

上海市水资源量与可利用水资源量计算方法综述

王一鸣¹, 薛剑锋², 乔红杰², 顾圣华³, 刘曙光^{1,4}, 娄厦^{1,4}, 杨中元¹

(1. 同济大学土木工程学院; 2. 长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局; 3. 上海市水务局;
4. 同济大学长江水环境教育部重点实验室)

摘要:上海市作为典型的超大型水质型缺水城市,本地水资源匮乏,虽然过境水资源丰富,但受咸潮入侵、突发污染等威胁,供水安全保障面临严峻挑战。本文基于上海市的自然地理情况与水资源分区情况,介绍了上海市的水资源构成、水量水质特点及利用现状。结合现有成果,总结了适用于上海市本地水资源量、过境水资源量及相应可利用量的分析和计算方法,指出部分传统方法应用于高度城市化河网区域的局限性,同时对未来的研究方向提出了展望。

关键词:水资源综合利用;区域水资源量;可利用水资源量;本地水资源;过境水资源;上海市

A review of methods for calculating water resources and available water resources in Shanghai//Wang Yiming¹, Xue Jianfeng², Qiao Hongjie², Gu Shenghua³, Liu Shuguang^{1,4}, Lou Sha^{1,4}, Yang Zhongyuan¹ (1. College of Civil Engineering, Tongji University; 2. Changjiang River Estuary Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology of Changjiang Water Resources Commission; 3. Shanghai Water Authority; 4. Key Laboratory of Yangtze Water Environment of the Ministry of Education, Tongji University)

Abstract: As a typical megacity facing water quality-induced water scarcity, Shanghai suffers from limited local water resources. Although transit water resources are abundant, the security of its water supply is severely challenged by threats such as saltwater intrusion and sudden pollution incidents. Based on the natural geographic conditions and water resources zoning of Shanghai, this paper introduces the composition of the city's water resources, the characteristics of water quantity and quality, and the current utilization status. Based on existing research, methods for analyzing and estimating local water resources, transit water resources and their corresponding exploitable quantities are summarized. The limitations of certain traditional methods when applied to highly urbanized river network regions are identified and future research directions are proposed.

Key words: comprehensive utilization of water resources; regional water resources; available water resources; local water resources; transit water resources; Shanghai City

水资源是自然资源的组成部分,也是人类赖以生存和发展的基础性资源,对社会生产和居民生活起着至关重要的作用。我国水资源总量较为丰富,但人均水资源占有量仅占全球平均水平的1/4^[1],许多城市存在水资源短缺问题。水资源短缺是关系经济社会发展的重大战略问题,它不仅制约了经济可持续发展,也极大地影响了人民群众的用水安全和城市的高质量发展^[2-5]。上海市是我国超大型城市,生产、生活、生态用水需求均较大。上海市过境水(太湖流域来水和长江过境水)丰富、本地水贫乏,目前建有长江陈行水库、青草沙水库、东风西沙水库和黄浦江上游金泽水库四大水源地,构成了

“两江并举、集中取水、水库供水、一网调度”的水源地原水系统格局。但上海市水源地受地理位置影响,面临突发污染事故和咸潮入侵风险,水质关键指标季节性波动大、改善难度高且周期长,同时市域内水源地间连通互济保障能力有限,因而是我国典型的水质型缺水城市。2024年初,上海市政府正式批复现代化市级水网建设规划,以“三江一网十枢”为总布局,聚焦水资源配置、水生态保护治理与防洪除涝减灾,强化水资源保障体系的支撑作用。科学地统计区域水资源量与可利用水资源量有助于提高水资源利用效率、优化水资源配置,实现经济社会与生态环境的和谐发展。

基金项目:上海市水务局科研项目(沪水科2023-06);上海市科技创新行动计划项目(22ZR1464200,22230712900)

作者简介:王一鸣(2000—),女,硕士研究生,主要从事河口海岸水动力与水环境研究。E-mail:2330819@tongji.edu.cn

通信作者:娄厦(1986—),女,副教授,博士,主要从事河口海岸水动力与水环境研究。E-mail:lousha@tongji.edu.cn

本文基于上海市的自然地理情况,介绍了水资源的构成和特点,并参考《全国水资源综合规划技术大纲》(水规计[2002]330号文件)的总体框架,依据 GB/T 23598—2009《水资源公报编制规程》、SL/T 238—1999《水资源评价导则》、SL/T 278—2020《水利水电工程水文计算规范》及相关文献资料中的方法与案例,总结了上海市水资源量的分析和计算方法,以期为保障城市供水安全、提高水资源利用效率提供科学依据。

1 上海市水资源特征

1.1 自然地理

上海市坐落于长三角前缘、太湖流域下游,北枕长江、东临东海、南濒杭州湾、西与江浙相接。全市陆域总面积为 6340.5 km²,根据地形可划分为东部滨海平原、中部碟缘高地、西部淀泖低地、北部江口沙洲 4 个部分^[6]。上海市气候属亚热带季风气候,温和湿润、雨量充沛,其降水空间分布不均、年际变化大、季节性变化亦大,主要集中于 5—9 月,分为春雨期、梅雨期、秋雨期,其中盛夏和初秋的暴雨具有局部性、短历时、高强度的特点。上海市分属于太湖流域和长江流域,水网交织,主要有长江口、黄浦江及其支流吴淞江(苏州河)、太浦河等^[7-9],上海市水系分布及重要水文站分布见图 1。据 2023 年统计数据,全市共有河道(湖泊)46441 条(个),河湖面积 655.1905 km²,河湖水面率 10.33%。水面比降平缓,感潮河段受潮汐作用影响,局部水流呈往复流。

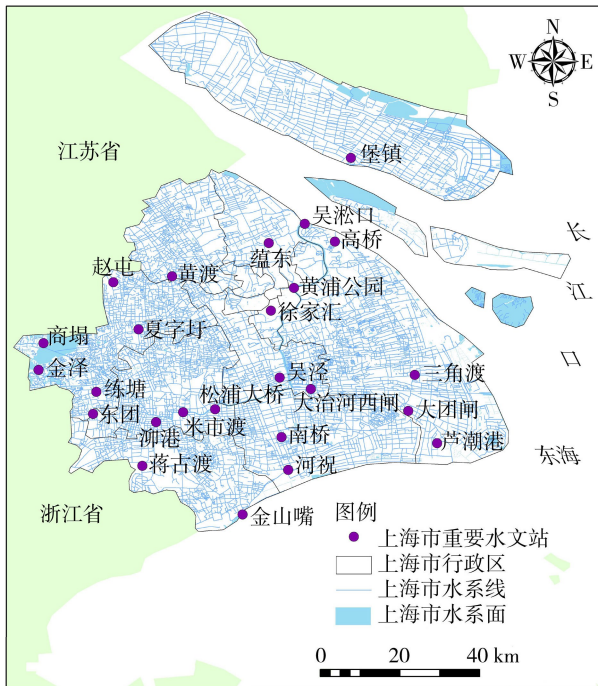


图 1 上海市水系分布及重要水文站分布

受半日潮影响,每天出现两次高潮和两次低潮,河口平均潮差约 2.3 m。

1.2 水资源分区

水资源分区以区域自然地理环境为基础,需考虑流域的完整性、与其他区域的协调性等,并结合该地区经济发展趋势和水资源开发利用需求^[10-11],具体包括气候条件和地质条件分区、行政分区与流域分区。按行政分区,上海市可分为中心城区、嘉定区、宝山区、闵行区、松江区、浦东新区、奉贤区、青浦区、金山区、崇明区。按流域分区,上海市包括黄浦江、杭嘉湖区、武阳区、通南及崇明岛诸河。由于上海市各部分水资源量大小相差较大且分布特点各不相同,需在分区的基础上对水资源分片开展计算,通常可分为长江口、黄浦江、淀山湖及 14 个水利片。结合《2023 上海市河道(湖泊)报告》与文献^[12],14 个水利片的面积及所在行政区如表 1 所示,14 个水利片总面积为 6158.62 km²,占上海市陆域总面积(6340.5 km²)的 97.13%,其余区域主要为沿海滩涂及未纳入水利片划分的区域。

表 1 上海市水利片基本情况

序号	水利片	总面积/ km ²	河湖面 积/km ²	所在行政区
1	嘉宝北片	698.77	57.51	嘉定区、宝山区、普陀区
2	蕴南片	173.37	4.42	宝山区、静安区、杨浦区、普陀区、虹口区
3	淀北片	179.28	6.35	长宁区、徐汇区、闵行区
4	淀南片	186.75	10.00	闵行区、徐汇区
5	浦东片	1976.60	190.79	浦东新区、闵行区、奉贤区
6	青松片	758.23	69.33	青浦区、松江区
7	太北片	85.05	16.14	青浦区
8	太南片	99.96	6.73	青浦区、松江区
9	浦南东片	479.00	32.93	金山区、松江区
10	浦南西片	293.06	19.00	金山区、松江区
11	高榻片	32.42	4.81	青浦区
12	崇明岛片	1070.00	102.21	崇明区
13	长兴岛片	76.87	17.97	崇明区
14	横沙岛片	49.26	4.56	崇明区
全市		6158.62	542.75	

2 上海市水资源构成与特点

2.1 水资源构成

上海市水资源包括本地水资源和过境水资源。本地水资源由地表径流和地下水组成。地表径流包括黄浦江、苏州河、川杨河、淀山湖等。根据《2023 年上海市水资源公报》,2023 年上海市地表径流量为 34.80 亿 m³,折合年径流深 548.8 mm。上海市主要地下水为松散岩类孔隙水^[9],2023 年上海市地下水资源量为 9.76 亿 m³,地下水与地表水资源不重复量为 6.70 亿 m³。因本地水资源总量等于地表径流和地下水与地表水资源不重复量之和,

2023年上海市本地水资源总量为41.50亿m³。

过境水资源则由长江过境水量和太湖流域来水量组成,水资源量十分丰裕。2023年上海市太湖流域来水量为195.4亿m³,主要经黄浦江干流下泄排入长江口,通过黄浦江松浦大桥断面的年平均净泄流量为620m³/s;长江干流来水量为6812.0亿m³,长江徐六泾水文站平均流量为21600m³/s。

2.2 水资源特点及现状

2.2.1 水量

结合2023年上海市本地水资源总量与人口数量,上海市人均水资源占有量为167m³左右,低于全国及世界平均水平,其中地下水仅约占地表径流量的28%,且曾存在地下水超采问题。在时间分布上,上海市丰水年、平水年、枯水年交替出现,出现比例约为0.21:0.54:0.25;水资源量年内分配不均、洪枯季节变化大,汛期水资源量约占全年径流量的60%^[13]。在空间分布上,受自然条件和工程措施的影响,区域性动态分布不均,存在着“郊区水网稠密、水资源量多,市中心区水网稀疏、水资源量少”的特点^[14],如2023年崇明区与中心城区水资源量分别为9.51亿、1.78亿m³,前者水资源量约为后者的5倍。

过境水资源量是上海市水资源量的重要组成部分,其数量约为本地水资源量的169倍,可弥补本地水资源量的不足。过境水资源量存在年内分配不均、年际变化相对较小的特点,以长江大通站为例,大通站最大、最小年径流量分别出现于1954年(13590亿m³)和2011年(6666亿m³),多年平均径流量为8974亿m³,年径流量在多年均值上下波动;大通站多年平均最大、最小径流量分别出现于7月(50000m³)和1月(11800m³),前者径流量约为后者的4.24倍;汛期为5—10月、枯水期为11月至次年4月,其中汛期径流量占全年径流量的70.15%,径流年内波动明显高于年际变化^[15]。

近年来上海市不断推进水资源开发项目,以提高水资源统筹配置水平。2023年上海市在用公共供水原水工程(包括青草沙、陈行、崇明东风西沙、黄浦江上游金泽饮用水水源及黄浦江上游松浦大桥备用饮用水水源)总取水能力达1334.5万m³/d,大幅提高了上海市水源抗风险能力。同时,针对地下水超采问题,目前已全面关闭公共供水深井水厂,连续13年保持人工回灌量大于开采量^[3],2023年上海市人工回灌量达1512.20万m³,约为深层地下水开采量的20.4倍,地下水超采问题得到遏制。

2.2.2 水质

上海市地表水水质有显著提升。在1999年上

海市主要骨干河道、湖泊水质综合评价中,Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类、劣Ⅴ类河长分别占比10.1%、30.9%、31.2%、27.8%^[7]。而根据上海市生态环境局发布的《2023上海市生态环境状况公报》,全市主要河湖断面水质为Ⅱ~Ⅲ类、Ⅳ类的断面分别占比97.8%、2.2%,无Ⅴ类、劣Ⅴ类断面,可见地表水质已有明显改善。

对于地下水水质而言,根据《2018上海市生态环境状况公报》,国家级地下水监测点水质为Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类的数量分别占比7.7%、76.9%、15.4%;而根据《2023上海市生态环境状况公报》,地下水水质为Ⅲ类、Ⅳ类和Ⅴ类的监测点数量分别占比2.3%、58.2%、39.5%,水质为Ⅲ类的地下水占比小幅下降,而Ⅴ类的地下水占比显著上升。

虽然上海市过境水资源量较为丰富,但水资源的利用在一定程度上受到水质条件的限制。黄浦江作为上海市重要的通航河道和接纳水体,其水质一方面面临着如航运事故、油品化学品泄漏等突发性污染及藻类、水葫芦等外源生物入侵的风险^[3,16],另一方面会受上游来水、生活污水与工农业污水等因素影响。例如:黄浦江吴泾段受流经化工区、上游农田多、相邻地块正开发建设等因素影响,其COD_{Cr}指标年际间有所上升,其他耗氧有机污染物指标降幅低于其他河段;黄浦江河口段因存在滨江雨污水合流排放问题,其溶解氧水平明显低于其他河段且改善效果不佳^[17]。因此,黄浦江水厂取水口一再向污染较轻的上游迁移^[18-19],但下泄水量较小时(如枯水季节)易受污水上溯的危害。

由于长江来水水量丰沛且水质良好,上海市人民政府在长兴岛西北方冲积沙洲青草沙上建设了青草沙水库,作为上海的水源地。该水库是目前国内最大的蓄淡避咸河口江心水库,具有库容大、水体停留时间长、水体自净能力强的特点^[20]。目前上海市原水供应总量的75%来自长江口水源地,可见其对全市供水的重要作用。虽然长江口水量丰沛、水质良好,但盐水入侵对长江口水质和可利用的淡水资源量具有严重影响。在长江径流量较小时(如枯水年份),长江口会遭遇不同程度的盐水入侵,一般为5~7d,严重时为十几天,极端情况下超过20d。盐水入侵会造成长江口水源地取水口的含氯度超标,若盐水入侵持续时间超过水源地供水能力,便会对城市供水安全造成严重威胁。例如:2014年长江口咸潮入侵事件历时19d,氯化物质量浓度最高超过3000mg/L,远超250mg/L的标准,影响人口高达200万^[21];2022年长江流域“汛期反枯”现象使陈行、青草沙、东风西沙水库均遭遇咸潮入侵问题,入

侵次数分别为 8、5、11 次,最长影响时长分别为 27、98、28 d,直通城市连续供水天数的极限,青草沙水库氯化物质量浓度最高达 2 980 mg/L^[22],给城市供水安全带来了巨大的挑战。

3 上海市水资源量与可利用水资源量计算方法研究进展

上海市水资源量分析首先需进行水资源分区,根据选用水文站、参证站的水文资料进行三性审查^[23],并进行还原计算与插补延长的数据处理工作。插补延长多使用相关分析法与水文比拟法^[24-25]来弥补收集的资料出现代表性较差或缺测的情况,以提高其可靠性;还原计算多使用分项调查法^[26-27],并分析选用水文站降雨-径流关系的一致性。

上海市水资源总量为地表径流量、地下水资源量中与地表水资源不重复量、太湖流域来水量与长江过境水量之和^[28];而可利用水资源量则是水资源总量中在技术可行、经济合理的情况下通过工程措施进行调节利用且有一定保证率的部分。

3.1 本地水资源量

本地水资源量包括地表径流量与地下水资源量。对于地表径流量,可以结合流域水量平衡法、年径流深等值线图法及各类模型(例如地面分类模型^[29-32]、SWAT 模型^[33-36]、HEC-HMS 模型^[37])进行计算。陈科信^[38]曾基于流域水量平衡公式估算了上海市本地区地表径流。等值线图法亦为常用手段,如周黔生^[39]在对杭州市进行分区后,结合等值线图法计算了各分区地表水资源量,并取其和为杭州市地表水资源量。近年来遥感技术的发展进一步提升了等值线图法的精度,如孙永寿等^[40]利用 ArcGIS 软件 ArcToolbox 将特殊地形区矢量等值线作内插处理,使用栅格化等值线法统计得到研究区水资源量;曾艳芬等^[41]采用 ArcGIS 自动绘制和人工经验修订相结合的方法绘制了径流深等值线图,并采用面积加权法量算了多年平均径流深,最后推求得到了地表水资源量;Kushwaha 等^[42]结合

ArcGIS 软件与 SWAT 模型计算了地表径流量,并评估了地表径流向深层含水层补给的地下水补给潜力。

流域水量平衡法与等值线图法概念清晰、计算便捷,但对于上海这个高度城市化且下垫面条件复杂的平原河网地区城市,分布式水文模型(如 SWAT)和水文水动力耦合模型^[43]能有效结合上海市城市化进程中的土地利用类型变化、水利工程调度等情况,更好地刻画城市下垫面变化与人类活动对地表径流量的影响。对于地表水可利用量的估算需区分不同单元,单一河道区适合采用扣损法^[32,44-45]或基于扣损法建立的去头斩尾法^[46],可减少流域内不同区域经济水平及工程建设不平衡所带来的影响。地表径流量与地表水可利用量计算方法对比见表 2。上海市大部分地区属河网密集区,河道纵横,水流交换复杂,直接应用扣损法较为困难,更宜采用水文水动力耦合模型进行模拟,如基于扣损法构建的平原区概化水库调蓄模型^[47-48],该模型综合考虑不同来水频率、工程引提水能力及生态用水情况来计算地表水可利用量及汛期弃水量,是研究河网地区可利用水资源量的有效手段。

对于地下水资源量可采用补给法、基流切割法^[49-51]进行计算,根据水量均衡原理^[6],含水层年补给量取含水层年净开采量及含水层年储存量的变化量之和。地下水资源分为浅层地下水(潜水)和深层地下水(承压水),潜水资源因透水性弱且易遭受污染,一般不开采利用,目前可开发利用的是承压水^[13]。地下水可开采量计算可使用可开采系数法^[52-54],取为可利用系数与地下水资源量之积。鉴于上海市长期面临地面沉降问题,在计算可开采量时,必须考虑开采量与地下水位及地面沉降的互动关系,如朱晓强^[55]结合罚函数法与变尺度法,建立了一维地面沉降非线性耦合数学模型,以计算大浦东地区承压含水层可开采地下水量。该方法对控制地面沉降具有重要参考价值。地下水资源量与地下水可开采量计算方法对比见表 3。上海市作为典型的软土地区,地下水超采易引发地面沉降,因此在

表 2 地表径流量与地表水可利用量计算方法对比

类别	方法	优点	缺点	适用性
地表径流量	流域水量平衡法	水循环过程概念清晰	各平衡项的精确测定存在难度,误差易累积	可用于理论分析或作为其他方法的校验基准
	等值线图法	原理简单,计算便捷	在站点稀疏或下垫面变化剧烈地区精度有限	适用于上海市水资源量宏观估算
	水文模型、水文水动力耦合模型	物理机制明确,能精细刻画下垫面空间异质性	数据需求量大,率定和验证过程复杂,计算成本高	适用于人类活动影响下上海市地表径流量评估
地表水可利用量	扣损法及其改进方法	计算简便,参数易获取	平原河网区水流方向不定、往复流显著,对其刻画不足	适用于上海市单一河道区
	水文水动力耦合模型	水流运动、闸泵调度情况模拟精确,结果可靠	模型构建复杂,需要详细的地形、水利工程运行等数据	适用于上海市河网密集区

表3 地下水资源量与地下水可开采量计算方法对比

类别	方法	优点	缺点	适用性
地下水 资源量	补给法	概念直接	参数(如降雨入渗系数)空间 变异性大	适用于上海市平原区地下水资源 量计算
	基流切割法	利用河道流量过程线数据, 计算便捷	方法选择存在主观性	适用于上海市山丘区地下水资源 量计算
地下水 可开采量	可开采系数法	操作简单,估算快速	系数取值存在主观性	可作为上海市区域性宏观规划的 参考
	耦合地面沉降的 数学模型	定量刻画开采-水位下降-地 层变形过程	需详细的地质参数,技术复杂	是实现上海市水资源可持续利用 与城市安全双目标的重要方法

可开采系数法的基础上,应进一步采用耦合地面沉降机制的数学模型进行校核,以确保水资源开采的地质环境安全。

对于本地水资源总量,除 GB/T 23598—2009《水资源公报编制规程》中的规范法外,还可参考水平衡方程法^[56]、Grey-Markov 模型^[57]等进行计算。对于本地可利用水资源总量,其总体计算思路为“地表水可利用量+地下水可开采量-两者重复计算量”,也有学者采用基于水量和水质的可利用水资源量指数法^[58]、MLF 流量法^[59]、可用流量法^[60]、F. J Mock 模型^[61]、Thorntwaite 水量平衡法^[62-63],或结合公共领域卫星数据产品^[64]进行推求。

3.2 过境水资源量

上海市过境水资源量包括太湖流域来水量和长江过境水量,可以使用代表站法^[65]进行推求。徐六泾水文站位于长江下游干流河口段,是长江入海水量的流量控制测站,大通水文站是长江干流最后一个径流控制站,两者实测流量数据可从长江水文网获取;黄浦江干流也有两大控制断面,上游以松浦大桥测站为常设断面,下游以吴淞口测站为调查断面^[12]。《2023 年上海市水资源公报》依据徐六泾水文站年平均流量、黄浦江松浦大桥断面年平均净泄流量分别推求其年入海水量和年净泄水量,即过境水资源量。对于长江水量,阮仁良^[12]参照大通水文站的实测水量,根据其与大通、徐六泾站区间水量之和推求徐六泾站多年平均径流量;卜东平^[15]以大通站与徐六泾站的区间来水量在大通站来水量中的占比为倍比,将大通站实测径流量放大得到长江上海段年过境水量;刘伟莘^[66]汇总了水闸和泵站引水量,取长江入海流量为大通流量与净引水流量之差。

计算可利用的过境水资源量时,需综合考虑水质维持需水(如压制咸潮)、生态需水及水利工程调度等因素。以长江口可利用水资源量为例,卜东平^[15]在不考虑长江河道地下水资源量的前提下,将长江上海段年可利用过境水资源量取为长江上海段年过境水量扣除生态用水及压制咸潮所需水量;顾圣华^[13]考虑咸水入侵的影响,建立了长江口吴淞站

多年平均月含氯度与相应长江月平均流量之间的关系,推算出长江口含氯度不超标情况下所需的长江上游来水流量,并将可利用量取为长江口年平均入海水量与冲盐必须保证入海水量之差。

除上述方法以外,还可以使用图解法、超标天数分析法进行计算。其中,图解法^[67]即建立长江口(以吴淞站为代表)出现含氯度月内超过 250 mg/L 的天数与相应长江大通站月平均流量相关图,得到一般情况下长江口含氯度不超标时的大通流量。超标天数分析法^[67]则是通过分析长江口含氯度超标天数与对应长江大通站月平均流量资料,建立相关方程,同样可推算出长江口含氯度不超标所需的长江来水流量。

同时,学者们进一步考虑潮差、风况等因素,结合相关模型(例如盐度预测经验模型^[68]、ECOM-si 三维盐度数学模型与 Delft 3D 模型^[69]等)计算、探讨了避免时间段内连续盐度超标的临界流量。如高华斌等^[70]基于新建站盐度、大通站流量、青龙港潮差间的相关关系,建立了盐度-流量-潮差多元回归模型,可用于流量与潮差不同时大于等于 12 500 m³/s 和大于 250 cm 情况下的临界流量经验值计算。

长江口咸潮入侵是制约上海市过境水资源可利用性的关键因素,长江口水质维持需水计算方法对比见表 4。对于上海市这样的对水资源安全保障要求极高的特大城市,可以采用能够综合考虑流量、潮差、风况等多重因子的盐度数学模型,更精确地模拟咸潮上溯规律,为水库避咸蓄淡调度提供精准预报支持。

生态需水量包括航运需水量、生物多样性需水量、河床冲淤变化需水量等,其计算方法可分为水文学法、水力学法、栖息地模拟法、整体分析法四大类。河口地区可根据 SL/T 712—2021《河湖生态环境需水计算规范》中的入海水量法,参考河流开发利用程度相对较低年代的控制断面生态需水量与天然径流量之比,确定河口生态需水量占入海水量的比例;亦可借助数学模型,如王高旭等^[71]根据盐的质量分数这一反映河口生态环境是否健康的敏感因子,采

表4 长江口水质维持需水计算方法对比

方法	优点	缺点	适用性
经验法(图解法、超标天数分析法等)	基于历史数据,形式简单、计算快速	难以捕捉咸潮入侵的复杂物理过程(如潮汐、风场的影响)	适用于上海市水情紧急时的快速判断
盐度数学模型	物理机制明确,模拟流量、潮汐、风况等多因子共同作用下的盐度时空分布	模型构建、率定和验证需要海量数据和高水平专业技术	适用于上海市可利用的过境水资源量精确管理与风险评估

用大通站流量作为模型的上边界输入条件,计算了大通站不同流量时下游各控制站点盐的质量分数,以上海市自来水公司盐水入侵标准为控制标准,求得长江大通站适宜的生态流量。此外,南水北调、三峡工程等重大水利工程对长江口可利用水资源量的影响也需纳入考量,如阮仁良等^[72]根据上海市水务局《长江三峡工程对河口水文情况和环境的影响》的研究结果,取徐六泾站多年平均实测径流量减去冲盐输沙通航水量和南水北调东线引水量,结合三峡工程调蓄水量得到长江口可利用水资源量。

同样,对于黄浦江可利用水资源量,为了尽量抑制下游污水的上溯,可将黄浦江松浦大桥站多年平均净泄流量减去控制水质所需平均下泄流量,求得其可利用水资源量^[7]。2018年水利部发布的《太湖流域水量分配方案》指出,金泽水库实施后松浦大桥断面最小月净泄流量控制指标为 $100\text{ m}^3/\text{s}$;顾圣华^[13]结合“7Q10”法,将近十年最枯月平均流量或90%保证率最枯月平均流量作为参考值,但若上溯严重,应通过太浦闸及两岸口门调度增大下泄流量;刘水芹等^[73]基于MIKE软件建立了上海市内陆河网地区水量水质数学模型,以氨氮浓度为标准,分析了太浦闸调度下泄流量变化对松浦大桥站净泄流量与水质的影响;彭焱梅等^[74]在太浦闸调度基础上进一步考虑了两岸口门调度,采用太湖流域平原河网水量水质数学模型,模拟了不同典型年金泽水库、松浦大桥净泄流量与氨氮浓度情况;毛兴华等^[75]考虑黄浦江属长江支流,水资源条件受干流控制,提出增加氯离子浓度作为保障因子。黄浦江作为上海市重要的饮用水源和纳污河道,其可利用水资源量的确定需兼顾水质和水量。可以采用水动力模型(如MIKE、Delft 3D)模拟分析不同调度情景(如太浦闸调控、口门启闭)对净泄流量和关键水质指标(如氨氮、氯离子浓度)的影响,从而科学确定满足水质目标的可利用水资源量。

4 研究展望

水资源量、可利用水资源量及各分项的计算方法多种多样,不同计算方法在参数选取、空间尺度等方面存在差异。传统方法(如等值线图法、扣损法、可开采系数法等)评价高度城市化、河网密布、存在

地面沉降风险地区的水资源时可能存在适用性不佳、精度不足等局限。在今后的研究中,应着力推动水文-水动力模型深度耦合,发展适应超大城市下垫面复杂性的水资源评价模型,并融合遥感等新型监测数据,加强多源数据的融合与同化,提升模型在无资料或缺测区域的模拟能力。

过境水资源量是上海市水资源总量的重要组成部分,其可利用性常受咸潮入侵、污水上溯等水质问题制约。未来可开展针对过境水资源的水量-水质联合计算,通过基于物理过程的水文水动力耦合模型或基于数据驱动的机器学习等智能算法开展多情景联合调度研究,模拟不同气候条件和上游人类活动(工程调度等)组合下的水资源供给格局,考虑极端气候事件或突发污染事故对水资源可利用量的影响,为提升特大型城市水资源系统的韧性与保障能力提供前瞻性科学支撑。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 2023年中国水资源公报[R]. 北京:中国水利水电出版社,2023.
- [2] 周琦,池飞,逢勇,等. 可利用水资源量正逆向联合计算方法[J]. 水资源保护,2016,32(5):42-46. (Zhou Qi, Chi Fei, Pang Yong, et al. A combined forward and reverse method for available water resources calculation[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5): 42-46. (in Chinese))
- [3] 龚李莉,蔡梅,王元元,等. 新时期水资源保护面临的形势及对策建议:以上海市为例[J]. 人民长江,2023,54(增刊1):39-44. (Gong Lili, Cai Mei, Wang Yuanyuan, et al. Situation and countermeasures of water resources protection in new era: case of Shanghai City[J]. Yangtze River, 2023, 54(S1): 39-44. (in Chinese))
- [4] 何义亮,陈奕涵,彭颖红. 新加坡的水资源开发与保护对上海的启示[J]. 净水技术,2018,37(4):1-7. (He Yiliang, Chen Yihan, Peng Yinghong. Enlightenment of Singapore's water resources development and protection to Shanghai[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(4): 1-7. (in Chinese))
- [5] 张兵,余一辰,邹晨. 低碳城市试点对工业水资源绿色效率的影响机制研究[J]. 水利经济,2024,42(3):1-7. (Zhang Bing, Yu Yichen, Zou Chen. Research on impact mechanism of low-carbon city pilot on green efficiency of industrial water resources[J]. Journal of Economics of

- Water Resources, 2024, 42(3): 1-7. (in Chinese))
- [6] 魏豪杉,王红瑞,郑鹏鑫,等.基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型构建[J].水资源保护,2024,40(3):71-77. (Wei Haoshan, Wang Hongrui, Jia Pengxin, et al. Construction of “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model based on spatial equilibrium of water resources[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 71-77. (in Chinese))
- [7] 顾圣华.上海市水资源特征[J].水文,2002,22(5):40-43. (Gu Shenghua. The characteristics of water resources in Shanghai [J]. Hydrology, 2002, 22(5): 40-43. (in Chinese))
- [8] 毛兴华.上海市水资源论证关键问题探讨[J].水利发展研究,2013,13(8):59-62. (Mao Xinghua. Discussion on key issues in the demonstration of water resources in Shanghai [J]. Water Resources Development Research, 2013, 13(8): 59-62. (in Chinese))
- [9] 刘华.上海市水资源安全利用理论及应用研究[D].上海:上海交通大学,2007.
- [10] 邱桃,张士锋,贤雯.中南半岛五国水资源分区研究[J].地理研究,2021,40(5):1421-1431. (Qiu Tao, Zhang Shifeng, Xian Wen. Study on water resources zoning of five countries in Indo-China Peninsula [J]. Geographical Research, 2021, 40(5): 1421-1431. (in Chinese))
- [11] 郝林钢,左其亭,石永强.流域水系统典型分区方法对比分析及应用[J].水电能源科学,2017,35(7):22-25. (Hao Lingang, Zuo Qiting, Shi Yongqiang. Comparative analysis and application of typical zoning methods in the study of river basin water system [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(7): 22-25. (in Chinese))
- [12] 阮仁良.平原河网地区水资源调度改善水质的机理和实践研究:以上海市水资源引清调度为例[D].上海:华东师范大学,2003.
- [13] 顾圣华.上海市水资源可持续利用的探讨[C]//太湖高级论坛交流文集.上海:中国水利学会,2004:209-213.
- [14] 张小燕.浅谈上海的水资源保护[J].科技信息,2011(15):778. (Zhang Xiaoyan. A brief discussion on the protection of water resources in Shanghai [J]. Science & Technology Information, 2011(15): 778. (in Chinese))
- [15] 卜东平.咸潮入侵对长江上海段过境水资源利用的影响探讨[J].上海国土资源,2023,44(3):61-67. (Bu Dongping. Influence of saltwater intrusion on the utilization of transiting water resources in the Shanghai section of the Yangtze River [J]. Shanghai Land & Resources, 2023, 44(3): 61-67. (in Chinese))
- [16] 陈祖军,李珺,谭显英.上海城市水资源发展战略研究[J].中国给水排水,2018,34(2):24-30. (Chen Zujun, Li Jun, Tan Xianying. Study on development strategy of urban water resources in Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(2): 24-30. (in Chinese))
- [17] 卢智灵.黄浦江水生生态系统变化趋势分析与改善策略[J].净水技术,2024,43(6):80-88. (Lu Zhiling. Analysis of changing trends and countermeasures of water ecosystem in Huangpu River [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 80-88. (in Chinese))
- [18] 周超,高乃云,赵世焜,等.上海青草沙水库水质调查与评价[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(6):894-899. (Zhou Chao, Gao Naiyun, Zhao Shijia, et al. Evaluation of water quality in Qingcaosha Reservoir of Shanghai [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(6): 894-899. (in Chinese))
- [19] 钱海雷,许慧慧,郭常义,等.青草沙水库启用对上海市浦西七区饮用水水质的影响[J].环境与健康杂志,2018,35(3):242-245. (Qian Hailei, Xu Huihui, Gu Changyi, et al. Effects of Qingcaosha Reservoir operation on drinking water quality in Puxi area, Shanghai [J]. Journal of Environment and Health, 2018, 35(3): 242-245. (in Chinese))
- [20] 李瑶,徐凌云,史云鹏.基于不同水质评价方法的长江口两大水源水库水质评价研究[J].环境科学与管理,2020,45(8):173-177. (Li Yao, Xu Lingyun, Shi Yunpeng. Research on water quality evaluation of two water source reservoirs in Yangtze River Estuary based on different water quality evaluation methods [J]. Environmental Science and Management, 2020, 45(8): 173-177. (in Chinese))
- [21] 毛兴华.2014年长江口咸潮入侵分析及对策[J].水文,2016,36(2):73-77. (Mao Xinghua. Analysis of saltwater intrusion in Yangtze River Estuary in 2014 [J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(2): 73-77. (in Chinese))
- [22] 顾晨.超大城市供水系统韧性评估与应用实践:以上海受咸潮入侵影响为例[J].净水技术,2024,43(5):1-9. (Gu Chen. Resilience assessment and application for megacity water supply system; case of Shanghai salt-tide intrusion [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(5): 1-9. (in Chinese))
- [23] 辛亮,陈元芳,顾圣华,等.上海长江口区水情资料的三性分析及自动化计算[J].水力发电,2016,42(7):27-30. (Xin Liang, Chen Yuanfang, Gu Shenghua, et al. Three characteristics analysis and automatic calculation of hydrologic data in Yangtze Estuary area of Shanghai [J]. Water Power, 2016, 42(7): 27-30. (in Chinese))
- [24] 宫云赵,李振苓,刘本宝.青岛市分区地表水资源量计算与分析[J].人民长江,2020,51(增刊2):68-70. (Gong Yunzhao, Li Zhenling, Liu Benbao. Surface water resources calculation by area partition of Qingdao City [J]. Yangtze River, 2020, 51(S2): 68-70. (in Chinese))
- [25] 赵蕾,廖瑜.某水库年径流插补延长方法适用性分析[J].人民珠江,2023,44(增刊2):222-226. (Zhao Lei,

- Liao Yu. Applicability of annual runoff interpolation and extension method in a reservoir[J]. Pearl River, 2023, 44 (S2): 222-226. (in Chinese))
- [26] 郭志刚. 具有长期径流资料时设计年径流及年内分配计算分析[J]. 水利科技与经济, 2013, 19(2): 73-74. (Guo Zhigang. Calculation and analysis of design annual runoff and annual distribution with long-term runoff data [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2013, 19(2): 73-74. (in Chinese))
- [27] 金翠翠, 李新德, 周伟凯. 清漳河流域刘家庄水文站设计年径流量及年内分配计算[J]. 水利科技与经济, 2017, 23(8): 28-31. (Jin Cuicui, Li Xinde, Zhou Weikai. Calculation of annual runoff and annual distribution of Liujiashuang hydrological station in Qingzhanghe River Basin[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2017, 23(8): 28-31. (in Chinese))
- [28] 阮仁良, 阮大成, 张勇, 等. 上海市水资源统计和核算体系研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [29] 朱威. 扬州市沿江地区水资源配置相关问题研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [30] 赵林林, 缪成晨, 周子江, 等. 仪征市地表水资源评价与利用研究[J]. 治淮, 2019(2): 13-14. (Zhao Linlin, Miao Chengchen, Zhou Zijiang, et al. Research on the evaluation and utilization of surface water resources in Yizheng City [J]. Harnessing the Huaihe River, 2019(2): 13-14. (in Chinese))
- [31] 王柳林, 张秀菊, 纪鹏程, 等. 基于 CMIP6 的通州区未来地表水资源量估算[J]. 水力发电, 2023, 49(8): 27-31. (Wang Liulin, Zhang Xiuju, Ji Pengcheng, et al. Estimation of future surface water resources in Tongzhou district based on CMIP6[J]. Water Power, 2023, 49(8): 27-31. (in Chinese))
- [32] 何琴, 童建, 罗俐雅, 等. 秦淮河流域地表水资源量计算分析[J]. 江苏水利, 2023(3): 41-43. (He Qin, Tong Jian, Luo Liya, et al. Calculation and analysis of surface water resources in Qinhuai River Basin[J]. Jiangsu Water Resources, 2023(3): 41-43. (in Chinese))
- [33] Juma L A, Nkongolo N V, Raude J M, et al. Assessment of hydrological water balance in Lower Nzoia Sub-catchment using SWAT model: towards improved water governance in Kenya[J]. Heliyon, 2022, 8(7): e09799.
- [34] Farzana S Z, Zafor M A, Shahariar J A. Application of SWAT model for assessing water availability in Surma River Basin[J]. Journal of the Civil Engineering Forum, 2019, 5(1): 29-38.
- [35] Maliehe M, Mulungu D M M. Assessment of water availability for competing uses using SWAT and WEAP in South Phuthiatsana Catchment, Lesotho[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2017, 100: 305-316.
- [36] Tefera G W, Dile Y T, Srinivasan R, et al. Hydrological modeling and scenario analysis for water supply and water demand assessment of Addis Ababa City, Ethiopia [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 46: 101341.
- [37] Genjebo M G, Kemal A, Nannawo A S. Assessment of surface water resource and allocation optimization for diverse demands in Ethiopia's upper Bilate Watershed [J]. Heliyon, 2023, 9(10): e20298.
- [38] 陈科信. 上海地表水资源估算方法和特点[J]. 自然资源, 1982(4): 19-22. (Chen Kexin. Estimation methods and characteristics of surface water resources in Shanghai [J]. Resources Science, 1982(4): 19-22. (in Chinese))
- [39] 周黔生. 杭州市水资源量的计算[J]. 浙江水利科技, 1986(4): 31-40. (Zhou Qiansheng. Calculation of water resources in Hangzhou [J]. Zhejiang Hydraulics, 1986(4): 31-40. (in Chinese))
- [40] 孙永寿, 李燕. 基于栅格数据在水资源评价水资源量计算中的应用[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(10): 185-189. (Sun Yongshou, Li Yan. Application of grid data in calculation of water resources quantity in water resources evaluation [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(10): 185-189. (in Chinese))
- [41] 曾艳芬, 涂进, 陈莹. 云南省楚雄州水资源量、可利用量分析计算水资源管理对策建议[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(3): 378-385. (Zeng Yanfen, Tu Jin, Chen Ying. Analysis and calculation of water resources quantity and availability and suggestions on water resources management in Chuxiong of Yunnan Province [J]. Advances in Geosciences, 2022, 12(3): 378-385. (in Chinese))
- [42] Kushwaha N L, Elbeltagi A, Patel A, et al. Assessment of water resources using remote sensing and GIS techniques [J]. Current Directions in Water Scarcity Research, 2022, 7: 85-98.
- [43] 高庆, 刘芸辰, 李根, 等. 基于水文水动力模型的平原地表水资源研究[J]. 水力发电, 2022, 48(8): 15-20. (Gao Qing, Liu Yunchen, Li Gen, et al. Study on plain surface water resources based on hydrologic-hydrodynamic coupling model [J]. Water Power, 2022, 48(8): 15-20. (in Chinese))
- [44] 张海明, 叶文, 臧力永. 生态文明视角下宿迁市可用水量研究[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(5): 46-48. (Zhang Haiming, Ye Wen, Zang Liyong. Research on available water resources in Suqian City from the perspective of ecological civilization [J]. Water Resources Development and Management, 2023, 9(5): 46-48. (in Chinese))
- [45] 董颖, 赵健. 水资源可利用量计算方法在陕北地区的应用研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(3): 104-108. (Dong Ying, Zhao Jian. The calculation method for available water resources of northern Shaanxi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(3): 104-108. (in Chinese))

- [46] 金新芽,张晓明,马俊. 地表水资源可利用量计算实用方法研究:以浙江省金华江流域为例[J]. 水文,2016,36(2):78-81. (Jin Xinya, Zhang Xiaowen, Ma Jun. A practical method for available surface water resources quantity calculation: a case study of Jinhuajiang River Basin in Zhejiang Province [J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(2): 78-81. (in Chinese))
- [47] 陈荣彤,董增川,邵逸卿,等. 基于概化水库模型的地表水资源可利用量研究:以里下河平原河网区为例[J]. 人民长江,2022,53(7):107-112. (Chen Motong, Dong Zengchuan, Shao Yiqing, et al. Study on availability of surface water resources in plain area based on generalized reservoir model: case of river network area of Lixiahe Plain [J]. Yangtze River, 2022, 53(7): 107-112. (in Chinese))
- [48] 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 Jiayi, Dong Zengchuan, Shao Yiqing, 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. (in Chinese))
- [49] 尤传誉,都兴伟,王建中,等. 基流切割法在山区地下水资源评价中的应用研究[J]. 东北水利水电,2019,37(9):43-46. (You Chuanyu, Du Xingwei, Wang Jianzhong, et al. Application study of base flow separation method in mountain groundwater resources assessment [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2019, 37(9): 43-46. (in Chinese))
- [50] 唐洪波,陈强,赵兴明. 多种基流切割法在青海地下水评价中的应用[J]. 人民长江,2010,41(14):41-43. (Tang Hongbo, Chen Qiang, Zhao Xingming. Application of base-flow separation methods in underground water evaluation in Qinghai Province [J]. Yangtze River, 2010, 41(14): 41-43. (in Chinese))
- [51] 许红燕. 舟山群岛地下水资源量及地下水水质评价[J]. 浙江水利科技,2014,42(2):66-68. (Xu Hongyan. Evaluation of groundwater resources and groundwater quality in Zhoushan Islands [J]. Zhejiang Hyrotechnics, 2014, 42(2): 66-68. (in Chinese))
- [52] 姚荣,张娜,唐德善. 湿润区域水资源可利用量研究初探[J]. 人民长江,2004,35(4):32-34. (Yao Rong, Zhang Na, Tang Deshan. Preliminary analysis of utilizable water resources volume in humid region [J]. Yangtze River, 2004, 35(4): 32-34. (in Chinese))
- [53] 刘权. 基于水资源优化配置的地下水可开采量研究[J]. 长江技术经济,2021,5(增刊1):120-122. (Liu Quan. Research on groundwater exploitability based on optimal allocation of water resources [J]. Technology and Economy of Changjiang, 2021, 5(S1): 120-122. (in Chinese))
- [54] Lu Yao, Ma Zhenzhen, Wang Ting, et al. Development of a water resource allocation model based on the dynamic exploitable amount of groundwater and its application in the Jinghe County, Xinjiang [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 946072.
- [55] 朱晓强. 上海市大浦东地区地下水资源开发利用现状及潜力评价[J]. 水利规划与设计,2019(11):43-46. (Zhu Xiaoqiang. Evaluation of status and potential of groundwater resources utilization in Pudong District in Shanghai [J]. Water Resources Planning and Design, 2019(11): 43-46. (in Chinese))
- [56] Wan Long, Zhou Jinxin, Guo Hongyan, et al. Trend of water resource amount, drought frequency, and agricultural exposure to water stresses in the karst regions of South China [J]. Natural Hazards, 2016, 80(1): 23-42.
- [57] Wang Hongcui, Hu Chao, Luo Yang, et al. Forecast of gross amount of water resources of Haihe River Basin based on Grey-Markov model [C]//International Conference on Environmental Pollution and Public Health (EPPH 2012) vol. 1. Scientific Research Publishing, 2012:610-612.
- [58] 张洪刚,张翔,吕孙云,等. 国内外水资源可利用量计算方法概析[J]. 人民长江,2008,39(17):18-20. (Zhang Honggang, Zhang Xiang, Lyu Sunyun, et al. Summary and analysis of calculation methods of available water resources quantity at home and abroad [J]. Yangtze River, 2008, 39(17): 18-20. (in Chinese))
- [59] Młyński D P, Wałęga A, Bugajski P, et al. Verification of empirical formulas for calculating mean low flow with the view to evaluating available water resources [J]. Acta Scientiarum Polonorum: Formatio Circumiectus, 2019, 18(2):83-92.
- [60] Więzik B. Calculating usable resources at surface water intakes using low-flow stochastic properties [M]//Pawlowski L, Dudzińska M R, Pawlowski A. Environmental Engineering III. London: CRC Press, 2010:539-542.
- [61] Herdiansyah A R, Zahra R A, Masjoyo Y M, et al. Analysis of meteorological water availability and water demand in Semarang Regency [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1039: 012011.
- [62] Irwan, Hardwinarto S, Sumaryono M, et al. Water availability analysis of Sangkulirang-Mangkalihat Karst in Kutai Timur Regency, East Kalimantan Province [J]. International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, 2020, 7(1): 153-155.
- [63] Lias S A, Irmayani, Laban S. The potential of water availability in Maros Watershed using Thornthwaite-Mather water balance method [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 486: 012135.

(下转第120页)

- simulation of hydrodynamics of open-channel confluences with bend flow[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(2):9-15. (in Chinese))
- [25] 王浩博,周大庆,郭俊勋. 基于 PIMPLE 算法的低负荷水泵水轮机内部流态研究[J]. *人民长江*, 2023, 54(11): 152-157. (Wang Haobo, Zhou Daqing, Guo Junxun. Research on internal flow pattern of low-load pump-turbine based on PIMPLE algorithm[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(11):152-157. (in Chinese))
- [26] 张小康,杨建东. 水头损失的 CFD 计算[J]. *中国农村水利水电*, 2009(5): 105-107. (Zhang Xiaokang, Yang Jiandong. Computation of head losses by CFD[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(5): 105-107. (in Chinese))
- [27] 刘荆辉,胡明. 动能修正系数对城门洞形尾水隧洞水头损失及其系数的影响[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(6):146-149. (Liu Jinghui, Hu Ming. Impact of kinetic energy correction factor on head loss and head loss coefficient of city gate-shaped tailrace tunnel[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(6): 146-149. (in Chinese))
- (收稿日期:2026-01-14 编辑:俞云利)
-
- (上接第 30 页)
- [64] Ali M I, Hashim M, Zin H S M. Assessing water availability over peninsular Malaysia using public domain satellite data products[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, 18:012187.
- [65] 李学辉,谷桂华,余守龙,等. 基于水量平衡和误差控制的出入境水量研究[J]. *人民长江*, 2020, 51(2):97-100. (Li Xuehui, Gu Guihua, Yu Shoulong, et al. Study on inflow and outflow volumes of an area based on water balance and error control criteria[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(2):97-100. (in Chinese))
- [66] 刘伟苹. 长江大通至河口段沿江引水变化特征及其对河口的影响分析[D]. 上海:华东师范大学, 2016.
- [67] 顾圣华. 长江口环境用水量计算方法探讨[J]. *水文*, 2004, 24(6): 35-37. (Gu Shenghua. Study on the computational method for environmental water use in the Yangtze River Estuary[J]. *Hydrology*, 2004, 24(6): 35-37. (in Chinese))
- [68] 严鑫,孙昭华,谢翠松,等. 基于经验模型的长江口南支上段压咸临界流量[J]. *地理学报*, 2019, 74(5):935-947. (Yan Xin, Sun Zhaohua, Xie Cuisong, et al. Estimation of critical discharge for saltwater intrusion in the upper south branch of the Yangtze River Estuary using empirical models[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5):935-947. (in Chinese))
- [69] 陈庆江,徐建益,朱建荣,等. 长江口水源地咸潮控制临界流量确定及保障措施[J]. *人民长江*, 2011, 42(18):68-72. (Chen Qingjiang, Xu Jianyi, Zhu Jianrong, et al. Determination of critical flow for saline water intrusion into water source area of Yangtze River estuary and guarantee measures[J]. *Yangtze River*, 2011, 42(18): 68-72. (in Chinese))
- [70] 高华斌,唐兵. 应对长江口咸潮入侵的临界流量经验模型研究[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(4):25-29. (Gao Huabin, Tang Bing. Empirical model of critical flow rate in response to salt water intrusion in the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(4):25-29. (in Chinese))
- [71] 王高旭,李褪来,陈敏建. 长江口生态流量研究[J]. *水利水运工程学报*, 2010(3):53-58. (Wang Gaoxu, Li Tilai, Chen Minjian. Analysis and calculation of ecological flow in Yangtze River Estuary[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2010(3):53-58. (in Chinese))
- [72] 阮仁良,韩昌来. 长江流域发展对长江口水域功能开发的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(5):427-432. (Ruan Renliang, Han Changlai. Effect of development in the Yangtze Basin on the exploitation of the water function in the mouth of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(5):427-432. (in Chinese))
- [73] 刘水芹,田华,易文林. 太浦闸调度对黄浦江水源地水质影响数值模拟[J]. *人民长江*, 2012, 43(12):33-36. (Liu Shuiqin, Tian Hua, Yi Wenlin. Digital simulation for influence of Taipu Sluice operation on water quality of water source of Huangpu River[J]. *Yangtze River*, 2012, 43(12):33-36. (in Chinese))
- [74] 彭焱梅,曹菊萍,周宏伟,等. 不同典型年太浦闸控制运用对流域区域及黄浦江上游水源地影响研究[J]. *水利发展研究*, 2020, 20(7):43-48. (Peng Yanmei, Cao Juping, Zhou Hongwei, et al. Study on the impact of Taipu Sluice control and operation in different typical years on the basin area and the upstream water source of the Huangpu River[J]. *Water Resources Development Research*, 2020, 20(7):43-48. (in Chinese))
- [75] 毛兴华,李琪,陈澄. 感潮河流生态流量保障目标研究[J]. *水利发展研究*, 2025, 25(9):90-94. (Mao Xinghua, Li Qi, Chen Cheng. Research on ecological flow guarantee targets tive of tidal rivers[J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(9): 90-94. (in Chinese))
- (收稿日期:2025-03-20 编辑:俞云利)