

云南纳帕海高原湿地水生植被时空演变及其影响因素¹

Comment [XZ1]: 这里删掉但要保留脚注

黄骏^{1,2}, 张佳奇^{1,2}, 石阳阳^{1,2}, 杨慧^{1,2†}, 王光临^{1,2}, 宋琳³, 陈欣昊⁴, 冯禹文⁵

(1.云南大学地球科学学院, 650500, 昆明

2.云南大学国际喀斯特联合研究中心/云南省教育厅喀斯特过程与水土资源调配重点实验室, 650500, 昆明

3.中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心/自然资源部自然生态系统碳汇工程技术创新中心/云南省自然资源碳汇调查与碳资产评估技术创新中心, 650100, 昆明

4.西安市气象局, 710016, 西安

5.巴中市气象局, 636000, 成都)

摘要:【目的】揭示高原季节性湿地水生植被长期时空演变特征及其水文气候响应机制, 为湿地生态保护、水资源调控和生境管理提供科学依据。【方法】基于 1985—2024 年 Landsat 和 Sentinel-2 多源遥感影像, 构建融合光谱指数、自适应阈值和随机森林的水生生境分层识别方法, 提取挺水植被、沉水/浮叶植被、开阔水体及高 FAI 异常区等典型生境类型。并结合年度变化分析、生境转移矩阵和 Spearman 秩相关方法, 揭示纳帕海水生植被长期演变特征及其气候响应关系。【结果】多源遥感分类总体精度达到 88.62%, Kappa 系数为 0.8115, 能够较好识别纳帕海主要水生生境类型。有效年度序列内, 挺水植被、沉水/浮叶植被及总水生植被面积均表现出显著的年际波动和阶段性变化, 未呈现持续单向增加或减少趋势。空间上, 水生植被主要分布于湖滨浅水区和水陆交错带, 长期变化主要表现为水生植被、开阔水体和陆地植被之间的动态转换。水生植被面积与年降水量、夏季降水量及丰水期降水量呈显著相关, 表明降水及其驱动的水文过程可能是影响水生植被变化的重要背景因素。高 FAI 异常区具有明显时空波动特征, 其光谱响应可能受到浮游藻类、浑浊水体及浅水底质等多种因素共同影响。【结论】基于多源遥感融合的分层识别框架能够有效重建高原季节性湿地水生植被长期变化过程。纳帕海水生植被演变主要受水文波动调节,

收稿日期: 2026-05-12 网络首发日期: 2026-08-21

项目名称: 国家重点研发计划项目“喀斯特坡耕地水土流失阻控及水资源调蓄利用技术”(2023YFD1902801); 广西重点研发计划项目“中国-柬埔寨地球关键带碳循环“一带一路”联合实验室建设”(桂科 AB25069497)

第一作者简介: 黄骏 (2002-), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 为资源遥感, E-mail: 1409583279@qq.com

†通讯作者简介: 杨慧 (1981-), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 岩溶区环境地质研究。E-mail: karstyanghui@163.com

表现为生境边界动态迁移和类型转换，而非持续性扩张或退化。研究结果为高原湿地水生植被监测、喀斯特流域水土资源管理及生态保护提供了长期尺度数据支撑。

关键词：高原湿地；水生植被；遥感监测；时空演变；水文响应；藻类水华

高原湿地是全球重要的生态系统类型之一，也是对气候变化和人类活动高度敏感的环境单元，其结构与功能易受到气温、降水和水位变化等因素的影响^[1]。水生植被作为湿地生态系统的重要组成部分，在水质净化、底泥稳定、生物栖息地维持和生物多样性保护等方面发挥着重要作用^[2]。由于水生植被对水文条件、营养盐状态及人为扰动较为敏感，其群落组成和空间分布可作为表征湿地生态环境变化的重要指标^[3]。典型高原湿地通常由沉水、浮叶、挺水植被及周边陆生植被共同组成，其群落结构和空间格局变化不仅影响湿地生态系统服务功能，也关系到系统对外界扰动的缓冲与调节能力^[4]。同时，水生植被也是连接流域水土过程与湖泊生态系统的重要界面，可通过降低水流扰动^[5]、促进悬浮颗粒沉降、增强底泥稳定性和减少浅水区再悬浮，调节湖泊泥沙输移与沉积环境^[6]。在喀斯特高原流域，水土流失产生的细颗粒物可随径流进入湖盆，湖滨水生植被还可能通过拦截入湖泥沙、缓冲底泥扰动，在维持湖盆泥沙动态平衡及调节区域水土资源过程发挥重要作用。

随着遥感技术发展，湿地植被监测已由单一指数分析转向利用 Landsat、Sentinel-2 和 MODIS 等多源、多时相数据开展精细制图和长时间序列动态监测^[7]。随机森林等机器学习方法可综合利用多光谱波段、植被指数及辅助特征，在复杂湿地背景下具有较好的分类性能^[8-10]；面向对象方法通过融合光谱、纹理、形状和空间关系信息，可降低像元分类中的椒盐效应^[11]。针对水生植被，基于光谱指数的决策树和植被—水体指数模型已广泛用于挺水、沉水/浮叶植被和开阔水体识别^[12]，相关研究已利用 VBI、NDVI 等方法实现浅水湖泊水生植被长期变化重建^[13-14]。但浅水湖泊和季节性湿地中，水生植被、浑浊水体、浅水底质及藻类聚集等目标光谱特征相近，易造成类型混淆^[15]。此外，高原季节性湿地水文和物候波动明显，多源传感器在空间分辨率、光谱响应和观测时间上的差异，也增加了长期分类一致性控制难度。因此，建立适用于高原季节性湿地的长期、多类型水生生境遥感识别方法，并揭示其时空演变及环境响应机制，仍是湿地遥感研究的重要问题。

纳帕海湿地位于滇西北高原，是典型的季节性湖泊湿地和国际重要湿地^[16-17]，具有显著的季节性水文特征和较高的生物多样性保护价值^[18-19]。已有研究主要关注水鸟多样性^[20]、季节性水文变化及典型年份生态调查^[21]，但对水生植被长期演变及其驱动机制仍缺乏系统认识，主要表现为：缺少覆盖数十年且分类体系相对一致的水生植被空间数据；多源遥感融合中传感器差异、水文波动和复杂背景光谱混淆对分类稳定性的影响尚未充分解决；水生植被、开阔水体与陆地背景之间的长期空间转换缺乏定量分析；水生植被变化与不同时间尺度气候因子的关系仍需厘清。此外，部分浅水区域的高 FAI 异常信号可能与浮游藻类

聚集有关，也可能受浑浊水体、浅水底质和湿润泥滩等因素干扰，其生态意义仍需验证。

基于此，本文以纳帕海湿地为研究对象，整合 1985—2024 年 Landsat 与 Sentinel-2 多时相遥感影像，构建融合光谱指数、自适应阈值和随机森林的水生生境分层识别方法，实现挺水植被、沉水/浮叶植被、开阔水体、高 FAI 异常区及陆地背景的长期空间重建。在此基础上，分析水生植被年度最大分布面积、典型年份空间格局及生境转换过程，并结合 Spearman 秩相关分析探讨其与不同时间尺度气温、降水指标之间的统计关系，重点回答水生植被长期变化特征、不同湿地生境空间转换及其与主要气候指标的响应关系。研究结果可为纳帕海湿地水生植被长期监测、喀斯特流域水土流失调控、湖盆泥沙动态管理及水土资源优化配置提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

纳帕海湿地位于云南省迪庆藏族自治州香格里拉市，地理坐标为东经 99°37′至 99°43′，北纬 27°49′至 27°55′之间，海拔约 3260 m（图 1）。该区为构造断陷形成的高原山间盆地，是典型的高原季节性湖泊湿地。夏秋丰水期湖面大幅扩张，水生植被生长繁茂；冬春枯水期水位明显回落，大片湖滨及湖底裸露，形成沼泽和草甸，为高原牧场和候鸟栖息地提供重要生境。本研究以纳帕海省级自然保护区核心区与缓冲区为边界划定研究范围，总面积约为 29.6 km²。区域属高原季风气候，年降水量不低于 400mm，降水主要集中在 6-9 月，年均气温约 7.5℃（图 2）。受季风降水、高原地形和湖盆地貌共同影响，研究区水位季节波动明显，水体、水生植被、草甸和裸露地表之间转换频繁，是自然水文过程与人类放牧、旅游活动共同作用下形成的典型高原季节性湿地复合生态系统。

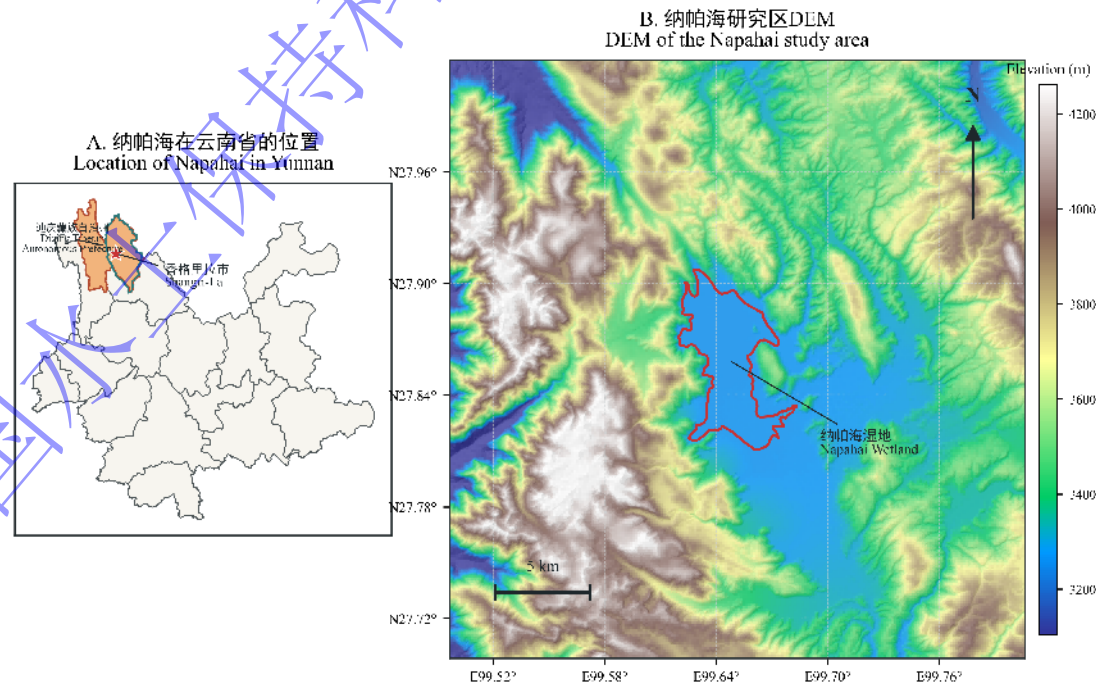


图 1 纳帕海地理位置图

Fig. 1 Geographical location image of Napahai

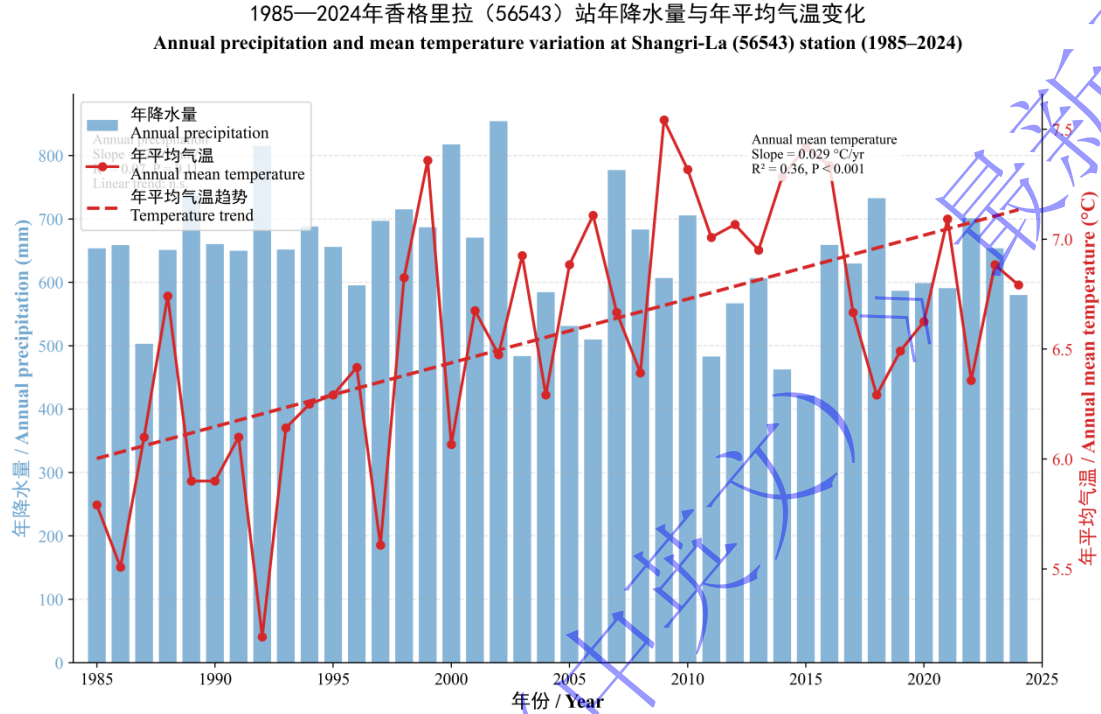


图 2 纳帕海地区气温与降水变化趋势图

Fig. 2 Variation trends of temperature and precipitation in the Napahai region

1.2 数据收集

本研究构建了基于多源遥感与辅助数据融合的综合分析框架。核心遥感数据包括欧洲航天局提供的 2019-2024 年 Sentinel-2 L2A 地表反射率产品，空间分辨率 10-20 m，并结合 COPENICUS/S2_CLOUD_PROBABILITY 云概率产品开展云污染控制主要用于水体与水生植被精细分类、近年基线构建及格局变化分析；美国地质调查局提供的 Landsat 系列地表反射率影像，数据采用 Google Earth Engine 平台提供的 Collection 2 Tier 1 Level-2 地表反射率产品，现有影像获取脚本实际包括 Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM+和 Landsat 8 OLI 影像；时间范围为 1985-2024 年，空间分辨率为 30m，主要用于长时序历史格局重建与宏观演变趋势分析。同时，收集 1985-2024 年香格里拉国家气象站（区站号 56543，香格里拉站）气象资料，包括降水量、气温等指标，用于分析水生植被面积变化与气候因子之间的关系。

为降低季节物候差异和影像质量差异对长时序面积比较的影响，本研究优先选取水生植被生长季内云量较低、湖区覆盖完整且水生植被发育较充分的影像作为年度候选影像。影像筛选时，优先选择云量较低的影像，并结合云和云影掩膜结果剔除湖区受云污染严重的影像。对于同一年存在多景有效影像的情况，综合考虑影像质量、湖区覆盖完整性和水

生植被识别结果，以水生植被面积较大且影像质量较高的结果作为该年度最大分布面积，用于年际变化分析。

1.3 数据预处理

针对多源遥感数据在空间分辨率、光谱响应和数据量级方面存在的差异，为保证长时序影像的一致性，本研究统一采用官方提供的地表反射率产品，并构建自适应波段映射与归一化流程。首先，对 Sentinel-2 和 Landsat 影像中的放大系数进行统一缩放，将像元值映射至 0-1 的标准反射率空间，以提高不同传感器数据之间的可比性。其次，根据不同传感器的波段位置，建立红光、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 等关键波段的对应关系，确保多源影像在水体和植被识别所需关键光谱通道上的一致性。同时，针对部分早期 Landsat 影像，由于热红外波段缺失或质量较差可能导致整体辐射平衡偏移^[22]，本研究通过对短波红外通道进行动态定位与重映射，尽可能校正光谱通道间的偏移。随后，利用影像质量控制波段和云影掩膜算法对所有影像进行云、云影及异常元剔除，去除云污染严重的影像或区域，为后续指数计算、阈值分割和分类分析提供清洁输入数据。

1.4 研究方法

针对纳帕海湿地研究时段长、传感器类型多样以及水陆交错带光谱混合明显等特点，本研究构建了由光谱指数判别、自适应阈值提取、随机森林分类和多源结果空间对齐组成的分层解译方法。首先利用 MNDWI 划分初始水域和非水域区域；随后在水域内部结合 NDVI 和 FAI 自适应阈值识别挺水植被、沉水/浮叶植被、开阔水体及高 FAI 异常区；在非水域区域调用预先训练的随机森林模型识别陆地植被和无植被裸露地表。

1.4.1 多光谱特征指数计算与水陆边界确定

在云掩膜处理后的 Landsat 与 Sentinel-2 影像上，提取红外、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 等关键波段的表面反射率，并计算水体和植被敏感光谱指数，包括归一化植被指数（NDVI）、改进型归一化差异水体指数（MNDWI）、浮游藻类指数（FAI）及归一化差异水体指数（NDWI）等。上述指数能够分别增强植被、水体及水面光谱异常信息，为水生植被、水体边界和潜在藻类异常区域识别提供依据。其中，NDVI 主要用于表征植被覆盖状况，其计算公式为：

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad \#(1)$$

式中， ρ_{RED} 和 ρ_{RED} 分别为近红外波段和红光波段的地表反射率；

NDWI 用于进一步识别水体范围，其计算公式为：

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}} \quad \#(2)$$

式中， ρ_{Green} 和 ρ_{NIR} 分别为绿光波段和近红外波段的地表反射率

MNDWI 用于增强水体信息并抑制植被、土壤等背景干扰，其计算公式为：

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \#(3)$$

FAI 指数用于增强水面漂浮植被或藻类聚集产生的近红外异常响应，其计算公式为：

$$FAI = R_{NIR} - \left[R_{Red} + (R_{SWIR} - R_{Red}) \times \frac{\lambda_{NIR} - \lambda_{Red}}{\lambda_{SWIR} - \lambda_{Red}} \right] \#(4)$$

式中， R_{NIR} 、 R_{Red} 和 R_{SWIR} 分别表示近红外、红光和短波红外波段反射率， λ_{NIR} 、 λ_{Red} 和 λ_{SWIR} 分别表示对应波段中心波长。

由于 Landsat 和 Sentinel-2 不同传感器的波段编号及光谱响应范围存在差异，为保证多源遥感数据计算结果的一致性，本研究依据不同传感器光谱响应特点，对相应波段进行匹配。不同传感器关键光谱波段对应关系见表 1。

表 1 不同遥感传感器关键光谱波段对应关系

Table 1 Correspondence of key spectral bands among different remote sensing sensors

传感器	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2
Landsat 5 TM	B2	B3	B4	B5	B7
Landsat 7 ETM+	B2	B3	B4	B5	B7
Landsat 8 OLI	B3	B4	B5	B6	B7
Sentinel-2 MSI	B3	B4	B8	B11	B12

为精确界定不同时期湖泊水体范围，结合不同传感器空间分辨率差异及 MNDWI 指数空间分布特征，设置初始水陆分割阈值。其中，Sentinel-2 影像 MNDWI 阈值设定为 0.00，Landsat 影像阈值设定为 0.05，将研究区初步划分为水域掩膜和非水域掩膜两部分，为后续水生植被识别和高 FAI 异常区提取提供空间约束。

需要说明的是，本文中的高 FAI 异常区主要用于表征具有异常水面光谱响应的区域，并作为潜在生态异常信息进行记录，不直接等同于真实藻类水华。由于缺乏连续叶绿素 a 浓度和现场藻类监测数据，高 FAI 异常区的生态属性仍需结合现场调查和水质监测进一步验证。

1.4.2 基于双峰波谷—最大梯度法的自适应阈值解算

传统基于经验常数的固定阈值难以适应长时序、多源影像的辐射差异，难以充分反映纳帕海季节湿地强烈的水文脉冲过程。为此，本研究在初始水域掩膜内分别提取 NDVI 和 FAI 有效像元，并构建 120 组直方图，采用高斯滤波对直方图进行平滑处理，平滑参数设为 $\sigma=2$ 。当平滑后的直方图存在两个主要峰值时，以两峰之间的波谷位置作为分类阈值；当未形成稳定双峰结构时，以直方图一阶梯度最小位置作为阈值。若有效像元数少于 500，则采用预设默认值。NDVI 默认阈值为 0.20，阈值限制范围为 0.10~0.40；FAI 默认阈值为 0.02，阈值限制范围为 0.005~0.080。由此分别获得单景影像的挺水植被阈值 T_{NDVI} 和高

T_{FAI} 异常阈值, 使阈值能够随不同年份、传感器和水文背景进行调整。

1.4.3 水生植被与高 FAI 异常区分层决策树提取

在获取自适应阈值后, 本研究于水域掩膜内部构建分层决策树, 逐步识别不同水生生态要素。具体规则为: ①挺水植被: 将 $NDVI \geq T_{NDVI}$ 的区域, 定义为挺水植被分布区。②考虑到纳帕海浅水区域可能同时受到浮游藻类聚集、浑浊水体、浅水底质、湿润泥滩以及漂浮物等因素影响, 其光谱异常并不一定对应真实藻类水华。本研究将满足 $FAI \geq T_{FAI}$ 且 $0.05 < NDVI < 0.3$ 的像元定义为高 FAI 异常区。由于研究区缺乏连续叶绿素 a 浓度监测数据、藻类显微鉴定数据以及同步现场调查样点, 本文不将高 FAI 异常区直接定义为藻类水华, 而仅作为潜在水体生态异常信号进行记录。在精度评价和生境转移分析中, 也未将其作为独立可靠生境类型处理。。③沉水/浮叶植被: 在剔除挺水植被和高 FAI 异常区后, 将 $NDVI > 0$ 的剩余水域像元划定为沉水/浮叶植被。④开阔水体: 水域掩膜内未被上述规则归类的剩余像元, 判定为开阔水体。

1.4.4 陆地背景同谱异物处理与随机森林分类

对于非水域区域, 为降低草地、裸露地表以及季节性植被变化引起的光谱混淆, 提高复杂高原湿地背景下陆地覆盖类型识别精度, 本研究分别针对 Sentinel-2 和 Landsat 影像构建随机森林分类模型。训练样本综合来源于野外调查数据、高分辨率 Google Earth 影像、同期 Sentinel-2 影像目视判读及典型地物光谱特征分析。涵盖陆地植被、不透水面和裸露地表等主要陆地背景类型, 并兼顾不同季节和空间位置下的地物光谱差异, 以提高模型对复杂环境变化的适应能力。随机森林模型以多源光谱特征和植被指数作为输入变量, 包括红光、近红外、短波红外 1、短波红外 2 波段反射率, 以及 NDVI 和近红外—短波红外 2 差异指数。通过融合原始光谱信息与增强型光谱特征, 充分利用不同地物在可见光、近红外和短波红外波段上的响应差异, 提高陆地植被与裸露地表等同谱异物的区分能力, 为后续湿地生境空间转换分析提供可靠的陆地背景分类基础。Sentinel-2 和 Landsat 随机森林模型分别设置 200 棵和 100 棵决策树, 最大树深分别为 12 和没有限制, 采用 Gini 指数作为节点划分准则, 最大特征数设置为输入变量总数的平方根, 最小分裂样本数和最小叶节点样本数分别设置为 2 和 1, Bootstrap 抽样方式和随机种子均保持一致 (seed=42)。

1.4.5 生境转移矩阵构建与端元年份选择

为分析纳帕海湿地长期生境空间转换特征, 本文选取 1992 年和 2024 年作为端元年份构建生境转移矩阵。其中, 1992 年代表研究早期具有较好影像质量的典型年份, 2024 年代表近期具有较高空间分辨率和较好影像质量的最新年份。二者分别反映研究早期和近期湿地生境格局, 可用于揭示近几十年尺度下纳帕海湿地水体、水生植被和陆地背景类型之间的总体空间转换特征。

由于 1992 年和 2024 年分类结果分别来源于 Landsat 和 Sentinel-2 影像, 不同传感器空间分辨率差异可能导致细尺度生境边界变化被高估。因此, 在转移矩阵计算前, 采用最近

邻重采样方法将 2024 年 Sentinel-2 分类结果统一至 1992 年 Landsat 影像的 30 m 空间网格，并在统一空间尺度下开展像元级空间叠置分析，以降低空间分辨率差异引起的伪变化。

2 结果分析

2.1 分类精度验证

基于遥感解译结果与实测样点构建混淆矩阵（表 1），研究区主要生境类型总体分类精度达到 88.62%，Kappa 系数为 0.8115，表明分类结果具有较高的一致性，能够满足纳帕海湿地长时序生境变化分析需求。

不同生境类型分类精度存在一定差异。其中，陆地植被与裸露地表的识别效果较好，用户精度分别达到 96.97%和 91.67%；沉水/浮叶植被识别精度为 77.78%。相比之下，挺水植被与开阔水体之间的用户精度相对较低，分别为 61.54%和 68.16%。总体上，分类结果能够较好区分纳帕海湿地主要生境类型，但挺水植被、沉水/浮叶植被和开阔水体之间仍存在一定混淆。

表 2 分类结果混淆矩阵
Table 2 Confusion matrix of classification results

		实测样点 / Reference Data					总计 Total	用户精 度(%) UA
		挺水植被 Emergent	沉水/浮叶 Submerged	开阔水 体 Open Water	陆地植被 Terrestrial	裸露地 表 Bare Land		
分类结果 Classified	挺水植被 Emergent	8	0	3	0	2	13	61.54
	沉水/浮叶 Submerged	1	7	1	0	0	9	77.78
	开阔水体 Open Water	1	3	15	0	3	22	68.18
	陆地植被 Terrestrial	0	0	1	96	2	99	96.97
	裸露地表 Bare Land	0	0	0	2	22	24	91.67
	总计 / Total	10	10	20	98	29	167	/
	制作者精度(%) PA	80.00	70.00	75.00	97.96	75.86	/	/

总体精度=88.62%；Kappa 系数=0.8115。
Overall accuracy=88.62%；Kappa coefficient=0.8115.

2.2 生境类型时空转化特征

为分析长期尺度下不同生境类型之间的空间转换关系，基于 1992 年和 2024 年两个端元年份分类结果构建生境转移矩阵（图 3）。在矩阵计算前，将 2024 年 Sentinel-2 分类结果重采样至 30 m 空间尺度，并将高 FAI 异常区归并至开阔水体类别。

结果显示，1992—2024 年间纳帕海湿地主要发生了水生植被、开阔水体和陆地植被之间的相互转换。其中，沉水/浮叶植被向陆地植被转化面积最大，达到 3.92 km²，占 1992 年该类型面积的 60.5%；其次为挺水植被向陆地植被转化（1.22 km²）以及开阔水体向陆地植被转化（1.17 km²）。

与此同时，部分陆地背景和水生生境发生向水体方向的转换。其中，沉水/浮叶植被向开阔水体转化面积为 1.56 km²，陆地植被和裸露地表向开阔水体转化面积均为 0.69 km²。陆地植被保持面积最大，为 10.18 km²，是两个端元年份之间最稳定的生境类型。

总体来看，1992—2024 年纳帕海湿地生境变化主要集中于沉水/浮叶植被、开阔水体和陆地植被之间，表现为水生生境与陆地背景之间的动态转换。

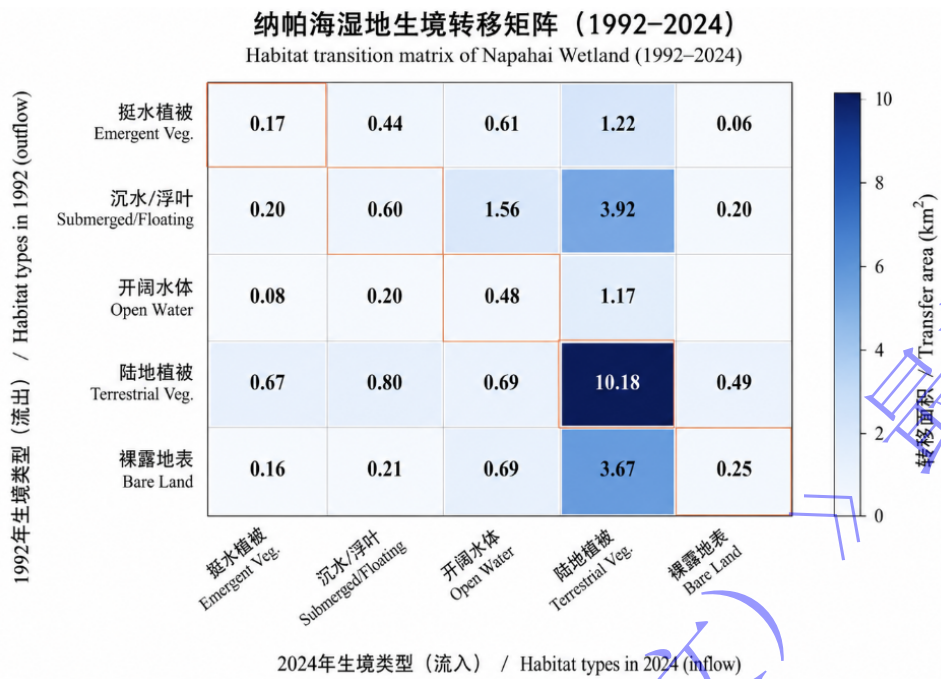


图 3 纳帕海湿地生境转移矩阵
Fig. 3 Habitat transition matrix of Napahai wetland

注：为降低不同传感器空间分辨率差异造成的伪变化，2024 年分类图在转移矩阵计算前采用最近邻法重采样至 1992 年 Landsat 30 m 空间网格。同时，高 FAI 异常像元在转移矩阵计算中并入开阔水体，不作为独立可靠生境类型解释。

Note: To reduce pseudo-changes caused by differences in sensor spatial resolution, the 2024 classification map was resampled to the 1992 Landsat 30 m spatial grid using the nearest-neighbor method before calculating the transition matrix. Meanwhile, high-FAI anomaly pixels were merged into open water in the transition matrix and were not interpreted as an independent reliable habitat type.

2.3 水生植被面积变化特征

基于年度代表影像分类结果，1985—2024 年纳帕海沉水/浮叶植被、挺水植被及总水生植被面积均呈明显年际波动（图 4）。线性趋势分析结果显示，沉水/浮叶植被面积、挺水植被面积和总水生植被面积的决定系数 R^2 分别为 0.00、0.05 和 0.02，对应的 P 值分别为 0.78、0.18 和 0.39，均未达到显著水平。因此，研究期内水生植被面积未表现出显著增加或减少趋势。

从面积变化范围看，沉水/浮叶植被面积约为 0~6.5 km^2 ，挺水植被面积介于 0.1~6.1 km^2 ，总水生植被面积介于 0.5~9.2 km^2 。三类面积指标均表现出明显的高低年份交替特征。

3 年滑动平均结果显示，水生植被面积存在阶段性变化过程，不同阶段表现为面积增加和减少交替出现。总体上，纳帕海水生植被长期变化以年际波动和阶段性变化为主要特征，而非持续性扩张或萎缩。

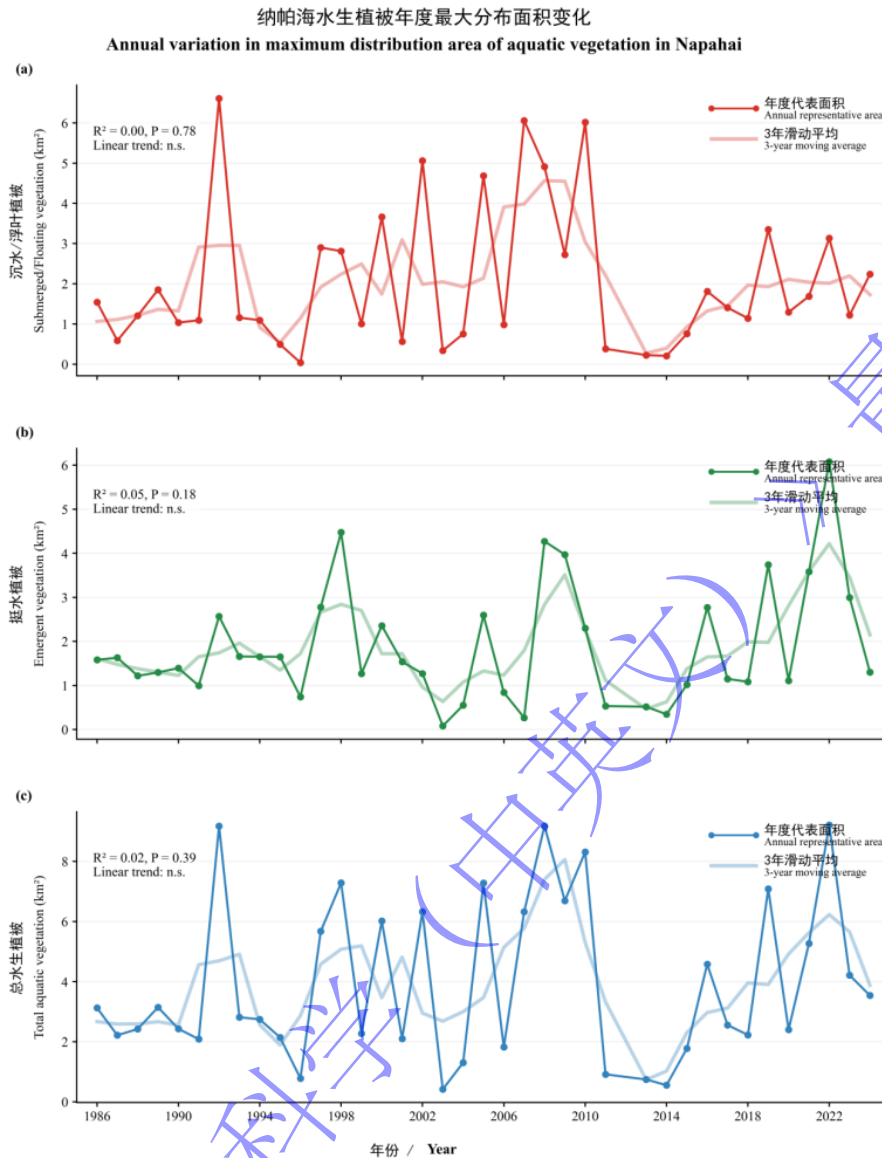


图 4 纳帕海水生植被年度最大分布面积变化

Fig. 4 Annual variation in maximum distribution area of aquatic vegetation in Napahai

2.4 空间分布演变特征

1985—2024 年遥感分类结果显示，纳帕海湿地水生生境总体保持稳定的空间分布格局（图 5）。开阔水体主要集中于研究区中北部低洼区域；沉水/浮叶植被主要分布于开阔水体外围；挺水植被主要分布于湖滨浅水带和水陆交错区域。

不同年份之间，各生境类型空间范围存在明显变化。在水域范围较小年份，开阔水体面积明显减少。例如，1992 年和 2021 年开阔水体面积分别为 0.03 km² 和 0.76 km²，水体边界向湖盆中心收缩，部分浅水区域转变为挺水植被、陆地植被或裸露地表。在水域范围较大年份，开阔水体范围扩大，沉水/浮叶植被主要分布于水体外围，挺水植被集中于湖滨过渡带，形成由开阔水体向外围陆地逐渐过渡的空间梯度。

2024 年分类结果显示，水体、水生植被和陆地背景仍保持类似空间分布结构，但部分

区域发生了生境类型转换。总体来看，纳帕海水生生境变化主要表现为空间边界移动和类型转换，而非整体空间格局重组。

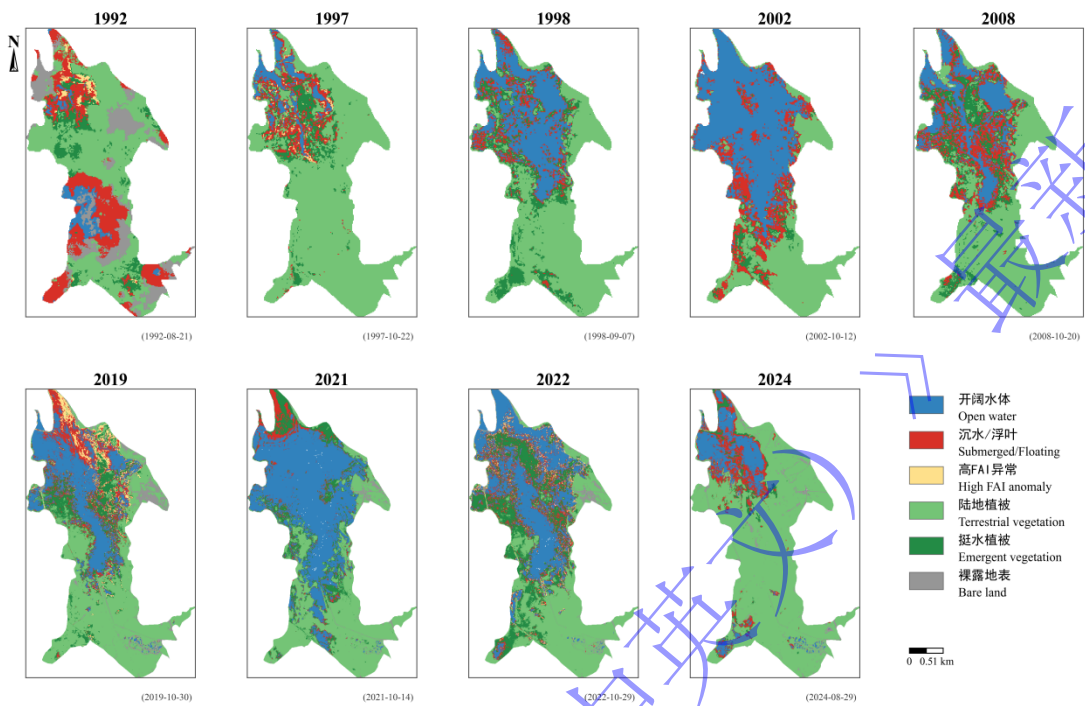


图 5 纳帕海水生空间变化图
Fig. 5 Spatial variation of aquatic habitats in Napahai

2.5 植被变化的气候驱动机制

为分析气候因素与水生植被变化之间的统计关系，选取年降水量、夏季降水量、生长季降水量、秋季降水量以及对应气温指标，采用 Spearman 相关分析进行检验（图 6）。结果显示，降水指标与水生植被面积总体呈正相关关系，其中沉水/浮叶植被面积与年降水量、夏季降水量、丰水期降水量和生长季降水量的相关系数分别为 0.58、0.51、0.54 和 0.51，均达到显著水平（ $P<0.01$ ）。

总水生植被面积与年降水量、夏季降水量、丰水期降水量和生长季降水量的相关系数分别为 0.58、0.53、0.53 和 0.47，均达到显著水平。相比之下，挺水植被与降水指标的相关性较弱，其与年降水量、夏季降水量和丰水期降水量的相关系数分别为 0.35、0.40 和 0.36。秋季降水与各类水生生境面积相关性较低，均未达到显著水平。气温指标与水生植被面积之间整体相关性较弱，相关系数绝对值均低于 0.20，且未达到显著水平。总体上，纳帕海水生植被面积变化与降水指标具有较强统计关联，而与气温指标相关性较弱。

纳帕海水生生境面积与气候因子的相关性分析
Spearman correlation between aquatic habitat area and climate factors in Napahai

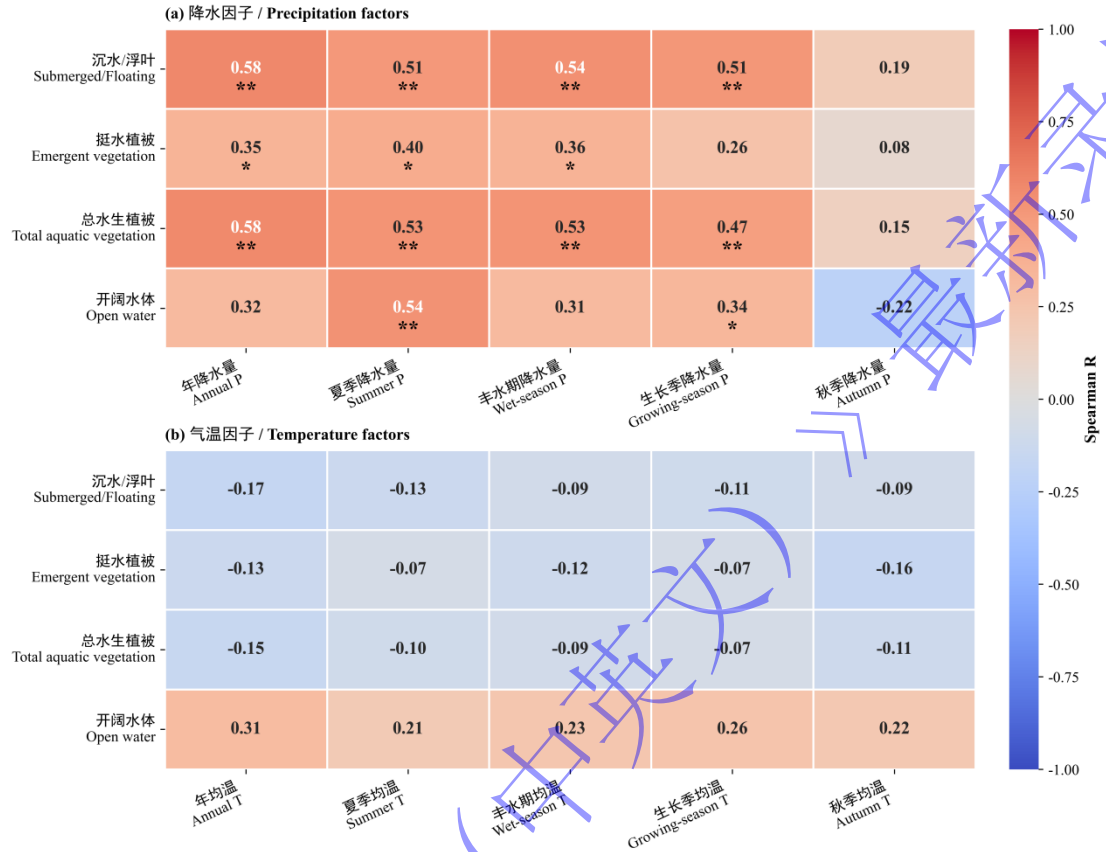


图 6 纳帕海水生生境面积与气候因子的 Spearman 相关性分析

Fig. 6 Spearman correlation between aquatic habitat area and climate factors in Napahai

纳帕海水生植被变化的气候驱动机制框架

Conceptual framework of climate-driven mechanisms of aquatic vegetation change in Napahai

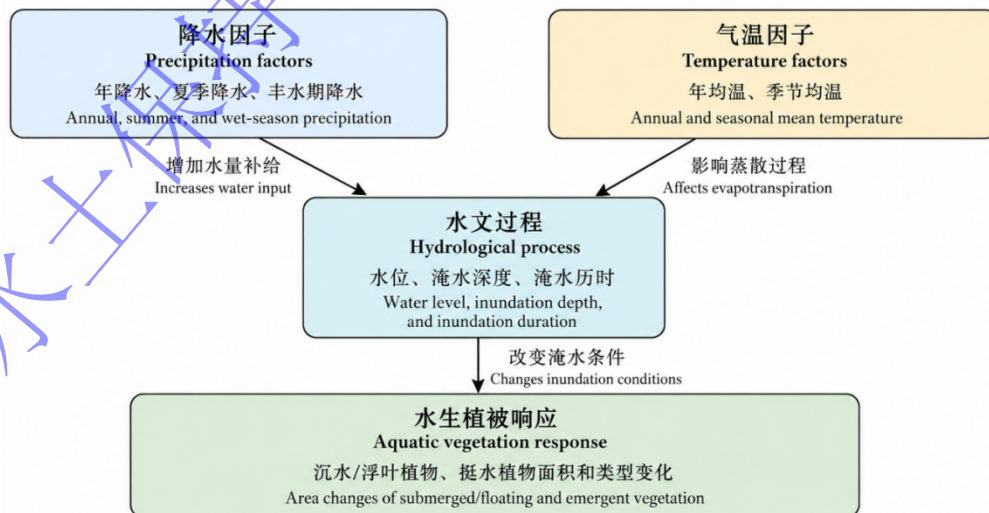


图 7 气候驱动机制图

Fig. 7 Climate-driven mechanism

3 讨论

3.1 长时间序列水生植被遥感监测方法适用性与不确定性

本研究构建了融合多光谱指数、自适应阈值与随机森林相结合的分层分类方法，总体精度为 88.62%，Kappa 系数为 0.8115，能够较好地区分纳帕海湿地的挺水植被、沉水/浮叶植被、开阔水体及陆地背景。该结果表明，将具有明确生态光谱意义的水体和植被指数与机器学习算法相结合，可以在复杂湿地背景下兼顾规则约束与非线性分类能力，从而提高不同水生生境的识别效果。长时间序列湿地遥感监测面临的重要问题之一是不同传感器间的观测一致性。Landsat 系列与 Sentinel-2 在空间分辨率、光谱响应函数及观测条件等方面存在差异，直接拼接不同传感器数据可能产生非生态意义上的突变，从而影响长期趋势判断。多源遥感时间序列构建通常需要进行空间配准、公共网格匹配及光谱波段协调等处理，以降低传感器差异造成的系统偏差^[23]。本研究通过统一反射率尺度、关键波段匹配和空间尺度，并在端元年份生境转移分析前进行空间对齐，在一定程度上降低了多源传感器差异造成的影响。结合 1985—2024 年的总体变化结果来看，研究区水生植被面积未表现出明显的突变式变化，这也在一定程度上说明本研究构建的跨传感器分类体系具有较好的长期一致性。

相较于单一指数或固定经验阈值，逐景自适应阈值能够根据不同影像的光谱分布调整分类界限，更适合水位和植被物候变化明显的长时间序列研究。已有浅水湖泊研究利用 Landsat 影像建立自动水生植被分类方法，通过影像特征动态确定分类阈值，实现了沉水植被长期空间分布提取，表明动态阈值在降低人工阈值依赖和提高长时间序列识别适应性方面具有一定优势^[24]。因此，本研究采用自适应阈值与随机森林相结合的方法，有利于减弱不同年份水文背景、植被物候及影像条件变化对分类结果一致性的影响。

然而，水生植被遥感信号并非仅由植被本身决定，而是水体、植被冠层、底质及水面状态共同作用的结果。在浅水环境中，水面状态、水体浑浊度、植被覆盖度及底质反射等因素均可能影响遥感光谱特征，尤其对于沉水植被，水体和底质共同作用会增加其与开阔水体之间的光谱混淆。已有水生植被辐射传输研究表明，挺水、浮叶和沉水植被的光谱响应受到水体、植被冠层和底质等多种组分共同影响^[25]。这可以在一定程度上解释本研究中挺水植被、沉水/浮叶植被和开阔水体之间仍存在混淆的现象。这一过程可以解释本研究中沉水/浮叶植被与开阔水体之间仍存在一定误分现象，也说明基于光学遥感的水生植被分类本质上具有一定的不确定性。

此外，纳帕海水位具有显著的季节性和年际波动，植被的萌发、扩张、成熟和衰退过程也具有明显的物候特征。因此，同一空间位置在不同时间可能表现为开阔水体、沉水/浮叶植被、挺水植被甚至湿润泥滩等不同光谱状态。已有研究表明，季节性水位变化不仅能

够改变水体面积，还能够通过改变水深、底质暴露程度及水下光环境影响水生植被的遥感可见性和空间分布^[26]。本研究选取水生植被生长季内云量较低、湖区覆盖完整且植被发育较充分的影像表征年度最大分布状态，能够降低云污染和物候差异的影响，但单景代表影像难以完整描述植被萌发、扩张和衰退的全年动态。未来研究可结合高频遥感时间序列、无人机影像、连续水位和水深监测及同步植被调查，对水生植被分类结果开展多时相验证，以进一步提高高原季节性湿地长期遥感监测的可靠性。

3.2 水生植被长期演变规律及其水文气候响应

本研究基于 1985—2024 年长时间序列遥感数据发现，纳帕海挺水植被、沉水/浮叶植被及总水生植被面积均未呈现显著增加或减少趋势，而主要表现为明显的年际波动和阶段性变化。这表明纳帕海水生植被长期演变并非简单的持续扩张或退化，而更可能体现为水文条件周期性变化背景下的生境重组与群落动态调整。已有研究表明，高原湿地植被的空间格局受到水分条件、地形、土壤水分和水文过程等多因素共同控制，其中水文条件往往通过改变植被生境范围和资源可利用性，对群落组成和空间分布产生重要影响^[26]。因此，相较于仅依据长期线性趋势判断湿地生态变化，识别水生植被的年际波动、阶段性变化和生境转换过程可能更能反映季节性高原湿地的真实生态动态。

从区域水文过程看，纳帕海具有典型的季节性湖泊湿地特征。针对纳帕海开展的长时间序列研究表明，其开放水面变化与降水及湿地水文过程之间存在密切联系^[27]。这一认识与本文“水生植被长期趋势不显著而年际波动突出”的结果相吻合，说明水文脉冲可能是控制纳帕海湿地生境动态变化的重要环境背景。空间上，研究区长期保持由开阔水体、沉水/浮叶植被、挺水植被向外围陆地植被过渡的空间梯度。这种空间序列实际上反映了沿水深梯度和淹水持续时间形成的水生—陆生生态过渡带。水位变化并不是简单地改变水体面积，而是通过推动水陆边界和浅水带的位置迁移，重新分配不同水生植被的潜在适生空间。因而，不同年份生境边界的移动可能比单纯的面积变化更能反映湿地水文过程对植被空间格局的影响。尤其是湖滨浅水区和水陆交错带，既处于水位变化最直接的影响范围，也是不同植被生活型之间转换最频繁的区域，应被视为纳帕海湿地生态变化的敏感响应带。

不同生活型水生植被对水文变化的响应具有差异。沉水/浮叶植被的年际面积波动较大，可能与其对水深和水下光环境更加敏感有关。其生长和空间分布不仅取决于是否存在水体，还受到水深、透明度和光照衰减等因素的共同限制。高原湖泊研究发现，水位变化是影响沉水植物分布深度的重要因素，不同沉水植物的分布边界可随季节性水位波动发生调整^[28]。因此，纳帕海沉水/浮叶植被面积的明显波动可能反映了适宜浅水生境随水位升降而发生的扩张和收缩。

水深变化对沉水植被的影响并非简单的线性关系。控制实验表明，水深增加可能抑制

部分沉水植物群落的生长，而一定程度的水位波动又可能改变其营养繁殖和空间扩展过程^[29]。这意味着，当水位处于适宜范围时，水量增加可能扩大适宜沉水/浮叶植被生长的浅水区域；但当水深超过适宜范围时，水下光照条件的改变又可能限制植被生长。相反，当水位过低时，原有浅水区域可能暴露并逐渐向挺水植被、陆地植被或裸露地表转化。因此，沉水/浮叶植被对水文变化可能具有一定的非线性响应特征，这也是其年际面积波动较大的可能原因之一。

相比之下，挺水植被主要分布于湖滨浅水区域和水陆交错带，对一定幅度水位变化具有不同于沉水植物的响应方式。针对挺水植物开展的水位控制实验表明，不同种类对水位波动幅度的耐受能力存在差异，只有当水位变化达到一定程度时，部分挺水植物的生长才会受到明显抑制^[30]。因此，本文中挺水植被与降水指标的相关程度总体低于沉水/浮叶植被，可能反映了不同生活型水生植被对水文扰动敏感性的差异。挺水植被的长期变化更多体现为湖滨水陆边界的动态迁移，而沉水/浮叶植被则更直接受到浅水生境范围及水深条件变化的影响。

气候因子分析进一步表明，降水指标与水生植被面积变化具有较强统计关联，而气温指标相关性相对较弱。湿地生态系统对气候变化的响应通常通过水分收支和水文过程实现，气温和降水变化均可能影响湿地水量平衡及植被生境条件^[31]。已有高原湿地研究发现，降水变化与湿地面积和生态格局演变具有密切联系^[32]；青海湖等高原湖泊研究也表明，水位波动能够显著影响湖滨生态环境及湿地生境格局^[33]。本研究中，年降水量、夏季降水量、丰水期降水量和生长季降水量均与沉水/浮叶植被及总水生植被面积呈显著正相关，因此可以推测降水的作用可能主要通过“降水输入—湿地水量补给—水位及淹水范围变化—浅水适生生境重新分配—水生植被面积变化”的过程链实现，而并非仅表现为对植物生长的直接促进作用。

相比之下，气温指标与水生植被面积的相关系数绝对值均低于 0.20，且未达到显著水平。这并不意味着气温对水生植被不存在生态影响，而可能说明在纳帕海当前研究尺度下，气温更多通过蒸散、水分收支和植被物候等过程产生间接影响，其统计信号受到较强水文波动的掩盖。因此，本文结果更支持“降水及其驱动的水文过程是影响纳帕海水生植被年际变化的重要背景因素”，而不能简单解释为降水直接决定水生植被面积。

同时需要指出，Spearman 相关分析反映的是统计关联，并不能直接证明因果关系。纳帕海水位除受到降水影响外，还可能受到地下水交换、蒸散、地表径流、放牧、旅游活动及湿地管理等因素共同影响。因此，本文提出的气候、水文、生境与植被响应链主要是基于长时间序列遥感变化特征和气候统计关系所提出的机制解释，仍需要过程观测进行验证。

未来研究需进一步结合连续水位、水深、水质、地下水过程、人类活动强度和植被群落监测数据，并采用滞后相关、偏相关等方法，进一步区分不同驱动因子的相对贡献。

总体而言，纳帕海水生植被 40 年尺度上的主要变化特征并非持续性扩张或退化，而是在显著水文波动背景下表现出的年际面积变化、生境边界迁移和类型转换。降水可能主要通过调节湿地水量补给、水位及浅水生境范围影响水生植被变化，其中沉水/浮叶植被对水文变化表现出更高敏感性，而挺水植被具有相对较强的水位波动适应能力。由此，湖滨浅水区和水陆交错带不仅是不同生活型水生植被响应水文变化最敏感的空间区域，也是未来纳帕海湿地生态保护和水文管理中需要重点关注的生境单元。

3.3 高 FAI 异常区识别不确定性及生态监测意义

FAI 通过利用红光、近红外和短波红外波段之间的光谱基线关系增强水面漂浮藻类产生的异常近红外信号，是湖泊漂浮藻类和水华遥感监测中应用较为广泛的光谱指数之一^[34]。本文识别出的高 FAI 异常区域主要分布于浅水区和水陆交错带，并表现出明显的年际和空间波动。然而，FAI 本质上反映的是水面近红外光谱异常，其生态指示意义具有一定的非唯一性，因此不能简单将高 FAI 异常直接等同于特定藻类聚集或蓝藻水华。

已有研究表明，卫星遥感进行湖泊蓝藻水华监测时，水体光学性质、藻类聚集程度、观测尺度及水体背景等因素均可能影响遥感信号^[35]。实测光谱研究进一步发现，藻类水华和部分水生高等植物在近红外及红边波段可能表现出一定程度的光谱相似性，从而增加二者的遥感区分难度^[36]。对于纳帕海这种浅水、水位波动明显且水陆交错带广泛分布的高原湿地，高 FAI 异常除了可能来源于浮游藻类或漂浮藻类聚集外，还可能受到浑浊水体、浅水底质、水生植被、漂浮有机物及湿润泥滩等因素的共同影响。因此，在缺乏叶绿素 a 浓度、藻类群落组成和同步水质数据的情况下，仅依据 FAI 异常判断藻类水华容易造成生态意义的过度解释。

基于这一认识，本研究未将高 FAI 异常区作为独立可靠生境类型参与精度评价和长期生境转移分析，而仅将其作为潜在水体生态异常信息进行记录。这种处理能够在保留异常水体遥感信息的同时，避免因缺乏现场验证而将其直接解释为真实藻类水华。

尽管存在上述不确定性，高 FAI 异常的长期空间信息仍具有潜在的生态监测价值。卫星遥感具有覆盖范围广和重复观测能力强等优势，可用于快速识别湖泊水华异常区域，为后续现场调查提供空间定位依据^[37]；高频及高光谱观测还能够进一步反映蓝藻水华短时间尺度的动态变化^[38]。此外，藻类在水柱中的垂向分布也会对遥感信号产生影响，说明仅依赖单次水面光谱观测仍存在一定不确定性^[39]。已有长期水生植被研究则表明，多时期遥感资料能够为湖泊水生植被长期生态演变识别提供重要信息^[40]。

因此，未来可针对高 FAI 异常反复出现或集中分布区域开展叶绿素 a、总氮、总磷、

透明度及藻类群落组成等现场调查,并结合无人机、高光谱和高空间分辨率遥感数据开展验证。在湿地管理实践中,高 FAI 异常更适合作为潜在生态风险的预警信号,而不应在缺乏现场证据的情况下直接作为藻类水华发生面积进行定量解释。

4 结论

本研究基于 1985—2024 年 Landsat 和 Sentinel-2 多源遥感影像,构建了融合光谱指数、自适应阈值和随机森林的水生生境分层识别方法,系统揭示了纳帕海季节性湿地水生植被长期演变特征及其气候响应关系。主要结论如下:

(1) 构建的多源遥感分层识别方法能够有效提取纳帕海挺水植被、沉水/浮叶植被、开阔水体和陆地背景等主要生境类型,为复杂水陆交错带和长时间序列湿地生境动态监测提供了有效方法。

(2) 纳帕海水生植被长期变化未表现出持续扩张或退化趋势,而主要呈现受水文波动调节的年际变化和阶段性波动特征。不同生境类型之间存在持续的空间转换过程,湖滨浅水带和水陆交错区是湿地生境变化的关键区域。

(3) 降水及其驱动的水文过程可能是影响纳帕海水生植被年际变化的重要环境因素,其影响强于气温因素。高 FAI 异常区可作为潜在生态异常遥感监测信息,但由于缺乏现场验证数据,尚不能直接等同于藻类水华。

5 参考文献

- [1] WANG R, HE M, NIU Z. Responses of alpine wetlands to climate changes on the Qinghai-Tibetan Plateau based on remote sensing [J]. Chinese Geographical Science, 2020, 30(2): 189-201.
- [2] RODRIGO M A. Wetland restoration with hydrophytes: A review [J]. Plants (Basel), 2021, 10(6): 1035.
- [3] JIANG H, LU A, LI J, et al. Effects of aquatic plant coverage on diversity and resource use efficiency of phytoplankton in urban wetlands: A case study in Jinan, China [J]. Biology (Basel), 2024, 13(1): 44.
- [4] HIROTA M, KAWADA K, HU Q, et al. Net primary productivity and spatial distribution of vegetation in an alpine wetland, Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Limnology, 2007, 8(2): 161-170.
- [5] MADSEN J D, CHAMBERS P A, JAMES W F, et al. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes [J]. Hydrobiologia, 2001, 444(1-3): 71-84.
- [6] HORPPILA J, NURMINEN L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidenvesi (southern Finland) [J]. Water Res, 2003, 37(18): 4468-4474.
- [7] WEN L, MASON T J, RYAN S, et al. Monitoring long-term vegetation condition dynamics in persistent semi-arid wetland communities using time series of Landsat data [J]. Sci Total Environ, 2023, 905: 167212.
- [8] 明義森, 刘启航, 柏荷, 等. 利用光学和 SAR 遥感数据的若尔盖湿地植被分类与变化监测[J]. 遥感学报, 2023, 27(6): 1414-1425.
- MING Y S, LIU Q H, BAI H, et al. Vegetation classification and change monitoring in Zoige wetland using optical and SAR remote sensing data [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(6): 1414-1425.

- [9] BELGIU M, DRĂGUT L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 114: 24-31.
- [10] MAXWELL A E, WARNER T A, FANG F. Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(9): 2784-2817.
- [11] BERHANE T M, LANE C R, WU Q, et al. Decision-tree, rule-based, and random forest classification of high-resolution multispectral imagery for wetland mapping and inventory [J]. *Remote Sens (Basel)*, 2018, 10(4): 580.
- [12] VILLA P, BRESCIANI M, BOLPAGNI R, et al. A rule-based approach for mapping macrophyte communities using multi-temporal aquatic vegetation indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 171: 218-233.
- [13] LUO J, NI G, ZHANG Y, et al. A new technique for quantifying algal bloom, floating/emergent and submerged vegetation in eutrophic shallow lakes using Landsat imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 287: 113480.
- [14] XU X, ZHANG Y, CHEN Q, et al. Regime shifts in shallow lakes observed by remote sensing and the implications for management [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 106239.
- [15] LIANG Q, ZHANG Y, MA R, et al. A MODIS-based novel method to distinguish surface cyanobacterial scums and aquatic macrophytes in Lake Taihu [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 147.
- [16] 胡金明, 李杰, 袁寒, 等. 纳帕海湿地季节性景观格局动态变化及其驱动[J]. *地理研究*, 2010, 29(5): 899-908.
- HU J M, LI J, YUAN H, et al. Landscape pattern change and its driving forces of the Napahai Wetland [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(5): 899-908.
- [17] 刘强, 蒋文静. 云南纳帕海湿地冬季景观格局动态[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2018, 38(4): 139-145.
- LIU Q, JIANG W J. Winter landscape pattern dynamics of Napahai wetland in Yunnan [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2018, 38(4): 139-145.
- [18] LIU G, TIAN K, SUN J, et al. Evaluating the effects of wetland restoration at the watershed scale in northwest Yunnan Plateau, China [J]. *Wetlands*, 2015, 36(1): 169-183.
- [19] 李杰, 胡金明, 张洪, 等. 无常规水文监测高寒湿地纳帕海水量波动模拟分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(2): 340-349.
- LI J, HU J M, ZHANG H, et al. The simulation of water storage fluctuation in ungauged subalpine wetlands—Naphai in northwest Yunnan, China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(2): 340-349.
- [20] ARRUDA ALMEIDA B, GREEN A J, SEBASTIAN-GONZALEZ E, et al. Comparing species richness, functional diversity and functional composition of waterbird communities along environmental gradients in the Neotropics [J]. *PLoS One*, 2018, 13(7): e0200959.
- [21] LI Y, ZHANG Q, CAI Y, et al. Hydrodynamic investigation of surface hydrological connectivity and its effects on the water quality of seasonal lakes: Insights from a complex floodplain setting (Poyang Lake, China) [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 660: 245-259.
- [22] THAKUR G, SCHYMANSKI S J, MALLICK K, et al. Downwelling longwave radiation and sensible heat flux observations are critical for surface temperature and emissivity estimation from flux tower data [J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 8592.
- [23] CLAVERIE M, JU J, MASEK J G, et al. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set [J]. *Remote Sens Environ*, 2018, 219: 145-161.
- [24] DAI Y, FENG L, HOU X, et al. An automatic classification algorithm for submerged aquatic vegetation in shallow lakes using Landsat imagery [J]. *Remote Sens Environ*, 2021, 260: 112459.

- [25] ZHOU G, NIU C, XU W, et al. Canopy modeling of aquatic vegetation: A radiative transfer approach [J]. *Remote Sens Environ*, 2015, 163: 186-205.
- [26] 肖德荣, 田昆, 杨宇明, 等. 高原退化湿地纳帕海植物多样性格局特征及其驱动力[J]. *生态环境*, 2007, (2): 523-529.
- XIAO D R, TIAN K, YANG Y M, et al. Plant diversity pattern and its driving forces in Napahai, a degraded plateau wetland in northwestern Yunnan, China [J]. *Ecology and Environment*, 2007, (2): 523-529.
- [27] LI X, LI J. Data-driven models for flood prediction in an ungauged karst wetland: Napahai wetland, Yunnan, China [J]. *PeerJ*, 2023, 11: e14940.
- [28] WEN Z, WANG H, ZHANG Z, et al. Depth distribution of three submerged macrophytes under water level fluctuations in a large plateau lake [J]. *Aquat Bot*, 2022, 176: 103451.
- [29] WANG P, ZHANG Q, XU Y S, et al. Effects of water level fluctuation on the growth of submerged macrophyte communities [J]. *Flora*, 2016, 223: 83-89.
- [30] DEEGAN B M, WHITE S D, GANF G G. The influence of water level fluctuations on the growth of four emergent macrophyte species [J]. *Aquat Bot*, 2007, 86(4): 309-315.
- [31] 傅国斌, 李克让. 全球变暖与湿地生态系统的研究进展[J]. *地理研究*, 2001, (1): 120-128.
- FU G B, LI K R. Progress in the study on the relationship between global warming and wetland ecological system [J]. *Geographical Research*, 2001, (1): 120-128.
- [32] 李凤霞, 伏洋, 肖建设, 等. 长江源头湿地消长对气候变化的响应[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 49-56.
- LI F X, FU Y, XIAO J S, et al. Response of wetlands rise and fall in the Changjiang River source region to climatic change [J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(1): 49-56.
- [33] HOU P, WEIDMAN R P, LIU Q, et al. Recent water-level fluctuations, future trends and their eco-environmental impacts on Lake Qinghai [J]. *J Environ Manage*, 2023, 333: 117461.
- [34] HU C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans [J]. *Remote Sens Environ*, 2009, 113(10): 2118-2129.
- [35] 冯炼. 卫星遥感解译湖泊蓝藻水华的几个关键问题探讨[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(3): 647-652.
- FENG L. Key issues in detecting lacustrine cyanobacterial bloom using satellite remote sensing [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(3): 647-652.
- [36] 李俊生, 吴迪, 吴远峰, 等. 基于实测光谱数据的太湖水华和水生高等植物识别[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(2): 215-222.
- LI J S, WU D, WU Y F, et al. Identification of algae-bloom and aquatic macrophytes in Lake Taihu from in situ measured spectra data [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(2): 215-222.
- [37] 赵焕, 李勇, 李俊生, 等. 基于卫星遥感的湖库蓝藻水华业务化时空快速响应方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2025, 40(6): 1637-1644.
- ZHAO H, LI Y, LI J S, et al. Study on the fast response method of operationalized spatial and temporal cyanobacterial blooms in lakes and reservoirs based on satellite remote sensing [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2025, 40(6): 1637-1644.
- [38] 张运林, 张毅博, 李娜, 等. 利用陆基高光谱遥感捕捉太湖蓝藻水华日内快速变化过程[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(6): 1951-1960.
- ZHANG Y L, ZHANG Y B, LI N, et al. Capturing the rapid intra-day change of cyanobacteria bloom by land-based hyperspectral remote sensing in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(6): 1951-1960.
- [39] KUTSER T, ROHTLA L, DEKKER A G. Influence of the vertical distribution of cyanobacteria in the water column on the remote sensing signal [J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2008, 78(4): 649-654.

[40] 赵凯, 周彦锋, 蒋兆林, 等. 1960 年以来太湖水生植被演变[J]. 湖泊科学, 2017, 29(2): 351-362.

ZHAO K, ZHOU Y F, JIANG Z L, et al. Changes of aquatic vegetation in Lake Taihu since 1960s [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(2): 351-362.

Spatiotemporal evolution and its influencing factors of aquatic vegetation in the Napahai Plateau Wetland, Yunnan

HUANG Jun^{1,2}, ZHANG Jiaqi^{1,2}, SHI Yangyang^{1,2}, YANG Hui^{1,2}, WANG Guanglin^{1,2},

SONG Lin³, CHEN Xinhao⁴, FENG Yuwen⁵

(1.School of Earth Sciences, Yunnan University, 650500, Kunming, China;

2.International Joint Research Center for Karstology, Yunnan University/Key Laboratory of Karst Processes and Water-Soil

Resources Allocation, Yunnan Provincial Department of Education, 650500, Kunming China;

3.Kunming General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey/Technology Innovation Center for Natural

Ecosystem Carbon Sink, Ministry of Natural Resources /Yunnan Technology Innovation Center of Natural Resources Carbon Sink

Investigation and Carbon Asset Assessment, 650100, Kunming, China

4. Xi'an Meteorological Bureau, 710016, Xi'an China

5.Bazhong Meteorological Bureau, 636000, Chengdu, China)

Abstract : [Objective] This study aimed to characterize the long-term spatiotemporal dynamics of aquatic vegetation and its hydroclimatic responses in the Napahai seasonally plateau wetland, providing support for wetland conservation, water-soil resource regulation, and habitat management.[Methods] Based on Landsat and Sentinel-2 multisource remote sensing imagery from 1985 to 2024, a hierarchical aquatic habitat classification framework integrating spectral indices, adaptive thresholding, and random forest algorithms was developed. The framework was used to identify major habitat types, including emergent vegetation, submerged/floating-leaved vegetation, open water, and high-floating algae index (FAI) anomaly areas. Annual variations, habitat transition matrices, and Spearman correlation analyses were further applied to investigate long-term vegetation dynamics and their relationships with hydroclimatic factors. [Results] The proposed multisource remote sensing approach achieved an overall classification accuracy of 88.62% and a Kappa coefficient of 0.8115, demonstrating its effectiveness in identifying major aquatic habitat types in Napahai wetland. From 1985 to 2024, emergent vegetation, submerged/floating-leaved vegetation, and total aquatic vegetation exhibited pronounced interannual fluctuations and stage-dependent variations, without significant persistent increasing or decreasing trends. Spatially, aquatic vegetation was mainly distributed in shallow littoral zones and water-land transition areas, with long-term changes characterized primarily by dynamic conversions among aquatic vegetation, open water, and terrestrial vegetation. Aquatic vegetation areas showed significant correlations with annual precipitation, summer precipitation, and wet-season precipitation, suggesting that precipitation-driven hydrological processes may represent important environmental controls. High-FAI anomaly areas exhibited substantial spatiotemporal variability and were likely influenced by multiple factors, including phytoplankton accumulation,

turbid water, and shallow-water substrate reflectance.[**Conclusion**] The multisource remote sensing-based hierarchical classification framework effectively reconstructed the long-term dynamics of aquatic vegetation in seasonal plateau wetlands. Aquatic vegetation changes in Napahai were primarily characterized by hydrologically regulated habitat shifts and boundary fluctuations rather than persistent expansion or degradation. These findings provide long-term data support for aquatic vegetation monitoring, karst watershed water–soil resource management, and ecological conservation of plateau wetlands.

Keywords: plateau wetland; aquatic vegetation; remote sensing monitoring; spatiotemporal dynamics; hydrological response; algal bloom

Funded: National Key Research and Development Program of China “Technologies for Soil and Water Loss Prevention and Control and Water Resource Regulation and Utilization in Karst Sloping Farmland” (2023YFD1902801); Key Research and Development Program of Guangxi “Construction of the China–Cambodia ‘Belt and Road’ Joint Laboratory for Carbon Cycling in the Earth’s Critical Zone” (AB25069497).