

白洋淀生态需水:进展及展望*

杨 薇^{1,2**}, 赵彦伟^{1,2}, 刘 强^{1,3}, 孙 涛^{1,2}

(1: 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

(2: 北京师范大学水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

(3: 北京师范大学水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 采用文献计量、统计分析等手段收集了国内外关于白洋淀生态需水核算的研究成果, 系统梳理了 15 种白洋淀生态需水核算方法, 获得了白洋淀不同时间尺度、不同等级生态需水核算结果, 并结合雄安新区规划对白洋淀生态需水核算存在的问题及未来的需求提出了展望. 统计结果表明, 白洋淀最小生态水位为 7.45 ± 0.66 m, 适宜水位为 8.61 ± 0.52 m, 最大水位为 9.46 ± 0.51 m; 各等级生态需水月际变化趋势大致相同, 8—9 月最大, 5 月最小, 但各月不同等级生态需水量的变幅较大; 白洋淀最小生态补水量为 1.35 亿 m^3 , 适宜补水量 2.40 亿 m^3 , 最大生态补水量 6.20 亿 m^3 . 从支撑雄安新区规划建设的角度来看, 目前白洋淀生态需水核算中面临的不足主要集中在生态管理目标和方法选择导致核算结果差异较大、缺乏淀区生态需水机制的阐释、生态需水核算时间尺度较粗略、未考虑淀区空间异质性的需水差异以及忽略河湖水文连通关系与过程 5 个方面; 最后, 以恢复白洋淀良性生态系统为导向, 从分级分区开展白洋淀生态需水精细核算、分时分段淀区生态需水量质耦合模拟和考虑河湖沼连通的淀区水动力过程恢复 3 个方面提出了未来研究的建议与展望.

关键词: 白洋淀; 生态需水; 流量调控; 生态补水; 雄安新区

A systematic literature review and perspective on water-demand for ecology of Lake Baiyangdian *

YANG Wei^{1,2**}, ZHAO Yanwei^{1,2}, LIU Qiang^{1,3} & SUN Tao^{1,2}

(1: *School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China*)

(2: *State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China*)

(3: *Key Laboratory for Water and Sediment Science, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China*)

Abstract: We collected the 35 literatures about water-demand for eco-environment of Lake Baiyangdian and systematically reviewed the methodologies and the corresponding calculation results. We identified the existing problem, and proposed research directions in the future according to the planning of the Xiong'an New Area. The statistical results shows that the lowest, suitable and highest water levels of Lake Baiyangdian are 7.45 ± 0.66 m, 8.61 ± 0.52 m and 9.46 ± 0.51 m, respectively. Among the above three grades, water levels are highest in August and September, while lowest in May. In addition, extra water with the range of $(1.35-6.20) \times 10^8 m^3$ should be supplied to the Lake Baiyangdian annually to maintain the ecosystem status. However, the existing research on environmental water in Lake Baiyangdian is insufficient to support the construction of the New Area, such as significant differences in water-demand for eco-environment from various methods, the mechanism deficiency and rough time scales (year and month) in the ecological water demand calculation, without consideration the spatial heterogeneity in the lake and the connection of the lake and upstream rivers. Therefore, we proposed three research expectations, including the gridding and fine calculation, water quantity and quality simulation by restoring stages, as well as the recovering of the lake hydrodynamic process.

Keywords: Lake Baiyangdian; water for the environment; flow regulation; environmental flow releases; Xiong'an New Area

* 2019-04-30 收稿; 2019-10-17 收修改稿.

国家自然科学基金项目(51439001)、国家重点研发计划项目(2017YFC0404505)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110001)联合资助.

** 通信作者; E-mail: yangwei@bnu.edu.cn.

生态需水(Environmental water 或 water for the environment),是指维持水生生态系统健康所必要的流量或水位的大小、时机和水质^[1],研究对象涉及河流、湖泊、沼泽等多种生态系统类型,其中河流多采用生态流量或环境流量表述,湖泊湿地多采用生态水位表述.近些年来关于生态需水的研究多集中在河流生态系统,并提出了一系列的研究方法,如水文学方法、水力学方法、栖息地模拟法以及整体法四大类^[2].湖泊生态需水是指维持湖泊湿地的生态系统基本结构与重要功能完整的生态水位,具有明显的时空性、复杂性和综合性^[3-5],计算方法有水量平衡法、换水周期法、最小水位法、功能设定法、水质目标法等^[6-8];也有学者认为湖泊生态需水量是指为维持湖泊功能不受破坏而每年因消耗所需要补充的水量^[9].不同学者有不同的理解,并将上述方法应用在鄱阳湖^[10-11]、太湖^[12-13]、博斯腾湖^[14]、南四湖^[15]等淡水湖泊生态水位核算中.

白洋淀作为我国北方最大的浅水草型湖泊,其生态需水研究也得到了国内生态水文学家的关注,自从2003年以来,国内生态环境学者采用多种方法,从生态需水等级要求、随月际变化等角度定量核算了淀区生态需水,但大多数仍处于初步、粗略核算阶段,缺乏需水机理的理解和阐释^[8,16].由于入淀水量不足、各类污染物输入量大、生态空间萎缩以及生态环境管理体制机制不完善等原因,白洋淀存在水体污染较重、生态水文过程弱化、沼泽化严重和生物多样性退化等生态环境问题,生态需水核算亟待明确,生态环境修复刻不容缓^[17].此外,河北雄安新区规划和建设也为白洋淀生态环境提出了更高的要求,生态需水保障是白洋淀生态修复的核心,已有对白洋淀生态需水的相关研究能否有效支撑多源补水长效机制的构建、科学指导白洋淀生态水文调控策略,尚缺乏系统梳理与科学论述.本研究从生态需水核算方法的原理切入,总结了满足白洋淀不同生态管理目标要求的生态需水核算方法及其结果,从生态管理目标内涵、生态水文响应机制、不同时空尺度差异以及河湖水系连通等角度深入剖析了当前湖泊生态需水核算中存在的不足,提出了新形势下白洋淀淀区生态需水研究的新思路,可对河北雄安新区的蓝绿空间格局和水资源管理提供重要的科技支撑.

1 数据来源

本研究基于中国知网和 Web of Science 数据库平台,选择关键词“白洋淀”+“生态水位、最小水位、生态需水、环境需水、生态环境需水、生态流量、环境流量”(英文:“Baiyangdian” + “Ecological water level, minimum water level, ecological water requirements, environmental water requirements, environmental flows, ecological flows”)作为检索策略,检索时间段截至2018年,共检索到有效论文35篇,包括中文27篇,英文8篇(期刊论文24篇,会议论文2篇,学位论文9篇).从图1可以看出,白洋淀生态需水研究自2000年以来展开并逐年递增,于2011年成果产出最多.



图1 白洋淀生态需水核算文献及项目支撑

Fig.1 Publication and technical project about water for environment in Lake Baiyangdian

2 白洋淀生态需水核算方法及成果分析

2.1 白洋淀生态需水核算方法原理

白洋淀生态需水核算方法包括常用的水量损失法、生态水位法、功能设定法、水量水质耦合法、最小水位法、水量平衡法、生境分析法等,均以水量或水质作为关注核心要素(表1)。生态水位法是最常用的方法之一,该方法通过对其长序列的水文资料分析,寻求多年来频率出现较高的水位作为湿地较适宜水文条件,并与生态环境状况进行对照进行验证,其实质上是考虑了生态系统状态的水文学方法^[18];水量损失法以湿地水域范围作为核心研究目标,考察的是湿地蒸发、渗漏等自身消耗的总水量;最小水位法和功能设定法虽然目标为生态环境功能维护,多依赖于经验、主观地确定相应一定的水位^[19]。此外,近些年来发展起来的其他方法如生态系统扰动法^[7]、生态系统脆弱性评估法^[20]、服务价值法^[8,21-20]等,试图从生态系统完整性、稳定性、功能健全的角度计算白洋淀生态需水。

广义上生态需水指湿地为维持自身存在和发展以及发挥湿地应有的生态环境效益所需要的水量,可理解为存量、蓄水量,狭义上一般认为是补充湿地生态系统每年消耗的水量,可以理解为通量、补水量;对于受人工调控的白洋淀而言,针对两种内涵开展的研究普遍存在。也有学者将其分解为满足淀区水资源蒸发入渗消耗的刚性需求以及改善淀区水动力条件和水生态环境质量的弹性需求^[9],其实质与通量和存量概念并不矛盾。可以从白洋淀生态水位和基于补水量的生态需水两个方面进行分析。

2.2 不同方法对白洋淀生态需水核算结果的影响

采用不同方法核算的白洋淀生态需水量如图2所示。有11种方法从淀区存量的角度进行了需水核算(图2a),由于面向的生态系统保护目标(如水量保障、水质改善、功能维持等)不同,导致核算结果有显著差异。其中,水量平衡法、年保证率法、水面变化速率法均以维持一定的水面,即水量保障为目标,计算结果普遍比较保守,在1.10亿~1.73亿 m^3 之间;生态水位法、生态系统扰动法和生态系统服务价值法分别以维持生态系统状态最优、生态系统健康和生态系统服务功能最大为具体目标,核算结果在2.80亿~3.10亿 m^3 之间;而功能设定法、生境分析、生态系统脆弱法等均以维持正常生态环境功能为管理目标,核算出的结果偏高,分别在4.20亿~5.37亿 m^3 之间;而量质耦合法和换水周期法均为以保持良好的水质条件为重要目标,核算结果分别为5.57亿、5.99亿 m^3 ,远远大于仅仅考虑水量需求的水文方法。另外有6种核算方法从补水量的角度核算了白洋淀生态需水量(图2b),同样可以看出,由于考虑了水质改善需求,环境改善法和物质平衡法的核算结果均显著大于水量损失法、最小水位法和水量平衡法等单纯的水文学方法。

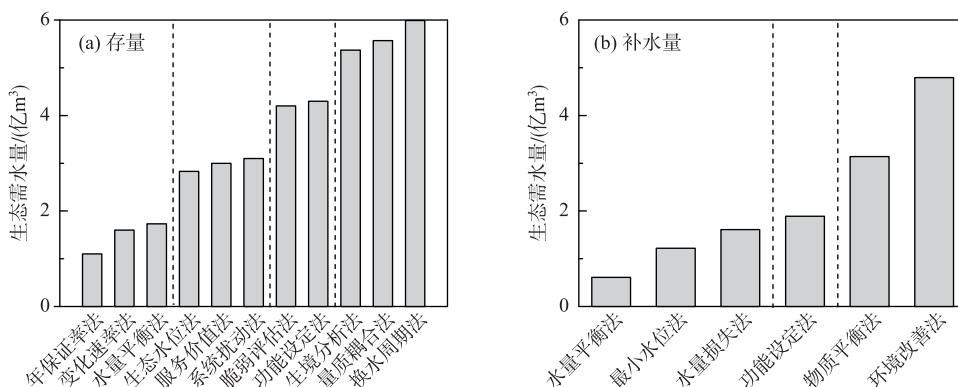


图2 不同生态需水核算方法及研究结果

Fig.2 Results from different methods of water for environment in Lake Baiyangdian

2.3 白洋淀生态水位及生态需水量分析

崔保山等^[51]早在2003年首次提出了生态需水等级概念和内涵,为后来湿地生态需水核算奠定了理论基础,其中最大生态需水量是系统可能承受的最大水量,超过该水量系统可能发生突变;适宜生态需水量是

表 1 白洋淀生态需水核算方法原理

研究方法	针对的问题	生态管理目标	原理/计算式	优点	缺点	应用频次	参考文献
水量损失法	水量型缺水	维持稳定水面	淀区净耗水需水量,即蒸散和渗漏消耗之和扣除水面降水,即 $W=A(E-P)+L$,式中, W 为生态需水量; A 为多年平均水面面积; E 为多年平均淀泊水面蒸发量; P 为多年平均降水量; L 为渗漏水量	数据易获取,不需要现场测定,计算简单、快速	较为粗略,未考虑生物作用	11	[19], [23-32]
生态水位法	过程型缺水	保障生态系统状态最优	通过对其长序列的水文资料分析,寻求该湿地频率出现较高的水文条件,然后与生态环境状况进行对照分析.如果生态环境状况也相应较好,此时水位可近似作为多年平均理想生态水位标准;如果生态环境状况较差,则近似认为最小生态水位标准	计算简单,容易理解和接受	需长系列水文及相应生态数据,但未考虑生物和水文间相互作用	10	[18], [21], [31], [33-39]
功能设定法	水量型缺水	维持正常生态环境功能	从维持和保证淀泊生态系统正常的生态环境功能的角度,考虑湖泊水面蒸发量、水生植物蒸腾量、水生生物需水量、土壤需水量、野生生物需水量、补给地下水需水量等,并对其进行整合	遵循生态优先、兼容性、最大价值和等级制原则,系统全面地计算湖泊生态需水量	需要大量生态数据,未考虑生态环境间相互作用关系	7	[19], [40-45]
量质耦合法	水质型缺水	水质达到一定标准(Ⅲ类)	通过构建湖泊水质模拟模型,模拟不同入流对淀区水质的影响,获得满足一定水质和水量要求的生态水位	从水量水质角度考虑,适用于存在水环境问题且水量充沛区域	一定程度上受水质模型制约,未考虑生态要素	3	[46-48]
最小水位法	水量型缺水	维持最小水面	满足淀泊主要生态环境功能的最小水位,即 $W_{min}=H_{min} \times A$,式中, W_{min} 为最小生态环境需水量; H_{min} 为满足淀泊主要生态环境功能的最小水位; A 为水面面积	计算简单,适合于干旱、缺水区域或人为干扰严重的湖泊	需要湖泊出入湖水量和最小水位,结果较为粗略	4	[19], [25], [31], [49]
水量平衡法	水量型缺水	维持稳定水面	基于水量平衡原理,淀区保持动态平衡时的水量或水位,即 $\Delta W_1=(P+R_1)-(R_2-E)+\Delta W_g$,式中, ΔW_1 为单位时间内的生态环境需水量; P 为多年平均降水量; R_1 为地表径流入淀泊水量; R_2 为地表径流出淀泊水量; E 为多年平均水面蒸发量; ΔW_g 为地下水变化量	适用于水量丰沛的吞吐型和受人为干扰小的湿地	单纯考虑水量过程,未考虑生物作用	2	[19], [25]
换水周期法	水质型缺水	保持良好水质条件	全部湖水交换更新一次所需要的平均水量,即 $W=0.000864T \times Q$,式中, T 为换水周期; Q 为多年平均出淀流量; W 为淀泊生态环境需水量	不需要太多数据,简单实用	在来水量较小的湖泊应用受限	1	[19]
生境分析法	过程型缺水	维持正常生态环境功能	形成和维持特定湿地景观格局和生境的需水量,以及湿地生态耗水量的总和	将水力学因素和给定物种的栖息地偏好因素相结合	生物资料不易获取,各因素之间的关系复杂	2	[40], [50]

续表 1

研究方法	针对的问题	生态管理目标	原理/计算式	优点	缺点	应用频次	参考文献
系统扰动法	过程型缺水	维护生态系统健康	比较分析不同情景水位方案和自然条件水位状态下的湿地生态系统健康状况,对各情景水位方案对生态系统的扰动程度 (APPED 指数) 做出评价, 计算公式: $APPED = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{H_i - h_{ij}}{h_{ij}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (i = 1, 2, \dots, 12; j = 1, 2, \dots, n)$ 式中: n 为评价年数; H_i 为第 i 月生态水位; h_{ij} 为第 j 年平均水位 按湿地的水质平衡, 假设湿地的物质总量恒定, 则对每一污染物质, 输入总量应等于排出总量, 即 $Q = (A \cdot C_a - O \cdot C_0 - Q_{ak}) / (C - C_{eq})$, 式中, Q 为物质平衡时的生态需水量; A 为来自排干系统的农田退水和生产生活废水; O 为出流量; $C_a, C_0, C_{eq}, C_{eq0}$ 为选定污染物质的湿地水体浓度, 来自排干系统的农田退水和生产生活废水浓度, 从湿地排出的水体浓度, 湿地生态用水浓度; Q_{ak} 为稳定分量 从生态系统服务功能核算的角度, 分析其与水量水位的相关关系, 获得最佳生态服务价值的水位	在数据资料不足的情况下, 可在一定程度上体现出生态-水量-水位之间的相互联系和影响	仅关注汛期和非汛期的生态需水, 结果相对粗略	1	[7]
物质平衡法	水质型缺水	水质达到一定标准 (III 类)		综合考虑了湿地水资源的源和汇及其水质情况, 使排入与排出湿地的污染物的量平衡	需要详细水质数据, 未考虑淀区自然净化功能, 有引水冲污嫌疑	1	[25]
服务价值法	过程型缺水	维护生态系统服务价值最大		方法较为简单, 易于理解, 考虑了人类福祉, 支撑生态需水保障	需要大量的生态服务价值核算参数, 仍为统计学法	2	[8], [21]
环境改善法	水质型缺水	水质逐步达到一定标准 (III 类)	该方法采用动态观点, 考虑水质达标所需要的时间, 湿地的水体总量和污染物浓度, 假设湿地水体污染物质浓度在 r 年后经湖泊完全混合后达到水质标准, 且每年提供的生态需水量相同, 提供的生态用水经湖泊完全混合后全部排出 选取一定序列最低水位资料, 按从大到小的顺序排列, 根据经验频率公式 $P = m / (n + 1) \times 100\%$, 取 $P = 75\%$, 计算得到相应水文年的水位	适用于污染情况较严重, 使生态系统功能受到影响的湿地	将水质改善作为目标, 缺乏对生态要素的考虑	1	[25]
年保证率法	水量型缺水	维持稳定水面		数据易获取, 计算简单; 不需要现场测定, 计算快速	较为粗略, 未考虑生物作用	1	[31]
脆弱评估法	过程型缺水	维持正常生态环境功能	构建干旱年生态脆弱性评价指标体系, 获得不同水位水量与系统脆弱性之间的关系, 进而确定满足一定要求的水量或水位	能体现生态系统的状态, 科学意义明显	计算过程较为复杂, 需要大量的生态数据	1	[20]
变化速率法	水量型缺水	维持稳定水面	根据已有的水位-面积关系曲线, 计算其斜率变化趋势, 拟合曲线二阶导数零点, 即斜率拐点处, 视为生态水位	不需要现场测定, 计算简单、快速	较为粗略, 未考虑生物作用	1	[23]

系统存在所需的最佳水量,此时系统处于最理想状态;最小生态需水量是系统维持自身发展所需的最低水量,低于该水量系统可能发生萎缩、退化甚至消失. 分析了检索的文献,有 16 篇从白洋淀最小、适宜和最大三个等级核算的结果(图 3). 统计分析表明,白洋淀最小水位为 7.45 ± 0.66 m,适宜水位为 8.61 ± 0.52 m,最大水位为 9.46 ± 0.51 m;相应的生态需水量年均最小为 1.93 亿 m^3 ,适宜需水量为 4.02 亿 m^3 ,且最大值为 6.93 亿 m^3 . 而上游水库拦蓄背景下白洋淀入淀流量小,自 1997 年以来,长期依赖于“引黄济淀”、“引岳济淀”、“南水北调”中线补水等调水工程措施,淀内水位在 7.0 m 左右波动^[52],长期处于最小水位下限,勉强维持生态基本需求.

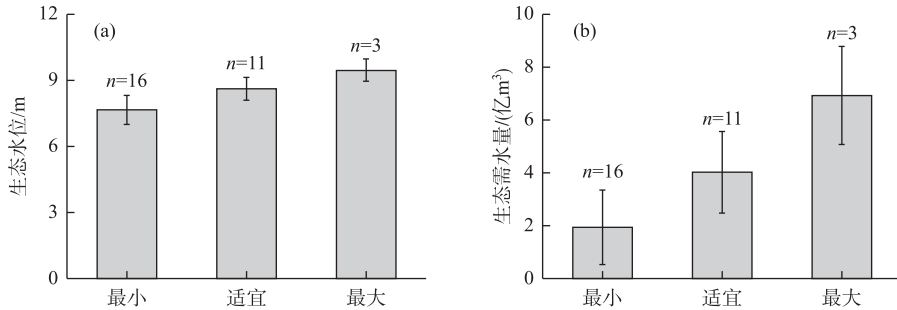


图 3 白洋淀最小、适宜和最大等级的年均生态水位(a)和生态需水量(b)

Fig.3 Annual water for environment in minimum, suitable and maximum grades in Lake Baiyangdian: (a) ecological water levels; (b) ecological water demand

有 14 篇文献从月尺度分析了白洋淀不同等级的生态水位或生态需水量(图 4). 各核算方法获得的生态需水量月际变化趋势大致相同,8 月和 9 月份生态需水量较大,5 月份最小;但各个月份最小、适宜生态需水量的变幅均比较大,适宜需水量计算结果的平均标准偏差为 1.08 亿 m^3 ;最小需水量的平均标准偏差 0.42 亿 m^3 ;体现了不同核算方法引起的差异.

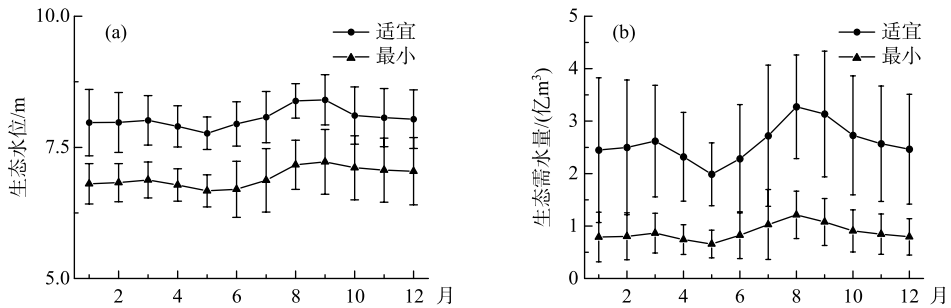


图 4 白洋淀最小和适宜的月均生态水位(a)和需水量(b)

Fig.4 Monthly water for environment in minimum and suitable grades in Lake Baiyangdian: (a) ecological water levels; (b) ecological water demand

2.4 面向生态补水的白洋淀生态需水核算成果分析

作为典型的受人工调控的浅水湖泊,许多学者认为白洋淀生态需水是指需要补充的水量,即作为水资源配置或三生用水(生产、生活和生态)的重要组成部分进行核算,该研究成果并非国际上通用的生态需水的概念,但可以对研究区的生态流量保障提供有效支撑. 共有 3 篇文献从每月生态补水的角度进行了核算,其中陈贺等^[7]和董文君等^[29]都采用了净蒸散量和渗漏损失之和获得了淀区生态补水量,2 篇文献计算的最小生态补水量分别为 0.845 亿 m^3 和 1.0 亿 m^3 ,较为接近;但适宜生态补水量差别较大,分别为 1.26 亿 m^3 和 3.1 亿~6.47 亿 m^3 ;而李经纬^[41]采用功能设定法获得了最小生态补水量 1.887 亿 m^3 、适宜生态补水量 3.389 亿 m^3 、

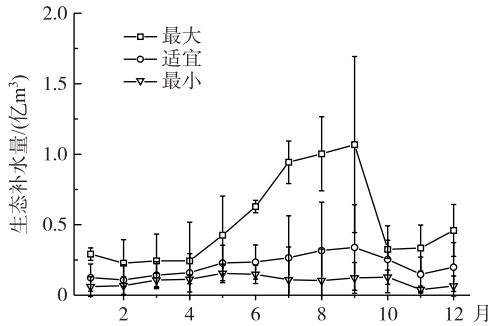


图5 白洋淀各等级月均生态补水

Fig.5 Monthly water releasing for environment in minimum, suitable and maximum grades in Lake Baiyangdian

最大生态补水量 5.909 亿 m^3 。各月生态补水量如图 5 所示,由于不同方法考虑的生态保护目标差异,导致结果变幅较大。实际上,生态保护目标、研究方法、关键参数、假设条件、数据基础、时空尺度,均会对生态需水量的核算结果产生重要的影响,也是科学合理核算生态水量、科学指导长效生态补水的重要前提。

3 白洋淀生态需水核算研究中存在的问题

3.1 生态管理目标选取不同,导致核算结果差别较大

当前白洋淀采用的生态需水核算方法中,有仅仅考虑水文要素的水量平衡法、年保证率法、水面变化速率法,也有考虑水质改善的量质耦合法、换水周期法、环境改善法和物质平衡法等,还有从生态系统整体健康、功能最大的生态水文学方法,涵盖过多研究目标和要求,平行的单目标或多目标方法体系并存,故因生态管理目

标选择的不同,直接导致了生态需水核算结果的显著差异,考虑水质改善的核算结果和关注湖泊生态系统功能维持的核算结果分别是单纯水量保障相关方法的 4~6 倍和 1.5~2.5 倍;然而白洋淀生态需水内涵应该如何界定,生态管理目标应该是什么需要进一步明确。据 2018 年布里斯班宣言和全球行动议程^[1],生态需水是指维持水生生态系统所必需的一定数量、时间和水质的淡水流量或水位,用以维持人类文化、经济、可持续生产生活及人类福祉。当前国际主流来看,在生态需水核算中生态管理目标旨在保证健康可持续的水生生态系统。白洋淀生态环境治理与保护规划^[17]要求白洋淀以水面恢复、水质达标、生态修复为目标进行综合治理,逐步恢复“华北之肾”功能。因此,在当前水量、水质、生态问题并存的情况下,有必要结合具体阶段具体分析。当前入淀河流多数断流,入淀水量逐年减少,白洋淀水质整体处于 IV 类以下的情况下,水质改善是白洋淀生态环境功能正常发挥的限制条件;未来一段时间,随着雄安新区建设、白洋淀污染源控制、环境质量改善,可将生态管理目标重点放在生态系统功能维持上。

3.2 湖泊生态-水文响应规律及机制缺乏,难以保障生态需水核算结果科学性

在生态需水核算方法中,Poff 等提出了近自然水文情势法 IHA/RVA 法^[53]曾一度被生态需水学者推崇,该方法适用于人工化程度相对较低的水生生态系统,但我国并不能广泛适用,2017 年 Poff 进一步提出了该方法不能适应变化环境中生态需水核算的缺陷和不足^[54]。当前国际上比较认可的是 ELOHA 法^[55],该方法属于整体法,通常根据区域内多条河流的已有水文和生态数据库,获得不同类型水体的流量-生态响应关系曲线,是制定湿地生态需水标准的基础。此外,国内学者及管理者也逐步将河湖生态需水的管理目标从水文均值、水质指标、单一鱼类保护逐步发展到更多关注生态系统结构、功能、健康等层面上来,推动了对河湖生态需水内涵上的理解和对湖泊管理上的提升。当前白洋淀水文数据比较翔实,但是生态数据的观测资料精度较低,更缺乏有效的时序序列资料,难以获取有效的水文-生态响应曲线;而已有白洋淀生态水位法^[18]中则是通过水文频率(用月均和年均水位表示)的高低进行估算的,认为长时间尺度的高频水位是生态系统已经适应的水位,对应水量即为生态需水,尚缺少湖泊水文-生态响应规律和机制解释,也缺乏从整体角度分析淀区生态系统健康、生态系统服务、生物多样性等与水文关系的阐释。

3.3 生态需水核算中时间尺度考虑不足,不利于生态系统健康及多样性维持

当前研究中多关注白洋淀年均水位以及年内最小、适宜、最大水位等,仅有 14 个案例中涉及到了月均水位的变化,鲜有学者研究关注水文脉冲及涨落过程^[8]。多种国际上较为先进的生态需水核算方法中(如 IHA/RVA 法、ELOHA 等),均特别强调了随时间变化的动态需水特征,以及营造年内和年际高流量脉冲对于河湖生态系统多样性的维持极具重要意义^[53-55]。尽管高流量脉冲与生物生命周期的相关关系机理尚不够清晰,但众多研究显示年内周期性变化和高流量脉冲模式共存,为湖泊湿地提供了动态的水位条件,使水生植物与湿生植物交替生长;水位涨落变化会引发鱼类等生物如产卵繁殖和洄游等特定行为,是水生生物群

落多样性的关键^[56]。由于白洋淀生态需水的科技支撑不足,以往淀区生态补水时往往根据经验临界水位(6.0 m)作为补水需求的指示,导致白洋淀实际水位变化中高流量脉冲涨落过程不明显,次数偏少,且与历史水文情势过程严重不匹配,年内高水位(1997—2011年)相比以往(1959—1996年)的8—9月,提前到了3月,导致即使在每年坚持补水1~2次的情况下,生态效应仍不容乐观^[57]。白洋淀生态环境治理与保护规划^[17]要求淀区正常水位达到6.5~7.0 m,非植物生长季可适当降低,因此为改善和提升生态系统健康,有必要结合ELOHA等先进的河流生态流量核算技术,在明确淀区水位变化与生态效应响应曲线的基础上,合理界定白洋淀年内及年际生态需水的动态。

3.4 缺乏考虑淀区内部空间异质性,难以支撑新区建设中淀区科学精细管理

已有白洋淀生态需水研究中,均将全淀概化为一个静态的、完整的浅水湖泊湿地。一方面,缺乏淀区水面-植被-台田等不同景观格局差异的考虑,难以支撑白洋淀生态环境治理和保护规划^[17]中关于加强淀区水动力过程调控和精细化管理的需求;另一方面,淀区库容曲线一直沿用1950s的历史数据,在淀内底泥淤积以及疏浚等过程影响下,淀底高程与历史状态已经有较大差异,导致了当前生态需水核算成果的不准确性。实际上,就自然力而言,湖泊会因地质构造运动和长期淤积致使湖水变浅,尤其是白洋淀草型湖泊,只入流、不出流的水文现状以及过剩的氮磷营养物质使水生生物生长茂盛,沼泽化趋势明显^[58]。当前生态需水核算结果存在高度概化,只提供淀区单一需水量值,缺少空间分布信息的缺陷。也有研究者对淀区景观格局演变开展相关研究^[59-60],阐释明水面、芦苇沼泽、农田和居民地之间的变化及转换,定性分析水位变化、人类活动、降水等驱动力对景观格局指数的影响。

3.5 孤立研究湖泊水量需求,无法有效支撑生态补水调控的实施

现有研究中多针对白洋淀淀区的生态需水及生态补水量开展核算,缺乏考虑水文连通背景下的河湖沼关系。白洋淀生态环境治理与保护规划中明确要求建立多水源补水机制,开展水量联合调度,实现河淀联动,恢复淀泊水动力过程。湿地生态水文调控不仅要解决如何补水问题,还要解决如何排水的问题,恢复与维持湿地生态系统合理的水文情势、安全的水质标准和良好的生态功能。白洋淀从历史上九河入梢,演变为仅有府河、孝义河承接上游县市城镇污水处理厂出水,水量缺乏水质恶化并存;而当前雄安新区建设新形势下需要统筹引黄入冀补淀、上游水库、本地非常规水资源以及“南水北调”水资源,河湖水系关系复杂多变。新区建设的高起点规划、高规格要求下,新区要求建设水系连通工程,恢复淀泊水动力过程,形成“一淀、多廊”的生态格局。因此,忽略水文水动力、水质因素,以及河湖沼之间的水力连通关系,孤立地计算白洋淀淀区水面水位需求是远远不够的,很难有效支撑白洋淀多源生态补水调控和淀泊生态水文过程优化。

4 新形势下白洋淀生态需水核算研究展望

大量学者针对白洋淀生态水位开展了系统而有深度的研究,从水量平衡、植被需水、蒸发渗漏损失、水质改善、生境脆弱评估等不同角度核算了白洋淀最小、适宜和最大生态水位、生态补水量等,对白洋淀生态保护与修复起到了积极的科技支撑作用。河北雄安新区建设规划给白洋淀生态环境提出了新的要求和挑战,在高起点规划、高标准建设雄安新区要求下,精准核算白洋淀生态水位和大清河水系廊道生态基流,是构建多源补水机制、形成“一淀”、“多廊”生态格局的前提。以下从分时分区的淀区生态需水精细化核算、分时分段的淀区生态需水质量耦合模拟、考虑河湖连通的淀区水动力过程恢复等方面提出相应的对策和建议。

4.1 分级分区的淀区生态需水精细化核算

白洋淀淀区内有大小不等的143个淀泊和3700多条沟壕,零星分布有36个纯水村,常驻农村居民达10万人以上,河淀相连,芦苇-台田-水域镶嵌,景观格局复杂;且淀底高程一般为5.5~6.5 m,壕沟沟底高程为6.0~7.0 m,芦苇高程在7.5~8.0 m,园田高程在9.0 m以上^[61],不同季节、不同水位条件下淀区核心水域、植被格局的空间异质性变化明显。为实现白洋淀淀区生态需水的科学精细核算,从湖沼湿地生态需水机制的角度,对淀区进行生态功能划分并分时分区开展生态需水的相关研究势在必行。当前我国的生态功能分区工作还主要集中在流域、省级和全国等大尺度上,对于单个湖泊进行的生态功能分区工作比较少,仅鄱阳湖开展了科学探讨^[62]。

未来研究中,可通过高分辨率遥感影像解译分析白洋淀不同时期水面-植被-台田之间的景观格局特

征,构建白洋淀生态系统服务时空模拟模型(如 InVEST 模型等),对其栖息地质量、碳储量、水质净化、文化服务等重要生态系统服务进行空间化和动态化的定量评估,解析白洋淀生态功能的空间异质性,并结合两规提出白洋淀生态功能的多级分区方案;对于台田芦苇沼泽区域,分析不同水位与淀区生态格局关系,明确水位波动、季节差异对植被分布格局和蒸散发过程的影响,建立淀区消耗性需水核算方法;针对淀区核心水域,建立水位水量驱动下的湖泊水域生态系统模拟模型(如 PCLake, IPH-ECO 等)^[63-64],模拟水位对湖泊生态系统演变的驱动机制,阐明生态要素-水位水量之间的响应关系曲线,耦合消耗性需水动态,形成不同功能区划的白洋淀生态水位核算技术及阈值方案(图 6)。

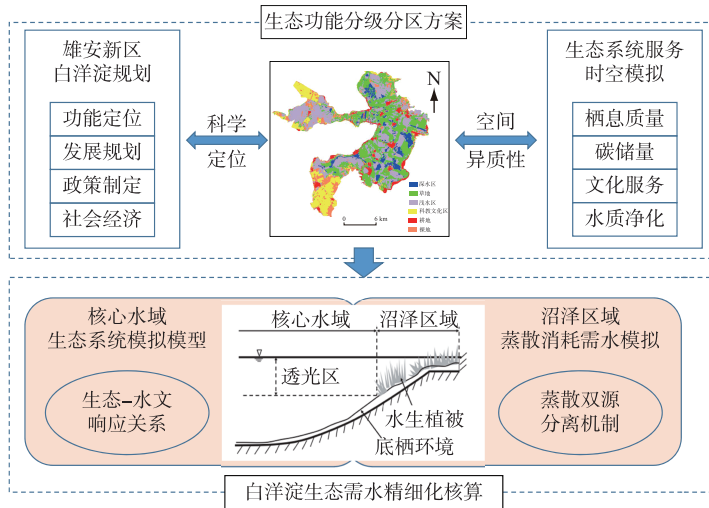


图 6 白洋淀生态需水精细核算的研究思路

Fig.6 Framework of fine calculation of water for environment in Lake Baiyangdian

4.2 分时分段的淀区生态需水量质耦合模拟

虽然生态需水有水量和水质两重含义,但是在内源、外源污染得不到控制的情况下,核算生态水位既不符合可持续发展,也达不到有效指导生态补水的效果.近年来,白洋淀水质长期处于 IV~劣 V 类之间,富营养化问题及沼泽化趋势并存,水质达标率不足 25%,白洋淀中水村居民的生活废水、垃圾渗滤水等得不到即时管控,淀外污染源尚未彻底切断,污染物总量居高不下.中国环境状况公报显示,2005—2011 年白洋淀水质属于劣 V 类,2012—2014 年为重度污染湖泊.《河北雄安新区规划纲要》明确表示,要修复水体底部水生动物栖息生态环境,提升淀泊水环境质量,将白洋淀水质逐步恢复到 III~IV 类.然而任何修复工程都不是一蹴而就,白洋淀也不例外.

有必要在考虑水质管理措施和目标的前提下分阶段核算白洋淀生态需水量,实现白洋淀水生态环境的系统治理与整体修复.白洋淀系统治理措施包括控源、净淀和生态补水等措施,其中,控源重点关注包括淀外点源和面源在内的陆上污染源、纳污支流、入淀河流、草型河口的各项污染源负荷削减;净淀主要是淀内及淀中村生活污水、生活垃圾、畜禽养殖污染治理以及科学精准的底泥疏浚、沼泽化控制等;生态水文调控包括引黄入冀补淀、上游水库(安格庄、西大洋、王快、龙门等)及本地非常规水资源在内的多源长效补水机制的构建.要科学合理量化淀泊生态需水过程,就需要在充分考虑控源、净淀等系统治理措施的分阶段实施的条件,建立白洋淀水文-水动力-水质耦合模型(如 MIKE21, Delft3D 等),进而通过量质耦合过程模拟,确定不同阶段的生态需水调控方案.

4.3 考虑河湖连通的淀区水动力过程恢复

《河北雄安新区规划纲要》明确指出,“建设水系连通工程,联合调度安格庄、西大洋、王快、龙门等上游水库水量,恢复淀泊水动力过程”.而白洋淀沟壑分布复杂,围埝众多,且多年来依赖于补水维持淀区最小水

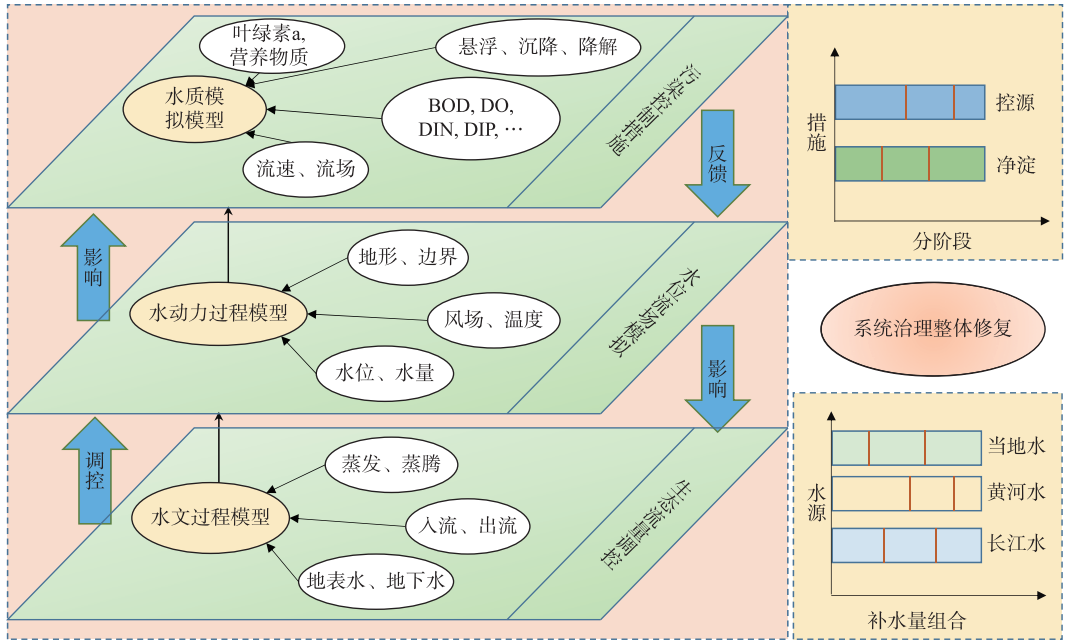


图 7 基于水文-水动力-水质耦合模型的生态需水调控研究思路
 Fig.7 Regulation framework of water for environment based on hydrological-hydrodynamic-water quality coupling mode in Lake Baiyangdian

位,尚无水下泄,导致了极弱的淀泊水动力过程. 作为淀区中物质输送、迁移和扩散的主要驱动力,水动力过程对淀泊生态系统的演变起着重要的作用^[65],特别是浅水、空间异质等特征,水文连通对水动力过程恢复举足轻重. 伴随着强烈的多源补水需求,水文连通框架及关键技术体系研究成为白洋淀生态水文调控工作的重点,特别是新区规划建设新形势新要求下,引水水源选择、引水路线优化、生态指标筛选、补水优先次序、组合模式、时间展布均需要科学合理的技术支撑.

未来研究中,需要从水文连通全新视角来开展白洋淀生态水文调控、提升淀内生态水动力过程和生态系统自我修复能力,以流场分布、连通强度、滞留时间以及水龄变化等重要参数变化作为表征^[66-68],重点关注并开展白洋淀流域水系连通演变过程及驱动、水系网络构建与优化、连通格局强度及时效的生态效应,生态补水的优先次序及组合模式和多源补水长效机制构建等几个方面(图 8).

5 结论

1) 系统分析了国内外文献中关于白洋淀生态需水核算的研究现状,研究取得了较为丰硕的成果,从存量的角度,白洋淀最小生态水位为 7.45 ± 0.66 m,适宜水位为 8.61 ± 0.52 m,最大水位为 9.46 ± 0.51 m;各等级生态需水月际变化趋势大致相同,8-9 月份最大,5 月份最小,但各月不同等级生态需水量的变幅较大;从通量的角度,白洋淀最小生态补水量为 1.35 亿 m^3 ,适宜补水量 2.40 亿 m^3 ,最大生态补水量 6.20 亿 m^3 ,研究成果在一定程度上支撑了现阶段白洋淀生态补水.

2) 在雄安新区高起点规划、高标准建设的新形势下,当前研究成果尚不能很好契合与支撑多源长效补水需求,如不同生态修复阶段各类生态需水核算方法的适应性问题;湖泊生态-水文响应规律及机制缺乏,难以保障生态需水核算结果科学性;存在对生态需水核算中时间维度考虑不足且缺乏考虑淀区内部空间异质性的问题,难以支撑新区建设中淀区科学精细管理;且多孤立研究湖泊水量需求,尚未考虑水文连通,无法有效支撑生态补水调控的实施.

3) 为推进白洋淀生态需水成果进一步提升,综合已有研究和热点前沿,本文提出分时分区的淀区生态

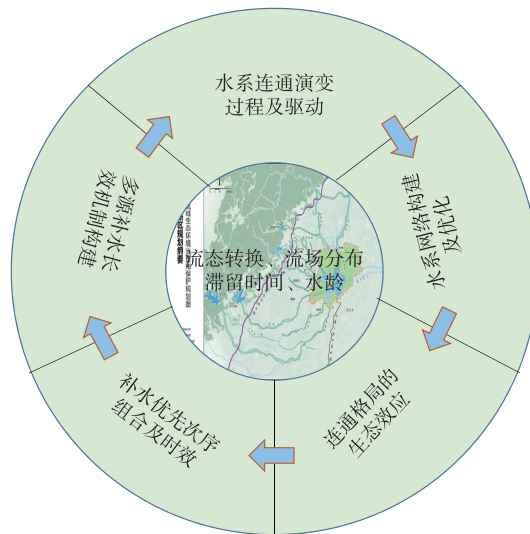


图 8 水系连通及淀泊水动力过程恢复的研究思路

Fig.8 Restoration framework of river-lake hydrological connectivity and hydrodynamic process in Lake Baiyangdian

需水精细化核算、分时分段的淀区生态需水质量耦合模拟、考虑河湖连通的淀区水动力过程恢复提精准核算等几个方面的建议和展望,以期科学支撑新区多源补水长效机制的构建和“一淀、多廊”生态格局的形成。

6 参考文献

- [1] Arthington AH, Bhaduri A, Bunn SE *et al.* The brisbane declaration and global action agenda on environmental flows. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, **6**: 1-15.
- [2] Horne A, Webb A, Stewardson M *et al.* Water for the environment: policy, science, and integrated management (1st Edition). Cambridge, MA: Elsevier, 2017.
- [3] Liu JL, Yang ZF. A study on the calculation methods of the minimum eco-environmental water demand for lakes. *Journal of Natural Resources*, 2002, **17**(5): 604-609. [刘静玲, 杨志峰. 湖泊生态环境需水量计算方法研究. 自然资源学报, 2002, **17**(5): 604-609.]
- [4] Cui Y, Zhang Q, Chen XH *et al.* Advances in the theories and calculation methods of ecological water requirement. *J Lake Sci*, 2010, **22**(4): 465-480. DOI: 10.18307/2010.0401. [崔瑛, 张强, 陈晓宏等. 生态需水理论与方法研究进展. 湖泊科学, 2010, **22**(4): 465-480.]
- [5] Zhang JY, Wang XH, Yang Q *et al.* Study on safeguard measures of ecological water demand for major rivers and lakes in China. *China Water Resources*, 2017, **23**: 8-11, 15. [张建永, 王晓红, 杨晴等. 全国主要河湖生态需水保障对策研究. 中国水利, 2017, **23**: 8-11, 15.]
- [6] Feng XQ, Zhang GX. Research advances in wetlands ecological water requirement. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, **27**(12): 2228-2234. [冯夏清, 章光新. 湿地生态需水研究进展. 生态学杂志, 2008, **27**(12): 2228-2234.]
- [7] Chen H, Yang Y, Yu SW *et al.* Study on ecological water demand based on assessment of ecosystem disturbance degree in the Baiyangdian Wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(23): 7218-7226. [陈贺, 杨盈, 于世伟等. 基于生态系统受扰动程度评价的白洋淀生态需水研究. 生态学报, 2011, **31**(23): 7218-7226.]
- [8] Yang W, Yang ZF. Evaluation of sustainable environmental flows based on the valuation of ecosystem services: A case study for the Baiyangdian Wetland, China. *Journal of Environmental Informatics*, 2014, **24**(2): 90-102.
- [9] Zhou LF, Xu SG, Li QS *et al.* Safety threshold of eco environmental water requirement in wetland. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, **38**(7): 845-851. [周林飞, 许士国, 李青山等. 扎龙湿地生态环境需水量安全阈值的的研究. 水利学报, 2007, **38**(7): 845-851.]
- [10] Liu JY, Zhang Q, Gu XH. Evaluation of ecological flow with considerations of hydrological alterations in the Poyang Lake

- basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **35**(16): 5477-5485. [刘剑宇, 张强, 顾西辉. 水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量. *生态学报*, 2014, **35**(16): 5477-5485.]
- [11] Liu JY, Zhang Q, Sun P *et al.* Minimum ecological water requirements of the Poyang Lake. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2014, **53**(4): 149-153. [刘剑宇, 张强, 孙鹏等. 鄱阳湖最小生态需水研究. *中山大学学报:自然科学版*, 2014, **53**(4): 149-153.]
- [12] Yan WM, Liu L, Wang CW. Simplified solution for minimum ecological water demand in freshwater lake and its application. *Water Resources and Power*, 2012, **30**(7): 6-8. [燕文明, 刘凌, 王翠文. 淡水湖泊最小生态需水量简易求解方法及应用. *水电能源科学*, 2012, **30**(7): 6-8.]
- [13] Xu H, Lei YF, Fan YY *et al.* Assessment of the interconnection demand of the river-lake system in the Lake Taihu basin. *J Lake Sci*, 2013, **25**(3): 324-329. DOI: 10.18307/2013.0302. [徐慧, 雷一帆, 范颖骅等. 太湖河湖水系连通需求评价初探. *湖泊科学*, 2013, **25**(3): 324-329.]
- [14] Hu CM, Narengerile, You L. Study of ecological water levels of Bosten Lake for water quality management. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(2): 748-755. [胡春明, 娜仁格日乐, 尤立. 基于水质管理目标的博斯腾湖生态水位研究. *生态学报*, 2019, **39**(2): 748-755.]
- [15] Xu XZ, Wang H, Dong ZC *et al.* Minimum ecological water requirement for Nansi Lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, **37**(7): 784-788. [徐志侠, 王浩, 董增川等. 南四湖湖区最小生态需水研究. *水利学报*, 2006, **37**(7): 784-788.]
- [16] Yang ZF, Cui BS, Sun T *et al.* eds. Mechanism, model and regulation of environmental flows in wetlands. Beijing: Science Press, 2012. [杨志峰, 崔保山, 孙涛等. 湿地生态需水机理, 模型和配置. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [17] The Hebei Provincial Party Committee and Provincial Government. Baiyangdian Ecological Environment Management and Protection Plan (2018-2035), 2019. [河北省委、省政府. 白洋淀生态环境治理和保护规划(2018-2035), 2019.]
- [18] Zhong P, Yang ZF, Cui BS *et al.* Studies on water resource requirement for eco-environmental use of the Baiyangdian Wetland. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(8): 1119-1126. [衷平, 杨志峰, 崔保山等. 白洋淀湿地生态环境需水量研究. *环境科学学报*, 2005, **25**(8): 1119-1126.]
- [19] Liu LH, Cheng WQ, Liu CG. Study on the water supply & requirement of the Baiyangdian Lake. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2005, **3**(3): 22-23. [刘立华, 程伍群, 刘春光. 白洋淀当前水量供需状况的研究. “南水北调”与水利科技, 2005, **3**(3): 22-23.]
- [20] Yuan Y. Wetland eco-hydrology change and comprehensive measures under drought; a case study of vegetation hydrology in wetland [Dissertation]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013. [袁勇. 干旱情景下湿地生态水文演变及综合应对—以湿地植被水文为例 [学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2013.]
- [21] Yang W. Variations in the ecosystem service values in response to changes in environmental flows; A case study of Baiyangdian Lake, China. *Lake and Reservoir Management*, 2011, **27**(1): 95-104.
- [22] Yang W, Yang ZF, Qin Y. An optimization approach for sustainable release of e-flows for lake restoration and preservation; Model development and a case study of Baiyangdian Lake, China. *Ecological Modelling*, 2011, **222**(14): 2448-2455.
- [23] Yang ZF, Hu P, Zhao Y *et al.* Study on ecological water demand and safeguard measures of Baiyangdian Lake and the upstream rivers under the background of Xiong'an New Area. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2018, **16**(6): 563-570. [杨泽凡, 胡鹏, 赵勇等. 新区建设背景下白洋淀及入淀河流生态需水评价和保障措施研究. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, **16**(6): 563-570.]
- [24] Wang XZ. Instream flow requirements in Hebei Province. *Water Resources Planning and Design*, 2005, **3**: 12-16. [王晓贞. 河北省河道内生态环境需水量分析. *水利规划与设计*, 2005, **3**: 12-16.]
- [25] Zhu J, Wang LM, Jia FX *et al.* Calculation methods and case study of wetlands ecological water demand in Northern China. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, **1**(1): 112-118. [朱婧, 王利民, 贾凤霞等. 我国华北地区湿地生态需水量研究探讨与应用实例. *环境工程学报*, 2007, **1**(1): 112-118.]
- [26] Wang Q, Liu JL, Yang ZF. Environmental water demand of Baiyangdian Lake at different times and places. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(7): 1447-1454. [王强, 刘静玲, 杨志峰. 白洋淀湿地不同时空水生植物生态需水规律研究. *环境科学学报*, 2008, **28**(7): 1447-1454.]
- [27] Dong N. Analysis of ecological drought and supplementing water to Baiyangdian wetland from two reservoirs linking system

- [Dissertation]. Tianjin: Agricultural University of Hebei, 2009. [董娜. 白洋淀湿地生态干旱及两库联通补水分析[学位论文]. 天津: 河北农业大学, 2009.]
- [28] Cao XZ, Dong WJ, Huang Q *et al.* An empirical study on ecological water right in Baiyangdian Wetland. *Resources Science*, 2011, **33**(8): 1431-1437. [曹学章, 董文君, 黄强等. 白洋淀流域湿地生态水权的实证研究. 资源科学, 2011, **33**(8): 1431-1437.]
- [29] Dong WJ, Cao XZ, Hu LL. Calculation of ecological water demand for Baiyangdian wetland. *China Science and Technology Information*, 2011, **11**: 23-25. [董文君, 曹学章, 胡丽丽. 白洋淀湿地生态需水量计算. 中国科技信息, 2011, **11**: 23-25.]
- [30] Yang Y, Chen H, Yu SW *et al.* Study on comprehensive operation of Xidayang reservoir based on improved operation chart. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, **31**(4): 139-144. [杨盈, 陈贺, 于世伟等. 基于改进调度图的西大洋水库综合调度研究. 水力发电学报, 2012, **31**(4): 139-144.]
- [31] Zhang GN, Cao XZ, Mao TJ. Ecological benefit assessment of water supplement to Baiyangdian Wetland. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, **29**(5): 605-611. [张赶年, 曹学章, 毛陶金. 白洋淀湿地补水的生态效益评估. 生态与农村环境学报, 2013, **29**(5): 605-611.]
- [32] Zhang H, Guo LF, Bai X *et al.* Study on ecological water demand and securing measures for wetlands of great significance in Haihe River Basin. The 4th Water ecological civilization forum. Duyun Cith, 2016, 21-22, Sep., 33-36. [张浩, 郭丽峰, 白雪等. 海河流域重要湿地生态需水及保障措施研究. 2016年第四届水生态文明论坛. 都匀市, 2016年9月21-22日, 33-36.]
- [33] Yin JM. Analysis of chaotic characteristic of water level and study on water supplement scheme in Baiyangdian [Dissertation]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2008. [尹健梅. 白洋淀水位混沌特性分析及补水方案研究[学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2008.]
- [34] Yan XX, Zhang SZ, Li SL *et al.* Study on optimal water level of comprehensive bearing capacity to water resources in Baiyangdian. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, **7**(3): 81-83. [阎新兴, 张素珍, 李素丽等. 白洋淀水资源综合承载力最佳水位研究. “南水北调”与水利科技, 2009, **7**(3): 81-83.]
- [35] Liu Y, Cheng WQ, Yin JM *et al.* Ecological water level and supplementing water plan in Baiyangdian wetland. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2010, **33**(2): 107-109. [刘越, 程伍群, 尹健梅等. 白洋淀湿地生态水位及生态补水方案分析. 河北农业大学学报, 2010, **33**(2): 107-109.]
- [36] Zhou J. Study on the optimal allocation of water resources of Baiyangdian Basin [Dissertation]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2010. [周婧. 白洋淀流域水资源优化配置研究[学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2010.]
- [37] Wang Q. Research on adaptive mechanism to drought and integrated regulation in Baiyangdian Wetland [Dissertation]. Shanghai: Donghua University, 2013. [王青. 白洋淀湿地对干旱的适应机制及综合调控研究[学位论文]. 上海: 东华大学, 2013.]
- [38] Yang Y, Yin XA, Chen H *et al.* Determining water level management strategies for lake protection at the ecosystem level. *Hydrobiologia*, 2014, **738**: 111-127.
- [39] Gao XY, Guo Y, Liu MZ. Ecological water requirements of rivers and lakes in Baiyangdian Basin. The 5th China Hydrology Ecology Conference. Guiyang, 2017, 27-29 Sep. [高晓月, 郭勇, 刘明喆. 白洋淀流域河湖生态环境需水研究. 2017(第五届)中国水生态大会论文集. 贵阳, 2017, 9月27-29日.]
- [40] Zhao X, Cui BS, Yang ZF. A study of the lowest ecological water level of Baiyangdian Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(5): 1033-1040. [赵翔, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究. 生态学报, 2005, **25**(5): 1033-1040.]
- [41] Li JW. Study on water environment quality and eco-environmental water requirement of Baiyangdian [Dissertation]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2008. [李经纬. 白洋淀水环境质量综合评价及生态环境需水量计算[学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2008.]
- [42] Tu XY, Wu TS. Eco-environmental water requirements in typical wetlands. *China Rural Water and Hydropower*, 2009, **12**: 19-23. [涂向阳, 吴天胜. 典型性湿地系统生态环境需水量研究. 中国农村水利水电, 2009, **12**: 19-23.]
- [43] Lu GX. Ecological water requirement of important natural wetlands in Hebei Province [Dissertation]. Baoding: Hebei Normal University, 2011. [卢国兴. 河北省重要自然湿地生态需水量研究[学位论文]. 保定: 河北师范大学, 2011.]
- [44] Ma T. Assessment of eco-environmental water consumption and water utilization effectiveness in wetland ecosystem [Dissertation]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. [马涛. 湿地生态环境耗水规律及水资源利用效用评价[学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2011.]

- 论文]. 大连: 大连理工大学, 2011.]
- [45] Pang AP, Li CH, Sun T *et al.* Trade-off analysis to determine environmental flows in a highly regulated watershed. *Scientific Reports*, 2018, **8**: 14130.
- [46] Zheng C, Yang W, Yang ZF. Strategies for managing environmental flows based on the spatial distribution of water quality: A case study of Baiyangdian Lake, China. *Journal of Environmental Informatics*, 2011, **18**(2): 84-90.
- [47] Yang Y, Chen H, Yang ZF. Integration of water quantity and quality in environmental flow assessment in wetlands. The 18th Biennial Conference of International Society for Ecological Modelling. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, **13**: 1535-1552.
- [48] Yang Y, Yin XA, Yang ZF. Environmental flow management strategies based on the integration of water quantity and quality, a case study of the Baiyangdian Wetland, China. *Ecological Engineering*, 2016, **96**: 150-161.
- [49] Zhang DJ. The lowest ecological water level of Baiyangdian and ecological health protection measures. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2013, (1): 16-18. [张东江. 白洋淀最低生态水位及生态健康保护措施. 水科学与工程技
术, 2013, (1): 16-18.]
- [50] Zhao ZX. Coupling mechanism of eco-hydrological processes and integrated regulation in Baiyangdian Wetland [Dissertation]. Tianjin: Tianjin University, 2012. [赵志轩. 白洋淀湿地生态水文过程耦合作用机制及综合调控研究[学位论文]. 天津: 天津大学, 2012.]
- [51] Cui BS, Yang ZF. The classification and case study on eco-environmental water requirement of wetlands. *Resources Science*, 2003, **25**(1): 21-28. [崔保山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量等级划分与实例分析. 资源科学, 2003, **25**(1): 21-28.]
- [52] Wang KL, Li HT, Wu AM *et al.* An analysis of the evolution of Baiyangdian wetlands in Hebei Province with artificial recharge. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **39**(5): 549-558. [王凯霖, 李海涛, 吴爱民等. 人工补水条件下白洋淀湿地演变研究. 地球学报, 2018, **39**(5): 549-558.]
- [53] Richter BD, Baumgartner JV, Powell J *et al.* A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 1996, **10**: 1163-1174.
- [54] Poff NL. Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flows challenges in a non-stationary world. *Freshwater Biology*, 2017, **63**(8): 1011-1021.
- [55] Poff NL, Richter BD, Arthington AH *et al.* The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 2010, **55**: 147-170.
- [56] Dong ZR, Wang HT, Zhao JY *et al.* Eco-survey and planning method for rehabilitation of connectivity of river-lake water system. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2013, **44**(11): 8-14. [董哲仁, 王宏涛, 赵进勇等. 恢复河湖水系连通性生态调查与规划方法. 水利水电技术, 2013, **44**(11): 8-14.]
- [57] Yang W, Yang ZF. Effects of long-term environmental flow releases on the restoration and preservation of Baiyangdian Lake, a regulated Chinese freshwater lake. *Hydrobiologia*, 2014, **730**(1): 79-91.
- [58] Cui BS, Han Z, Li X *et al.* eds. Driving mechanisms and regulating measures for lake terrestrialization: A case of Lake Baiyangdian. Beijing: Science Press, 2017. [崔保山, 韩祯, 李夏等. 白洋淀沼泽化驱动机制与调控模式. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [59] Zhuang CW, Ouyang ZY, Xu WH *et al.* Landscape dynamics of Baiyangdian Lake from 1974 to 2007. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(3): 839-848. [庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华等. 近 33 年白洋淀景观动态变化. 生态学报, 2011, **31**(3): 839-848.]
- [60] Zhang MM, Wu XQ. Changes in hydrological connectivity and spatial morphology of Baiyangdian wetland over the last 20 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(12): 4205-4213. [张梦嫫, 吴秀芹. 近 20 年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变. 生态学报, 2018, **38**(12): 4205-4213.]
- [61] Anxin Local Chronicles Compilation Committee ed. Anxin Chronicles. Beijing: Xinhua Publishing House, 2000. [安新县地方志编纂委员会. 安新县志. 北京: 新华出版社, 2000.]
- [62] Zhang ZF. Wetland ecosystem function importance zoning of Poyang Lake [Dissertation]. Nanchang: Nanchang University, 2014. [张祖芳. 鄱阳湖湿地生态功能重要性分区研究[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2014.]
- [63] Janse JH, Scheffer M, Lijklema L *et al.* Estimating the critical phosphorus loading of shallow lakes with the ecosystem model PCLake: Sensitivity, calibration and uncertainty. *Ecological Modelling*, 2010, **221**: 654-665.

- [64] Janssen ABG, van Wijk D, van Gerven LPA *et al.* Success of lake restoration depends on spatial aspects of nutrient loading and hydrology. *Science of the Total Environment*, 2019, **679**: 248-259.
- [65] Wu SQ, Dai JY, Shi S. Progress in assessment of hydro-ecological effects in lakes induced by water diversion. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2018, **37**(6): 14-27. [吴时强, 戴江玉, 石莎. 引水工程湖泊水生态效应评估研究进展. 南昌工程学院学报, 2018, **37**(6): 14-27.]
- [66] Ulrich S, Rita A, De Senerpont DL *et al.* Beyond the plankton ecology group (PEG) model: mechanisms driving plankton succession. *The Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, **43**: 429-448.
- [67] Tim C. Hydrologic connectivity as a framework for understanding biogeochemical flux through watersheds and along fluvial networks. *Geomorphology*, 2017, **277**: 133-144.
- [68] Zhang LL, Yin JX, Zhang SH *et al.* Ecological operation schemes on water diversion from Danjiangkou Reservoir to Baiyang Lake. *Wetlands Science*, 2012, **10**(1): 32-39. [张丽丽, 殷峻暹, 张双虎等. 丹江口水库向白洋淀补水生态调度方案研究. 湿地科学, 2012, **10**(1): 32-39.]