响应,以期半干旱区湖泊生态保护与水资源管理提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

岱海湖是内蒙古第三大内陆湖和中国典型的半干旱区湖泊,位于内蒙古自治区乌兰察布市,岱海湖流域面积为 2312.75 km²,地理位置为东经 112°30′~112°52′、北纬 40°30′~40°45′,行政区划涉及凉城县、丰镇市和卓资县,其中凉城县境内面积占全流域面积的 85.1% (图 1)。岱海湖属于典型的温带大陆性气候,冬季严寒漫长,夏季炎热短促,降水量年内分配不均,主要集中在 6—9 月,占年降水量的 72.7%,其中 7—8 月的降水量占年降水量的 50.7%。岱海湖现有 22 条入湖河沟,其中索代沟、水草沟、目花河、天成河、步量河、土城子河、五号河和弓坝河等是其主要入湖河流。

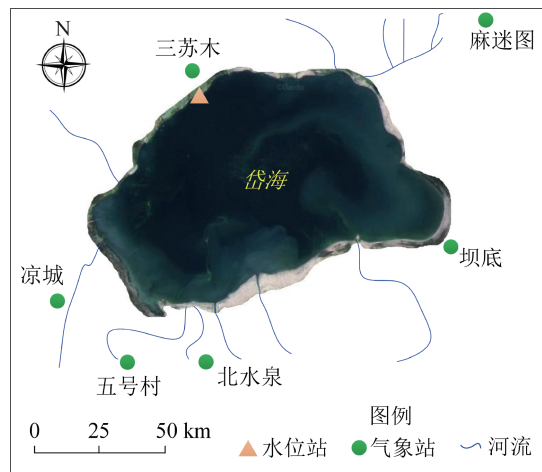


图 1 岱海湖地理位置概况

Fig. 1 Location of Daihai Lake

1.2 数据来源

凉城、北水泉、三苏木、五号村、坝底、麻迷图等气象站 1959—2018 年气温、降水、蒸发、日照时长数据,三苏木水位站 1959—2018 年水位数据(基于中国黄海高程),以及岱海湖流域 DEM 数据(精度为 90 m)、土壤类型数据(比例尺 1:100 万,分辨率 1 km,1984 大地坐标系)来自内蒙古凉城县水务局;岱海湖流域 1988 年、1998 年、2008 年和 2018 年土地利用数据来自中国科学院西北生态环境资源研究院。

2 研究方法

2.1 数值分析

本文采用基于有序聚类法的 t 检验分析水位突变性^[16],通过 Mann-Kendall (M-K) 检验^[17]和 Hurst 系数法^[18]分析水位趋势性。考虑到水位的影响要素较多,采用 Partial Mantel 检验^[19]分析水位与各影响要素间的相关关系。Partial Mantel 检验可通过添加特定变量作为控制矩阵,能够消除变量间可能存在的间接影响,从而更加明确地检测成对目标变量间的相关性。Partial Mantel 法检验有 p 和 r 两个检测参数, p 为显著性水平, p 越小表示相关性越显著; r 为相关性水平, r 越大表示越相关。Partial Mantel 检验通过 R 语言中的 vegan 模型实现。

土地利用影响分析采用 SWAT 模型模拟实现^[20]。考虑到半干旱区湖泊可能存在缺少实测径流数据问题,湖泊月均流量采用水量平衡公式估算:

$$Q = \frac{A_c R}{24 \times 3600 T} \quad (1)$$

其中

$$A_c R = \Delta V - A_L P + A_L E$$

式中: Q 为月平均流量, m³/s; A_c 为流域面积, km²; R 为径流深度, mm; ΔV 为湖泊蓄水月变化量, m³; A_L

为湖泊面积,km²; P 为月平均降水量,mm; E 为月平均蒸发量,mm; T 为月份天数。 ΔV 和 A_L 可由湖泊水位-面积-湖容曲线推求。

2.2 湖泊流域水文模型

考虑到岱海湖冬季湖水补给源为地下水和降水,但部分降水以积雪状态在地表覆盖,不发生下渗或产流过程,为了优化模型搭建,假定岱海湖表面所有的冰雪在春季都融化完毕。同时,由于岱海湖汇入河流缺乏水文监测数据,而 SWAT 模型要求设定一个出口流量,因此,将岱海湖按照最终汇入点考虑,以式(1)推求的岱海湖月均流量作为模型率定与验证的依据。基于气象、水文、DEM、土地利用、土壤类型数据(图 2),分别完成 SWAT 模型空间数据库、属性数据库、土地利用数据库和气象数据库的搭建^[20-21]。其中,岱海湖流域土地利用重分类为 6 类,即草地、林地、耕地、水域、建设用地和未利用地;土壤类型重分类为 8 类,即栗钙土、栗褐土、灰褐土、

山地草甸土、石质土、草甸土、潮土和水域;气象数据库搭建由模型自带的天气发生器完成。

利用 SWAT-CUP 中的全局敏感性分析对岱海湖流域 SWAT 模型参数敏感性进行分析^[21],选用决定系数 R^2 和纳什效率系数 E_{ns} 评价模型模拟效果,一般而言,当 $E_{ns} > 0.5$ 且 $R^2 > 0.6$,即认为模拟取得了良好效果^[21]。选用推求的 1959—1960 年岱海湖流量系列为缓冲期,1961—1982 年流量系列为率定期,1983—2018 年流量系列为验证期,参数率定结果如表 1 所示。

由图 3 可知,模型率定期 R^2 和 E_{ns} 分别为 0.72 和 0.70,验证期 R^2 和 E_{ns} 分别为 0.70 和 0.69,故认为 SWAT 模型在岱海湖流域有良好的适用性,可用于分析气候变化和人类活动对岱海湖水位的影响。模型模拟值与实测值存在一定偏差的原因可能为:①岱海湖流域降水时空分布不均匀、暴雨中心范围较小,模型对降水的响应会有所偏差;②将具有开放

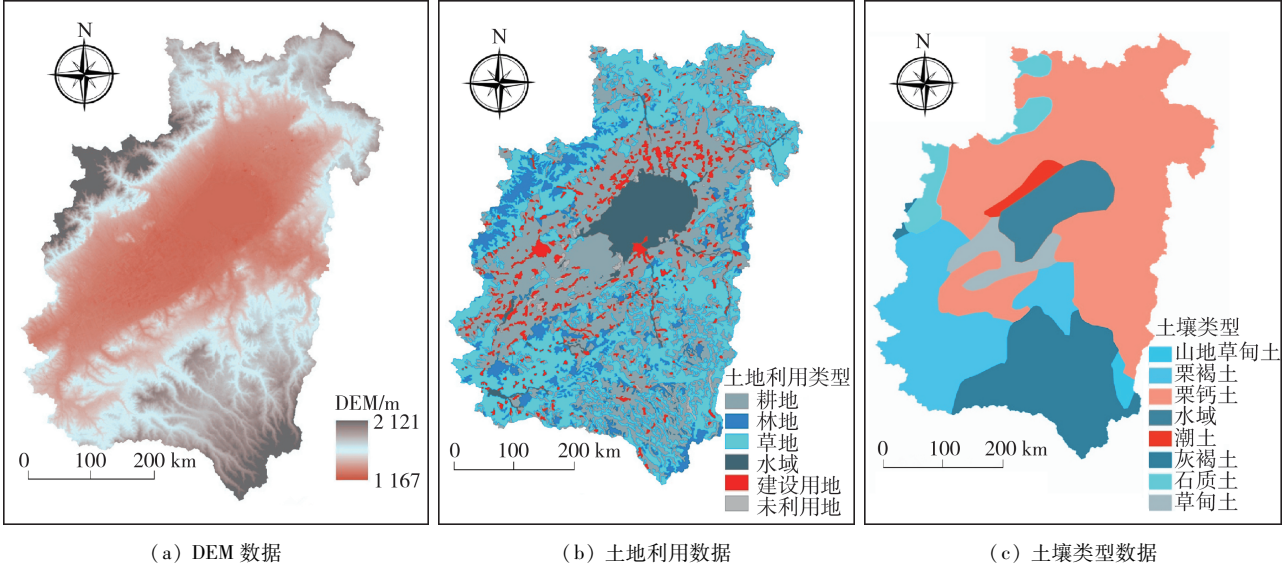


图 2 岱海湖流域 DEM、土地利用、土壤类型数据
Fig. 2 DEM, land use, and soil type data in Daihai Lake Basin

表 1 模型参数率定结果
Table 1 Model parameter calibration results

参数	意义	影响过程	取值范围	最终取值
GWQMN. gw	浅层地下水径流系数	地下水	0 ~ 5 000	5.105
REVAPMN. gw	浅层地下水再蒸发系数	地下水	0 ~ 500	5.25
GW_DELAY. gw	地下水延迟系数	地下水	0 ~ 500	499
GW_REVAP. gw	地下水再蒸发系数	地下水	0.02 ~ 0.20	0.2
CH_K2. rte	主河道河床有效水力传导度	壤中流	0 ~ 150	15.6
RCHRG_DP. gw	深层地下水补给系数	地下水	0 ~ 1	0.456
ALPHA_BF. gw	基流 Alpha 系数	地下水	0 ~ 1	0.99
ESCO. hru	土壤蒸发补偿系数	蒸散发	0.01 ~ 1.00	0.128
SOL_AWC(). sol	土壤可利用有效水量	壤中流	0 ~ 1	0.24
SOL_Z(2). sol	土壤深度	壤中流	0 ~ 3 500	1221
SOL_K(). sol	土壤饱和导水率	壤中流	0 ~ 2 000	0.3
CN2. mgt	SCS 径流曲线数	地表径流	20 ~ 90	34

性且受地下水影响的岱海湖流域认定为不透水边界;③模型采用SCS-CN径流曲线法定义降水事件,只考虑一天的降水总量,未考虑降水事件的强度和降水量。这些因素都会对模拟精度造成一定的影响。

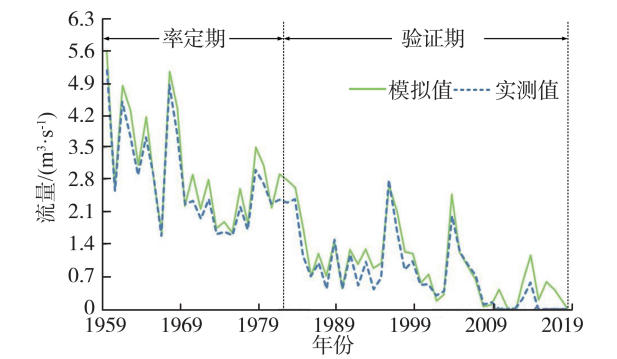


图3 岱海湖流量率定期和验证期模拟值和实测值对比结果
Fig.3 Comparison of simulated and measured flows in calibration and verification periods in Daihai Lake

3 结果与分析

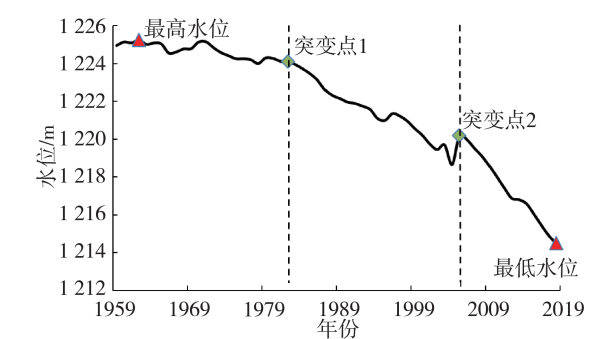
3.1 水位演变及趋势分析

3.1.1 演变分析

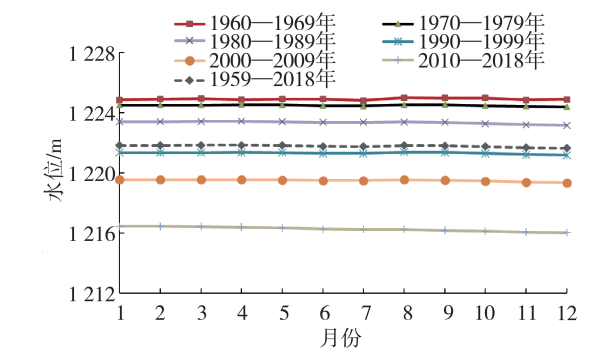
岱海湖 1959—2018 年多年平均水位为 1 221.79 m,最高水位是 1962 年的 1 225.26 m,最低水位是 2018 年的 1 214.48 m;M-K 检验结果显示,岱海湖水位 Z 值为 -10.41,通过 0.01 置信水平检验,说明岱海湖水位呈现显著下降趋势。图 4 显示,岱海湖 3 月水位最高,2 月、3 月、4 月、8 月水位均超过多年平均水位;6 月、7 月、10 月、11 月、12 月水位都低于多年平均水位,而 12 月水位最低,比多年平均水位低 0.13 m。岱海湖月均水位不同年代间均呈现降低特征,其中,2010—2018 年与 2000—2009 年水位下降最明显,年内下降值为 3.10 ~ 3.34 m;1970—1979 年与 1960—1969 年水位下降微弱,年内下降值为 0.33 ~ 0.50 m。四季之中,岱海湖春季水位最高,为 1 221.84 m;秋季水位最低,为 1 221.75 m;夏季与冬季水位分别为 1 221.80 m 和 1 221.78 m。对比发现,岱海湖秋季水位下降最为明显,其次为夏季,然而,夏季是岱海湖产流的主要季节,夏季水位的异常下降可能与气候变化、湖泊周边用水量增加有关。

3.1.2 突变诊断

突变检验发现,1982 年和 2005 年是岱海湖水位突变点(均通过 0.01 置信水平检验),由图 4 可知,1959—1982 年,岱海湖水位呈现微弱下降的特征,但水位变化整体较为稳定;1983—2005 年,岱海湖水位呈现陡坡式下降,虽然在 2005 年有所回升,



(a) 水位年际变化



(b) 水位年内变化

图4 岱海湖水位演变特征
Fig.4 Changing characteristics of water level in Daihai Lake

但仍无法改变整体下降的趋势;2006 年后,岱海湖水位再次呈现陡坡式下降,直至 2018 年降至历史系列水位最低值。1982 年之前,岱海湖受人类活动影响较小,1982 年之后,针对岱海湖的资源性开发逐渐加强,这是岱海湖水位在 1982 年发生突变的主要原因;2005 年之后,岱海湖流域取用水量显著增加,造成岱海湖水位在 2005 年发生了突变性降低。

3.1.3 变化趋势推断

利用 Hurst 系数法分析岱海湖水位变化趋势。岱海湖水位的 Hurst 系数 H 为 0.79,表示湖泊历史水位变化对未来产生持续效应,即岱海湖水位未来可能继续出现显著下降趋势。若不采取有效措施,未来岱海湖湖区面积将面临消失的巨大风险,这对区域气候调节、生态环境健康极为不利。

3.2 水位对气候要素的响应

图 5 显示,1959—2018 年岱海湖流域多年平均气温为 5.58℃,最大值和最小值分别为 7.32℃ (1998 年)和 4.35℃ (1959 年),年际整体呈现明显的上升趋势;多年平均降水量为 417.73 mm,最大值和最小值分别为 669.40 mm (2003 年)和 201.00 mm (1965 年),年际波动十分显著且整体呈现减小趋势;多年平均蒸发量为 1 804.29 mm,最大值和最小值分别为 2 214.60 mm (1966 年)和 1 215.70 mm (1963 年),年际整体呈现增加趋势并在 1966 年发

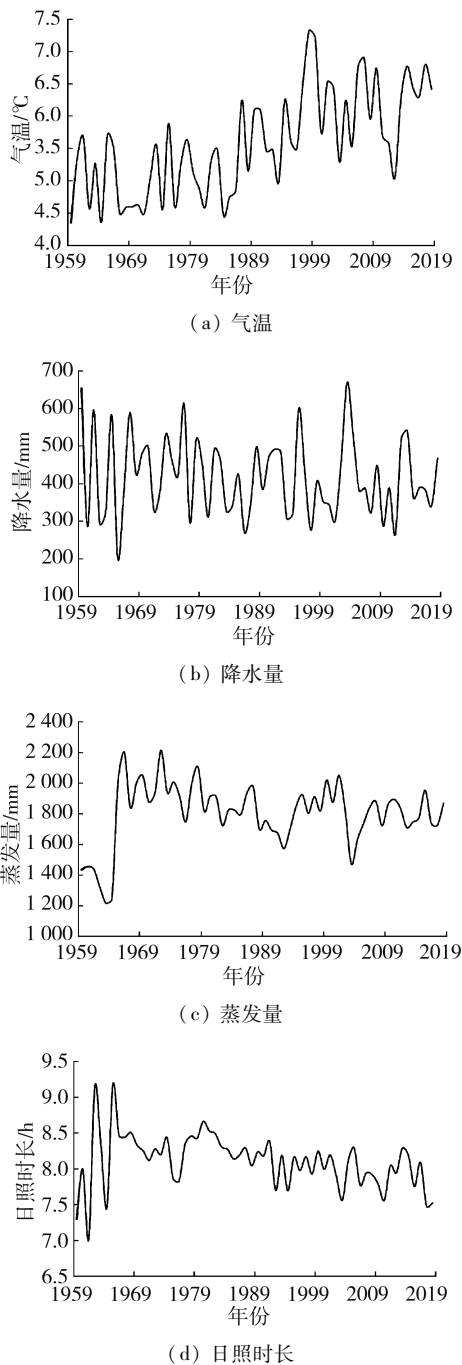


图5 岱海湖流域气候要素年均变化过程
Fig.5 Average annual change processes of climatic factors in Daihai Lake Basin

生增加式突变;多年平均日照时长为8.11 h,最大值和最小值分别为9.18 h(1965年)和7.02 h(1961年),年际整体呈现减小趋势。

partial Mantel 检验发现(表2),4个单一要素中,气温与岱海湖水位呈现较为显著的相关性,日照与水位呈现中等的显著性相关,降水与水位相关性较差,这可能与流域径流的下渗强度有关;2个组合要素中,包含气温的要素组合与岱海湖水位均呈现显著性相关,降水与日照、蒸发与日照的要素组合与水位相关性一般;3个组合要素中,气温、降水和日

照要素组合与岱海湖水位呈现显著相关性;在4个要素的共同作用下,岱海湖水位同样发生明显变化。由此推断,气温是岱海湖水位演变的主导因素,日照与蒸发是次要因素,说明气温、日照或两者的共同变化可能引起岱海湖水位发生显著变化,同时,岱海湖水位对气温的强敏感性也从侧面反映了单一气候要素的作用效应高于多要素交互作用的可能性;而岱海湖水位对降水变化反应迟钝或滞后,说明岱海湖流域现有产汇流过程较为复杂,降水过程不会立刻以径流的形式体现,流域降水-产流-下渗的交互作用是未来研究的核心内容之一。

表2 气候要素对岱海湖水位的影响

Table 2 Impacts of climatic factors on water level of Daihai Lake

影响要素	<i>p</i>	<i>r</i>
气温	0.001	0.3477***
降水	0.812	-0.0377
蒸发	0.456	0.0002
日照	0.006	0.1741**
气温+降水	0.001	0.2208***
气温+蒸发	0.001	0.2280***
气温+日照	0.001	0.3298***
降水+蒸发	0.704	-0.0270
降水+日照	0.031	0.1062*
蒸发+日照	0.016	0.1282*
气温+降水+蒸发	0.004	0.1523**
气温+降水+日照	0.001	0.2514***
降水+蒸发+日照	0.059	0.0880
气温+降水+蒸发+日照	0.001	0.2062***

注:*表示显著性等级,数量越多显著性等级越高。

3.3 水位对土地利用变化的响应

由表3可知,岱海湖流域1998年水域面积比1988年减少了19.27%,2008年水域面积比1998年减少了15.80%,2018年水域面积比2008年减少了6.25%,说明岱海湖流域水量不断减少;流域耕地面积、未利用土地面积呈现减少趋势,而林地面积、草地面积、建设用地面积呈现增加趋势,特别是1988—2018年建设用地面积增加了79.09%,增加幅度十分显著,说明岱海湖流域社会经济发展及城

表3 岱海湖流域土地利用类型动态变化

Table 3 Dynamic changes of land use types in Daihai Lake Basin

土地类型	面积变化率/%			
	1988—1998年	1998—2008年	2008—2018年	1988—2018年
耕地	-2.82	-20.87	-11.40	-31.86
林地	4.82	15.66	4.35	26.51
草地	3.51	9.03	3.80	17.16
水域	-19.27	-15.80	-6.25	-36.28
建设用地	7.63	30.49	27.51	79.09
未利用地	-2.73	3.11	-12.37	-12.12

镇化进展速度较快。由此推断,岱海湖水位的不
断减少与人类活动影响密不可分;同时,流域耕
地、未利用地面积主要向建设用地转换,水域
面积主要向林地、草地转换,这与湖泊面积萎
缩后实施的植树种草工程有关。

将 1988 年、1998 年、2008 年和 2018 年岱
海湖流域的土地利用数据输入 SWAT 模型分析
土地转化对岱海湖水位的影响。假设在土地
利用变化过程中,流域其他影响产汇流过程
的要素相对稳定或不变。表 4 显示,在土地
利用变化作用下,1998 年、2008 年和 2018
年岱海湖水量比 1988 年分别减少了 6.70%
、10.66% 和 12.48%,这也意味着岱海湖
流域林地和草地面积增加导致流域降水截
留能力增强、水源涵养能力提高、产流能力
下降等可能是岱海湖水位降低的重要因素。
综上,气候变化与水土资源开发利用是影响
半干旱区湖泊水位变化的主要因素。

表 4 岱海湖水量模拟结果

Table 4 Simulation results of water quantity in Daihai Lake

年份	水量/万 m ³	变化率/%
1988 年	5 836.73	
1998 年	5 445.80	-6.70
2008 年	5 214.63	-10.66
2018 年	5 108.52	-12.48

4 结 论

a. 1959—2018 年间岱海湖水位在 1982 年
和 2005 年出现突变,年际间呈现显著下降
趋势,且水位在未来仍可能不断降低。岱海
湖水位 3 月最高,12 月最低;春季由于融雪
效应,水位维持在较高水平;秋季由于用水
影响,水位维持在较低水平,同时,秋季水位
降低最为明显。

b. 气候变化与水土资源开发利用是影响
半干旱区湖泊水位变化的主要因素。在气候
变化条件下,岱海湖水位对气温变化最为敏
感,对日照变化的响应次之;由于岱海湖流
域降水-产流-下渗机制较为复杂,岱海湖
水位对降水变化的响应具有滞后性。此外,
岱海湖流域林地和草地面积增加可能是引
发岱海湖水位降低的重要因素。

c. 考虑到岱海湖水位未来可能出现持续
降低趋势,无外源引水情况下,未来若出现
连续枯水年份,岱海湖湖面会出现不断萎
缩的风险,因此,需要规划外调水工程以避
免湖泊消亡。

d. 合理规划岱海湖流域土地利用结构、
优化土地利用布局、严格管控流域工业用
水、加强节水改造也是应对气候变化和人
类活动带来的水位负效应的有效方式。

参考文献:

[1] KOBLE U G, SCHMID M. Ensemble modelling of ice cover for a reservoir affected by pumped-storage operation and climate change[J]. Hydrological Processes, 2019, 33 (20): 2676-2690.

[2] LIU Bojun, WANG Yu, XIA Jun, et al. Optimal water resources operation for rivers-connected lake under uncertainty[J]. Journal of Hydrology, 2021, 595: 125863.

[3] XUE P, SCHWAB D J, HU S. An investigation of the thermal response to meteorological forcing in a hydrodynamic model of Lake Superior [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120 (7): 5233-5253.

[4] LI Yuan, HU Ling, ZHAO Yongtao, et al. Meltwater-driven water-level fluctuations of Bosten Lake in arid China over the past 2,000 years[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(2): e2020GL090988.

[5] MILLY P C D, DUNNE K A, VECCHIA A V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate[J]. Nature, 2005, 438(7066): 347-350.

[6] SCORDO F, BOHN V Y, PICCOLO M C, et al. Mapping and monitoring lakes intra-annual variability in semi-arid regions: a case of study in Patagonian plains (Argentina) [J]. Water, 2018, 10(7): 889.

[7] ABBASIAN M S, NAJAFI M R, ABRISHAMCHI A. Increasing risk of meteorological drought in the Lake Urmia basin under climate change: introducing the precipitation-temperature deciles index [J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125586.

[8] 刘美萍, 哈斯, 春喜. 近 50 年来内蒙古查干淖尔湖水量变化及其成因分析[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 141-149. (LIU Meiping, HA Si, CHUN Xi. Variation and causation of Lake Qehan, Inner Mongolia over the recent 50 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(1): 141-149. (in Chinese))

[9] 张宇瑾, 于瑞宏, 张笑欣, 等. 近 30 年内蒙古入湖流域干旱特征时空变化分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 232-238. (ZHANG Yujin, YU Ruihong, ZHANG Xiaoxin, et al. Spatio-temporal variability of drought characteristics in the entering lake watershed in Inner Mongolia during the past 30 years [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(6): 232-238. (in Chinese))

[10] SATGÉ F, ESPINOZA R, ZOLÁ R P, et al. Role of climate variability and human activity on Poopó Lake droughts between 1990 and 2015 assessed using remote sensing data[J]. Remote Sensing, 2017, 9(3): 218.

[11] 魏学. 近 45 a 达里诺尔湖面积演变对气候的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 110-115. (WEI Xue.

- Response of Dali Lake area to climate factors in the past 45 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(2): 110-115. (in Chinese))
- [12] 曹国亮, 李天辰, 陆垂裕, 等. 干旱区季节性湖泊面积动态变化及蒸发量: 以艾丁湖为例[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1095-1104. (CAO Guoliang, LI Tianchen, LU Chuiyu, et al. Dynamic variation and evaporation of seasonal lakes in arid areas: a case study for the Aiding Lake[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1095-1104. (in Chinese))
- [13] 霍天赐, 颜伟, 马晓飞. 内陆河尾间湖泊水域面积变化及驱动因素研究: 以台特玛湖地区为例[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(3): 149-156. (HUO Tianci, YAN Wei, MA Xiaofei. A study of the variation and driving factors of the water area of the terminal lake of inland river: a case study of Taitema Lake region [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, 32(3): 149-156. (in Chinese))
- [14] 梁旭, 刘华民, 纪美辰, 等. 北方半干旱区土地利用/覆被变化对湖泊水质的影响: 以岱海流域为例(2000—2018年)[J]. 湖泊科学, 2021, 33(3): 727-738. (LIANG Xu, LIU Huamin, JI Meichen, et al. Effects of land use/cover change on lake water quality in the semi-arid region of Northern China: a case study in Lake Daihai basin (2000-2018) [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3): 727-738. (in Chinese))
- [15] CAO Yang, FU Congsheng, WANG Xiao, et al. Decoding the dramatic hundred-year water level variations of a typical great lake in semi-arid region of northeastern Asia [J]. Science of the Total Environment, 2021, 770: 145353.
- [16] 王卫光, 陆文君, 邢万秋, 等. 黄河流域 Budyko 方程参数 n 演变规律及其归因研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 7-13. (WANG Weiguang, LU Wenjun, XING Wanqiu, et al. Analysis of change and attribution of Budyko equation parameter n in Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 7-13. (in Chinese))
- [17] 张姝琪, 张洪波, 辛琛, 等. 水文序列趋势及形态变化的表征方法[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 58-67. (ZHANG Shuqi, ZHANG Hongbo, XIN Chen, et al. A method for characterizing trends and morphological changes of hydrological series [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 58-67. (in Chinese))
- [18] 韩先明, 左德鹏, 李佩君, 等. 雅鲁藏布江流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 16-23. (HAN Xianming, ZUO Depeng, LI Peijun, et al. Spatiotemporal variability of vegetation cover and its response to climate change in Yarlung Zangbo River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 16-23. (in Chinese))
- [19] PEREZ S I, DINIZ-FILHO J A F, BERNAL V, et al. Alternatives to the partial Mantel test in the study of environmental factors shaping human morphological variation[J]. Journal of Human Evolution, 2010, 59(6): 698-703.
- [20] SCHUOL J, ABBASPOUR K C, SRINIVASAN R, et al. Estimation of freshwater availability in the west African sub-continent using the SWAT hydrologic model [J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1/2): 30-49.
- [21] 刘柏君, 权锦, 杨超慧, 等. 基于 SWAT 模型的青海省主要流域径流模拟[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 39-44. (LIU Bojun, QUAN Jin, YANG Chaohui, et al. Simulation of runoff of major basins in Qinghai Province based on SWAT model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 39-44. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-10-26 编辑: 施业)

(上接第 14 页)

- [18] JIANG Shanhu, WANG Menghao, REN Liliang, et al. A framework for quantifying the impacts of climate change and human activities on hydrological drought in a semiarid basin of Northern China [J]. Hydrological Processes, 2019, 33(7): 1075-1088.
- [19] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 313-323. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, GUAN Xiaoxiang, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 313-323. (in Chinese))
- [20] 任立良, 沈鸿仁, 袁飞, 等. 变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 492-500. (REN Liliang, SHEN Hongren, YUAN Fei, et al. Hydrological drought characteristics in the Weihe catchment in a changing environment [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 492-500. (in Chinese))
- [21] 栗晓玲, 康绍忠, 魏晓妹, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 153-159. (SU Xiaoling, KANG Shaozhong, WEI Xiaomei, et al. Impact of climate change and human activity on the runoff of Wei River basin to the Yellow River [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2007, 35(2): 153-159. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-08-16 编辑: 俞云利)