

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 03. 015

洞庭湖湖区最低生态水位的确定

杨毓鑫^{1,2,3}, 杜春艳^{1,2,3}, 张金帆^{1,2,3}, 余关龙^{1,2,3}, 陈 宏^{1,2,3}, 钱 湛⁴

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南省环境保护河湖污染控制工程技术中心, 湖南 长沙 410114; 4. 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南 长沙 410007)

摘要:为确定洞庭湖湖区最低生态水位,针对洞庭湖湖区复杂、不同湖区差异较大的问题,基于城陵矶、鹿角、南嘴、小河嘴和杨柳潭 5 个水文站 1953—2013 年的水文资料,采用天然水位资料法、年保证率法、最低年平均水位法、生态水位法、湖泊形态分析法及最小空间需求法,分别对东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖的最低生态水位进行了计算,并与前人关于洞庭湖生态水位的研究成果进行了对比分析。结果表明:东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖的最低生态水位分别为 22.62 m、27.19 m 和 28.11 m,相应的湖面面积分别为 373.85 km²、406.88 km² 和 142.19 km²,从保护洞庭湖自然保护区的角度看,确定的最低水位是合理的。

关键词:洞庭湖;最低生态水位;湖泊生态水文;水面面积

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004 - 6933 (2019) 03 - 0089 - 06

Determination of lowest ecological water level in Dongting Lake area// YANG Yuxin^{1,2,3}, DU Chunyan^{1,2,3}, ZHANG Jinfan^{1,2,3}, YU Guanlong^{1,2,3}, CHEN Hong^{1,2,3}, QIAN Zhan⁴ (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China ; 3. Engineering and Technical Center of Hunan Provincial Environmental Protection for River-Lake Dredging Pollution Control, Changsha 410114, China; 4. Hunan Hydro & Power Design Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: In order to determine the lowest ecological water level in the Dongting Lake area, the complexity of the Dongting Lake area and the great differences between different lake areas were studied. Based on the hydrological data of five hydrological stations, Chenglingji, Lujiao, Nanzui, Xiaohesui and Yangliutan, from 1953 to 2013, the natural water level data method, annual guarantee rate method, minimum annual average water level method, ecological water level method, lake morphology analysis method and minimum spatial demand were adopted. The lowest ecological water levels of East Dongting Lake, South Dongting Lake and West Dongting Lake were calculated, and compared with the previous research results on ecological water levels of Dongting Lake. The results show that the lowest ecological water levels of East Dongting Lake, South Dongting Lake and West Dongting Lake are 22.62 m, 27.19 m and 28.11 m, respectively, and the corresponding lake surface areas are 373.85 km², 406.88 km² and 142.19 km², respectively. From the point of view of protecting the Dongting Lake Nature Reserve, the lowest water level determined is reasonable.

Key words: Dongting Lake; lowest ecological water level; lake eco-hydrology; water surface area

我国是一个湖泊众多的国家,全国共有 1.0 km² 以上的自然湖泊 2 693 个,总面积 81 414.6 km²,约占全国土地面积的 0.9%^[1]。近年来,在自然环境和人类生产生活活动的双重影响下,我国湖泊的水文情势发生了显著变化,特别是水位变化,成为影响

湖泊生态安全的重要因素之一^[2-3]。而湖泊生态系统动植物功能与水位联系密切,应将湖泊生态水位作为湖泊生态水文的重要研究对象。

国外对于湖泊生态水文的研究开始于 20 世纪末,主要依据是所选取的敏感指示物种对水环境指

基金项目:国家自然科学基金(51109016);湖南水利重大科技项目(湘水科计[2016]194-12,湘水科计[2017]230-22)
作者简介:杨毓鑫(1993—),男,硕士研究生,研究方向为水环境与水生态。E-mail:yangyx_edu@126.com
通信作者:杜春艳,讲师。E-mail:cydu@csust.edu.cn

标的需求,注重水位的涨落限制,且涉及大量的生物资料,需要现场数据的支撑^[3-8]。国内对湖泊生态水文的研究起步较晚,主要分为湖泊生态需水量和湖泊生态水位两大方向。在湖泊生态水位研究方面,徐志侠等^[9-10]根据水文循环原理,提出了吞吐型湖泊的最低生态水位的理论与计算模型;袁平等^[11]结合生态资料与水位数据,提出了生态水位法;近些年来,部分学者在前人研究的基础上,对生态水位的计算方法提出了改进^[12-17],也有学者以生物及水质为保护目标,进行了湖泊生态水位的分析^[18-20]。国内由于缺乏生物资料及现场观测数据,计算方法较为单一,其中以水文数据为基础的计算方法使用较为普遍;应结合研究区域的实际情况采用不同的计算方法,尽快提出适合我国国情的湖泊生态水位计算方法。

关于洞庭湖湖区的生态水位研究主要集中在东洞庭湖,且仅考虑了水文学和水力学要素,对洞庭湖湖区的复杂性、区域性差异性及生物指标关注较少。本文采用不同方法分析洞庭湖3个子湖区的生态水位,以期对洞庭湖及其类似湖泊水资源的合理开发和利用以及恢复湖泊水生生态系统的健康提供依据。

1 研究区域概况

洞庭湖(28°44′ ~ 29°35′N、111°53′ ~ 113°05′E)是我国第二大淡水湖,位于湖南省东北部,长江中游荆江段南岸;湖体呈近似“U”形,湖区承接湘、资、沅、澧四水和松滋、太平、藕池三口分泄长江来水,经湖区调节后由城陵矶出流进入长江。由于气候变化和人类活动的影响,湖体已演变为首尾相接的东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖3个部分。洞庭湖湖区的气候类型为亚热带季风气候,4—9月为雨季,10月至翌年3月为旱季,降水季节分配不均导致洞庭湖湿地“涨水为湖,落水为洲”。

水文控制断面的选择对于湖泊生态水位的确定至关重要,本文生态水位研究涉及整个洞庭湖湖区,在平衡断面数量和工作量的基础上,遵循典型性、稳定性、实用性和可靠性的原则,选取洞庭湖湖区具有代表性的水文站作为控制断面,包括城陵矶、鹿角、南嘴、小河嘴和杨柳潭5个水文站,其中东洞庭湖以城陵矶和鹿角为代表,西洞庭湖以南嘴和小河嘴为代表,南洞庭湖以杨柳潭为代表。

2 生态水位计算

通过数据采集及对计算方法适用性的比较,选用天然水位资料法、年保证率法、最低年平均水位法、生态水位法、湖泊形态分析法和生物最小空间需求法,计算5个代表性水文站点的生态水位。计算

结果均以1985 黄海高程为基准。

2.1 天然水位资料法

为甄别不同年代洞庭湖水位变化的主要驱动力,20 世纪50 年代以来,受下荆江裁弯、葛洲坝和三峡水利枢纽工程的影响,荆南三口分流入湖水量总体呈减少趋势,为便于分析洞庭湖水位变化的趋势及成因,将1953—2013 年大致划分为6 个时间段^[21],各水文站不同时段年平均水位如表1 所示。

表1 洞庭湖各水文站不同时段年平均水位 m

时段	城陵矶	鹿角	南嘴	小河嘴	杨柳潭
1953—1966 年	22. 23	22. 96	28. 33	28. 19	26. 71
1967—1972 年	22. 33	23. 46	28. 25	28. 11	26. 95
1973—1980 年	22. 76	23. 70	28. 20	28. 10	27. 19
1981—1990 年	23. 21	24. 27	28. 14	28. 10	27. 26
1991—2003 年	23. 43	24. 28	28. 28	28. 23	27. 37
2004—2013 年	22. 89	23. 49	27. 82	27. 69	26. 87

考虑到荆江裁弯及葛洲坝、三峡等水利枢纽工程对洞庭湖水位的影响,采用荆江裁弯前1953—1966 年的水位资料近似替代天然状况下的多年水位情况。统计计算得到城陵矶、鹿角、南嘴、小河嘴和杨柳潭5 个水文站的生态水位分别为22. 23 m、22. 96 m、28. 33 m、28. 19 m 和26. 71 m。

2.2 年保证率法

选取1953—2013 年5 个水文站实测最低水位数据,按从小到大的顺序排列。根据经验频率公式(1),取保证率 $P=75\%$,计算得到相应的水文年。参考文献[22]对计算得到的水文年的生态系统健康进行评价,结果为差;再由湖泊生态系统健康等级与权重的对应关系,得出权重 $\mu=1. 01$,结合公式(2),可得到城陵矶、鹿角、南嘴、小河嘴和杨柳潭5 个水文站的生态水位分别为23. 77 m、24. 59 m、28. 11 m、28. 35 m 和27. 19 m。

$$P = \frac{m}{n + 1} \times 100\% \tag{1}$$

$$H_{\min} = \mu \bar{H} \tag{2}$$

式中: P 为保证率; m 为相应保证率所对应的年数; n 为统计年数; $H_{\min}$ 为生态水位,m; $\bar{H}$ 为相应水文年的年平均水位,m。

2.3 最低年平均水位法

选取1953—2013 年5 个水文站实测水位数据,确定5 个水文站的多年平均最低水位,该方法的关键是权重 λ 的确定。权重 λ 实际上是反映湖泊历年最低水位的平均值与最低生态水位的接近程度, λ 取值区间为0. 65 ~ 1. 55,通过查阅资料^[23-24]和专家打分法来确定权重 λ 的取值。生态水位计算结果如表2 所示。

表 2 最低年平均水位法计算结果 m

水文站	多年平均最低水位	生态水位
城陵矶	17.25	22.62
鹿 角	18.84	22.02
南 嘴	26.11	29.74
小河嘴	26.28	29.91
杨柳潭	25.33	28.90

2.4 生态水位法

通过对 1953—2013 年 5 个水文站的水位频率分析,确定各站的高频水位年份,再对照洞庭湖湖区鱼类捕捞状况和 1960—2011 年洞庭湖区的旱涝情况^[25],确定相对生态环境最差年份及其平均水位。由于鱼类处于湖泊生态系统食物链的中上层,其在水文等环境因子和生产者、消费者等生态因子具有较好的指示作用,因此选择鱼类作为洞庭湖的生物指标。生态水位系数的确定及计算结果如表 3 所示。

表 3 生态水位法计算结果

水文站	相对生态环境最差年份	最差年份平均水位/m	多年平均水位/m	最低生态水位系数	生态水位/m
城陵矶	1997 年	22.85	22.81	1.00	22.89
鹿 角	1996 年	23.98	23.87	1.00	24.09
南 嘴	1995 年	28.38	28.17	1.01	28.66
小河嘴	1993 年	28.38	28.26	1.00	28.50
杨柳潭	1995 年	27.38	27.14	1.01	27.62

2.5 湖泊形态分析法

采用东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖的实测水位和面积资料推算出水面面积-水位关系曲线和面积变化率-水位关系曲线,结果如图 1 和图 2 所示。湖泊的面积增加速度随着水位升高呈现出先增加后

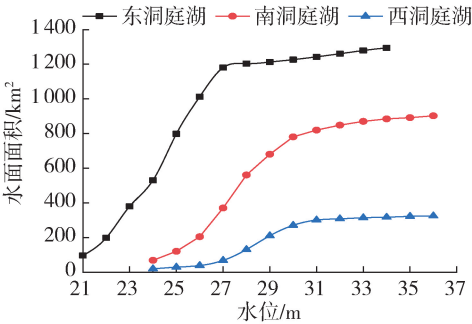


图 1 水面面积-水位关系曲线

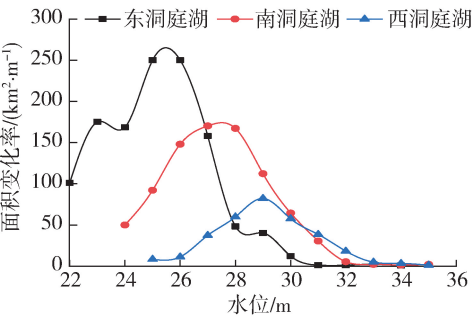


图 2 面积变化率-水位关系曲线

减小的趋势,面积变化率的最大值表明湖泊面积变化最大,所对应的水位即为生态水位^[10]。生态水位计算结果如表 4 所示。

表 4 湖泊形态分析法计算结果 m

湖 区	多年平均水位	生态水位
东洞庭湖	22.81(城陵矶)、23.87(鹿角)	25.67
南洞庭湖	27.14(杨柳潭)	27.37
西洞庭湖	28.17(南嘴)、28.26(小河嘴)	29.02

2.6 生物最小空间需求法

湖泊植物、鱼类等为维持各自群落不严重衰退均需要一个最低生态水位。不同的水生和陆生植物有不同的适宜水位,而沉水植物和挺水植物更易受到水位高低的影响。沉水植物的适宜水深为 60 ~ 200 cm,挺水植物的适宜水深为植物露出水面 30 ~ 50 cm;鱼类为湖泊生态系统中的顶级群落,根据现有相关研究可知野生鱼类生存和繁殖的最小水深为 1.0 m。综合考虑选取鱼类需求的最小水深加上湖底平均高程作为生态水位,计算结果如表 5 所示。

表 5 生物空间最小需求法计算结果 m

湖 区	湖底平均高程	生态水位
东洞庭湖	14.15	15.15
南洞庭湖	22.16	23.16
西洞庭湖	22.76	23.76

3 最低生态水位的确定

天然水位资料法、年保证率法和最低年平均水位法是根据历史水位资料计算生态水位,属于统计学的方法,优点是不需要现场测定数据,不足之处是没有直接考虑生物需求和生物间的相互影响,适用于计算水情对生态系统影响较大的湖泊生态水位;生态水位法通过建立水位与相关生物指标及气象条件的关系来计算生态水位,缺点是生物指标较为单一,缺乏整体性;湖泊形态分析法通过研究湖泊水位与面积的关系来确定生态水位,属于半经验方法,优点是不需要详细的生态资料,包含更多更为具体的湖泊信息,缺点是体现不出季节变化因素,对生态系统机理的研究较为粗略,适用于小型湖泊或水位变化幅度较小且相对稳定的湖泊以及湖泊水环境污染不明显的湖泊;生物最小空间需求法属于栖息地法的范畴,生物学基础牢固,优点是考虑了湖泊相关生物的生态机理,缺点是所需的生物资料难以获取,对于小型湖泊较为实用。

洞庭湖分为东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖 3 个湖区,且湖底地面自西北向东南微倾,因此分区确定生态水位很有必要。东洞庭湖湿地自然保护区总面积为 1 900 km²,其中核心区面积为 290 km²,

缓冲区面积为 364 km²;南洞庭湖湿地水禽自然保护区总面积为 1 680 km²,其中核心区面积为 390 km²,缓冲区面积为 610 km²;西洞庭湖自然保护区总面积为 300. 44 km²,其中核心区面积为 90. 61 km²,缓冲区面积为 61. 55 km²。核心区是天然状态的生态系统以及珍惜、濒危动植物的集中分布地,最有保护价值,是最重要的保护区域。因此,最低生态水位相应的水面面积应该保证核心区生态系统的健康发展。

为了保证 3 个子湖区的核心区生态系统健康发展,最低生态水位相应的湖面面积至少应满足核心区的面积需要。综合 6 种方法的计算结果,确定东洞庭、南洞庭湖和西洞庭湖湖最低生态水位分别为 22. 62 m、27. 19 m 和 28. 11 m,并通过水面面积-水位关系推算出各湖区最低生态水位所对应的水面面积分别为 373. 85 km²、406. 88 km² 和 142. 19 km²。最低生态水位所提供的水面面积满足核心区对水面的需要,因此,从保护洞庭湖自然保护区的角度看,确定的最低水位是合理的。

4 分析与讨论

将本文的计算结果与已有研究成果进行比较,结果见表 6(表中计算结果均换算为 1985 黄海高程)。

表 6 洞庭湖生态水位研究成果比较

成果来源	生态水位
梁捷等 ^[13]	城陵矶生态水位为 22. 35 m
谢永宏等 ^[15]	1974、1988 年最低生态水位为 22. 06 m,1998 年最低生态水位为 22. 66 m
Shang 等 ^[16]	城陵矶最低生态水位估计值为 24. 76 m
程俊翔等 ^[24]	东洞庭湖最低生态水位 23. 48 m
Zhang 等 ^[26]	城陵矶最低保护水位为 20. 67 ~ 21. 55 m
余勋 ^[27]	南嘴和城陵矶汛期的生态可接受水位范围分别为 23. 25 ~ 36. 51 m 和 22. 54 ~ 29. 02 m,非汛期分别为 15. 75 ~ 27. 25 m 和 13. 65 ~ 20. 13 m
本文	东洞庭湖、南洞庭湖、西洞庭湖最低生态水位分别为 22. 62 m、27. 19 m 和 28. 11 m

梁捷等^[13]考虑了人类活动和气象条件的影响,通过对水位数据的变异性分析确定了洞庭湖的生态水位;谢永宏等^[15]从湿地水文的角度出发,综合考虑环境要素及人类活动,计算了洞庭湖不同时期的最低生态水位,结果表明 1974—1998 年洞庭湖最低生态水位呈上升趋势;Shang 等^[16]认为生物多样性会随表面积增加而增加,提出了湖泊表面积法,与湖泊形态分析法相比,湖泊表面积法的适用范围、计算复杂程度等方面更具有优势;程俊翔等^[24]采用最低年平均水位法、年保证率法等水文学方法计算结果的平均值作为东洞庭湖的最低生态水位;Zhang 等^[26]深入研究了水文、气候变化与水鸟之间的量化

关系,运用冗余分析(RDA)和响应面分析法(RSM)筛选确定了对水鸟影响最显著的指标是流量和水位,从而以洞庭湖湿地的水鸟为保护目标,计算得到最低保护水位;余勋^[27]从水文角度出发,通过引入水文指数 RFD (ratio flow deviation) 和 AAPFD (amend annual proportional flow deviation)对水位序列进行水文变异分析和湿地健康状况分析,得到了洞庭湖的生态可接受水位。不同研究者所采用的计算方法理论基础和侧重点有所不同,得到的结果存在差异。以城陵矶水文站为代表的东洞庭湖多年平均水位为 22. 81 m,在不考虑汛期和非汛期的情况下,东洞庭湖最低生态水位为 20. 67 ~ 24. 76 m。其中,侧重于湖泊某一生态保护目标(鸟类或鱼类)的湖泊生态水位计算方法忽视了洞庭湖水位情势的变化过程及其生态意义,计算结果明显低于其他计算方法,结果难以覆盖完整的湖泊生态系统。考虑到国内生物资料缺乏的情况,结合研究区域的实际情况,采用以水文资料为基础的水文学方法及水力学方法更适合洞庭湖最低生态水位的计算。

相关研究以东洞庭湖或以城陵矶站代表整个洞庭湖,缺乏对洞庭湖复杂多变的实际情况的考虑,本文以保证湖泊核心区生态健康发展为目标,结合洞庭湖的实际情况,运用 6 种湖泊生态水位的计算方法,最终确定了东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖的最低生态水位,可为洞庭湖湖区生态系统的恢复提供更为详细的数据支撑和决策依据,促进湖泊健康与可持续发展。

5 结 语

本文采用天然水位资料法、年保证率法、最低年平均水位法、生态水位法、湖泊形态分析法和生物最小空间需求法计算生态水位,综合分析确定了东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖的最低生态水位分别为 22. 62 m、27. 19 m 和 28. 11 m,最低生态水位所对应的水面面积满足湖泊核心区对水面的需要,结果合理可行。同时,结合洞庭湖的实际情况,将本文的计算结果与已有的研究成果进行了比较,分析并讨论了不同研究成果之间的差异,认为以水文资料为基础的水文学方法及水力学方法更适合洞庭湖最低生态水位的计算,本文最低生态水位的确定也为洞庭湖生态系统的恢复提供了科学依据。

参考文献:

[1] 马荣华,杨桂山,段洪涛,等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布[J]. 中国科学:地球科学,2011,41(3):394-401. (MA Ronghua, YANG Guishan, DUAN Hongtao, et

- al. China's lakes at present: number, area and spatial distribution[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2011, 41(3): 394-401. (in Chinese))
- [2] YIN Xin'an, YANG Zhifeng. A method to assess the alteration of water-level-fluctuation patterns in lakes[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 2427-2436.
- [3] WANTZEN K M, ROTHaupt K, MÖRTL M, et al. Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: an urgent issue[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 613(1): 1-4.
- [4] BAIRD A J, WILBY R L. *Eco-hydrology: plants and water in terrestrial and aquatic environments* [M]. New York: Routledge, 1999.
- [5] TILLEY D R, BADRINARAYANAN H, ROSATI R, et al. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2002, 26(2): 81-109.
- [6] COOPS H, HOSPER S H. Water-level management as a tool for the restoration of shallow lakes in the Netherlands [J]. *Lake and Reservoir Management*, 2002, 18(4): 293-298.
- [7] HOFMANN H, LORKE A, PEETERS F. Temporal scales of water-level fluctuations in lakes and their ecological implications[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 613(1): 85-96.
- [8] SUTELA T, VEHANEN T. Effects of water-level regulation on the nearshore fish community in boreal lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2008, 613(1): 13-20.
- [9] 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 Zhixia, WANG Hao, TANG Kewang, et al. Minimum ecological water requirements for lakes taking in-sending out water [J]. *Resources Science*, 2005, 27(3): 140-144. (in Chinese))
- [10] 徐志侠, 王浩, 董增川, 等. 南四湖湖区最小生态需水研究[J]. *水利学报*, 2006, 37(7): 784-788. (XU Zhixia, WANG Hao, DONG Zengchuan, et al. Minimum ecological water requirement for Nansi Lake[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(7): 784-788. (in Chinese))
- [11] 衷平, 杨志峰, 崔保山, 等. 白洋淀湿地生态环境需水量研究[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(8): 1119-1126. (ZHONG Ping, YANG Zhifeng, CUI Baoshan, et al. Studies on water resource requirement for eco-environmental use of the Baiyangdian Wetland [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(8): 1119-1126. (in Chinese))
- [12] 淦峰, 唐琳, 郭怀成, 等. 湖泊生态水位计算新方法与应用[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 783-790. (GAN Feng, TANG Lin, GUO Huaicheng, et al. New method and application of estimating ecological water level of the Lake Poyang[J]. *Journal of Lake Science*, 2015, 27(5): 783-790. (in Chinese))
- [13] 梁婕, 彭也茹, 郭生练, 等. 基于水文变异的东洞庭湖湿地生态水位研究[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(3): 330-334. (LIANG Jie, PENG Yeru, GUO Shenglian, et al. Determination of ecological water-level in the Eastern Lake Dongting with hydrological alterations[J]. *Journal of Lake Science*, 2013, 25(3): 330-334. (in Chinese))
- [14] LIANG Jie, YU Xun, ZENG Guangming, et al. A hydrologic index based method for determining ecologically acceptable water-level range of Dongting Lake[J]. *Journal of Limnology*, 2015, 74(1): 75-84.
- [15] 谢永宏, 李峰, 陈心胜. 洞庭湖最小生态需水量研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(1): 64-70. (XIE Yonghong, LI Feng, CHEN Xinsheng. Study on the minimum ecological water demand for the Dongting Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(1): 64-70. (in Chinese))
- [16] SHANG Songhao. Lake surface area method to define minimum ecological lake level from level-area-storage curves[J]. *Journal of Arid Land*, 2013, 5(2): 133-142.
- [17] 孟凡志, 赵艳波, 崔玉玲. 兴凯湖生态水位分析[J]. *水资源保护*, 2008, 24(6): 46-48. (MENG Fanzhi, ZHAO Yanbo, CUI Yuling. Analysis of ecological water level of Xingkai Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2008, 24(6): 46-48. (in Chinese))
- [18] 巩琳琳, 黄强, 薛小杰, 等. 基于生态保护目标的乌梁素海生态需水研究[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(6): 83-88. (GONG Linlin, HUANG Qiang, XUE Xiaojie, et al. The research of ecological water demand of Ulansuhai Nur based on the ecological protection targets [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(6): 83-88. (in Chinese))
- [19] 黎磊, 张笑辰, 秦海明, 等. 食块茎水鸟及水位对沙湖沉水植物冬芽分布的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 661-669. (LI Lei, ZHANG Xiaochen, QIN Haiming, et al. Effects of tuber-feeding waterbird guild and water level fluctuation on tuber distribution of submerged macrophytes in Shahu Lake [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3): 661-669. (in Chinese))
- [20] 唐玥, 谢永宏, 李峰, 等. 1989—2011 年东洞庭湖草洲出露面积变化及其与水位响应的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3229-3236. (TANG Yue, XIE Yonghong, LI Feng, et al. Area changes of emergent herbaceous wetlands in relation to water level in East Dongting Lake, China in 1989-2011 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(11): 3229-3236. (in Chinese))
- [21] 刘晓群, 戴斌祥. 三峡水库运行以来洞庭湖水文条件变化与对策[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(6): 25-31. (LIU Xiaoqun, DAI Binxiang. Variation of hydrological conditions of Dongting Lake and corresponding countermeasure analysis after operation of the Three Gorges Reservoir [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(6): 25-31. (in Chinese))
- [22] 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 Baoshan, ZHAO Xiang, YANG Zhifeng. Eco-hydrology-based calculation of the minimum ecological water requirement for lakes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1788-1795. (in Chinese))
- [23] 赵翔, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究[J]. *生态学报*, 2005, 25(5): 1033-1040. (ZHAO Xiang, CUI Baoshan, YANG Zhifeng. A study of the lowest ecological

water level of Baiyangdian Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(5): 1033-1040. (in Chinese))

[24] 程俊翔,徐力刚,吴睿,等. 东洞庭湖最低生态水位研究[J]. 江西科学, 2015, 33(6): 932-937. (CHENG Junxiang, XU Ligang, WU Rui, et al. Study on the lowest ecological water level of East Dongting Lake [J]. Jiangxi Science, 2015, 33(6): 932-937. (in Chinese))

[25] 黄菊梅,邹用昌,彭嘉栋,等. 1960—2011 年洞庭湖区年降水量变化特征[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 81-86. (HUANG Jumei, ZOU Yongchang, PENG Jiadong, et al. Variation characteristics of annual precipitation from 1960 to 2011 in Dongting Lake area [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(6): 81-86. (in Chinese))

[26] ZHANG Chang, YUAN Yujie, ZENG Guangming, et al. Influence of hydrological regime and climatic factor on waterbird abundance in Dongting Lake Wetland, China: implications for biological conservation [J]. Ecological Engineering, 2016, 90: 473-481.

[27] 余勋. 洞庭湖不确定性水质评价及生态水位研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.

(收稿日期: 2018-05-05 编辑: 熊水斌)

+++++

(上接第 83 页)

[62] 蔡庆拟,陈志和,陈星,等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 31-36. (CAI Qingni, CHEN Zhihe, CHEN Xing, et al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 31-36. (in Chinese))

[63] 黄国如,王欣. 基于城市雨洪模型的市政排水与水利排涝标准衔接研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 1-5. (HUANG Guoru, WANG Xin. Study on standard syntaxis of urban drainage between pipe and river based on urban storm flood models [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 1-5. (in Chinese))

[64] SHAHSAVARI G, ARNAUD-FASSETTA G, CAMPISANO A. A field experiment to evaluate the cleaning performance of sewer flushing on non-uniform sediment deposits [J]. Water Research, 2017, 118: 59-69.

[65] 唐建国,曹飞,全洪福,等. 德国排水管道状况介绍[J]. 给水排水, 2003, 29(5): 4-9. (TANG Jianguo, CAO Fei, QUAN Hongfu, et al. Brief on german sewage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2003, 29(5): 4-9. (in Chinese))

[66] 王健,周玉文,刘嘉,等. 雨水调蓄池在国内外应用简况[J]. 北京水务, 2010(3): 6-9. (WANG Jian, ZHOU Yuwen, LIU Jia, et al. Application of rainwater storage tanks at home and abroad [J]. Beijing Water, 2010(3): 6-9. (in Chinese))

[67] 王建龙,黄涛,张萍萍,等. 合流制溢流调蓄池污染控制研究进展[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(8): 85-89. (WANG Jianlong, HUANG Tao, ZHANG Pingping, et al. Research progress on combined sewer overflow stormwater storage tank for pollution control [J]. Environmental Pollution and Control, 2015, 37(8): 85-89. (in Chinese))

[68] PETRUCK A, CASSAR A, DETTMAR J. Advanced real time control of a combined sewer system [J]. Water Science & Technology, 1998, 37(1): 319-326.

[69] ALKHADDAR R M, HIGGINS P R, PHIPPS D A, et al. Residence time distribution of a model hydrodynamic vortex separator [J]. Urban Water, 2001, 3(1/2): 17-24.

[70] 吴春笃. 城市合流管网溢流污染控制规划研究[M]. 镇江: 江苏大学出版社, 2014.

[71] 马倩倩,蔡欣,丁怡斐. 旋流分离器在合流制溢流污染控制中的应用进展[J]. 绿色科技, 2016(2): 68-70. (MA Qianqian, CAI Xin, DING Yifei. The application progress of cyclone separator in the control of overflow pollution in combined flow control system [J]. Journal of Green Science and Technology, 2016(2): 68-70. (in Chinese))

[72] LUYCKX G, VAES G, BERLAMONT J. Comparison between the separating efficiency of an improved high-side weir overflow and a hydrodynamic storm king™ separator [J]. Water Science & Technology, 1999, 39(9): 177-184.

[73] SULLIVAN R H, URE J E, PARKINSON F, et al. Design manual: swirl and helical bend pollution control devices [R]. Washington D C: EPA, 1982.

[74] PISANO W C, BROMBACH H. Operational experience with vortex solids separators for combined sewer overflow (CSO) control [J]. Waterence & Technology, 2011, 29: 383-391.

[75] LEE D H, MIN K S, KANG J H. Performance evaluation and a sizing method for hydrodynamic separators treating urban stormwater runoff [J]. Water Science & Technology, 2014, 69(10): 2122-2131.

[76] COCK W D, BLOM P, VAES G, et al. The feasibility of flocculation in a storage sedimentation basin [J]. Water Science & Technology, 1999, 39(2): 75-83.

[77] 张力,张善发,周琪. 化学强化一级处理工艺处理上海合流污水溢流水的中试研究[J]. 净水技术, 2010, 29(3): 18-21. (ZHANG Li, ZHANG Shanfa, ZHOU Qi. Pilot scale experiment on chemically enhanced primary treatment (CEPT) for combined sewer overflows (CSOs) in Shanghai [J]. Water Purification Technology, 2010, 29(3): 18-21. (in Chinese))

[78] 邢丽贞,王恩革,常青霞. 合流制污水溢流治理技术综述[J]. 山东建筑大学学报, 2011, 26(2): 166-169. (XING Lizhen, WANG Enge, CHANG Qingxia. On the treatment technologies for combined sewer overflows [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2011, 26(2): 166-169. (in Chinese))

[79] 谈文彦. CSO 水质特征及磁絮凝最佳参数研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

[80] TCHOBANOGLOUS G, BURTON F L, STENSEL H D. Wastewater engineering treatment and reuse [M]. 4th ed. Boston, US: McGraw-Hill Higher Education, 2003: 50-51.

(收稿日期: 2018-06-14 编辑: 熊水斌)