

许钦, 张坤, 叶鸣, 等. 基于分区耦合模型的太湖流域地表水资源量研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(9): 30-41. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.003

XU Qin, ZHANG Kun, YE Ming, et al. Research on surface water resources in Taihu Lake Basin based on zonal coupling model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(9): 30-41. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.003

基于分区耦合模型的太湖流域地表水资源量研究

许钦^{1,2,3}, 张坤^{1,2}, 叶鸣⁴, 陈星⁵

(1. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 南京水利科学研究院 水文水资源研究所, 江苏 南京 210029; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 上海市嘉定区水文站, 上海 201899; 5. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:【目的】太湖流域是我国经济高度发达的区域,同时也是水资源供需矛盾突出的典型地区。为估算太湖流域多年平均地表水资源量,基于流域地理空间分布、下垫面类型及水文气象条件,【方法】提出分区耦合建模方法,将流域划分为上游山丘区和中下游平原区,分别采用新安江三水源模型和下垫面分类产汇流方法估算1956—2020年地表水资源量,并通过水库径流模拟和一维水动力模型验证结果的可靠性。【结果】研究表明:上游山丘区径流模拟平均确定性系数达0.76,相对误差控制在±7%以内;中下游平原区水位模拟确定性系数平均为0.88,丰水年拟合效果更优;模型估算的多年平均地表水资源量为178.54亿m³,较第二次全国水资源调查评价成果161.5亿m³偏大10.6%,较2006—2020年水资源公报平均值174.81亿m³偏大2.1%。【结论】分区耦合模型估算太湖流域地表水资源量具有较好的适用性和可靠性。降雨序列的延长、湖西区产流估算方式优化、下垫面变化等是造成模型同“二调”成果间存在差异的原因,未来研究中应考虑构建动态参数化方案精进模型估算能力。

关键词:太湖流域;地表水资源量;径流模拟;新安江模型;一维水动力模型

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.003

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号:TV121

文献标志码:A

文章编号:1000-0860(2025)09-0030-12



Research on surface water resources in Taihu Lake Basin based on zonal coupling model

XU Qin^{1,2,3}, ZHANG Kun^{1,2}, YE Ming⁴, CHEN Xing⁵

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China; 2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 4. Shanghai Jiading District Hydrological Station, Shanghai 201899, China; 5. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

收稿日期:2025-04-03;修回日期:2025-06-05;录用日期:2025-06-05;网络出版日期:2025-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(U2443202,52209031);长江电力智慧长江与水电科学湖北省重点实验室开放基金项目(2422020009);山东省重点研发计划项目(2023CXGC010905);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y523008,Y522018,Y524016);南京水利科学研究院研究生学位论文发展基金(Yy524017)

作者简介:许钦(1980—),男,正高级工程师,博士,主要从事流域水文学及水资源研究。E-mail:qinxu@nhri.cn

通信作者:张坤(1998—),男,硕士研究生,主要从事流域降雨径流模拟研究。E-mail:kunzhang0@163.com

陈星(1980—),女,副教授,博士,主要从事水资源评价与管理研究。E-mail:chenxing@hhu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] The Taihu Lake Basin is a highly developed economic region in China and a typical area with prominent imbalance between supply and demand of water resources. The aim is to estimate the multi-year average surface water resources in the Taihu Lake Basin based on its geographical distribution, underlying surface types, and hydrometeorological conditions. [Methods] A zonal coupling modeling method was proposed, dividing the basin into the upstream hilly area and the middle-lower plain area. The Xin'anjiang three-source model and the runoff generation and concentration method based on underlying surface classification were used respectively to estimate the surface water resources from 1956 to 2020. The reliability of the result was verified through reservoir runoff simulation and a one-dimensional hydrodynamic model. [Results] The result showed that in the upstream hilly area, runoff simulation achieved an average coefficient of determination of 0.76, with relative errors controlled within $\pm 7\%$. In the middle-lower plain area, water level simulation yielded an average coefficient of determination of 0.88, with better fitting performance in wet years. The model estimated the multi-year average surface water resources at 17.854 billion m^3 , which was 10.6% higher than the 16.15 billion m^3 reported in the Second National Water Resources Survey and Assessment and 2.1% higher than the 17.481 billion m^3 average in the water resources bulletins from 2006 to 2020. [Conclusion] The zonal coupling model demonstrates good applicability and reliability for estimating surface water resources in the Taihu Lake Basin. Differences between the model result and the "Second Survey" result primarily stem from the extended rainfall series, optimized runoff estimation method in the western lake area, and underlying surface changes. Future research should consider developing dynamic parameterization schemes to improve the model's estimation capabilities.

Keywords: Taihu Lake Basin; surface water resources; runoff simulation; Xinanjiang model; one-dimensional hydrodynamic model

0 引言

水资源是地球上最重要的自然资源之一,既是人类生产、生活必不可少的重要原料,也是国家战略性经济资源和综合国力的有机组成部分^[1]。太湖流域作为长三角城市重要的水资源供给区,不仅是全国经济最活跃、城市化水平最高的地区之一,也是水资源供需矛盾最为突出的区域之一^[2]。据《2023年度太湖流域及东南诸河水资源公报》(以下简称《公报》),2023年末全流域国内生产总值占全国GDP的9.8%,但人均水资源量仅为320 m^3 ,远低于全国人均水平。《公报》中地表水资源量指河流、湖泊、冰川等地表水体逐年更新的动态水量,即当地天然河川径流量,是直接影响生态系统和人类社会的重要资源。降水作为水文循环中的主要影响因子,目前仍是太湖流域地表水资源的主要来源,且与水资源总量具有显著相关关系^[3-4]。气候变化条件下,流域年降水量呈缓慢增长趋势,强降水的降雨总量呈上升趋势^[5-6]。因此,考虑到气候变化背景下降水特征的变化以及降水与水资源量间的相关关系,通过延长降水序列长度,有助于准确评估区域水资源量。

地表水资源量的计算与评估,不仅是水资源科学管理的基础与合理开发地区水资源的重要依据,也是协调经济发展与生态保护的关键^[7-9]。近年来,有关水资源的研究热点如水资源承载力^[10-11]、区域水资源评价^[12]等,其核心讨论对象皆以地表水资源量为

主。陈莱彤等^[13]构建概化水库模型估算了里下河平原河网区不同情景设置下的地表水资源可利用量,并提出了减缓区域水资源短缺的措施。ZHONG等^[14]使用MIKE模型估算了松嫩平原地表水资源量,并评估了气候变化和土地利用变化对流域径流深的影响。胡倩等^[15]基于洞庭湖平原实测水文气象数据,利用ArcSWAT构建洞庭湖分布式水文模型,模拟该区域径流过程并估算水资源量,对模型进行率定验证后证明该模型适用于洞庭湖平原地表水资源量估算。高庆等^[16]通过耦合产汇流模型和河网水动力模型准确模拟泰州市海陵区径流过程。马嘉忆等^[17]针对盐城市地区特点建立平原河网概化水库估算模型获取地表水资源量。FENG等^[18]构建了耦合水质与水量的一维水动力模型,用于评估浑河流域水资源量,模型估算结果与实测值的相对误差为8%。ZHANG等^[19]开展了太湖流域平原区降雨产流模型及关键影响因素研究,指出太湖平原区仍以蓄满产流为主,并且降雨量、降雨强度和微地形对降雨产流影响显著。YANG等^[20]构建分布式Green-Ampt模型探讨了太湖流域平原区农田微地形对产流的影响,指出强降水加快了农田的汇流速度。上述方法多局限在单一地形上,而太湖流域不仅存在平原区河网,还涉及湖西丘陵区和浙西山丘区,利用传统水文站资料进行径流还原方法直接估算水资源量难度较高;单一山丘区产汇流模型或平原水网模型适用性有限,无法满足太湖流域地形变化。

针对太湖流域地形构建的降雨径流模型最早由梁瑞驹等^[21]提出,通过模拟河网、湖泊水体、边界条件、降雨径流等对洪水、枯水以及调度进行研究,主要是将下垫面分为水面、水田、旱地及非耕地进行不同的产流估算,汇流估算上虽然对山丘区和平原区进行了区分,但使用的方法采用了较为传统的瞬时单位线,无法充分考虑水文要素在时空上分布不均的特征,对水资源量的估算难以达到精度要求。CHEN 等^[22]在该估算方法的基础上,对太湖流域构建了水文水动力耦合模型,湖西区与平原区产流采用下垫面分类估算方法,浙西山丘区采用分布式新安江模型进行了地表水资源量的估算。刘浏等^[23]为了模拟太湖流域洪水过程,在考虑地形的基础上,采用了分区耦合的方法,对山区和平原区分别采用分布式 VIC 模型和水动力学 ISIS 模型,对太湖流域具有较好的适应性。此外,近年来太湖流域城市化快速发展,地形及气候存在较大变化,而对延长太湖流域水文要素序列的相关水资源评估研究不足^[24-26]。第二次全国水资源调查评价(以下简称“二调”)针对太湖流域地表水资源量同样采用了山丘区、平原区分别估算。其中,浙西山丘区采用新安江三水源模型,与其相似的湖西区则与平原区一同采用下垫面分类的估算方法。因此,通过考虑太湖流域地形丰富、优化水利分区估算方法、延长降水资料序列长度等方面,构建适用于该地区的模型是合理估算地表水资源量的必要方法。

为探究太湖流域地表水资源量的估算方法,本文基于全国水资源调查评价中太湖流域地表水资源量估算方法,提出分区耦合建模,将太湖流域分为上游山丘区和中下游平原区,针对不同分区特征应用不同的降雨产汇流模型估算太湖流域地表水资源量,改进了湖西区估算方法,同时延长了数据序列长度,通过山丘区水库入库径流、平原区水位的多源数据验证,估算太湖流域多年平均地表水资源量,以期能为流域水资源科学管理提供科学方法。

1 研究区及数据来源

太湖流域地处长江三角洲南缘,涉及 31 个县级行政单位。受亚热带季风气候控制,气候特征表现为冬冷夏热、降水丰沛、夏季多台风,冬季受到西北冷气团侵袭影响,以西北风为主,夏季受到海洋气团控制,以东南风为主。流域地势呈四周高中间低的“碟形”,地形从治水角度可分为西部山丘区、中部低平原、沿江滨海高平原以及太湖湖区。

由于太湖流域地域范围广、地形地貌特征不一、时空降水分布不均,单一的降雨径流估算方法不具备代表性和准确性,根据太湖流域基本地形特征及不同下垫面类型的产汇流计算特点、河网水系位置情况、水利工程布局等因素,将流域划分为 8 个四级水利分区(见图 1)。

针对太湖流域水资源综合规划对土地利用和土地覆被变化调查的要求,以及不同土地利用方式对流域产汇流的影响程度,将太湖流域的土地利用方式综合归纳成四种类型(见表 1)。其中,水域包括河流、湖泊和水库;水田包括有水源保证和灌溉设施,能经常灌溉,用于种植水稻、莲藕等水生作物的耕地;旱地及其他中,旱地指除水田外的其他耕地,包括水浇地、旱地、望天田、菜地等,其他包括耕地、水域以外的用地;建设用地包括城市、集镇、农村居民点、工矿、国防、名胜古迹、学校及企事业单位用地,铁路、公路及其附属设施用地。

本文降雨径流模型构建所使用到的水文数据包括降水、蒸发、流量、水位、水库蓄水量及坝上水位,均来自《中华人民共和国水文年鉴》第 6 卷长江流域第 19 太湖区(苕溪,南溪水系)及第 20 册太湖区(湖区水系,黄浦江水系,杭嘉湖水系)1956—2020 年实测数据,以此作为基础数据资料进行太湖流域地表水资源量计算。水利分区下垫面面积数据来源于太湖流域水资源调查评价成果。

2 研究方法 with 评价标准

基于下垫面类型、水文气象条件等将湖西区和浙西山丘区划分为上游山丘区,将武澄锡虞区、阳澄淀泖区、湖区、杭嘉湖区、浦西区和浦东区划分为中下游平原区,采用不同模拟方法分别对二者进行地表水资源量估算。

2.1 上游山丘区

湖西区与浙西山丘区的土地利用情况类似,旱地及建设用地占地超过分区面积的 60%,而水田的占比相对较小,分别为 29% 和 8%,可作为自然流域。且两区内有 4 座大中型水库,具有较好的长系列降雨径流资料,故采用新安江三水源模型计算上游山丘区径流过程。该模型广泛应用于湿润半湿润区以进行洪水预报和水资源评估与管理。其中坡面汇流按照线性水库退水规律出流汇入河网,河道汇流基于滞后演算法对各面积分别进行汇流计算。新安江三水源模型参数对结果精度有关键性影响^[27]。通过模拟浙西山丘区、湖西区 4 座大型水库 2008—2019 年倒推入

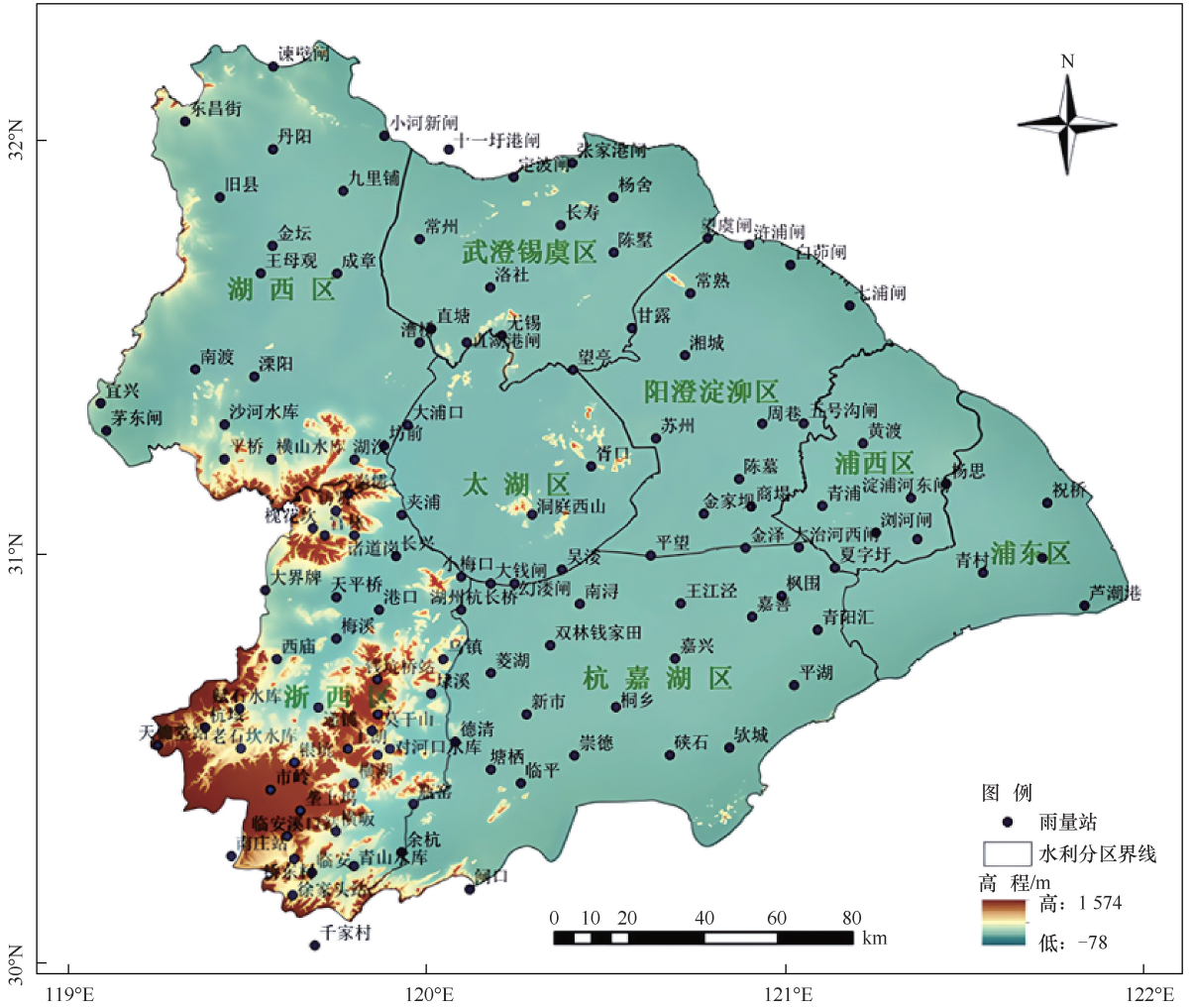


图 1 太湖流域水利估算分区示意

Fig. 1 Schematic diagram of water conservancy estimation zoning in Taihu Lake Basin

表 1 太湖流域水利分区及土地利用类型基本情况

Table 1 Basic information of water conservancy zoning and land use types in Taihu Lake Basin

水利分区	总面积	水域	水田	旱地	建设用地
湖西区	7 478. 10	723. 71	2 152. 83	3 100. 66	1 500. 90
武澄锡虞区	4 028. 50	229. 77	949. 83	908. 60	1 940. 30
阳澄淀泖区	4 312. 10	714. 68	548. 48	1304. 81	1 744. 13
湖区	3 158. 20	2 396. 61	36. 19	412. 14	313. 26
杭嘉湖区	7 552. 40	647. 42	2 007. 22	2 346. 31	2 551. 45
浙西山丘区	5 954. 50	264. 91	460. 89	4 486. 86	741. 84
浦西区	4 614. 00	285. 74	652. 02	913. 16	2 763. 09
浦东区	2 449. 00	146. 82	508. 33	559. 38	1 234. 46
合计	37 097. 81	5 262. 84	6 807. 46	13 472. 54	11 554. 97

库径流日过程进行参数率定及验证。其中, 2008—2016 年为率定期, 2017—2019 年为验证期。太湖流域内相同气候及地理空间利用的区域描述水文特征参数大致一致, 因此在进行模型的参数率定后, 可以将率定结果作为该水利分区中更小分区的模型估算参数^[28]。

2.2 中下游平原区

中下游平原区分为产流计算和汇流计算。其中, 产流计算分别对四种下垫面类型展开(见图 2), 分别计算各个下垫面类型的产流量, 再利用面积加权平均得到各水利分区总产流量 R_Z 。

各下垫面及水利分区产流量计算公式如下。

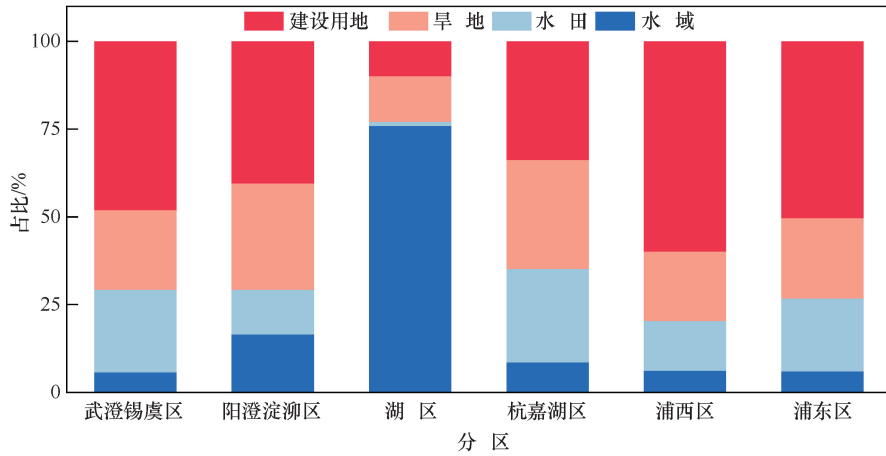


图 2 中下游平原水利分区的不同下垫面类型面积占比

Fig. 2 Area proportion of different underlying surface types in water conservancy zoning of middle and lower reaches of plain

(1) 水域。计算公式为

$$W_E = W_S + (P - C_E \times E) \quad (1)$$

若 $W_E \leq W_M$,

$$R_W = 0 \quad (2)$$

若 $W_E > W_M$,

$$R_W = W_E - W_M \quad (3)$$

式中, W_E 为水体时段末蓄水量(mm); W_S 为水体时段初蓄水量(mm); P 为日降水量(mm); C_E 为蒸发皿折算系数; E 为日蒸发量(mm); W_M 为圩区水体蓄水容量(mm); R_W 为水域产流量。

(2) 水田。计算公式为

$$H_2 = H_1 + P + M_i - R_R - \alpha \times C_E \times E - \beta \quad (4)$$

若 $H_2 > P$,

$$\begin{cases} R_R = H_2 - H_p \\ M_i = 0 \\ H_2 = P \end{cases} \quad (5)$$

若 $H_L < H_2 < H_p$,

$$\begin{cases} R_R = 0 \\ M_i = 0 \\ H_2 = H_1 + P + M_i - R_R - \alpha \times C_E \times E - \beta \end{cases} \quad (6)$$

若 $H_2 < H_L$,

$$\begin{cases} R_R = 0 \\ M_i = H_U \\ H_2 = H_U \end{cases} \quad (7)$$

式中, H_1 、 H_2 为水田始、末时刻水深(mm); P 为日降水量(mm); M_i 为灌溉水量(mm); R_R 为水田产流量; α 为水稻生长需水系数; C_E 为蒸发皿折算系数; E 为日蒸发量(mm); β 为水田渗漏量(mm/d); H_p 为淹没水深(mm); H_U 为水田适宜水深上限(mm); H_L

为水田适宜水深下限(mm)。

江苏、浙江、上海水稻灌溉制度如表 2 所列。

(3) 旱地及其他、建设用地。采用蓄满产流模型及三层蒸散发模型进行计算。汇流计算将圩区划分为圩区内和圩区外, 圩区内利用排涝模数限制, 圩区外采用汇流曲线计算, 最后将二者按面积加权法得到中下游平原区径流过程。圩区内的产水量一部分汇聚于圩内水田、池塘、河沟内, 另一部分依靠动力排涝抽出。假定圩内排涝模数 PL , 超过排涝模数的圩区产流量将留在圩区内, 根据次日产流情况及排涝原则判断是否部分或全部排出。圩区内的汇流过程公式为

$$\begin{cases} \text{若 } R_{PNET} \leq PL, \\ R_p = R_{PNET} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \text{若 } R_{PNET} > PL, \\ R_p = PL \end{cases} \quad (9)$$

式中, R_{PNET} 为圩内产流量(mm); R_p 为圩区内产水量(mm)。

对于平原区的圩区外汇流计算, 目前尚无成熟理论体系和规范标准可供借鉴, 本模型沿用以往成果的处理方法即假定汇流曲线^[29], 以 40%、40%、20% 的分配比例将圩区外的产流量在降水后续 3 d 分批排出圩区并汇入河网。

中下游平原地区缺乏能够控制河道断面的水文站点, 无法满足将径流数据作为模型模拟效果的要求。因此, 径流结果验证采用一维水动力模型 MIKE11 中的水动力模块(HD)(见图 3)。对中下游平原区的主要河道进行概化并划分断面, 将中下游平原区径流过程结果作为一维水动力模型的输入条件, 模拟下游断面水位, 对比模拟水位与实测水位, 若误差在合理范

表 2 水稻灌溉制度

Table 2 Rice irrigation regimes

地 区	水稻生长期	起始日期/月-日	结束日期/月-日	H_p/mm	H_U/mm	H_L/mm	$\beta/mm \cdot d^{-1}$	α
江 苏	泡田期	06-19	06-23	200	10	5.00	2	1.00
	返 青	06-24	06-30	50	30	20.00	2	1.35
	分叶前期	07-01	07-19	30	20	1.30	2	2.00
	分叶后期	07-20	08-04	30	20	1.30	2	2.00
	孕 穗	08-05	09-03	40	30	1.30~1.40	2	2.00
	抽 穗	09-04	09-16	50	30	20.00	2	1.30
	成 熟	09-17	10-30	20	10	0.00	2	1.05~1.30
浙 江	泡田期	06-12	06-15	200	40	20.00	2	1.00
	返 青	06-16	06-27	80	60	40	2	1.00
	分叶前期	06-28	07-28	30~40	20~30	1.15~1.30	2	2.00
	分叶后期	07-29	08-06	0	0	1.40	0	0.00
	孕 穗	08-07	09-04	10~50	40	30.00	2	1.45~1.50
	抽 穗	09-05	09-11	40	30	20.00	2	1.40
	成 熟	09-12	10-27	10~30	10~20	10.00	2	1.05~1.35
上 海	泡田期	06-14	06-23	200	10	5.00	2	1.00
	返 青	06-24	06-30	50	30	20.00	2	1.26
	分叶前期	07-01	07-19	30	20	1.52	2	2.00
	分叶后期	07-20	08-04	30	20	1.86	2	2.00
	孕 穗	08-05	09-03	50	40	30.00	2	1.56
	抽 穗	09-04	09-16	50	30	20.00	2	1.61
	成 熟	09-17	10-20	20	10	0.00	2	1.50

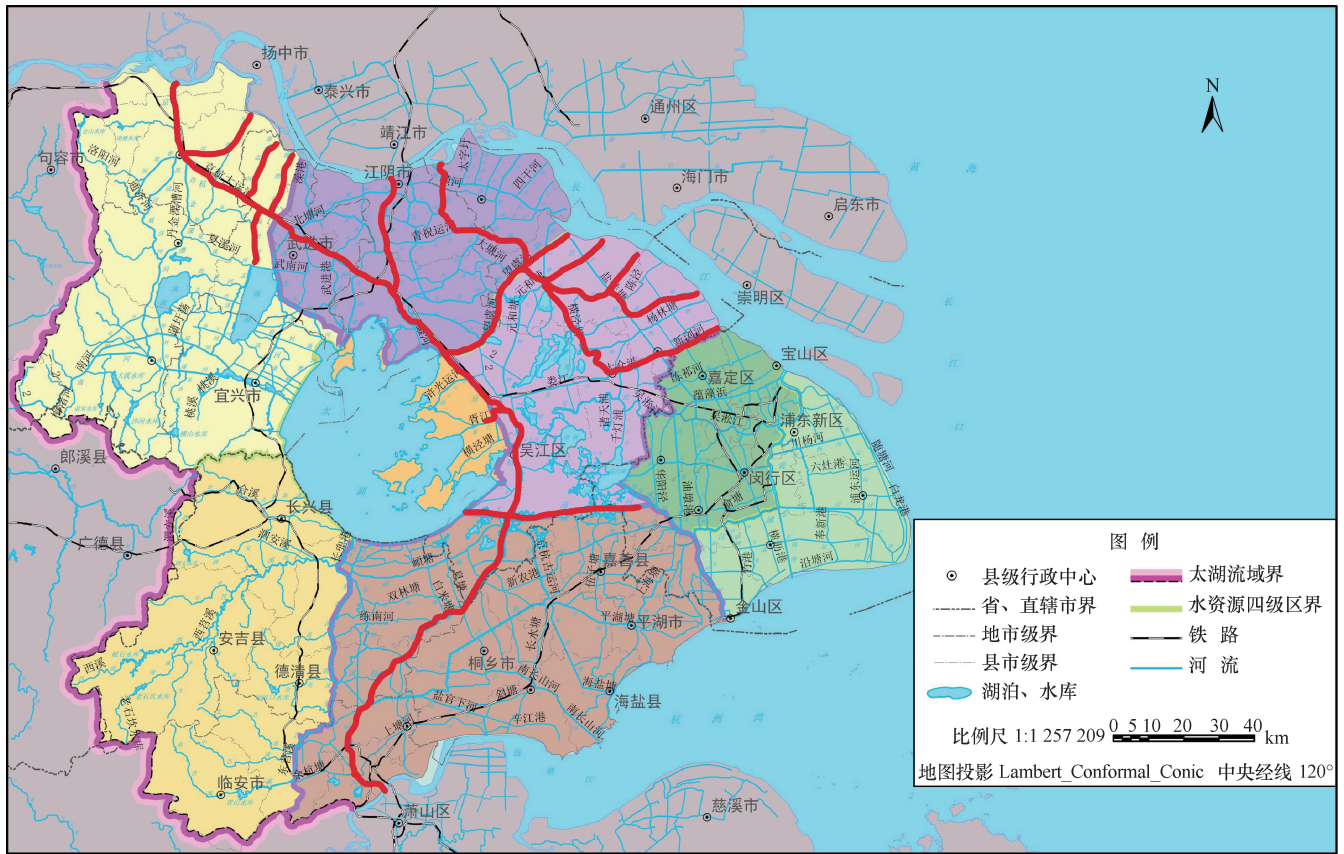


图 3 一维水力模型计算区域

Fig. 3 Calculation area of one-dimensional hydrodynamic model

围内则认为中下游平原区径流过程计算结果正确。选取的水位站包括拱宸桥站、新市站、常州站、甘露站、平望站。其中 2016—2017 年为率定期, 2020 年为验证期。为排除引江济太措施对中下游河网水位的影响, 进而影响中下游平原区产汇流模型参数确定, 选择率定期及验证期的汛期(5—9 月)作为比对时段。

2.3 评价指标

参照《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008), 本文选取平均相对误差(MRE)、确定性系数(DC)进行模拟精度评价, 计算公式为

$$MRE = \frac{1}{N} \sum \frac{|sim - obv|}{obv} \times 100\% \quad (10)$$

$$DC = \frac{1}{N} \sum \left(1 - \frac{\sum (sim - obv)^2}{\sum (obv - \overline{obv})^2} \right) \quad (11)$$

式中, *sim* 为计算值; *obv* 为实测值; *N* 为年份。

3 结果与讨论

3.1 上游山丘区

采用新安江三水源模型对山丘区径流过程进行模拟与验证, 其径流估算结果统计如表 3 所列。浙西山丘区内的青山水库率定期相对误差为 -13.60 ~ 18.89%, 确定性系数平均为 0.67, 检验期平均相对误差为 2.33%, 确定性系数 0.74~0.80。湖西区内大溪水库、沙河水库及横山水库率定期的平均相对误差分别为 -1.43%、3.05%、6.88%, 平均确定性系数为 0.70、0.68、0.87; 验证期 3 座水库的相对误差范围分别为 2.17% ~ 10.44%、-5.08% ~ 6.21%、-3.79% ~ 6.20%, 确定性系数平均为 0.76、0.83、

0.81, 均达到《水文情报预报规范》精度等级要求标准。

本文新安江模型参数如表 4 所列。率定结果表明, 通过参数迁移方法处理水利分区参数问题是可行的, 模型精度能够满足水资源评价要求。除不透水面积比例系数和地下水库消退系数外, 其余多数参数可在不同流域间通用。4 座水库 2019 年验证期日降雨径流模拟结果如图 4 所示, 模拟径流过程与实测过程相似度高, 表明所采用参数能够有效反映浙西山丘区及湖西区的径流特征。

3.2 中下游平原区

将下游平原区径流过程模拟结果作为水动力模型的上游边界输入, 输出断面水位与实测数据进行对比。2016 年、2017 年 5 个水位站的平均绝对误差为 0.07 m, 确定性系数平均为 0.88。其中, 拱宸桥站位于江南运河终点附近, 受周边河网干扰较小, 拟合效果最优, 确定性系数分别达到 0.88、0.89; 其余 4 站水位整体拟合较好, 汛期模拟水位偏大。由此, 确定了平原区蓄满产流计算参数(见表 5)。其中, 湖区的排涝模数设置为 1 000, 表示直接产流。

利用 2020 年拱宸桥、新市、常州、甘露和平望 5 站的实测日水位数据对模型参数进行进一步验证, 水位绝对误差范围为 0.04 ~ 0.14 m, 确定性系数为 0.73 ~ 0.97, 均满足精度要求。对比 2016 年、2017 年、2020 年的拟合效果, 2016 年的 5 站总体拟合最佳(见图 5)。该年是自 1954 年以来太湖流域第 4 场大洪水^[30], 表明本模型在丰水年份具有较好的模拟效果。

表 3 水库径流估算结果统计

Table 3 Statistics of reservoir runoff estimation results

参 数	年 份	青山水库		大溪水库		沙河水库		横山水库	
		相对误差/%	确定性系数	相对误差/%	确定性系数	相对误差/%	确定性系数	相对误差/%	确定性系数
率定期	2008	18.89	0.58	8.53	0.97	17.05	0.63	11.95	0.77
	2009	-11.28	0.53	-7.65	0.52	-13.58	0.41	-4.73	0.94
	2010	6.66	0.56	18.41	0.71	19.10	0.49	27.55	0.79
	2011	5.95	0.86	-3.65	0.42	13.71	0.78	27.27	0.91
	2012	-15.30	0.68	-16.59	0.72	-1.90	0.86	-6.74	0.90
	2013	12.41	0.85	-2.48	0.84	-16.88	0.82	-12.30	0.88
	2014	9.23	0.57	-4.32	0.73	27.17	0.67	16.88	0.85
	2015	-13.60	0.61	4.49	0.76	-22.02	0.53	-4.54	0.82
	2016	4.35	0.79	-9.59	0.66	4.83	0.88	6.55	0.95
	平均	1.92	0.67	-1.43	0.70	3.05	0.68	6.88	0.87
验证期	2017	-0.90	0.80	10.44	0.78	6.21	0.68	6.08	0.80
	2018	7.62	0.74	4.58	0.73	5.98	0.84	-3.79	0.77
	2019	0.25	0.76	2.17	0.77	-5.08	0.98	6.20	0.86
	平均	2.33	0.77	5.73	0.76	2.37	0.83	2.83	0.81

表 4 新安江三水源模型参数

Table 4 Parameters of Xinanjiang three-source model

参 数	浙西山丘区		湖西区	
	青山水库	大溪水库	沙河水库	横山水库
蒸发折减系数 K	0.99	0.98	1.20	1.20
不透水面积比例系数 IM	0.01	0.01	0.01	0.01
张力水容量 WM/mm	120	140	140	140
上层张力水 UM/mm	20	20	20	20
下层张力水 LM/mm	60	80	80	80
分布曲线指数 B	0.2	0.1	0.1	0.3
深层蒸发系数 C	0.15	0.15	0.14	0.14
地下水消退系数 CG	0.995	0.999	0.990	0.994
壤中消退系数 CI	0.60	0.64	0.30	0.30
地下出流系数 KG	0.1	0.2	0.2	0.2
壤中消退系数 KI	0.5	0.5	0.4	0.4
自由水容量 SM	16	14	9	21
分布曲线指数 EX	1	1	1	1
马斯京根法参数 KE	18	24	18	18
马斯京根法参数 XE	0.491	0.491	0.491	0.491
流域面积 A/km^2	603	90	148	155
河网消退系数 CS	0.20	0.30	0.08	0.27

3.3 地表水资源量对比分析

模型计算的太湖流域多年平均地表水资源量为 178.54 亿 m^3 , 略高于水资源公报公布的 174.81 亿 m^3 , 偏差为 2.1%。对比 2006—2020 年降雨径流模型计算结果与太湖流域管理局历年发布的公报数据(见表 6), 模型计算地表水资源量结果与公报成果相比整体偏差较小, 平均相对误差为 2.63%, 其中丰水年结果更接近公报数据。

“二调”评价统计期为 1956—2000 年, 期间太湖流域多年平均地表水资源量为 161.5 亿 m^3 , 而模型对 1956—2020 年计算结果为 178.54 亿 m^3 , 偏大 10.6%; 若限定于 1956—2000 年, 模型估算值为 168.74 亿 m^3 , 仅偏大 4.5%, 相较之下与调查成果更为接近。各水利分区在不同时间序列下的模型计算值与“二调”成果对比如图 6 所示, 显示模型总体估算略高。具体而言, 1956—2000 年计算结果平均

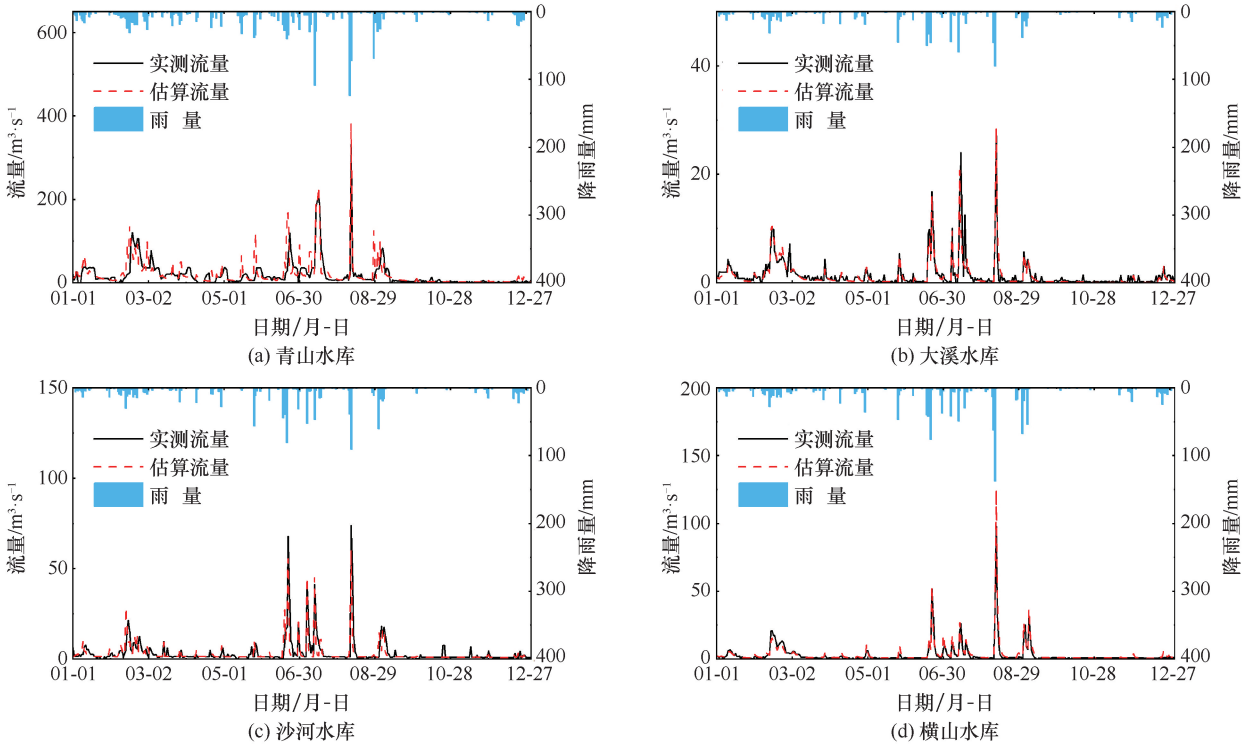


图 4 各水库新安江三水源模型 2019 年日径流模拟

Fig. 4 Daily runoff simulation for different reservoirs using Xin'anjiang three-source model in 2019

表 5 平原区蓄满产流计算参数

Table 5 Calculation parameters for saturation-excess runoff generation in plain areas

水利分区	A/km^2	K	UM/mm	LM/mm	WM/mm	B	C	IM	$PL/mm \cdot d^{-1}$
武澄锡虞区	4 028.5	0.960	20	90	130	0.11	0.17	0.01/0.2	40
阳澄淀泖区	4 312.1	0.960	20	90	130	0.11	0.17	0.01/0.2	40
湖区	3 158.2	0.960	20	90	130	0.11	0.17	0.01/0.2	1 000
杭嘉湖区	7 552.4	0.960~0.965	20	90	130	0.11	0.17	0.01/0.2	30
浦东区	2 449.0	0.925	20	90	130	0.11	0.17	0.01/0.2	40
浦西区	2 165.0	0.925	20	90	130	0.11	0.17	0.01/0.2	40

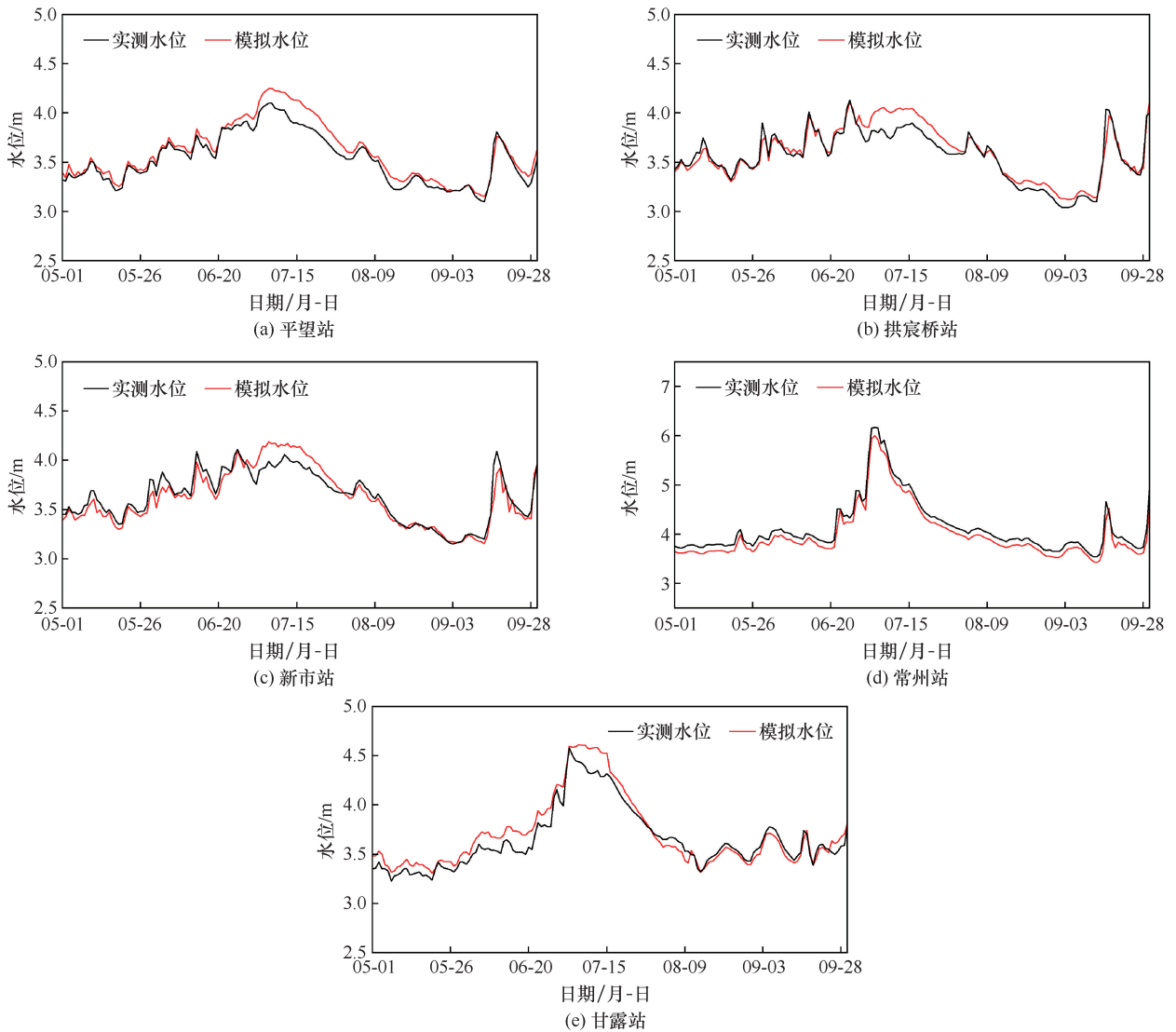


图 5 2016 年水位站模拟结果

Fig. 5 Simulation results of water level stations in 2016

表 6 降雨径流模型计算结果与太湖流域水资源公报对比
亿 m³

Table 6 Comparison between rainfall-runoff model calculation results and Taihu Lake Basin water resources bulletins

年份	模型计算	公报成果	相对误差/%
2006	136.64	130.40	4.79
2007	154.73	155.40	-0.43
2008	178.30	175.70	1.48
2009	219.21	222.00	-1.26
2010	191.03	187.10	2.10
2011	176.55	174.80	1.00
2012	213.42	207.30	2.95
2013	137.99	139.90	-1.37
2014	223.72	204.00	9.67
2015	319.38	311.60	2.50
2016	401.54	404.40	-0.71
2017	207.28	183.70	12.84
2018	228.81	204.00	12.16
2019	231.78	204.10	13.56
2020	234.24	292.30	-19.86

高出二调成果 8%，1956—2020 年则高出 13%。其中，太湖区、浦东区和湖西区偏差尤为显著，1956—2000 年模型结果分别为 9.53、10.15 和 28.81 亿 m³，1956—2020 年分别为 8.98、10.75 和 31.57 亿 m³，均高于二调结果（分别为 7.8、8.8 和 27.6 亿 m³）。综上，太湖流域总体水资源量呈增加趋势，这与李原园等^[31]对我国水资源量变化特征的研究结果相吻合。

4 结果讨论

本研究计算的 1956—2020 年太湖流域多年平均地表水资源量较“二调”成果偏大 10.6%，这一差异主要源于以下 3 个方面的因素。

(1) 关键区域计算方法的改进。本研究对湖西丘陵区的产流计算进行了重要修正。“二调”中该水利分区的估算方式与平原区相同，采用下垫面分类估算

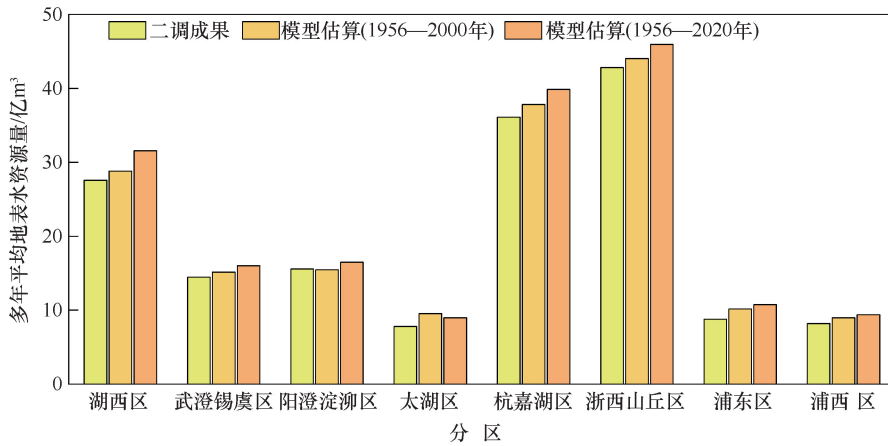


图6 分区耦合模型与“二调”成果对比

Fig. 6 Comparison between zonal coupling model results and second survey results

方法, 由此得出的径流系数为 0.2~0.3, 与湖西区实际径流系数相差较大, 而本研究基于流域实际地形特征(山地占比>60%)和水库入库径流数据, 采用新安江模型改进湖西山丘区产汇流估算方法, 由此估算出的径流系数为 0.35。验证表明, 该方法使径流模拟的确定性系数提升, 更符合湿润区山丘流域的水文响应机制。

在采用三水源新安江模型估算上游地表水资源量的过程中, 部分参数的率定结果不同。其中, 蒸发折减系数的差异较大, 湖西区蒸发折减系数平均值大于浙西山丘区, 造成该种差异的原因主要在于二者的下垫面组成。湖西区的水田占比较浙西山丘区多 21%, 集中分布的水稻田、湖泊、鱼塘等提供了充足且稳定的水分供应, 使得水面蒸发和植物蒸腾量能够接近潜在蒸散发水平。而浙西山丘区水田面积占比较小且分散, 土壤水分较湖西区更易流失且供应不稳定。在湖西区中, 大溪水库的蒸发折减系数较其他 2 座水库明显较小。三个水库均位于湖西区内, 处于同一气候区内, 参数相似性较高, 但大溪水库控制流域面积较其他两座水库更小, 流域平均坡度为 8.5%, 小于沙河水库的 12.8% 和横山水库的 15.3%, 难以形成更大的有效蒸发面, 因此蒸发折减系数小于后两者。沙河水库和横山水库的蒸发折减系数均大于 1, 同样可能由于上述湖西区及各水库控制流域特征产生。此外, 在使用模型估算地表水资源量时, 模型参数率定以相对误差和确定性系数作为评价指标, 而水文模型存在“异参同效”现象, 在后续模型的使用中, 应对该现象展开相关研究。

(2) 输入数据的时空扩展与优化。近年来, 太湖流域降水格局发生了显著变化^[32]。相较于“二调”

采用的 1956—2000 年降水序列, 本研究通过增补代表性雨量站数据并将序列延长至 2020 年, 使输入雨量的空间代表性和时间连续性显著提升。这一调整不仅改变了降水-径流关系的统计特征, 还影响了模型参数的率定过程, 最终导致水资源量估算的系统性偏差。

(3) 下垫面变化的动态影响。近 20 年来, 太湖流域经历了显著的土地利用变化, 相应变化会影响流域产流特征^[33-34]。与“二调”时期相比, 2020 年流域水面减少 5.2%、水田减少 41.1%、旱地增加 2.2%、建设用地增加 75.0%。这种下垫面变化通过改变不透水面积系数等关键参数, 使得相同降水条件下旱地及建筑用地的计算产流量增加, 是导致多年平均地表水资源量估算差异的重要因素。此外, 本文模型未设置多个土地利用类型数据场景以进行地表水资源量的估算, 在一定程度上造成了本文模型估算同“二调”成果的差异。为了更好地把握太湖流域多年平均地表水资源量, 通过划分阶段, 使用不同土地利用类型数据进行分段估算后汇总, 预计可以得到更为理想的结果。

通过对比模型计算结果和水资源公报多年均值, 误差仅为 2.1%, 说明本文使用的降雨径流模型对计算太湖流域地表水资源量具有较好的可靠性; 相较“二调”成果, 本文的估算结果更为接近水资源公报结果, 说明通过改进湖西区产汇流计算方法, 能够提高太湖流域多年平均地表水资源量的估算精度。

5 结论

(1) 湖西区及浙西山丘区 2 个上游山丘区采用新安江三水源模型计算径流, 利用水利分区内 4 座大型

水库的倒推入库流量作为实测流量进行参数率定及验证, 大溪水库、沙河水库、横山水库及青山水库的率定期平均相对误差范围-1.43%~6.88%, 确定性系数平均为0.73, 检验期平均相对误差分别为2.33%~5.73%, 确定性系数范围为0.74~0.83, 径流过程与实测过程相似度高, 适用于太湖流域山丘区地表水资源量估算要求。

(2)中下游平原区产流计算将下垫面区分为水域、水田、旱地、建设用地四种类型分别计算, 汇流计算在四种下垫面类型基础上再区分圩区内及圩区外讨论; 将计算结果作为输入数据在一维水动力模型中进行验证, 利用水动力模型输出的下游水位与实测水位进行对比检验中下游平原区产汇流计算结果可靠性, 率定期平均绝对误差为0.07 m, 确定性系数平均为0.88, 检验期水位绝对误差范围为0.04~0.14 m, 确定性系数平均0.87, 适用于太湖流域中下游平原区地表水资源量估算要求。

(3)降雨径流计算模型通过长序列水文气象资料、调整湖西区产流计算方式等, 计算得到太湖流域近65a多年平均地表水资源量为178.54亿 m^3 , 比2006—2020年太湖水资源公告平均值174.81亿 m^3 偏大2.1%, “二调”成果161.5亿 m^3 偏大10.6%, 利用同期序列计算, 本文降雨径流模型计算结果为168.74亿 m^3 , 比“二调”成果偏大4.5%。

本研究通过构建太湖流域分区耦合模型计算了太湖流域65a平均地表水资源量, 为快速城市化流域的水资源评估提供了更适应现状的技术框架。然而, 气候变化背景下降水格局的改变以及人类活动的持续影响, 需在未来研究中通过动态参数化方案加以考虑。

参考文献 (References):

[1] 王建华, 刘欢, 胡鹏. 水资源“量-质-域-流-生”全要素保护体系架构与实施策略[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(8): 51-58.
WANG J H, LIU H, HU P. Architecture and strategies for total elements protection of water resources in “quantity-quality-domain-connectivity-biology” [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(8): 51-58.

[2] HU Z B, PANG Y, XU R C, et al. Systematic evaluation and influencing factors analysis of water environmental carrying capacity in Taihu Basin, China[J]. Water, 2023, 15(6): 1213.

[3] 金科, 王雪姣, 陈甜. 降雨及引江济太调度对太湖水位变化的影响分析[J]. 水文, 2020, 40(6): 63-67.
JIN K, WANG X J, CHEN T. Analysis on the impacts of rainfall and Yangtze-Taihu water diversion on the water level variation in Taihu Lake[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(6): 63-67.

[4] 胡萌, 盛英武. 青岛年降水量和水资源量变化特征研究[J]. 水文, 2022, 42(1): 103-108.
HU M, SHENG Y W. Study on variation characteristics of precipitation and water resources in Qingdao [J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(1): 103-108.

[5] 许钦, 叶鸣, 蔡晶, 等. 1956—2018年太湖流域降水统计特征及演变趋势[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 127-132.
XU Q, YE M, CAI J, et al. Precipitation statistical characteristics and evolution trend in Taihu Lake Basin from 1956 to 2018 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 127-132.

[6] 陶雨薇, 王远坤, 王栋, 等. 太湖流域湖西区暴雨时空分布特性分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(3): 43-50.
TAO Yuwei, WANG Yuankun, WANG Dong, et al. Analysis of spatio-temporal distribution of rainstorms in the western region of Taihu Lake Basin [J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(3): 43-50.

[7] SCHROEDER R, MCDONALD K C, CHAPMAN B D, et al. Development and evaluation of a multi-year fractional surface water data set derived from active/passive microwave remote sensing data [J]. Remote Sensing, 2015, 7(12): 16688-16732.

[8] 李世曙, 彭莹, 崔巍. 厦门市地表水资源可利用量计算[J]. 水文, 2023, 43(2): 86-90.
LI S S, PENG Y, CUI W. Study on available surface water resources of Xiamen City [J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(2): 86-90.

[9] 韩昕泽, 宋松柏, 孟雪, 等. 1994—2021年陕西省水资源分布演变特征[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(6): 79-87.
HAN X Z, SONG S B, MENG X, et al. Characteristics of distribution and variations of water resources in Shaanxi Province from 1994 to 2021 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(6): 79-87.

[10] QIN J, NIU J, NIU W L. Research on water resource carrying capacity of capital water conservation functional zone [J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 10: 1108631.

[11] 王新苑, 张芮, 舒和平, 等. 引大入秦工程受水区水资源承载力评价[J]. 人民黄河, 2025, 47(1): 78-82.
WANG X Y, ZHANG R, SHU H P, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in the water receiving area of the water diversion project from Datong River to Qinwangchuan Region [J]. Yellow River, 2025, 47(1): 78-82.

[12] 黄锋华, 黄本胜, 谭超, 等. 基于DPSIR模型的广东省水资源安全评价及障碍因子研究[J]. 水利发展研究, 2024, 24(12): 100-107.
HUANG Fenghua, HUANG Bensheng, TAN Chao, et al. Study on water resources security and obstacle factors in Guangdong Province based on DPSIR model [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(12): 100-107.

[13] 管清花, 汪玉静, 刘海娇, 等. 基于MIKE水文模型的流域地表水资源利用[J]. 人民黄河, 2023, 45(S1): 28-29.

[14] LU Z, ZHANG J L, LI C Q, et al. Effects of land use change on runoff depth in the Songnen Plain, China [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 24464.

- [15] 胡倩, 王军霞, 刘世强, 等. 基于 SWAT 模型的洞庭湖平原水资源量计算[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(3): 244-252.
HU Q, WANG J X, LIU S Q, et al. Calculation of water resources in Dongting Lake Plain based on SWAT model [J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(3): 244-252.
- [16] 高庆, 刘芸辰, 李根, 等. 基于水文水力模型的平原地表水资源研究[J]. 水力发电, 2022, 48(8): 15-20.
GAO Q, LIU Y C, LI G, et al. Study on plain surface water resources based on hydrologic-hydrodynamic coupling model [J]. Water Power, 2022, 48(8): 15-20.
- [17] 马嘉忆, 董增川, 邵逸卿, 等. 平原河网地区地表水资源可利用量计算方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(10): 50-54.
MA J Y, DONG Z C, SHAO Y Q, et al. A study of the calculation method of available surface water resources of plain river network area [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(10): 50-54.
- [18] FENG R, WENG L E, LIU J, et al. Surface water resources assessment based on water quantity and quality coupling [J]. Desalination and Water Treatment, 2023, 303: 34-43.
- [19] ZHANG P N, CHEN G, WANG C H, et al. Rainfall-runoff generation patterns and key influencing factors in the plain of the Taihu Lake Basin, China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 58: 102247.
- [20] YANG H, JIANG Y H, ZHOU Q P, et al. Effects of microtopography on runoff generation in plain farmland: New insights from an event-based rainfall-runoff model[J]. Water, 2022, 14(17): 2686.
- [21] 梁瑞驹, 程文辉, 蔡文祥, 等. 太湖流域水文数学模型[J]. 湖泊科学, 1993, 5(2): 99-107.
LIANG R J, CHENG W H, CAI W X, et al. Hydrological system model for Taihu lake drainage basin [J]. Journal of Lake Sciences, 1993, 5(2): 99-107.
- [22] CHEN G, WANG C H, FANG X, et al. Distributed-framework basin modeling system: IV. application in Taihu Basin [J]. Water, 2021, 13(5): 611.
- [23] 刘浏, 徐宗学. 太湖流域洪水过程水文-水力学耦合模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(5): 530-536.
LIU L, XU Z X. Hydro-dynamical simulation of flood in the Taihu basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48(5): 530-536.
- [24] 王强, 宋琛, 张建云, 等. 平原水网区洪水形态特征变化及其影响因素[J]. 地理学报, 2024, 79(11): 2780-2795.
WANG Q, SONG C, ZHANG J Y, et al. Change of flood morphological characteristics and its influencing factor over the river network plain region [J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(11): 2780-2795.
- [25] 王强, 林芷欣, 贺瑞敏, 等. 太湖流域典型下垫面土壤水响应规律及影响因素[J]. 水科学进展, 2024, 35(5): 700-710.
WANG Q, LIN Z X, HE R M, et al. Responding patterns and influencing factors of soil moisture under different underlying surfaces over the Taihu Lake basin [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(5): 700-710.
- [26] 张伊佳, 陈星, 许钦, 等. 太湖下游河网区水质变化特征与引水调控效果[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 79-86.
ZHANG Y J, CHEN X, XU Q, et al. Characteristics of water quality change in the downstream river network area of Taihu Lake and effect of water diversion control [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 79-86.
- [27] 刘希琛, 阚光远, 丁留谦, 等. 新安江模型参数优化的一种约束 SCE-UA 算法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(5): 434-443.
LIU Xichen, KAN Guangyuan, DING Liujian, et al. Study on a constrained SCE-UA algorithm for parameter optimization of the Xinanjiang model [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(5): 434-443.
- [28] 刘浏, 徐宗学, 黄俊雄. 气候变化对太湖流域径流的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 371-377.
LIU L, XU Z X, HUANG J X. Impact of climate change on runoff in the Taihu basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(3): 371-377.
- [29] 赵永军, 杨珏, 程文辉. 太湖流域产汇流模拟[J]. 河海大学学报, 1998, 26(2): 110-113.
ZHAO Y J, YANG J, CHENG W H. Runoff model for the Taihu Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1998, 26(2): 110-113.
- [30] 王同生. 太湖流域 2016 年大洪水分析[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(6): 60-62.
WANG T S. "2016 heavy flood" analysis for Taihu Basin [J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(6): 60-62.
- [31] 李原园, 李云玲, 郭旭宁, 等. 1956—2016 年中国水资源总量时空分布规律及变化特征[J]. 水科学进展, 2025, 36(1): 18-27.
LI Y Y, LI Y L, GUO X N, et al. Spatial-temporal distribution and variation characteristics of water resources in China during 1956—2016 [J]. Advances in Water Science, 2025, 36(1): 18-27.
- [32] HU J, LIU Y, SANG Y F, et al. Precipitation variability and its response to urbanization in the Taihu Lake Basin, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 144(3): 1205-1218.
- [33] HUANG C B, CHENG X J, ZHANG Z M. Future land use and habitat quality dynamics: Spatio-temporal analysis and simulation in the Taihu Lake Basin [J]. Sustainability, 2024, 16(17): 7793.
- [34] JIN T, ZHANG X, XIE J C, et al. Study on hydrological response of runoff to land use change in the Jing River Basin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(45): 101075-101090.

(责任编辑 王 璐)