

孟鸿旭, 王国庆, 邹畅林, 等. 莫莫格湿地生态需水量估算与补水调控[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(9): 167-179. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.013

MENG Hongxu, WANG Guoqing, ZOU Changlin, et al. Estimation of ecological water demands and water replenishment regulation for Momoge Wetland[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(9): 167-179. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.013

莫莫格湿地生态需水量估算与补水调控

孟鸿旭^{1,2,3}, 王国庆⁴, 邹畅林⁵, 吴燕锋¹, 李治军^{2,3}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102; 2. 黑龙江大学水利电力学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 黑龙江大学寒区地下水研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 4. 白城市林科院, 吉林 白城 137000; 5. 吉林莫莫格国家级自然保护区管理局, 吉林 白城 137300)

摘要:【目的】目前莫莫格湿地缺乏对湿地整体规模的研究, 尤其缺乏对年内不同时期生态需水变化的考虑。针对莫莫格湿地整体构建了包含5项指标的湿地生态需水指标体系的估算框架。【方法】在建立湿地生态需水指标体系的基础上, 运用生态功能法估算了莫莫格湿地3个等级、3个时段生态需水量。并运用GM灰度模型预测了不同丰枯遭遇情景下莫莫格湿地面积, 确定了莫莫格湿地变化下的补水方案。【结果】莫莫格湿地最大、适宜、最小生态需水量分别为 $24.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $16.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $10.88 \times 10^8 \text{ m}^3$; 越冬期、繁殖期、汛期三个时段的需水量分别为 $1.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $5.39 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $8.73 \times 10^8 \text{ m}^3$; 基于不同丰枯遭遇情景下的湿地面积预测, 莫莫格湿地在枯-枯-枯、枯-枯-平、枯-平-枯和平-平-平四种丰枯遭遇情景下所需的补水量分别为 $0.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.49 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。【结论】在枯水年份, 现有补水工程不能完全满足莫莫格湿地蓄水量, 迫切需要开展多水源补水的方式实现补水量效提升。研究结果可用于莫莫格湿地年尺度和年内尺度补水方案与多水源调控, 从而提高区域水资源利用效率, 保障湿地生态系统的稳定性。

关键词: 生态需水; 生态补水; 需水等级; 指标体系; 莫莫格湿地; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.013

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)09-0167-13



Estimation of ecological water demands and water replenishment regulation for Momoge Wetland

MENG Hongxu^{1,2,3}, WANG Guoqing⁴, ZOU Changlin⁵, WU Yanfeng¹, LI Zhijun^{2,3}

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, China; 2. School of Hydraulic and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, Heilongjiang, China; 3. Institute of Groundwater in Cold Region, Heilongjiang University, Harbin 150080, Heilongjiang, China; 4. Baicheng Forestry Research Institute, Baicheng 137000, Jilin, China; 5. Jilin Momoge National Nature Reserve Administration, Changchun, Baicheng 137000, Jilin, China)

Abstract: [Objective] Currently, research on the overall scale of the Momoge Wetland remains limited, especially the lack of

收稿日期: 2024-11-19; 修回日期: 2025-01-09; 录用日期: 2025-01-10; 网络出版日期: 2025-02-25

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3200203); 国家自然科学基金项目(U2243230, 421010514); 吉林省科技发展计划项目(20240101058JC)

作者简介: 孟鸿旭(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事湿地生态水文研究。E-mail: menghongxu1024@163.com

通信作者: 吴燕锋(1986—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事湿地生态水文研究。E-mail: wuyanfeng@iga.ac.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

consideration of the variations in ecological water demand across different periods within a year. To address this, an estimation framework for the wetland ecological water demand indicator system, consisting of five indicators, is developed for Momoge Wetland. [Methods] Based on the established ecological water demand indicator system, the ecological function method was employed to estimate the ecological water demand of Momoge Wetland across three levels and for three time periods. Moreover, the Grey Model (GM) was utilized to predict the wetland area under various hydrological scenarios of water abundance and water scarcity, thereby determining the water replenishment schemes in response to wetland changes of Momoge Wetland. [Results] The result showed that the maximum, suitable, and minimum ecological water demands of Momoge Wetland were $24.14 \times 10^8 \text{ m}^3$, $16.65 \times 10^8 \text{ m}^3$, and $10.88 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. The water demands for the overwintering period, breeding period, and flood season were $1.92 \times 10^8 \text{ m}^3$, $5.39 \times 10^8 \text{ m}^3$, and $8.73 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. Based on the predicted wetland area under different scenarios of water abundance and scarcity, the required water replenishment volumes for Momoge Wetland under the four scenarios — dry-dry-dry, dry-dry-normal, dry-normal-dry, and normal-normal-normal — were $0.70 \times 10^8 \text{ m}^3$, $0.49 \times 10^8 \text{ m}^3$, $0.68 \times 10^8 \text{ m}^3$, and $0.36 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. [Conclusion] In years of water scarcity, existing water replenishment projects fail to meet the water storage requirements of the Momoge Wetland, highlighting the urgent need to implement multi-source water replenishment method to enhance water replenishment efficiency. The calculation result of this study can inform annual and within-year water replenishment schemes and multi-source water regulation for the Momoge Wetland, thereby improving the efficiency of regional water resource utilization and ensuring the stability of the wetland ecosystem.

Keywords: ecological water demand; ecological water replenishment; water demand classification; indicator system; Momoge Wetland; influencing factors

0 引言

湿地具有多种生态功能,如调节气候,净化水质,生产有机物质,调节水循环,是地球上重要的生态系统之一^[1]。但湿地生态系统随着全球气候变化和人类活动的加剧,面临着巨大的压力和挑战^[2]。自20世纪初以来,全球湿地生态系统面积缩减了近一半,远超其他陆地生态系统的减少面积^[3]。在中国,湿地的生态需水问题日益突出,湿地资源的保护和管理已成为国家生态文明建设的重要内容^[4]。湿地是一种水陆交互作用形成的生态系统,在湿地的形成和演变过程中,水资源扮演着重要的角色^[5]。为湿地提供充足且优质的水对于湿地生态系统的保护与恢复具有重要意义^[6]。因此,无论从理论上还是实践上,研究湿地生态需水量及其补水调控策略都是非常有价值的。

生态需水量是指为维持特定生态系统的结构、生态过程以及其提供的服务所需的水量。这个概念覆盖了包括河流、湿地和湖泊在内的多种水体的需水需求^[7]。目前国际上有200多种计算生态需水量的方法^[8],大致可以分为水量平衡法、换水周期法、生态功能法^[9]。水量平衡法是根据水量平衡原理,通过建立水量平衡方程来估算湿地生态需水量的方法^[10],具有概念清楚、方法简单、适应性强等优点,但计算量较大,并且计算过程中一些要素难以准确测量,导致最后的计算结果精准度不高^[11-12];换水周

期法是根据水体换水周期理论推导出来的计算生态需水量的方法^[13],但是需要的获得多年平均蓄水量,对于时间分布难以解决;生态功能法以生态系统生态学为理论基础,综合考虑湿地生态系统各功能部分生态需水^[14],计算湿地生态需水量经常考虑此方法。张殷钦等^[15]基于气象数据及下垫面条件,根据GF1-WFV遥感影像数据订正后的地表反射率和作物种植结构提升模拟精度,建立气候变化背景下流域生态需水预测方法;李肖杨等^[16]综合运用了多种水文学方法估算了新疆孔雀河地区生态基本流量和天然植被的水分需求进行了评估;易雨君等^[17]采用境模拟模型和函数型线性回归模型等方法,综合考虑了黄河河口区三角洲湿地生态需水、河口及近海鱼类需水及河道泥沙输送的需求,提出了满足多目标的需水量及流量过程的核算方法;WU等^[18]整合水文、水力和生态栖息地方法构建了黄河下游生态水资源的需求框架,并采用生态功能法计算湿地生态需水量。这些研究为从水资源保障视角的生态修复与保护提供了有力的证据。

生态补水是一种人工干预手段,其目的在于防止生态系统结构的破坏和功能退化。通过人为补给缺失的水量,该措施旨在协助湿地恢复其固有的自我调节功能和基本生态作用。具体而言,生态补水通过补充必要的水资源,助力湿地维持其自然调节能力,从而保护和恢复其基本功能^[19]。评估生态补水量对湿地生态系统的影响对水资源管理及生态恢复至关重要^[20]。目前,生态补水量一般以生态需水量多少为

标准确定。马超等^[21]以湿地优势物种价值增量最大、湿地水资源保障能力增量最大和水源地用水效益损失最小为目标,构建水面光伏抑制蒸发作用对应节水量的优化配置模型,解决湿地生态补水问题;唐彩红等^[22]通过运用遥感影像资料对比分析了2017年和2020年白洋淀不同植被类型的动态变化,并深入剖析了水位变化对植被生物量的影响,并评估了生态补水对淀区植被恢复的整体效果;ZHANG等^[23]利用Mike21模型构建了白龟山水库的水环境模型,并提出了一个最优的湿地生态补水方案。

莫莫格湿地地处吉林省西北部,是我国重要的湿地资源之一。莫莫格湿地以得天独厚的湿地景观而闻名,是东亚候鸟迁徙路线上的关键栖息地,同时是保持区域生态平衡和生物多样性的重要一环^[24]。确定湿地生态需水量后才能对生态系统中的水资源进行科学的分配以及湿地生态功能的恢复,因而对维持莫莫格湿地水生态安全具有重要的研究意义^[25]。迄今为止,对莫莫格湿地已经开展了一些有关生态需水量的研究,但现有的研究基本以核心区和缓冲区为主^[26-27],缺乏对湿地整体规模的研究,并且缺乏考虑年内不同时期生态需水量的研究结果,难以满足莫莫格湿地生态补水实践应用的需求。

本研究的目的是核算莫莫格湿地生态需水量和补水量,以期更好地为莫莫格湿地恢复保护与水资源综合管控提供科学支撑。为此,本研究将莫莫格湿地作为一个整体为进行研究,结合莫莫格湿地现状,利用生态功能法对生态需水量进行分类计算,并利用灰度预测模型对不同情景下的生态补水量进行预测,以期保护莫莫格湿地的生态提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

莫莫格湿地(123°27'E—124°04'E, 45°42'N—46°18'N)位于吉林省白城市镇赉县。莫莫格湿地总面积约1442 km²,嫩江、洮儿河等多条河流在此汇聚,形成了丰富的水系网[见图1(a)]。莫莫格湿地属温带大陆性季风气候^[28],是众多候鸟的迁徙停歇地和繁殖地;每年春秋之际,这里栖息着大量的白鹤、丹顶鹤、东方白鹳等珍稀鸟类^[29]。湿地内的植被类型多样,包括草本沼泽、灌丛沼泽、疏林沼泽等,植物资源丰富,如芦苇、香蒲、苔草等^[30]。在生态功能上,莫莫格湿地在调节气候、改善水质、保护生物多样性等具有重要作用。莫莫格湿地多年平均气温为4.5℃,年日照时数为2924.5 h,无霜期约为160 d,年降水量约为400 mm,主要集中在6—9月,年蒸发量约为1000 mm^[31]。

1.2 数据来源与处理

本研究采用的数据包括土壤厚度、蒸散发、径流量、降雨量和湿地分布数据。湿地分布数据来源于2000—2022年全球30 m精细分类湿地数据集^[32],该数据集综合了多源遥感特征和时空一致性优化,适用于分析湿地格局及其变化。土壤厚度来自于YAN等^[33]制备的中国100 m分辨率的土壤厚度数据。湿地蒸散发量来源于ETMonitor全球1 km分辨率地表实际蒸散发数据集^[34];该模型估算了植被蒸腾等过程,以获取逐日蒸散发量。莫莫格湿地及其周边的气象数据来源于国家气象科学数据中心。察尔森站和江桥站的径流量来源于水文统计年鉴。使用ArcGIS软件处理2022年的莫莫格湿地分布、土壤厚度和蒸散发数

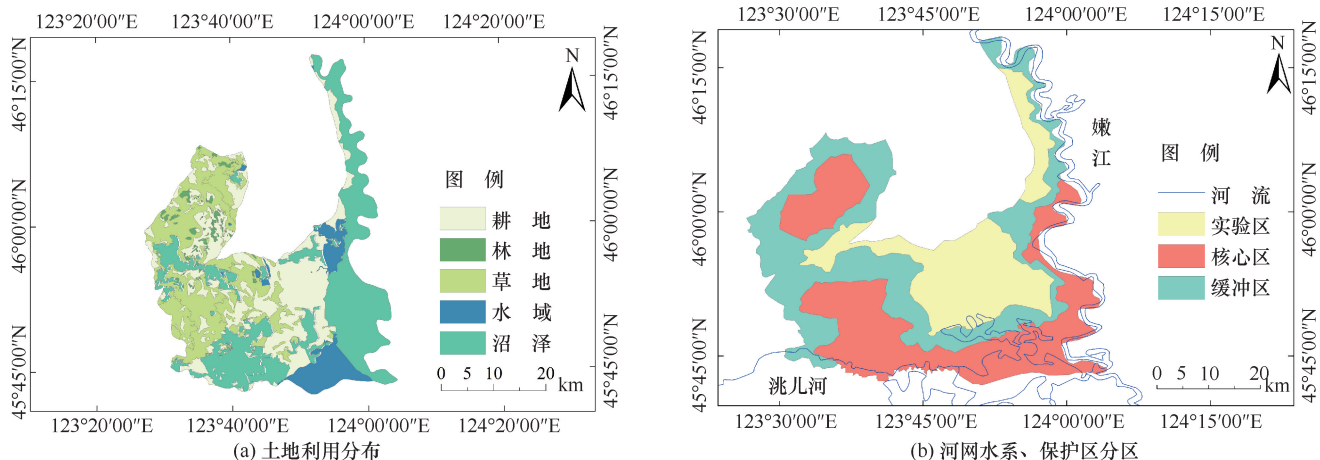


图1 莫莫格湿地土地利用分布和河网水系、保护区分区

Fig. 1 Land use distribution, river network system and reserve zoning in Momogou Wetland

据, 并依据《湿地分类》(GB/T 24708—2009) 进行湿地类型划分[见图 1(b)]。莫莫格湿地总面积约为 1 442 km²。其中, 自然湿地和水域面积分别为 757.01 km² 和 118.45 km², 非植被区面积为 391.71 km²。人工湿地如水田在生态需水计算中不予考虑。本研究采用 ArcGIS 软件对所有数据统一处理为 1 km 分辨率数据, 以保证所有栅格数据分辨率的一致性。

1.3 生态需水评价指标体系

本研究在崔保山等^[35]的研究基础上, 结合莫莫格湿地的实际情况, 综合考虑了多篇文献中的研究成果^[17-38], 制定了维持湿地规模、保护生物多样性及稳定生态系统功能及结构三个方面的评价指标。在维持湿地规模方面, 要重点对湿地和土壤蒸散损失的水量进行保持和补充, 选取了湿地蒸散需水量和土壤需水量作为评价指标。保护生物多样性方面, 要专注于确保湿地生态系统中动植物的生存和繁殖需求得到满足。为此, 采纳了植被需水量和生物栖息地需水量作为评估标准。在这些标准中, 植被覆盖度和物种多样性指数被视为关键的评价参数。在稳定生态系统功能及结构方面, 要重点在于满足补充地下水的需要, 因此选取了补给地下水需水量为指标, 其中入渗回补率和地下水水位回升率是关键的评估方法。

1.4 生态需水计算方法

生态功能法通过分析整个湿地生态系统的各个基本功能对水量的需求来估算生态需水量。这种方法首先识别湿地生态系统的关键功能, 然后分别计算这些功能所需的水量, 最终将这些水量相加, 得出整个湿地生态系统的生态需水量^[36]。

生态需水量计算模式在本文中采用的公式为

$$W = W_{p1} + Q_i + W_{p2} + W_p + W_b \quad (1)$$

式中, W 为莫莫格湿地生态需水量 (m³); W_{p1} 为湿地蒸散需水量 (m³); Q_i 为土壤需水量 (m³); W_{p2} 为植被需水量 (m³); W_p 为生物栖息地需水量 (m³); W_b 为补给地下水需水量 (m³)。

1.4.1 湿地蒸散需水计算方法

湿地蒸散需水量含有植被区蒸腾需水量和非植被区蒸散量两部分, 是指通过蒸发和植物蒸腾作用导致湿地生态系统中失去的水量。在此, 我们专注于计算湿地非植被区域的蒸散量, 而不包括植被生态需水量的计算, 这部分将在后续步骤中单独进行。其计算公式^[39]为

$$\frac{dW_{p1}}{dt} = A(t)ET_m \quad (2)$$

式中, W_{p1} 为非植被区需水量 (m³); $A(t)$ 为湿地非植被区面积 (m²); ET_m 为蒸散发量 (mm); t 为时间 (d)。

1.4.2 土壤需水量计算方法

土壤需水量指的是为了满足作物生长和土壤中各种生物化学过程的需要, 土壤所应保持的适宜水分含量。根据研究需要, 以田间持水量为参量计算, 其计算公式^[40]为

$$Q_i = \alpha H_i A_i \quad (3)$$

式中, Q_i 为土壤需水量 (m³); α 为田间持水量 (%); H_i 为土壤厚度 (m); A_i 为湿地土壤面积 (m²)。

1.4.3 植被需水量计算方法

植被需水量涵盖了湿地内植物在自然生长过程中对水分的总需求, 这包括植物进行光合作用等同化活动时消耗的水分、植物体内用于支持生理活动和结构的水分、植物叶片等部位通过蒸腾作用损失的水分, 以及植物根部土壤中通过蒸发过程损失的水分。植物表面蒸腾和土壤蒸发这两部分通常被归类为植物蒸散发量, 因为它们直接关系到植物的生长环境和生态功能, 对植物的健康生长和湿地生态系统的稳定至关重要, 占植物需水量的 99%, 是主要的耗水项目^[41]。因此植被需水量在数值上约等于植物蒸散发量。其计算公式^[42]为

$$W_{p2} = A(t)ET_m \quad (4)$$

式中, W_{p2} 为植被区需水量 (m³); $A(t)$ 为湿地植被区面积 (m²); ET_m 为蒸散发量 (mm); t 为时间 (d)。

1.4.4 生物栖息地需水量计算方法

生物栖息地需水量是指为了确保鱼类、鸟类等生物能够在其栖息地中正常生活和繁衍所需的水量。在计算时, 主要依据栖息地的水面面积比例和适宜的水深这两个参数。这种方法考虑了生物栖息地对特定水环境的需求, 以保障生物多样性和生态平衡。通过合理计算和调配水资源, 可以为这些生物提供必要的生存条件, 维护生态系统的健康和稳定。其计算公式^[43]为

$$W_p = CHA(t) \quad (5)$$

式中, W_p 为生物栖息地需水量 (m³); C 为湿地水面面积百分比 (%); H 为适宜水深 (m); $A(t)$ 为大尺度区域湿地的面积 (m²)。

1.4.5 补给地下水需水量计算方法

湿地通过渗透这一途径进行对地下水的补给, 这一过程可以保障湿地生态系统机构和功能的稳定性。补给地下水需水量与土壤的类型、水力坡度、湿地面

积有关。其计算公式^[44]为

$$W_b = kIAT \quad (6)$$

式中, W_b 为补给需水量(m^3); k 为渗透系数(m/d); I 为水力坡度; A 为湿地向地下水渗流的剖面面积(m^2); T 为计算周期(d)。

1.5 生态补水量计算方法

本研究采用灰色预测模型预测不同丰枯情景下的莫莫格湿地面积。灰度预测模型基于灰色系统理论, 它适合在数据量较少或信息不完整的时候进行预测^[45]。莫莫格湿地面积序列获取难度较大, 但很容易获取影响面积的相关因素数据序列, 因此适用于利用灰色预测模型对莫莫格湿地面积进行预测。本文考虑将莫莫格湿地周边河道的来水流量作为影响湿地面积的相关因素。参考文献[27], 选取了莫莫格湿地的降水量、察尔森来水量及江桥来水量作为影响该湿地的因主要因素, 即灰色预测模型的驱动因素。最后通过相对残差来检验灰色预测模型的合理性和有效性。本文借助 MATLAB 软件对数据进行处理, 应用灰色预测 GM(1, 3) 模型对莫莫格湿地面积进行分析并预测。灰度建模机理和过程如下^[46]。

1.5.1 数据预处理

由于自变量数据序列与因变量数据序列量纲不一定相同, 需要对原始数据进行归一化处理。原始数据 $x_i^{(0)}(j) = (j=1, 2, 3, \dots, n)$, 具体计算公式为

$$\tilde{x}_i^{(0)}(j) = \frac{x_i^{(0)}(j) - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}} \quad (7)$$

式中, $x_{i \max}$ 和 $x_{i \min}$ 分别为 $x_i^{(0)}(t)$ 的最大值和最小值。

1.5.2 生成累加序列

将上述 $\tilde{x}_i^{(0)}(t)$ 进行一次累加, 可以弱化数据的随机性, 其公式为

$$x_i^{(1)} = \{x_i^{(1)}(1), x_i^{(1)}(2), \dots, x_i^{(1)}(n)\} \quad (8)$$

式中, $x_i^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k x_i^{(0)}(j)$, $k=1, 2, 3, \dots, n$ 。

1.5.3 构建微分方程

$$\frac{dx_1^{(1)}}{dt} + ax_1^{(1)} = b_1x_2^{(1)} + b_1x_3^{(1)} + \dots + b_{n-1}x_n^{(1)} \quad (9)$$

1.5.4 计算参数

将上述方程的参数列为 $\hat{a} = [a, b_1, b_2, \dots, b_{n-1}]$, 选用最小二乘法计算相应的参数估计向量, 其公式为

$$\hat{a} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}_n \quad (10)$$

式中, $\mathbf{Y}_n = [x_1^{(0)}(2), x_1^{(0)}(3), \dots, x_1^{(0)}(n)]^T$,

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}[x_1^{(1)}(2)+x_1^{(1)}(1)] & x_2^{(1)}(2) & \cdots & x_n^{(1)}(2) \\ -\frac{1}{2}[x_1^{(1)}(3)+x_1^{(1)}(2)] & x_2^{(1)}(3) & \cdots & x_n^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x_1^{(1)}(n)+x_1^{(1)}(n-1)] & x_2^{(1)}(n) & \cdots & x_n^{(1)}(n) \end{pmatrix}$$

1.5.5 预测模型 GM

$$x_1^{(1)}(k+1) = \left[x_1^{(1)} - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (11)$$

1.5.6 模型物理意义还原

对模型求解值进行累减还原, 其公式为

$$x_1(k+1) = x_1^{(1)}(k+1) - x_1^{(1)}(k) \quad (12)$$

1.5.7 进行残差检验

预测模型的精度可以由残差检验来进行检验本文采取相对残差检验。假设所构建灰色模型原始数据列为 $x^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)]$, 而对应的模拟序列记为 $\hat{x}^{(0)} = [\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n)]$, 具体公式为

$$\begin{aligned} \Delta(k) &= \left| \frac{\varepsilon(k)}{x^{(0)}(k)} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \right| \times 100\% \end{aligned} \quad (13)$$

进而计算相应的平均相对残差计算公式为

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n \Delta(k) \quad (14)$$

给定 α , 当 $\bar{\Delta} < \alpha$ 且 $\Delta_n < \alpha$ 成立时, 我们将所构建的灰度预测模型称为残差合格模型。

2 生态需水量等级划分及年内不同时期需水量分配

湿地生态需水量展现出两个关键特征: 阈值性和季节性。本研究对湿地生态系统的生态需水量进行了分级, 具体分为三个层次: 最高、适中和最低。最高需水量代表了湿地生态系统能够承受的最大水量限制, 超出此限可能会导致湿地功能受损; 适中需水量则是指维持湿地生态系统完整结构和正常运作所需的水量; 最低需水量是指湿地生态系统维持基本功能所需的最小水量, 低于此值湿地生态系统可能会遭受退化。另外, 根据湿地生态系统中生物在一年内不同时期的环境需求生态需水量分为越冬期(11月—次年3月)、繁殖期(4—7月)及汛期(7—10月)。莫莫格湿地土地在越冬期被积雪覆盖, 此时对湿地的生态需水量要求不高; 在繁殖期, 要求充足的水量以供莫莫格

湿地内动植物度过生长繁殖的关键期;在汛期莫莫格湿地降雨量明显增加,植被生长旺盛,达到湿地生态需水量的最高值。

2.1 湿地蒸散需水

湿地蒸散需水量的计算可以采用湿地水面面积的比例作为标准划分需水等级^[47]。在莫莫格湿地内,当水域面积取河流面积和非植被区面积之和时,达到最大水域面积,占自然湿地总面积的35%;若湿地水面面积占湿地面积的比重小于13%时,湿地的植被区会发生退化。故本文把最大、适宜、最小湿地蒸散需水量定为水面面积/自然湿地总面积之比为0.35、0.24、0.13情景下的湿地蒸散生态需水量。湿地蒸散需水量通过公式(2)计算,莫莫格湿地蒸散最大、适宜、最小需水量如表1所列。

表1 湿地蒸散需水等级划分

Table 1 Classification of wetland evapotranspiration water demands

需水量等级	湿地水面面积百分比/%	植被需水量/亿 m ³
最大需水量	35	4.33
适宜需水量	24	3.06
最小需水量	13	1.64

2.2 土壤需水量

根据参考文献计算^[33],莫莫格湿地土壤厚度为0.57 m,湿地土壤面积取自然湿地面积757 km²。以田间持水量比例为标准,对土壤需水量进行等级划分。土壤最大需水量选取田间持水量的80%,此时植物达到对水的最大耐受;土壤适宜需水量选取田间持水量的55%,此时达到植物生长所需的最佳水分;土壤最小需水量选取田间持水量的30%,此时土壤干涸,植物凋谢^[48]。同时还可以用湿地平均月径流量比例为标准划分土壤需水量。以镇赉站2000—2014年月径流实测为基准,越冬期、繁殖期、汛期的比重分别为0.04、0.21、0.75。土壤需水量通过公式(3)计算,莫莫格湿地土壤最大、适宜、最小需水量如表2所列。

表2 土壤需水量等级划分

Table 2 Classification of soil water demands

需水量等级	田间持水量/%	土壤需水量/亿 m ³
最大需水量	80	3.52
适宜需水量	55	2.73
最小需水量	30	1.94

2.3 植被需水量

以平均蒸散发量和潜在蒸散发量为基准,可以对

植被的生态需水量进行等级划分。在莫莫格湿地,年均蒸腾量为887 mm,这一数值标志着该区域植被的最小生态需水标准。与此同时,该湿地的潜在蒸发量高达1000 mm,此时对应的是植被最大生态需水量。通过比较平均蒸散发量和潜在蒸散发量,可以评估植被的水分状况,并据此确定植被的生态需水量等级。本文将最大、适宜、最小植被需水量设定为年均蒸腾量为887 mm、950 mm、1000 mm情景下得到的植被需水量。同时还可以用湿地月蒸散发比例为标准划分植被需水量,越冬期、繁殖期、汛期的比重分别为0.13、0.44、0.43。植被需水量通过公式(4)计算,莫莫格湿地植被最大、适宜、最小需水量如表3所列。

表3 植被需水量等级划分

Table 3 Classification of vegetation water demands

需水量等级	年均蒸腾量/mm	植被需水量/亿 m ³
最大需水量	1000	2.47
适宜需水量	950	2.35
最小需水量	887	2.19

2.4 生物栖息地需水量

以湿地水面面积百分比为标准划分生物栖息地需水等级。本文设定在水面面积百分比为80%、50%、30%的情景条件下获得最大、最适宜、最小的生物栖息地需水量。湿地内部动植物种类及数量繁多,我们难以测定所有物种的生存条件,因此生物栖息地需水量运用关键物种指示法。观察莫莫格湿地内部动植物,芦苇的面积占比最多,因而选用芦苇作为指示性物种。由于芦苇在不同月份的需水原因各异,其需水深度也会相应变化,越冬期、繁殖期、汛期的适宜水深分别为15 cm、30 cm和50 cm^[49]。生物栖息地需水量通过公式(5)计算,莫莫格湿地植被最大、适宜、最小需水量如表4所列。

表4 生物栖息地需水量等级划分

Table 4 Classification of biological habitat water demands

需水量等级	水面面积百分比/%	生物栖息地需水量/亿 m ³
最大需水量	80	11.54
适宜需水量	50	7.21
最小需水量	30	4.33

2.5 补给地下水需水量

莫莫格湿地的渗透系数为0.005 m/d,水力坡度为0.2,计算周期为180 d。在对地下水补给和生物栖息地的需水量进行等级划分时,均依据湿地水面

面积的百分比作为标准^[50]。对于莫莫格湿地而言, 6—8月的降水量约占全年总量的68%, 而5—9月的径流量则占到了全年的88%, 这一数据反映出5—9月是该湿地的主要补水期。基于此, 本文将补水周期设定为180 d进行计算。根据镇赉站2000—2014年实测的月径流量对越冬期、繁殖期、汛期进行配额, 比重分别为0.04、0.21、0.75。补给地下水需水量通过公式(6)计算, 莫莫格湿地补给地下水最大、适宜、最小需水量如表5所列, 年内不同时期补给地下水需水量如表6所列。

表5 补给地下水需水量等级划分

Table 5 Classification of groundwater replenishment water demands

需水量等级	湿地水面面积百分比/%	补给地下水需水量/亿 m ³
最大需水量	80	2.08
适宜需水量	50	1.30
最小需水量	30	0.78

3 研究结果

3.1 莫莫格湿地年尺度生态需水量

图2(a)显示了莫莫格湿地以年为尺度时的适宜需水量及其阈值。莫莫格湿地全年所需的最大生态需水量为 $24.14 \times 10^8 \text{ m}^3$, 适宜需水量为 $16.65 \times 10^8 \text{ m}^3$, 最小生态需水量为 $10.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从图2(a)中可以看出, 保护生物多样性的生态需水量最高, 达到了 $9.56 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占全年适宜生态需水量的57%。同时, 维持湿地规模的需水量为 $5.79 \times 10^8 \text{ m}^3$, 而稳定生态系统的功能及结构的需水量最低, 为 $1.30 \times 10^8 \text{ m}^3$, 仅占全年需水量的3%。这些数据表明在进行湿地保

表6 莫莫格湿地年内不同时期生态需水量等级分类 亿 m³

Table 6 Classification of ecological water demand levels for different intra-annual periods in Momoge Wetland

划分时段	需水量等级	10 ⁸ m ³				
		湿地蒸散需水	土壤需水量	植被需水量	生物栖息地需水量	补给地下水需水量
越冬期	最大需水量	0.56	0.14	0.32	1.73	0.08
	适宜需水量	0.37	0.11	0.31	1.08	0.05
	最小需水量	0.20	0.08	0.28	0.65	0.03
繁殖期	最大需水量	2.00	0.74	1.09	3.46	0.44
	适宜需水量	1.36	0.57	1.03	2.16	0.27
	最小需水量	0.72	0.41	0.96	1.30	0.16
汛期	最大需水量	1.97	2.64	1.06	5.77	1.56
	适宜需水量	1.31	2.05	1.01	3.61	0.98
	最小需水量	0.72	1.46	0.94	2.17	0.59

护和生态恢复时, 应重点关注生物多样性的保护, 以确保生态系统的健康和稳定。

图2(b)显示了莫莫格湿地以年为尺度时各项需水指标的适宜需水量及其阈值。在这些指标中, 生物栖息地需水量最大, 为 $7.21 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占全部需水量的44%, 这与图2(a)中的保护生物多样性的高需水量相呼应, 同时强调了生物栖息地对于生物多样性保护的重要性。而湿地蒸散需水和土壤需水量相对接近, 分别为 $3.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $2.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。植被需水量稍低, 为 $2.35 \times 10^8 \text{ m}^3$, 而补给地下水需水量最低, 仅为 $1.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这些数据揭示了在湿地生态系统中, 不同生态功能对水的需求差异, 为湿地水资源管理和生态保护提供了具体的指导依据。

3.2 莫莫格湿地年内不同时期生态需水量

图3(a)显示了莫莫格湿地年内不同时期各项需

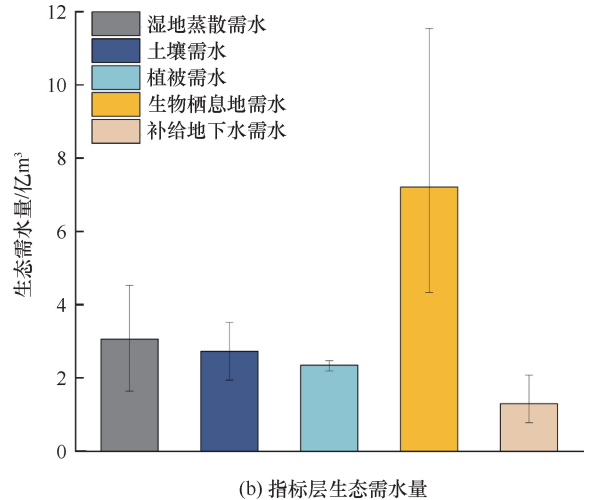
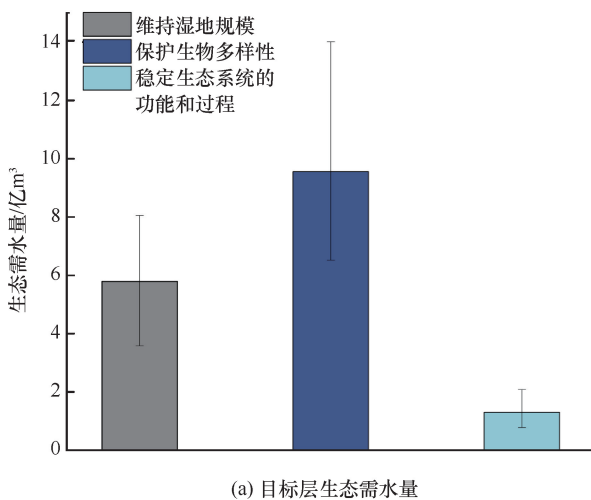


图2 莫莫格湿地目标层及指标层年度适宜生态需水量及其阈值

Fig. 2 Annual appropriate ecological water demands and thresholds for target and indicator layers of Momoge Wetland

水目标的适宜需水量及其阈值。在越冬期, 维持湿地规模的需水量较低, 仅为 $0.48 \times 10^8 \text{ m}^3$, 而保护生物多样性的需水量稍高, 为 $1.39 \times 10^8 \text{ m}^3$; 稳定生态系统的功能及结构的需水量最低, 仅为 $0.05 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在繁殖期, 三个类别的需水量都有所增加, 其中保护生物多样性的需水量最高, 达到了 $3.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在汛期, 保护生物多样性的需水量进一步增加, 达到了 $4.62 \times 10^8 \text{ m}^3$, 而维持湿地规模和稳定生态系统的功能及结构的需水量也有所上升, 但仍然低于保护生物多样性。这表明在不同的时间段内, 尤其是汛期, 保护生物多样性是生态需水的主要因素。

图 3(b) 显示了莫莫格湿地年内不同时期各项需水指标的适宜需水量及其阈值。在越冬期, 生物栖息地需水和湿地蒸散需水量较高, 分别为 $1.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.37 \times 10^8 \text{ m}^3$, 而补给地下水需水接近于零。在繁殖期, 所有类别的生态需水量均有所增加, 其中生物栖息地需水量最高, 达到 $2.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在汛期, 生物栖息地需水继续增加, 达到 $3.61 \times 10^8 \text{ m}^3$, 成为这一时期的最大需水类别, 湿地蒸散需水和土壤需水也有所增加, 但仍然低于生物栖息地需水, 植被需水和补给地下水需水相对较低, 分别为 $1.01 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这些数据表明, 生物栖息地需水在全年都是一个重要的需水因素。

3.3 莫莫格湿地满足状况分析

收集了 1979—2013 年莫莫格湿地的年径流量数据, 在这段时间里, 1979 年的年径流量最低, 仅为 13.92 亿 m^3 , 被称作极端枯水年; 1998 年的年径流量最高, 达到了 144.00 亿 m^3 , 被称作极端丰

水年。

图 4(a) 显示了 1979 年及 1998 年莫莫格湿地最大生态需水量在越冬期、繁殖期及汛期占径流量的比重。在极端枯水年, 莫莫格湿地的最大生态需水量在越冬期、繁殖期和汛期均显著超过了同期的径流量, 分别达到了径流量的 3.14 倍、2.19 倍和 1.37 倍。这一现象表明, 在极端枯水年, 湿地的生态需水需求远超过了自然径流的供给, 生态状况棉铃严峻挑战。相对而言, 在极端丰水年, 处理汛期的最大需水量占径流量的 10% 外, 越冬期和繁殖期的径流量均不足以满足湿地的最大生态需水量。图 4(b) 显示了 1979 年及 1998 年莫莫格湿地适宜生态需水量在越冬期、繁殖期及汛期占径流量的比重。在极端枯水年, 越冬期和繁殖期的适宜生态需水量分别是径流量的 2.13 倍和 1.53 倍, 而汛期的适宜生态需水量虽然低于当年的径流量, 但其生态基流占比高达 94%, 远超正常水平。在极端丰水年, 越冬期、繁殖期和汛期的适宜生态需水量均低于径流量, 但越冬期和繁殖期的生态基流占比分别为 96% 和 74%。这表明在这些时期, 莫莫格湿地的径流量难以满足适宜生态需水量的要求, 需要根据实际情况进行适当的补水, 以维持生态平衡。图 4(c) 显示了 1979 年及 1998 年莫莫格湿地最小生态需水量在越冬期、繁殖期及汛期占径流量的比重。极端枯水年, 在越冬期这一时期莫莫格湿地的径流量无法满足生态系统的最低要求; 在繁殖期, 该湿地是最小生态需水量与径流量持平, 即径流量刚好能满足湿地生态系统的基本需求; 而到了汛期, 生态基流占比为 62%, 远高于正常水平, 这强调了在枯

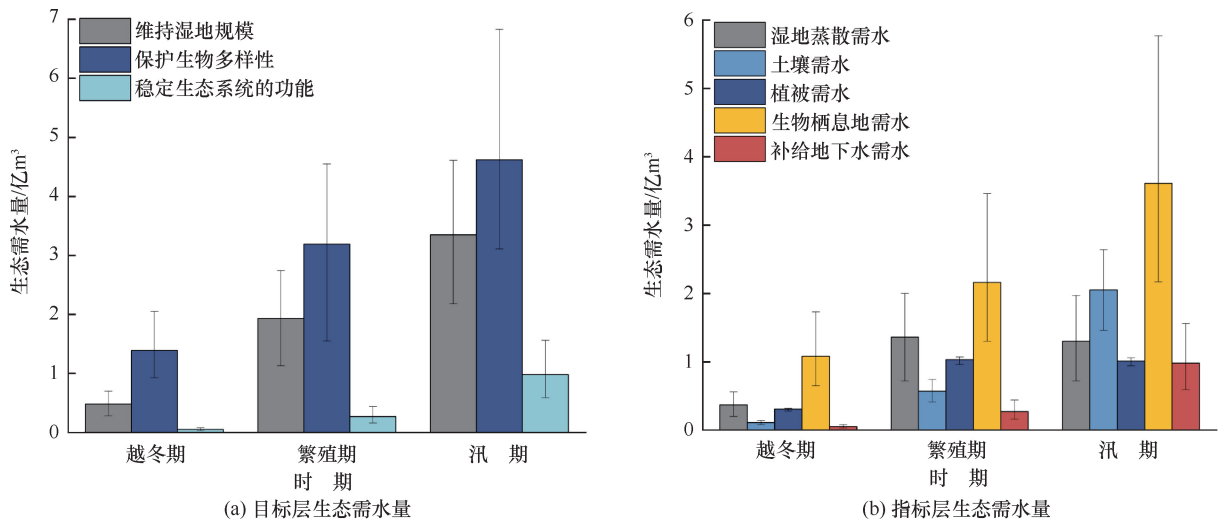


图 3 莫莫格湿地年内不同时期目标层及指标层适宜生态需水量及其阈值

Fig. Fig. 3 Suitable ecological water demands and thresholds for target and indicator layers of Momoge Wetland for different intra-annual periods

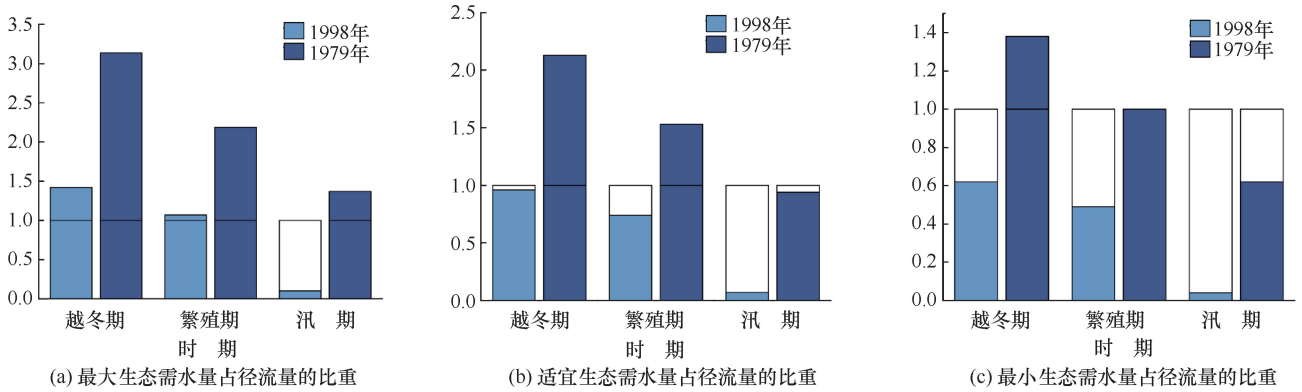


图4 1979、1998年不同时期、不同等级生态需水量占莫莫格湿地径流量的比重

Fig. 4 Proportion of ecological water demands of different levels at different periods in the runoff of Momoge Wetland in 1979 and 1998

水年进行生态补水的必要性。在极端丰水年,莫莫格湿地的径流量基本可以满足最小生态需水量,生态基流占比在越冬期、繁殖期和汛期分别为62%、49%和4%,这表明在极端丰水年,尽管总体水资源充足,但仍需关注水资源的合理分配和利用,以支持湿地生态系统的健康。

3.4 莫莫格湿地补水量核算

参考史文杰^[27]的研究,我们采纳其提出的调控方案,利用灰色预测模型来预测莫莫格湿地的面积,并据此估算所需的补水量。

3.4.1 提取三种因子丰、平、枯设计值

根据现有研究^[27],我们选取莫莫格湿地降雨量、察尔森流量及江桥流量作为影响莫莫格湿地面积的关键因素,选取了四种不同的补水情况,分别是(枯,枯,枯)、(枯,枯,平)、(枯,平,枯)、(平,平,平)。本研究采用频率分析法对来水进行分类,将丰水和平水的分界频率设定为25%,而平水与枯水的分界频率则设定为75%。遵循该标准,本研究对莫莫格湿地的降水数据以及察尔森和江桥地区的来水数据进行了详细分析。通过检索历史数据,构建了P-III型频率分布曲线,并据此确定了在不同频率(丰水、平水、枯水)条件下的设计值。降水、察尔森来水、江桥来水各丰、平、枯对应的设计值如表7所列。

表7 不同频率对应的设计值

Table 7 Designed values for different frequencies

项目	25%	50%	75%
降水/mm	398.5	345.2	310.6
察尔森来水/亿 m ³	1.81	0.87	0.23
江桥来水/亿 m ³	225.8	180.6	138.4

3.4.2 四种情景下生态补水量计算

使用灰度预测模型,将表(7)中得到的三种因子在不同频率下对应的设计值运用到1.5节公式(7)至公式(14)中,预测莫莫格湿地在不同情景下的面积,预测值如表8所列。由于四种情景下,湿地生态需水量满足程度都较低,因此亟需借助于引水工程满足湿地最小生态需水量,以维持湿地生态系统健康。为此,利用预测面积按照比例得到湿地各类型的面积,运用1.4节的公式计算不同情境下所需要的补水量。

表8 不同丰枯遭遇组合情景下湿地面积预测值

Table 8 Predicted values of wetland areas under different hydrological scenarios

项目	情景1	情景2	情景3	情景4
丰枯遭遇组合	(枯, 枯, 枯)	(枯, 枯, 平)	(枯, 平, 枯)	(平, 平, 平)
预测面积	1 338.5	1 368.7	1 340.9	1 387.7
需要的补水量	0.70	0.49	0.68	0.36

3.4.3 补水建议

莫莫格湿地主要依赖嫩江作为补水水源,通过引嫩入白工程为湿地提供常规补水。然而,在枯水年,这一工程的补水量并不足以满足湿地的生态需求。鉴于此情况,建议增加建设更多的补水渠道,以确保莫莫格湿地在枯水年也能获得足够的补水。这样的措施将有助于湿地在水资源匮乏时期维持其生态功能和生物多样性。如利用洮儿河洪水资源、洋沙泡蓄水工程及绰尔河水资源。通过这些渠道,可以增大湿地保护面积、改善周边的环境,对恢复莫莫格湿地有着至关重要的作用。此外,在实际工程应用中,由于水库运行管理者的实际要求,可以采用多水源联合调度的方式最大程度的满足莫莫格湿地的需水量。

4 讨论

以往研究往往采用生态功能法计算莫莫格湿地生态需水量^[26,51],但聚焦在莫莫格湿地的核心区和缓冲带,缺乏对湿地整体规模的研究,尤其缺乏考虑生态需水量的年内变化和差异性。本研究中,选取包含了核心区、缓冲区和实验区莫莫格湿地整体为研究区,根据莫莫格湿地生态系统的功能和结构,将生态需水量分为五种需水指标。在计算过程中,我们将蒸散发消耗的水量分为湿地蒸散需水和植物蒸散发量(即植被需水量),这与莫莫格实际状况更为符合;生物栖息地需水量运用关键物种指示法进行计算,并选取芦苇作为莫莫格湿地的指示性物种。生态功能法从宏观的角度对生态需水量进行计算,关键物种指示法从微观角度将动植物和湿地联系起来。因此,将两种方法结合起来,不仅从宏观层面上保障了湿地生态系统功能的完整性和稳定性,而且从微观层面上关照了湿地内动植物的生存条件。通过这种方法,我们能够更全面地评估和满足莫莫格湿地的生态需水要求,确保湿地生态系统的健康和生物多样性的保护。

在湿地生态需水量的研究中,由于湿地区域化定、计算方法以及生态需水类型的不同,湿地生态需水量计算结果存在一定的差异性。本研究与莫莫格湿地生态需水量估算的相关文献进行了对比分析^[26,51]。本研究采用的湿地生态需水量(计算方法与孙晓梅等^[26]的方法一致,即均采用生态功能法进行估算。但是湿地生态需水量差异明显,本研究和孙晓梅等^[26]核算的生态需水量分别为 $10.88 \times 10^8 \sim 24.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $6.05 \times 10^8 \sim 21.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该差异主要在于湿地面积的界定,本研究考虑的是整个莫莫格湿地的生态需水量,而孙晓梅等^[26]的研究则基于湿地的核心区和缓冲带来核算最小和适宜的需水量。此外,本研究与沈惠安等^[51]的计算结果($3.31 \times 10^8 \sim 6.42 \times 10^8 \text{ m}^3$)存在较大差异,原因在于本研究额外考虑了土壤需水量和生物栖息地需水量。实地调研表明,莫莫格湿地是多种珍稀动植物的栖息地,准确把握土壤和生物栖息地的需水量对于制定有效的保护措施和精确评估生态系统服务价值至关重要。因此,本研究将土壤需水量和生物栖息地需水量纳入生态需水指标体系,以期提供更为全面和精确的生态需水量估算。本研究从三个需水目标出发,分别研究了莫莫格湿地年内不同等级及不同时期生态需水量,从适宜生态需水量及其阈值的角度进行分析,更清晰直观的了解生态需水量的大小及其季节变化。这些发现有助于

从水资源配置与优化视角促进莫莫格湿地恢复、生物多样性保护及生态可持续发展^[52-53]。

本研究以莫莫格湿地降水、察尔森来水及江桥来水为驱动因素,以莫莫格湿地在不同情况下的湿地面积为目标建立灰色预测模型,从而得到在枯-枯-枯、枯-枯-平、枯-平-枯和平-平-平四种状况较为严峻的情况下所需要的生态补水量分别为 $0.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.49 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。当前,莫莫格湿地的主要水源依赖于嫩江和洮儿河的径流补给,而关键的水利设施为引嫩入白工程^[54]。尽管该工程在一定程度上缓解了湿地的水资源短缺问题,但在极端干旱年份,其供水量仍不足以满足湿地的用水需求。通过对洮儿河的水文特征进行深入分析,本研究提出了若干针对莫莫格湿地洪水期补水的策略。具体而言,建议限制湿地内芦苇的过度收割,以延长洪水在湿地内部的停留时间,从而增强湿地的自然蓄水能力。此外,严格执行退耕还林政策,旨在减少人为活动引起的水土流失,同时为珍稀动植物种群提供更广阔的栖息地和充足的食物资源,以维护湿地生态系统的完整性和生物多样性。

本研究中对于生态需水量的计算,从莫莫格湿地实际出发,在计算结果上整体可靠。在使用生态功能法来估算生态需水量的过程中,通常会单独计算每个目标和功能所需的水量,这种做法未能充分考虑不同功能之间可能存在的重叠部分。因此,这种方法在估算的准确性方面存在提升的潜力。为了提高估算的精确度,未来的研究可以考虑不同生态功能之间的相互作用和重叠区域,以更准确地评估湿地生态系统的整体需水量。其次在利用灰色预测模型预测莫莫格湿地面积时,只选取了莫莫格湿地降雨量、察尔森流量及江桥流量三种因素,缺乏对其他人为因素(如农业生产、道路建设等)影响的考虑。因此在此后的研究中,可以从人为因素对莫莫格湿地产生的影响入手,更好的实现生态需水的合理配置^[55]。

5 结论

本研究采用生态功能法对湿地的生态需水量进行了详细计算,涵盖了湿地蒸散需水、土壤需水、植被需水、生物栖息地需水以及补给地下水需水量等多个方面。研究从保持湿地面积、保护生物多样性和稳定生态系统的功能及结构三个层面出发,对年内不同等级和不同时间段的生态需水量进行了具体计算。以下是研究的主要结论。

(1)莫莫格湿地全年最大需水量为 $24.14 \times 10^8 \text{ m}^3$,

适宜需水量为 $16.65 \times 10^8 \text{ m}^3$, 最小需水量为 $10.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(2) 越冬期、繁殖期、汛期的适宜需水量分别为 $1.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $5.39 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $8.73 \times 10^8 \text{ m}^3$; 维持湿地面积、保护生物多样性、稳定生态系统的功能及结构的适宜需水量分别为 $5.79 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $9.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(3) 莫莫格湿地在枯-枯-枯、枯-枯-平、枯-平-枯和平-平-平四种丰枯遭遇情景下所需的补水量分别为 $0.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.49 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在枯水年份, 现有补水工程不能完全满足莫莫格湿地蓄水量, 迫切需要开展多水源补水的方式实现补水量效提升。

参考文献 (References):

- [1] SALIMI S, ALMUKTAR S A A N, SCHOLZ M. Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286: 112160.
- [2] FLUET-CHOUINARD E, STOCKER B D, ZHANG Z, et al. Extensive global wetland loss over the past three centuries [J]. *Nature*, 2023, 614(7947): 281-286.
- [3] DAVIDSON N C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2014, 65(10): 934.
- [4] 卓凌, 黄桂林, 唐小平, 等. 中国湿地保护标准体系优化研究 [J]. *湿地科学*, 2022, 20(2): 133-138.
ZHUO L, HUANG G L, TANG X P, et al. Research on optimization of wetland protection standard system in China[J]. *Wetland Science*, 2022, 20(2): 133-138.
- [5] MITSCH W J, GOSSELINK J G, WETLANDS W J. *Wetlands*[M]. Hoboken: John Wiley & sons, 2015.
- [6] XU Y, WANG Y, LI S, et al. Stochastic optimization model for water allocation on a watershed scale considering wetland's ecological water requirement[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 330-341.
- [7] HAO X M, ZHAO Z Y, FAN X, et al. Evaluation method of ecological water demand threshold of natural vegetation in arid-region inland river basin based on satellite data[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109811.
- [8] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers[J]. *River Research and Applications*, 2003, 19(5/6): 397-441.
- [9] 汪志荣, 张晓晓, 田彦杰. 流域生态需水研究体系和计算方法 [J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(15): 3204-3211.
WANG Z R, ZHANG X X, TIAN Y J. The research system and calculation of ecological water requirement of river basin[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(15): 3204-3211.
- [10] CHEN H, ZHAO Y W. Evaluating the environmental flows of

China's Wolonghu wetland and land use changes using a hydrological model, a water balance model, and remote sensing[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(2): 253-260.

- [11] YU X Y, ZHU W B, WEI J X, et al. Estimation of ecological water supplement for typical bird protection in the Yellow River Delta wetland[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107783.
- [12] CHI D K, WANG H, LI X B, et al. Estimation of the ecological water requirement for natural vegetation in the Ergune River Basin in Northeastern China from 2001 to 2014 [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 141-150.
- [13] 刘增进, 张敏, 潘乐. 生态环境需水量计算方法的探讨[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(32): 13921-13922.
LIU Z J, ZHANG M, PAN L. Discussion on calculation methods of ecological environment water requirement [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(32): 13921-13922.
- [14] ZHONG P, YANG Z F, CUI B S, et al. Eco-environmental water demands for the Baiyangdian wetland[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2008, 2(1): 73-80.
- [15] 张殷钦, 康文健, 乔海娟, 等. 气候变化背景下流域生态需水预估: 以好溪流域为例[J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2023, 21(2): 313-323.
ZHANG Y Q, KANG W J, QIAO H J, et al. Estimation of watershed ecological water demand under the background of climate change: A case study of Haoxi Watershed [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(2): 313-323.
- [16] 李肖杨, 朱成刚, 马玉其, 等. 新疆孔雀河流域生态基流与天然植被需水量研究[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(2): 337-345.
LI X Y, ZHU C G, MA Y Q, et al. Ecological baseflow and natural vegetation water requirement of Konqi River Basin, Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(2): 337-345.
- [17] 易雨君, 徐嘉欣, 宋劫, 等. 黄河河口区生态需水量及流量过程核算[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 133-140.
YI Y J, XU J X, SONG J, et al. Ecological water demand and discharge process calculation in the Yellow River Estuary [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 133-140.
- [18] WU H S, SHI P, QU S M, et al. Establishment of watershed ecological water requirements framework: A case study of the Lower Yellow River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 820: 153205.
- [19] MAO B N, WANG X, LIAO Z M, et al. Spatiotemporal variations and tradeoff-synergy relations of ecosystem services under ecological water replenishment in Baiyangdian Lake, North China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 343: 118229.
- [20] HUANG F, CHUNYU X, ZHANG D R, et al. A framework to assess the impact of ecological water conveyance on groundwater-dependent terrestrial ecosystems in arid inland river basins [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 709: 136155.
- [21] 马超, 李鑫杨. 水面光伏抑制蒸发作用对应节水量的优化配置: 以白洋淀湿地补水为例 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2023, 21(4): 742-750.
MA C, LI X Y. Optimal allocation of water saving of evaporation

- suppression by floating photovoltaic: A case study of Baiyangdian Wetland[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21 (4): 742-750.
- [22] 唐彩红, 陈东明, 易雨君, 等. 生态补水对白洋淀湿地植被格局的影响[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(4): 1197-1207.
TANG C H, CHEN D M, YI Y J, et al. Effects of ecological water supplement on vegetation dynamics in Lake Baiyangdian wetland[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(4): 1197-1207.
- [23] ZHANG X Q, DUAN B S, HE S Y, et al. Simulation study on the impact of ecological water replenishment on reservoir water environment based on Mike21: Taking Baiguishan reservoir as an example[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108802.
- [24] JIANG H B, WEN Y, ZOU L F, et al. The effects of a wetland restoration project on the Siberian crane (*Grus leucogeranus*) population and stopover habitat in Momoge National Nature Reserve, China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 96: 170-177.
- [25] YE Z X, YANG Y H, ZHOU H H, et al. Ecological water rights of the Bosten Lake wetlands in Xinjiang, China[J]. *Wetlands*, 2020, 40(6): 2597-2607.
- [26] 孙晓梅, 曲延光. 莫莫格湿地生态环境需水量研究[J]. *东北水利水电*, 2007, 25(1): 54-55.
SUN X M, QU Y G. Study on ecological environment water demand in Momoge marsh[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2007, 25(1): 54-55.
- [27] 史文杰. 莫莫格湿地空间格局变化及生态需水调控研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
SHI W J. Study on the Change of Spatial Pattern and the Regulations of Ecological Water Demand of Momoge Wetland[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [28] HAN J Q, WANG D Y, ZHANG S W. Momoge internationally important wetland: Ecosystem integrity remote assessment and spatial pattern optimization study[J]. *Land*, 2022, 11(8): 1344.
- [29] WEN D, SU L, HU Y M, et al. Surveys of large waterfowl and their habitats using an unmanned aerial vehicle: A case study on the Siberian crane[J]. *Drones*, 2021, 5(4): 102.
- [30] ZHANG M Y, ZHANG D J, QI Q, et al. Flooding effects on population and growth characteristics of *Bolboschoenus planiculmis* in Momoge wetland, Northeast China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108730.
- [31] 崔楨, 沈红, 章光新. 3个时期莫莫格国家级自然保护区景观格局和湿地水文连通性变化及其驱动因素分析[J]. *湿地科学*, 2016, 14(6): 866-873.
CUI Z, SHEN H, ZHANG G X. Changes of landscape patterns and hydrological connectivity of wetlands in Momoge National Natural Wetland Reserve and their driving factors for three periods [J]. *Wetland Science*, 2016, 14(6): 866-873.
- [32] ZHANG X, LIU L Y, ZHAO T T, et al. Global annual wetland dataset at 30 m with a fine classification system from 2000 to 2022 [J]. *Scientific Data*, 2024, 11(1): 310.
- [33] YAN F P, SHANGGUAN W, ZHANG J, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters [J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 2.
- [34] ZHENG C L, JIA L, HU G C. Global land surface evapotranspiration monitoring by ETMonitor model driven by multi-source satellite earth observations[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613: 128444.
- [35] 崔保山, 李英华, 杨志峰. 基于管理目标的黄河三角洲湿地生态需水量[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 606-614.
CUI B S, LI Y H, YANG Z F. Management-oriented ecological water requirement for wetlands in the Yellow River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 606-614.
- [36] 邱梦琪, 韩美, 焦晨泰, 等. 黄河口湿地生态需水量估算[J]. *生态学报*, 2023, 43(21): 9096-9105.
QIU M Q, HAN M, JIAO J T, et al. Estimation of Ecological Water Requirements in the Yellow River Estuary Wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 43(21), 9096-9105.
- [37] 赵芬, 庞爱萍, 李春晖, 等. 黄河干流与河口湿地生态需水研究进展[J]. *生态学报*, 2021, 41(15): 6289-6301.
ZHAO F, PANG A P, LI C H, et al. Progress in ecological water requirements in the mainstream and estuary ecosystem of the Yellow River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(15): 6289-6301.
- [38] 王富强, 张红璐, 赵衡, 等. 三门峡库区湿地水资源利用效用评价[J]. *人民黄河*, 2021, 43(3): 69-73.
WANG F Q, ZHANG H L, ZHAO H, et al. Evaluation of water resources utilization utility in Sanmenxia Reservoir Wetland [J]. *Yellow River*, 2021, 43(3): 69-73.
- [39] LI L J, LI J Y, LIANG L Q, et al. Method for calculating ecological water storage and ecological water requirement of marsh[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(4): 427-436.
- [40] 董李勤, 章光新, 张昆. 嫩江流域湿地生态需水量分析与预估[J]. *生态学报*, 2015, 35(18): 6165-6172.
DONG L Q, ZHANG G X, ZHANG K. Analysis and prediction of wetland ecological water requirements in the Nenjiang Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(18): 6165-6172.
- [41] 刘昌明. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
LIU C M. The Interface Processes of Water Movement in the Soil-Crop-Atmosphere System and Water-Saving Regulation[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [42] 李加林, 赵寒冰, 刘闯, 等. 辽河三角洲湿地生态环境需水量变化研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 129-134.
LI J L, ZHAO H B, LIU C, et al. Effects of wetlands changes on eco-environmental water requirement in Liaohe Delta [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 129-134.
- [43] 刘俊威, 吕惠进. 生态功能法在计算湿地生态需水量中的应用: 以天津滨海新区湿地为例[J]. *湖南农业科学*, 2012(9): 68-70.
LIU J W, LYU H J. Application of ecological function method in calculation of ecological water requirement for wetland: A case study in Tianjin New Coastal Areas [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2012 (9): 68-70.
- [44] 申海鹏, 张义文, 焦明, 等. 黄骅湿地生态需水量研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2012, 47(3): 111-115.
SHEN H P, ZHANG Y W, JIAO M, et al. Ecological water requirement for wetlands in Huanghua City [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2012, 47(3): 111-115.

- [45] LIU S. Grey Systems[M]. Berlin: Springer, 2010.
- [46] YOU K, KANG N, FU J X, et al. Research on forecast of water demand in Jinzhou based on grey model[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 770(1): 012037.
- [47] 杨晓妍. 黄河三角洲国家级自然保护区湿地生态需水研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2012: 75.
YANG X Y. Study On Ecological Water Requirement Of Wetland In Yellow River Delta Natural Conservation Area[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2012: 75.
- [48] 张长春, 王光谦, 魏加华. 基于遥感方法的黄河三角洲生态需水量研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 149-152.
ZHANG C C, WANG G Q, WEI J H. Study on water requirements in Yellow River Delta based on remote sensing[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(1): 149-152.
- [49] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量等级划分与实例分析[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 21-28.
CUI B S, YANG Z F. The classification and case study on eco-environmental water requirement of wetlands[J]. Resources Science, 2003, 25(1): 21-28.
- [50] 倪鹤珊, 李鸿雁, 佟守正, 等. 基于生态环境需水量的莫莫格国家级自然保护区湿地生态服务功能评价[J]. 湿地科学, 2024, 22(3): 437-444.
NI H S, LI H Y, TONG S Z, et al. Evaluation of wetland ecological service function in Momoge National Nature Reserve based on ecological water demand[J]. Wetland Science, 2024, 22(3): 437-444.
- [51] 沈惠安, 胥铭兴, 王凤翥. 莫莫格自然保护区湿地生态需水量计算[J]. 东北水利水电, 2009, 27(6): 44-47.
SHEN H A, XU M X, WANG F Z. Calculation of wetland ecological water demand in Momoge nature reserve [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2009, 27(6): 44-47.
- [52] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.
LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10.
- [53] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在 2023 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 1-11.
LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(1): 1-11.
- [54] 郎宏磊. 莫莫格湿地水资源管理与保护[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
LANG H L. Water Resource Management and Protection in Momogee Wetland[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [55] 吴丰昌. 我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望[J]. 水利发展研究, 2023, 23(12): 1-8.
WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(12): 1-8.

(责任编辑 王海锋)