

## 2003-2023 年内蒙古浑善达克沙地湖泊动态及气候驱动分析\*

吕圣薇<sup>1</sup>, 章 骞<sup>1</sup>, 张圣微<sup>1,2,3,4\*\*</sup>, 雒 萌<sup>1</sup>, 林 汐<sup>1</sup>, 王 帅<sup>1</sup>, 赵星宇<sup>5</sup>

(1: 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

(2: 内蒙古自治区生态水文学与水资源高效利用重点实验室, 呼和浩特 010018)

(3: 黄河流域内蒙段水资源与水环境综合治理内蒙古自治区协同创新中心, 呼和浩特 010018)

(4: 内蒙古农业大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 呼和浩特 010018)

(5: 内蒙古自治区水文水资源中心, 呼和浩特 010020)

**摘 要:** 干旱区湖泊是流域生态与环境变化的关键指示器, 对维持区域水循环平衡与生态系统稳定性发挥重要的水文生态功能。本文以中国北方干旱化显著、生态脆弱的气候敏感区——浑善达克沙地为研究对象, 开展了沙地湖泊动态与气候响应研究。通过融合 Landsat、Sentinel 以及 Global Surface Water(GSW)、Global Land Analysis and Discovery(GLAD)等多源数据, 利用水体指数法、水体分类增强法与随机森林分类算法提取水体面积, 并结合水位-面积关系与体积-面积经验曲线计算蓄水量变化。基于上述方法, 探究了浑善达克沙地 2003-2023 年月度与年度湖泊 (>0.01km<sup>2</sup>) 的面积与蓄水量变化, 并分析了相关气候影响因素。结果显示, 在年内尺度上, 沙地湖泊呈显著季节性波动, 5-10 月表现为单峰变化趋势。在年际尺度上, 近 21 年湖泊群整体呈持续退化趋势, 2023 年总面积较 2003 年减少了 37.17%。湖泊数量由 1198 减少至 466, 总体以小型浅水湖数量减少与干涸为主。在区域气候干旱条件下, 8%的永久性水体向季节性水体转化, 86%的季节性水体出现阶段性干涸。蓄水量整体呈下降趋势, 净蓄水量变化率为-0.005km<sup>3</sup>·yr<sup>-1</sup>, 大中型湖泊 (≥1km<sup>2</sup>) 贡献了 60%的蓄水损失。气候驱动机制表明, 降水、饱和水汽压差(VPD)与气温在 0-2 个月内对湖泊动态存在分布滞后, 其中降水与 VPD 的滞后峰值均为 1 个月。VPD 是年度与月度水体面积的主要负向影响因子。降水主导季节性水体面积的年际调控, 并与潜在蒸散发(ET)共同正向驱动月度波动。气温通过增加 VPD 与蒸散需求间接影响湖泊动态。本文从区域尺度揭示了气候变化下干旱区湖泊的响应机制与时空异质性, 可以为生态脆弱区的水资源适应性管理提供数据支持。

**关键词:** 多源遥感; 干旱区; 湖泊动态; 浑善达克沙地。

### Analysis of Lake Dynamics and Climate Drivers in the Hunshandake Sandy Land, Inner Mongolia (2003-2023)\*

Lv Shengwei<sup>1</sup>, Zhang Qian<sup>1</sup>, Zhang Shengwei<sup>1,2,3,4\*\*</sup>, Luo Meng<sup>1</sup>, Lin Xi<sup>1</sup>, Wang Shuai<sup>1</sup> & Zhao Xingyu<sup>5</sup>

(1: College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, 010018 Hohhot, P.R.China.)

(2: Inner Mongolia Key Laboratory of Ecohydrology and High Efficient Utilization of Water Resources, Hohhot 010018, P.R.China.)

(3: Autonomous Region Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in the Inner Mongolia Reaches of the Yellow River, 010018 Hohhot, P.R.China.)

(4: State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Inner Mongolia Agricultural University,

\*2025-09-30 收稿; 2026-01-29S 收修改稿。

内蒙古自治区科技计划项目 (2025YFDZ0008)、国家自然科学基金项目 (U2544201)、内蒙古自治区自然科学基金项目 (2024ZD08, 2025YQ029)、内蒙古自治区水利科技项目 (NSK202405)、内蒙古自治区高校创新研究团队计划项目 (NMGIRT2313) 和“草原英才”创新团队项目联合资助。

\*\*通讯作者; Email: zsw@imau.edu.cn。

010018 Hohhot, P.R.China.)

(5: Inner Mongolia Autonomous Region Hydrology and Water Resources Center, 010020 Hohhot, P.R.China.)

**Abstract:** Arid-zone lakes are key indicators of watershed ecological and environmental changes, playing vital hydrological and ecological roles in maintaining regional water cycle balance and ecosystem stability. This study investigated lake dynamics and their climatic responses in the Hunshandake Sandy Land, Inner Mongolia, a climate-sensitive region in northern China characterized by pronounced aridification and ecological fragility. By integrating multi-source datasets including Landsat, Sentinel, Global Surface Water (GSW), and Global Land Analysis and Discovery (GLAD), water extent was mapped using the water-index method, water classification enhancement approach, and random-forest classification. Changes in water storage were estimated by combining stage-area relationships and volume-area empirical curves. Based on these methods, we quantified monthly and annual changes in lake area ( $>0.01 \text{ km}^2$ ) and water storage from 2003 to 2023, while analyzing relevant meteorological factors. Results showed significant intra-annual seasonality, with lake extent exhibiting a single-peak trend from May to October. At the interannual scale, the lake system experienced a persistent degradation trend over the 21-year period. Total lake area decreased by 37.17% compared to 2003. The number of lakes declined from 1,198 to 466, primarily driven by the loss of small, shallow lakes and widespread drying. Under regional climatic aridity, 8% of formerly permanent water bodies converted to a seasonal status, while 86% of seasonal water bodies experienced episodic drying. Net water storage decreased at a rate of  $-0.005 \text{ km}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$ , with medium-to-large lakes ( $\geq 1 \text{ km}^2$ ) accounting for 60% of the storage loss. Climate-driven mechanisms revealed that precipitation, vapor pressure deficit (VPD), and air temperature exhibited spatiotemporal lags of 0-2 months, with both precipitation and VPD peaking at a 1-month lag. VPD emerged as the primary negative factor influencing annual and monthly water body area, while precipitation dominated the interannual regulation of seasonal water body area and jointly governed monthly fluctuations positively with potential evapotranspiration (ET). Temperature indirectly affected lake dynamics by increasing VPD and evapotranspiration demand. This regional-scale study clarifies the response mechanisms and spatiotemporal heterogeneity of arid-region lakes under climate change, providing data support for adaptive water resource management in ecologically fragile areas.

**Keywords:** Multi-source remote sensing; Arid zones; lake dynamics; Hunshandake Sandy Land.

湖泊作为水文过程与水循环的基本要素之一<sup>[1]</sup>,在调节区域气候与维持生态平衡中发挥着关键作用<sup>[2]</sup>,其演变特征反映了区域气候的波动特性与水资源格局的变化趋势<sup>[3-5]</sup>。在内陆干旱与半干旱地区,湖泊系统在时空尺度上具有显著异质性:大型湖泊通常维系着区域水资源的稳定性,而广泛分布的小型及微型水体则构成了局地生境的生态热点,并对环境扰动表现出更高的敏感性<sup>[6]</sup>。湖泊动态研究不仅需要把握长期的扩张或收缩趋势、干湿周期驱动的年际变化,也应纳入干涸与漫溢之间的年内波动,这对于综合揭示不同尺度与水文类型湖泊对环境变化的响应至关重要<sup>[7]</sup>。在当前气候变化的背景下,中国干旱半干旱地区的湖泊持续萎缩,削弱了区域淡水储量与供水保障能力<sup>[8]</sup>,引发水生生态退化与生态服务功能衰退<sup>[9]</sup>,生态恢复与水资源管理的难度增加<sup>[10,11]</sup>。因此,了解干旱区湖泊的长期变化与季节性动态,对于生态脆弱区实现水资源适应性管理具有重要科学意义。

浑善达克沙地位于中国典型的干旱半干旱过渡带,生态系统对气候变化具有较高的敏感性<sup>[12,13]</sup>。尽管地域面积有限,该地区仍是中国重要的生态屏障与荒漠化防治重点区域<sup>[14]</sup>。沙地内湖泊众多且分布广泛,虽然面积相对较小,但其动态变化程度异常活跃<sup>[15]</sup>,在维持生态系统良性循环、改善局部气候以及遏制扬沙方面具有不可替代的作用<sup>[16]</sup>。然而,浑善达克沙地生态条件脆弱,气候变化复杂,近年来沙地内湖泊逐渐出现萎缩与干涸。这不仅导致草地退化与沙地化的景观演替<sup>[17]</sup>,还可能会通过改变地表能量与水分收支<sup>[18]</sup>,恶化局地气候与人居环境,对区域生态安全与可持续发展产生威胁。此外,与许多大型内陆湖泊不同,浑善达克沙地湖泊主要受降水与蒸发平衡及浅层地下水补给<sup>[19,20]</sup>,其水体动态对环境变化表现出快速而显著的响应,是识别气候变化和干旱化进程的重要自然指示器。尽管目前已有研究涉及该区域湖泊动态,但多数仍局限于典型湖泊或大型地表水体<sup>[21,22]</sup>,对分布众多的季节性及临时性等小型非连续地表水体研

究相对薄弱。同时,对于区域尺度湖泊群的长期与季节性动态缺乏详尽的探讨,尤其在气候变化的背景下,湖泊的季节响应特征尚不清晰<sup>[20]</sup>。

实地观测难以全面反映地表水动态<sup>[23]</sup>,而多光谱卫星影像的日益普及与云计算平台的发展使得水体信息的获取更为高效<sup>[24-26]</sup>,已成为研究水资源时空分布的可靠手段<sup>[27-29]</sup>。然而,影像质量与传感器差异会导致处理策略的不同<sup>[30]</sup>,从中提取长时段、连续且准确的湖泊数据仍面临挑战<sup>[31]</sup>。荒漠化地区复杂的地表特征使得面积通常小于 0.1km<sup>2</sup> 的小型水体占主导地位。相较于大中型水体 (>1km<sup>2</sup>),小型水体更容易受到环境扰动的影响。受当前遥感图像的检测限制,现有水体地图更偏向面积大于 0.1km<sup>2</sup> 的湖泊<sup>[32]</sup>,使用单一数据源在识别此类小型水体时往往精度不足<sup>[14]</sup>。另外,湖泊形态与地形差异使得面积变化无法充分反映其对气候与环境变化的响应,而垂直信息(如蓄水量变化)能够有效弥补这一不足<sup>[33]</sup>。然而,由于高精度测高卫星仅限于少数大型湖泊<sup>[34]</sup>,蓄水量估算仍存在较大不确定性。考虑到中国北方干旱区湖泊重要的水文生态作用,本文通过整合 Landsat、Sentinel 以及 GSW、GLAD 等多源遥感数据,系统构建了浑善达克沙地湖泊月度数据集。主要研究目的是:(1)描述与量化浑善达克沙地 2003-2023 年不同规模与类型湖泊 (>0.01km<sup>2</sup>) 在面积与蓄水量变化的年际与年内动态;(2)解析气候因子对湖泊群动态的驱动作用。

## 1 研究区概况

浑善达克沙地是中国四大沙地之一,位于锡林郭勒草原南端,沿东西向横亘内蒙古高原东部,总面积达 5.3×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>。该区域地处干旱半干旱生态敏感地带和农牧交错带,是中国北方的重要生态屏障。总体格局呈现以草地为主、伴有人工固沙与退化-恢复并存的林草带,局部存在裸地与流动沙丘。沙地分布众多的湖泊、水泡子和沙泉,并由少数内流河相互连通。由于依赖天然降水与浅层地下水补给,沙地的水生态系统因沙质疏松、持水性差而极为脆弱。

浑善达克沙地以固定、半固定沙丘为主,含少量流动沙丘,且东部多固定沙丘,西部多半固定沙丘<sup>[35]</sup>。丘间低地植被较好,与草甸湿地交错分布<sup>[36]</sup>。沙地内湖泊多位于半固定或固定沙丘之间的低洼地带,湖岸带周边通常发育草本-灌木植被带。在干旱半干旱环境中,沙地植被在防风固沙与维持沙地、草地生态系统稳定性方面发挥重要功能<sup>[37]</sup>。这些植被带与固定、半固定沙丘共同作用,削弱了土壤风蚀与沙粒输移,在区域尺度上可有效抑制沙丘大幅横向迁移与对湖泊盆地边界的侵蚀。尽管局部流动沙丘可能引起岸线的微小移动,但对整体湖盆结构的影响相对有限。在 2003-2023 年研究时段内,湖泊并未受到显著的流动沙丘侵蚀或地形重塑,湖盆形态可视为整体上基本稳定。

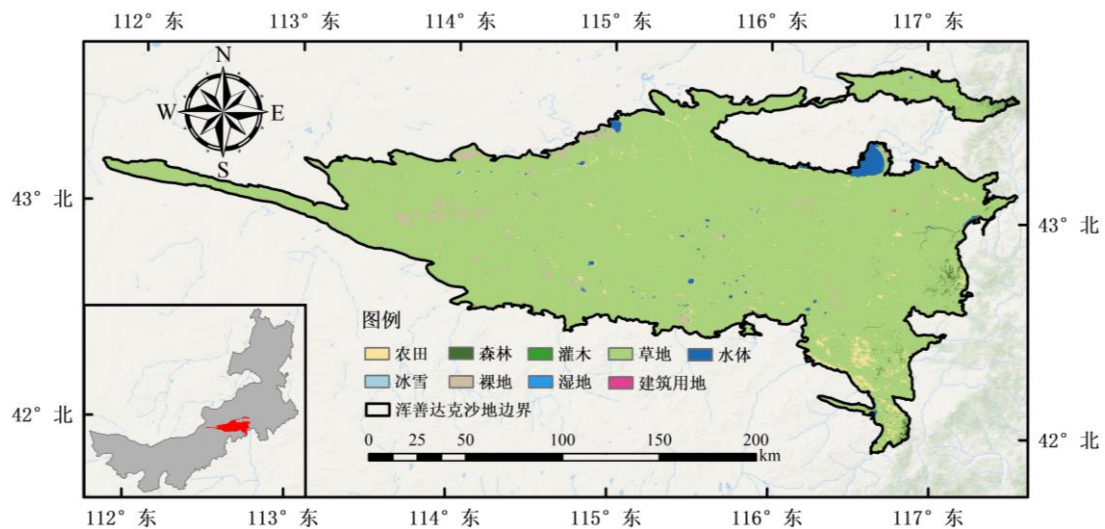


图 1 内蒙古浑善达克沙地研究区概况图。

Fig.1 Overview map of Hunshandake Sandy Land, Inner Mongolia

## 2 数据与方法

### 2.1 卫星与气候数据

Landsat 系列卫星是美国航空航天局 (NASA) 为资源调查与环境监测而发射的地球观测卫星<sup>[38]</sup>。本研究共使用了 2636 幅 Landsat 影像, 包括 400 幅 Landsat 5 专题制图仪(TM)影像 (2003-2011 年)、1414 幅 Landsat 7 增强型专题制图仪(ETM+)影像 (2003-2023 年)以及 822 幅 Landsat 8 陆地成像仪(OLI)影像(2013-2023 年)。

Sentinel-2 是欧洲航天局 (ESA) 于 2015 年发射的一组高分辨率多光谱地球观测卫星<sup>[39]</sup>, 由 Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 组成。其主要载荷为多光谱仪 MSI, 可捕获 12 个光谱波段的数据。通过使用 2019-2021 年经正射校正与大气校正后的 Sentinel-2 地表反射率数据, 提取了研究区的湖泊面积。在本研究中, 该数据集作为高精度验证标准, 用于评估三种水体提取方法并选出最小 RMSE 的水体面积结果。

GSW 是一个 30m 分辨率的全球地表水时空图数据集 ([https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JRC\\_GSW1\\_3\\_MonthlyHistory](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JRC_GSW1_3_MonthlyHistory)), 时间跨度为 1984-2021 年, 该数据集包含每月的水体覆盖和水体出现图像, 可用于获取长时序的水体面积。文中用以提供长期月度水体覆盖与出现频率, 并作为填补和增强长期面积序列的主要数据源之一。

GLAD 数据集(<https://www.glad.umd.edu/dataset/global-surface-water-dynamics>)以 30m 分辨率展示了 1999-2021 年全球地表水的时空动态。GLAD 年度水体百分比图以高精度观测频率解释了水体的年内变化。文中用以对水体进行采样, 并辅助训练与评估随机森林分类算法。

航天飞机雷达地形测绘使命(SRTM)于 2000 年 2 月实施全球地形测绘任务, 通过采用干涉合成孔径雷达(InSAR)技术, 制作了覆盖北纬 125° 至南纬 57° 区域的数字高程模型(DEM)。本文通过 SRTM DEM 数据([https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USGS\\_SRTMGL1\\_003](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USGS_SRTMGL1_003))的增强迭代建立水位与面积之间的函数关系, 用于估算蓄水量变化。

ERA5-Land 再分析数据集是通过重放 ECMWF/Copernicus (C3S) 基于 ERA5 再分析的陆面部分生成的。文中使用了气温(TM)、降水量(P)、潜在蒸散发量(ET)、饱和水汽压差(VPD)与风速(W), 时间分辨率为每月, 空间分辨率为 0.1°, 以分析气候因子对湖泊动态的影响, 并作为遥感提取结果的辅助环境变量。

本文以 Landsat 系列影像与 GSW、GLAD 数据集构建 2003-2023 年浑善达克沙地湖泊的月尺度面积序列, 对每年 5-10 月的有效观测影像进行统一处理与融合。Sentinel-2 并不直接参与长时序影像融合, 而是仅作为 2019-2021 年的高精度验证基准, 用于评估 Landsat-MNDWI、GSW-水体分类增强以及 GSW/GLAD-随机森林三种提取方法的精度, 从而确定最优面积数据与补充数据来源 (详见 2.2.1)。

### 2.2 研究方法

2.2.1 水体面积提取 由于研究区的 Sentinel-2 数据仅自 2019 年起可用, 无法满足长时序观测要求, 因此采用 Landsat 水体指数法、水体分类增强的 GSW 与随机森林分类算法融合提取水体面积。为降低全球水体数据集引入的区域尺度误差, 本研究选取 GSW 与 GLAD 的高置信度水体与非水体像元作为随机森林训练样本, 并剔除了沙地强反射、云污染及浅水区等潜在误差区域。Sentinel-2 MSI 10m 分辨率影像仅作为独立验证基准, 通过人工目视解译与阈值优化来确保水体边界的精度。具体方法为: 将三种方法提取的每个湖泊面积与 Sentinel-2 的 MNDWI 提取结果进行 RMSE 比较, 将 RMSE 值最小的方法确定为最优面积来源并作为原始数据, 其余两种数据作为填补原始数据像元缺失的补充数据<sup>[30]</sup>, 从而构建了浑善达克沙地 2003-2023 年 5-10 月完整且连续的逐月湖泊面积 (>0.01km<sup>2</sup>) 数据集。此外, 由于 GSW 与 GLAD 数据集时间覆盖截至 2021 年, 因此 2022-2023 年的逐月水体面积均通过水体指数法获取。

(1)水体指数法: 是利用光谱吸收特性将水体与其他地物区分开来的一种重要的遥感影像水体提取方法。文章采用(MNDWI>NDVI 或 MNDWI>EVI)且 EVI>0.1 作为水体提取标准<sup>[24]</sup>。

$$MNDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{green} + \rho_{SWIR1}} \quad (1)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (2)$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + 6 \times \rho_{red} - 7.5 \times \rho_{blue} + 1} \quad (3)$$

式中,  $\rho_{green}$ ,  $\rho_{red}$ ,  $\rho_{blue}$ ,  $\rho_{NIR}$ 和 $\rho_{SWIR1}$ 分别是 Landsat 图像的绿色、红色、蓝色、近红外和短波红外波段。

(2)水体分类增强方法: 是将未受污染影像中水体频率 $\geq \alpha$ 的像元判为水, 并将同一时期受污染影像中水体频率 $\geq \alpha$ 的像元一并恢复分类为水<sup>[27]</sup>, 用于恢复 GSW 数据集中缺失的像元并进行重新分类, 从而获取水体的长时间序列数据。

(3)随机森林分类算法:是将 GSW 和 GLAD 数据集作为训练集, 用于自动检测 Landsat 系列卫星影像中提取的水体。同时, 为提高水体的可用性, 使用 GSW 数据集填补因云层阴影以及无效像素造成的影像空白<sup>[30]</sup>。

2.2.2 精度评价 本文以 10m 分辨率的 Sentinel-2 MSI 影像作为验证数据, 将提取的水体掩膜重采样至 30m, 分别与基于 Landsat 系列影像及 GSW、GLAD 数据集三种方法生成的水体数据在统一空间分辨率下进行对比。通过计算 Sentinel-2 与各方法之间的面积偏差 (RMSE), 来确定最优面积数据与补充数据。此外, 考虑到 0.01 km<sup>2</sup>对应约 11 个连续 Landsat 像元 (或约 100 个 Sentinel-2 像元), 在该面积阈值以上, 岸线处个别像元的错分对整体面积估算的相对误差较小<sup>[40]</sup>, 可满足后续面积统计与变化分析的精度需求。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (8)$$

式中,  $\hat{y}_i$ 表示预测值,  $y_i$ 表示观测值,  $n$ 是观测值的数量。

另外, 基于混淆矩阵使用了以下指标来评价水体总体提取精度: 总体准确性(OA)、Kappa 系数、用户准确性(UA)、生产者准确性(PA)。

2.2.3 水体频率计算 水体存在频率又称淹没频率, 通常由地表水动态表示, 反映了地表水体观测中的可靠数据比例。利用公式(4)计算每个像元的水体频率(WIF), 即某像元点被识别为水体的次数与该像元点在同一时期被良好观测的总次数之比。

$$WIF(t) = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} W_{t,i} \times 100 \quad (4)$$

其中,  $N_t$ 表示某一时期内影像像元的有效观测总数,  $W_{t,i}$ 为第*i*张水体影像在该像元上的对应单位值 (1 表示有水, 0 表示无水)。依据 WIF 阈值将每年的水体像元分类如下: 年最大水体 (WIF>25%), 季节性水体 (25% $\leq$ WIF<75%), 永久性水体 (WIF $\geq$ 75%)。

按照公式(4)在像元尺度上逐像元累加并归一化处理: 以每年 5-10 月的月度二值水体影像合并计算得到年度 WIF (年度样本数 N=6), 多年累积水体 WIF 考虑了 2003-2023 年每年 5-10 月的月度二值水体影像 (总体样本数 N=126)。

2.2.4 蓄水量估算 文章从 SRTMDEM 中提取了各湖泊的水位-面积(h-A)数据, 通过建立 h-A 关系曲线, 从而推导出计算水位的函数方程。对于每个湖泊的 h-A 数据, 使用线性、二次和三次多项式关系进行最小二乘曲线拟合获取三条拟合曲线 (公式(5)), 将决定系数 R<sup>2</sup> 最高的曲线作为该湖泊的 h-A 曲线, 并由该曲线计算水位。另外, 如果该水体面积小于 2003 年的相应面积, 则外推 h-A 曲线以计算相应的水位。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{argminf}(a, b) = \text{argmin}_{a, b} \sum_{i=1}^n (E_i - E_{p1})^2 \\ E_{p1} = aA_i + b \\ \text{argminf}(a, b, c) = \text{argmin}_{a, b, c} \sum_{i=1}^n (E_i - E_{p2})^2 \\ E_{p2} = aA_i^2 + bA_i + c \\ \text{argminf}(a, b, c, d) = \text{argmin}_{a, b, c, d} \sum_{i=1}^n (E_i - E_{p3})^2 \\ E_{p3} = aA_i^3 + bA_i^2 + cA_i + d \end{array} \right. \quad (5)$$

式中,  $\text{argminf}(a, b)$ ,  $\text{argminf}(a, b, c)$ ,  $\text{argminf}(a, b, c, d)$ 表示当线性曲线、二次项曲线和三次项曲线与观测值之差的平方和最小时参数 $a, b, c, d$ 的值。 $E_i$ 和 $A_i$ 分别表示各水位-面积关系中各数据对对应的水位和面积。

面积与水位-面积法得出的水位输入棱台体积公式(6)计算总蓄水量变化。

$$\Delta SWS_{t,t+1} = \frac{1}{3}(A_t + A_{t+1} + \sqrt{A_t A_{t+1}})(H_{t+1} - H_t) \quad (6)$$

其中, $\Delta SWS_{t,t+1}$ 为地表水蓄水量变化量, $A_t$ 和 $H_t$ 分别t为时刻下的湖泊面积和水位, $A_{t+1}$ 和 $H_{t+1}$ 分别为t+1时刻下的湖泊面积和水位。

本文采用 SRTM 30m DEM 用于构建湖泊 h-A 关系并估算蓄水量变化。基于 SRTM 作为初始地形数据已在区域与全球湖泊研究中得到广泛应用,整体精度可满足小型湖泊水文变化分析要求<sup>[41]</sup>。然而,由于 SRTM DEM 的空间分辨率与垂向精度限制,部分微小湖泊可用 h-A 数据点不足,且低坡度浅水湖泊的湖底高程变化幅度有限,难以量化水位差。对于此类湖泊,基于 SRTM 的 h-A 进行外推拟合容易产生平坦段或不稳定值,从而导致水位差估计存在较大不确定性。因此,为降低 DEM 噪声对蓄水量计算的影响,本文对研究区内 h-A 拟合良好的湖泊( $R^2 > 0.8$ )采用公式(6)计算蓄水量变化,对 h-A 数据点不足或拟合效果较差的湖泊,以研究区内 h-A 拟合良好的湖泊为样本,构建了经验体积-面积幂律曲线(公式(7)),用于估算无显著计算性水位或蓄水量变化水体的蓄水量。

$$V = \alpha A^\beta \quad (7)$$

式中, $V$ 与 $A$ 分别为湖泊体积与面积, $\alpha$ 与 $\beta$ 分别为湖泊尺度参数与形状参数。该经验关系主要反映湖泊几何特征的平均规律,用于估算微小、浅水湖泊的蓄水量变化,并在区域尺度上评价总蓄水量变化。

**2.2.5 湖泊动态的归因分析** 为评估气候因素对浑善达克沙地湖泊变化的影响,采用 Spearman 相关系数分析变量之间的相关性;并基于协方差结构方程模型分析气候因子对湖泊面积变化的作用路径。模型在 R 语言环境中基于 lavaan 包实现,参数采用最大似然方法估计。所用变量为连续型再分析气候数据与区域尺度统计量,时间序列完整、一致性较高;在显变量路径分析下,最大似然估计对轻度分布偏态具有一定稳健性。模型拟合效果通过比较拟合指数(CFI)、近似误差均方根(RMSEA)和拟合优度指数(GFI)进行评价。

### 3 结果

#### 3.1 水体提取精度评价

图 2(a)-(c)的结果表明,三种不同方法在湖泊面积 RMSE 上的总体精度较为一致。但在低误差(RMSE=0-0.01km<sup>2</sup>)与高误差(RMSE>1km<sup>2</sup>)提取结果中,随机森林算法识别效果最优,分别对应 120 个低误差与 18 个高误差。而水体指数法为 115 个低误差与 28 个高误差,水体分类增强法为 116 个低误差与 22 个高误差。三种方法融合后的提取精度显著提升,分别对应 170 个低误差与 9 个高误差(图 2(d))。

图 3 是三种方法融合生成的浑善达克沙地湖泊面积合成数据集的精度验证结果。图 3(a)展示了 2019-2023 年 5-10 月共 30 张月度合成影像的总体精度,其中 OA、Kappa 系数和 UA 的均值与中位数均在 0.90

以上, 相比之下 PA 整体略低。不同月份的提取精度显示 (图 3b), 5-6 月的离散度较大, 个别样本出现低值离群点 ( $<0.80$ )。相比之下, 7-10 月总体更为稳健, 其中 7-8 月最稳定, 9 月波动和漏检程度较大。

总体来看, 年度与月度的水体融合提取精度均保持在较高水平。结合最小湖泊面积阈值  $0.01\text{km}^2$ , 可认为融合后的 30m 湖泊面积精度足以支撑对面积大于  $0.01\text{km}^2$  湖泊在 2003-2023 年间年际及季节性面积变化特征的定量分析。

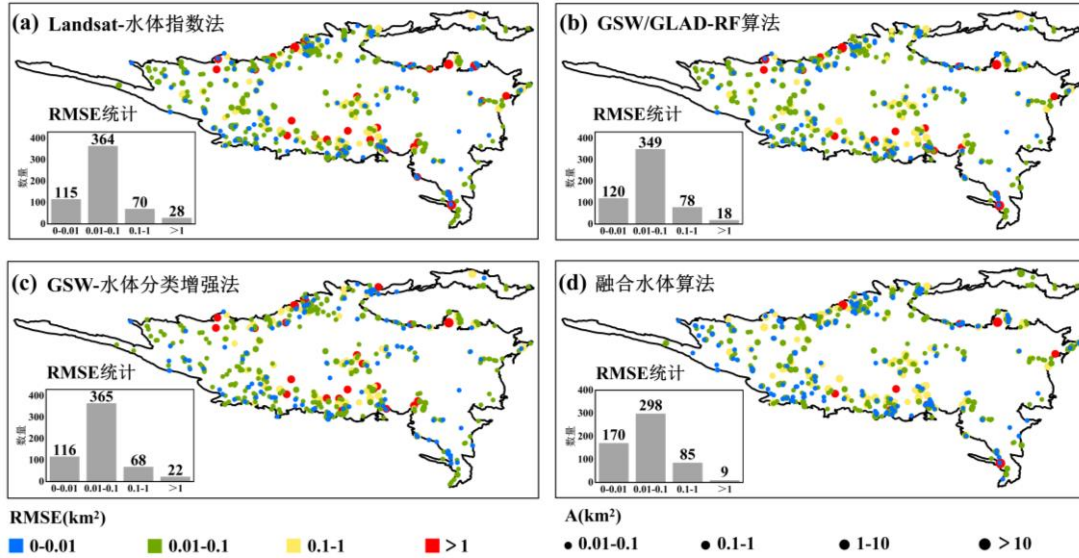


图 2 (a)水体指数法、(b)水体分类增强法、(c)随机森林分类算法与(d)三种方法融合 (Landsat-MNDWI、GSW-水体增强与 GSW/GLAD-随机森林) 的 RMSE 空间分布。

Fig.2 Spatial distribution of RMSE for (a)water body index, (b) water body classification enhancement, (c) random forest classification algorithm, and (d) three method integrations (Landsat-MNDWI, GSW-water body enhancement, and GSW/GLAD-random forest).

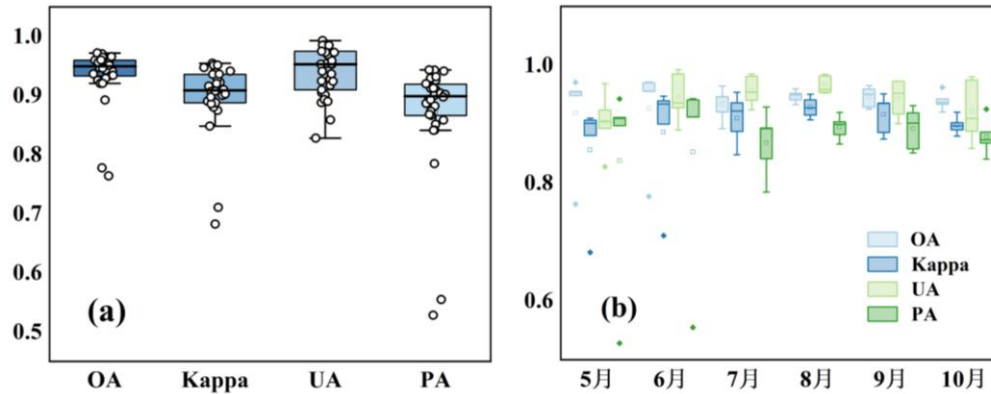


图 3 基于三种方法融合的湖泊面积提取精度验证。(a)月度水体合成影像的总体性能。(b)不同月份的准确度验证。

Fig.3 Accuracy validation of lake area extraction based on three method integrations. (a) Overall performance of monthly water body composite images. (b) Accuracy validation across different months.

### 3.2 浑善达克沙地湖泊群的时空变化格局

3.2.1 水体淹没频率时空格局 图 4a 展示了 2003-2023 年浑善达克沙地的累积水体频率的空间分布。总体来看, 地表水体分布呈现高时空异质性: 永久性水体呈簇状分布, 集中于沙地中部及东北部。而季节性水体主要散布于沙地西部及其边缘地带, 年际波动与消长较为显著。纬向面积分布 (图 4b) 显示, 水体面积主要聚集于  $42.6^{\circ}\text{N}-43.6^{\circ}\text{N}$ , 其中  $43.2^{\circ}\text{N}-43.6^{\circ}\text{N}$  贡献了区域内的主要水体面积, 占比约为 70%, 这一

分布主要受沙地内面积最大的达里诺尔湖的存在所主导。若剔除该大型湖泊, 纬向分布将呈多峰化并在约 42.9°N 等纬段出现次级峰值, 整体格局变得更为分散。经向面积分布 (图 4c) 显示, 沙地东部存在明显水体面积峰值, 中部、西部以低幅度波动为主。总体而言, 浑善达克沙地主要呈现出局部集中与广域分散的水体分布格局, 大中型永久性水体是构成最大水体的主体, 季节性水体则在年内与年际尺度上主导着沙地湖泊动态的空间差异。

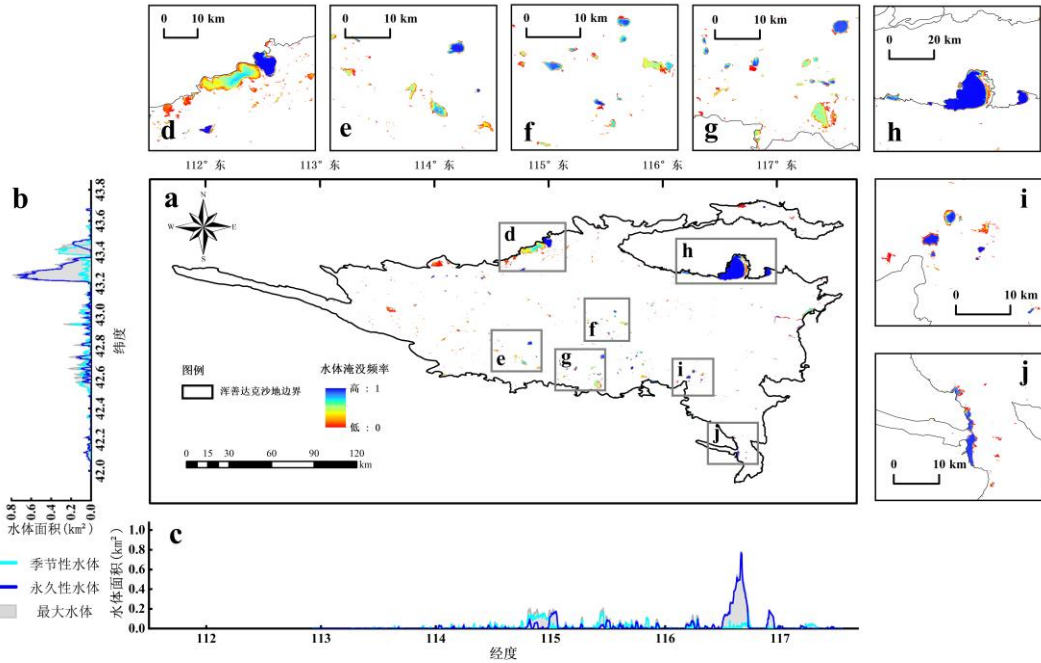


图 4 浑善达克沙地 2003-2023 年累积水体淹没频率分布图(a)。水体面积 (季节性水体和永久性水体) 沿纬向和经向汇总图 (b,c)。图 d-j 为局部放大图。

Fig.4 Water inundation frequency distribution map of the Hunshandake Sandy Land from 2003 to 2023 (a). Aggregated maps of water body area (seasonal and permanent water bodies) along latitude and longitude (b, c). Figures d-j depict enlarged views.

为揭示沙地湖泊的时空变化规律, 选取 2003-2023 年间每隔 3 年的共 8 个年份 (2003、2006、2009、2012、2015、2018、2021 与 2023) 可视化分析湖泊群的空间分布动态。总的来看, 水体格局在年际尺度上存在显著的时空动态特征, 但总体结构相对稳定 (图 5)。面积大于 1km<sup>2</sup> 的永久性水体共有 6 个 (图 5 中的 a-f), 其中岗更诺尔湖、巴彦呼日诺尔湖、多伦湖与面积最大的达里诺尔湖在整个研究期内长期稳定存在。查干诺尔湖由东西两湖组成, 东湖面积小为淡水, 西湖面积大为咸水。东湖在 2003-2023 年水体频率均为 >0.75, 西湖逐年萎缩且 2006 年后逐渐演变为季节性水体。宝沙达来湖自 2006 年水体频率降入季节性区间, 并持续至研究期末, 2015 年和 2023 年甚至出现短暂消退。散布于沙地内部及其周缘的小型湖泊呈现出了明显的年际波动, 多在季节性与非水体的状态间转换, 但很少转变为高频的稳定水体。

**3.2.2 湖泊群的年内动态** 2003-2023 年 5-10 月的湖泊面积均值呈现出明确的季节特征 (图 6(a)): 5-6 月逐月减少, 7 月出现次峰, 8 月略有回落, 9 月达到年内峰值, 10 月小幅下降的趋势。另外, 9-10 月的离散程度明显高于其他月份, 可见雨季后的年际变异性增强。年内湖泊数量逐月增加, 9-10 月趋于稳定。数量结构的主导与变动以微型湖泊 (0.01-0.1km<sup>2</sup>) 为主, 大中型湖泊 (≥1km<sup>2</sup>) 的数量基本不变 (图 6(b))。微型湖泊数量与总面积均值的月度变化趋势一致。由图 6(c) 可知, 多年水体面积的缓慢变化伴随显著的季节性波动, 年内面积峰值的年际振幅较大。2003-2013 年月度水体面积在 360-564km<sup>2</sup> 之间大幅波动, 2004 年与 2012 年在 9 月出现多年峰值, 分别达到 564.36km<sup>2</sup> 与 561.21km<sup>2</sup>。随后 2013-2023 年水体面积由 494km<sup>2</sup> 下降至 300km<sup>2</sup>, 2022 年 6 月下降至多年最低值为 225.71km<sup>2</sup>。

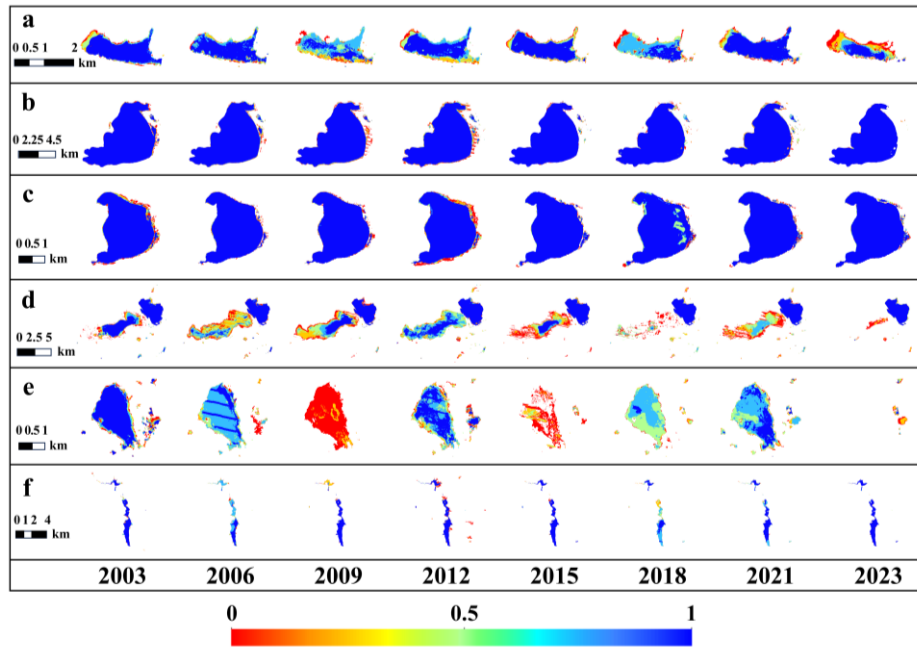


图5 年度水体频率空间分布图。

图中 a-f 分别代表巴彦呼日诺尔湖、达里诺尔湖、岗更诺尔湖、查干诺尔湖、宝沙达来湖、多伦湖。

Fig.5 Annual water inundation frequency spatial distribution map of water bodies. a-f represent Bayanhuri Nuur, Dalinur, Ganggen Nuur, Hulchaganur, Baoshadainur, and Dolon Nuur, respectively.

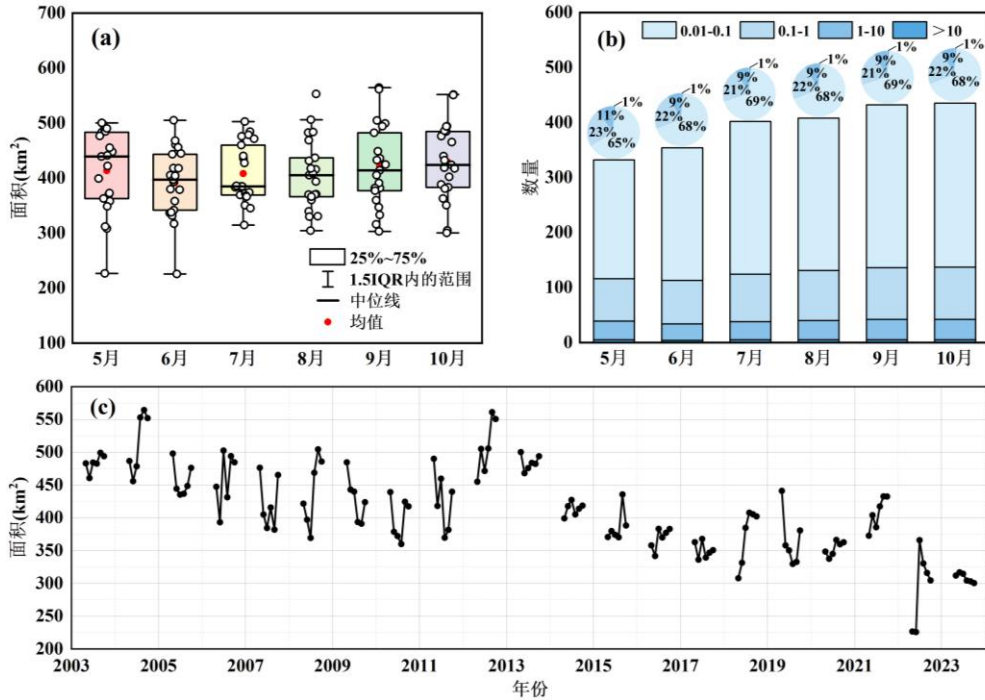


图6 (a)2003-2023 年逐月湖泊面积箱型图。(b)湖泊数量逐月堆积图。(c)湖泊面积的年内变化。

Fig.6 (a) Box plots of lake area by month from 2003 to 2023. (b) Monthly accumulation chart of lake counts. (c) Intra-annual variation in lake area.

3.2.3 湖泊群的年际动态 图 7 展示了浑善达克沙地 2003-2023 年期间面积大于  $0.01\text{km}^2$  的永久性、季节性和年最大水体的面积与蓄水量的变化情况 (图 7-8)。由图 7(a)可知,年最大水体面积总体呈缓慢下降趋势,变化率为 $-0.023\text{km}^2 \cdot \text{yr}^{-1}$ 。2012 年出现多年峰值,最大水体面积达到  $561.21\text{km}^2$ ,占当年沙地总面积的 0.97%。之后波动下降,2023 年降至多年湖泊面积最小值,为  $361.91\text{km}^2$ 。季节性水体面积在年际峰谷值处与年最大面积呈同步变化,而永久性水体面积则表现更为平缓,对短期波动的贡献较小。而在长期趋势中,永久性水体面积与年最大面积一致性较高。年度永久性水体面积均远高于季节性水体面积。

图 7(b)表明 2003-2023 年永久性和季节性水体均表现为微型和小型湖泊 ( $0.01-1\text{km}^2$ ) 数量占比最多且变化幅度较大,与总数量的年际变化趋势存在较高的一致性,大中型湖泊 ( $\geq 1\text{km}^2$ ) 数量则较为稳定。另外,季节性水体数量变化范围在 317-883 之间,远超出永久性水体 (数量范围在 130-222)。湖泊数量与地表水体总面积之间存在显著的正相关关系 ( $R^2=0.85, p<0.01$ ) (图 7(c)),表明湖泊数量变化在一定程度上驱动了总水体面积的变化,尤其是微型和小型水体数量的减少。

年际净蓄水量变化为各年月度净变化量之和。研究区所有大于  $0.01\text{km}^2$  的湖泊的平均蓄水量年变化率约为  $1 \times 10^{-5}\text{km}^3 \cdot \text{yr}^{-1} (-0.022-0.016\text{km}^3 \cdot \text{yr}^{-1})$ ,总蓄水量年变化率约为 $-0.005\text{km}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$ 。面积大于  $1\text{km}^2$  的湖泊总蓄水量变化率约为 $-0.003\text{km}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$ ,大型湖泊贡献了总体蓄水量下降的约 60%。

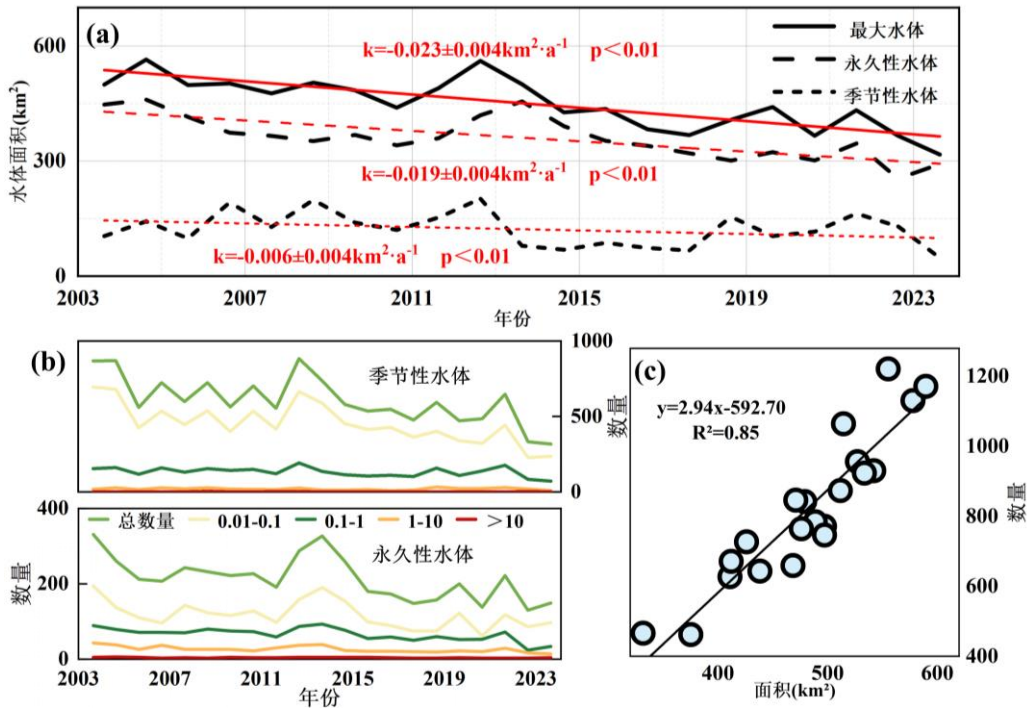


图 7 (a)湖泊面积年际变化图。(b)不同大小的湖泊数量时间序列变化图。(c)水体面积与数量之间的相关性。年最大水体面积值为各年的最大月度面积。

Fig.7 (a) Interannual variation in lake area. (b) Time-series changes in the number of lakes of different sizes. (c) Correlation between lake area and number. The annual maximum water body area value corresponds to the maximum monthly area for each year.

图 8 展示了浑善达克沙地的湖泊群面积与蓄水量变化的空间分布差异。按照湖泊大小的分组统计 (图 8(a))显示,湖泊群总面积减少约 37.17%,其中微小型 ( $0.01-1\text{km}^2$ ) 湖泊的相对变幅较大 ( $>70\%$ )。湖泊蓄水量变化的空间格局同样显著:湖泊蓄水量增加 ( $0-0.56\text{km}^3$ ) 的比例小于蓄水量减少 ( $-1.19-0\text{km}^3$ )。大中型 ( $\geq 1\text{km}^2$ ) 湖泊的蓄水量累积 ( $-1.19-0.56\text{km}^3$ ) 显著高于微小型 ( $0.01-1\text{km}^2$ ) 湖泊 ( $-0.02-0.01\text{km}^3$ )。总体而言,湖泊群面积与净蓄水变化量的空间分布格局高度一致:沙地中西部及其周缘以下降为主,东北部局部上升或稳定。

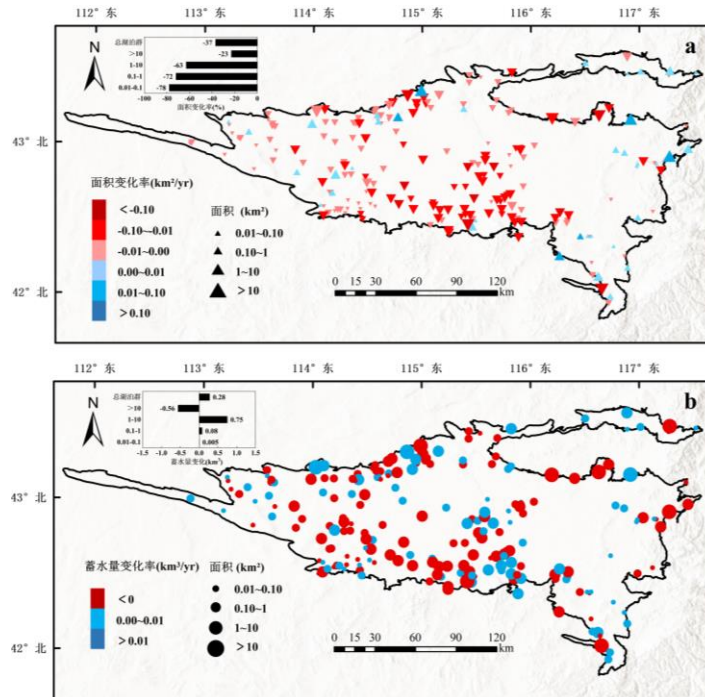


图 8 2003-2023 年浑善达克沙地湖泊面积(a)与蓄水量(b)变化的空间格局。

Fig.8 Spatial patterns of changes in lake area (a) and water storage capacity (b) in the Hunshandake Sandy Land from 2003 to 2023.

为了更准确分析浑善达克沙地湖泊的时空演变特征,根据湖泊面积变化将湖泊分为 5 个类型:干涸型、稳定型、萎缩型、扩张型与新增型<sup>[13]</sup>,并对不同类型湖泊进行数量统计(表 1)。本文以 0.01 km<sup>2</sup> 作为湖泊分类的最小单元,并将 5 年作为时间间隔,此时湖泊数据稳定性较好,可有效反映长时间序列下湖泊变化规律。其中干涸型判定条件包括:某一时刻干枯至研究期末;研究期内出现短暂复水随后再次干枯至研究期末。稳定型判定为两个时期面积变化在±10%以内。

由表 1 可知,2003-2023 年浑善达克沙地萎缩、干涸型湖泊数量始终高于新增、扩张型湖泊数的总和,其中 2003-2008 年两者总和相差最大。2008-2013 年湖泊数量增长最多,这段时期为沙地湖泊的短暂扩张期,稳定型湖泊约占湖泊总数的 23%。随后 2013-2018 年转为湖泊退缩最显著的阶段,面积减少达 91.13km<sup>2</sup>,约占整个研究期累积减少量的 83%。2018-2023 年干涸型数量再次增加,面积变化量仍呈负变化。总的来说,尽管存在短暂扩张时期,湖泊总体处于以萎缩与干涸为主的退化趋势。

此外,近 21 年期间,沙地内不同类型的湖泊面积变化差异明显(表 2)。其中,季节性水体的波动最为显著,面积变化量占其总面积的 43%。尽管永久性水体总体上相对稳定,但仍有约 35%转换为季节性水体(8%)或出现干涸(27%)。季节性水体与干涸之间转换频繁,而极少向永久性水体转换。

表 1 5 个时段不同变化类型湖泊的数量统计。

Tab.1 Statistics on the number of lakes with different change types across five periods.

变化时段	湖泊变化数量(个)					面积变化量(km <sup>2</sup> )
	干涸型	稳定型	萎缩型	扩张型	新增型	
2003-2008	95	79	102	41	40	-29.51
2008-2013	47	80	73	61	54	+24.42
2013-2018	57	40	107	43	16	-91.13
2018-2023	109	26	49	29	23	-23.81
2003-2023	225	14	74	5	34	-110.18

表 2 2003-2023 年湖泊类型转移矩阵 (km<sup>2</sup>)。

Tab.2 Lake type transition matrix (km<sup>2</sup>) from 2003 to 2023.

2003 \ 2023		2023			总计
		永久性	季节性	消失	
2003	永久性	272.64	34.37	110.37	417.38
	季节性	2.76	10.06	78.43	91.25
	消失	11.37	7.18	-	18.55
	总计	286.77	51.61	188.80	527.18

### 3.3 气候因素对湖泊群动态的影响

由于浑善达克沙地的气候条件与地理位置较为特殊, 人类活动的影响相对有限, 气候变化通常被认为是影响当地水文系统的主导因素。因此, 文章选取了气温(TM)、降水量(P)、潜在蒸散发量(ET)、饱和水汽压差(VPD)与风速(W)五个气候因子, 分析了 2003-2023 年期间其对年度和月度湖泊面积的相对贡献。如图 10(a)所示, 在这 21 年期间气温、风速与 VPD 呈明显上升趋势, 变化率分别为  $0.026 \pm 0.061^{\circ}\text{C}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、 $0.022 \pm 0.015\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$  与  $0.008 \pm 0.006\text{kPa}\cdot\text{yr}^{-1}$ 。相比之下, 降水呈下降趋势, 变化率为  $-0.015 \pm 0.008\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ , 潜在蒸散发量无显著趋势。值得注意的是, 2012 年出现的湖泊面积和蓄水量峰值与当年中国北方地区的异常强降水事件密切相关<sup>[42]</sup>。该次极端事件在短时尺度上产生了区域性的强补给并引发严重洪涝, 是促成浑善达克沙地湖泊水文发生年际异常的主要气候因素。该年降水量达到最高为 459.79mm, 气温、蒸散发与 VPD 下降至最低值。

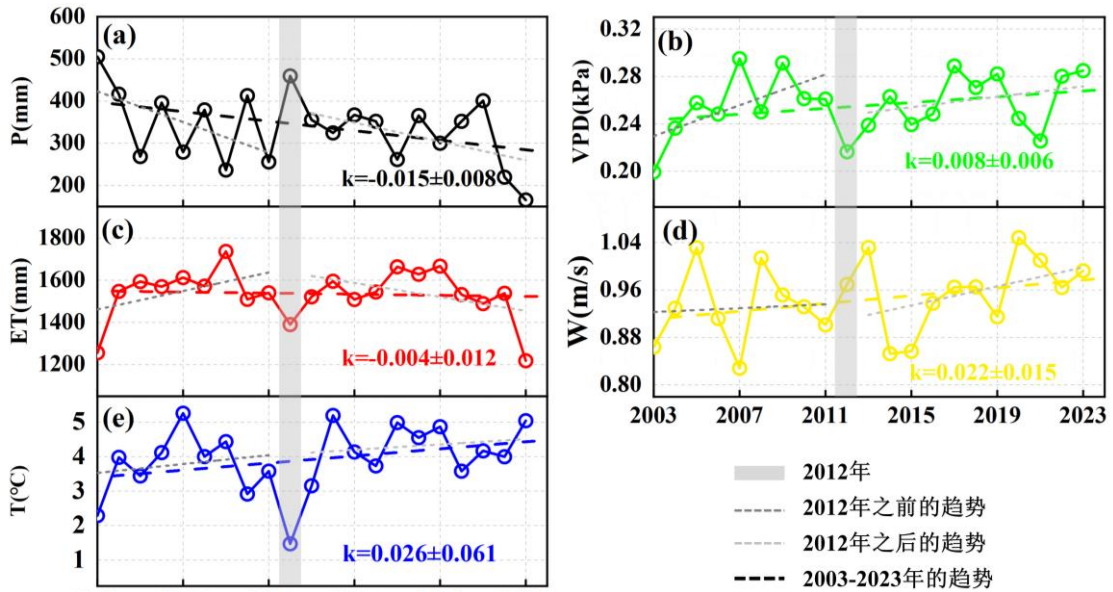


图 9 2003-2023 年浑善达克沙地降水量 (P)、气温(T)、潜在蒸散发量(ET)、饱和水汽压差(VPD)与风速(W)的年度时间序列。

Fig.9 Annual time series of precipitation (P), temperature (T), potential evapotranspiration (ET), vapor pressure deficit (VPD), and wind speed (W) in the Hunshandake Sandy Land from 2003 to 2023.

不同气候因子对地表水的作用机制通常存在显著差异, 并且气候变化对水循环的影响可能存在时滞。因此, 通过比较当月及前两个月湖泊面积与气候因子的 Spearman 相关系数 (表 2), 结果表明: 降水、气温与 VPD 对湖泊面积在 0-2 个月内存在分布滞后, 其中降水与 VPD 的滞后峰值均为 1 个月。潜在蒸散发与风速并未表现出明显滞后。

表 3 气候因子与湖泊面积在不同时滞下的 Spearman 系数，单星号表示显著性水平为 0.05，双星号表示显著性水平为 0.01。

Tab.3 Spearman correlation coefficients between meteorological factors and lake area at different time lags. A single asterisk indicates significance at the 0.05 level, while a double asterisk indicates significance at the 0.01 level.

时滞	P	T	ET	VPD	W
无时滞	0.22*	-0.27**	-0.13	-0.35**	0.09
一个月	0.34**	-0.28**	-0.10	-0.41**	0.05
两个月	0.31**	-0.29**	-0.06	-0.39**	0.09

采用结构方程模型量化了各气候因子对湖泊面积的直接与间接影响，结果如图 10 所示。其中，年度水体面积以及年度永久性、季节性水体面积均基于逐年 12 期水体淹没频率统计得到，在 SEM 中作为年度指标；逐月水体面积则作为月度指标。年尺度 SEM 模型（图 10(a)）表明，VPD 对年度、永久性水体面积的负向直接影响最强，标准化路径系数分别为-0.43 与-0.79。降水对季节性水体面积的正向直接影响最强，标准化路径系数为 0.54。风速对年尺度水体面积影响均较小。路径分解结果显示，气温与 VPD、ET 之间存在较强的正相关，与降水之间有较强的负相关。月尺度模型（图 10(b)）结果表明，VPD 对月度面积的负向直接影响最强，与年尺度一致，其标准化路径系数为-0.65。ET 对月度面积的正向直接影响最强，标准化路径系数为 0.47。降水表现为正向直接影响，标准化路径系数为 0.26。气温与风速对月度湖泊面积的直接作用较弱。此外，VPD 与气温、ET 之间存在极强的正相关，相关系数分别为 0.88 与 0.85。

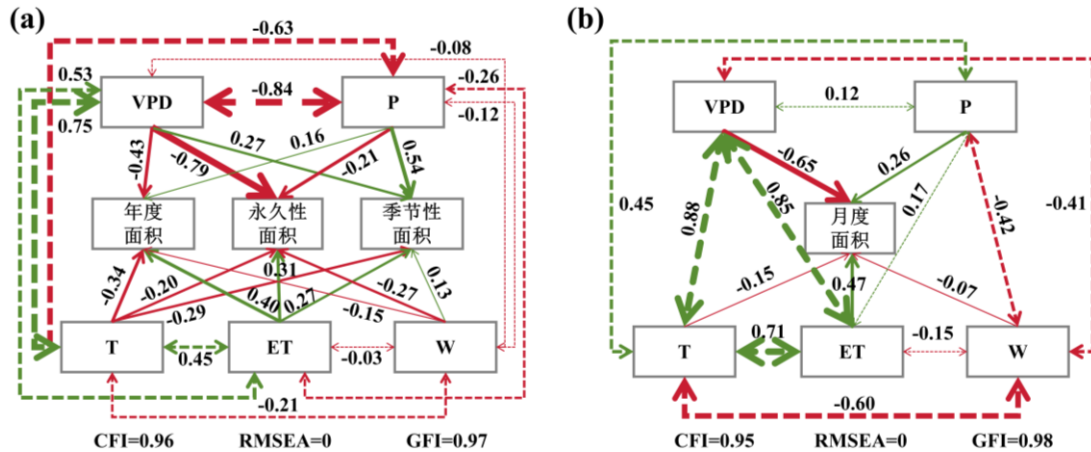


图 10 (a)气候因子与年度水体面积、永久性水体面积、季节性水体面积的影响关系；(b)气候因子与月度水体面积的影响关系。

Fig.10 (a) The relationship between climate factors and annual water area, permanent water area, and seasonal water area; (b) The relationship between climate factors and monthly water area.

## 4 讨论

### 4.1 浑善达克沙地湖泊群动态特征及驱动机制

本文基于 2003-2023 年水体淹没频率构建了浑善达克沙地不同时间尺度（年度、月度）与不同类型（永久性、季节性）的地表水体面积时间序列，沙地湖泊群表现出了显著的季节性波动与空间差异。总体而言，湖泊群面积在区域干旱模式下<sup>[43]</sup>呈多年下降趋势，且面积缩减主要由小水体消失驱动，而非大湖萎缩。结合湖泊面积与数量变化可知，年际蓄水量净变化的正负异常在空间上对应于湖泊扩张或消退的局地聚集区，反映出区域水文气候调节与地形特征在空间格局形成中的共同作用<sup>[44]</sup>。沙地中西部及其南缘的显著下降区以微小型浅水湖泊为主，其面积-体积比较大、蒸发耗水占比高且补给条件相对有限。在近 21 年降水下降、气温与 VPD 总体升高的干旱化背景下，更易对气候扰动做出快速响应，并表现出更剧烈的面积与水量波动<sup>[45]</sup>。东北部及沙地局部东缘的稳定上升区集中分布少数大中型深水湖泊，贡献了主要的蓄水量变化，汇水面积较大、补给条件相对稳定。沙地湖泊群的空间分异特征可理解为区域气候干旱化趋势与湖泊尺度

及水文类型差异共同作用的结果。

浑善达克沙地湖泊群面积主要受 VPD 负向调控,降水与 ET 的影响短期波动,气温发挥间接作用。年尺度 SEM 模型表明,VPD 对年度、永久性水体面积的负向效应最强,降水对季节性面积的正向调节最大,湖泊群面积变化整体上反映了水量补给与大气蒸发需求之间的动态平衡,这一格局与近期全球湖泊蒸发与干旱热点研究中对降水-蒸发比主导水量收支的认识相一致<sup>[46]</sup>。在暖干化背景下,VPD 上升比气温本身更能直接限制蒸散与植被活动<sup>[47]</sup>,甚至在许多生态系统中对水碳通量的约束超过土壤水分与气温<sup>[48]</sup>。与此同时,在干旱半干旱环境中,陆地增温未伴随近地层绝对湿度同步增加,饱和水汽压上升而实际水汽压变化有限,导致 VPD 持续上升<sup>[49]</sup>。这种增温而不增湿的气候格局显著增强湖泊与周边土壤的蒸发需求,将加剧蒸发与生态干旱风险<sup>[50]</sup>。月尺度模型进一步表明,VPD 仍是对月度水体面积具有负向直接影响最大的气候要素,ET 与降水的正向效应其次。气温对月度面积的直接效应较弱。ET 与气温更多通过增强 VPD、改变湖泊-大气之间的能量与水分交换而发挥间接作用<sup>[51, 52]</sup>。已有研究表明,VPD 上升会增加大气蒸发需求,从而通过加剧湖面与集水区蒸发耗水,对湖泊水量产生负向累积影响<sup>[53]</sup>。

基于逐月相关性与时滞分析发现,VPD 与降水均存在 1 个月的滞后峰值,其中降水对湖泊动态的作用滞后通常由于集水过程、地表径流与短期补给在数周内主导浅水湖的面积变动<sup>[54, 55]</sup>,而 VPD 的滞后主要归因于水体热惯性导致的表面温度与蒸发速率对大气干燥程度响应的延迟<sup>[56]</sup>。此外,8%的永久性水体逐渐退化为季节性水体,86%的季节性水体出现了阶段性干涸,其原因可归结为降水与蒸发比例的变化<sup>[57]</sup>,尤其是对浅湖水位波动的主要调控作用<sup>[18]</sup>。这种变化导致部分原本的永久性水体演变为季节性水体,而某些季节性水体则完全干涸<sup>[11, 58]</sup>。由于几乎没有地表水出流,浅咸水湖会在降水或蒸发的小幅变化下产生异常大的水位与面积变化<sup>[59]</sup>。已有研究指出,深水湖、泉水以及依靠地下水的湖泊适应力更强,而半永久或季节性的盐水湖对气候变化更为敏感,特别是在干旱半干旱地区<sup>[60, 61]</sup>。

#### 4.2 与中国北方其他沙漠/沙地湖泊变化的对比分析

近几十年来,中国北方典型沙漠与沙地湖泊动态的年际与年内动态已在多区域得到系统研究,为本研究提供了重要参照。以巴丹吉林沙漠为代表的典型沙漠腹地湖区中,湖泊多位于沙丘-洼地系统中,主要由深层地下水补给,受到区域降水直接影响相对较弱<sup>[62]</sup>。既有研究表明,1970s 以来该地区湖泊面积整体呈缓慢缩小趋势,部分湖泊水位与地下水储量持续下降,但季节尺度波动较小,湖泊变化更体现为多年水量亏损过程<sup>[63]</sup>。相比之下,人为因素与生态工程在毛乌素沙地子区域地区表现出对湖泊长期趋势的强调制作用;当人为用水强度较高或生态治理广泛实施时,湖泊响应往往表现出与纯气候驱动不同的时空模式<sup>[64]</sup>。针对红碱淖等典型湖泊的研究表明,多年湖泊面积持续萎缩与区域气温升高、降水变化以及流域内煤炭开采与取水工程密切相关<sup>[65]</sup>。毛乌素沙地的绿化与治理伴随景观格局改变,在区域尺度上促成了水文格局的重分布<sup>[66]</sup>。此外,综合多沙地湖区的对比研究发现,浑善达克沙地、毛乌素沙地等湖区面积在 1-40km<sup>2</sup> 的湖泊整体存在明显萎缩趋势,而科尔沁沙地湖区面积由于植被恢复与地表持水性改善出现局部稳定与回升<sup>[67]</sup>,其年际响应在空间格局上更为复杂,反映出不同气候带与下垫面条件对湖泊演变的调控差异<sup>[14]</sup>。

基于长期遥感记录与野外观测资料的多项研究表明,干旱半干旱地区内陆湖泊在过去数十年总体呈显著收缩甚至局部干涸的变化趋势,湖泊退化表现出区域普遍性与严重性,主要归因于降水减少、蒸发增强以及人类用水量快速增长的综合影响<sup>[68]</sup>。与中国北方其他典型沙漠与沙地湖泊相比,浑善达克沙地湖泊群具有“浅水、密集、小型与季节性湖泊分布众多”的显著特征,其演变既共同呈现出气候暖干化背景下的长期退化趋势,同时又表现出以 VPD 强调控为主、降水与 ET 协同作用下更强的季节性与空间异质性。

#### 4.3 环境意义

在水资源紧缺与气候变化背景下,水体动态作为衡量水资源状况的可靠指标<sup>[69]</sup>,已成为近年来的研究重点。然而,受 Landsat 重访周期、Sentinel-2 时序覆盖<sup>[70, 71]</sup>等观测限制,既有研究多聚焦于典型或中大型湖泊的年际变化,较少兼顾小型水体<sup>[72]</sup>与连续月尺度动态<sup>[20, 73]</sup>,且常以单一时相或年度均值代替年内波动<sup>[74, 75]</sup>。为此,本文结合水体指数法、水体分类增强法与随机森林分类算法,构建了浑善达克沙地 2003-2023 年湖泊面积 >0.01km<sup>2</sup> 的月度水体面积与蓄水量变化数据集,并在此基础上开展了年际与季节性变化及时空格局演变的水文分析,旨在从区域尺度揭示湖泊群的动态特征与驱动机制。

然而,研究仍存在一定局限性。首先,基于 30m 分辨率影像提取微小水体易受到混合像元与分类误差的影响,可能在统计上引入较大噪声与系统偏差。后续可在典型样点处结合更高分辨率卫星或无人机影像进行交叉验证,并量化像元的不确定性。其次,h-A 关系缺乏实测水位与剖面数据验证,并依赖获取时间与研究期存在差异的静态 SRTM,在岸线复杂或水深分布不均的浅水湖中可用 h-A 数据有限,外推拟合不稳定。在局部强风蚀、强堆积或人为扰动显著的区域,h-A 可能会进一步受到沙丘微地形发生调整的影响,引入水量估算的不确定性。未来可结合高精度 DEM 或测高数据重新约束 h-A 模型,并通过提高空间分辨率进行短时序季节性分析,以精细表征微小湖泊水位与面积变化,可进一步检验与改进 h-A 关系法的适用性与稳定性。值得注意的是,SRTM DEM 仅用于表征湖泊几何形态并构建 h-A 关系,不直接参与水位推算,湖泊时序变化来源于多时相水体面积。尽管本研究通过 h-A 拟合与经验 V-A 曲线一定程度上减弱了 DEM 噪声的影响,但对 0.01-0.1 km<sup>2</sup>微小湖泊的蓄水量估计仍存在不确定性,蓄水量变化结果主要适用于区域尺度的相对变化分析。最后,研究假定人类活动影响相对有限,但是在干旱半干旱区灌溉、地下水抽采仍在一定程度上影响湖泊的季节响应与蓄水量变化。与此同时,地下水补给对湖泊滞后响应有重要作用,未在归因分析中充分考虑。

## 5 结论

本文基于 Landsat、Sentinel-2 以及 GSW、GLAD 数据集,融合三种水体提取方法,构建了浑善达克沙地 2003-2023 年面积大于 0.01km<sup>2</sup> 的湖泊在年际与年内尺度上的面积与蓄水量变化的时间序列,并分析其气候驱动因素。主要结论如下:(1)湖泊群总体呈多年退化趋势,空间分布上以沙地中西部萎缩为主,东北部相对稳定。小型浅水湖与总面积缩减趋势一致,湖泊数量与面积变化显著正相关( $R^2=0.85$ )。在区域气候干旱模式的背景下,8%的永久性水体向季节性水体转化,86%的季节性水体出现阶段性干涸。蓄水量整体呈下降趋势,大型湖泊贡献了蓄水量变化的 60%。(2)湖泊面积在 5-6 月逐月减少,7-9 月显著增加,10 月逐渐回落,呈现明显的季节性波动。小型季节性水体的波动大于永久性水体。(3)结构方程模型表明,在年尺度上,VPD 对年度、永久性水体面积负向影响最强,降水对季节性水体面积正向影响最强;在月尺度上,湖泊面积由 VPD、降水与 ET 共同调控,其中 VPD 对月度水体面积的负向直接影响最强,其次是降水与 ET 的正向直接影响,气温主要通过提高 VPD 与蒸散需求间接作用于湖泊动态。降水与 VPD 在 0-2 个月内对湖泊动态存在分布滞后,且滞后峰值均为 1 个月。

## 6 参考文献

- [1] Miao, Q., et al., *Lake-area shrinkage driven by the combined effects of climate change and human activities*. Ecological Indicators, 2025. **175**: p. 113606.
- [2] He, M. and Y. Liu, *Analysis of lake area dynamics and driving forces in the jiangnan plain based on GEE and SEM for the period 1990 to 2020*. Remote Sensing, 2024. **16**(11): p. 1892.
- [3] Chang, L., et al., *Reservoir dominated spatio-temporal changes of the surface water area in the Yangtze River Basin during past three decades*. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024. **55**: p. 101948.
- [4] Li, M., et al., *Exploring the Causes of Severe Fluctuations in Water Surface Area Using Water Index and Structural Equation Modeling: Evidence from Ebinur Lake, China*. Remote Sensing, 2025. **17**(8): p. 1431.
- [5] Chen, X., et al., *Interaction of Climate Change and Anthropogenic Activity on the Spatiotemporal Changes of Surface Water Area in Horqin Sandy Land, China*. Remote Sensing, 2023. **15**(7): p. 1918.
- [6] Pi, X., et al., *Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes*. Nature communications, 2022. **13**(1): p. 5777.
- [7] Li, L., et al., *Global dominance of seasonality in shaping lake-surface-extent dynamics*. Nature, 2025: p. 1-8.
- [8] Yao, F., et al., *Satellites reveal widespread decline in global lake water storage*. Science, 2023. **380**(6646): p. 743-749.
- [9] Tao, S., et al., *Changes in China's lakes: Climate and human impacts*. National science review, 2020. **7**(1): p. 132-140.
- [10] Wei, X., *Response of Dali Lake area to climate factors in the past 45 years*. Journal of Arid Land resources and Environment 2019.
- [11] Jiménez-Bonilla, A., et al., *Impact of climate change on permanent lakes in a semiarid region: Southwestern Mediterranean basin (S Spain)*.

- Science of the Total Environment, 2025. **961**: p. 178305.
- [12] Zhang, Z. and D. Huisingh, *Combating desertification in China: Monitoring, control, management and revegetation*. Journal of Cleaner Production, 2018. **182**: p. 765-775.
- [13] Bai, X., et al., *Changes of lakes in Hunshandake Sandy Land in the past 45 years, Inner Mongolia*. Journal of Lake Science, 2016. **28**: p. 1086-1094.
- [14] Zhang, Y., et al., *Spatio-temporal evolution of inland lakes and their relationship with hydro-meteorological factors in Horqin Sandy Land, China*. Remote Sensing, 2023. **15**(11): p. 2719.
- [15] Liu, X., et al., *Ecological policies enhanced ecosystem services in the Hunshandake sandy land of China*. Ecological Indicators, 2022. **144**: p. 109450.
- [16] Guo, W., et al., *Change and driving factor analysis of eco-environment of typical lakes in arid areas*. Water, 2023. **15**(11): p. 2107.
- [17] Chao, M., et al., *Responses of NDVI evolution to climate change and human activities in the Hunshandake Sandy Land and its ecotones*. Resources Science, 2023. **45**(1): p. 204-221.
- [18] Woolway, R.I., S. Sharma, and J.P. Smol, *Lakes in hot water: the impacts of a changing climate on aquatic ecosystems*. Bioscience, 2022. **72**(11): p. 1050-1061.
- [19] Yu, X., et al., *Magnetic resonance sounding evidence shows that shallow groundwater discharge maintains the lake landscape in the Hunshandake Sandy Land, North China*. Environmental Earth Sciences, 2020. **79**(13): p. 327.
- [20] Wang, Y., et al., *Recent lake surface dynamics in the Hunshandake sandy land (2017–2022) and their response to climatic factors*. Ecological Indicators, 2025. **178**: p. 113820.
- [21] Ma, C., et al., *Wetland and grassland degradation and the response to climate in Dalinor Basin during 1962–2016*. Geographical Research, 2017. **9**(36): p. 1755-72.
- [22] Feng, S., et al., *Evolution of the lake area and its drivers during 1990–2021 in Inner Mongolia*. Environmental Earth Sciences, 2024. **83**(13): p. 414.
- [23] Ureyen, S. and C. Kuenzer, *A review of earth observation-based analyses for major river basins*. Remote Sensing, 2019. **11**(24): p. 2951.
- [24] Zhou, H., et al., *Retrieving dynamics of the surface water extent in the upper reach of Yellow River*. Science of The Total Environment, 2021. **800**: p. 149348.
- [25] Chang, L., et al., *Extracting urban water bodies from Landsat imagery based on mNDWI and HSV transformation*. Remote Sensing, 2022. **14**(22): p. 5785.
- [26] Chen, Y., et al., *Extraction of urban water bodies from high-resolution remote-sensing imagery using deep learning*. Water, 2018. **10**(5): p. 585.
- [27] Zhu, Y., A. Ye, and Y. Zhang, *Water body seasonality reveals the dominant role of human activity across the Yangtze River Basin in China*. Journal of Hydrology, 2025. **653**: p. 132759.
- [28] Zhou, Y., et al., *Open surface water mapping algorithms: A comparison of water-related spectral indices and sensors*. Water, 2017. **9**(4): p. 256.
- [29] Huang, C., et al., *Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review*. Reviews of Geophysics, 2018. **56**(2): p. 333-360.
- [30] Liu, Z., et al., *Changes in monthly surface area, water level, and storage of 194 lakes and reservoirs in the Yangtze River Basin during 1990–2021 using multisource remote sensing data*. Science of The Total Environment, 2024. **944**: p. 173840.
- [31] Wang, C., et al., *Long-term surface water dynamics analysis based on Landsat imagery and the Google Earth Engine platform: A case study in the middle Yangtze River Basin*. Remote Sensing, 2018. **10**(10): p. 1635.
- [32] Mullen, A.L., et al., *Using high-resolution satellite imagery and deep learning to track dynamic seasonality in small water bodies*. Geophysical Research Letters, 2023. **50**(7): p. e2022GL102327.
- [33] An, C., et al., *A review on the research progress of lake water volume estimation methods*. Journal of Environmental Management, 2022. **314**: p. 115057.
- [34] Han, K., et al., *Enhanced water level monitoring for small and complex inland water bodies using multi-satellite remote sensing*. Environmental Modelling and Software, 2024. **180**: p. 106169.

- [35] Yu, X., et al., *Grain size characteristics of sediments in the Hunshandake Sandy Land and its implications*. Acta Geogr. Sin, 2023. **78**: p. 1809-1824.
- [36] He, Q. and D. Lu. *Monitoring vegetation cover change in east Hunshandake savanna with Landsat TM*. in *Ecosystems Dynamics, Ecosystem-Society Interactions, and Remote Sensing Applications for Semi-Arid and Arid Land*. 2003. SPIE.
- [37] Hao, S. and F. Li, *Water sources for typical desert vegetation in the Ebinur Lake basin*. Journal of Geographical Sciences, 2022. **32**(6): p. 1103-1118.
- [38] Wulder, M.A., et al., *Fifty years of Landsat science and impacts*. Remote Sensing of Environment, 2022. **280**: p. 113195.
- [39] Malenovský, Z., et al., *Sentinels for science: Potential of Sentinel-1,-2, and-3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land*. Remote Sensing of environment, 2012. **120**: p. 91-101.
- [40] Lawley, E., M. Lewis, and B. Ostendorf, *Evaluating MODIS soil fractional cover for arid regions, using albedo from high-spatial resolution satellite imagery*. International Journal of Remote Sensing, 2014. **35**(6): p. 2028-2046.
- [41] Lv, Y., et al., *A novel remote sensing method to estimate pixel-wise lake water depth using dynamic water-land boundary and lakebed topography*. International Journal of Digital Earth, 2024. **17**(1): p. 2440443.
- [42] Zhang, D.L., et al., *The Beijing extreme rainfall of 21 July 2012: "Right results" but for wrong reasons*. Geophysical Research Letters, 2013. **40**(7): p. 1426-1431.
- [43] Chen, Q. and Y. Cao, *Optimization of desert lake information extraction from remote sensing images using cellular automata*. International Journal of Coal Science Technology, 2023. **10**(1): p. 41.
- [44] Zhou, W., et al., *Spatial pattern of lake evaporation increases under global warming linked to regional hydroclimate change*. Communications Earth Environmental 2021. **2**(1): p. 255.
- [45] Fu, H., et al., *Seasonal and long-term trends in the spatial heterogeneity of lake phytoplankton communities over two decades of restoration and climate change*. Science of the Total Environment, 2020. **748**: p. 141106.
- [46] Cheng, X., et al., *Global assessment and hotspots of lake drought*. Communications Earth & Environment, 2025. **6**(1): p. 308.
- [47] Yuan, W., et al., *Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth*. Science advances, 2019. **5**(8): p. eaax1396.
- [48] Novick, K.A., et al., *The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes*. Nature climate change, 2016. **6**(11): p. 1023-1027.
- [49] Zhou, X., et al., *Significant increases in water vapor pressure correspond with climate warming globally*. Water, 2023. **15**(18): p. 3219.
- [50] Novick, K.A., et al., *The impacts of rising vapour pressure deficit in natural and managed ecosystems*. Plant, Cell & Environment, 2024. **47**(9): p. 3561-3589.
- [51] Peng, L., D. Li, and J. Sheffield, *Drivers of variability in atmospheric evaporative demand: Multiscale spectral analysis based on observations and physically based modeling*. Water Resources Research, 2018. **54**(5): p. 3510-3529.
- [52] Wang, W., et al., *Global lake evaporation accelerated by changes in surface energy allocation in a warmer climate*. Nature Geoscience, 2018. **11**(6): p. 410-414.
- [53] Woolway, R.I., et al., *Global lake responses to climate change*. Nature reviews earth & environment, 2020. **1**(8): p. 388-403.
- [54] Adrian, R., et al., *Lakes as sentinels of climate change*. Limnology oceanography, 2009. **54**(6part2): p. 2283-2297.
- [55] Rieder, J.C., et al., *Meteorological ingredients of heavy precipitation and subsequent lake-filling episodes in the northwestern Sahara*. Hydrology and Earth System Sciences, 2025. **29**(5): p. 1395-1427.
- [56] Shao, C., et al., *Intra - annual and interannual dynamics of evaporation over western Lake Erie*. Earth and Space Science, 2020. **7**(11): p. e2020EA001091.
- [57] Pilgrim, D., T. Chapman, and D. Doran, *Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions*. Hydrological Sciences Journal, 1988. **33**(4): p. 379-400.
- [58] Ficker, H., M. Luger, and H. Gassner, *From dimictic to monomictic: Empirical evidence of thermal regime transitions in three deep alpine lakes in Austria induced by climate change*. Freshwater Biology, 2017. **62**(8): p. 1335-1345.
- [59] Micklin, P.P., *The Aral crisis: Introduction to the special issue*. Post-Soviet Geography, 1992. **33**(5): p. 269-282.
- [60] Smol, J.P. and M.S. Douglas, *Crossing the final ecological threshold in high Arctic ponds*. Proceedings of the national Academy of Sciences,

2007. **104**(30): p. 12395-12397.
- [61] Riveros-Iregui, D.A., et al., *Evaporation from a shallow, saline lake in the Nebraska Sandhills: Energy balance drivers of seasonal and interannual variability*. Journal of Hydrology, 2017. **553**: p. 172-187.
- [62] Zhao, Q., et al., *Monitoring Changes to Small-Sized Lakes Using Medium Spatial and Temporal Satellite Imagery in the Badain Jaran Desert from 2015 to 2020*. International Journal of Crowd Science, 2025. **9**(2): p. 96-109.
- [63] Zhang, Z., et al., *Lakes area change in Badain Juran desert hinterland and its influence factors during the recent 40 years*. Journal of Desert research, 2012. **32**(6): p. 1743-1750.
- [64] Fei, Y., L. Huayu, and W. Huijuan, *Estimation of annual water erosion sediments in Mu Us sandy land based on remote sensing images and coupled water-energy balance equation*. Acta Geographica Sinica, 2024. **79**(3): p. 635-653.
- [65] Yin, L., M. Zhang, and J. Dong, *Area variation and controlling factors of Lake Hongjian, Mu Us desert, China based on remote sensing techniques*. Geological Bulletin of China, 2008. **27**(8): p. 1151-1156.
- [66] Zhang, Q., et al., *Research on the sustainability of "greening" process in the Mu Us Sandy Land based on the spatiotemporal stability of ecological land*. Plos one, 2024. **19**(2): p. e0292469.
- [67] Yuke, Z., *Drivers of lake water area reduction and desiccation in semi-arid regions of China over the last 40 years*. 2010.
- [68] Liu, H., et al., *Disappearing lakes in semiarid northern China: drivers and environmental impact*. Environmental science technology, 2013. **47**(21): p. 12107-12114.
- [69] Zou, Z., et al., *Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018. **115**(15): p. 3810-3815.
- [70] Deng, Y., et al., *Long-term changes of open-surface water bodies in the Yangtze River basin based on the Google Earth Engine cloud platform*. Remote Sensing, 2019. **11**(19): p. 2213.
- [71] Zou, Z., et al., *Continued decrease of open surface water body area in Oklahoma during 1984–2015*. Science of the Total Environment, 2017. **595**: p. 451-460.
- [72] Hayashi, M. and G. Van der Kamp, *Simple equations to represent the volume–area – depth relations of shallow wetlands in small topographic depressions*. Journal of hydrology, 2000. **237**(1-2): p. 74-85.
- [73] Che, L., S. Li, and X. Liu, *Improved surface water mapping using satellite remote sensing imagery based on optimization of the Otsu threshold and effective selection of remote-sensing water index*. Journal of Hydrology, 2025. **654**: p. 132771.
- [74] Che, X., et al., *Landsat-based estimation of seasonal water cover and change in arid and semi-arid Central Asia (2000–2015)*. Remote Sensing, 2019. **11**(11): p. 1323.
- [75] Pekel, J.-F., et al., *High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes*. Nature, 2016. **540**(7633): p. 418-422.