引文格式：王陆一,陆天启,崔振昂. 新丰江水库长时间序列水面信息遥感监测与分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(8):72-76. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.08.014

新丰江水库长时间序列水面信息遥感监测与分析

王陆一[1,2,3]，陆天启[1,2,3*]，崔振昂[1,2,3]

（1. 广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所，海南 三亚 572025；2. 自然资源部海底矿产资源重点实验室，广东 广州 510075；
3. 中国地质调查局南海地质科学院，海南 三亚 572025）

摘　要：新丰江水库是广东省第一大水利工程，具有发电、防洪、灌溉等功能，常年保障粤港澳大湾区供水。以新丰江水库为研究区域，基于谷歌地球引擎（google earth engine，GEE），利用1993—2022年Landsat遥感影像，对比并选取随机森林法，识别水库长时间序列面积变化特征，研究其主要驱动因素。结果表明：①随机森林法对比水体指数法具有更高的准确性，总体精度达97.01%；②水库水体面积总体呈稳定增长后波动下降，永久性水体占比为69%，水库部分边缘区域水陆交替显著；③降水是水体面积增长的直接驱动因素，而气温对水域面积产生间接的负向影响，植被覆盖度表现为不显著的正向作用。研究成果可为保障用水安全、防范洪涝灾害、推动水库管理可持续发展提供参考。

关键词：水体面积；新丰江水库；时空变化；随机森林；GEE；驱动因素

中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）08-0072-05

Remote Sensing Monitoring and Analysis of Long-term Water Surface Information of Xinfengjiang Reservoir

WANG Luyi[1,2,3], LU Tianqi[1,2,3], CUI Zhen'ang[1,2,3]

(1. Sanya Geology Institute of South China Sea, Guangzhou Marine Geological Survey, Sanya 572025, China;
2. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510075, China;
3. Academy of South China Sea Geological Science, China Geological Survey, Sanya 572024, China)

Abstract: The Xinfengjiang Reservoir, the largest water conservancy project in Guangdong Province, serves essential functions including power generation, flood control, and irrigation, ensuring water supply for the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area throughout the year. Taking the Xinfengjiang Reservoir as the research area, based on the Google Earth Engine (GEE) platform and Landsat remote sensing image from 1993 to 2022, we used the random forest algorithm to identify the long-term time series characteristics of reservoir area changes, and investigated their main driving factors. The results indicate that ①compared with the water index method, the random forest algorithm exhibits higher accuracy, with an overall accuracy of 97.01%. ②The overall area of reservoir water body shows a stable increase followed by fluctuation and decline, with permanent water bodies accounting for 69%, and significant alternation between water and land in certain marginal areas of the reservoir. ③Precipitation serves as the direct driving factor for the increase of water body area, while temperature indirectly negatively influences the water body area, and vegetation coverage demonstrates a non-significant positive effect. The findings of this study can provide references for ensuring water security, preventing flood disasters, and promoting the sustainable development of reservoir management.

Key words: water body area, the Xinfengjiang Reservoir, spatio-temporal change, random forest, GEE, driving factor

当前，机器学习已被广泛应用于遥感解译，其复杂环境适应性、多源数据融合等特征在水体识别中展现出了较高的准确性和可操作性，如Wang等[1]利用卷积神经网络（convolutional neural network，CNN）对中国主要城市进行大规模、长时期的城市水变化监测研究，并证明其提取整体性能优于MNDWI指数法；张友才等[2]利用随机森林模型提取南京长江沿岸不透水面，研究表明该算法可准确反映不透水面的空间分布，总体精度达90.51%；Sun等[3]结合自动提取训练数据和支持向量机分类法识别水体空间分布，并以此分析中国629个主要湖泊2000—2010年面积变化、变异性和淹没强度特征。

本研究基于GEE平台，选取Landsat系列遥感数据，对NDWI、MNDWI、EWI、NWI指数提取法和随

项目来源：广州市基础与应用基础研究项目（2023A04J0219）；三亚崖州湾科技城科技专项资助项目（SCKJ-JYRC-2023-04）；广州海洋地质调查局局长科研基金资助项目（2023GMGSJZJJ00025）。

第一作者简介：王陆一（1993—），硕士，工程师，从事生态环境调查监测、遥感数据处理应用工作，E-mail：wly808678@126.com。
通信作者：陆天启（1992—），博士，高级工程师，从事自然资源调查、遥感数据处理应用工作，E-mail：lutq2014@126. com。

机森林分类法进行对比，采用精度最优方法提取1993—2022年新丰江水库水体，深入研究水库面积时空分布特征，根据水体淹没频率划分水体类型，探讨气温、降水、植被覆盖度等因素对水体面积变化的影响。在全球变暖背景下，掌握新丰江水库水体面积的时空变化趋势，研判其主要驱动因素，对研究我国内陆水库资源变化、气候变化影响具有重要意义，一定程度上为水资源管理者和决策制定者提供科学依据，以实现水资源可持续利用和气候适应能力的提升。

1　研究区与数据源

1.1　研究区概况

新丰江水库（23°43′～24°10′N，114°15′～114°45′E），又名万绿湖，位于广东省河源市境内，是华南地区第一大湖泊（图1）。水库所在区域属亚热带季风气候，夏季炎热多雨，冬季较为温和。其地理位置优越，主要由山地、丘陵和平原组成，山脉环抱，形成天然的水源补给区。新丰江作为主要河流，自上游穿越山脉，通过水库形成一片湖泊。水库占地面积为1 600 km²，蓄水量约139亿m³，是一座集供水、灌溉、发电、旅游等多种功能为一体的大型水库。

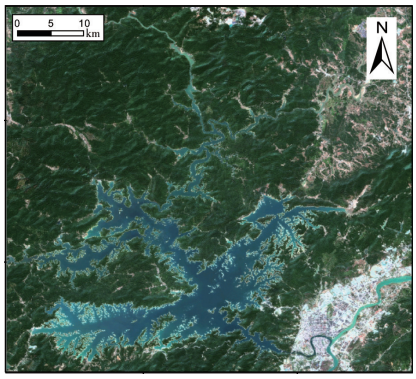


图1　研究区位置

1.2　数据源与预处理

研究采用Landsat5 TM、Landsat7 ETM+和Landsat8 OLI三代探测器获取研究区1993—2022年共计1 732景影像（图2），用于提取研究区水体。使用Sentinel-2获取2022年共计23景影像，用于水体提取精度对比。所用遥感影像相关参数见表1。研究基于GEE平台对获取的数据进行去云、拼接、融合等预处理。

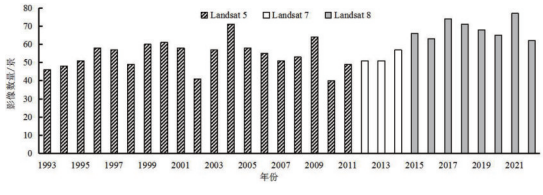


图2　1993年—2022年新丰江水库影像数量

表1　遥感影像参数

卫星/传感器	所用波段/μm	分辨率/m	影像数量/景	选取时间
Landsat5 TM	Blue（0.450~0.520） Green（0.520~0. 600） Red（0.630~0.690） NIR（0.770~0.900） SWIR1（1.550~1.750） SWIR2（2.080~2.350）	30	1027	1993-01-01—2011-12-31
Landsat7 ETM+			159	1992-01-01—2013-12-31
Landsat8 OLI	Blue（0.452~0.512） Green（0.533~0.59） Red（0.636~0.673） NIR（0.851~0.879） SWIR1（1.566~1.651） SWIR2（2.107~2.294）	30	546	1993-01-01—2011-12-31
Sentinel-2	Blue（0.497） Green（0.560） Red（0.665）	10	23	2022-01-01—2022-12-31

注：Blue为蓝光波段，Green为绿光波段，Red为红光波段，NIR为近红外波段，SWIR为短波红外波段。

为了探究气候因素对新丰江水库水体面积变化的影响，研究使用国家青藏高原科学数据中心提供的1 km分辨率逐月平均气温和逐月降水数据集[4]（数据来源：https：//data.tpdc.ac.cn）。该数据集是基于英国国家大气科学中心发布的全球0.5°气候数据集以及WorldClim发布的全球高分气候数据集，通过Delta空间降尺度方案生成，同时使用496个独立气象观测点数据进行验证。在数据剪裁和异常值剔除后，计算得出新丰江水库1993—2022年平均气温和降水量。

2　研究方法

研究内容包括新丰江水库水体识别、精度对比验证以及气象、植被覆盖度等因素对水体面积变化驱动力分析。

2.1　水体提取

2.1.1　水体指数法

研究选用NDWI、MNDWI、EWI、NWI共4类指数法进行水体特征提取，具体特征波段选取与指数计算见表2。

表2　研究所用水体指数

水体指数	计算公式
NDWI[5]	$\frac{Green-NIR}{Green+NIR}$
MNDWI[6]	$\frac{Green-MIR}{Green+MIR}$
EWI[7]	$\frac{Blue-(NIR+MIR)}{Green+(NIR+MIR)}$
NWI[8]	$\frac{Blue-(NIR+SWIR1+SWIR2)}{Blue+(NIR+SWIR1+SWIR2)}$

阈值确定是指数法提取水体的关键，由于研究区域植被茂密，水体指数相近的土地覆盖类型较少，如阴影、基岩等，因此采用Otsu算法进行阈值分割，其是根据图像灰度级别的类内和类间方差，寻找类间方差最大阈值，将图像进行分割。

2.1.2 随机森林法

随机森林法（random forests，RF）基于训练样本构建多个决策树以便更好地适应数据相互关系，自动选择水体和非水体最具区分性的特征，可以有效克服数据噪声干扰，提高鲁棒性和泛化能力，从而提高分类的准确性[9-11]。本次研究基于GEE平台构建算法模型，模型特征集包含Landsat遥感影像可见光至热红外7个波段和上述4种水体指数，结合Sentinel-2遥感影像目视解译，随机抽取训练样本并进行5次交叉验证，评估模型精度。

2.2 植被覆盖度计算

植被覆盖度（fractional vegetation cover，FVC）用于定量描述地表植被覆盖程度，可反映气候变化、水资源开发、土地利用变化等特征[12-13]。由于植被覆盖受多种气象因子影响，在实际应用中难以获取其理论值。因此，本文选取NDVI（归一化植被指数），通过像元二分法进行计算，具体公式如下：

$$FVC=\frac{NDVI-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}} \tag{1}$$

式中，$NDVI_{max}$和$NDVI_{min}$分别为置信区间内NDVI指数的最大值和最小值，置信区间选取累计百分数的2%~98%。

2.3 淹没频率计算

本文利用淹没频率对新丰江水库水体月际、年际变化特征进行研究分析，用以反映其空间法发展分布变化[14-15]，具体公式如下：

$$F=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}W_i\times 100\% \tag{2}$$

式中，F为淹没频率；n为观测总次数；W_i为第i次观测像元是否为水体。

2.4 相关性分析

本文选取皮尔逊系数R与斯皮尔曼等级系数ρ探讨水体变化与气候因素、植被覆盖度之间的相关性。相关性系数可反映变量间的方向和程度，系数大于0表示二者呈现正相关性，小于0表示二者呈现负相关性。其绝对值越大，相关性越强；绝对值越接近于0，相关性越弱[16-17]。具体公式如下：

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{3}$$

式中，R为皮尔逊系数；x_i、y_i分别为两组变量第i个观测值；$\bar{x}$、$\bar{y}$分别对应两组变量样本均值；n为观测总次数。

$$\rho=1-\frac{6\sum d_i^2}{n(n^2-1)} \tag{2}$$

式中，ρ为斯皮尔曼等级系数；d_i为第i对观测变量差的绝对值；n为观测总次数。

3 结果与分析

3.1 水体提取精度验证

本文利用Sentinel-2影像目视解译结果与实验结果进行对比，基于混淆矩阵，计算总体精度、漏提率、误提率、Kappa系数评价指标（表3）。结果显示，识别质量表现为RF > NDWI > EWI > NWI > MNDWI。随机森林法展现了绝对的优势，总体精度和Kappa系数最高，分别达97.01%和0.90，且漏提率最低，为1.60%，反映了其较高的精度和一致性。但随机森林法在误提率上表现较差，为1.39%，这是由于该算法对特定类型的错误分类更为敏感。NDWI和EWI 2种水体指数法识别结果表现同样较好，总体精度均达到95%以上，表明研究区水体在近红外和绿光波段中的反射率差异能够更加有效地突出水体特征。

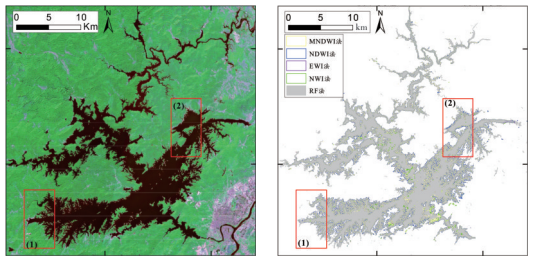
表3 水体提取精度结果对比/%

指标	RF	NWI	NDWI	EWI	MNDWI
总体精度	97.01	94.50	95.80	95.08	94.49
漏提率	1.60	5.43	4.01	4.84	5.44
误提率	1.39	0.07	0.19	0.08	0.07
Kappa系数	0.95	0.80	0.85	0.82	0.80

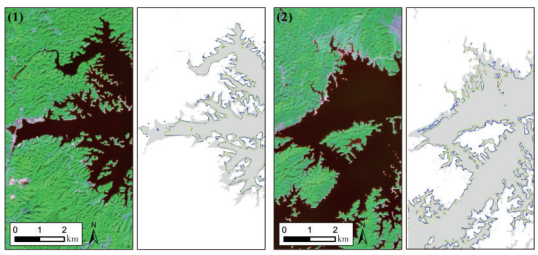
由图3看出，5种算法均可以反映研究区水体形态，不同的是水体指数法在水库边界区域存在无法识别的现象（图3a、3b）。相比之下，随机森林法对于地物过渡区域具有更好的捕捉能力，使水体轮廓更加明晰（图3c、3d）。同时，随机森林法对细小线状水体识别能力不够突出，局部图斑较破碎，存在支流区域分为非水体的问题。综合对比分析5种方法的提取精度和展现效果，随机森林法提取结果与目视解译的一致性非常高，说明了该算法适用于长时间序列水库动态制图，因此采用该算法进行后续研究分析。

3.2 新丰江水库水体时间变化

1993—2022年，新丰江水库水域面积呈现稳定增



a 假彩色图像　　b 提取结果



c 区域1放大图　　d 区域2放大图

图3　5种水体提取方法效果及对比

长后波动下降趋势（图4），年变化率介于−7%到+10%之间，30 a间总面积增长5.54 km²，相对面积变化率为1.8%。

水库年际面积变化可划分为3个阶段：1993—1998年，水域面积由306.91 km²增至330 km²，年均水域面积逐年上升；1999—2012年，水域面积波动较为剧烈，但整体趋势表现为波峰波谷交替，水域面积在2005年达最大值343.24 km²，与2005年6月华南特大洪水（05.6）灾害事件对应，最高水位列1957年以来第一[18-19]，随后，水域面积急剧减小，并于2009年降至285.95 km²后逐步抬升，水域收缩主要受降水和河流来水影响，后续回升受利于国家防总、水利部调水工作的实施[20]；2013—2023年，水域面积呈波动式下降，可能受到气候变化和人为干预等多重因素的影响。

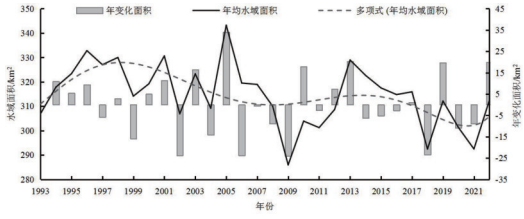


图4　1993—2022年新丰江水库水体面积变化

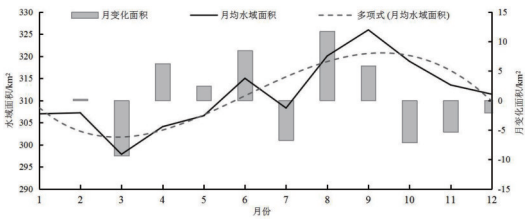
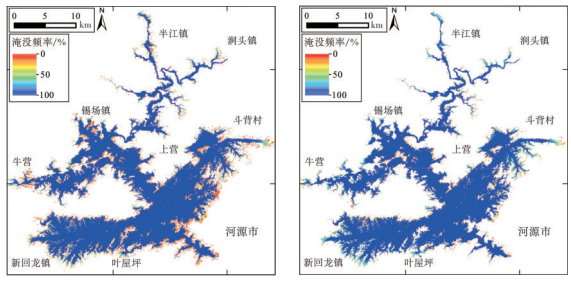


图5　新丰江水库水体面积月际变化

水库水域面积月际变化上呈现出“冬低夏高”的变化趋势（图5），月变化率在−3%~+4%间，水库月平均面积为311.31 km²，最小值在3月份，为297.85 km²，最大值在9月份，为325.95 km²。水库月际变化可分为3个阶段：1—5月份，水域面积相对稳定，总体保持在304.54 km²；6—9月份水域面积呈现出2轮波动性增长，首轮在6月份水库面积增至315.02 km²，与华南地区间歇性“龙舟水”事件基本一致[21]，次轮在9月份水体面积达到全年最大，主要受台风影响；10—12月份，水域面积逐步下降，相对10月份，水体面积减少了14.53 km²。

3.3　新丰江水库水体空间变化

图6展示了新丰江水库1993—2022年新丰江水库年际和月际淹没频率的空间分布特征，蓝色表示较高的淹没频率，红色表示淹没发生频率较低。



a 年际淹没频率分布图　　b 月际淹没频率分布图

图6　新丰江水库水体淹没频率分布图

在过去30 a中，水库年际淹没频率分布呈现出明显的内外异质性特征（图6a）。淹没频率较高的区域主要集中在水库和主渠道中心位置，所占比例达到69%，面积为257.51 km²（表4），表明此区域在研究期间保持着相对恒定的永久性水体（F =100%）。相比之下，水库边缘和水道分叉区域淹没频率相对较低，这些区域多数时间为非水体。淹没频率最高的两级区域占据了80%的总面积，其余区域总占比仅为20%，面积为72.46 km²，主要分布锡场镇、牛营、叶屋坪、斗背村和石龙排周边区域，其中，斗背村尤为突出。

表4　新丰江水库淹没频率统计表

淹没频率/%	年际		月际	
	水体面积/km²	所占比例/%	水体面积/km²	所占比例/%
100	257.51	69	257.13	76
（80~100）	42.49	11	29.66	9
（60~80]	11.04	3	14.65	4
（40~60]	9.97	3	10.02	3
（20~40]	10.78	3	10.40	3
（0~20]	40.68	11	18.59	5

水库月际淹没频率分布特征与年际上基本一致（图6b），但在频率变化上波动较小，永久性水体占比更大（76%）。高淹没频率区域（80< F ≤100%）占比

达85%，分布在水库和主渠道中心区域；中低淹没频率的区域面积（0< F ≤60%）仅为39.02 km^2，占比9%。

总体而言，水库中心地区表现出更高的永久性水体面积，突显了水库在不同时间尺度上的水体稳定性；中低淹没频率区域虽然占比较小，但常年经历水陆更替，水资源短缺、生态系统破坏和洪涝灾害等风险发生频率较高，需要在水库管理中采取有效措施以保障民生安全。

3.4 水体面积变化驱动因素分析

3.4.1 气候因素影响

研究区年降水量呈明显的周期震荡和丰枯转换，变化周期为4~5 a，观测期内降水量最低和最高值分别为1 226.21 mm和1 837.37 mm，其周期性变化可能与厄尔尼诺运动周期相关[19]。由表5所示，年降水量 R 值与 ρ 值均大于0，分别为0.320和0.316，呈现正相关。表明随着年均降水量的增加，水体面积也呈上升趋势，因此降水是引起水域面积变化的直接驱动因素。

表5 水体面积变化与驱动力因素相关性分析

驱动力因素	水体面积相关系数	
	皮尔逊系数（R）	斯皮尔曼等级系数（ρ）
年降水量	0.320	0.316
年平均温度	−0.325	−0.081
植被覆盖度	0.114	0.068

在过去30 a中，新丰江水库年平均温度呈波动性上升趋势。1993—2010年，年平均温度保持相对稳定，维持在20.02℃左右。自2011年始，升温速度较为显著，上升速率可达0.097 ℃/a。年平均温度的 R 值与 ρ 值均小于0，分别为−0.325和−0.081，表明温度对水体面积起到一定程度的反向作用，水体面积随着年平均温度的升高，呈下降趋势，或由于温度升高引发水体表面蒸发速率增加，导致水体面积减小水体蒸发增加，因此气温是水域面积减小的间接驱动因素。

3.4.2 植被覆盖度影响

水库周边区域植被覆盖度变化整体上可划分为3个阶段：1993—2001年，植被覆盖度波动性增长，从65%升至67%；2002—2015年，植被覆盖度相对稳定，总体保持在66%上下；2016—2022年，植被覆盖度呈现明显的下降，降幅约为3%。植被覆盖度与水体面积变化相关性分析结果（表4）反映出两者之间具有较弱的正向关联，且通过图表对比可表明一定程度的一致性，如2011年水体面积、降水量和植被覆盖度的极低值与平均温度极高值对应。总体而言，覆盖度对水体面积变化表现为不显著的正向驱动。

4 结 语

本研究基于GEE平台，利用Landsat数据对比5种水体识别方法，发现随机森林法虽精度最高（94%以上），但误提率较高。研究发现1993—2022年新丰江水库水体面积先增后降，季节上“冬低夏高”，空间上内外异质，永久性水体集中于水库和主渠道。降水是水体面积变化的直接驱动因素，气温和植被覆盖度影响较小。研究结果对优化水库调度、土地规划有参考价值，但需结合实地数据验证精度，且本研究未分析入库径流等其他因素，有待进一步完善。

参考文献

[1] Wang Y, Li Z, Zeng C, et al. An Urban Water Extraction Method Combining Deep Learning and Google Earth Engine[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2020,13:769-782

[2] 张友才,李强,臧英平,等. 基于随机森林模型的岸线不透水面提取方法研究[J]. 地理空间信息,2022,20(1):13-18

[3] Sun F, Zhao Y, Gong P, et al. Monitoring Dynamic Changes of Global Land Cover Types:Fluctuations of Major Lakes in China Every 8 Days During 2000-2010[J]. Chinese Science Bulletin,2014,59(7):171-189

[4] Peng S, Gang C, Cao Y, et al. Assessment of Climate Change Trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38 (5):2 250-2 264

[5] Mcfeeters S K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17 (7):1 425-1 432

[6] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报,2005,9(5):589-595

[7] 闫霈,张友静,张元. 利用增强型水体指数(EWI)和GIS去噪音技术提取半干旱地区水系信息的研究[J]. 遥感信息,2007,21(6):62-67

[8] 丁凤. 基于新型水体指数(NWI)进行水体信息提取的实验研究[J]. 测绘科学,2009,34(4):155-157

[9] Ko B C, Kim H H, Nam J Y. Classification of Potential Water Bodies Using Landsat8 OLI and a Combination of Two Boosted Random Forest Classifiers[J]. Sensors, 2015, 15 (6):13 763-13 777

[10] Acharya T D, Subedi A, Lee D H. Evaluation of Machine

（下转第81页）