

白洋淀水量平衡生态风险评价

林梦婧^{1,2}, 陈丁楷^{1*}, 石龙宇¹

(1. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 福建 厦门 361021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:在河北省雄安新区发展建设背景下,评价白洋淀的水量平衡生态风险,旨在为白洋淀周边水资源规划和管理提供依据,实现建设绿色生态宜居雄安新区的规划发展目标。通过构建白洋淀水量平衡分析模型,利用历史数据和最新的规划数据,预测白洋淀入淀水资源量、周边用水量和水体的自然消耗量;根据预测结果,在生态适宜水位上,计算白洋淀的水资源缺口和水量平衡概率,确定白洋淀的水量平衡风险等级。研究结果表明,白洋淀存在平均每年 $0.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的水资源缺口;白洋淀达不到在适宜水位上的水量平衡的概率为50.2%,白洋淀有中等水量平衡生态风险;未来,白洋淀的消耗水量主要是周边区域的用水量,占总消耗水量的77.92%,其中,农业用水量占总消耗水量的48.63%。在雄安新区建设过程中,建议从构建水源互通和多源互补的雄安新区供水保障体系、提高居民、工农业和生态水资源利用效率、建设精细化智慧水资源管理体系三方面采取措施,以维护白洋淀的水量平衡。

关键词:白洋淀;水量平衡;水位;水资源;风险评价;雄安新区

中图分类号:YV213 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-5948(2023)01-028-07

2017年4月1日,中共中央、国务院印发通知,决定设立河北雄安新区。位于河北省雄安新区境内的白洋淀是雄安新区发展建设的重要生态支撑^[1]。白洋淀属于海河流域大清河南支水系浅水型淡水湖泊,淀区地形平坦,不具备多年调节水量的能力^[2]。自20世纪60年代以来,由于上游水库建设和生产、生活用水量剧增,白洋淀入淀水量在持续减少,在有些年份,甚至出现干淀现象^[3-5]。因进入白洋淀水量的骤减而导致的水位下降甚至干淀,直接导致白洋淀生态系统功能的严重减弱^[6-7]。调查显示,白洋淀的鱼类物种数量已经从20世纪50年代的54种减少至2011年的25种^[8-9],鱼类种类呈杂鱼化^[10]。白洋淀的鸟类物种数量从1965年的192种减少至2017年的66种^[11]。除了白洋淀生态系统的自然退化以外,白洋淀水位下降导致周边区域对地下水的需求量剧增,使得地下水被严重超采,又致使地表水下渗量增加,白洋淀水位进一步下降,进入了一种恶性循环^[10]。

自20世纪80年代以来,经相关部门协调,从

上游水库对白洋淀进行过多次补水,白洋淀的缺水状况得到一定缓解^[12]。随着南水北调工程、引黄济淀工程等补水工程陆续引水成功,以及雄安新区未来产业入驻和人口增长,白洋淀的水量平衡状况又将产生新的变化。在此背景下,白洋淀是否能够在适宜生态水位上保持水量平衡,关系到雄安新区能否实现建设绿色生态宜居新城区的规划发展目标,甚至将直接影响雄安新区的基本生产和生活需求。

目前在湖泊、水源地和灌区水量平衡方面已经开展了较多研究。例如,利用SRM模型,研究西藏东南部然乌湖的水量平衡过程^[13];利用遥感、估算和实测数据,研究2000年至2019年黑河流域水循环要素的水量平衡^[14];通过水源地水量平衡分析,在最严格水资源管理制度总用水量控制目标下,研究商洛水源地提供给南水北调(中线)的水量与其可供水量的关系^[15];利用SWMM模型、SCS模型和SWAT模型等,模拟研究暴雨径流消减^[16]和平原灌区水量平衡^[17]。

收稿日期:2022-06-29; 修订日期:2022-08-19

基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFC0506901)资助。

作者简介:林梦婧(1996-),女,福建省平潭人,博士研究生,从事生态风险评价研究。E-mail: mjlin@iue.ac.cn

*通讯作者:陈丁楷,助理研究员。E-mail: dkchen@iue.ac.cn

本研究根据白洋淀的入淀水量和消耗水量,计算白洋淀的水量平衡,确定白洋淀的生态适宜水位,评价白洋淀的水量平衡生态风险,为雄安新区发展建设过程中的白洋淀水资源科学管理和利用提供参考依据。

1 数据和方法

1.1 研究区

白洋淀(38°43'N~39°2'N, 115°38'E~116°7'E)是华北平原上最大的天然湖泊,其水域总面积为366 km²(十方院段水位为大沽高程10.5 m),流域面积为3.12×10⁴ km²[18-19],上游有8条入淀河流[20]。

该区气候属温带大陆性季风气候,年平均气温为7.3~12.7℃;年降水量为529.8 mm,70%以上的降水集中在6月至8月,而且多暴雨[21];白洋淀年潜在蒸散量为993.0 mm[22],白洋淀流域年潜在蒸散量为1031.1 mm[23]。

白洋淀自然入淀水量的年际分布极不均匀,1990年至2008年白洋淀的总入淀水量为60.01×10⁸ m³。其中,1995年和1996年的入淀水量分别为14.00×10⁸ m³和25.50×10⁸ m³,两年的入淀水量之和占1990年至2008年白洋淀总入淀水量的65.82%,其余年份的平均年入淀水量仅为1.21×10⁸ m³[24-25]。

1.2 数据

本研究通过查阅文献和调研,获得了白洋淀面积、年蒸发量、年降水量、1988年至2003年的天然入淀水量和白洋淀周边用水现状等数据,以及白洋淀面积-容量-渗漏量关系曲线。利用白洋淀面积-容量-渗漏量关系曲线,得到了白洋淀渗漏水量数据。

从保定市水利局发布的《王快-西大洋水库连通工程竣工环评报告公示》中,得到了王快-西大洋水库联合补水设计补淀水量数据。从河北省水利水电第二勘测设计研究院的《引黄入冀补淀工程(河北省段)可行性研究报告》中,得到了引黄入冀设计补淀水量数据。从河北省南水北调工程建设委员会办公室发布的《河北省南水北调配套工程规划(简要报告)》中,得到了南水北调中线设计补淀水量数据。

从《北京统计年鉴2019》[26]中,获得了2018年北京市常住人口数量和用水量数据。

1.3 白洋淀水量平衡要素及其计算方法

白洋淀的入淀水量包括大气降水量、上游水库补水量、引黄入淀配额水量和南水北调配额水量。白洋淀的消耗水量包括雄安新区及周边的用水量(包括工业、农业和生活用水量)、湖泊水面的蒸发量和湖泊的下渗水量以及在入淀水量有盈余时的弃水量。白洋淀水面的蒸发量与水面面积、下渗量与蓄水位关系密切。本研究采用与平衡态对应的水面面积计算水面的蒸发量。

白洋淀年入淀水量等于多年平均的年自然入淀水量、引黄入冀补淀年设计补水量、南水北调年设计入淀补水量和上游水库联合补水年设计补水量之和。

白洋淀年消耗水量等于年蒸发净损失水量、与生态适宜水位对应的年渗漏水量、年农业用水量、年工业用水量和年生活用水量之和。其中,年蒸发净损失水量等于多年平均的年蒸发量与多年平均的年降水量之差乘以与生态适宜水位对应的水面面积。

白洋淀每年的水量缺口等于年消耗水量减去年入淀水量。

保证白洋淀每年在生态适宜水位上保持水量平衡的最小自然入淀水量等于多年平均的年自然入淀水量与白洋淀每年的水量缺口之和。

1.4 水量平衡生态风险评价依据和风险等级划分

以白洋淀入淀水量和消耗水量在生态适宜水位上处于平衡态作为生态风险阈值。当入淀水量大于消耗水量时,白洋淀可以通过向下游弃水来保持水量平衡,维持生态适宜水位。当入淀水量小于消耗水量时,白洋淀水位将下降到生态适宜水位以下,从而打破了水量平衡状态。因此,研究白洋淀入淀水量小于消耗水量情况发生的可能性,以概率定量判断白洋淀水量平衡生态风险等级。

利用白洋淀历年自然入淀水量数据,拟合出白洋淀年自然入淀量与保证率之间的函数;根据白洋淀生态适宜水位现有研究结果和历年水位保证率,确定白洋淀生态适宜水位;根据白洋淀每年在生态适宜水位上保持水量平衡的最小自然入淀水量,计算出对应的保证率,进一步计算出白洋淀不能保持水量平衡状态的概率;再根据白洋淀不能保持水量平衡状态的概率对应的风险等级,评价白洋淀水量平衡的生态风险。

将白洋淀不能保持水量平衡状态的概率(P)的取值范围平均分为5等级。当 $0 \leq P \leq 20\%$ 时,水量平衡生态风险等级为低风险;当 $20\% < P \leq 40\%$ 时,水量平衡生态风险等级为较低风险;当 $40\% < P \leq 60\%$ 时,水量平衡生态风险等级为中等风险;当 $60\% < P \leq 80\%$ 时,水量平衡生态风险等级为较高风险;当 $80\% < P \leq 100\%$ 时,水量平衡生态风险等级为高风险。

2 结果与分析

2.1 白洋淀适宜生态水位

参考水体污染控制与治理科技重大专项课题“白洋淀流域生态需水保障及水生态系统综合调控技术与集成示范”研究成果和文献^[27-31]中的白洋淀适宜水位,得到的白洋淀最低生态水位为大沽高程7.3 m,此即为白洋淀适宜生态水位。

白洋淀新安段历年水位保证率曲线图(图1)显示,白洋淀水位 ≥ 7.3 m的保证率为65%。即若以7.3 m作为白洋淀水位的风险阈值,则白洋淀水位不低于风险阈值的保证率为65%。

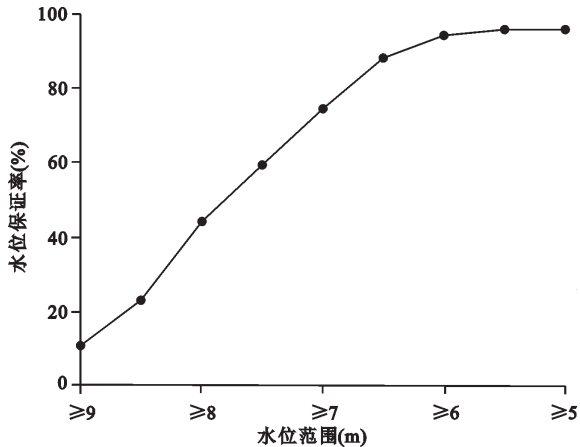


图1 1950年至2015年白洋淀新安段水位保证率曲线图
Fig.1 The curve diagram of water level guarantee rates of Xin'an section of Baiyangdian Lake during 1950 to 2015

2.2 白洋淀的水量

2.2.1 不同补水量下的白洋淀入淀水量

虽然多年平均的自然入淀水量的年内分布在明显的季节差异,例如,汛期的入淀水量占全年入淀水量的70%以上^[21],但是,通过非汛期的补水调节,白洋淀的逐月入淀水量可以达到较为平稳的水平。

由于白洋淀区地形平坦,自身不具备多年调节水量的能力,因此,在计算白洋淀一般年份的水量平衡缺口时,选择了除了1995年和1996年以外的其余年份的多年平均自然入淀水量,其值为 $1.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

根据规划,白洋淀上游的王快水库和西大洋水库每年分两次对白洋淀进行联合补水,设计每年平均补水量为 $1.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ (<http://slj.bd.gov.cn/content-97-1702.html>);根据引黄入冀工程的设计,河北省在冬季的4个月(11月至翌年2月)引水,每年的平均引黄河水量为 $6.20 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中,白洋淀的生态补水量为 $1.10 \times 10^8 \text{ m}^3$ [见引黄入冀补淀工程(河北省段)可行性研究报告];根据《河北省南水北调配套工程规划》,南水北调中线工程每年平均向河北省输水 $34.70 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中,保定市可以获得的补水量为 $5.50 \times 10^8 \text{ m}^3$,容城县、安新县和雄县可以获得的补水量为 $0.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

在达到设计补水量的条件下,根据多年平均的年自然入淀水量,预测白洋淀年入淀水量可以达到 $3.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于各项补水工程的补水量受水源地水资源量的影响较大,根据设计补水量的波动比例,得到5种补水量条件下的年入淀水量(表1)。

按照设计补淀量计算,将白洋淀年消耗水量减去年入淀水量,白洋淀的水量距离达到水量平衡的状态存在 $0.20 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的缺口。保证白洋淀水

表1 5种补水量条件下白洋淀的年入淀水量

Table 1 Annual inflow of Baiyangdian Lake under 5 kinds of water supplement

项目	年入淀补水量($\times 10^8 \text{ m}^3$)				
	设计补水量的50%	设计补水量的80%	设计补水量	设计补水量的120%	设计补水量的150%
引黄入冀补水	0.550	0.880	1.10	1.320	1.650
南水北调中线补水	0.145	0.232	0.29	0.348	0.435
王快水库和西大洋水库联合补水	0.640	1.024	1.28	1.536	1.920
合计	1.335	2.136	2.67	3.204	4.005

量平衡的最小年自然入淀水量为 $1.41 \times 10^8 \text{ m}^3$, 对照白洋淀历年自然入淀水量的拟合结果(图2), 最小年自然入淀水量的保证率为 49.8%, 白洋淀无法保持水量平衡状态(达到适宜生态水位 7.3 m)的概率为 50.2%, 即白洋淀发生负面生态效应的概率为 50.2%。按照水量平衡生态风险等级划分标准, 白洋淀的水量平衡生态风险等级为中等风险。

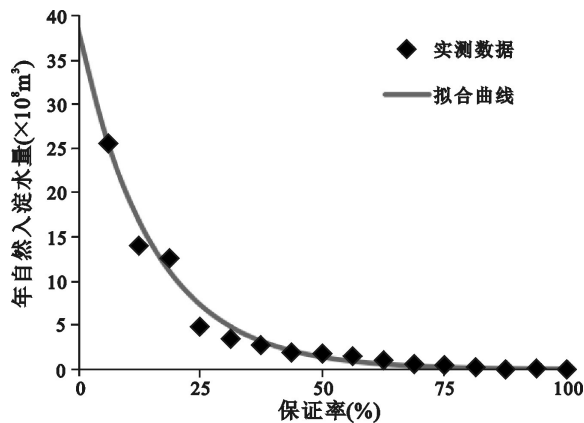


图2 白洋淀年自然入淀水量保证率曲线图

Fig.2 The curve diagram of guarantee rates of annual natural inflow of Baiyangdian Lake

当设计补水量上下浮动 20% 时, 白洋淀都具有中等水量平衡生态风险; 当补水量为 50% 设计补水量时, 白洋淀具有较高的水量平衡生态风险; 当补水量为设计补水量的 150% 时, 白洋淀的水量平衡生态风险最低。

2.2.2 白洋淀的自然消耗水量

根据白洋淀蓄水位与渗漏量关系^[32], 当白洋淀水位保持在适宜水位范围(7.3 m 以上)时, 每年白洋淀的渗漏水量大于 $0.39 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。白洋淀的多年平均年水面蒸发量为 993.0 mm ^[22], 多年平均的年降水量为 609.1 mm ^[33]。根据白洋淀水面面积与水位的关系^[34], 当白洋淀水位保持在适宜水位 7.3 m 时, 白洋淀的水面面积等于 130 km^2 , 计算出的白洋淀每年蒸发净损失水量为 $0.50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此, 白洋淀每年自然消耗水量的最小值为 $0.89 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.2.3 白洋淀周边区域的用水量

白洋淀周边区域的用水量为 $2.43 \times 10^8 \text{ m}^3$, 包括 $1.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.22 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[35] 的农业、工业和生活用水量。

雄安新区建成后, 预计周边区域的农业用水量还会保持现在的 $1.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于雄安新区将

承接北京市非首都功能的相关产业, 其单位工业和生活用水量参照北京市的工业和生活用水量。2018 年, 北京市的常住人口数量为 2154.2 万人, 工业用水量为 $3.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 生活用水量为 $18.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[26], 耗水率为 65%。根据《河北雄安新区起步区控制性规划》, 到 2035 年, 雄安新区起步区建设用地控制在 100 km^2 , 原则上按照雄安新区规划建设区每平方公里 1 万人的规模控制人口, 届时雄安新区将新增人口约 100 万。根据新区新增人口数量, 计算得到雄安新区的新增工业用水量为 $0.15 \times 10^8 \text{ m}^3$, 新增生活用水量为 $0.56 \times 10^8 \text{ m}^3$, 合计新增用水量为 $0.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

因此, 白洋淀周边区域的用水量为 $2.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 加上 $0.71 \times 10^8 \text{ m}^3$, 合计为 $3.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

白洋淀每年的总消耗水量为 $0.89 \times 10^8 \text{ m}^3$ 加上 $3.14 \times 10^8 \text{ m}^3$, 合计为 $4.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3 讨论

按照各项补水工程的设计补水量, 2035 年, 雄安新区起步区建成后, 白洋淀每年的水量缺口为 $0.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ ($4.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减去 $3.88 \times 10^8 \text{ m}^3$)。白洋淀具有不能保持适宜生态水位的中等水量平衡生态风险, 可能性为 50.2%。白洋淀消耗水量主要是周边区域的用水量, 其占白洋淀年总消耗水量的 77.92%。农业用水量占周边区域用水量的 62.42%, 其占白洋淀年总消耗水量的 48.63%。由于目前雄安新区的规划中没有提及工业发展的具体规划目标, 仅有人口控制目标, 因此, 本研究以人均方法预测工业用水量。后续如果有工业规划目标发布, 可以在此基础上重新计算工业用水量, 以提高白洋淀水量平衡生态风险评价的准确性。

本研究按照设计补水量得到的白洋淀水量缺口值小于文献[10]和[36]的 $0.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的白洋淀水量缺口值。文献[10]并未提及白洋淀水量缺口值的具体计算过程, 其预测的雄安新区发展规模与本研究预测的新增人口约 100 万相近。

每年白洋淀的入淀水量存在波动。本研究所采用的白洋淀入淀水量、降水量及与其对应的自然入淀水量是基于历史数据的预测。在气候变化背景下, 预测的水量存在偏差; 来自外界的补给水量变化则更具有不确定性, 除了自然入淀水量以外, 王快水库和西大洋水库联合补水量、引黄入冀工程补水量、南水北调中线补水量都未设计补水

量。一方面,据新闻报道,2016年、2017年和2018年王快水库和西大洋水库联合入淀补水量分别为 $0.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.28 \times 10^8 \text{ m}^3$,三者都远小于设计入淀补水量 $1.28 \times 10^8 \text{ m}^3$,这导致白洋淀水量平衡缺口进一步加大。另一方面,2018年,南水北调中线工程首次向白洋淀生态补水,净入淀水量为 $1.12 \times 10^8 \text{ m}^3$,由于补水时中线水源丹江口水库的水量较多,因此预计平均年补水量少于2018年的补水量,按其60%计算,平均年补水量可以达到 $0.67 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[37]。可见,相对于规划设计中南水北调中线工程给雄安新区的分水量,未来南水北调中线工程的供水量仍有潜力可控。

4 白洋淀水量平衡生态风险的管理对策

雄安新区的建设以新时代的生态文明典范城市为目标,规划建成蓝绿交织、水城共融的生态城市,因此,白洋淀的中等水平衡生态风险需要引起足够重视。针对白洋淀水资源不足的问题,在建设雄安新区的过程中,必须以建设节水型城市为目标,在建设智慧城市的过程中,将相应的智慧管理技术应用于水资源管理领域,旨在精细化管理水资源。白洋淀周边区域的用水量远大于白洋淀自然消耗水量,这主要是由于白洋淀周边区域的农业用水量较大所致。建议雄安新区从三方面采取措施,以应对白洋淀的水量平衡生态风险。

第一,构建水源保障体系。《河北雄安新区规划纲要》提出,“构建水源保障体系。依托南水北调、引黄入冀补淀等区域调水工程,合理利用上游水、当地水、再生水,完善新区供水网络,强化水源互联互通,形成多源互补的新区供水格局。”这是保障白洋淀水量平衡的根本。

第二,提高水资源利用效率。坚持以水定人,强化新区人口管理。应当根据新区水资源人口承载力,制定严格的人口管理措施,严格按照规划建设,严格管控房地产开发,做到在保障民众住房需求的同时,限制入住人口数量。

提高工农业用水效率。河北省和雄安新区在提高工农业用水效率方面已经发布了具有针对性的政策和措施。河北省水利厅和河北省发展和改革委员会联合制定的《河北省节水行动实施方案》提出,调整农业种植结构、发展高效节水灌溉工

程、推进农村生活节水、推广畜牧业节水方式等措施。雄安三县发布的《关于进一步严管严控严禁违法违规建设和抢栽抢种行为的通告》提出,只允许新种一季一收农作物。雄安新区管理委员会印发的《关于支持新区三县传统产业转型升级工作的指导意见》指出,工业企业用水效率与准入机制挂钩。雄安新区正在招标建设部分水资源再生利用工程。

在生态优先的前提下,优化绿化植物结构。城市绿地的用水效率提升,也能在一定程度上改善白洋淀的水量平衡。建议在满足雄安新区生态系统健康的前提下,构建城市绿地时选择种植耐旱且蒸腾量小的植物,减少灌溉用水,从而提高绿地的用水效率。

第三,建设智慧水资源管理体系。结合雄安新区智慧城市建设,构建智慧水资源管理体系,对水资源进行精细化管理。在技术和方法上,首先,全面建设水资源量化感知网络,针对白洋淀流域产水量、上游水库蓄水量、河流流量、入淀水量、蒸散量、渗漏量、各产业用水量、生活用水量和城市绿地用水量等水资源变化数据,实施网络实时监测;其次,可以开发流域产水量预测模型、不同类型植物灌溉需水模型和三生用水预测模型,构建白洋淀水量平衡预测模型,对白洋淀水量平衡进行预测和风险预警。在管理体系上,可以构建白洋淀水量平衡智慧管理平台,针对预测和预警结果,结合水源保障体系和水资源调配方案,及时调控水资源分配和保障水量平衡。

5 结论

在雄安新区发展建设背景下,白洋淀存在中等水量平衡生态风险,达不到适宜生态水位上的水量平衡有50.2%的可能性。当补水量为设计补水量的150%时,白洋淀水量平衡的生态风险最低。未来,白洋淀周边区域农业的消耗水量最大。

参考文献

- [1]刘俊国,赵丹丹,叶斌.雄安新区白洋淀生态属性辨析及生态修复保护研究[J].生态学报,2019,39(9):3019-3025.
- [2]程伍群,薄秋宇,孙童.白洋淀环境生态变迁及其对雄安新区建设的影响[J].林业与生态科学,2018,33(2):113-120.
- [3]袁勇,严登华,王浩,等.白洋淀湿地入淀水量演变归因分析[J].

- 水利水电技术, 2013, **44**(12): 1-4.
- [4]王青, 严登华, 秦天玲, 等. 人类活动对白洋淀干旱的影响[J]. 湿地科学, 2013, **11**(4): 475-481.
- [5]闫欣, 牛振国. 1990~2017年白洋淀的时空变化特征[J]. 湿地科学, 2019, **17**(4): 436-444.
- [6]徐菲, 赵彦伟, 杨志峰, 等. 白洋淀生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2013, **33**(21): 6904-6912.
- [7]夏雪岭, 翟雷田. 几种在白洋淀野生状态下绝迹的经济鱼类及原因[J]. 河北渔业, 2014(5): 63-64.
- [8]谢松, 贺华东. “引黄济淀”后河北白洋淀鱼类资源组成现状分析[J]. 科技信息, 2010(9): 433.
- [9]马晓利, 刘存歧, 刘录三, 等. 基于鱼类食性的白洋淀食物网研究[J]. 水生态学杂志, 2011, **32**(4): 85-90.
- [10]夏军, 张永勇. 雄安新区建设水安全保障面临的问题与挑战[J]. 中国科学院院刊, 2017, **32**(11): 1199-1205.
- [11]王义弘, 吴婷婷, 范俊功, 等. 白洋淀夏季鸟类群落及类群多样性[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2018, **38**(4): 443-448.
- [12]冯亚辉, 李书友. 白洋淀生态补水分析与研究[J]. 水利科技与经济, 2013, **19**(6): 37-39.
- [13]崔颖颖, 朱立平, 鞠建廷, 等. 基于流量监测的西藏东南部然乌湖水量平衡季节变化及其补给过程分析[J]. 地理学报, 2017, **72**(7): 1221-1234.
- [14]闫柏琨, 李文鹏, 甘甫平, 等. 基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析[J]. 水文地质工程地质, 2022, **49**(3): 44-56.
- [15]张家荣, 刘建林, 朱记伟, 等. 最严格水资源管理制度下的水量平衡分析——南水北调(中线)高洛水源地[J]. 中国农业资源与区划, 2018, **39**(11): 163-168.
- [16]刘文, 陈卫平, 彭驰. 社区尺度绿色基础设施暴雨径流消减模拟研究[J]. 生态学报, 2016, **36**(6): 1686-1697.
- [17]欧阳威, 黄浩波, 张璇, 等. 基于SWAT模型的平原灌区水量平衡模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, **34**(1): 17-22.
- [18]江波, 陈媛媛, 肖洋, 等. 白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估[J]. 生态学报, 2017, **37**(8): 2497-2505.
- [19]夏琳琳, 刘仁志, 张珂. 基于GIS的白洋淀流域景观格局对水质的影响研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, **20**(增刊): 87-95.
- [20]刘春兰, 谢高地, 肖玉. 气候变化对白洋淀湿地的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(2): 245-250.
- [21]高彦春, 王金凤, 封志明. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J]. 中国生态农业学报, 2017, **25**(4): 467-477.
- [22]贾秋兰, 赵玉兵, 王小娟, 等. 1972-2012年白洋淀湿地潜在蒸散量变化分析[J]. 农学报, 2018, **8**(5): 10-14.
- [23]胡珊珊, 张涛. 白洋淀流域潜在蒸散量与实际蒸散量变化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2016, **14**(1): 67-71.
- [24]刘立华. 白洋淀湿地水资源承载能力及水环境研究[D]. 石家庄: 河北农业大学, 2005.
- [25]杨春霄. 白洋淀入淀水量变化及影响因素分析[J]. 地下水, 2010, **32**(2): 110-112.
- [26]北京市统计局. 北京统计年鉴2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [27]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.
- [28]徐卫华, 欧阳志云, Iris van Duren, 等. 白洋淀地区近16年芦苇湿地面积变化与水位的关系[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(4): 181-189.
- [29]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[J]. 南水北调与水利科技, 2009, **7**(3): 81-83.
- [30]袁平, 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.
- [31]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[J]. 河北农业大学学报, 2010, **33**(2): 107-118.
- [32]刘立华, 程伍群, 刘春光. 白洋淀当前水量供需状况的研究[J]. 南水北调与水利科技, 2005, **3**(3): 22-23.
- [33]尹健梅, 程伍群, 严磊, 等. 白洋淀湿地水文水资源变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2009, **25**(1): 52-54, 58.
- [34]张素珍, 宋保平. 白洋淀水资源承载力研究[J]. 水土保持研究, 2004, **11**(2): 100-103.
- [35]葛全胜, 杨林生, 金凤君, 等. 雄安新区资源环境承载力评价和调控提升研究[J]. 中国科学院院刊, 2017, **32**(11): 1206-1215.
- [36]孔锋, 王品, 吕丽莉. 全球气候变化背景下雄安新区建设水资源安全风险与治理对策[J]. 水利发展研究, 2018(2): 12-14.
- [37]杨瑞祥, 侯保灯, 鲁帆, 等. 雄安新区水资源承载力分析及提升途径研究[J]. 水利水电技术, 2019, **50**(10): 1-9.

Ecological Risk Assessment of Water Balance of Baiyangdian Lake

LIN Mengjing^{1,2}, CHEN Dingkai¹, SHI Longyu¹

(1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, Fujian, P.R.China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: This paper conducted ecological risk assessment on the water balance of Baiyangdian Lake under the background of the development and construction of Xiongan New Area, and hopes to provide the basis for the planning and management of water resources around Baiyangdian Lake. We built a water balance analysis model for Baiyangdian Lake, and according to historical data and the latest planning data, predicted the amount of water resources, the surrounding water consumption, and the natural consumption. Based on these prediction results, we calculated the water resource gap and water balance probability on Baiyangdian's ecologically appropriate water level and determined the risk level of water balance. The results showed that from the perspective of long-term impact, there could be an average annual water gap of $0.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ in Baiyangdian Lake, and the probability that Baiyangdian Lake fails to reach the water balance at the appropriate water level could be 50.2% , and the risk level is medium. In the future, the main water consumption source of Baiyangdian Lake will be anthropic water usage, accounting for 77.92% of the total consumption, of which agricultural water accounted for 48.63% of the total consumption. In the process of construction of Xiongan New Area, measures should be taken to maintain the balance of water quantity in Baiyangdian Lake from three aspects: constructing water supply guarantee system, improving the efficiency of water resource utilization, and building intelligent water resource management system.

Keywords: Baiyangdian Lake; water balance; water level; water resource; risk assessment; Xiongan New Area