文章编号:1672-3317(2017)03-0089-06

基于 OLI 遥感影像的叶绿素 a 质量浓度反演研究

郑 震

(福州市环境科学研究院 水环境研究所, 福州 350000)

摘 要:为探究研究区叶绿素a质量浓度分布,更好的应对水体富营养化对东张水库水源安全的威胁。采用数学 回归模型,利用OLI遥感影像,根据长期定点监测的叶绿素质量浓度数据与遥感影像光谱信息特征值的内在联系, 构建叶绿素a质量浓度反演数学模型,应用GIS得出东张水库连续空间、离散时间上叶绿素a质量浓度的分布。结 果表明,东张水库叶绿素质量浓度7月份明显高于11月份与3月份;东张水库沿库岸及进口位置叶绿素a质量浓度 明显高于库心位置质量浓度;环东张水库截污工程前后相同月份叶绿素质量浓度有着明显的改善。遥感数据在空 间、时间维度分布有差异的情况下,反演结果误差较小,精度满足管理决策需要,有着较好的适用性。 关键词:OLI影像; 叶绿素a; 反演; 富营养化

中图分类号: TP79 文献标志码: A doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.03.016 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):89-93,107.

0 引 言

湖泊、水库作为重要的饮用水源,正面临着点源、面源污染的威胁,如湖库的富营养化所引发的水等水 环境灾害^[1]。水体富营养化的一个重要特征就是藻类的大量繁殖^[2]。常规的水质监测是通过采集水样、过 滤、萃取以及分光光度计分析,以确定叶绿素a质量浓度。大区域的水环境监测靠传统人工选点取样或者建 立自动站,不仅耗费大量的人力、物力,而且很难得到空间、时间连续分布的监测结果^[3]。基于地理信息系统 的遥感技术作为一种新型区域性水环境调查和监测方法,在空间与时间连续性上有很强的优势,常用方法 就是通过研究遥感影像光谱特征与叶绿素a质量浓度之间的关系,构建数学模型反演叶绿素a质量浓度^[4]。

陈楚群等¹⁶选取了TM1~TM4波段的若干种波段组合作为因变量,分析各波段组合与叶绿素质量浓度之间的关联度,将关联度最大5种波段组合分别建模,得到了5个估算表层海水叶绿素a质量浓度的反演模型。Andreo等¹⁶采用MODIS叶绿素产品数据,应用GIS讨论分析阿根廷巴塔哥尼亚地区海湾叶绿素a质量浓度,得到了浮游植物分布的最大及最小的变化范围,用来监测水环境的变化情况。Watanabe等¹⁷利用Landsat8 OLI影像采取对波段值组合形成单因子,建立回归方程,反演叶绿素a质量浓度。Dalu等¹⁸采用TM1~TM3波段数据,引用已验证的3波段经验公式计算叶绿素a与悬浮物质量浓度,讨论城市水库中叶绿素a质量浓度及悬浮物质量浓度的分布与水库蓄水水位变化的相关性。

以往研究重点大多放在探究单次、单区域遥感影像的叶绿素a质量浓度与遥感光谱值之间的内在联系, 而没有充分探究其在时间维度及空间维度上的差异性与适应性,研究结论仅适应于此时间点及此区域,应 用到不同时刻及空间变化的情况下,代表性与可靠性均不够充分。为此,采取不同月份的遥感影像,结合相 邻山仔水库的监测站点实测数据,探究适应于东张水库时间、空间范围内的叶绿素a质量浓度反演模型。

1 材料方法

1.1 研究区概况

东张水库位于福建省福清市龙江中下游石竹山下,库区面积15 km²,控制流域面积200 km²,总库容2.06 亿 m³,有效库容1.55 亿 m³,外流域有太城溪引水和一都溪引水,流域面积分别为39.6 和76 km²¹⁹。环东张水

收稿日期: 2016-07-10

作者简介:郑震(1989-),男。硕士研究生,主要从事GIS、RS在水环境中的研究。E-mail: zzme110@126.com

库周边分布着大量村落及少量农业种植,水库出口处为旅游开发区。东张水库受到水库周边生活和农业污染源以及一些开发旅游活动的影响^[10]。监测结果显示,主要超标指标为总磷和总氮,其余指标均达到了II类

以上标准。东张水库总体处于中营养化水平。 从浮游植物的群落结构角度看,夏季东张水库绿 藻门种类最多,有20种,其中蓝藻数量极多,约占 浮游植物总数量的96.13%,其次为绿藻(2.3%); 冬季硅藻类占绝对优势。

1992年经福建省政府批准作为饮用水水源 地,根据福建省水(环境)功能区划,东张水库库 区执行GB3838-2002的II类水质标准,福州市监 测站对东张水库的监测共设置了3个长期监测断 面,分别是库区的进水口、库心以及坝前,每年3、 7、11月进行叶绿素a质量浓度检测;库区海拔高 程约60m,河网分布比较密集,除主干流外,小支 流较多。研究区概况及监测站点分布见图1(图 中库区范围为其常规水面范围)。



图1研究区概况

1.2 数据的选取及依据

研究区域属于中小面积水库,Landsat8影像获取方便,分辨率30m;光谱信息丰富,包括11个波段,波段1~7、9~11的空间分辨率为30m,波段8为15m分辨率的全色波段,卫星每16d可以实现1次全球覆盖。数据下载自中科院地理空间数据云中提供的Lansat8 OLI影像。OLI陆地成像仪有9个波段,成像宽幅为185×185km。OLI陆地成像仪的优势:①Band5的波段范围调整为0.845~0.885 µm,排除了0.825 µm处水汽吸收的影响;②新增波段,Band1蓝色波段(0.433~0.453 µm)主要应用于海岸带观测^[11]。研究区处于沿海地区,水汽大、云雨频繁,用OLI影像在辐射定标及大气校正等图像前期处理中得到结果会更准确^[12]。

叶绿素光谱特征信息主要存在蓝绿及近红外波段,故取用 OLI 遥感影像的1~7波段范围进行反演。遥 感影像取用2013年7月5日、2013年10月23日、2015年3月18日的3幅图像及补充2016年3月5日影像展 示分析结果(不参与建模);监测值取2013年7月5日、2013年11月1日、2015年3月16日东张水库入口、库 心、出口断面的数据,以及山仔水库库心及出口断面的补充数据(缺1个实测值),共14个实测值。

1.3 遥感反演原理

将实测水质参数质量浓度与同期遥感影像光谱特征值建立数学关系,不同叶绿素质量浓度的水体存在 其特有的光谱特征,可构建出研究目标反演的数学模型。纯净水体在可见光波段随波长增大,反射率逐渐 减小。水体叶绿素质量浓度增加,蓝色波段的反射率下降,绿光波段的反射率增高,水面叶绿素和浮游生物 质量浓度高时,近红外波段仍存在一定反射率^[13]。藻类物质中在蓝紫光波段(0.420~0.50 µm)和0.675 µm处 都有吸收峰,因此在藻类质量浓度较高时,水体反射率曲线在这2个波段出现谷值。含藻类水体最显著的光 谱特征是在0.70 µm附近常出现反射峰,其存在与否通常被认为是判定水体是否含有藻类叶绿素的依据^[14]。

在遥感影像中,监测点位置的叶绿素a质量浓度监测值,对应了该点进行辐射校正及大气校正的遥感影像的光谱特征。解释变量为各个波段值,响应变量为叶绿素a质量浓度监测值,按照时间日期、排列序号一一对应,对其进行多元线性回归分析。

1.4 回归分析原理

由于叶绿素质量浓度与光谱信息之间存在线性关系,存在较多的波段,所以尝试采用线性多元回归模型来描述与预测叶绿素a质量浓度。既可以充分利用遥感影像中各波段的光谱值,又可以探究哪些波段影响叶绿素a质量浓度的相关性较大^[15],其数学表达形式如下:

$$Y = [K1, K2, K3, \dots, Kn] \cdot [X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n]^T + \varepsilon, \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) ,$$
(1)

式中:矩阵K表示线性回归方程系数;X表示不同的变量(1~7波段), 定为误差且服从均值为0的正态分布。

构建多元线性回归模型时,存在响应变量 Y 与解释变量 X₁,X₂,…,X_n,回归模型的变量众多,因此需要对 模型的合理性与可靠性进行检验,通常包括:拟合优度检验、显著性检验、残差分析、变量的筛选等。显著性 检验包括回归方程的F检验及方程回归系数的t检验:F检验判断回归方程的所有自变量与因变量是否存在显著性线性关系;t检验判断各个自变量分别与因变量之间的线性关系。残差分析则是检验模拟值与实测值之间残差 ε 是否为正态独立性分布。利用 SPSS 软件可以完成对回归分析中的解释变量的筛选、检验、验证等^[16]。

2 结果分析

2.1 回归结果分析

用东张水库及山仔水库的补充监测点,兼顾点位的时间、空间分布,选取10组监测数据做回归分析,剩 余监测数据做模型验证,利用统计软件 SPSS 对统计的7个波段进行回归分析得到表1。从 SPSS 软件前期筛 选出回归方程及回归系数线性显著的3种波段组合的线性模型进行分析。

	144- mil			ハナオ		
模型		B(非标准系数)	标准误差	t分布值	Sig(显者水平)	
	(常量)	3.674	4.967	0.740	0.481	
	OLI 2	-0.012	0.033	-0.370	0.721	
1	OLI 3	-0.070	0.023	-3.035	0.016	
1	OLI_4	0.134	0.040	3.311	0.011	
	OLI 5	0.031	0.032	0.952	0.369	
	OLI 6	-0.078	0.030	-2.577	0.033	
	(常量)	3.060	4.452	0.687	0.509	
	OLI 3	074	0.020	-3.612	0.006	
2	OLI_4	0.130	0.037	3.502	0.007	
	OLI 5	0.025	0.027	0.928	0.378	
	OLI 6	-0.073	0.026	-2.797	0.021	
	(常量)	5.566	3.515	1.583	0.144	
2	OLI 3	-0.084	0.017	-5.110	0.000	
3	OLI_4	0.150	0.030	4.993	0.001	
	OLI 6	-0.052	0.013	-4.019	0.002	

表1 回归模型分析

Sig值低于0.05表示拒绝此变量的线性无关。从表1中可知,3号模型的各个变量Sig均小于0.05,其他线性回归模型则不能保证每个解释变量的显著水平全部拒绝线性无关。回归模型非标准化后的模拟值与实测值的对比,见图2。一方面,统计学意义上选取模型3作为反演模型较为可靠;另一方面,实际意义上分析,其3、4、6波段波长范围与叶绿素的光谱反射峰值及吸收谷所在的波段关系相重合,间接反映了物体反射率的特征。故选取数学模型3进行反演,其表达式如下:

 $Y = 5.566 - 0.084 \cdot OLI_3 + 0.150 \cdot OLI_4 - 0.052 \cdot OLI_6$, (2) 式中:Y为叶绿素质量浓度; $OLI_3 \setminus OLI_4 \setminus OLI_6$ 指遥感波段光谱值。

对建立的回归模型进行验证,实测值与模拟值的对比结果 见表2,验证值的均方根误差 *RMSE*=1.97。



图2 多元回归线性模型预测值与实测值的分布

衣2 保空验证									
	点位	东张进口 (201311)	东张库心 (201311)	东张出口 (201311)	山仔库心 (201503)	东张进口 (201603)	东张库心 (201603)	东张出口 (201603)	
	实测值/(µg·L-1)	6.30	9.17	9.72	10.59	6.28	8.50	10.40	
	模拟值/(µg·L ⁻¹)	9.26	9.22	9.94	6.01	10.60	6.80	14.90	
	误差	-2.96	-0.05	-0.22	4.58	-4.32	1.7	-4.5	

14-01-04-0

2.2 叶绿素a反演结果与分析

将遥感影像代入构建的叶绿素 a 质量浓度反演模型,反演其叶绿素 a 质量浓度值。最后结合 ArcGIS 空间分析插值功能,对所提取的反演结果,进行颜色渲染,得到不同时期研究区内反演结果(图3)。



图3 叶绿素年内分布图

东张水库叶绿素 a 质量浓度的年内分布特征为夏季 7 月份的整体明显高于春季 3 月份与冬季的 11 月份;3 月份与 11 月份的质量浓度差距不大。东张水库叶绿素 a 质量浓度的空间分布特征为叶绿素 a 质量浓度 较高的地区基本上分布在沿库区岸线附近以及水库进口处,库心附近大部分区域质量浓度偏小。东张水库 叶绿素 a 质量浓度伴随库面水位变化的特征为2015年 3 月水库库区水面小于 2016年 3 月的水库面积。同一季节,水位相对较低时,叶绿素质量浓度整体会增高。

针对研究区内叶绿素 a 质量浓度时空分布特点,分析原因,包括以下几个部分:

1)东张水库地处东南沿海,气温、降水等条件较适合植物生存,叶绿素a质量浓度的年际分布存在差异。分析原因是夏季雨量充沛,水体温度稳定,适合藻类生长。从春末开始,在下风区的坝址断面的库表,即已出现少量的"水华",随水温上升,到夏、秋季节,"水华"数量达到高峰,"水华"范围也向库区广泛蔓延。 "水华"的种类主要是蓝藻门的水华微囊藻、螺旋鱼腥藻和水华束丝藻等。颤藻和小球藻等也占相当比例。 近年来,东张水库偶有爆发局部富营养化^[17];3、11月降雨少,气温变化剧烈,气温波动很大,影响藻类繁殖。

2)库区周围存在大量村庄,生活污水及农业灌溉用水排入导致岸边总氮总磷等污染物质量浓度偏高, 适合藻类大量繁殖生存;水动力方面,岸边水流缓慢且浅,水流空间范围交换不够充分,导致水体藻类在位 置处堆积生长;岸边绿色植被对光谱信息的干扰也容易造成反演结果质量浓度偏高的假象。

3)上游为小溪流,水体交换缓慢,容易发生藻类堆积;上游来水在没有充分流入库区,污染物质降解前, 其含有的总氮、总磷等化合物对东张水库的影响是显著的。加强对上游来水的水质预警监测,布设预警断 面,可以更好地保障水体健康。

4)库区范围发生萎缩、水位下降时,来水量较少,取水量大,水动力交换不足^[18]。污染物及藻类得不到更 好的混合稀释及降解,易发生水体富营养化;2015年5月开始,为进一步保障水源地饮用水安全,开展并实施 了环东张水库截污工程,已完成环库区两岸主管道的建设,支管正在建设,对周围村庄进行集中并网处理至 市政污水处理厂,大大降低了库区富营养化敏感污染物量,可知福州此项水源地整治工程效果显著。

3 结 论

针对2013—2016年东张水库浮游叶绿素a质量浓度的空间、时间上的变化展开研究,利用不同时间、空间的遥感影像合理的构建反演模型,具备较好的合理性与可行性。回归分析中,遥感OLI₃、OLI₄、OLI₆波段的线性组合,较好的反应了叶绿素质量浓度的变化。叶绿素质量浓度存在年际变化,夏季高于春季与冬季,且沿岸与进口附近质量浓度高于库心位置,粗略反映了叶绿素a质量浓度时间、空间范围的变化。

此外,东张水库应尽快完成对沿岸的居民生活污水、农田施肥灌溉的截污工程,未来可大大的降低东张 水库目前较为严峻的富营养化风险,在夏秋季藻类高爆发期间,应重视对上游来水水质的监测,及在以后东 张水库的取水、调水及更深入的研究中,应补充探求在水量、水动力等方面对藻类浮游植物的影响,对未来 东张水库水源地的安全供水有着重大的意义。

参考文献:

- [1] 龚峰. 黄前水库水源地保护研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010.
- [2] 李雷,戴万宏.巢湖水体富营养化污染现状及防治对策[J].中国水土保持,2009(7):55-57.
- [3] 马荣华,戴锦芳.应用实测光谱估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度[J].遥感学报,2005,9(1):78-86.
- [4] 柳成亮,杨永坡,樊瑞琪.高光谱影像和地理建模在引黄灌区水量调度中的应用[J].灌溉排水学报,2013,32(4):15-19.
- [5] 陈楚群, 施平, 毛庆文. 应用 TM 数据估算沿岸海水表层时绿素浓度模型研究[J]. 遥感学报, 1996(3):168-176.
- [6] ANDREO V, DOGLIOTTI A I, TAURO C, et al. Spatio-temporal variations in chlorophyll-a concentration in the patagonic continental shelf: Anexample of satellite time series processing with GRASS GIS temporal modules[C]// IGARSS. 2015.
- [7] WATANABE F S, ALCÂNTARA E, RODRIGUES T W P, et al. Estimation of Chlorophyll-a Concentration and the Trophic State of the Barra Bonita Hydroelectric Reservoir Using OLI/Landsat-8 Images[J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2015, 12 (9): 10 391-10 417.
- [8] DALU T, DUBE T, FRONEMAN P W, et al. An assessment of chlorophyll-concentration spatio-temporal variation using Landsat satellite data, in a small tropical reservoir[J]. Geocarto International, 2015, 30(10):1 130-1 143.
- [9] 林晶. 福清市东张水库浮游植物动态研究[J]. 化学工程与装备, 2012(7):224-228.
- [10] 江惠龙. 福清市东张水库饮用水水源污染控制与污染防治对策研究[J]. 化学工程与装备, 2009(8):204-210.
- [11] 徐涵秋, 唐菲. 新一代Landsat系列卫星:Landsat 8遥感影像新增特征及其生态环境意义[J]. 生态学报, 2013, 33(11):3 249-3 257.
- [12] GAROFALO D F T, MESSIAS C G, LIESENBERG V, et al. Comparative analysis of digital classifiers of Landsat-8 images for thematic mapping procedures[J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2015, 50(7):593-604.
- [13] 梅安新, 彭望琭, 秦其明, 等. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001:238-239.
- [14] 疏小舟, 尹球, 匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系[J]. 遥感学报, 2000, 4(1):41-45.
- [15] 纪永凤. 灰色多元线性回归分析及其应用研究[D]. 沈阳: 东北师范大学, 2008.
- [16] 时李文. SPSS19.0统计分析从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社, 2012:173-174.
- [17] 魏德莹.东张水库水质现状分析及保护对策[J]. 福建环境, 1995(2):25-26.
- [18] ALLEE R J, JOHNSON J E. Use of satellite imagery to estimate surface chlorophyll a and Secchi disc depth of Bull Shoals Reservoir, Arkan sas, USA[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(6):1 057-1 072.

(下转第107页)