

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.05.11

基于动态模型的湖库水环境容量影响因素重要性解析

孙玉莹¹, 陈炼钢¹, 陈少颖², 徐祎凡¹, 姜克芳³, 金秋¹

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 3. 江苏省城镇化和城乡规划研究中心, 江苏 南京 210000)

摘要: 湖库入库径流量、库面蒸发、大气干湿沉降、库区降水、沉降自净、水温波动、不均匀混合及库容变化等都会影响湖库水环境容量的大小,为明确各因子的定量影响,基于构建的水环境容量逐日动态计算模型,将模型考虑要素按输入特性划分为物理因子、计算参数、水库管理目标3类,与全要素考量得到的容量基准值进行对比分析。结果表明:物理因子中入库径流量与TN容量结果相关性最强,基准设计水文条件下库区降水对TN容量结果偏差值的影响最大;计算参数中水温修正系数 α 对TN容量的影响最大,其增大5%对应的TN容量偏差值为8.27%;水库管理目标中的水质管理目标对TN容量的影响最大,而且是所有因素中对容量影响最大的因子。定量分析的结果明确了各影响因素对容量核算结果的影响程度,可为容量核算方法的简化及精度的提高提供依据。

关键词: 湖库水环境容量; 动态模型; 影响因素; TN容量; 定量分析; 大溪水库

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)05-0098-08

Importance analysis of factors affecting the water environmental capacity of lake reservoir based on a dynamic model

SUN Yuying¹, CHEN Liangang¹, CHEN Shaoying², XU Yifan¹, JIANG Kefang³, Jin Qiu¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Jiangsu Institute of Water Conservancy, Nanjing 210017, China; 3. Urbanization and Urban - Rural Planning Research Center of Jiangsu, Nanjing 210000, China)

Abstract: Factors such as lake reservoir inflow runoff, reservoir surface evaporation, atmospheric dry and wet sedimentation, precipitation in the reservoir area, sedimentation self-purification, water temperature fluctuation, uneven mixing, storage capacity change, etc. will all affect the size of the water environmental capacity of the lake reservoir. To determine the quantitative impact of each factor, a daily dynamic calculation model of water environmental capacity was established for the calculation, and the factors were divided into physical factors, calculation parameters, and reservoir management objectives according to their input characteristics. Then the calculation results were compared and analyzed with the capacity benchmark value obtained from full factor analysis. The results show that among physical factors, the inflow runoff has the strongest correlation with TN capacity results and the precipitation in the reservoir area has the greatest impact on the deviation of TN capacity results under the basic design hydrological conditions. Correction factor of water temperature α in calculation parameters has the great impact on TN capacity, an increase of 5% corresponds to a bias value of 8.27% in TN capacity. Water quality management objective in reservoir management objectives has the greatest impact on TN capacity and is the most influencing factor of all factors. The quantitative analysis clarifies the influencing degree of each factor on the capacity accounting result, and provides a technical support for simplification and improvement of the capacity accounting method.

收稿日期:2022-10-20; 修回日期:2023-03-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202000);广西重点研发计划项目(AB22080093、AB22035075);江苏省水利科技项目(2021033)

作者简介:孙玉莹(1998—),女,山东淄博人,硕士,研究方向为水环境与水生态。

通讯作者:陈炼钢(1981—),男,湖南长沙人,博士,正高级工程师,研究方向为生态水文与水资源保护。

Key words: water environmental capacity of lake reservoir; dynamic model; impact factor; total nitrogen (TN) capacity; quantitative analysis; Daxi Reservoir

1 研究背景

水环境容量是水污染控制和环境管理的一个重要指标,是在满足水体特定功能的情况下水体承载污染物的能力,同时也是总量控制的基础条件^[1],该指标能够为环境管理部门因地制宜地制定符合当地实际情况的水质目标与排放标准提供坚实的科学基础^[2]。人类活动及区域气候变化对湖库水质的影响逐渐加剧,水质污染已成为湖库管理中亟待解决的问题,因而对湖库水环境容量的精准计算显得尤为重要^[3]。

目前,关于水环境容量的核算方法在国内外已有丰富的研究成果,Chen等^[4]提出了在水文信息匮乏地区计算水环境容量的解决方案;Wang等^[5]利用机器学习辅助进行了流域尺度的水环境容量核算;Li等^[6]利用零维水质模型对洋河水库水环境容量进行了估算,基于水动力水质模型的湖库水环境容量核算方法在国内的杞麓湖^[7]、鄱阳湖^[8]、太湖^[9]、湛江湾^[10]、彩云湖^[11]等湖库得到了广泛应用,但计算所用参数大都以年为单位,未考虑到水环境容量的年内动态变化。陈江海^[12]对不同时空尺度下水环境容量评估的差异进行了分析,指出现有的静态水文设计条件选择方式易造成“过保护”等问题;崔嵩等^[13]与Ma等^[14]分别针对不同河网建立水动力与水质耦合模型对水环境容量进行了逐月动态计算,结果表明入湖流量的动态变化对河流水环境容量影响较大,丰水期与枯水期存在显著差异;陶亚等^[15]通过季节性分析发现水文气象条件与河流径流量存在显著正相关关系,从而使同一河段在不同时期的水环境容量呈现出动态变化的特征;宋泽峰等^[16]通过对农田面源污染来源的研究发现,大气干湿沉降对面源污染具有较大贡献;Chen等^[17]将氮沉降监测资料与半分布式模型相结合,发现氮沉降是重要的氮源。

总结现有研究发现,水环境容量与入湖流量的动态变化、水文气象条件及大气干湿沉降等因素密切相关,已有研究提出有针对性的流域分区管理的思路^[18],但目前将全要素考虑在内的湖库水环境容量核算模型较少。此外,现行国家标准^[19]所规定的湖库水环境计算方法仅对于入库径流量中所携带的入湖负荷、污染物综合衰减系数以及不均匀混合系

数作出了明确规定,还存在针对性不足的问题^[20],在实际应用中可能导致水环境治理的精准施策出现偏差。且目前湖库水环境容量核算的研究多针对某一特定流域开展,研究目标集中于提高结果的准确性,对于计算模型的普适性及各因素对计算结果的影响方面研究较少。因此很有必要建立基于全要素考量的模型来量化不同因子对水环境容量计算值的影响,对重要性强的因子应予以重视,以保障环境容量核算的精度。

本研究以太湖流域大溪水库为例,综合考虑影响湖库水环境容量的各种因素(包括湖库入库径流量、库面蒸发、大气干湿沉降、库区降水、沉降自净、水温波动、不均匀混合及库容变化等全要素),建立逐日动态模型对水环境容量进行核算,对不同影响因素进行定量分析,从中确定影响水环境容量的主要因素,为完善水环境容量核算方法和提高核算精度提供科学依据。

2 数据来源与计算模型

2.1 研究区域概况

大溪水库位于江苏省溧阳市的太湖流域西区南河水系天目湖流域,其集水面积约为90 km²,常水位为12~14 m(青岛黄海基面),最大水深为8 m,水面面积约为12 km²,总库容为1.128×10⁸ m³。水库于1960年6月建成,是一座以防洪、城镇供水、灌溉为主的大型水库^[21],也是太湖流域重要的水源涵养区。当地气候为亚热带季风气候,每年的6—8月为丰水期,该时段内降水量约占常年总降水量的42%;每年10—翌年2月为枯水期,该时段内降水量占常年总降水量的24%左右;每年3—5月以及9月为平水期,该时段内降水量约占常年总降水量的34%。大溪水库入库水量主要补给源是流域降水和地表径流,最大入库河流为西南部的洙漕河。大溪水库水质主要受上游来水影响^[22],2015—2020年库内水体中高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)浓度均值分别为2.95、0.89、0.09、0.02 mg/L,目前水库的水质管理目标为全库Ⅱ类,主要超标因子为TN^[23]。因此本文选择TN作为大溪水库水环境容量的代表水质因子。

2.2 数据来源

本研究数据资料包括大溪水库水文、水质及库容面积曲线,其中,水文数据(水位、流量、降水、蒸

发)来源于水文年鉴,为1978—2018年逐日序列数据;水质数据(水温、TN浓度)来源于大溪水库水质监测站,包括大溪水库取水口、库中、上游3个站点2015—2020年的逐周监测数据,主要用于模型验证;大气沉降数据为中田舍流域2014—2020年实测数据,计算均值后代入大气干湿沉降负荷量方程进行计算。

2.3 容量计算模型与参数取值

2.3.1 容量计算模型 建立能反映所有影响因素的二维分区逐日水量、水质动态平衡模型,对大溪水库水环境容量影响因素进行定量分析。

分区逐日水量平衡计算公式为:

$$V_j^{i+1} = V_j^i + Q_{IN,j}^i - Q_{O,j}^i + P_j^i - E_j^i \quad (1)$$

式中: V_j^i 为第 j 分区第 i 天的水量, m^3 ; $Q_{IN,j}^i$ 、 $Q_{O,j}^i$ 分别为第 j 分区第 i 天的进、出径流量, m^3 ; P_j^i 为第 j 分区第 i 天的降水量, m^3 ; E_j^i 为第 j 分区第 i 天的蒸发量, m^3 。

分区逐日水质模拟模型计算公式包括公式(2)~(4),其中污染物质量平衡由公式(2)进行计算,入湖径流污染负荷量由公式(3)进行计算,大气干湿沉降负荷量由公式(4)进行计算。

$$C_j^{i+1} V_j^{i+1} = C_j^i V_j^i (1 - K) + W_{Q,j}^i + W_{A,j}^i - C_j^i Q_{O,j}^i \quad (2)$$

$$W_{Q,j}^i = Q_{IN,j}^i C_{IN,j}^i \quad (3)$$

$$W_{A,j}^i = C_p^i P_j^i + S_j^i M^i \quad (4)$$

式中: C_j^i 为第 j 分区第 i 天的水质指标浓度, mg/L ; K 为综合降解系数, d^{-1} ; $W_{Q,j}^i$ 为第 j 分区第 i 天随径流入湖的污染负荷量, g ; $W_{A,j}^i$ 为第 j 分区第 i 天的大气干湿沉降负荷量, g ; $C_{IN,j}^i$ 为第 i 天进入第 j 分区径流的水质指标浓度, mg/L ; C_p^i 为第 i 天降雨中的污染物浓度, mg/L ; S_j^i 为第 j 分区第 i 天的水面面积, km^2 , 由湖库水位-水面面积关系曲线计算得出; M^i 为第 i 天的干湿沉降强度, g/km^2 ; 其他字符含义同上。

对湖库水量、水质数据采用分区逐日水量平衡计算公式进行长系列计算,并结合分区逐日水质模拟模型进行验证,针对设计水文条件的代表系列,按水环境容量逐日计算公式(5)进行连续计算。

$$W_{OP,j}^i = C_{S,j}^i V_j^{i+1} - C_j^i V_j^i (1 - K) - W_{A,j}^i + C_j^i Q_{O,j}^i \quad (5)$$

式中: $W_{OP,j}^i$ 为第 j 分区第 i 天的水环境容量, g ; $C_{S,j}^i$ 为第 j 分区的目标水质指标浓度, mg/L ; 其他字符含义同上。

2.3.2 混合区划分 湖库相较于河网来说水面面积更大,因此具有水体流速、环流形态以及自净能力时空分布不均匀等特点。若将湖库视为一个均匀分

布的整体,并使用零维模型对水环境容量进行核算,结果通常难以准确反映污染物的实际容许状态^[24],因此常规方法是采用非均匀系数^[25]来修正不均匀混合对湖库水环境容量的影响,然而,将全湖库作为整体计算得到的水环境容量无法支撑起流域污染总量的分区控制。

为科学反映水环境容量受湖库水质不均匀混合的影响,将大溪水库水域划分为主湖区和湖滨混合区^[26],再根据入库河流的分布和湖库岸线的特征,将湖滨混合区进一步划分为5个子区域:洙漕河区、洙漕河东区、大溪东南区、大溪东北区、大溪西区。通过各分区之间的通量交换,可以精确地计算出大溪水库全湖和混合区各子区域的水环境容量。结合实地考察与模型的调整与计算,确定湖滨混合区占大溪水库水域总面积的比例为20%;根据陆域集水面积和岸线特征,确定5个混合区子区域的面积比为9:2:3:3:3。

2.3.3 设计水文条件选择 根据大溪水库流域1978—2018年长序列的逐日降水量监测数据,流域多年平均降水量约为1251mm,其中2010—2015年的平均降水量约为1278mm,与长系列平均值基本一致,可以反映出大溪水库降水量的多年动态变化特征,故以2010—2015年的逐日动态水文数据作为设计水文条件进行水环境容量计算,具体数据如表1所示。

表1 大溪水库设计水文条件

年份	年型	降水量/ mm	蒸发量/ mm	入库径流 量/ $10^4 m^3$	库水位/ m
2010	平水年	1179.60	669.70	3289.11	9.55
2011	枯水年	1089.60	680.00	3669.62	9.70
2012	平水年	1369.60	776.90	3830.81	11.42
2013	枯水年	1079.50	851.80	2246.62	10.95
2014	平水年	1360.20	681.00	4599.56	10.82
2015	丰水年	1590.80	715.50	5280.78	11.68
平均	多年平均	1278.22	729.15	3819.42	10.69

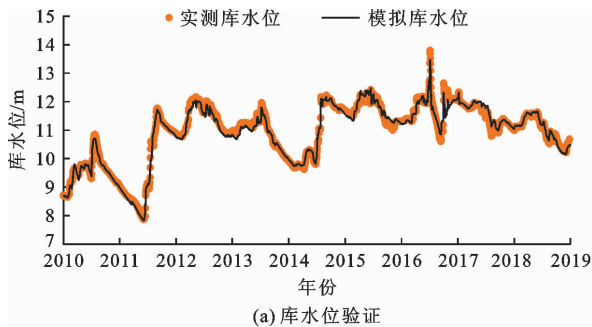
2.3.4 综合降解系数 水体中微生物及水生植物的存在使得氮素在进入湖体后会经过一个沉降自净的过程,动态容量解析模型中需要率定的与自净有关的参数为综合降解系数 K ,该系数综合反映了氮素在进入水体后通过反硝化作用等来降低污染物浓度的能力^[27],受水温的影响较大,通常水温对综合降解系数的影响可用下式计算:

$$K_t = k_{20} \cdot \alpha^{(t-20)} \quad (6)$$

式中: K_t 为水温为 t °C 时的综合降解系数, d^{-1} ; k_{20} 为水温为 20 °C 时的综合降解系数, d^{-1} , 经率定得出大溪水库 TN 的 k_{20} 为 $0.0075 d^{-1}$; α 为水温修正系数, 取值为 1.08。

2.4 模型验证结果

对大溪水库选取 2010—2018 年水量数据开展逐日动态模拟计算验证水量平衡, 库水位验证结果见图 1(a); 以 2015—2018 年逐周水质数据为基础,



验证分区逐日水质模型的准确性, 水质验证结果见图 1(b)。由图 1 可见, 库水位的实测值与模拟值变化过程相吻合, 决定系数 R^2 达到 0.98 (图 1(a)), 说明构建的分区逐日水量平衡模型能有效反映水库蓄水量的动态变化过程; TN 浓度的实测值与模拟值变化过程基本一致, 决定系数 R^2 为 0.79 (图 1(b)), 说明所建分区逐日水质模拟模型能合理反映库区水质的长系列动态变化, 可用于大溪水库水环境容量的解析。



图 1 模型水量与水质模拟结果验证

3 影响因素重要性分析方法

湖库动态水环境容量主要影响因素源于模型中所考虑的各项参数, 基于水环境容量逐日动态计算模型开展研究, 考虑的综合因素包括湖库径流变化、库面蒸发、大气干湿沉降、库区降水、沉降自净、水温波动、不均匀混合、库容变化和水质目标。为探索各因素对水环境容量的影响, 对模型中所考虑的各因素运用控制单一变量的方法进行定量分析。按照输入状态可将其分为物理因子、计算参数和水库管理目标, 针对不同的因素采取不同方法进行对比。

3.1 物理因子

物理因子包括入库径流量、大气干湿沉降、库面蒸发、水温波动及库区降水, 模型中应用的各项输入数据均为逐日动态变化状态, 不能通过改变某个或某一段时间的输入数据来进行对比, 因此对于不同的影响因子需要根据自身特性及模型特点选择不同的方案进行分析。

(1) 入库径流量是模型计算的主体, 不同来水年型及径流的年内分配能够体现径流量的变化状态, 因此选择通过比较不同来水年型水环境容量的差异来分析入库径流量对水环境容量的影响, 并分析年内水量分配的影响。

(2) 水温影响水体中营养盐的化学反应过程及生物的降解过程, 从而间接影响水环境容量。对水

温影响的估算可采用固定的温度数值作为输入条件, 本研究将固定水温选为 20 °C, 将固定水温下与水温波动情况下的水环境容量进行对比, 分析水温波动对容量的影响情况。

(3) 大气干湿沉降是面源污染的一个重要来源, 库面蒸发和库区降水是水量平衡中的重要影响因子, 也是容量计算中的重要输入条件, 但在目前水环境容量计算中这 3 个因素常被忽视, 因此选择将不考虑对应因素时的环境容量核算结果作为基准情景, 对比分析各因素对水环境容量的影响。其中库区降水对水量平衡的影响极大, 且与大气干湿沉降密切相关, 为排除沉降等因素对库区降水影响的干扰, 设置两组计算方案, 如表 2 所示。

表 2 库面降水讨论方案设计

方案名称	方案不考虑因素
方案 1	库面蒸发、大气干湿沉降
方案 2	库面蒸发、大气干湿沉降、库区降水

将两组方案计算结果分别与基准情景进行对照分析, 则方案 1 和方案 2 各自计算结果与基准情景计算结果偏差值的差值即为库区降水的影响程度。

3.2 计算参数

在本研究所应用的参数中, 可率定的参数为综合降解系数 K 和混合区占比, 其中综合降解系数中又包含水温为 20 °C 时的综合降解系数 k_{20} 和水温修

正系数 α 。在设计水文条件下,对参数选用蒙特卡洛方法(Monte Carlo method)进行5 000次均匀抽样,分析参数变化对水环境容量的影响。

3.3 水库管理目标

水质目标管理^[28]与水量目标管理^[29-30]是目前流域水环境管理中常用的两种模式。研究区水质管理目标结合《常州天目湖保护条例》中相关规定,将TN的水质目标设置为全湖Ⅱ类和主湖区Ⅱ类,对应的TN浓度为0.5 mg/L,其中全湖Ⅱ类为模型设置的基准情景。

水量目标管理依赖于水位调控,受库区管理范围征地与移民限制。长期以来大溪水库设计功能效益无法正常发挥,难以满足周边社会、经济及生态环境的需求,急需提升大溪水库蓄水量。根据最新批复“大溪水库汛限水位由12.00 m恢复为除险加固确认的汛限水位14.00 m,非汛期控制水位相应地由13.00 m调整为14.00 m”,在原有研究基础上将水位抬高2 m,分析新的水量控制目标下大溪水库的水环境容量变化情况。

4 结果与分析

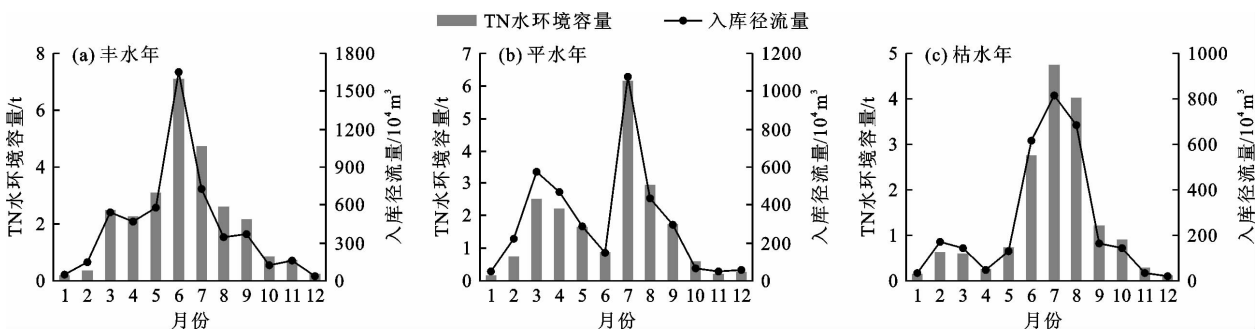
4.1 基准水环境容量

基于建立的大溪水库容量计算模型,设置模型基准情景为考虑所有输入因子及计算参数,水质目标设定为全湖Ⅱ类。按设计水文条件长系列逐日计算后取均值作为多年平均来水条件下大溪水库TN水环境容量(以下简称TN容量)的基准值,结果见表3,其中洙漕河控制单元的TN容量为9.18 t,占全流域的46.53%。

表3 多年平均来水条件下大溪水库流域TN容量基准值 t

洙漕河	洙漕河东	大溪东南	大溪东北	大溪西	全流域
9.18	2.86	2.68	3.08	1.93	19.73

基准情景下大溪水库年内逐月降水量和TN容量



量如图2所示。由图2可知,丰水期、平水期、枯水期的月均TN容量分别为3.72、1.64、0.40 t,月TN容量的最大值在7月份,最小值在1月份,TN容量与流域降水量呈显著正相关关系,相关系数 R^2 为0.86。

图2 基准情景下大溪水库年内逐月降水量和TN容量

4.2 物理因子的影响

(1)入库径流量的影响。入库径流量呈动态变化状态,不同来水年型TN容量及入库径流量与基准值偏差见表4。由表4可以看出,不同来水年型下TN容量随入库径流量的不同存在明显差异,丰水年、平水年、枯水年TN容量分别为26.45、19.81、16.27 t,与基准值偏差分别为34.06%、0.41%、-17.54%,入库径流量与基准值相比分别偏差38.26%、2.28%、-22.55%。相比较而言,丰水年与枯水年TN容量的偏差小于相应来水年型入库径流的偏差,受入库径流量的影响较大。

表4 不同来水年型TN容量及入库径流量与基准值偏差

来水年型	TN容量/t	偏差/%	入库径流量/ $10^4 m^3$	偏差/%
多年平均(基准)	19.73		3819.42	
丰水年	26.45	34.06	5280.78	38.26
枯水年	19.81	0.41	3906.49	2.28
平水年	16.27	-17.54	2958.12	-22.55

不同来水年型条件下大溪水库年内逐月TN容量与入库径流量如图3所示。

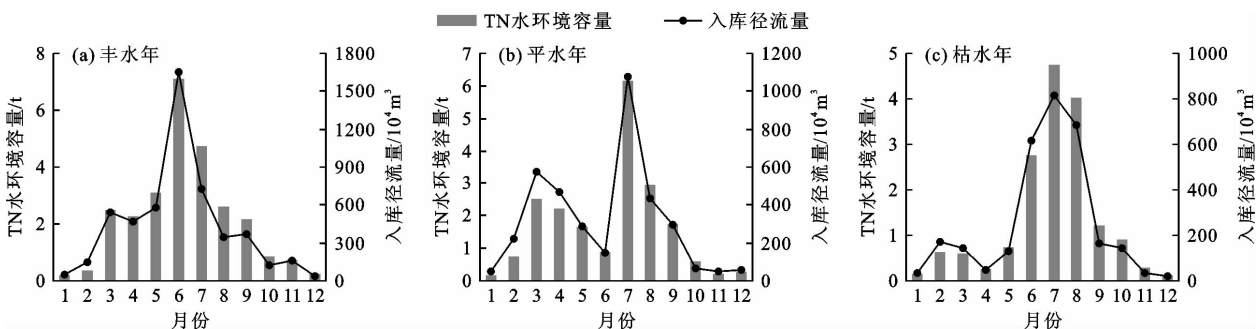


图3 不同来水年型大溪水库年内逐月TN容量与径流量

由图3可知,入库径流量的年内分配状态与TN容量的变化趋势基本一致,表现为丰水期径流量大、TN容量大,枯水期径流量小、TN容量小。

(2)库面蒸发的影响。在多年来水条件下对不考虑库面蒸发影响时的水环境容量进行核算,蒸发量的去除首先会对水量平衡的计算结果产生影响,不考虑蒸发量时库水位的验证结果与实际产生了较大偏差,模型模拟水位与实测水位的相关系数 R^2 由0.98降低至0.62。TN容量核算结果为22.88 t,与基准值相比偏大15.97%,其主要原因是不考虑蒸发时库内蓄水量增大,使水库内可以容纳的污染物总量相应增加。

(3)大气干湿沉降的影响。若不考虑大气干湿沉降,多年来水条件下大溪水库的TN容量为24.64 t,与基准值相比偏大24.89%。由此可见,对于湖库这类水面面积较大的水域,大气干湿沉降对其水环境容量的影响不可忽视,否则可能会造成过高的污染负荷流入湖库内部使其产生大面积的污染,影响水环境整体的平衡性以及水质目标。

(4)水温波动的影响。若不考虑水温变化,利用固定数据计算得到的多年来水条件下TN容量为18.54 t,与基准值相比偏小6.03%。

(5)库区降水的影响。按照表2中的两种设计方案对库区降水影响程度进行计算分析。计算结果表明,方案1、方案2的TN容量分别为27.94、22.25 t,比基准值分别增大了41.61%、12.77%。方案1与方案2的偏差值之差为28.84%,即不考虑库区降水时,大溪水库TN容量减小了28.84%。

各物理因子与TN容量的线性相关系数如表5所示。

表5 各物理因子与大溪水库TN容量的线性相关系数

来水年型			库面蒸发	大气干湿沉降	水温波动	库区降水
丰水年	平水年	枯水年				
0.93	0.96	0.97	0.13	0.14	0.01	0.86

综合分析各物理因子对应容量核算结果的偏差程度及其与TN容量的线性相关系数 R^2 可知,入库径流量与TN容量核算结果的相关性最强,径流量与设计水文条件下偏差越大,其TN容量的偏差值也越大。基准情景设计水文条件下库区降水对容量核算结果偏差值的影响最大,其次为大气干湿沉降,考虑的沉降量越多,TN容量越小;库面蒸发量对TN容量核算结果偏差值的影响及线性相关系数均较

小;在物理因子中固定的水温对TN容量计算结果的影响最小,且受降解等物理化学反应的影响,水温波动与TN容量之间并非简单的线性关系。

4.3 计算参数的影响

(1)综合降解系数的影响。经率定,大溪水库流域基准情景中 k_{20} 为 0.0075 d^{-1} ,对 k_{20} 取值为 $0\sim 0.015\text{ d}^{-1}$ 时利用蒙特卡洛均匀分布进行计算,得出TN容量范围为14.36~24.26 t,与基准值偏差 $-27.22\%\sim 22.96\%$, k_{20} 取值与TN容量的关系曲线如图4(a)所示,两者接近线性相关关系。可见湖库的自净能力是影响水环境容量大小的一个重要因素,其取值是否合理将对湖库水环境管理决策的准确性产生较大影响,如果对湖库的水温数据进行逐日监测较为困难,可考虑利用具有代表性的常数进行计算,尽量减小水体沉降自净带来的影响。

(2)水温修正系数的影响。以水温修正系数 $\alpha = 1.08$ 为基准,对温度系数取值为 $1.0\sim 1.5$ 进行计算,得出TN容量范围为18.54~30.01 t,与基准值偏差 $-6.03\%\sim 52.10\%$ 。水温修正系数 α 取值与TN容量的关系曲线如图4(b)所示。

(3)混合区面积占比系数的影响。基准情景中混合区面积占比为0.2,利用动态模型对混合区面积占比进行重新计算,在其取值范围为 $0.05\sim 0.50$ 时,对应的TN容量范围为19.07~20.80 t,与基准值偏差 $-3.35\%\sim 5.42\%$ 。另外,若考虑取消混合区设置,利用均匀混合模型对TN容量进行核算,则结果为27.54 t,与基准模型相比偏大39.58%。混合区面积占比与TN容量的关系曲线如图4(c)所示,两者基本接近线性相关,并且混合区面积占比越大,则TN容量越大。上述结果表明,在计算大面积湖库的水环境容量时,需要设置污染混合区,以确保流入湖库的总污染物控制在湖库的实际污染承载力范围之内。

因以上3个参数的率定范围不一致,为统一对比标准,对各计算参数在相应基准值的基础上分别变化5%、10%与20%,核算TN容量相比基准值的偏差百分比,结果如表6所示。由表6可知,水温修正系数对TN容量的影响最大,混合区面积占比影响最小。

4.4 水库管理目标的影响

大溪水库流域水质管理目标为主湖区II类时,库区多年平均TN容量为55.91 t,比基准值偏大183.38%。可见水质管理目标直接影响水环境容量的大小,对流域水环境管理具有决定性的作用。根据大溪水库最新调控方案将库水位抬高2 m后,计

算得出的 TN 年容量为 21.33 t, 比基准值偏大 8.11%。可见合理调控水位能够使湖库水质状况得到

改善, 该方法可为湖库管理部门在制定水环境管理策略上提供新思路。

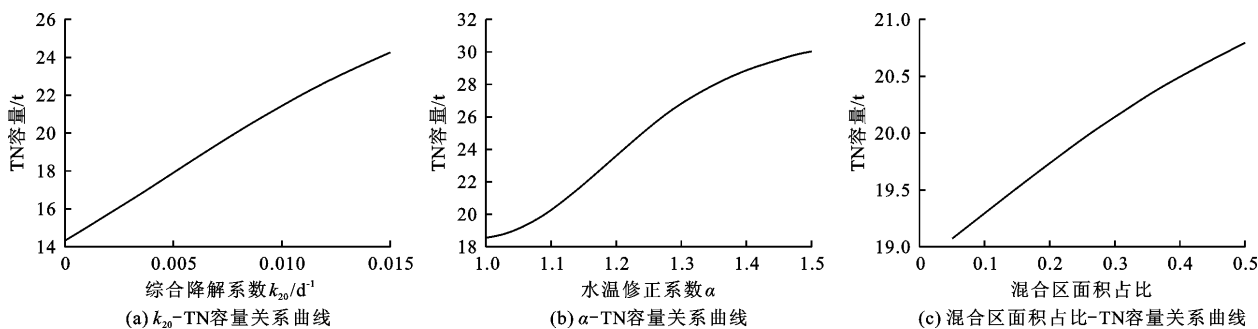


图4 各计算参数与 TN 水环境容量关系曲线

表6 各计算参数不同幅度变化对应的 TN 容量相比基准值的偏差百分比

计算参数	计算参数变化幅度					
	-20%	-10%	-5%	5%	10%	20%
降解系数 k_{20}	-5.53	-2.74	-1.36	1.35	2.67	5.26
水温修正系数 α			-5.98	8.27	17.34	35.27
混合区面积占比	-0.44	-0.88	-0.22	0.21	0.86	0.43

5 讨论

目前在湖库水环境容量的计算中, 计算模型中所考虑的因素往往不够全面, 针对这一问题, 本研究综合考虑所有影响水环境容量的因素建立了逐日动态模型, 并对各因素按照物理因子、计算参数以及水库管理目标进行分类, 针对不同类别的影响因子采取不同对比方式进行定量分析。

在所有因素中, 水库管理目标中的水质管理目标对大溪水库 TN 容量核算结果的影响最大, 这与李静等^[31]对不同水质目标下居延海(东)水环境容量分析所得结论相吻合。水量目标管理对 TN 容量核算结果的影响与水质管理目标相比较小, 但在湖库的水位调控与运行管理过程中也要科学合理地进行考量。

物理因子中入库径流量的变化是影响湖库水环境容量的一个重要因素, 这与崔嵩等^[13]的研究成果一致。径流量年际、年内的丰枯变化显著影响着水环境容量的大小, 入库径流量越大, 则水环境容量越大; 若不考虑水量的动态变化过程, 仍将以年为单位进行静态核算的结果作为水环境保护工作的依据, 对于以面源输入为主的湖库型流域的水环境容量计算结果将产生明显偏差^[12]。其他因素中库面蒸发与库区降水对水环境容量核算的影响也不容忽视, 其实质是通过影响水量平衡过程对最终计算结果产

生影响, 不考虑库面蒸发时, 湖库内水量增加, 相应的容量也增大; 不考虑库区降水时, 湖库内水量减少, 相应的容量也减小。在库区降水的定量分析过程中, 通过两组方案与基准情景的对比可以看出, 库面蒸发与库区降水之间存在一种互相抵消的过程, 即方案 2 中同时去除库面蒸发、大气沉降和库区降水的影响时, TN 容量与基准值的偏差值较仅去除库面蒸发和大气沉降的方案 1 偏差减小, 因此, 在降水与蒸发资料缺乏时, 可以选择同时不考虑二者影响, 利用二者相抵消的特性来提高计算精度。

模型计算结果进一步验证了大气干湿沉降是湖库非点源污染的重要来源, 对水环境容量的影响程度较大, 这与宋泽峰等^[16]的研究结果一致。湖库水温的波动是另一重要因素, 固定的温度输入条件使 TN 水环境容量计算结果明显小于基准情景下的计算结果, 这是因为大溪水库流域的丰水期为每年的 6—8 月, 该时段水温通常高于设定的固定温度 20℃, 而较适宜的高水温有利于水体中污染物的降解自净^[32]。

计算参数中与水温相关的参数有水温为 20℃的综合降解系数 k_{20} 与水温修正系数 α , 两个参数与核算结果均为正相关关系, 并且水环境容量受水温修正系数 α 的影响更大, 因此在计算过程中应更加重视该参数的率定工作。混合区面积占比的变化对核算结果的影响较小, 但若完全不考虑混合区的作

用也是不可取的,因此在计算时需要对混合区占比进行合理划分。

6 结 论

本文基于构建的水环境容量逐日动态计算模型,量化分析了物理因子、计算参数、水库管理目标3类影响因素对湖库TN水环境容量核算值的影响。主要结论如下:

(1)综合考虑影响湖库水环境容量的所有因素计算得到的大溪水库TN年容量基准值为19.73 t, TN容量与流域降水量存在显著正相关关系,相关系数 R^2 为0.86。

(2)物理因子中入库径流量与TN容量核算结果相关性最强,基准情景设计水文条件下库区降水对TN容量核算结果偏差值的影响最大,其他因素对TN容量的影响也不容忽视。计算参数中水温修正系数 α 对容量核算结果的影响最大,综合降解系数 k_{20} 次之。水库管理目标中的水质管理目标对TN容量的影响最大,而且是所有因素中对TN容量影响最大的因子。

(3)本研究明确了各影响因素改变后对水环境容量核算结果的影响程度,可为精确核算水环境容量提供依据,为数据缺乏地区构建水环境容量计算模型时选取关键影响因子提供参考,还可为环境管理部门的科学决策提供依据。

参考文献:

[1] 徐兆静. 基于一维水质模型的平原河网水环境容量计算[J]. 人民黄河, 2021, 43(S2): 113-114.

[2] 黄立章, 朱艳芳, 张子林. 南昌市艾溪湖COD、TN、TP水环境容量研究[J]. 江西水利科技, 2016, 42(1): 32-35.

[3] ZHU Kaihang, CHEN Lei, CHEN Shibo, et al. New framework for managing the water environmental capacity integrating the watershed model and stochastic algorithm [J]. Science of the Total Environment, 2021, 816: 151659.

[4] CHEN Juan, CHEN Tao, WANG Sen. Study on river water environmental capacity under unascertained information [C]// 2020 International Symposium on Water, Ecology and Environment. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 690(1): 012005.

[5] WANG Xin, LI Rong, TIAN Yong, et al. Watershed-scale water environmental capacity estimation assisted by machine learning [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126310.

[6] LI Daming, BU Shilong, LI Qichen, et al. Water environ-

ment capacity estimation and pollutant reduction of Yanghe Reservoir Basin in Hebei Province, China, via 0-D water quality model [J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80: 508.

- [7] 王晨, 伊学农, 李池鸿, 等. 基于水动力水质模型的湖泊水环境容量计算与应用[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(3): 69-71.
- [8] 夏军, 刁艺璇, 余敦先, 等. 鄱阳湖流域水资源生态安全状况及承载力分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 1-8+24.
- [9] HU Kaiming, WANG Yunyan, FENG Bin, et al. Calculation of water environmental capacity of large shallow lakes—a case study of Taihu Lake [J]. Water Policy, 2020, 22(2): 223-236.
- [10] 石泳昊, 贾良文, 张恒, 等. 湛江湾内湾环境容量计算与排污治理[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(4): 134-142.
- [11] 张光炯, 王惠, 申源源, 等. 彩云湖水污染负荷解析及环境容量研究[J]. 环境保护与循环经济, 2019, 39(10): 45-52.
- [12] 陈江海. 不同时空计算尺度对水环境容量评估差异的影响分析[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(9): 33-36.
- [13] 崔嵩, 贾朝阳, 付强, 等. 河流动态水环境容量核算与影响因素分析[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(1): 66-76.
- [14] MA H B, TIAN C C, HUANG D J, et al. Study on dynamic water environmental capacity of the river network in Wenhuang plain based on the hydrodynamic and water quality coupling model [C]// The 6th International Conference on Water Resource and Environment. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 612(1): 012061.
- [15] 陶亚, 陈宇轩, 赵喜亮, 等. 基于EFDC模型的阿什河水环境容量季节性分析[J]. 环境工程, 2017, 35(7): 65-69.
- [16] 宋泽峰, 张君伍, 陆智平, 等. 大气干湿沉降对河北平原农田面源污染的贡献[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1): 93-98.
- [17] CHEN Shibo, CHEN Lei, LI Xuejun, et al. Unexpected nitrogen flow and water quality change due to varying atmospheric deposition [J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127679.
- [18] 李恒鹏, 陈伟民, 杨桂山, 等. 基于湖库水质目标的流域氮、磷减排与分区管理——以天目湖沙河水库为例[J]. 湖泊科学, 2013, 25(6): 785-798.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水域纳污能力计算规程: GB/T 25173—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [20] 刘晓东, 杨婷, 石佳佳, 等. 关于现行水域纳污能力计算规程中河流计算模型的探讨[J]. 环境保护科学, 2018, 44(2): 32-36.

(下转第115页)

- [26] 王勇,孙瑞欣. 土地利用变化对区域水-能源-粮食系统耦合协调度的影响——以京津冀城市群为研究对象[J]. 自然资源学报,2022,37(3):582-599.
- [27] XU Xibao, YANG Guishan, TAN Yan, et al. Factors influencing industrial carbon emissions and strategies for carbon mitigation in the Yangtze River Delta of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142(Part 4): 3607-3616.
- [28] ZHANG Jie, WANG Yajing, LI Jiangfeng. Maximize economic benefits with minimum land resources input: evaluation and evolution of land use eco-efficiency of agglomerations in middle reaches of Yangtze River, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(3): 1985.
- [29] 马志远,段学军,王磊,等. 长江经济带区域发展与资源环境承载力空间耦合特征及高质量发展路径[J]. 长江流域资源与环境,2022,31(9): 1873-1883.
- [30] 油建盛,董会忠,蒋兵,等. 长江经济带能源生态效率及驱动因子时空非平稳性[J]. 资源科学,2022,44(11): 2207-2221.
- [31] 邓鹏,陈菁,陈丹,等. 区域水-能源-粮食耦合协调演化特征研究——以江苏省为例[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6): 232-238.
- [32] 徐辉,王亿文,张宗艳,等. 黄河流域水-能源-粮食耦合机理及协调发展时空演变[J]. 资源科学,2021,43(12): 2526-2537.
- [33] 杨肖. 长江经济带水-能源-粮食系统耦合协调度测算及影响因素的时空差异研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学,2022.
- [34] 毛艳. 西部地区现代农业与旅游业的耦合协调关系分析[J]. 南方农业学报,2020,51(3): 712-721.
- [35] 肖露,张榆琴,李新然,等. 欠发达地区农业农村现代化发展与阻碍因素分析——以云南省为例[J]. 农业现代化研究,2022,43(5): 780-789.
- [36] 顾茉莉,叶长盛,楼婷婷,等. 长江经济带水-能源-粮食-土地耦合协调发展研究[J]. 人民长江,2023,54(6): 11-18+40.
- [37] 李嫒,段佩利,邵喜高,等. 长江经济带城市群开发强度与生态环境承载力关系分析[J]. 统计与决策,2021,37(10): 70-74.
- [38] 吴艳霞,罗恒,梁志康. 长江经济带生态安全测度研究[J]. 生态学报,2020,40(19): 6761-6775.

(上接第105页)

- [21] 汪琪,黄蔚,陈开宁,等. 大溪水库浮游植物群落结构特征及营养状态评价[J]. 环境科学学报,2020,40(4):1286-1297.
- [22] 刘森,陈开宁,孙淑云,等. 大溪水库水质变化趋势及污染成因解析[J]. 环境科学学报,2017,37(7):2514-2523.
- [23] 余符合. 天目湖饮用水水源地长效管护状况与对策建议[J]. 江苏水利,2021(S1):65-68.
- [24] 孙先忍. 基于不同运行模式的官厅水库水质过程模拟[D]. 重庆:重庆交通大学,2021.
- [25] 于雷,吴舜泽,范丽丽,等. 水环境容量一维计算中不均匀系数研究[J]. 环境科学与技术,2008,31(1):116-119.
- [26] 陈炼钢,孙玉莹,叶兴平,等. 考虑大气沉降的湖库分区动态水环境容量精细解析[J]. 水资源保护,2023,39(1):174-180+189.
- [27] 盛丰,冯天国,王福科,等. 浏阳河长沙段 COD_{Mn}、NH₃-N 和 TP 综合降解系数研究[J]. 中国环境科学,2021,41(2):669-676.
- [28] 陈俊颖,张亚辉,杨吉强,等. 基于水质目标管理的水功能区调整实践[J]. 南京大学学报(自然科学),2022,58(2):235-245.
- [29] 孙东旭,丁爱中. 基于水量调控的城市湖泊水环境保障措施研究[J]. 弹性体,2014,24(2):58-63.
- [30] 李海辉. 鄱阳湖主湖区与碟形湖水位变化及其对水质的影响[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(6):1298-1306.
- [31] 李静,沈梦兰,何立山,等. 不同水质目标下居延海(东)水环境容量分析[J]. 中国环境监测,2022,38(3):120-125.
- [32] 蔚秀春. 河流中污染物综合降解系数的影响因素浅析[J]. 内蒙古水利,2007(2):116-117.