引文格式：陈晓希,陈晨,周会珍,等. 多源卫星遥感的洱海透明度反演和时空变化分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(10):39-44. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.10.009

# 多源卫星遥感的洱海透明度反演和时空变化分析

陈晓希[1]，陈　晨[2]，周会珍[2]，李艳芳[1*]，朱菊蕊[2]
（1. 大理州智慧洱海监管指挥中心，云南 大理 671000；2. 二十一世纪空间技术应用股份有限公司，北京 100096）

**摘　要：**水体透明度作为关键物理参数，能直观反映水体清澈与浑浊程度，对水生态环境研究意义重大。整合洱海野外实测透明度数据、气象信息及Sentinel-2、Landsat8遥感影像，构建具有自适应优选特性与稳健性能的透明度反演模型，系统剖析2013—2022年洱海透明度时空变化规律与影响因素。研究发现：①2013-2022年洱海年均透明度波动于1.67~2.87 m，其中2014年达峰值，2019年降至谷底；2022年月均透明度在1.60~3.32 m区间变化，3月最高，9月最低。②时空分布特征显著，年际透明度呈升降交替态势，南北部差异突出；季节性差异明显，春冬季节透明度较高。③2013—2022年洱海透明度与藻类含量、水温呈显著负相关。本研究成果为洱海水质监测与生态保护提供重要数据支撑与理论依据。

**关键词：**洱海；透明度；时空分布；影响因素；定量遥感
**中图分类号：**P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）10-0039-06

# Transparency Inversion and Spatio-temporal Change Analysis of Erhai Lake Based on Multi-source Satellite Remote Sensing

CHEN Xiaoxi[1], CHEN Chen[2], ZHOU Huizhen[2], LI Yanfang[1], ZHU Jurui[2]
(1. Wisdom Erhai Supervision and Command Center of Dali Prefecture, Dali 671000, China;
2. Twenty First Century Aerospace Technology Co., Ltd., Beijing 100096, China)

**Abstract:** Water transparency, as a key physical parameter, can directly reflect the clarity and turbidity of water body, which is of great significance to the research of water ecological environment. We integrated field-measured transparency data of Erhai Lake, meteorological information, Sentinel-2 and Landsat8 remote sensing images to construct a transparency inversion model with self-adaptive optimization characteristics and robust performance, and systematically analyzed the spatio-temporal change patterns and influence factors of water transparency in Erhai Lake from 2013 to 2022. The research findings showed that ①the annual average transparency of Erhai Lake fluctuated between 1.67 m and 2.87 m from 2013 to 2022, reaching a peak in 2014 and a trough in 2019. The monthly average transparency in 2022 varied between 1.60 m and 3.32 m, with the highest value in March and the lowest in September. ②The spatio-temporal distribution characteristics were significant, the interannual transparency shows an alternating pattern of increase and decrease, with prominent differences between the northern and southern regions. The seasonal variations were obvious, with higher transparency in spring and winter. ③From 2013 to 2022, water transparency in Erhai Lake is significantly negatively correlated with algae content and water temperature. The results can provide important data support and theoretical basis for water quality monitoring and ecological protection of Erhai Lake.

**Key words:** Erhai Lake, transparency, spatio-temporal distribution, influence factor, quantitative remote sensing

目前遥感技术正逐渐成为水体透明度监测的有效且重要手段之一[1-3]。在数据源方面，美国陆地卫星系列（Landsat8）和Sentinel-2卫星数据被大量用于水体透明度监测[4-8]。

由于应用于水体透明度的反演模型多采用单一建模因子或几个因子组合，未充分利用遥感数据中丰富的波段信息，致使透明度的光谱特征表达不够全面，影响反演精度；同时，不同时期，环境变化导致水体光学组分等发生改变[9]，致使透明度的光谱特征表达不同，因此针对不同时期透明度使用同一反演模型进行研究，难以保障每个时期水体透明度的高精度反演。

本文以洱海为例基于Landsat8数据和Sentinel-2数据，充分挖掘水体透明度与遥感数据波段信息之间的关系，建立全面、综合的透明度遥感反演因子体系，结合实测数据基于因子分析法筛选出重要因子，

项目来源：云南省科技厅科技计划资助项目（202303AC10014）。
第一作者简介：陈晓希（1984—），本科，高级工程师，从事洱海流域水环境及信息化技术研究与建设工作，E-mail：99160278@qq.com。
通信作者：李艳芳（1990—），硕士，从事高原湖泊水环境遥感及应用、生态环保信息化建设工作，E-mail：1253277278@qq.com。

利用多元逐步回归算法构建高精度洱海透明度反演模型，对过去10 a（2013—2022年）年际和2022年月际洱海透明度进行定量反演，并分析其时空变化规律和影响因素，旨在为洱海流域水环境综合治理和湖泊水生态保护提供科学的技术支持。

## 1 研究区概况

洱海（图1）地处云南省大理白族自治州中心地带，跨洱源、大理两县市，是云南省的第二大高原淡水湖泊，是大理市和周边乡村居民的生产生活用水供给源地，属国家重点保护的水域之一。洱海南北长41.5 km，东西宽5.9 km，周长116 km，面积251 km$^2$。平均水深10.5 m，最深处达20.5 m，汇水面积2 565 km$^2$，平均容水量为28.2亿m$^3$。洱海地处高原亚热带季风区，干湿气候明显，且夏季暴雨多、冬季降水少，多年平均气温维持在15℃左右，洱海地区的风向以西南风为主。

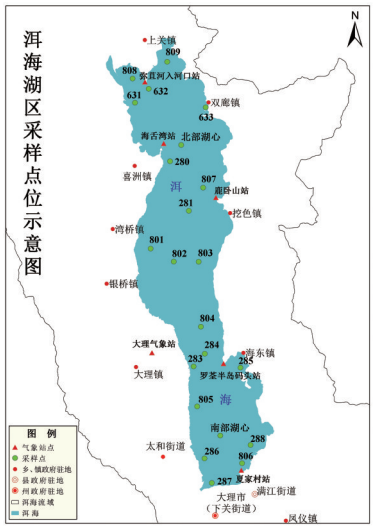



图1 洱海湖区采样点位示意图

## 2 研究数据与方法

### 2.1 透明度实测数据

本文所使用的透明度实测数据来源于大理州智慧洱海监管指挥中心，观测方式为塞氏盘法，测定时，将塞氏盘平放入水中，逐渐下沉，到刚好看不到盘面的白色时，记录深度（m），即为水的透明度。2017年之前每月观测2~3次，2017年后观测时间为每周1次。2022年4月之前共19个实测点位，之后增加至22个点位（图1）。为匹配遥感影像时相，2013—2021年选用每年12月观测数据，2022年为每月观测数据。

### 2.2 遥感数据与处理

2013—2022年使用每年12月的Landsat8 OLI数据，该数据质量较好且具备长时间序列优势，适合进行大时间跨度的研究。2022年1–12月主要使用Sentinel–2 MSI数据，哨兵2覆盖13个光谱波段，信息丰富，且重访频率较高，适用于监测快速变化的地表特征。有研究[10–11]已经证实两套数据之间有较高的一致性，为二者之间的协同使用提供支撑。对Landsat8影像进行辐射定标和大气校正处理，其中，大气校正选用MODTRAN辐射传输模型。Sentinel–2A光谱数据为L2A级别的产品数据，该数据已经完成了辐射校正和大气校正的处理，在SNAP软件中完成重采样（10 m）即可。

### 2.3 其他数据与处理

风速数据来源于中央气象台的大理气象站和大理州洱海管理局的夏家村站、罗荃半岛码头站、鹿卧山站、弥苴河入河口站和海舌湾站（图1），时间尺度为逐小时；净入湖水量来源于云南省水文水资源局大理分局和云南省水环境监测中心大理州分中心，时间尺度为逐月；降水量来源于中央气象台，时间尺度为逐天。将原始观测数据进行处理，为保证一致性，气象数据均处理为月尺度（风速取月度平均，降水量取月度总值）。水温、PH、溶解氧和藻类含量数据来源于上海交通大学云南（大理）研究院布设的实测点位（图1），获取了2022年1–12月的月度数据。

### 2.4 透明度遥感反演模型

#### 2.4.1 反演集成因子体系构建

水体透明度反演的核心在于构建能够有效表征水体光学特性的因子体系。本研究基于水体光谱特性（蓝绿波段反射率较高、红/近红波段吸收率较高），结合多源遥感数据（如LandsatOLI、Sentinel–2 MSI），构建包含三类核心要素的洱海透明度反演集成因子体系[12]（表1）：单波段反射率、波段比值和波段组合[13–17]。单波段反射率是选取蓝绿波段和红/近红波段的反射率值，直接反映水体对不同波长光的吸收与散射特性；波段比值是通过计算蓝绿波段与红/近红波段的反射率比值，校正光照强度、大气散射等环境干扰，增强水体与背景地物的光谱差异；波段组合是采用线性组合或非线性组合，突出水体光谱特征，提升精度[18–20]。

#### 2.4.2 重要因子筛选方法

基于每期透明度观测值（2022年4月之前19个/之后22个）（单位：m）和对应点位的遥感反射率数

表1　透明度反演因子表

| 方法 | 基于Sentinel-2A的反演因子 | 基于Landsat8的反演因子 |
|---|---|---|
| 单波段 | B2、B3、B4、B5、B6、B7、B8、B8a | B2、B3、B4、B5 |
| 波段比值 | B5/B4、B6/B4、B6/B5、B7/B4、B7/B5、B7/B6、B8/B4、B8/B5、B8/B6、B8/B7、B8a/B4、B8a/B5、B8a/B6、B8a/B7、B8a/B8 | B3/B2、B4/B2、B5/B2、B4/B3、B5/B3、B5/B4 |
| 波段组合 | B4+B5、B4+B6、B4+B7、B4+B8、B4+B8a、B5+B6、B5+B7、B5+B8 、B5+B8a、B6+B7、B6+B8、B6+B8a、B7+B8、B7+B8a、B8+B8a | B2+B3、B3+B4、B4-B2、B4-B3、B4×B3、B4/(B1+B2)、B4/(B2+B3)、B4/(B2+B4)、B4/(B2+B5)、(B3+B4)/B2 (B2+B3+B4)/B1、(B1+B2+B4)/B3、(B4+B5)/(B2+B3)、(B1+B3)/(B2+B3)、(B2+B4)/(B3+B1)、(B2+B3)/(B1+B4)、(B1+B4)/(B3+B2)、(B3-B4)/(B3+B4)、(B5-B4)/(B5+B4) |

据，首先将所有反演因子进行Z-score标准化处理，消除量纲影响，公式为：

$$Z_i=\frac{X_i-\mu}{\sigma}(i=1,2,\ldots,n) \tag{1}$$

式中，$X_i$为反演因子原始数据；$\mu$为均值；$\sigma$为标准差；$n$为样本量。

然后采用主成分分析（PCA）提取特征值大于1的主成分，确保累计方差贡献率≥70%，以保留原始数据的主要信息。最后根据因子载荷矩阵，选取载荷系数绝对值大于0.5的因子作为重要反演因子。载荷系数绝对值越接近1，表明该因子与主成分的相关性越强，对透明度反演的解释力越高。

2.4.3　多元逐步回归模型构建与验证

以实测透明度数据作为因变量（$Y$），对应的筛选出来的重要反演因子作为自变量（$X_1$，…，$X_k$），构建多元逐步回归模型，并将每期实测样本点（2022年4月之前19个/之后22个）以3∶1的比例划分随机划分为训练集和验证集，训练集用于模型参数估计，验证集用于精度验证。多元逐步回归采用向前逐步法，初始模型仅包含截距项，每次引入$F$检验显著（$\alpha$=0.05）且$F$值最大的自变量，每引入一个新变量后，对已纳入模型的变量重新进行$F$检验，剔除$F$值不显著（$\alpha$=0.10）的变量，消除共线性影响。当无新变量满足引入条件或所有变量均通过显著性检验时，终止迭代，得到最优回归方程：

$$\hat{Y}=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\ldots+\beta_kX_k \tag{2}$$

式中，$\beta_0$为截距项；$\beta_1$、…、$\beta_k$为回归系数。

洱海水体透明度反演的精度评价采用决定系数（R-Square，$R^2$）、平均绝对误差（Mean Absolute Error，MAE）和均方根误差（Root Mean Squard Error，RMSE），计算公式分别如下：

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{m}\left(Y_i-\hat{Y}_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{m}\left(Y_i-\bar{Y}\right)^2} \tag{3}$$

$$\mathrm{MAE}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\left|\left(Y_i-\hat{Y}_i\right)\right|}{m} \tag{4}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}\left(Y_i-\hat{Y}_i\right)^2}{m}} \tag{5}$$

式中，$m$为验证集样本数；$Y_i$为透明度实测值；$\hat{Y}_i$为透明度的模型预测值；$\bar{Y}$为透明度实测均值。

## 3　结果与讨论

### 3.1　透明度实测值统计分析

为了直观分析年度和月度透明度的变化趋势，本文基于洱海水体透度实测值分别绘制了2013—2022年年度透明度变化趋势图（图2）和2022年月度透明度变化趋势图（图3）。2013—2022年洱海水体透明度变化范围为1.67~2.87 m，平均值为2.14 m，2014年的平均透明度最高，2019年达到最低值；2014—2019年呈现下降的趋势，2019—2022年逐步上升。2022年年内水体透明度变化范围为1.60~3.32 m，平均值为2.18 m，3月的平均透明度最高，9月的平均透明度最低；1—3月透明度持续升高，4—9月透明度逐步降低，10—12月透明度变化平稳，2022年年内透明度总体呈现出下降的趋势。

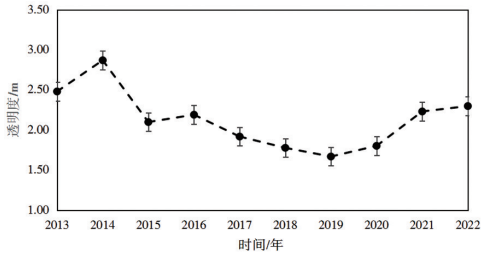



图2 2013—2022年洱海实测水体透明度时间变化图

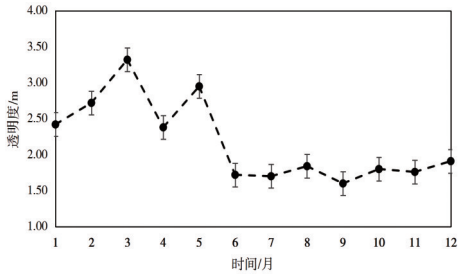
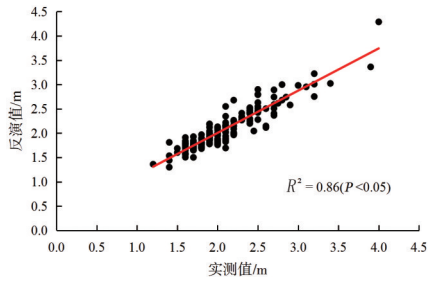


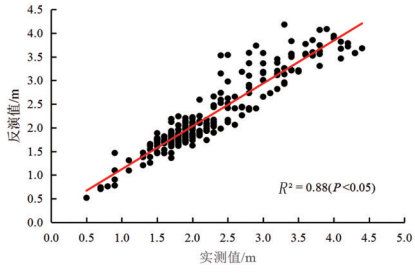

图3 2022年洱海实测水体透明度时间变化图

### 3.2 透明度反演

基于多源遥感数据和透明度实测数据，完成2013—2022年年度与2022年月度洱海湖区水体透明度的定量反演，透明度预测值和实测值结果对照如图4所示，年度透明度反演 $R^2$ 为0.86（$P$ <0.05），MAE=0.14，RMSE=0.04；月度透明度反演 $R^2$ 为0.88（$P$ <0.05），MAE=0.2，RMSE=0.28，表明洱海水体透明度遥感反演结果准确度较高，能够较好地反映洱海透明度时空变化规律。




a 2013—2022年年度反演结果图




b 2022年月度反演结果图

图4 洱海水体透明度反演结果图

### 3.3 透明度时空变化特征

2013—2022年洱海年际水体透明度反演空间分布如图5所示，2022年年内洱海透明度反演结果空间分布如图6所示。反演结果图颜色越靠近蓝色，水体透明度越高，水质越好；反之，越靠近红色，则说明水体透明度越低，水质越差。从时间上看，过去10 a内，洱海全域透明度呈现先下降后升高的趋势。从空间上看，洱海透明度呈现出鲜明且复杂的分布格局。在纵向空间上，洱海呈现出北低南高的显著特征。在诸多年份和月份的专题图中，北部区域常大面积呈现0.0~1.0 m的低透明度区间。从横向空间看，沿岸带与湖心区的透明度差异也较为突出。沿岸带受人类活动和陆源输入影响显著，透明度普遍低于湖心区。

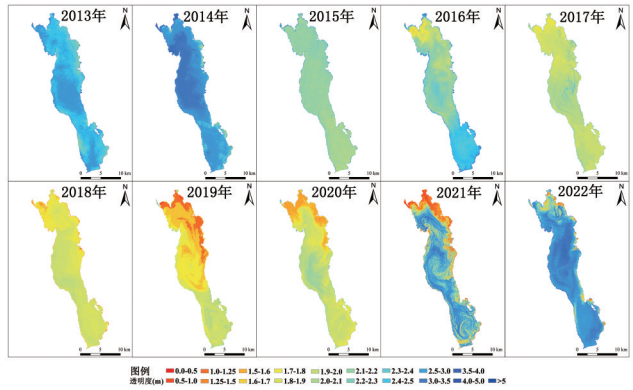



图5 2013—2022年洱海水体透明度年际反演结果

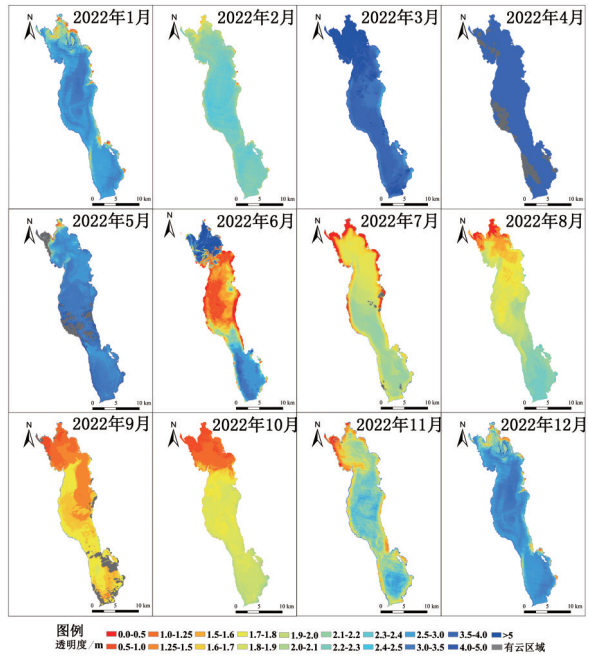



图6 2022年洱海水体透明度月际反演结果

### 3.4 透明度影响因素分析

有研究表明，导致水体透明度变化的因素主要有水温、降水量、入湖水量、风速、水温、PH、风速、溶解氧和藻类含量等[21-27]，此外人为因素对水体透明度的影响也不容忽视。本文综合分析各影响因子和人类活动与洱海水体透明度的关系，探究影响洱海水体透明度的原因。

受实测数据限制，本文仅利用Pearson相关分析

法分析2022年1–12月水体透明度与各种影响因子的相关关系，透明度与各种影响因子的相关性如图7所示，在各种影响因子中水温、藻类含量与水体透明度呈显著相关，因此重点分析两者对水体透明度的影响原因。

透明度与藻类含量在 $P<0.01$ 的水平下，呈极显著负相关，相关系数为–0.73。水体透明度随藻类含量的升高而下降。相关研究表明，洱海水温与蓝藻、绿藻等浮游植物数量呈正相关关系，水温升高，浮游植物增多，进而影响水体透光系数，导致水体透明度降低。藻类含量与水体透明度的时间变化关系，与图7所呈现的关系相符。透明度与水温在 $P<0.05$ 的水平下，呈显著负相关，相关系数为–0.58。水温降低，水体透明度增高，水温升高，水体透明度降低。原因可能是：①水生生物影响：夏季水温升高，利于蓝藻等水生生物生长，因此透明度随水温升高而降低；其他季节由于水温较低，水生生物数量减少而透明度增加；②悬浮颗粒物溶解度：水温升高，使得水中悬浮颗粒物溶解度升高，不利于悬浮颗粒物的沉积，因此透明度降低；反之，透明度升高。

从时间序列角度（图8）观察洱海海水体透明度与主要影响因素的关系，水温在年内呈现先上升后下降的趋势，与透明度的变化在部分时段呈现反向对应关系，进一步佐证了二者的负相关关系。藻类含量在年内也有起伏，且与透明度变化趋势存在一定关联，尤其在藻类含量较高的时段，透明度往往较低，表明藻类的生长繁殖对水体透明度有明显影响。例如在藻类生长旺季，大量藻类悬浮于水体中，降低了水体透光性，使得透明度下降 。

除自然因素外，人类活动也会影响水体透明度。上世纪80年代以来，洱海流域由于旅游业、工业、农业等无序开发，不断出现“流域污染日益严重”、“污染负荷不断增加”、“蓝藻大面积爆发和聚集”等问题，使得水质严重恶化。自2015年以来，当地相关部门推进“山水林田湖草”综合治理，关停流域山区非法矿山和水泥厂，并且出台洱海保护“七大行动”，对流域内的违章建筑进行整治，关停整顿核心区内的餐饮客栈，加快环湖截污工程建设，将洱海保护治理范围从252 km$^2$扩展至2 565 km$^2$。此外，流域周边区县还完成了生态农业产业结构调整、恢复森林覆盖度等工作，使流域生态环境得到大幅度改善，流域森林覆盖度提高率3个百分点。2018年，环湖截污工程全部闭环，并对入湖河流实施生态化治理，同年洱海水质恢复到“优”级水平，达到1类水质。到目前为止，洱海生态保护成效显著，生物多样性得到有效恢复，水质水量有明显提升，这与本文水体透明度的升高趋势相吻合，说明人类活动干预对洱海水体透明度存在一定影响。

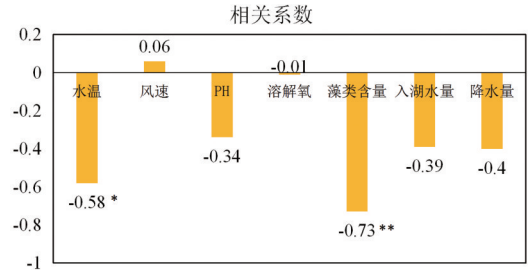



图7　洱海水体透明度与影响因子相关关系

注：*: $P<0.05$；**: $P<0.01$)。

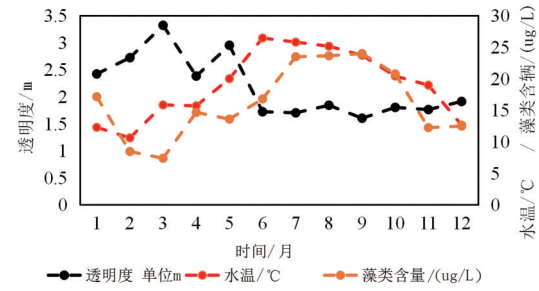



图8　洱海水体透明度与主要影响因素关系图

## 4　结　语

本研究通过搭建全面综合的透明度遥感反演因子体系，突破传统单因子或几个因子组合的局限，并创新融合主成分分析和多元逐步回归算法，构建具有自适应优选特性与稳健性能的透明度反演模型，实现对洱海全域透明度的大面积、长时间、高频次动态监测，快速反映洱海透明度的异常变化，为洱海水质保护管理部门提供及时、准确的监测信息。同时，通过对洱海透明度时空变化特征和影响因子的深入分析发现，时空分布特征显著，过去10 a内洱海水体透明度呈现先下降后上升的趋势，南北部差异突出，季节性差异明显，春冬季节透明度较高；2013—2022年洱海透明度与藻类含量、水温呈显著负相关，并且人类活动干预对透明度也存在一定影响。通过本项研究，管理部门能够清晰了解洱海透明度的变化规律及不同因素对洱海水质的影响程度和作用机制，从而制定更具针对性的保护策略，致力于洱海生态环境保护。此外，本研究成果受实测数据限制，对长期影响因素的综合分析仍有待进一步深入，未来可结合更多监测数据和先进技术，开展更全面的研究，持续助力洱海生态保护与可持续发展。

## 参考文献


[1] Cui Y, Yan Z, Wang J, et al. Deep learning-based Remote Sensing Estimation of Water Transparency in Shallow Lakes by Combining Landsat8 and Sentinel-2 Images[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(3):4 401-4 413

[2] Bai S, Gao J, Sun D, et al. Monitoring Water Transparency in Shallow and Eutrophic Lake Waters Based on Goci Observations[J]. Remote Sensing, 2020, 12(1):163

[3] 刁瑞翔,青松,越亚螺,等. 北方半干旱区典型湖泊:岱海透明度遥感反演(2013—2020年)[J]. 湖泊科学,2021,33(4):1 072-1 086

[4] Maciel D A, Pahlevan N, Barbosa C C F, et al. Towards global long-term Water Transparency Products from the Landsat Archive[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 299:113 889

[5] Song K, Liu G, Wang Q, et al. Quantification of Lake Clarity in China Using Landsat OLI Imagery Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 243:111 800

[6] Qing S, Cui T, Lai Q, et al. Improving Remote Sensing Retrieval of Water Clarity in Complex Coastal and Inland Waters with Modified Absorption Estimation and Optical Water Classification Using Sentinel-2 MSI[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 102:102 377

[7] Zeng W, Xu K, Cheng S, et al. Regional Remote Sensing of Lake Water Transparency Based on Google Earth Engine: Performance of Empirical Algorithm and Machine Learning[J]. Applied Sciences, 2023, 13(6):4 007

[8] Zhang Y, Zhang Y, Shi K, et al. Remote Sensing Estimation of Water Clarity for Various Lakes in China[J]. Water Research, 2021, 192:116 844

[9] 姚慧平,樊彦国,禹定峰,等. 2003—2020年黄海水体透明度时空变化特征及影响因素研究[J]. 海洋环境科学,2023,42(2):262-270

[10] 徐光志,徐涵秋. Sentinel-2A MSI和Landsat 8 OLI两种传感器多光谱信息的交互对比. 遥感技术与应用[J],2021,36(1):165-175

[11] 钟函笑,边金虎,李爱农. Landsat8 OLI与Sentinel-2 MSI山区遥感影像辐射一致性研究[J]. 遥感技术与应用,2018,33(3):428-438

[12] 周会珍. 一种基于集成因子体系的叶绿素a浓度反演方法、系统:ZL20221686559. 5[P]. 2023-05-05

[13] Tao H, Song K, Liu G, et al. Analysis of Spatio-temporal Dynamics of Chinese Inland Water Clarity at Multiple Spatial Scales Between 1984 and 2018 [J]. Remote Sensing, 2022, 14(20):5 091

[14] Yin Z, Li J, Liu Y, et al. Water Clarity Changes in Lake Taihu over 36 Years Based on Landsat TM and OLI Observations [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 102:102 457

[15] 杨雷,禹定峰,高皞,等. Sentinel-2的胶州湾水体透明度遥感反演[J]. 红外与激光工程,2021,50(12):515-521

[16] Zhao Y, Wang S, Zhang F, et al. Retrieval and Spatio-temporal Variations Analysis of Yangtze River Water Clarity from 2017 to 2020 Based on Sentinel-2 Images [J]. Remote Sensing, 2021, 13(12):2 260

[17] Zhou Y, Yu D, Cheng W, et al. Monitoring Multi-temporal and Spatial Variations of Water Transparency in the Jiaozhou Bay Using GOCI Data[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 180:113 815

[18] 杨林燕. 高原湖泊流域管理体制探析:以云南大理洱海流域为例[J]. 环境与发展,2023,35(2):6-13

[19] 杨进腊,温雯雯,胡潇芮,等. 云南九大高原湖泊2013—2022年水质变化趋势及其成因分析[J]. 环境科学研究,2025,38(6):1 300-1 311

[20] 张洪森,角媛梅,陈凡,等. 云南九大高原湖泊流域人类活动强度对水质的多尺度影响[J]. 湖泊科学,2024(2):36

[21] 赵轩,许申来,薛祥山,等. 高原再生水湖泊的水体透明度及其影响因素[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(6):1 084-1 088

[22] 石宏博,黄玥,李杰,等. 洱海水质评价及污染物来源分析[J]. 水电能源科学,2021,39(10):72-75

[23] 陈俊伊,王书航,郑朔方,等. 南湖水系水体透明度时空分布、影响因素及控制对策[J]. 环境工程技术学报,2020,10(6):897-904

[24] Zhou Q, Zhang Y, Li K, et al. Seasonal and Spatial Distributions of Euphotic Zone and Longterm Variations in Water Transparency in a Clear Oligotrophic Lake Fuxian, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 72(10):185-197

[25] 张运林,张毅博,周永强,等. 生态文明建设以来长江中下游湖泊水生态环境变化[J]. 人民长江,2023,54(1):14-23

[26] Yin Z, Li J, Huang J, et al. Steady Increase in Water Clarity in Jiaozhou Bay in the Yellow Sea from 2000 to 2018:Observations from MODIS [J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2021, 39(3):800-813

[27] Du Y, Luo C, Chen F, et al. Water Depth and Transparency Drive the Quantity and Quality of Organic Matter in Sediments of Alpine Lakes on the Tibetan Plateau[J]. Limnology and Oceanography, 2022, 67(9):1 959-1 975