

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkj.2022.0037

陶洁,李行,左其亭. 湖泊生态需水计算方法比较及实例应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(2):365-374. TAO J, LI H, ZUO Q T. Comparison and application of calculation methods for ecological water demand of lakes[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(2):365-374. (in Chinese)

湖泊生态需水计算方法比较及实例应用

陶洁^{1,2,3},李行¹,左其亭^{1,2,3,4}

(1. 郑州大学水利科学与工程学院,郑州 450001;2. 郑州大学黄河生态保护与区域协调发展研究院,郑州 450001;
3. 郑州市水资源与水环境重点实验室,郑州 450001;4. 河南省地下水污染防治与修复重点实验室,郑州 450001)

摘要:归纳湖泊生态需水的相关概念、分类和组成,利用 CiteSpace 软件分析近 20 年国内外相关研究进展,发现其主要集中在水文学角度与生态学角度 2 个方面,故从这 2 个角度总结湖泊生态需水计算方法。其中:水文学方法主要考虑湖泊长序列水文要素,具体有最低水位法、水量平衡法和换水周期法等;生态学方法多同时考虑湖泊生态和水文要素,具体有曲线相关法、生态演变分析法和功能法等。不同方法的主要原理、适用性各有不同。以太湖为例,选择最低水位法、换水周期法和生态演变分析法 3 种方法进行实际应用与结果比较,得到太湖生态需水分别为 36.01 亿、27.14 亿和 38.81 亿 m^3 。综合比较分析后,认为生态演变分析法在计算过程中同时考虑了水文与生物状况,计算结果最合理,故最终确定太湖湖泊最小生态需水为 38.81 亿 m^3 。该研究为系统了解并合理选择湖泊生态需水计算方法,开展湖泊生态保护修复与高质量发展提供支持。

关键词:湖泊生态需水;计算方法;CiteSpace;最低生态水位;生态演变分析法;太湖

中图分类号:X143;TV213.4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



水生态系统问题自 20 世纪 60 年代开始逐渐引起国内外专家学者^[1-5]的广泛关注,然而生态需水研究大多还是集中在河流。湖泊作为水生态系统的重要组成部分,分析确定其生态需水对河湖健康及生态文明建设具有显著意义。部分学者也针对湖泊生态需水展开研究。例如:Abbaspour 等^[6]基于水量-水质-水生生物相互关系计算了 Urmia 湖的生态需水量;贺新春等^[7]引入防洪、水质和景观水位等控制要素,构建了城市湖泊需水量模型;许文杰等^[8]考虑生态需水的时空特性与湖泊功能要求,探讨了基于水量水质耦合关系和阈值的湖泊生态需水计算方法;张华等^[9]基于水量平衡原理建立了极端干旱区东居延海湖生态需水模型;Sajedipour 等^[10]根据大火烈鸟数量与 Bakhtegan 湖表面积之间的相关关系确定了湖泊生态需水量;何山等^[11]分析计算了不同

水位时期有利于湖泊生物多样性的白洋淀生态需水量,并根据改进的马尔可夫链模型确定生态需水保障程度。

总体来看,目前湖泊生态需水研究多偏向于综合考虑不同水文条件、水质因素与生物状况,但还是存在需水构成分析不明晰、计算方法比较分散、缺少较统一的分类体系等问题。本文系统梳理基于不同原理的湖泊生态需水计算方法,并以太湖为例,进行不同计算方法的实际应用与比较。

1 湖泊生态需水的概念与构成

1.1 湖泊生态需水概念

生态需水属于生态学与水文学的交叉范畴。针对不同的研究对象,其定义有很多^[12-18]。针对湖泊生态需水,也有部分专家学者专门对其概念进行了

收稿日期:2021-02-27 修回日期:2021-09-12 网络出版时间:2021-09-22

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210922.0743.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(51709238)

作者简介:陶洁(1986—),女,江苏盐城人,副教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:taojie2015@zzu.edu.cn

通信作者:左其亭(1967—),男,河南固始人,教授,博士,博士生导师,主要从事水文学水资源研究。E-mail:zuoqt@zzu.edu.cn

探讨与研究。例如:崔保山等^[19]认为湖泊需要一定质量的水来维持湖泊水资源功能正常与生物多样性,所需的最小水量即为湖泊最小生态需水量;刘静玲等^[20]认为在某一特定阶段内,湖泊若要保障生态系统发挥正常功能,则需要一定质量和数量的水;Krishnani 等^[21]认为湖泊水量低于某一值是其生态系统功能丧失和结构破坏的关键因素,且只有在满足人类生存发展和生态环境稳定的基础上,湖泊才是健康的。可见,虽然这些定义的表达不尽不同,但都指出了是满足生态系统结构与功能稳定的临界水量,具有明显的时空异质性、水质水量一致性、功能差异性和阈值性。

近年来河湖生态需水与人类活动的联系愈来愈密切,考虑我国城市化进程与湖泊生态环境现状,湖泊生态需水的定义需要符合时代背景。因此,基于前人成果,并引申左其亭等^[22]在《现代水文学》中生态需水的定义,本文将湖泊生态需水理解为“在特定区域、时段和条件下,湖泊生态系统为达到某一水平所需的水资源量”。

1.2 湖泊主要分类与湖泊生态需水组成

湖泊有多种形态分类方法^[23-24]:按照湖泊成因,可分为天然湖泊和人工湖泊;按进出水流情况,可分为闭口湖、外流湖和吞吐湖。其中:闭口湖是指有水量流入但无水量流出的湖泊;外流湖有水量流出,但无水量流入;吞吐湖则既有水量流入,也有水量流出。

一般湖泊多为吞吐湖^[25],其生态需水组成主要包括入湖、湖区、出湖 3 部分,见图 1。其中:入湖生态需水是指为了满足湖区和出湖生态需水而必须对湖泊补充的水量;湖区生态需水量是为了保持湖泊水位、保证生物基本生境而必需的水量;出湖生态需水是为了完成湖泊水量自我更新及满足下游河道生态需水所需的水量。这 3 部分构成了湖泊生态需水

的有机整体。湖泊水量一部分用于蒸发、渗漏和人类活动用水等水循环过程,一部分为满足下游河道生态需求而流出湖泊。同时上游地表径流、地下径流、降雨等水资源进入湖泊,补充了湖泊水量,保持湖泊水量平衡。

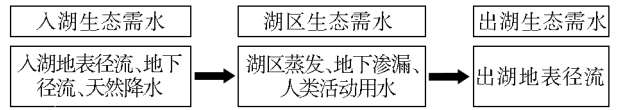


图 1 一般湖泊生态需水组成

Fig. 1 The composition of ecological water demand of general lakes

2 湖泊生态需水研究现状分析

采用 CiteSpace 文献可视化分析软件^[26]在中国知网和 Web of Science 核心数据集搜索关键词对湖泊生态需水研究现状进行统计分析。时间跨度截止到 2020 年,其中中英文关键词有“湖泊生态需水”“湖泊生态流量”“湖泊生态环境需水”“Lake Ecological Water Demand”“Lake Ecological Water Resource”,并考虑大小写、各种词性变形。

通过国内外文献关键词共现分析图谱(图 2)分析可知,国内研究多侧重从水文与水生生物角度,主要关键词有“水生生物栖息地”“生态水位”“景观水位”“水量平衡”“功能法”等,在鄱阳湖、扎龙湿地、东居延海湖等湖泊都进行了实际应用研究。相较而言,国外的研究方向更加多元化,在水质、气候变化、水生生物等方面均有所涉及,主要关键词有“eutrophication(富营养化)”“climate change(气候变化)”“water quality(水质)”“management(管理)”“sediment(沉积物)”“conservation(保护)”等。综合来看,目前针对湖泊生态需水研究方法虽然仍较分散,但主要集中在从水文学角度与生态学角度 2 个方面,在计算生态需水时主要考虑湖泊水位、出入湖水量以及湖泊水生生物等因素。



图 2 国内外文献关键词共现分析图谱

Fig. 2 Co-occurrence analysis of keywords in domestic and foreign literatures

3 湖泊生态需水计算方法总结

3.1 基于水文学的计算方法

最低水位法。该方法通过确定湖泊最低生态水位来确定湖泊最小生态需水,公式为

$$W_{\min} = (H_{\min} - H) \times S \quad (1)$$

表1 湖泊最低生态水位常用的计算方法、主要原理与数据要求

Tab. 1 Commonly used methods, main principle and data requirement for calculating the lowest ecological water level of lakes

方法	公式	主要原理及数据要求
湖泊形态分析法 ^[27]	$S = f(h); \frac{\partial^2 S}{\partial h^2} = 0$	建立水位与湖泊水面面积变化率(dS/dh)的关系曲线, dS/dh 在枯水期低水位附近最大值对应的水位即为湖泊最低生态水位
天然水位资料统计法 ^[28]	$H_{\min} = \min(H_{\min,1}, \dots, H_{\min,i}, \dots, H_{\min,n})$	选取年内日(月)均最低水位,参考流量历时曲线法,水位系列资料长度不少于20 a
最低年平均水位法 ^[29]	$H_{\min} = \lambda \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n}$	参考河流最枯月平均流量法,确定历年最低水位均值, λ 反映了该均值与 H_{\min} 的接近程度,可通过水文统计法等确定
年保证率设定法 ^[29]	$H_{\min} = \lambda \bar{H}$	排序历年月最低水位,统计得到不同保证率(50%、75%、95%)的年平均水位

注: S 为湖泊水面面积, m^2 ; h 为湖泊水位, m ; $H_{\min,i}$ 为第 i 年最小日(月)均水位, m ; n 为统计年数, a ; λ 为权重; H_i 为年最低水位, m ; \bar{H} 为年平均水位, m 。

水量平衡法。根据水量平衡原理^[30],天然状态吞吐湖任意时段的水量平衡方程为

$$\Delta W = (P + R_i) - (E + R_f) \pm \Delta W_g \quad (2)$$

式中: ΔW 为湖泊蓄水量的变化量, m^3 ; R_i 、 R_f 分别为地表入湖水量与出湖水量, m^3 ; P 为降雨量, m^3 ; E 为蒸发量, m^3 ; ΔW_g 为地下水变化量(包括出入湖流量), m^3 。

如果研究对象是闭口湖,则不考虑出湖流量;如果研究对象是外流湖,则不考虑地表径流入湖流量;方程(2)可分别简化为方程(3)、(4)。

$$\Delta W = P + R_i - E \pm \Delta W_g \quad (3)$$

$$\Delta W = P - E - R_f \pm \Delta W_g \quad (4)$$

假设湖体水量变化量为零,此时湖泊生态需水等于湖区生态需水量^[27]。天然状态下湖区生态需水量等于湖区蒸发量与渗漏量之和再减去湖区降水量。当遇到蒸发量大或降雨量较少时,可近似取蒸发量作为湖区生态需水量。蒸发量可根据湖泊植物分布情况,通过水面蒸发观测值、不同植物蒸散发量和耗水量观测资料计算得到。

当湖泊受人类活动影响较大时,原有的水量平衡都会被打破并产生新的水量平衡,此时 ΔW 需考虑人类取水。在缺水且人口密集的地区,需水明显大于供给, ΔW 经常是负值,此时需考虑人工补充入湖水量。

换水周期法。换水周期^[31]是指水量吐纳更新1

式中: W_{\min} 为湖泊最小生态需水量, m^3 ; H_{\min} 为最低生态水位, m ; H 为湖底高程, m ; S 为湖泊水面面积, m^2 。

湖泊最低生态水位是指保障湖泊生态系统健康的最低水位,表1统计了湖泊最低生态水位的常用计算方法、主要原理与数据要求。

次所需的时间。湖泊最小生态需水可根据换水周期计算得到,公式为

$$W_{\min} = \frac{W_k}{D} \times T \quad (5)$$

$$T = \frac{W}{W_0} \times 365 \text{ 或 } T = \frac{W}{Q} \quad (6)$$

式中: W_k 为枯水期出湖水量, m^3 ; D 为全年总天数, d ; T 为换水周期, d ; W 为年蓄水量, m^3 ; W_0 为年出湖水量, m^3 ; Q 为多年平均出湖流量, m^3/s 。

该方法中换水周期是整体平均交换时间,且可以通过控制出湖水量和流速来改变,因此该方法也常用于湖泊的健康管理。但对于干旱或半干旱区湖泊来说,湖泊来水量较小,换水导致湖泊水量不足,从而引起生态环境恶化,此时该方法不太适用。

3.2 基于生态学的计算方法

曲线相关法。当湖泊水量发生较大变化时,湖泊生态系统功能也会产生影响,故可根据湖泊实况选取适宜的生态功能指标,如水质、水生生物等。通过收集指标历史数据和相应年的湖泊最小水量,拟合水量与所选指标的相关曲线。拟合曲线上的拐点所在位置表示其对应的湖泊生态功能发生显著变化,可认为该点对应水量即是湖泊最小生态需水量。若存在多个拐点,则可取所有拐点对应水量的平均值作为湖泊最小生态需水,公式为

$$W_{\min} = \frac{\sum_{j=1}^J V_j}{J} \quad (7)$$

式中: V_j 为第 j 个拐点对应的水量, m^3 ; J 为拐点数量, 个。

若选择的生态功能指标不止 1 个, 则可针对每个指标建立拟合关系曲线。根据最大值原则, 选取不同指标计算结果的最大值作为该湖泊最小生态需水量的标准值。

生态演变分析法。由于湖泊生态系统的复杂性, 实际研究中部分湖泊缺乏足够监测资料, 无法建立水量指标与生态系统功能指标的定量关系, 此时曲线相关法不再适用, 故可从水量与湖泊的生态演变关系角度来计算湖泊生态需水。

随着湖泊水量的不断减少, 湖泊生态系统大致经历了 3 个时期^[32]: 高产期, 湖泊生态结构稳定, 功能正常; 稳定期, 在干旱缺水或人类干扰等情况下, 湖泊水量小幅变化, 水生物种生长繁殖受一定影响, 但关键物种仍然存在, 能够满足基本需求; 退化期, 湖泊水量显著变化, 水生物种明显减少, 湖泊生态健康遭受显著破坏。

生态演变分析法, 也叫生物空间需求法。该方法通过构建指标集(如水深、水温、流量、水质等)来选择生物生存空间指标, 多选择水深指标。根据现有资料或实时监测数据确定某物种生存所需的最小水深 H_1 , 再加上湖底高程即为最低生态水位, 低于该水位则认为湖泊生态系统进入退化期。若分析 x 个物种, 则在得到的 x 个生态水位中选择最大值作为湖泊最低生态水位, 公式为

$$H_{\min} = \max(H_{\min,1}, H_{\min,2}, \dots, H_{\min,a}, \dots, H_{\min,x}), \quad a=1, 2, \dots, x \quad (8)$$

表 3 湖泊生态需水不同计算方法比较

Tab. 3 Comparison of different calculation methods of lake ecological water demand

分类	方法	主要原理	主要优点或局限性
基于水文学的计算方法	最低水位法	通过确定湖泊最低生态水位来确定湖泊最小生态需水	数据易获取, 使用简便, 可用于干旱缺水区域的湖泊, 但多只利用天然水位资料, 缺乏对湖泊生物状况的考虑
	水量平衡法	根据水量平衡原理, 通过确定湖泊水体变化量来确定湖泊最小生态需水	原理清晰, 能较好表述湖泊水循环过程及各要素关系, 适用范围广
	换水周期法	根据湖泊换水周期和枯水期出湖水量来确定湖泊最小生态需水	计算简便, 但换水周期易受人类活动影响, 计算结果可能较实际存在偏差
基于生态学的计算方法	曲线相关法	建立湖泊水量与所选生态功能指标的拟合关系曲线, 确定曲线上的拐点	计算较简单, 但针对所选生态功能指标, 需获取长序列监测资料, 且拟合曲线易受所选指标影响
	生态演变分析法	通过确定湖泊内重要物种在生态演变过程中所需的生态水位, 进而确定湖泊生态需水	计算较简单, 综合考虑了湖泊生物因素与水文因素, 但需要处理湖泊不同物种生存需求间的矛盾
	功能法	通过确定维持湖泊不同功能的生态需水, 进而确定整个湖泊生态需水	较全面考虑了湖泊水资源功能, 适用于特定区域湖泊的生态修复与水资源管理, 但部分功能缺少统一评价标准, 在实际计算中可能存在重复部分

式中: x 为湖泊内重要生物种类数量, 个; $H_{\min,a}$ 为第 a 种生物所需的湖泊最低生态水位, m 。

同理可确定物种生存所需的适宜水深 H_2 , 再加上湖底高程即为湖泊适宜生态水位, 高于该水位时, 认为湖泊生态系统进入高产期。根据最低水位法, 可分别计算得到湖泊最小生态需水和适宜生态需水。

功能法。功能法从水资源功能与水量关系出发, 确定某湖泊水资源所具备的不同功能, 通过确定维持不同功能的生态需水, 进而估算整个湖泊的生态需水量, 公式为

$$W_{\min} = \frac{\sum_{z=1}^Z U_z W_z}{Z} \quad (9)$$

式中: W_z 为满足湖泊第 z 个水资源功能所需的最小生态需水量, m^3 ; Z 为湖泊水资源功能数, 个; U_z 为湖泊第 z 个水资源功能权重, $U_1 + U_2 + \dots + U_z = 1$ 。

湖泊水资源主要功能见表 2, 不同功能计算方法参考文献[20]。

表 2 湖泊水资源的主要功能

Tab. 2 Main functions of lake water resources

类型	主要功能
环境功能	防止水体盐碱化和水质富营养化、构成湖泊景观、自净水体、调节径流、防洪防旱等
生态功能	调节气候、为水生生物提供适宜生境、物质循环与自我调节等
生产功能	农业灌溉、工业生产、发电、航运、水产养殖、居民生活用水、娱乐功能等

3.3 不同方法比较

比较上述计算方法, 总结其适用性, 见表 3。

4 湖泊生态需水计算方法实际应用与比较

4.1 研究区概况与数据

太湖是我国五大淡水湖之一,位于长江三角洲腹地。湖泊水域面积为 2 338.1 km²,多年平均水位 3.21 m,蓄水量 49.56 亿 m³[33]。太湖自然条件优越,生态环境资源丰富,对维持自身乃至整个太湖流域生态平衡都具有重要作用。但是随着流域经济社会发展,水资源供需矛盾日益突出,太湖水污染现象被高度关注,水治理形势愈发复杂严峻,且人为的水利工程造成湖泊水体流动加快、换水周期缩短、水位逐渐抬升,有可能引起新的生态环境风险[34-35]。因此,面对太湖生态环境治理新形势,研究其生态需水就显得尤为重要。

根据太湖历年相关水资源公报、健康状况报告、水情年(月)报以及环太湖水文站点实测资料,获取了

太湖 1986—2019 年逐日径流量与水位数据、2004—2019 年出入湖水量,以及 2008—2016 年银鱼、2013—2017 年沉水植物和挺水植物、2007—2008 年底栖动物采样数据。由于太湖受人类活动影响明显,故综合资料收集情况,选择最低水位法、换水周期法和生态演变分析法进行太湖生态需水计算分析。同时为便于 3 种方法结果的对比性,故不考虑湖泊面积与水下地形变化,相关数据均采用平均值计算。

4.2 结果与分析

最低水位法计算结果。根据 1986—2019 年的太湖日水位数据,绘制太湖水位变化见图 3。选择 95% 保证率下的年最低水位作为太湖最低生态水位,即 $H_{\min}=2.64$ m。已知太湖多年平均湖底高程 $H=1.1$ m,平均湖面面积 $F=2\ 338.1$ km²,利用式(1)计算得到太湖年最小生态需水量 $W_{\min}=36.01$ 亿 m³。

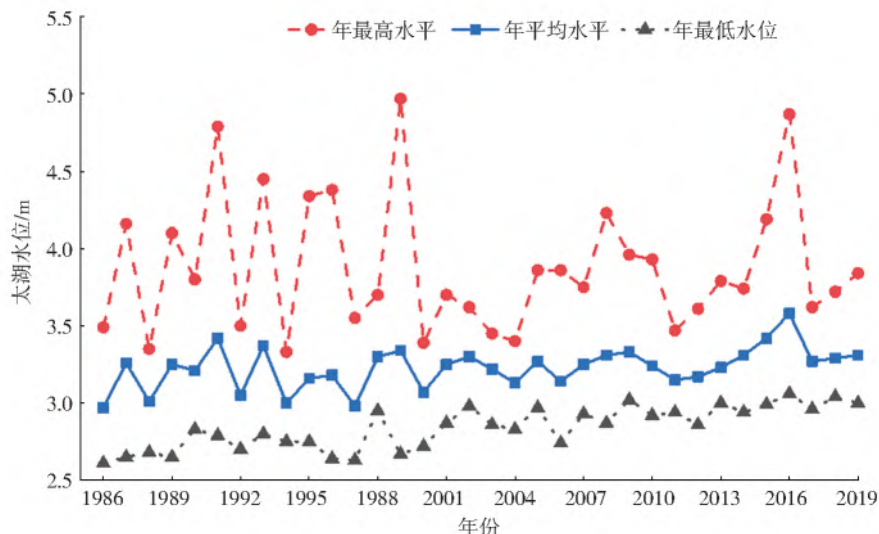


图 3 太湖 1986—2019 年水位变化

Fig. 3 Water level changes in Taihu Lake from 1986 to 2019

换水周期法计算结果。根据 2004—2019 年环太湖水文巡测统计资料,确定多年平均出湖水量为 99.56 亿 m³,其中枯水期(10 月—次年 3 月)平均出湖水量 53.86 亿 m³,其变化与入湖水量变化基本一致,且 2000 年以来呈现逐步增加的趋势。根据式(5)、(6)计算得到太湖多年平均换水周期为 182 d,年平均生态需水 26.86 亿 m³。

生态演变分析法计算结果。银鱼是太湖最具代表性的鱼类之一,只有水深在 1.5 m 以上时才适宜银鱼生存[36]。综合对比其他水生生物适宜水深(底栖动物优势物种河蚬的适宜水深为 1.3~2.2 m,马来眼子菜等沉水植物生长适宜水深为 1.1~1.7 m,芦苇等挺水植物生长适宜水深 1.3~2.2 m),最终选择银鱼作为太湖指示生物。考虑到每年 4—10

月是银鱼生长的关键期,分析多年水位资料得到 90% 保证率下太湖 4—10 月内最低月平均水位为 2.76 m,故最终确定该水位作为太湖生态水位,再根据最低水位法计算公式得到太湖年生态需水 38.81 亿 m³。

计算结果比较分析。在 3 种方法计算结果中,生态演变分析法计算结果最大,最低水位法计算结果与其较为接近,而换水周期法计算结果最小,且与另 2 种方法结果相差较大。

换水周期法计算结果主要受换水周期影响。将本次计算的换水周期与文献[37-39]研究结果进行比较,可知受出入湖水量影响,太湖换水周期呈缩短趋势(1982—2010 年太湖平均换水周期为 192 d,而 2004—2019 年为 182 d,2010—2018 年为 154.36 d)。

主要原因是引江济太工程实施后,太湖流域水资源向周边河网扩散的速度加快,年出入湖水量增加,换水周期明显缩短,故计算的太湖生态需水量可能较实际偏小。

最低水位法由于不考虑湖泊面积与水下地形变化,故计算结果主要受水位影响。根据图 4 可知,太湖年最低水位总体呈上升趋势。对比文献[35,42]研究结果,1986—1999 年太湖水位波动较大,主要是受流域降水丰枯变化影响。2000 年以后,流域基本上属于平水或枯水年份,但太湖最低水位不仅没有随之降低,反而逐渐升高。2000—2018 年太湖最低水位明显高于 1986—1999 年。根据文献[40-41]以及太湖流域水情年报可知,2000 年以后太湖水位变化主要受人类活动影响导致,流域内大规模引水及土地利用变化等活动,不仅补充了枯水期的湖泊

水量,造成水位抬升,还改变了最低水位在年内出现时间的季节性规律,破坏了水文资料的一致性和代表性。因此,在确定湖泊最低生态水位时不能仅考虑水文资料。

与前 2 种方法不同,生态演变分析法主要考虑了太湖生物状况,在计算时选择银鱼生存水深作为太湖生物生存空间指标,结合文献[43-45]的主要研究结果,并与收集的水生植被、底栖生物等生物资料进行比较后,发现 1.5~1.7 m 的水深能满足太湖大部分水生生物的生存需求,认为银鱼作为太湖指示物种的代表性较好。再根据太湖天然水位资料,经过综合分析后确定了最低生态水位。对比 3 种计算方法,综合分析后认为生态演变分析法计算结果最为合理,故最终确定太湖年最小生态需水为 38.81 亿 m^3 。所比较的与太湖生态需水相关研究见表 4。

表 4 与太湖生态需水相关研究成果的比较

Tab. 4 Comparison with other research on ecological water demand of Taihu Lake

方法	作者	发表时间	相关研究结果或结论
换水周期法	王洗民等 ^[37]	2016	1982—2010 年太湖平均换水周期为 192 d,2010 年现状条件下太湖适宜换水周期为 150~160 d
	卞锦宇等 ^[38]	2020	引江济太工程加速了太湖水体置换,换水周期从原来的 309 d 缩短至 250 d 以下
	林鹏等 ^[39]	2020	太湖年出入湖水量呈增加趋势,换水周期呈递减趋势,2010—2018 年平均换水周期为 154.36 d
最低水位法	申金玉等 ^[40]	2011	2002—2007 年引江济太工程净入湖 51.5 亿 m^3 ,抬高了太湖水位,出湖水量增加
	王磊之等 ^[41]	2016	2000—2013 年太湖年最低水位均值达到 2.90 m;引江济太工程等人类活动是水位变化较大主导因素
	季海萍等 ^[35]	2019	1986—2017 年多年平均环太湖出湖水量 94.68 亿 m^3 ,年出湖水量呈增加趋势,年平均水位和最低水位呈上涨趋势
	盛昱凤等 ^[42]	2021	1960—2018 年太湖水位整体呈现上升趋势,极值水位波动幅度较强
生态演变分析法	许浩等 ^[43]	2015	大型底栖生物主要分布在太湖湖心与西南部敞水区,受水体营养水平影响较大
	徐德瑞等 ^[44]	2020	2013—2017 太湖沉水植物平均生存水深为 1.57 m,其中,最小值 1.38 m,最大值 1.90 m
	刘倩等 ^[45]	2020	太湖高等水生植物主要分布在东部、南部及北部,生存水深多在 1.1~1.8 m

5 结论与建议

通过对目前湖泊生态需水计算方法的系统梳理与总结,并以太湖为例对计算方法进行实际应用后,得到如下结论:

目前湖泊生态需水计算方法主要集中在从水文学角度与生态学角度 2 个方面。不同方法的计算原理和适用范围各有不同。其中:水文学计算方法主要包括最低水位法、水量平衡法和换水周期法等;生态学计算方法主要包括曲线相关法、生态演变分析法和功能法等。

通过最低水位法、换水周期法和生态演变分析

法等方法开展太湖生态需水实例计算,并与太湖已有相关研究成果进行比较,综合分析后认为生态演变分析法较能反映更客观的生态系统内在关系和需求,因此确定太湖年最小生态需水选取生态演变分析法计算结果,即为 38.81 亿 m^3 。

目前湖泊生态需水计算方法大都是围绕某个指标或生态目标展开,建议未来需要更深入探索湖泊生态水文过程,加强基于河湖联系的生态需水研究,明确湖泊生态系统内生物之间及其与周围环境之间的影响机理,同时加强对基础资料的获取,探索并充分利用新技术,探索多学科融合的定量计算方法。

参考文献(References):

- [1] 倪晋仁,崔树彬,李天宏,等.论河流生态环境需水[J].水利学报,2002,9(9):14-19,26. (NI J R, CUI S B, LI T H, et al. On water demand of river ecosystem[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 9(9): 14-19, 26. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:SLXB. 0. 2002-09-002.
- [2] 王西琴,刘昌明,杨志峰.生态及环境需水量研究进展与前瞻[J].水科学进展,2002,13(4):507-514. (WANG X Q, LIU C M, YANG Z F. Research advance in ecological water demand and environmental water demand[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(4): 507-514. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2002. 04. 020.
- [3] SONG J X, XU Z X, LIU C M, et al. Ecological and environmental instream flow requirements for the Wei River: The largest tributary of the Yellow River[J]. Hydrological Processes, 2010, 21(8): 1066-1073. DOI: 10. 1002/hyp. 6287.
- [4] 孙甲岚,雷晓辉,蒋云钟,等.河流生态需水量研究综述[J].南水北调与水利科技,2012,10(1):112-115. (SUN J L, LEI X H, JIANG Y Z, et al. Review of research on river ecological water demand[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 112-115. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2012. 01112.
- [5] 李咏红,刘旭,李盼盼,等.基于不同保护目标的河道内生态需水量分析:以琉璃河湿地为例[J].生态学报,2018,38(12):4393-4403. (LI Y H, LIU X, LI P P, et al. Analysis of ecological water requirement of rivers for different purposes: The case of Liuli River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4393-4403. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201801300243.
- [6] ABBASPOUR M, NAZARIDOUST A. Determination of environmental water requirements of Lake Urmia, Iran: An ecological approach[J]. International Journal of Environmental Studies, 2007, 64(2): 161-169. DOI: 10. 1080/00207230701238416.
- [7] 贺新春,郑江丽,邵东国,等.城市湖泊生态环境需水研究[J].长江科学院院报,2008,25(6):38-42. (HE X C, ZHENG J L, SHAO D G, et al. Research of eco-environmental water demand of urban lake[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(6): 38-42. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-5485. 2008. 06. 009.
- [8] 许文杰,曹升乐.城市湖泊生态环境需水量计算方法研究:以东昌湖为例[J].水力发电学报,2009,28(1):102-107. (XU W J, CAO S L. Calculation method of eco-environmental water demand of urban lake with an example of Dongchang Lake in Liaocheng City of China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(1): 102-107. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: SFXB. 0. 2009-01-019.
- [9] 张华,张兰,赵传燕.极端干旱区尾间湖生态需水估算:以东居延海为例[J].生态学报,2014,34(8):2102-2108. (ZHANG H, ZHANG L, ZHAO C Y. Ecological water requirement estimation of the rump lake in an extreme arid region of east Juyanhai[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 28(1): 102-107. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201306171720.
- [10] SAJEDIPOUR S, ZAREI H, ORYAN S. Estimation of environmental water requirements via an ecological approach: A case study of Bakhtegan Lake, Iran[J]. Ecological Engineering, 2017, 100: 246-255. DOI: 10. 1016/j. ecoleng. 2016. 12. 023.
- [11] 何山,尹心安,李浩,等.基于马尔可夫过程的湖泊生态需水保障不确定性研究[J].水生态学杂志,2020,41(5):13-20. (HE S, YIN X A, LI H, et al. Estimating the ecological water demand in lakes and the degree of certainty based on the Markov process[J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(5): 13-20. (in Chinese)) DOI: 10. 15928/j. 1674-3075. 2020. 05. 002.
- [12] LI L J, ZHENG H X. Environmental and ecological water requirement of river system: A case study of Haihe-Luanhe River system[J]. Journal of Geographical Sciences, 2001, 11(2): 99-105. DOI: 10. 1007/BF02888694.
- [13] 姜德娟,王会肖,李丽娟.生态环境需水量分类及计算方法综述[J].地理科学进展,2003,22(4):369-378. (JIANG D J, WANG H X, LI L J. A review on the classification and calculating methods of ecological and environmental water requirements[J]. Progress in Geography, 2003, 22(4): 369-378. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-6301. 2003. 04. 005.
- [14] 郑红星,刘昌明,丰华丽.生态需水的理论内涵探讨[J].水科学进展,2004,15(5):626-633. (ZHENG H X, LIU C M, FENG H L. On concepts of ecological water demand[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5): 626-633. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2004. 05. 016.
- [15] 崔瑛,张强,陈晓宏,等.生态需水理论与方法研究进展[J].湖泊科学,2010,22(4):465-480. (CUI Y, ZHANG Q, CHEN X H, et al. Advances in the theories and calculation methods of ecological water requirement[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(4): 465-480. (in Chinese)) DOI: 10. 18307/2010. 0401.

- [16] 孙栋元,杨俊,胡想全,等. 基于生态保护目标的疏勒河中游绿洲生态环境需水研究[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 1008-1020. (SUN D Y, YANG J, HU X Q, et al. Study on eco-environmental water requirement in the middle-reach oasis of Shulehe River basin based on ecological protection target[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(3): 1008-1020. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201508121696.
- [17] 岳东霞,陈冠光,朱敏翔,等. 近 20 年疏勒河流域生态承载力和生态需水研究[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5178-5187. (YUE D X, CHEN G G, ZHU M X, et al. Biocapacity and ecological water demand in Shule River basin over the past 20 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(14): 5178-5187. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201809141989.
- [18] 刘昌明,门宝辉,赵长森. 生态水文学:生态需水及其与流速因素的相互作用[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 765-774. (LIU C M, MEN B H, ZHAO C S. Eco-hydrology: Environmental flow and its driving factors[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 765-774. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2020. 05. 013.
- [19] 崔保山,赵翔,杨志峰. 基于生态水文学原理的湖泊最小生态需水量计算[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1788-1795. (CUI B S, ZHAO X, YANG Z F. Eco-hydrology-based calculation of the minimum ecological water requirement for lakes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1788-1795. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0933. 2005. 07. 036.
- [21] 刘静玲,杨志峰. 湖泊生态环境需水量计算方法研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(5): 604-609. (LIU J L, YANG Z F. A study on the calculation methods of the minimum eco-environmental water demand for lakes[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(5): 604-609. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-3037. 2002. 05. 011.
- [21] KRISHNANI K K, KATHIRAVAN V, NATARAJAN M, et al. Diversity of sulfur-oxidizing bacteria in greenwater system of coastal aquaculture[J]. *Applied Biochemistry & Biotechnology*, 2010, 162(5): 1225-1237. DOI: 10. 1007/s12010-009-8886-3.
- [22] 左其亭,王中根. 现代水文学[M]. 新 1 版. 北京:中国水利水电出版社, 2019. (ZUO Q T, WANG Z G. *Modern hydrology*[M]. New edition. Beijing: China Water Power Press, 2019. (in Chinese))
- [23] 姜加虎,王苏民. 中国湖泊分类系统研究[J]. 水科学进展, 1998, 9(2): 65-70. (JIANG J H, WANG S M. Study on the classified system of Chinese lakes[J]. *Advances in Water Science*, 1998, 9(2): 65-70. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: SKXJ. 0. 1998-02-010.
- [24] 刘蕾,臧淑英,邵田田,等. 基于遥感与 GIS 的中国湖泊形态分析[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(3): 92-98. (LIU L, ZANG S Y, SHAO T T, et al. Characterization of lake morphology in China using remote sensing and GIS[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2015, 27(3): 92-98. (in Chinese)) DOI: 10. 6046/gtzyyg. 2015. 03. 16.
- [25] 徐志侠,王浩,唐克旺,等. 吞吐型湖泊最小生态需水研究[J]. 资源科学, 2005, 27(3): 140-144. (XU Z X, WANG H, TANG K W. Minimum ecological water requirements for lakes taking in-sending out water[J]. *Resources Science*, 2005, 27(3): 140-144. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1007-7588. 2005. 03. 023.
- [26] NIAZI, MUAZ A. Review of "CiteSpace: A practical guide for mapping scientific literature" by Chaomei Chen[J]. *Complex Adaptive Systems Modeling*, 2016, 4(1): 23. DOI: 10. 1186/s40294-016-0036-5.
- [27] 李新虎,宋郁东,李岳坦,等. 湖泊最低生态水位计算方法研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(4): 526-530. (LI X H, SONG Y D, LI Y T, et al. Calculation methods of lowest ecological water level of lake[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(4): 526-530. (in Chinese)) DOI: 10. 13826/j. cnki. cn65-1103/x. 2007. 04. 010.
- [28] 徐志侠,陈敏建,董增川. 湖泊最低生态水位计算方法[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2324-2328. (XU Z X, CHEN M J, DONG Z C. Researches on the calculation methods of the lowest ecological water level of lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2324-2328. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0933. 2004. 10. 035.
- [29] 宁龙梅,王学雷. 洪湖湿地最低生态水位研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(3): 67-70. (NING L M, WANG X L. Research on the minimal ecological water level of Honghu wetland[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, 29(3): 67-70. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1671-4431. 2007. 03. 019.
- [30] 李文运,张伟,戈建民,等. 水量平衡分析方法及应用[J]. 水资源保护, 2011, 27(6): 83-87. (LI W Y, ZHANG W, GE J M, et al. Water balance analysis method and its application[J]. *Water Resources Protection*, 2011, 27(6): 83-87. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-6933. 2011. 06. 020.
- [31] 郭武,钱湛. 湖南湘阴东湖水生态流量及换水周期计算方法[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(9): 66-68, 96. (GUO W, QIAN Z. Aquatic ecology flow and changing water cycle calculation method for Dong

- Lake in Xiangyin, Hunan[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31(9): 66-68, 96. (in Chinese) DOI: 10. 14067/j. cnki. 1673-923x. 2011. 09. 003.
- [32] 张丽, 李丽娟, 梁丽乔, 等. 流域生态需水的理论及计算研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 307-313. (ZHANG L, LI L J, LIANG L Q. Progress on the research of theory and calculation method of ecological water requirement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(7): 307-313. (in Chinese) DOI: 10. 3321/j. issn: 1002-6819. 2008. 07. 064.
- [33] 戈礼宾, 潘彩英, 张泉荣, 等. 太湖水位资料系列分析与水位特征值计算[J]. 水资源研究, 2008, 29(4): 7-8. (GE L B, PAN C Y, ZHANG Q R, et al. Series analysis of water level data and calculation of water level characteristic value in Lake Taihu[J]. Journal of Water Resources Research, 2008, 29(4): 7-8. (in Chinese) DOI: CNKI; SUN; SZYY. 0. 2008-04-004.
- [34] 张运林, 秦伯强, 朱广伟. 过去 40 年太湖剧烈的湖泊物理环境变化及其潜在生态环境意义[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1348-1359. (ZHANG Y L, QIN B Q, ZHU G W. Long-term changes in physical environments and potential implications for the eco-environment of Lake Taihu in the past four decades[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1348-1359. (in Chinese) DOI: 10. 18307/2020. 0503.
- [35] 季海萍, 吴浩云, 吴娟. 1986—2017 年太湖出、入湖水量变化分析[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1525-1533. (JI H P, WU H Y, WU J. Variation of inflow and outflow of Lake Taihu in 1986-2017[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1525-1533. (in Chinese) DOI: 10. 18307/2019. 0612.
- [36] 朱成德. 太湖银鱼产量与水位关系的数理统计分析[J]. 淡水渔业, 1982(4): 40-42. (ZHU C D. Mathematical statistics analysis of the relationship between whitebait yield and water level in Taihu Lake[J]. Freshwater Fisheries, 1982(4): 40-42. (in Chinese))
- [37] 王洗民, 翟淑华, 张红举, 等. 基于水质改善目标的太湖适宜换水周期分析[J]. 湖泊科学, 2017, 29(1): 9-21. (WANG X M, ZHAI S H, ZHANG H J, et al. Research on appropriate hydraulic retention time on basis of water quality improvement of Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(1): 9-21. (in Chinese) DOI: 10. 18307/2017. 0102.
- [38] 卞锦宇, 宋轩, 耿雷华, 等. 太湖流域水资源承载力特征分析及评价研究[J]. 节水灌溉, 2020(1): 73-78, 83. (BIAN J Y, SONG X, GENG L H, et al. Feature analysis and evaluation of water resources carrying capacity in Taihu Lake basin[J]. Water Saving Irrigation, 2020(1): 73-78, 83. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-4929. 2020. 01. 016.
- [39] 林鹏, 陈启慧, 李琼芳, 等. 环太湖各水资源分区入湖水量及贡献分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 66-73. (LIN P, CHEN Q H, LI Q F, et al. Variations and contributions of inflow and outflow of water resources zones around Lake Taihu[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 66-73. (in Chinese) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2021. 03. 011.
- [40] 申金玉, 甘升伟, 陈润, 等. 环太湖出入湖水量影响因素分析及对策措施研究[J]. 水资源保护, 2011, 27(6): 48-52. (SHENG J Y, GAN S W, CHEN R, et al. Analysis of influencing factors of inflow and outflow around Taihu Lake and countermeasures[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(6): 48-52. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-6933. 2011. 06. 012.
- [41] 王磊之, 胡庆芳, 胡艳, 等. 1954—2013 年太湖水位特征要素变化及成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 13-19. (WANG L Z, HU Q F, HU Y, et al. Changes and cause analysis of water level characteristic factors in Taihu Lake during period from 1954 to 2013[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(1): 13-19. (in Chinese) DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2016. 01. 003.
- [42] 盛昱凤, 薛媛媛, 戚丽萍, 等. 1960 年以来太湖水位变化特征及影响因素分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 22-28. (SHENG Y F, XUE Y Y, QI L P, et al. Water level changes in Taihu Lake from 1960 and influencing factors[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(1): 22-28. (in Chinese) DOI: 10. 12202/j. 0476-0301. 2020441.
- [43] 许浩, 蔡永久, 汤祥明, 等. 太湖大型底栖动物群落结构与水环境生物评价[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 840-852. (XU H, CAI Y J, TANG X M, et al. Community structure of macrozoobenthos and the evaluation of water environment in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(5): 840-852. (in Chinese) DOI: 10. 18307/2015. 0510.
- [44] 徐德瑞, 周杰, 张建华, 等. 东太湖沉水植物现状及影响因子分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(4): 64-67, 94. (XU D R, ZHOU J, ZHANG J H, et al. Status of submerged plants and its influencing factors in east Lake Taihu[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(4): 64-67, 94. (in Chinese) DOI: CNKI; SUN; SD-NY. 0. 2020-04-016.
- [45] 刘倩, 李超, 徐军, 等. 太湖流域湖荡湿地水生植物的

分布特征[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 244-251.
(LIU Q, LI C, XU J, et al, Distribution characteristics
of aquatic plants in the watershed of Lake Taihu[J].

China Environmental Science, 2020, 40(1): 244-251. (in
Chinese)) DOI:CNKI:SUN:ZGHJ. 0. 2020-01-033.

Comparison and application of calculation methods for ecological water demand of lakes

TAO Jie^{1,2,3}, LI Hang¹, ZUO Qiting^{1,2,3,4}

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordination Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Zhengzhou Key Laboratory of Water Resource and Environment, Zhengzhou 450001, China; 4. Henan Key Laboratory of Groundwater Pollution Prevention and Rehabilitation, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Since the 1960s, the problem of ecological water demand has gradually attracted attention at home and abroad. The determination of the ecological water demand of lakes is of great significance to lake health and ecological civilization because of an important part of water ecosystem. Since the 21st century, many experts and scholars have also carried out relevant research on the ecological water demand of lakes. Most of the current studies focused on the comprehensive consideration of different hydrological conditions and ecological information, but there are still some problems, such as unclear classification of calculation methods. Therefore, it is necessary to study these methods.

Statistical analysis and generalization were used to summarize the concepts, classification, and composition related to the ecological water demand of lakes, and the key words of relevant domestic and foreign literature from 2001 to 2020 were visualized and analyzed by CiteSpace software. The methods of calculating ecological water demand of lakes based on both hydrological principle and ecological principle are summarized, and the applicability of different methods is compared. Finally, taking Taihu Lake as an example, three methods were selected to analyze the minimum ecological water demand, including the minimum water level method, the water exchange cycle method, and the ecological evolution analysis method.

It was summarized that lake ecological water demand is "the amount of water of lake ecosystem when it reaches a certain level in a specific area, time and condition". General lakes are mostly the lakes with water input and water output, whose ecological water demand mainly consists of ecological water demand in the lake and inlet and outlet ecological water demand. The keyword co-occurrence network diagrams were obtained, and the analysis shows that current studies of lake ecological water demand at home and abroad mainly focused on two aspects of hydrological principles and ecological principles. The calculation methods based on hydrological principles include minimum water level method, water quantity balance method, and water exchange cycle method, and the calculation methods based on ecological principles include curve correlation method, ecological evolution analysis method and functional method. The annual ecological water demand of Taihu Lake is 3.601 billion m³, 2.714 billion m³ and 3.881 billion m³ calculated by the lowest water level method, the water exchange cycle method and the ecological evolution analysis method, respectively. The results of the three methods have some deviations due to different calculation principles and focus. The water exchange period method are greatly affected by the water exchange period of the lake. The lowest water level method are limited by the lack of consistency and representativeness of the water level data of Taihu Lake. The ecological evolution analysis method considers both the hydrological and biological conditions, and its results are the most reasonable.

Different methods for lake ecological water demand have a different scope of application. The lowest water level method is suitable for lakes with long series of water level data. The water quantity balance method is mostly used in natural lakes with less human interference. The water change cycle method is not suitable for dry areas or small water storage conditions. The curve correlation method and the functional method both require enough ecological and hydrological data, and the functional method has a wider application. The ecological evolution analysis method focuses on the requirements of biological living space, which is suitable for some lakes lacking ecological data. Taking Taihu Lake as an example, through different calculation methods and comparison with other research results, it is believed that the result of the ecological evolution analysis method is the most reasonable, and the annual ecological water demand of Taihu Lake is finally determined to be 3.881 billion m³. This study provides support for the reasonable calculation of lake ecological water demand and the study of ecological protection, restoration, and high-quality development.

Key words: lake ecological water demand; calculation method; CiteSpace; lowest ecological water level; ecological evolution analysis method; Taihu Lake