

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.023

考虑大气沉降的湖库分区动态水环境容量精细解析

陈炼钢¹, 孙玉莹¹, 叶兴平², 徐祎凡¹, 何常清², 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. 江苏省城镇化和城乡规划研究中心, 江苏 南京 210000)

摘要: 针对面源污染为主的湖库型流域, 为建立水质目标管理与污染总量控制之间更精准的响应关系, 借鉴日最大负荷总量模式, 基于物质平衡原理提出考虑径流丰枯变化、不均匀混合、大气沉降等影响因素的湖库分区动态水环境容量精细解析方法, 包括污染混合区设置、代表水文系列确定、逐日分区水量水质计算。以沙河水库为例, 分别以全湖Ⅱ类、主湖Ⅱ类作为水质管理目标, 采用2010—2015年代表水文系列对总氮动态水环境容量进行精细解析。结果表明: 全湖Ⅱ类、主湖Ⅱ类水质管理目标下沙河水库总氮水环境容量的多年均值分别为36.7 t和99.43 t, 若不考虑湖滨混合区, 全湖Ⅱ类水质目标下总氮的年水环境容量计算值偏大66.43%; 实施水质目标管理的水域面积越大, 大气沉降对水环境容量的影响越大; 径流年际及年内丰枯变化对水环境容量的影响显著; 各分区总氮控制总量占全流域总量的比例与面积比基本一致。湖库分区动态水环境容量精细解析可量化不同因素对水环境容量计算结果的影响, 科学解析面源输入型湖库水环境容量的时空结构特征, 实现水质目标管理与污染总量分区管控的有机联动, 更好地支撑流域水环境的精细化管理。
关键词: 水环境容量; 水质目标管理; 日最大负荷总量; 大气沉降; 湖库分区; 总氮; 沙河水库
中图分类号: X26 **文献标志码:** A **文献标志码:** 1004-6933(2023)01-0174-07

Fine analysis of dynamic water environment capacity of lakes and reservoirs in consideration of atmospheric deposition// CHEN Liangang¹, SUN Yuying¹, YE Xingping², XU Yifan¹, HE Changqing², JIN Qiu¹ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210000, China; 2. Urbanization and Urban-Rural Planning Research Center of Jiangsu, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to establish a more accurate response relationship between water quality target management of non-point source inputting lakes and reservoirs and total pollution load control in the river basin, a detailed analysis method of dynamic water environment capacity of lakes and reservoirs based on mass balance was proposed with reference to total maximum daily loads, including pollution mixing zone setting, representative hydrological series selection, and daily 2D water quality calculation, with consideration of the influence factors, including runoff variation, inhomogeneous mixing, atmospheric deposition, etc. The Shahe Reservoir in the western hilly area of the Taihu Lake Basin was used as a case study. The dynamic water environment capacity of total nitrogen (TN) was analyzed with the level-Ⅱ water quality for the whole lake and the main lake area, respectively, by using the representative hydrological series from 2010 to 2015. The results show that the annual average values of TN water environment capacity are 36.7 t and 99.43 t under the level-Ⅱ water quality for the whole lake and the main lake area, respectively; if the lakeside mixing zone is not considered, the calculation result of annual TN water environment capacity increases by 66.43%; the larger the area of the water area where the water quality target management is implemented, the greater the influence of atmospheric deposition on the water environment capacity; the inter-annual and intra-annual variations of runoff have significant impact on the water environment capacity; and the ratio of total TN control of each subzone to that of the whole river basin is basically consistent with the area ratio. The method can scientifically analyze spatial and temporal characteristics of the water environment capacity of non-point source inputting lakes and reservoirs, and the results could better support the fine management of the river basin water environment by establishing well link between water quality target management and spatial control of total

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200304); 广西重点研发计划(AB22035075, AB22080093); 江苏省水利科技项目(2021033)

作者简介: 陈炼钢(1981—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事生态水文与水资源保护研究。E-mail: lgchen@nhri.cn

pollution loads.

Key words: water environment capacity; water quality target management; total maximum daily loads; atmospheric deposition; partition of lakes and reservoirs; total nitrogen; Shahe Reservoir

“十六字”治水思路中“空间均衡”的核心要义是建立与水资源承载能力相均衡的国土空间格局;2021年10月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于推动城乡建设绿色发展的意见》,明确提出“以自然资源承载能力和生态环境容量为基础,合理确定开发建设密度和强度”。水环境容量作为资源环境承载能力的重要组成部分,是链接水质目标管理与污染总量控制的核心纽带,其科学测算关系到所采取的污染防治措施能否实现预期的水质目标。对于水环境容量计算,欧美国家常采用日最大负荷总量(total maximum daily loads, TMDL)模式,其考虑了污染负荷在点源与非点源之间的分配、安全临界值和季节性变化等因素。国内权威的技术指南为GB/T 25173—2010《水域纳污能力计算规程》,在实际工作中得到了广泛应用,然而存在一些不足,包括对水域的简化与划分过于宽泛,静态的设计水文条件与径流的动态丰枯变化不符,污染源主要针对点源等。因此,其计算成果常与实际偏差较大,难以有效支撑流域水环境精细管理及水污染精准防治。

上述问题日益引起关注和重视,水环境容量动态特征的研究成为新的趋势。Xie等^[1]将西太湖划分控制单元后结合一维与二维模型计算西太湖水环境容量,并基于各月水量对水环境容量进行月尺度下的重新分配,初步认识到水环境容量与月径流量呈正相关关系。李冰阳等^[2]综合考虑了丰枯水期的点、面源污染协同影响下的水环境容量,指出点、面源污染与丰枯水季相关,有一定的季节性特征,但对于面源污染的来源仅考虑了污染物随径流的入流,未考虑大气干湿沉降的影响。张剑等^[3-4]针对不同流域水文条件和污染源变化特征构建不同条件下河网动态水环境模型,解决了对水环境容量动态特征考虑不足的缺陷,但都属于河网水环境容量的计算方法,不能直接用于湖泊水库。在湖库水环境容量计算方面,学者们采用水质模型对太湖^[5]、鄱阳湖^[6]、潼湖^[7]、闽海湖^[8]、仙女湖^[9]、蘑菇湖^[10]、星海湖^[11]、洋河水库^[12]和杞麓湖^[13-14]等进行了水环境容量估算研究,除太湖和鄱阳湖两座大型湖库外,其余都选择均匀混合模式,也均未考虑大气沉降和径流动态变化对水环境容量的影响。

综上所述,较全面考虑影响因素的动态水环境容量研究目前多针对河流,对湖库动态水环境容量

研究相对薄弱,考虑的影响因素也比较单一。与河流相比,湖库由于其水量保障程度高,通常作为水源地,点源排放日趋严格,入湖污染负荷中面源输入比重日益加大,甚至占优,同时湖库具有水面面积大、流动性差等特点。面源输入受径流丰枯变化的影响,由流动性差所引起的不均匀混合现象等对湖库水环境容量的影响非常大;水面面积大所带来的氮磷等元素的大气干湿沉降也是入湖污染负荷一个不可忽视的重要来源^[15]。针对湖库水环境的上述特点,本文借鉴TMDL模式,基于物质质量平衡原理提出湖库分区动态水环境容量精细解析方法,综合考虑了径流变化、不均匀混合、大气干湿沉降、库面蒸发、库容变化、水温波动、沉降自净等可能影响水环境容量的主要因素,并选择太湖流域湖西丘陵区的沙河水库进行实例分析,旨在建立更精准的面源输入型湖库水质目标管理与流域污染总量控制之间的响应关系,更好地支撑湖库型流域水环境的精细化管理。

1 研究方法

1.1 湖库分区

湖库具有水面面积大和水体流速、湖泊环流形态和自净能力时空分布不均匀^[16]的特点,当入湖水流携带污染物进入湖体时,其水质与湖体自身水质存在差异,形成了占据一定面积的混合区域;而湖心区水质受外来水的影响较小,导致湖心区与湖滨带的水质存在较大差异。若将湖库看作一个整体,假定整个湖体的水质均匀分布,采用简单的零维模型计算水环境容量,计算成果通常偏大、不能准确反映真实的污染物容纳能力,为此目前的实际工作中常通过不均匀系数校正不均匀混合对湖库水环境容量的影响^[17],但是不均匀系数的取值依赖主观经验,科学性有待提升。此外,仅采用全湖整体的环境容量无法直接支撑流域分区的污染总量控制,环境容量空间分配的科学合理性面临较大挑战^[18]。

为科学反映湖库水质不均匀混合对水环境容量的影响,支撑湖库水质目标分区管理和流域污染总量的空间管控,将湖库水域划分为主湖区和湖滨混合区,依据入库河流分布以及湖库岸线特征进一步将湖滨混合区划分为若干混合分区,各分区之间的联动主要体现在湖滨混合区与主湖区之间水和污染物质的通量交换。根据各分区的水质目标、蓄水量、

水面面积及入库径流量等,通过分区联动的二维水量水质动态平衡模型计算出各分区的水环境容量,各湖滨混合区的容量总和即为湖库水环境容量的总量,各混合子区的水环境容量对应各流域分区的人湖污染总量控制目标,可为更精准的总量空间管控及入库河流的水质目标管理提供科学依据。

1.2 代表水文系列的选择

水环境容量计算中设计水文条件选取常用的方法有:90%保证率最枯月平均流量、水位和近10年最枯月平均流量、水位。设计水文条件的选取应与目标水体主要污染负荷排放规律相协调,因此上述不利枯水条件的选取对于控制与径流丰枯变化无关的点源排放是适用的,可保障不利条件下的水质安全。然而,如果某湖库型水体污染负荷以面源输入为主,上述设计水文条件的选择将严重偏离面源输入的特点与规律,所得水环境容量成果无法用于控制流域的面源排放。面源污染伴随降雨侵蚀产流出现,排放量的大小常随水量(降水量/径流量)的变化而正相关变化,具有显著的动态波动特征^[19-20],因而丰水期一般也是面源污染排放的重点时段。对于控制与水量丰枯变化密切相关的面源排放,应选择与多年长系列水文过程变化特征接近的水雨情代表系列,才能与面源排放的动态变化特征相匹配。具体选择建议如下:以10a以上的长系列逐日流域降水量或入湖库径流量资料为基础,计算年均值、月均值、丰/平/枯水年的占比等3类统计特征值;以5~10a作为设计水文条件的系列长度,选择与多年长系列3类统计特征值相近的水雨情组合作为代表系列;湖泊的设计水位和出流量采用与代表系列同期的实际过程。

1.3 水量水质动态计算

分区逐日水量水质动态平衡模型如式(1)~(4),其中式(1)为水量平衡方程,式(2)为污染物质量平衡方程,式(3)为入湖径流污染负荷量方程,式(4)为大气干湿沉降负荷量方程。

$$V_{j,i+1} = V_{j,i} + Q_{1,j,i} - Q_{0,j,i} + P_{j,i} - E_{j,i} \quad (1)$$

$$\rho_{j,i+1} V_{j,i+1} = \rho_{j,i} V_{j,i} (1 - k) + W_{Q,j,i} + W_{A,j,i} - \rho_{j,i} Q_{0,j,i} \quad (2)$$

$$W_{Q,j,i} = Q_{1,j,i} \rho_{1,j,i} \quad (3)$$

$$W_{A,j,i} = \rho_{p,i} P_{j,i} + S_{j,i} M_i \quad (4)$$

式中: $V_{j,i}$ 为第 j 分区第 i 天水量, m^3 , 由湖库水位结合容积曲线计算; $S_{j,i}$ 为第 j 分区第 i 天水面面积, km^2 , 由湖库水位结合面积曲线计算; $Q_{1,j,i}$ 、 $Q_{0,j,i}$ 分别第 j 分区第 i 天流入、流出径流量, m^3 ; $P_{j,i}$ 、 $E_{j,i}$ 分别为第 j 分区第 i 天的降水量和蒸发量, m^3 , 根据

降雨蒸发强度和水面面积动态计算; $\rho_{j,i}$ 为第 j 分区第 i 天的污染物质量浓度, mg/L ; k 为污染物综合降解系数, d^{-1} ; $W_{Q,j,i}$ 为第 j 分区第 i 天随径流进入的污染负荷量, g ; $W_{A,j,i}$ 为第 j 分区第 i 天的大气干湿沉降负荷量, g ; $\rho_{1,j,i}$ 为第 i 天进入第 j 分区径流中的污染物质量浓度, mg/L ; $\rho_{p,i}$ 为第 i 天降雨中的污染物质量浓度, mg/L ; M_i 为第 i 天污染物干沉降强度, $g/(km^2 \cdot d)$ 。

在采用长系列水量水质数据完成湖库水量平衡方程,与污染物质量平衡方程验证的基础上,针对设计水文条件的代表系列,按式(5)进行水环境容量逐日连续计算,并统计出各分区在不同水文年型(多年平均、丰水年、平水年、枯水年)以及不同时段(全年、丰水月、平水月、枯水月)的水环境容量:

$$W_{QP,j,i} = \rho_{s,j} V_{j,i+1} - \rho_{j,i} V_{j,i} (1 - k) - W_{A,j,i} + \rho_{j,i} Q_{0,j,i} \quad (5)$$

式中: $W_{QP,j,i}$ 为第 j 分区第 i 天的水环境容量, g ; $\rho_{s,j}$ 为第 j 分区的目标水质, mg/L 。

2 研究区模型验证与代表水文系列

2.1 研究区概况

沙河水库位于江苏省常州市,是天目湖流域2座水库中的一座大型水库,功能以城镇供水、防洪、农业灌溉为主,兼顾旅游、渔业、发电等;水库常年水位20~21m(吴淞基面),水面面积约11 km^2 ,最大水深14m,平均水深5.85m,总库容1.09亿 m^3 。沙河水库上游为低山丘陵区,集水面积154.5 km^2 (约28.4 km^2 位于安徽省宣城市),主要入库河流包括平桥河、徐家园河与中田河,属于太湖流域湖西区南部的南河水系,是太湖流域重要的水源涵养区。流域水系及水文水质监测站点见图1,其中沙河水库坝上和中田河设有水文站,平桥河另设有单独的雨量站;湖区设置水质测点5处,3个主要的入库河流(中田河、徐家园河、平桥河)都设有水质测点。流域雨量丰沛,多年平均降水量1248mm,但年际变化剧烈,最大年降水量为2398mm(2016年),最小年降水量仅632mm(1978年)。降雨年内分配具有明显的季节特征,丰水期(6—8月)平均降水量522mm,约占常年降水量的42%;枯水期(10月至翌年2月)平均降水量305mm,仅占常年降水量的24%左右;平水期(3—5月,9月)平均降水量421mm,约占常年降水量的34%。

沙河水库是常州溧阳市的主要水源地和核心的旅游资源之一,为保护和进一步提升其水质,地方专门立法制定了《常州市天目湖保护条例》(下文简称《条例》),规定将流域内水库校核洪水位线以下的

全湖面划定为保护区,按Ⅱ类水质管理。近年来随着农村生活污水处理、退耕还林、林茶收储、氮

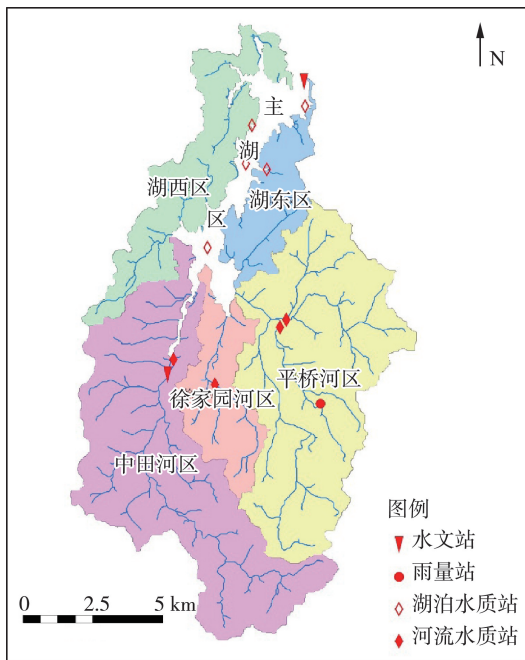


图1 沙河水库流域水系及水文水质监测站点

Fig.1 Water system and hydrologic and water quality monitoring stations in Shahe Reservoir Basin

磷拦截等治理措施的推进,沙河水库水质总体呈现好转态势,主湖区总磷(TP)浓度处于Ⅱ~Ⅲ类水质之间、总氮(TN)浓度处于Ⅲ~Ⅳ类水质之间,营养水平总体处于中营养水平,与《条例》设定的全湖Ⅱ类水质目标尚存差距,与《湖泊营养物基准—中东部湖区(总磷、总氮、叶绿素a)》(2020年版)也存在一定差距。此外,主要入库河流的TP浓度处于Ⅱ~Ⅲ类水质之间、TN浓度为劣V类水质,导致各库湾及湖滨带水质与《条例》水质目标存在较大差距。沙河水库流域目前没有工业点源,污染主要来自面源,其次为分散的农村生活点源,随着农村生活污水处理设施的全域覆盖,面源在入库污染负荷中将绝对占优。经测算目前沙河水库流域TN污染入湖负荷量中,面源污染占比为87%,点源污染占比仅13%,其中茶园的贡献率最大,为23.91%,其次为林地和其他园地,贡献率分别为22.94%和19.22%。不同子流域各污染源的贡献差别较大,以全流域污染负荷贡献最大的茶园为例,中田河、徐家园河、平桥河、湖东区、湖西区5个子流域的入库TN污染负荷量中茶园的贡献率分别为13.64%、9.91%、21.99%、31.79%和46.367%。为更好地支撑流域面源污染的分区治理及时程管控,有必要对其水环境容量的时空结构特征开展精细解析。

2.2 水量水质模型验证

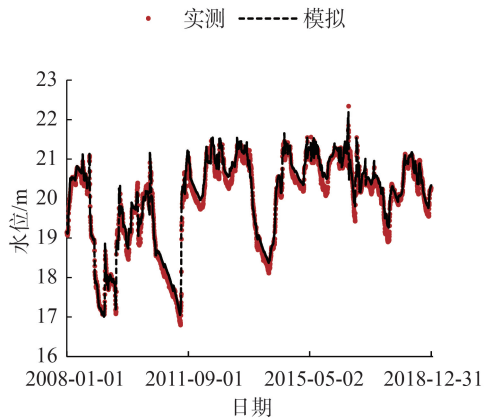
依据沙河水库入库河流的分布以及岸线特征,将沙河水库水域划分为6个计算分区,包括1个主湖区、5个湖滨混合区(中田河混合区、徐家园河混合区、平桥河混合区、湖东混合区、湖西混合区),各分区对应的子流域见图1。通过水环境实况调查并结合模型计算,确定湖滨混合区总面积占同期水域面积的20%;进一步根据各混合区对应的陆域集水面积并结合岸线特征,确定5个混合区的面积比为4:1:3:1:1。

a. 水量模型验证。采用2010—2018年逐日水文数据对水量模型进行验证,各分区的入库日流量采用SWAT(soil and water assessment tool)模型由逐日降雨资料进行模拟,采用中田河入库径流实测数据对SWAT模型进行验证,中田河流量模拟值的 R^2 为0.85,相对偏差为12%。在入库径流模拟的基础上,对水库水量平衡模型进行验证,库水位模拟值的 R^2 为0.98,总体绝对偏差为0.11 m。从水量模型验证情况(图2(a))可见,基于SWAT模拟计算出的入库径流精度较好,所建水量平衡模型能反映水库蓄水量的动态变化。

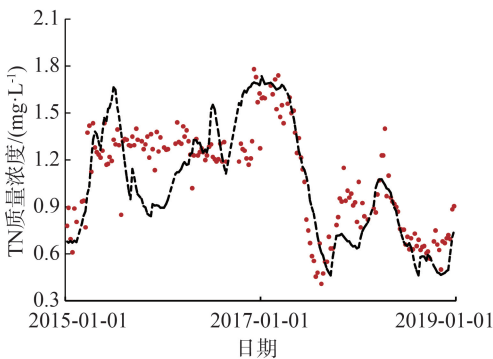
b. 水质模型验证。在水量模型验证的基础上,采用2015—2018年逐周水质数据对水质模型进行验证,代表水质因子选择超标最为严重的TN。中田河、徐家园河、平桥河采用实测水质,对于没有实测数据的湖东、湖西区入库河流采用SWAT模型的模拟水质;中田河、徐家园河、平桥河TN质量浓度SWAT模型模拟值的决定系数 R^2 分别为0.76、0.80和0.77,说明SWAT模型模拟出的各子流域分区的入库水质合理可信。大气沉降强度依据中田河的入库控制站——中田舍站2014—2016年的观测数据设定,TN湿沉降质量浓度年均值为2.16 mg/L,按其季节变化规律逐月赋值(降水量大的月份质量浓度低,最低为7月,其值为0.63 mg/L;降水量小的月份质量浓度高,最高为1月,其值为3.76 mg/L);TN干沉降强度无明显季节变化规律,采用年均值585 g/(km²·d⁻¹)。综合降解系数 k 受水温的影响较为明显,采用式(6)计算,经率定水温20℃时的综合降解系数 $k_{20} = 0.0075 \text{ d}^{-1}$,水温修正系数 $\alpha = 1.08$ 。采用湖区5个实测点的均值对模型6个分区计算结果的均值进行验证,TN质量浓度模拟值的决定系数 R^2 为0.67,总体绝对偏差为0.042 mg/L。从水质模型验证情况(图2(b))可见,所建污染物质量平衡模型能较好反映库区水质的长系列动态变化。

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

式中： k_t 为水温 t 时的综合降解系数， d^{-1} 。



(a) 库水位



(b) 库水质

图2 模型验证结果

Fig. 2 Model verification results

2.3 代表水文系列

分析流域3个站点(中田舍、平桥、沙河水库)1978—2017年长系列逐日降雨监测数据,发现2010—2015年降雨系列的年均值、月均值、丰平枯水年占比等统计特征值与长系列基本相同,能代表沙河水库流域降雨的多年动态变化特征(表1),可以作为开展水环境容量计算的设计水文条件。从表1可见不同年份入库径流量的差异非常大,2013年枯水年约3 200万 m^3 ,2015年丰水年超过8 200万 m^3 ,入库径流量的大幅变化必将导致水环境容量的较大差异。

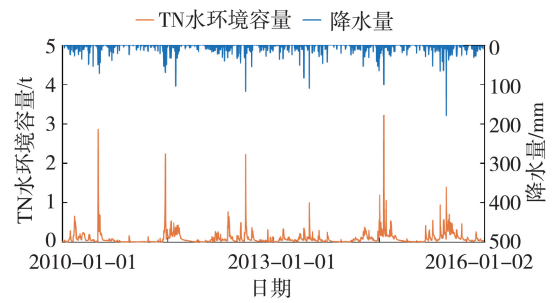
表1 代表水文系列

Table 1 Representative hydrological series

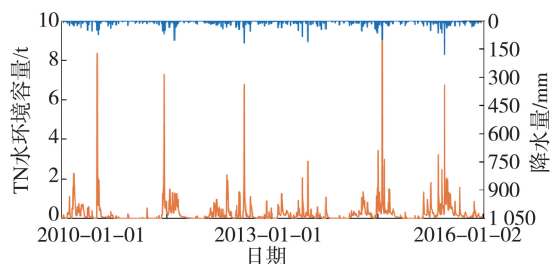
年份	水文年	降水量/ mm	蒸发量/ mm	入库径流 量/万 m^3	库水位/ m
2010年	平水年	1 179.60	669.70	6 948.33	19.32
2011年	枯水年	1 089.60	680.00	5 413.35	18.95
2012年	平水年	1 369.60	776.90	6 904.31	20.65
2013年	枯水年	1 079.50	851.80	3 211.67	20.18
2014年	平水年	1 360.20	681.00	7 177.13	20.06
2015年	丰水年	1 590.80	715.50	8 240.55	20.75
平均		1 278.22	729.15	6 315.89	19.99

3 结果与讨论

基于验证的沙河水库分区逐日水量水质动态模型,采用2010—2015年代表水文系列开展逐日动态水环境容量计算,结果见图3。从图中可见水环境容量的日间变化非常大,与降水量的变化基本同步,符合面源输入占优的湖库水量水质特点。为更好地支撑环境管理,基于水环境容量的逐日过程,按多年平均、丰水年、平水年、枯水年统计分析水环境容量的年际变化特征,按丰水期、平水期、枯水期统计分析水环境容量的年内变化特征,量化水质目标、径流丰枯变化、大气沉降、不均匀混合等的影响,进一步解析水环境容量的时空结构特征,支撑流域污染总量的分区管控和入湖河流水质目标的精细化管理。



(a) 全湖Ⅱ类水质



(b) 主湖Ⅱ类水质

图3 TN水环境容量的逐日变化

Fig. 3 Daily variation of TN water environment capacity

3.1 水环境容量总量及其影响因素

a. 水质目标及径流丰枯变化的影响。沙河水库年水环境容量见表2,从表中可见,不同水质管理目标下水环境容量差异非常大,如果按照《条例》规定的全湖Ⅱ类,沙河水库TN的多年平均水环境容量仅36.70t;如果将Ⅱ类水质目标管理的范围缩小至主湖区,沙河水库TN的多年平均水环境容量可大幅增加至99.43t,可为相关规划选择合理可行的水质管理目标提供依据。此外,径流的丰枯变化对水环境容量的影响明显:平水年TN水环境容量接近多年均值,丰水年TN水环境容量超过多年均值30%以上,枯水年TN水环境容量低于多年均值20%以上,可为相关部门在面临不同的实况来水情势时开展更精细的环境管理提供支撑。

表2 TN年水环境容量 单位:t

Table 2 Annual TN water environment capacity unit:t

水质目标	多年平均	丰水年	平水年	枯水年
全湖Ⅱ类	36.70	48.22	38.76	27.85
主湖Ⅱ类	99.43	136.55	104.95	72.57

b. 大气沉降的影响。不考虑大气沉降,沙河水库 TN 年水环境容量计算结果见表 3,从中可见,多年平均来水条件下,全湖Ⅱ类、主湖Ⅱ类水质目标下沙河水库 TN 的年水环境容量分别为 42.07 t 和 32.57 t,相比考虑大气沉降时的水环境容量分别偏大 14.6% 和 33.3%。全湖Ⅱ类水质目标实质是要求湖滨混合区水质达到Ⅱ类,其水质目标管理区域为水域面积占比 20% 的湖滨带;主湖Ⅱ类水质目标是要求主湖区水质达到Ⅱ类,其水质目标管理区域为水域面积占比 80% 的主湖区。因此,当实施水质目标管理的水域面积越大,大气沉降对水环境容量的影响越大,如果忽略大气沉降的影响,将导致入库径流污染控制总量超出湖库实际纳污能力,造成湖库污染负荷过载。

表3 不考虑大气沉降下 TN 年水环境容量 单位:t

Table 3 Annual TN water environment capacity without consideration of atmospheric deposition unit:t

水质目标	多年平均	丰水年	平水年	枯水年
全湖Ⅱ类	42.07	56.52	44.10	31.83
主湖Ⅱ类	132.57	182.06	139.94	96.76

c. 不均匀混合的影响。若不考虑湖滨混合区,将湖库看作一个均匀混合的整体来计算其水环境容量,Ⅱ类水质目标下沙河水库 TN 多年平均水环境容量为 61.08 t,相比考虑混合区时全湖Ⅱ类水质目标下水环境容量增加了 66.43%;丰水年、平水年、枯水年 TN 年水环境容量分别为 85.13 t、64.36 t 和 44.13 t,均比考虑混合区时的水环境容量值有明显增加。因此,对于水域面积较大湖库的水环境容量计算,有必要设置污染混合区,以保障入库径流污染控制总量在湖库实际纳污能力以内。

3.2 时空结构特征

多年平均来水条件下,沙河水库 TN 水环境容量的年内变化见图 3,分析可见,全湖Ⅱ类水质目标下,丰水期、平水期、枯水期的月均 TN 水环境容量分别为 6.43 t、3.2 t 和 0.92 t;主湖Ⅱ类水质目标下,丰水期、平水期、枯水期的月均 TN 水环境容量分别为 16.90 t、8.92 t 和 2.61 t。可见水环境容量随来水的丰枯变化波动明显,因此,对于面源输入型湖库的污染控制,需要开展更精细的时程管控。

各污染混合区的水环境容量,即对应各流域分区的入库污染控制总量,见表 4。中田河与平桥河

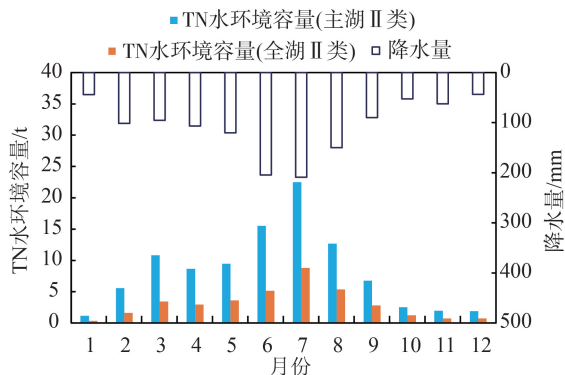


图4 设计水文条件下逐月降水量与 TN 水环境容量

Fig. 4 Monthly precipitation and TN water environment capacity under representative hydrological series

由于集雨面积大,相应混合区面积大,入库污染控制总量占比也高,中田河、平桥河入库 TN 污染控制总量分别约占全流域的 39% 和 31%。结合各入库河流的径流量,进一步将各分区的污染控制总量转化为各河流的水质管理目标:为达到全湖Ⅱ类水质目标,入库河流 TN 质量浓度应控制在 0.75 mg/L 以内;为达到主湖Ⅱ类水质目标,入库河流 TN 质量浓度应控制在 1.5 mg/L 以内。由此实现湖库水质目标管理、流域污染总量分区管控、入库河流水质目标管理的联动,支撑流域水环境的精细化管理。

表4 流域各分区 TN 年水环境容量 单位:t

Table 4 Annual TN water environment capacity

水质目标	of each subbasin					
	全湖	中田河	徐家园河	平桥河	湖东区	湖西区
全湖Ⅱ类	36.70	14.42	3.30	11.38	3.13	4.47
主湖Ⅱ类	99.43	39.04	8.85	30.90	8.34	12.30

4 结 语

本文所提出湖库分区动态水环境容量解析方法,既克服了传统方法过于概化,导致所得水环境容量计算成果难以反映湖库实际纳污能力的不足,又克服了数值模型要求水下地形资料和计算复杂的问题;方法考虑了湖库水环境容量的主要影响因素,资料要求适中、计算简便。在沙河水库案例研究中,以全湖Ⅱ类、主湖Ⅱ类分别作为水质管理目标,采用 2010—2015 年代表水文系列对 TN 动态水环境容量进行精细解析。结果表明所得成果能解析出水质目标、径流丰枯变化、大气沉降、不均匀混合等因素对水环境容量的影响及其时空结构特征,可实现水质目标管理与污染总量分区管控的有机联动,支撑流域水环境的精细化管理。

参考文献:

[1] XIE Rongrong, PANG Yong, BAO Kun. Spatiotemporal

- distribution of water environmental capacity; a case study on the western areas of Taihu Lake in Jiangsu Province, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(8): 5465-5473.
- [2] 李冰阳, 韩龙喜, 陈丽娜. 基于丰水、枯水期点源、面源水污染特征的水环境容量计算方法: 以太湖流域某水系为例[J]. 环境保护科学, 2021, 47(3): 100-105. (LI Bingyang, HAN Longxi, CHEN Lina. A calculation method of water environmental capacity based on water pollution characteristics of point and non-point sources in abundant and dry season; a case study of a river system in Taihu Basin [J]. Environmental Protection Science, 2021, 47(3): 100-105. (in Chinese))
- [3] 张剑, 付意成, 韩会玲. 浑太河流域动态水环境容量设计水文条件研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(3): 75-80. (ZHANG Jian, FU Yicheng, HAN Huiling. Hydrological condition design for the dynamic calculation of water environmental capacity (WEC) in Huntai River Watershed [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(3): 75-80. (in Chinese))
- [4] 张万顺, 李琳, 彭虹, 等. 面向水环境改善的城市河网动态水环境容量研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 167-175. (ZHANG Wanshun, LI Lin, PENG Hong, et al. Dynamic water environment capacity of urban river network for water environment improvement [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 167-175. (in Chinese))
- [5] 张秀菊, 王宝斌, 徐小溪, 等. 动态水环境容量研究: 以潇河流域为例[J]. 中国农村水利水电, 2022(2): 20-26. (ZHANG Xiuju, WANG Baobin, XU Xiaoxi, et al. Research on dynamic water environment capacity: taking Xiaohe River Basin as an example [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(2): 20-26. (in Chinese))
- [6] 范丽丽, 沙海飞, 逢勇. 太湖湖体水环境容量计算[J]. 湖泊科学, 2012, 24(5): 693-697. (FAN Lili, SHA Haifei, PANG Yong. Water environmental capacity of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(5): 693-697. (in Chinese))
- [7] 马广文, 王圣瑞, 王业耀, 等. 鄱阳湖流域面源污染负荷模拟与氮和磷时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1285-1291. (MA Guangwen, WANG Shengrui, WANG Yeyao, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorus and diffuse source pollution load simulation of Poyang Lake Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(5): 1285-1291. (in Chinese))
- [8] 王雁, 高俊峰, 刘正文, 等. 潼湖流域污染负荷与水环境容量[J]. 湿地科学, 2016, 14(3): 354-360. (WANG Yan, GAO Junfeng, LIU Zhengwen, et al. Pollution load and environment capacity in Tonghu Lake Basin [J]. Wetland Science, 2016, 14(3): 354-360. (in Chinese))
- [9] 郭琦, 尹娟, 邱小琮, 等. 银川市阅海湖水环境容量评估[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 290-294. (GUO Qi, YIN Juan, QIU Xiaocong, et al. Water environmental capacity assessment of Yuehai Lake in Yinchuan City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 290-294. (in Chinese))
- [10] 张萌, 祝国荣, 周慜, 等. 仙女湖富营养化特征与水环境容量核算[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8): 1395-1404. (ZHANG Meng, ZHU Guorong, ZHOU Min, et al. Eutrophication assessment and estimation of water environmental capacity in Lake Xiannv of Jiangxi [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(8): 1395-1404. (in Chinese))
- [11] 杨玉麟, 李俊峰, 刘伟伟, 等. 基于 SMS 水质模型的蘑菇湖水环境容量分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 127-137. (YANG Yulin, LI Junfeng, LIU Weiwei, et al. Water environmental capacity analysis of Moguhu Reservoir based on SMS water quality model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 127-137. (in Chinese))
- [12] 雷兴碧, 吴岳玲, 邱小琮, 等. 星海湖水环境容量研究[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(3): 34-38. (LEI Xingbi, WU Yueling, QIU Xiaocong, et al. Water environmental capacity assessment of Xinghai Lake [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2020, 32(3): 34-38. (in Chinese))
- [13] LI Daming, BU Shilong, LI Qichen, et al. Water environment capacity estimation and pollutant reduction of Yanghe Reservoir Basin in Hebei Province, China, via 0-D water quality model [J]. Environmental Earth Sciences, 2022, 81(17): 428.
- [14] 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, 2021, 21(3): 69-71. (WANG Chen, YI Xuenong, LI Chihong, et al. Calculation and application of lake water environmental capacity based on hydrodynamic water quality model [J]. China Water Transport, 2021, 21(3): 69-71. (in Chinese))
- [15] 王万宾, 管堂珍, 梁启斌, 等. 杞麓湖流域污染负荷及水环境容量估算研究[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(11): 1436-1442. (WANG Wanbin, GUAN Tangzhen, LIANG Qibin, et al. Study on the estimation of pollution loads and water environmental capacity in Qilu Lake watershed [J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(11): 1436-1442. (in Chinese))
- [16] 卢俊平, 马太玲, 刘廷玺, 等. 京蒙沙源区水库大气磷干、湿沉降污染特征[J]. 湖泊科学, 2017, 29(1): 127-134. (LU Junping, MA Tailong, LIU Tingxi, et al. Pollution characteristics of atmospheric dry and wet phosphorus deposition on a reservoir in sand source areas of Beijing-Inner Mongolia [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(1): 127-134. (in Chinese))

- rainfall in a gaining stream [J]. *Water Resources Management*, 2020, 34(15):4617-4631.
- [63] LIANG Dong, SONG Jinxi, XIA Jun, et al. Effects of heavy metals and hyporheic exchange on microbial community structure and functions in hyporheic zone [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 303:114201.
- [64] 朱静思, 束龙仓, 鲁程鹏. 基于热追踪方法的河道垂向潜流通量的非均质性研究 [J]. *水利学报*, 2013, 44(7): 818-825. (ZHU Jingsi, SHU Longcang, LU Chengpeng. Study on the heterogeneity of vertical hyporheic flux using a heat tracing method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(7): 818-825. (in Chinese))
- [65] ZHENG Lizhi, CARDENAS M B, WANG Lichun. Temperature effects on nitrogen cycling and nitrate removal-production efficiency in bed form-induced hyporheic zones [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(4):1086-1103.
- [66] LIU Dongsheng, ZHAO Jian, CHEN Xiaobing, et al. Dynamic processes of hyporheic exchange and temperature distribution in the riparian zone in response to dam-induced water fluctuations [J]. *Geosciences Journal*, 2018, 22(3):465-475.
- [67] 姬雨雨, 施文卿, 陈求稳, 等. 库区洲滩潜流带温度示踪流速计算方法 [J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3):159-163. (JI Yuyu, SHI Wenqing, CHEN Qiuwen, et al. Calculation method of temperature tracing velocity in the hyporheic zone of the reservoir continent beach [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(3):159-163. (in Chinese))
- [68] WALLACE C D, SAWYER A H, BARNES R T, et al. A model analysis of the tidal engine that drives nitrogen cycling in coastal riparian aquifers [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(4):e2019WR025662.
- [69] DWIVEDI D, STEEFEL C I, ARORA B, et al. Geochemical exports to river from the intramander hyporheic zone under transient hydrologic conditions: East River Mountainous Watershed, Colorado [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(10):8456-8477.
- [70] 刘毅, 陈吉宁, 杜鹏飞. 环境模型参数识别与不确定性分析 [J]. *环境科学*, 2002, 23(6):6-10. (LIU Yi, CHEN Jining, DU Pengfei. Parameters identification and uncertainty analysis for environmental model [J]. *Environmental Science*, 2002, 23(6):6-10. (in Chinese))
- [71] 陈孝兵, 郑春阳, 袁越. 河床沉积物非均质性影响下的潜流交换数值模拟 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(2):220-229. (CHEN Xiaobing, ZHENG Chunyang, YUAN Yue. Modeling the impacts of streambed sediment heterogeneity on hyporheic exchange [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(2):220-229. (in Chinese))
- [72] MENDOZA-LERA C, DATRY T. Relating hydraulic conductivity and hyporheic zone biogeochemical processing to conserve and restore river ecosystem services [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579:1815-1821.
- [73] LIU Yajing, LIU Yong, LUO Qiankun, et al. Experimental and numerical study of bimolecular reactive transport in a single rough-wall fracture [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 594:125944.
- [74] WU Qiaofeng, LIU Shuguang, CAI Yi, et al. Improvement of hydrological model calibration by selecting multiple parameter ranges [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(1):393-407.
- (收稿日期:2022-01-25 编辑:熊水斌)

(上接第 180 页)

- [17] 张万顺, 李琳, 彭虹, 等. 面向水环境改善的城市河网动态水环境容量 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(1):167-175. (ZHANG Wanshun, LI Lin, PENG Hong, et al. Dynamic water environment capacity of urban river network for water environment improvement [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1):167-175. (in Chinese))
- [18] 门宝辉, 牛晓赞, 刘灿均, 等. 滦河承德段水环境容量计算及初始分配 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(2):168-175. (MEN Baohui, NIU Xiaoyun, LIU Canjun, et al. Calculation and initial allocation of water environmental capacity in Chengde section of Luanhe River [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(2):168-175. (in Chinese))
- [19] 陈丽娜, 韩龙喜, 谈俊益, 等. 基于多断面水质达标的河网区点面源污染负荷优化分配模型 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(6):128-134. (CHEN Li'na, HAN Longxi, TAN Junyi, et al. Optimal allocation model of point and non-point pollution loads in river network based on water quality standard of multiple control sections [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(6):128-134. (in Chinese))
- [20] 张婷, 高雅, 李建柱, 等. 流域非点源氮磷污染负荷分布模拟 [J]. *渤海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1):42-49. (ZHANG Ting, GAO Ya, LI Jianzhu, et al. Distribution simulation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(1):42-49. (in Chinese))
- (投稿日期:2021-11-08 编辑:施业)