

兴安盟察尔森水库对吉林省向海湿地生态补水效应研究

玉 凤

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2026年3月14日; 录用日期: 2026年4月14日; 发布日期: 2026年4月29日

摘 要

本研究以兴安盟察尔森水库和吉林省向海湿地为研究对象, 利用2003年至2022年的Landsat系列遥感数据, 结合目视解译和NDVI分析方法, 评估了察尔森水库向向海湿地实施生态应急补水的效果。研究结果表明, 面积变化: 2003~2022年期间, 察尔森水库和向海湿地的面积均呈现上升趋势。具体来看, 察尔森水库的总面积从22.94 km²增加至62.05 km², 扩展方向主要为北部和西部; 向海湿地的总面积从35.46 km²增加至59.38 km², 主要向西北和东南方向延伸。生态补水效应: 研究重点分析了2004年、2011年和2020年三次“引察济向”生态补水工作对向海湿地的影响。在2004年实施3470万m³补水后, 向海湿地面积由35.46 km²增加至39.71 km², NDVI值从0.28下降至0.26; 2011年补水6220万m³后, 湿地面积由36.50 km²增加至60.27 km², NDVI值从0.25升至0.28; 2020年补水6400万m³后, 湿地面积由51.01 km²增加至62.58 km², NDVI值从0.31升至0.32。效果总结: 这三次生态补水有效缓解了向海湿地的缺水问题, 增加了湿地的水源和水库蓄水量, 促进了湿地面积的恢复。同时, 三次补水工程对湿地植被的恢复起到了积极作用, 促进了湿地生态系统的恢复, 并带来了积极的社会效益。

关键词

察尔森水库, 向海湿地, 生态补水, 遥感, Landsat

The Study on the Ecological Water Supplement Effect of the Chaersen Reservoir in Xing'an League on the Xianghai Wetland of Jilin Province

Feng Yu

College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Abstract

This study focuses on the Chaersen Reservoir in the Xing'an League and the Xianghai Wetland in Jilin Province, using Landsat series remote sensing data from 2003 to 2022, combined with visual interpretation and NDVI analysis methods, to assess the effectiveness of ecological emergency water replenishment from the Chaersen Reservoir to the Xianghai Wetland. The findings are as follows: **Area Changes:** Between 2003 and 2022, both the Chaersen Reservoir and the Xianghai Wetland exhibited an increasing trend in area. Specifically, the total area of the Chaersen Reservoir expanded from 22.94 km² to 62.05 km², extending primarily northward and westward. Meanwhile, the total area of the Xianghai Wetland grew from 35.46 km² to 59.38 km², mainly expanding to the northwest and southeast. **Ecological Water Replenishment Effect:** The study focuses on the effects of three ecological water replenishment projects—carried out in 2004, 2011, and 2020—on the Xianghai Wetland. After 34.7 million m³ of water was replenished in 2004, the Xianghai Wetland's area increased from 35.46 km² to 39.71 km², with the NDVI value decreasing from 0.28 to 0.26. In 2011, following the replenishment of 62.2 million m³, the wetland area expanded from 36.50 km² to 60.27 km², and the NDVI value rose from 0.25 to 0.28. After 64 million m³ of water replenishment in 2020, the wetland area grew from 51.01 km² to 62.58 km², and the NDVI value increased from 0.31 to 0.32. **Summary of Effects:** The three ecological water replenishment projects effectively alleviated the water shortage problem in the Xianghai Wetland, increased the water storage capacity of the reservoir, and promoted the restoration of wetland areas. Additionally, the water replenishment projects positively impacted the recovery of wetland vegetation, facilitated ecosystem restoration, and provided significant social benefits.

Keywords

Chaersen Reservoir, Xianghai Wetland, Ecological Water Replenishment, Remote Sensing, Landsat

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球变暖已成为当今世界面临的重大环境问题，对地球生态系统产生了深远影响。吉林省西部的向海湿地，作为国家级自然保护区，是气候变化影响最为显著的区域之一[1]。近年来，随着气候变暖，降水量逐年减少，江河来水量和湿地蓄水量显著下降，导致湿地面积逐步萎缩，生物多样性面临严重威胁。湿地作为地球陆地表层最重要的生态系统之一，在调节水循环、净化水质、降解污染物以及为动植物提供栖息地等方面起着至关重要的作用[2]。向海湿地不仅为许多珍稀动植物提供栖息地，保护了丰富的生物多样性，同时也在维持区域生态平衡和水资源调节方面发挥着重要作用[3]。

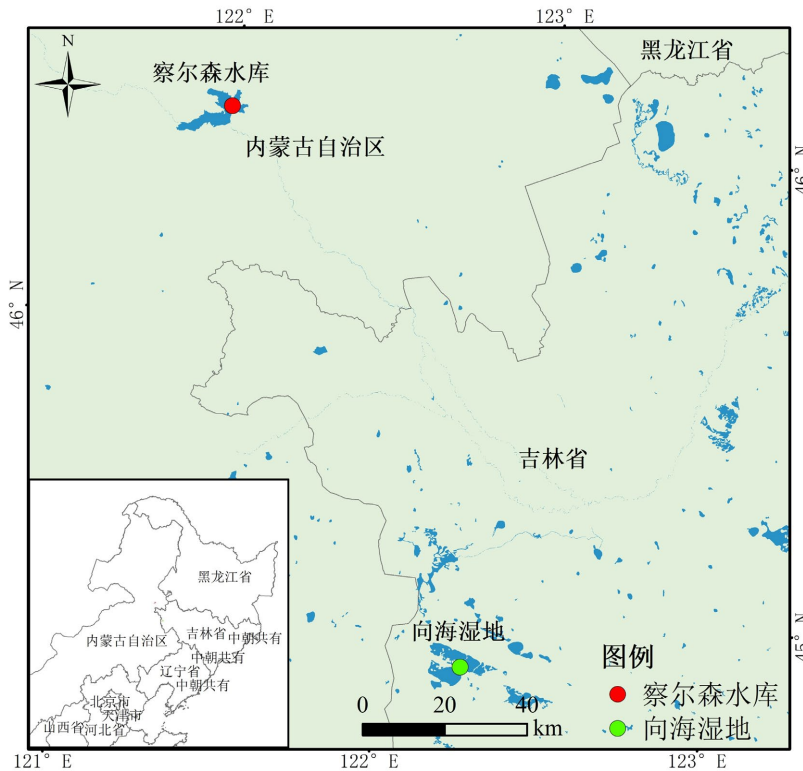
然而，气候变化与人类活动的双重影响使得向海湿地面临严峻的水资源短缺问题。具体而言，向海湿地的干涸原因包括水资源匮乏、污染严重、泥土淤积和过度开发等。该湿地位于吉林省的半干旱气候区，夏季降水量较少，冬季寒冷且降雪量不足[1]。周边的农业活动、过度的湿地旅游开发以及过度放牧和土地开垦等因素，进一步加剧了湿地的退化和污染。渔民的过度捕鱼行为也破坏了湿地生态链，导致湿地植被减少，土壤有机质含量下降，生态环境面临更为严峻的挑战。

为应对这一问题，察尔森水库实施了生态应急补水措施，旨在恢复湿地的生态功能[4]。跨流域水调配作为一种有效的水资源管理手段[5]，逐渐成为湿地保护的重要举措[6]。根据吉林省的要求和水利部的部署，松辽委分别在 2004 年、2011 年和 2020 年组织了三次应急补水工程[7]。这些补水工程通过从察尔森水库引水，缓解了向海湿地的水资源短缺问题，恢复了湿地的生态功能和面积[8] [9]。本文以兴安盟察尔森水库和吉林省向海湿地自然保护区为研究对象，结合 Landsat 系列遥感数据，探讨向海湿地生态应急补水的效果。通过遥感影像分析，研究湿地的变化趋势，并为未来湿地的可持续保护和管理提供科学依据。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

察尔森水库地处兴安盟科右前旗察尔森镇境内，距乌兰浩特市 32 公里。地理坐标为北纬 43°56′~43°58′，东经 125°31′~125°33′(图 1)。流域面积为 7780 km²，坐落于嫩江支流洮儿河中游是一座以灌溉、防洪和发展渔业的综合性水库，最大库容量 12 亿 m³ [10] [11]。察尔森水库周边自然生态环境较好，保留了原始生态风貌，人为影响也比较小，水的质量好也没有污染，属于我国稀有的未受到污染的水库之一，从而鱼类丰富且种类繁多[12]。综上察尔森水库是个综合利用的大型水利枢纽[13]。向海湿地地处吉林省白城市通榆县，地理坐标为北纬 44°55′~45°90′，东经 122°5′~122°31′，位于科尔沁草原中部，北部与洮南市相接，西部与内蒙古自治区科尔沁右翼中旗相接，1922 年，向海湿地被列入国际重要湿地名录中，向海湿地自然保护区是国家级自然保护区[14]。向海湿地气候属于北温带大陆性季风气候。向海湿地东西宽为 42 千米，南北长 45 千米，总面积为 105,467 公顷[9]。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. Chaersen Reservoir water transfer for Xianghai Wetland emergency relief route map

图 1. 引察济向应急调水线路图

2.2. 数据来源

遥感数据来源于地理空间数据云平台的 Landsat 系列数据(<https://www.gscloud.cn/search>)。本研究选取了 2003~2022 年间的向海湿地和察尔森水库遥感影像,重点选择了云量较少(小于 16%)且数据完整的影像。时间上,数据主要集中在每年的 5 至 9 月,以确保所选影像具有相对一致的气候条件。此外,NDVI 数据(涵盖 2003、2005、2010、2012、2019、2021 年)来自 NASA,基于 MOD13A3 数据集提供的逐月 NDVI 栅格数据。

2.3. 研究方法

本研究通过目视解译方法,结合遥感影像数据,分析了向海湿地和察尔森水库的面积变化。为进一步提取和分析湿地与水库的变化。采用目视解译方法对每一幅遥感影像进行人工分析[15],结合地理信息和影像特征,识别出察尔森水库和向海湿地的边界、主要水体区域及其周围环境的变化。该方法不仅能够较为准确地确定湿地和水库的分布区域,还能根据影像的特征变化精确定位发生变化的区域,从而确保了结果的高精度。

3. 结果与分析

3.1. 察尔森水库时空变化

3.1.1. 察尔森水库的时间变化

根据表 1 数据,察尔森水库在过去 20 年间的总面积从 22.19 km² 增加至 62.05 km²,增加了约 39.86 km²。其中,2013 年水库面积达到 76.70 km²,为近 20 年面积最大值;而 2017 年水库面积为 19.92 km²,是近 20 年间的最小值。总体上,察尔森水库面积变化范围在 20 km² 至 80 km² 之间。从面积变化趋势来看,察尔森水库呈现出周期性的波动。在 2003~2005 年、2007~2013 年、2017~2021 年,水库面积呈上升趋势;而在 2005~2007 年、2013~2017 年、2021~2022 年,水库面积则出现下降。综上所述,察尔森水库在近 20 年中有 13 年表现为面积增长,7 年表现为面积下降,因此,整体趋势是水库面积呈上升状态。

Table 1. System resulting data of standard experiment

表 1. 察尔森水库 2003~2022 面积变化

日期	2003.05.27	2004.08.09	2005.09.13	2006.7.30	2007.08.02	2008.8.20
面积(km ²)	22.19	31.95	51.36	41.68	28.67	34.98
日期	2009.05.27	2010.08.10	2011.08.29	2012.08.07	2013.09.03	2014.08.21
面积(km ²)	42.49	48.60	52.95	67.60	76.70	60.75
日期	2015.07.07	2016.08.26	2017.06.26	2018.08.16	2019.08.19	2020.07.20
面积(km ²)	48.39	23.45	19.92	40.74	47.10	52.18
日期	2021.05.20	2022.09.20				
面积(km ²)	64.43	62.05				

3.1.2. 察尔森水库的空间变化

根据 2003 至 2020 年的遥感影像,察尔森水库的空间变化清晰地反映了水库面积的变化趋势。图 2 展示了过去 20 年间察尔森水库的遥感影像,直观呈现了水库在不同年份的扩展和收缩情况。进一步分析发现,察尔森水库的面积扩展并非均匀发生,而是具有一定的方向性,主要集中在北部和西部两个方向。图 3 中的边界变化图进一步明确了这一趋势,显示了水库在不同年份的空间边界变化,从而证实了水库扩展的主要方向。

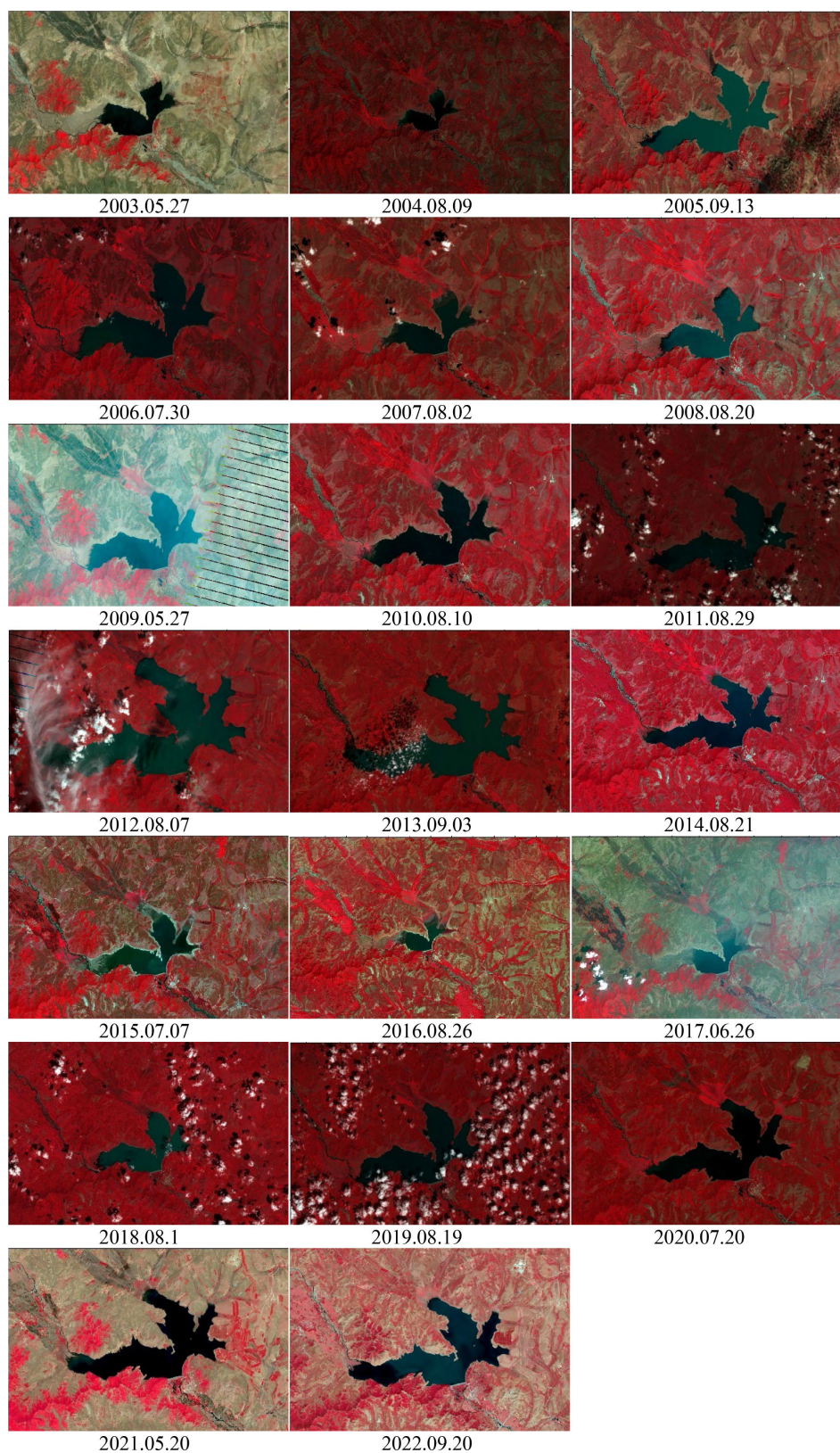


Figure 2. Chaersen reservoir remote sensing images from 2003 to 2022

图 2. 察尔森水库 2003~2022 遥感影像

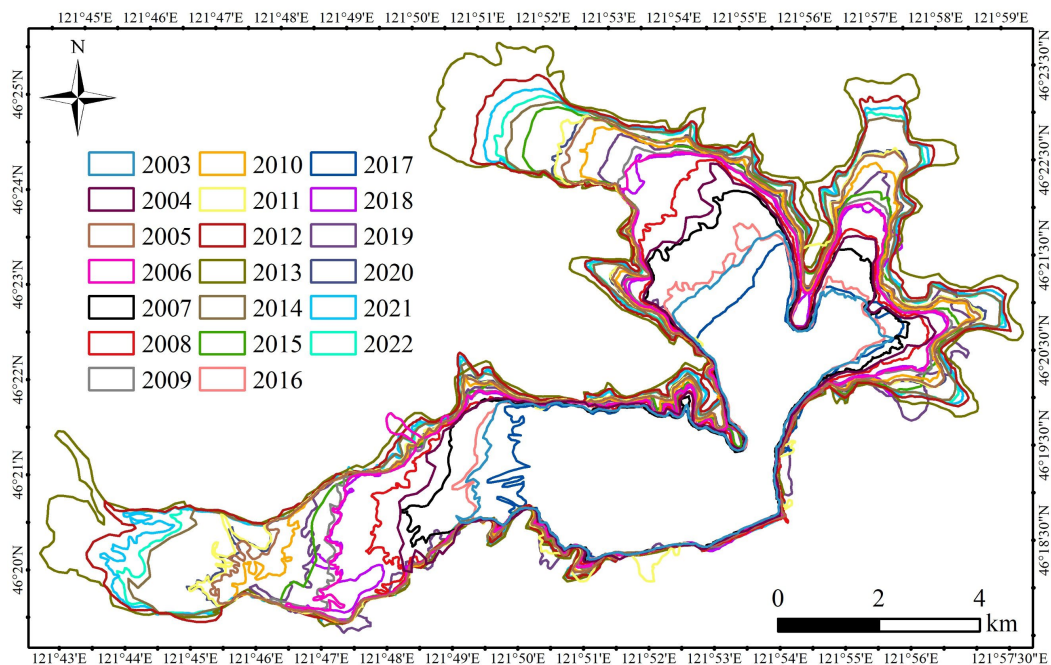


Figure 3. Chaersen reservoir boundary map from 2003 to 2022
图 3. 察尔森水库 2003~2022 年边界图

3.2. 向海湿地时空变化

3.2.1. 向海湿地的时间变化

根据表 2 数据, 向海湿地在过去 20 年间的总面积从 35.46 km² 增加至 59.38 km², 增加了 23.92 km²。其中, 2013 年湿地面积达到 69.33 km², 为近 20 年间的最大值; 2003 年湿地面积为 35.46 km², 是近 20 年间的的核心值。湿地面积的变化范围在 30 km² 至 70 km² 之间。从面积变化趋势来看, 向海湿地面积在 2003~2006 年、2010~2013 年、2019~2020 年呈上升趋势; 而在 2006~2010 年、2013~2019 年、2020~2022 年则出现下降趋势。综上所述, 向海湿地在近 20 年间有 7 年表现为面积增加, 13 年表现为面积减少, 因此, 整体上湿地面积呈现上升趋势。

Table 2. Area Changes of Xianghai Wetland from 2003 to 2022

表 2. 向海湿地 2003~2022 面积变化

日期	2003.08.31	2004.08.17	2005.08.28	2006.08.31	2007.08.02	2008.05.16
面积(km ²)	35.46	36.55	39.70	47.14	44.86	42.43
日期	2009.08.07	2010.08.10	2011.9.30	2012.08.07	2013.07.17	2014.08.05
面积(km ²)	41.60	36.50	49.45	60.27	69.33	67.94
日期	2015.08.08	2016.08.10	2017.08.29	2018.08.16	2019.08.19	2020.08.21
面积(km ²)	68.26	66.33	60.66	54.13	51.01	69.09
日期	2021.10.11	2022.09.20				
面积(km ²)	62.58	59.38				

3.2.2. 向海湿地的空间变化

不同年份的遥感影像直观展示了向海湿地面积的变化情况。图 4 展示了向海湿地在过去 20 年中的

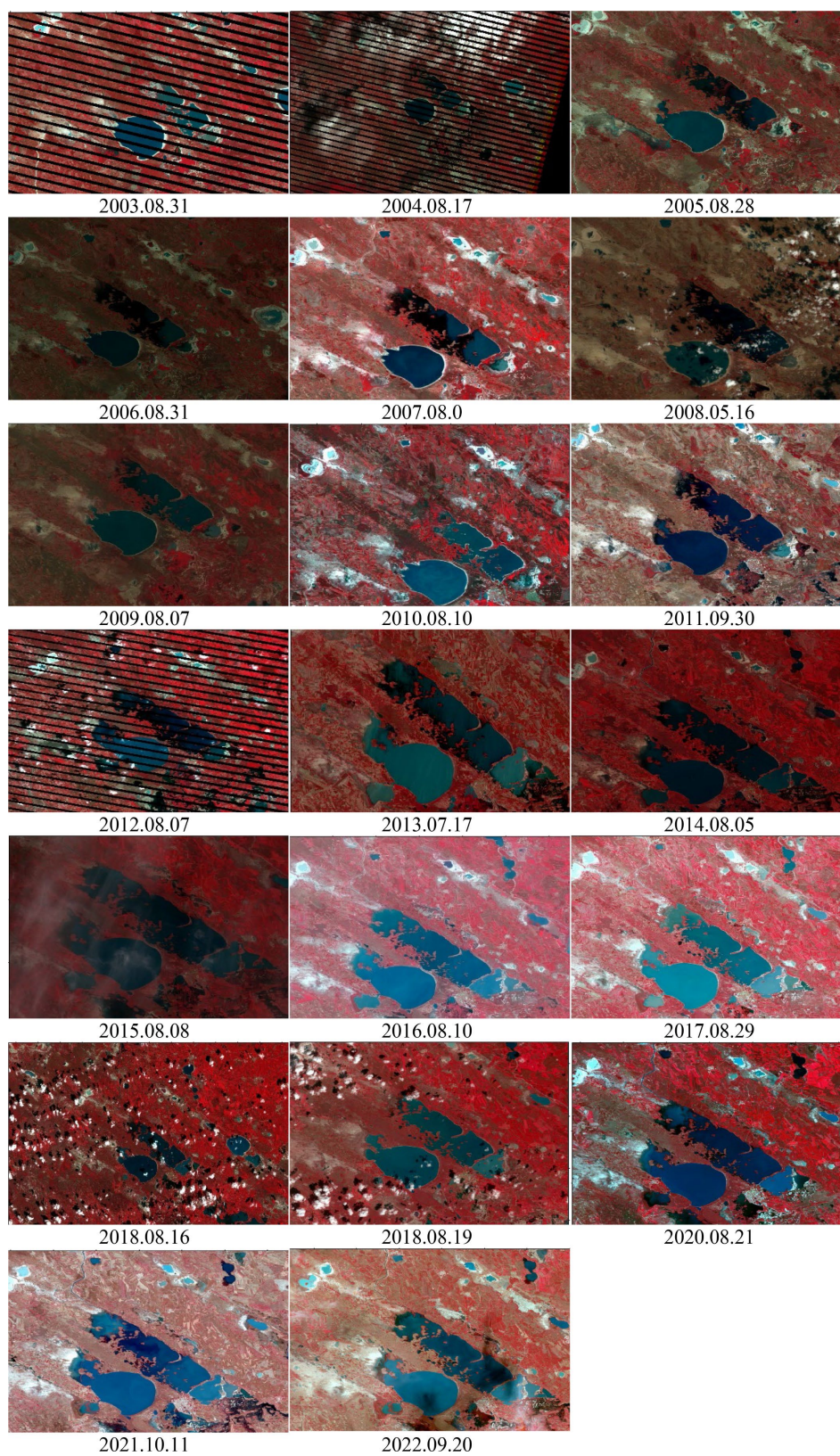


Figure 4. Xianghai Wetland remote sensing images from 2003 to 2022

图 4. 向海湿地 2003~2022 遥感影像

遥感影像。由于察尔森水库在 2004 年、2011 年和 2020 年曾实施应急补水措施，从图中可以看出，向海湿地在 2005 年、2012 年和 2021 年表现出面积扩大的趋势。而在应急补水之前，向海湿地的面积逐年减少，呈现出干涸的趋势。结合图 5 中的向海湿地的边界变化，可以直观地看到湿地在不同方向上的萎缩和扩展。近 20 年来，向海湿地的空间分布趋于分散，面积持续向外扩张，扩展方向主要从西北向东南延伸。

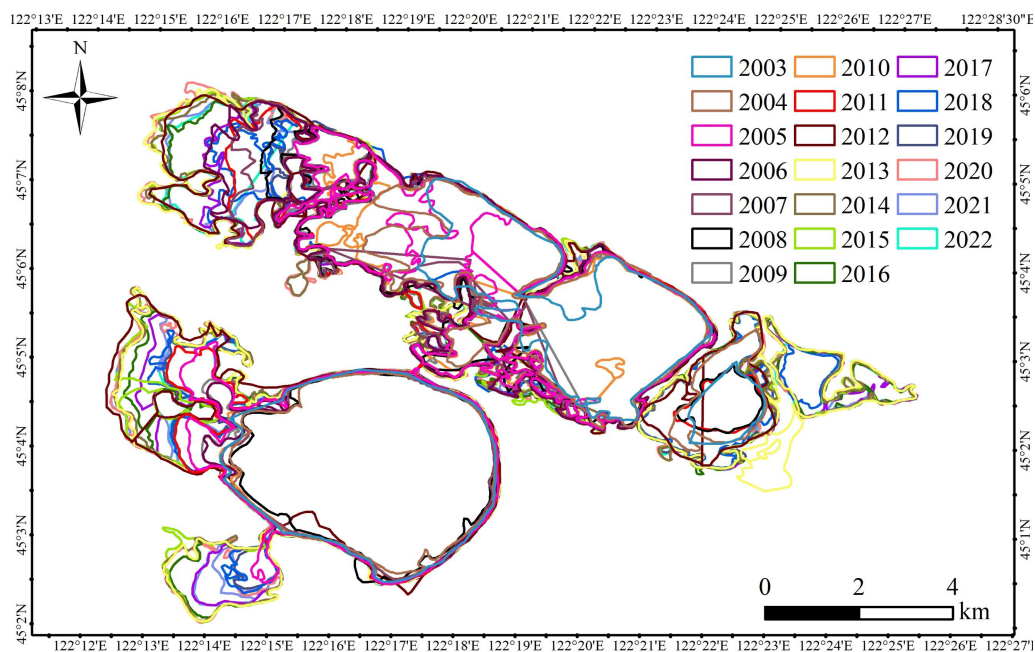


Figure 5. Xianghai Wetland boundary map from 2003 to 2022
图 5. 向海湿地 2003~2022 年边界图

3.3. 引察济向工程分析

受气候变化的影响，近 20 年来吉林省西部地区降水量逐年减少，导致向海湿地面积不断收缩，并多次遭遇严重干旱。为遏制向海湿地生态环境的进一步恶化，确保湿地生态环境的安全，松辽委根据吉林省的要求和水利部的部署，分别于 2004 年、2011 年和 2020 年组织了三次生态应急补水工程(表 3)。

2004 年，实施了第一次引察济向生态应急补水工作。通过龙华吐分洪闸，过水量超过 8300 万 m^3 ，其中 3470 万 m^3 水量进入向海水库。此次补水工程有效缓解了向海湿地的缺水问题，遏制了湿地面积的萎缩。由于长期缺水，向海湿地的鸟类已迁离，但通过生态应急补水，湿地面积恢复了 2.2×10^4 hm^2 ，恢复了往日的景象。此外，补水工作还使得向海湿地地下水位上升了 0.7 米，约 194 眼曾经无法使用的井再次投入使用。2011 年，第二次引察济向生态应急补水工作实施，镇西断面累计过流量达到 25,440 万 m^3 ，水库水位从补水前的 163.65 米上升至 165.33 米，蓄水量从 3930 万 m^3 增加到 9310 万 m^3 ，湿地地下水位抬升了约 1.1 至 1.5 米。2020 年，第三次引察济向生态应急补水工作启动。镇西断面累计过流量为 8500 万 m^3 。此次应急调水路线的起点位于内蒙古自治区的察尔森水库，经过洮儿河渠道输水，最终到达吉林省的龙华图分洪闸，全长 192 公里。这三次跨流域调水工程为向海湿地提供了宝贵的水资源，帮助恢复了湿地生态环境。

3.4. 向海湿地引水前后 NDVI 变化分析

向海湿地的 NDVI 在 2003 至 2021 年间发生了显著变化，特别是在 2004 年、2011 年和 2020 年进行

补水后。从图 5 和表 4 的分析结果来看,湿地的 NDVI 受补水措施的影响明显。2003 年湿地 NDVI 为 0.28,首次补水后,2005 年 NDVI 略降至 0.26,持续下降至 2010 年的 0.25,表明湿地植被健康状况逐渐恶化。2011 年补水后,2012 年 NDVI 回升至 0.28,表明补水对湿地植被有一定的恢复作用。此后,NDVI 持续上升,2019 年达到 0.31,2020 年补水后,2021 年 NDVI 进一步提高至 0.32,湿地植被恢复效果显著。总之,三次补水措施有效提升了湿地的 NDVI 值,显示出湿地生态系统在水源干预后的良好恢复。

Table 3. Three Chaersen Reservoir water transfer projects for the relief
表 3. 三次引察济向工程

时间	2004.6.25~2004.8.18	2011.6.19~2011.8.1	2020.4.5~2020.5.2
补水量	3470 万 m ³	6220 万 m ³	6400 万 m ³
费用	400 万左右	400 万左右	400 万左右
增水面积	90km ²	200 km ²	70 km ²
察尔森水库调水量	6600 万 m ³	——	10,380 万 m ³

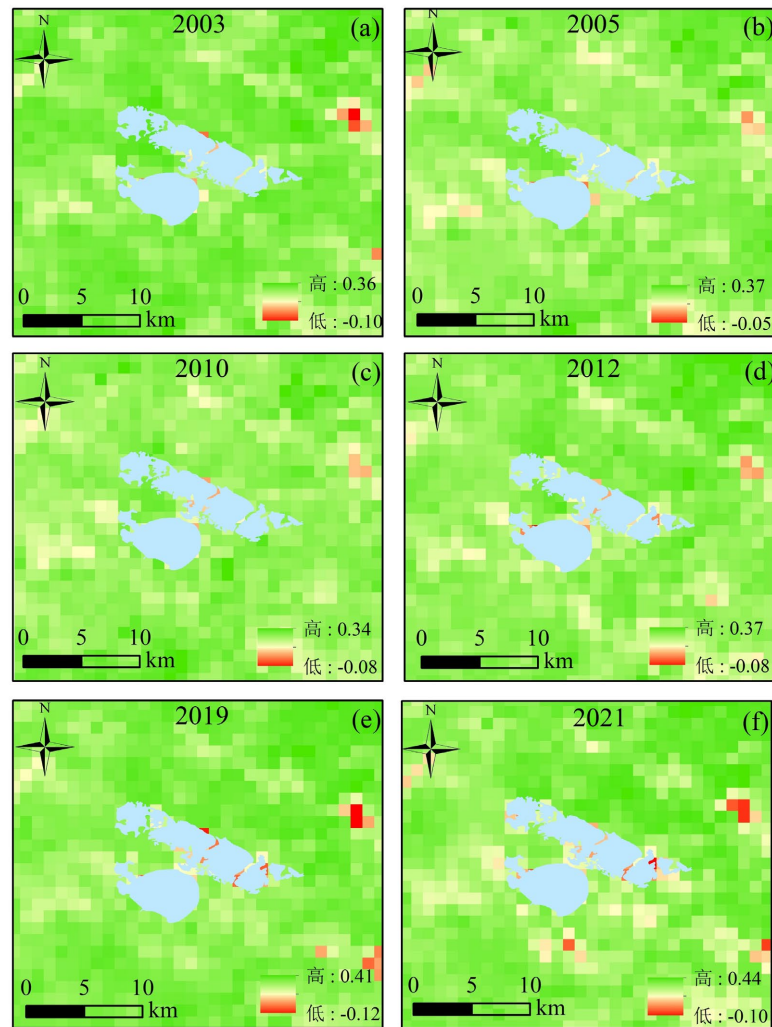


Figure 5. NDVI distribution map around Xianghai Wetland
图 5. 向海湿地周围 NDVI 分布图

Table 4. Annual average NDVI of Xianghai Wetland
表 4. 向海湿地 NDVI 年平均值

年份	2003	2005	2010	2012	2019	2021
NDVI 平均值	0.28	0.26	0.25	0.28	0.31	0.32

4. 讨论

本研究分析了察尔森水库对向海湿地的生态应急补水效果,结果显示生态补水措施对湿地面积恢复和 NDVI 起到了积极作用。尽管本研究已得出较为明确的结论,但仍有一些重要的生态学意义需要进一步探讨。

首先,生态补水对向海湿地植被恢复的影响明显,尤其是湿地的 NDVI 值在三次补水后显著上升,表明补水措施有效缓解了湿地缺水带来的生态压力。这一发现与已有的相关研究一致,如许多学者指出,通过补水可以显著改善湿地植被的生长和生态功能[16][17]。然而,尽管补水措施对湿地面积和 NDVI 值产生了积极影响,研究结果也表明湿地面积的变化受到多重因素的综合影响。在补水后,湿地面积的恢复主要体现在特定的时间窗口,如 2004 年、2011 年和 2020 年补水后的短期效果。这表明,虽然补水有效,但湿地恢复的持续性仍受到气候变化、土地利用和水质等多重因素的影响。为此,未来的研究需要进一步探讨补水与其他生态修复措施(如湿地恢复、植物多样性保护等)的结合效果,以实现湿地的长期稳定恢复。

本研究表明生态补水措施能够有效缓解湿地生态退化问题,并促进湿地生态系统功能的恢复。跨区域水调配作为一种应对水资源短缺和湿地退化的有效措施,已经在多个区域得到应用[17][18]。这些研究同样表明,补水措施能显著改善湿地水位并促进植物和动物群落的恢复。然而,研究也表明,跨区域水调配的效果会受到水源可用性、补水量、湿地类型等多因素的影响。因此,不同地区和湿地类型的补水效果应根据当地的生态和环境特征进行具体分析。

综上所述,生态应急补水对向海湿地的恢复起到了显著作用。未来的研究应继续加强湿地恢复措施的综合性和长期监测,结合多项生态保护措施,确保湿地生态系统的可持续性。

5. 结论

本研究通过遥感影像分析了近 20 年来察尔森水库和向海湿地的时间变化与空间变化,并评估了引察济向生态应急补水工程对湿地的影响。研究表明,近 20 年来,察尔森水库总面积呈现出显著的波动,整体呈上升趋势,其中 2013 年为面积最大值,达到 76.7 km²,而 2017 年为最小值,仅为 19.9 km²。水库面积的变化受人类活动和自然因素的双重影响,尤其是在 2005 至 2007 年、2013 至 2017 年等特定时期,水库面积出现了明显的下降。

向海湿地的面积变化趋势则与察尔森水库的水调配措施紧密相关。湿地的总面积由 2003 年的 35.46 km² 增加至 2022 年的 59.38 km²,最大面积出现在 2013 年,达到了 69.3 km²,而 2003 年为最小值。通过分析湿地面积变化曲线可以看出,湿地面积在 2003 至 2006 年、2010 至 2013 年和 2019 至 2020 年间有所增加,而在 2006 至 2010 年、2013 至 2019 年和 2020 至 2022 年间出现下降趋势。整体而言,向海湿地面积的变化受气候变化和人类活动的影响较大,但通过生态补水工程,湿地面积得到了部分恢复。在空间变化方面,遥感影像分析显示,察尔森水库的空间分布呈现出由北向西的扩展趋势,而向海湿地的面积扩展则主要表现为由西北向东南的延伸。这一变化在补水工程实施后尤为显著,表明跨区域水调配有效地促进了湿地恢复。通过引察济向生态应急补水工程,湿地的生态状况得到了有效改善。每次补水后,向海湿地的 NDVI 值明显上升,显示出植被覆盖度的提高。具体来说,2004 年补水后 NDVI 值从 0.28

下降至 0.26, 2011 年补水后 NDVI 值从 0.25 上升至 0.28, 2020 年补水后 NDVI 值从 0.31 上升至 0.32。三次补水工作的实施改善了湿地周围的植被环境, 提高了湿地的生态功能。

综上所述, 察尔森水库的生态应急补水工程对向海湿地的恢复和保护起到了至关重要的作用。随着气候变化和人类活动的影响日益加剧, 跨区域调水措施为湿地恢复提供了宝贵的水资源, 有效地缓解了湿地面积萎缩的趋势。未来, 继续加强湿地生态补水和保护措施, 对于保障湿地生态环境的可持续性具有重要意义。

参考文献

- [1] 姚艳玲, 张宇, 吕军, 等. 向海湿地补水生态效益评价[C]//河海大学, 贵州省水利学会. 2017 (第五届)中国水生态大会论文集. 长春: 松辽水环境科学研究所, 2017: 299-308.
- [2] 公雪婷, 刘志红, 阎奕维, 辛卓航, 李昱, 曹婷. 水文连通条件下向海湿地多水源补水研究[J]. 湿地科学, 2020, 18(6): 719-723.
- [3] 王教河, 张延坤, 朱景亮, 袁琪. 引察济向生态应急补水的分析[J]. 东北水利水电, 2004(10): 40-41+48-72.
- [4] 王有利. 向海湿地补水生态补偿机制研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [5] 王志鹏. 三江平原挠力河湿地群生态补水研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [6] 靳晓辉, 樊玉苗, 王会永, 等. 乌梁素海生态补水可持续运行的关键问题[C]//中国水利学会. 2022 中国水利学术大会论文集(第七分册). 金水: 黄河水利委员会黄河水利科学研究院; 巴彦淖尔: 内蒙古河套灌区水利发展中心, 2022: 252-257.
- [7] 费祥, 边境. 引察济向润生灵[J]. 吉林水利, 2011(9): 63.
- [8] 尹雄锐, 王晓妮. 2020 年引察济向生态应急调水实施情况及效果评价[C]//水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 中国水利学会减灾专业委员会, 《中国防汛抗旱》杂志社. 第十二届防汛抗旱信息化论坛论文集. 长春: 水利部松辽水利委员会流域规划与政策研究中心; 长春: 水利部松辽水利委员会, 2022: 63-67.
- [9] 张秀英, 张秀兰, 张玉, 朱春伟. 向海湿地自然资源保护存在的问题及对策研究[J]. 吉林农业, 2019(13): 38.
- [10] 李松鹤. 洮儿河流域察尔森水库汛期调度方案分析[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [11] 李帅, 徐志国, 赵也, 徐金婷. 察尔森水库除险加固工程坝后渗漏量监测优化设计[J]. 东北水利水电, 2021, 39(10): 68-70.
- [12] 崔迪, 宋金萍, 郑国臣, 魏念鹏, 邓红娜, 谷逊雪. 察尔森水库水质特征及其微生物多样性分析[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2021, 37(3): 282-289.
- [13] 宋金萍. 察尔森水库丰水水质特征分析及其微生物多样性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2021.
- [14] 高文宏, 闫红军. 引察济向恢复湿地功能效益分析[J]. 吉林水利, 2006(11): 18+20.
- [15] 彭凯锋, 蒋卫国, 侯鹏, 等. 结合多源专题数据和目视解译的大区域密集湿地样本数据生产[J]. 遥感学报, 2024, 28(2): 334-345.
- [16] 高树云. 生态补水对桑干河流域张家口地区地表水的影响分析[J]. 地下水, 2026, 48(1): 123-125+165.
- [17] 李冉, 张鸾, 贺成婉, 等. 生态补水背景下黄河三角洲河网浮游植物群落特征与关键环境因子耦合解析[J/OL]. 环境科学, 1-15. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202508242>, 2026-04-21.
- [18] 贾丹妮, 武连洲, 粟晓玲, 等. 跨区域调水工程“用户-枢纽”群联合优化调配[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 188-197.