文章编号:1673-9469(2018)04-0066-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.014

# 阳宗海叶绿素 a 浓度遥感反演及富营养化评价

毛 星,徐希涛,梁 艳,谢 凯

(南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,江苏南京211000)

摘要:以阳宗海为研究对象,利用 landsat-8 OLI 遥感影像与叶绿素 a 浓度实测数据,基于波段敏感性分析,构建叶绿素 a 浓度估测回归模型。研究表明,以波段组合(B5-B4)/(B5+B4)为参数的 多项式回归模型结果最优,拟合度达 0.720 1。反演得到阳宗海 2018 年 3 月 1 日叶绿素 a 浓度和 富营养化指数的空间分布图,结果显示阳宗海水体整体为中营养状态。

## Remote sensing inversion of chlorophyll a concentration and evaluation of eutrophication in Yangzonghai Lake

MAO Xing, XU Xitao, LIANG Yan, XIE Kai (NARI GROUP CORPORATION/STATE GRID ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Jiangsu Nanjing 211000, China)

Abstract: Taking Yangzonghai Lake as the research object, using landsat-8 OLI remote sensing image and chlorophyll a concentration measured data, based on band sensitivity analysis, a chlorophyll a concentration estimation regression model was constructed. The results show that the polynomial regression model with the band combination (B5-B4))/((B5+B4) as the parameter has the best result with a fit of 0.7201. The inversion obtained the spatial distribution map of chlorophyll a concentration and eutrophication index of Yangzonghai Lake on March 1, 2018. The results showed that the Yangzonghai Lake was in a medium nutrient state.

Key words: Yangzonghai Lake; remote sensing inversion; chlorophyll a; eutrophication

湖泊是我国可利用内陆淡水资源重要的存储形 式<sup>[1]</sup>。近年来,湖泊富营养化问题日益突出,我国 131个主要湖泊中,已经有超过半数的湖泊达富营 养程度<sup>[2]</sup>。基于遥感技术的富营养化监测是利用遥 感影像对叶绿素 a、悬浮物等水质参数进行动态分 析<sup>[3]</sup>,其方便快捷、监测范围广,能够反应空间扩 散信息,已成为国内外学者研究热点。目前,对于 水体富营养化判别的方法主要有:模型估算法<sup>[4-5]</sup>, 该方法受到水域和时段的限制,不具有统一的适用 性;经验估算法<sup>[6-8]</sup>,该方法受实测数据量和数据时 段影响较大。为此,本研究通过不同时相 landsat-8 卫星 OLI 遥感影像与实测值相关性分析,建立波段 组合的回归模型,探究适用于阳宗海时空范围内的 叶绿素 a 浓度反演方法。

## 1 研究区概况及数据准备

#### 1.1 研究区概况

阳宗海位于昆明市东南部,是云南省九大高原 湖泊之一,为天然淡水湖泊,流域面积 192 km<sup>2</sup>,湖 泊面积 31.9 km<sup>2</sup>,水位标高 1 770.46 m,平均水深 20 m,最大水深 30 m,总蓄水量 6.04×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。阳 宗海的湖水,除雨季汇积外,入湖水系主要有七星 河、阳宗大河以及人工开凿的摆衣河,仅有汤池河

基金项目:国家重点研发计划项目专题 (2016YFC0401702)

作者简介:毛星(1991-),男,江苏丹阳人,硕士,从事GIS与遥感应用方面的研究。

收稿日期: 2018-07-01

这一个出水口,多年均入湖量为0.52×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,平 均出水量0.36×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。阳宗海污染以生活污染为主, 云南省2015年度环境状况公报显示,2015年水质 类别为IV类,其中总磷含量超标0.36倍,湖体平均 营养状态指数为41.2,处于中营养状态。湖体设置 了三个长期监测点,分别是阳宗海北、阳宗海中、 阳宗海南,每月进行水质参数检测。

#### 1.2 数据准备

Landsat-8 是美国航空航天局与 2013 年 2 月 11 日发射的陆地卫星,Landsat-8 携带了两个传感器, 分别是 OLI 陆地成像仪和 TIRS 热红外传感器,卫 星共有 11 个波段,波段 1 ~ 7、9 ~ 11 的空间分辨 率为 30 m,波段 8 为 15 m 分辨率的全色波段,卫 星覆盖全球一次只需 16 d。OLI 陆地成像仪有 9 个 波段,成像宽幅为 185 km×185 km。与上一代 ETM 传感器相比,OLI 的波段 5 范围 调整至 0.845 ~ 0.885 µm,排除了水汽吸收的影响;波段 8 可更好 区分有无植被;新增了蓝色波段和短波红外波段, 可用于海岸带观测和云检测。

考虑到叶绿素的光谱特征信息主要存在与蓝绿 及近红外波段,故本研究选取 2015 年 11 月 20 日、 2016 年 8 月 18 日、2017 年 5 月 1 日和 2018 年 2 月 13 日四期不同季节的 OLI 遥感影像进行叶绿素反演 模型构建,选取 2018 年 3 月 1 日的反演数据进行模 型验证。实测数据选取阳宗海北、阳宗海中、阳宗 海南三个断面点的当月监测数据。

### 2 基于 OLI 数据的回归模型建立与分析

#### 2.1 叶绿素 a 敏感波段分析

叶绿素 a 浓度与 OLI 遥感影像较多波段存在线 性关系,因此本研究尝试通过波段敏感性分析的方 法来选取反演模型输入参数,敏感波段的判断方法 是将水体实测叶绿素 a 浓度值与遥感影像的不同波 段组合之间建立 Person 相关系数,并将其作为判断 叶绿素 a 浓度与 OLI 各波段相关程度的判断依据, Person 相关系数的计算公式为:

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

其中, x<sub>i</sub>、y<sub>i</sub>为两组变量的样本值, x̄、ȳ为两组变量的算术平均值, R 为两组变量的 Person 相关系数,

|R| 越接近于 1, 表明两变量相关程度越高。

考虑到水体中叶绿素 a 浓度的变化,在 430 ~ 700 nm 光谱范围内吸收性和反射性差异明显<sup>[9]</sup>,本 研究选择以下几个波段组合与叶绿素 a 浓度进行相 关性分析,分析结果见表 1。

由表 1 可知,经过波段组合的 OLI 遥感数据中 (B5-B4)/(B5+B4) 与阳宗海水体中叶绿素 a 实测浓度 相关性较高,相关系数的绝对值为 0.713 45。

表 1 波段组合与叶绿素 a 浓度相关系数表 Tab.1 Table of band combination and chlorophyll a concentration correlation coefficient

| 波段组合            | R        | 波段组合  | R        |
|-----------------|----------|-------|----------|
| (B5-B4)/(B5+B4) | 0.713 45 | B5/B4 | 0.532 26 |
| (B5-B3)/(B5+B3) | 0.136 33 | B5/B3 | 0.342 85 |
| (B5-B2)/(B5+B2) | 0.596 34 | B5/B2 | 0.549 76 |
| (B4-B3)/(B4+B3) | 0.504 52 | B4/B3 | 0.360 94 |
| (B4-B2)/(B4+B2) | 0.164 52 | B4/B2 | 0.253 24 |
| (B3-B2)/(B3+B2) | 0.139 65 | B3/B2 | 0.043 58 |

#### 2.2 叶绿素 a 回归模型构建

回归分析是确定多种变量间定量关系的一种统 计学方法,是一种预测性的建模技术。本研究对阳 宗海叶绿素 a 浓度分别采用线性、多项式、指数、 对数、幂函数多种方式进行回归分析。(B5-B4)/ (B5+B4)这个波段组合与实测值相关性较高,故将 其作为自变量构建叶绿素 a 浓度回归方程。回归结 果如下:

线性回归: Inp=76.809x+7.117 2, r<sup>2</sup>=0.615 3 (2) 多项式回归: Inp=108.378x<sup>2</sup>+12.205x-0.346 1, r<sup>2</sup>=0.720 1 (3)

指数回归: Inp=12.297e<sup>26.39x</sup>, r<sup>2</sup>=0.551 4 (4)

对数回归: Inp=-4.354lnx-9.7653, r<sup>2</sup>=0.4943(5)

幂函数回归: Inp=0.037x<sup>1.51</sup>, r<sup>2</sup>=0.6353 (6)

其中, $\rho$ 为估测的叶绿素 a 浓度, $r^2$  为拟合度, x=(B5-B4)/(B5+B4)。

根据上述回归结果可知,以多项式回归模型进 行拟合分析时,回归结果拟合度最高。

#### 2.3 湖泊富营养化评价

湖泊富营养化评价就是通过与湖泊营养状态相 关的指标,对湖泊的营养状态进行准确的判断。湖 泊富营养化受到自然环境和人类活动等综合因素的 影响。目前常用的方法有单项指标法、营养状态指 数法、营养状态质量指数法、模糊综合评价法、主成份分析发和评分法。叶绿素 a 在富营养化评价中 是一项重要的生物学指标,其含量高低可标志水体 富营养化程度。金相灿等<sup>[10]</sup>在全国 26 个湖泊调查 基础上建立了适用于我国湖泊富营养化评价指标体

系,本研究采用该体系中以叶绿素 a 为参数的计算 方法。 TLI(Chla)=25+10.86ln(Chla) (7)

其中, TLI(Chla) 为以叶绿素 a 为参数计算的营养状态指数, Chla 为叶绿素 a 浓度 (μg/L)。

依据 TLI 富营养化评价标准, TLI<30 的为贫营 养, 30 ≤ TLI ≤ 50 的为中营养, 50<TLI ≤ 60 的为轻 度富营养, 50<TLI ≤ 70 的为中度富营养, TLI>70 的为重度富营养。

## 3 研究结果

根据上述本研究的回归模型,对2018年3月1 日这期OLI 遥感影像数据进行叶绿素 a 浓度反演, 得到阳宗海水体叶绿素 a 浓度的空间分布图,再以 叶绿素 a 为参数计算富营养化指数,得到阳宗海水 体富营养化空间分布图,如图1所示。

阳宗海叶绿素 a 浓度总体呈现出湖体沿岸高于 中央、南部高于北部的空间特征,湖体沿岸受到水 草的影响,浓度多在 30 以上,除沿岸外,叶绿素 a 浓度最高值集中在湖体东南角落,浓度高于 30; 南半湖东边区域浓度达 28~30,高于西边区域的 26~28;北半湖呈现中间低、两边高的趋势,湖体 中间浓度为 24~26, 湖体北岸浓度低于 24, 为浓度 最低区域。

从富营养化指数的空间分布图看,除了湖体四 周水草区域外,阳宗海整体为中营养状态,富营养 化指数最高的区域为湖体东南区域,高于47.22,湖 体南部富营养化指数高于湖体北部区域,南部仅中 间区域富营养化指数为30~45.92,其他大部分地区 在45.92~47.22之间,湖体北部除东西沿岸外,大部 分区域富营养化指数低于45.92,低值点位于摆衣河 入湖口所在的湖体北岸。

## 4 结论

1) 通过对阳宗海水体光谱特性分析,采用波 段组合的方式进行波段敏感分析,得出与阳宗海湖 体叶绿素 a 浓度敏感度最高的波段组合为 (B5-B4)/ (B5+B4)。

2)运用统计回归模型,建立多种回归方程,多 项式回归模型结果最优,拟合度 r<sup>2</sup>=0.7201,与国内 外相关研究的精度差别不大,表明该方法适用于阳 宗海叶绿素 a 浓度反演。

3)采用本研究提出的方法对阳宗海进行富营养 化监测评价,2018年3月,阳宗海水体整体呈现中 营养状态,湖体南部富营养化指数高于北部。

#### 参考文献:

[1] 周德明.基于 TM 的太湖富营养化成因的空间分析 [D].
南京:南京邮电大学, 2015.



图 1 阳宗海水体叶绿素 a 浓度及富营养化分布图

Fig.1 Seawater chlorophyll a concentration and eutrophication distribution in Yangzong Lake

- [2] 赵永宏,邓祥征,战金艳,等.我国湖泊富营养化防治 与控制策略研究进展[J].环境科学与技术,2010(3): 92-98.
- [3]DUAN H T, MA R H, ZHANG Y Z, et al. A new threeband algorithm for estimating chlorophyll concentrations in turbid inland lakes[J].Environmental Research Letters, 2010, 5(4): 44009.
- [4] 史 锐,张 红,岳 荣,等.基于小波理论的干旱区内 陆湖泊叶绿素 a 的 TM 影像遥感反演 [J]. 生态学报, 2017(3): 1043-1053.
- [5]BRESCIANI M, GIARDINO C, STROPPIANA D, et al. Retrospective analysis of spatial and temporal variability of chlorophyll-a in the Curonian Lagoon[J]. Journal of Coastal Conservation, 2012, 16(4): 511-519.
- [6]WATANABE F S, ALCANTARA E, RODRIGUES T W,

et al. Estimation of Chlorophyll-a Concentration and the Trophic State of the Barra Bonita Hydroelectric Reservoir Using OLI/Landsat-8 Images[J]. Int J Environ Res Public Health, 2015, 12(9): 10391-10417.

- [7] 郑 震. 基于 OLI 遥感影像的叶绿素 a 质量浓度反演研究 [J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3): 89-93.
- [8] 李云亮, 张运林. 基于 TM 影像的太湖夏季悬浮物和 叶绿素 a 浓度反演 [J]. 遥感信息, 2008(6): 22-27.
- [9]SUN D, LI Y, WANG Q. A Unified Model for Remotely Estimating Chlorophyll a in Lake Taihu, China, Based on SVM and In Situ Hyperspectral Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2957-2965.
- [10] 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛,中国湖泊富营养化 [M].北 京:中国环境科学出版社,1990.

(责任编辑 王利君)

- (上接第54页)
- 变形分析 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14(5): 70-75.
- [3] 张迎春,刘吉福,魏金霞.砂井地基主、次固结度粘 弹性分析 [J].水运工程,2003,355(8):20-24.
- [4] 廖红建,苏立君,白子博明,等,次固结沉降对压缩时 间曲线的影响研究 [J]. 岩石力学,2002,23(5):636-540.
- [5] 殷宗泽,张海波,朱俊高,等.软土的次固结[J].岩土 工程学报,2003,25(5):521-526.
- [6]CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(11): 907–916.
- [7]BJERRUM L. Embankments on soft ground[C]// Proceedings of the Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-supported Structures. Purdue University: ASCE, 1972: 1-54.
- [8] 李国维,胡坚,陆晓岑,等.超固结软黏土一维蠕变 次固结系数与侧压力系数[J].岩土工程学报,2012, 34(2): 2198-2205.
- [9] 余湘娟, 殷宗泽, 董卫军. 荷载对软土次固结影响的 试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 913-916.
- [10] 周秋娟, 陈晓平.软土次固结特性试验研究[J]. 岩土 力学, 2006, 27(3): 404-408.

(责任编辑 王利君)

(上接第59页)

深基坑开挖过程数值分析 [J]. 河北工程大学学报: 自 然科学版, 2008, 25(3): 15-18.

- [11] 李晶晶,程祖锋,耿立立,等.基于 FLAC3D 的复合 土钉支护数值模拟分析 [J].河北工程大学学报:自然 科学版,2011,28(3):5-8.
- [12] 张玉伟,谢永利,翁木生.非对称基坑开挖对下卧地铁 隧道影响的离心试验[J]. 岩石力学,2018,39(7):1-8.
- [13] 金小荣, 俞建霖, 祝哨晨, 等. 基坑降水引起周围

土体沉降性状分析 [J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1575-1581.

- [14] 杨清源,赵伯明,孙风伯,等.潜水层基坑降水引起 地表沉降试验与理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 1–14.
- [15] 刘历波,王晓磊,史三元.基坑开挖过程中地下水渗 流数值模拟[J].河北工程大学学报:自然科学版, 2013,30(3):13-16.

(责任编辑 王利君)