

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2019.04.006

## 丹江口水库总磷浓度遥感反演及其时空特征研究

王磊<sup>1</sup>, 章昱<sup>1</sup>, 徐帅<sup>2</sup>, 伏永朋<sup>1</sup>

WANG Lei<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, XU Shuai<sup>2</sup>, FUYong-Peng<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 武汉 430205; 2. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074)

(1. Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

**摘要:** 水体中总磷(TP)的浓度是水质参数中的主要指标之一,借助遥感技术的时效性、宏观性和经济性的优势,反演其时空分布特征信息,对于调查、管理和保护水库生态系统是必要的。研究选取覆盖丹江口水库的多期 Landsat 8 OLI 遥感影像,结合现场的水体采样实测数据,利用不同的波段组合,分别采用线性回归和非线性模型对水体的 TP 浓度进行遥感反演,分析 TP 浓度的时空特征和变化规律。结果表明:(1)TP 浓度与可见光波段组合相关性较好,丰水期回归的相关系数最高为 0.746,枯水期回归的相关系数最高为 0.684;(2)TP 浓度在不同时期差异性显著,丰水期浓度总体低于枯水期;(3)库区 TP 浓度的空间变化明显,水库中心区 TP 浓度相对于整个库区较低,沿库周围水体和河流入库口 TP 浓度为全库最高区域,而且常年处于高浓度状态;(4)自丹江口水库蓄水以来,TP 浓度高值明显减少,与近年来水库实施的生态保护政策有关。

**关键词:** 总磷(TP); 回归分析; 遥感反演; 丹江口水库; 时空变化分析

中图分类号:P66; X824

文献标识码:A

文章编号:1007-3701(2019)04-0449-08

**Wang L, Zhang Y, Xu S and Fu Y P. Remote Sensing Retrieval of Total Phosphorus Concentration in Danjiangkou Reservoir and Its Spatial and Temporal Characteristics. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2019, 35(4): 449-456.**

**Abstract:** The concentration of total phosphorus (TP) in water is one of the main indexes of water quality parameters. Using the advantages of timeliness, macrocosm and economy of remote sensing technology to invert TP spatio-temporal distribution information is necessary to investigate, manage and protect reservoir ecosystems. We select multi-phase Landsat 8 OLI remote sensing images covering Danjiangkou Reservoir, combine with the measured data of water sampling in the field, use different band combinations, linear regression and nonlinear model to retrieve the TP concentration of water body and analysis spatio-temporal characteristics and variation of TP concentration. The result shows that: (1) the correlation between TP concentration and visible light band combination is good, the highest correlation coefficient of regression in flood season is 0.746, and the highest correlation coefficient of regression in dry season is 0.684; (2) TP concentration has significant difference in different periods, and the concentration in flood season is lower than that in dry season; (3) The spatial variation of TP concentration in reservoir area is obvious, and TP concentration in reservoir center is lower than that in whole reservoir area. The TP concentration in the water

收稿日期:2019-8-28; 修回日期:2019-9-23; 责任编辑:庞迎春

基金项目: 中国地质调查局项目“丹江口水库南阳—十堰市水源区 1:5 万环境地质调查”(DD20160256),“赣州市于都地区生态地质调查”(DD20190540)联合资助

第一作者:王磊(1981—),男,硕士,工程师,主要从事遥感地质研究工作, E-mail: snackok@qq.com

around the reservoir and the river inlet is the highest in the whole reservoir, and it is in a high concentration state all the year round; (4) Since the storage of Danjiangkou Reservoir, the TP concentration has decreased significantly, which is related to the ecological protection policy implemented in recent years.

**Key words:** total phosphorus (TP); regression analysis; remote sensing inversion; Danjiangkou Reservoir; spatio-temporal variation analysis

磷是水体生物生长和富营养化的重要指标之一,总磷(TP)浓度的获取是水质监测的一项重要工作<sup>[1]</sup>。传统的 TP 浓度的监测,采用人工采样的方式,不仅耗时、费力、不经济,而且以采样点数据代替周围水域 TP 浓度值也存在一定不合理性,借助遥感技术的时效性、宏观性和经济性等优势定量反演 TP 浓度方法,可以满足大面积的水域实时监测,是今后水质监测发展的重要方向。对于 TP 浓度遥感反演的相关研究较少,主要通过分析 TP 的光谱特征,来寻找与 TP 相关性较高的波段或者不同的波段组合。Baban 等<sup>[2]</sup>利用 Landsat 5 TM 遥感数据对英国的 Norfolk Broad 地区的水质进行反演,建立了 TM 数据与 TP 浓度的回归关系式,取得了良好的反演结果;Isenstein 等<sup>[3]</sup>结合 Landsat 7ETM 遥感数据与实测数据,对尚普兰湖的 TP 浓度建立了遥感反演模型,获得了相应的多元线性回归模型。国内学者段洪涛等<sup>[4]</sup>对查干湖的 TP 浓度作遥感定量分析时,发现波长在 810 nm 处,与 TP 有很高的相关性,利用 810 nm 处的波段反射值建立了一元线性回归方程反演 TP 的浓度,得到了较高精度的结果。徐炜凡等<sup>[5]</sup>利用环境一号卫星的 CCD 数据对“三湖一库”的 TP 浓度进行遥感反演研究,构建了基于环境一号卫星多光谱数据的富营养化评价模型。Chang 等<sup>[6]</sup>基于 MODIS 影像数据,对美国佛罗里达州西部坦帕湾区域进行研究,采用遗传算法分析 TP 浓度的空间分布特征。杜成功等<sup>[7]</sup>利用 GOCI 影像数据,通过回归分析方法反演太湖的 TP 浓度,匹配较好,并分析得出 TP 浓度在不同的季节存在差异,在一天内 TP 浓度变化存在相似性。刘庆生<sup>[8]</sup>通过野外光谱和对应土壤样品的理化分析研究出高光谱植被指数(NDNI)可用于初步反映土壤全磷的含量变化。陈三明等<sup>[9]</sup>、路鹏等<sup>[10]</sup>、吕凤军等<sup>[11]</sup>、夏学齐等<sup>[12]</sup>和陈勇敢等<sup>[13]</sup>均利用高光谱数据和水质 TN、TP、PH 等值进行了建模和反演,取得了不同程度的反演精度。

本研究在 2016–2017 年期间对丹江口水库及其支流汇合处水域进行采样分析,获取 TP 等水质参数的实时地面监测数据,利用同时期的覆盖丹江口水库的多景 Landsat 8 OLI 遥感影像,建立不同波段组合的遥感反射率与 TP 浓度之间的线性或非线性关系,比较不同遥感反演算法相关系数和误差,选取较好的遥感反演模型对 2013–2018 年不同时期的库区 TP 浓度进行定量反演,分析丹江口水库水体 TP 浓度的时间特征和空间特征,为库区水质监测及生态管理提供技术支持和科学依据。

## 1 研究区概况

丹江口水库作为南水北调中线工程的水源区,地处湖北省丹江口市和河南省淅川县,是汉江和丹江并联水库。地理位置介于北纬 32°30′~33°30′和东经 110°30′~111°50′之间,属于北亚热带季风气候,自然条件优越,植被覆盖较好。库区位于秦岭东西向构造体系的南部边缘,地质构造复杂,以中低山和丘陵为主<sup>[14]</sup>。研究区地理位置及现场采样点分布如图 1 所示。

## 2 技术方法

### 2.1 数据源

本研究选取 2016–2017 年丹江口环境地质调查的地表水样点数据,收集库区水域范围内的 30 组数据,严格按照水质检测标准,测试出 TP 浓度,并将数据分为两组:一组作为测试样本数据用于建立与遥感不同波段反射率组合值之间的线性或非线性关系;一组用于反演后的精度评估数据。同时,选用准同步的 Landsat 8 卫星 OLI 传感器多光谱影像数据作为丹江口水库 TP 浓度反演的数据源。该影像条带号为 125,行编号为 37,数据标识为中心经纬度为 111.51°E、33.18°N,选取数据平均云量小

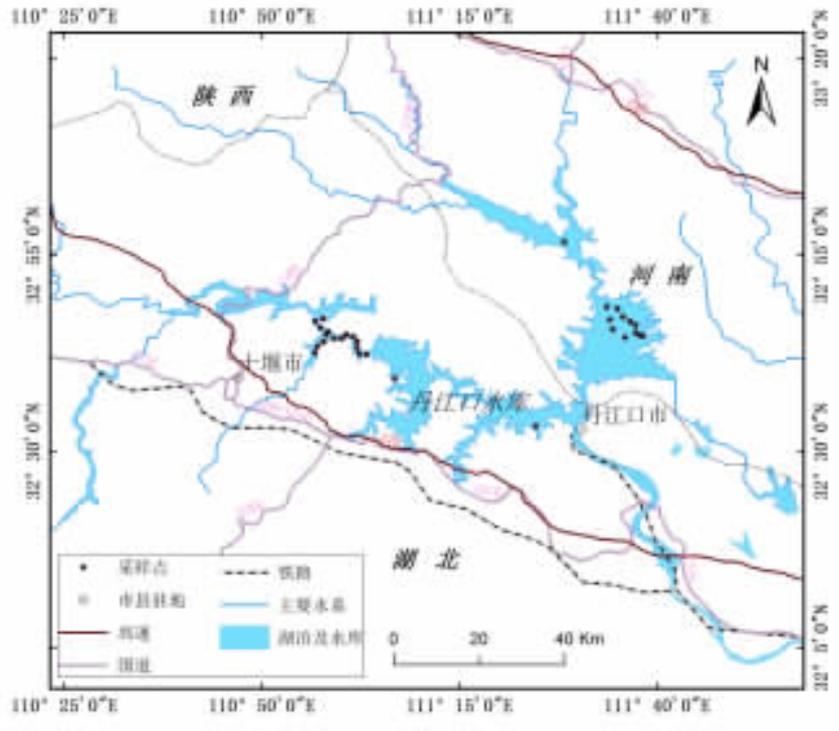


图1 研究区地理位置及其采样点

Fig. 1 Geographical location and the sampling points in the study area

于 5%的丰水期 2 期、枯水期 4 期和平水期 2 期数据(表 1)。

2.2 数据处理及水域提取

原始影像在获取的过程中由于地形、大气、光照等因素的影响,会产生不同程度的几何畸变和辐射变形,因此需要对遥感原始影像进行预处理,即纠正遥感影像在获取过程中产生的变形、扭曲、噪声信息等<sup>[5]</sup>。本研究对所需影像的预处理过程包括精确的辐射定标和大气校正,用以获取 OLI 多光谱影像的真实地表反射率数据。

表1 Landsat 8数据源信息列表

Table 1 The information list of data source of Landsat 8 satellite

时间	数据标识号	平均云量(%)
2013-08-14	LC81250372013226LGN00	3.51
2016-04-16	LC81250372016107LGN00	4.21
2016-11-10	LC81250372016315LGN01	0.08
2017-01-13	LC81250372017013LGN00	3.55
2017-07-24	LC81250372017205LGN00	0.97
2018-04-06	LC81250372018096LGN00	3.36

丹江口水库地处亚热带大陆性气候区,水库水域面积受上游降雨影响显著,水域面积具有季节性变化特征,选择合适的水体边界提取方法是水质定量反演的基础,水体信息的提取精度将会直接影响水质反演的精度。本研究对比分析了几种常见的、应用较为广泛的水体边界提取方法:单波段阈值法、多波段谱间关系法、NDWI 法、MNDWI 法<sup>[16]</sup>,得出不同水体边界提取方法在丹江口库区的适用性,确定了丹江口水库水域边界提取的最优方法。

对经预处理的两景 Landsat 8 卫星 OLI 传感器多光谱数据进行基于如上介绍的四种方法的水体边界提取试验,边界提取的流程如图 2 所示,得出 MNDWI 算法提取的水域边界具有良好的精度,提取结果示例如图 3,其算法关系式和阈值如公式(1)所示:

$$\frac{Band2-Band5}{Band2+Band5} < 0.18 \tag{1}$$

将 MNDWI 法提取的水域栅格进行阈值分割处理以得到丹江口水库水域边界,并将提取的水库水域边界信息转为矢量数据如图 4,裁剪出准确的库区水域范围。

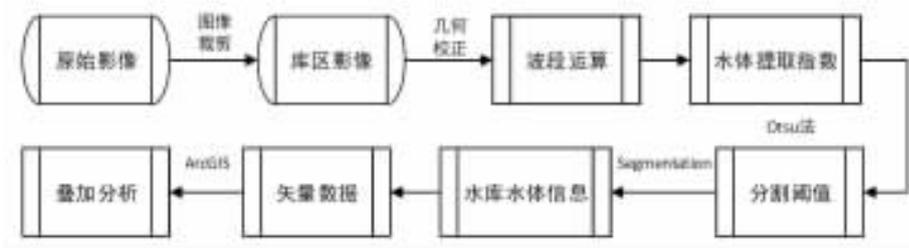


图2 Landsat 8卫星OLI传感器多光谱数据水库水域边界提取流程图

Fig. 2 The flowing chart of reservoir boundary extraction using Landsat 8 satellite sensor-OLI multispectral data



图3 利用MNDWI法的OLI数据水库水域边界提取示例图

Fig. 3 The reservoir boundary extraction using OLI data by MNDWI algorithm

### 2.3 TP 浓度遥感反演模型

利用 Landsat 8 卫星 OLI 传感器多光谱影像数据建立遥感水质 TP 浓度反演模型。反演采用经预处理的 OLI 多光谱影像反射率为模型输入,根据前人的经验算法,以及磷在可见光和近红外光谱附近敏感性比较,选取不同时期的水样点的 TP 浓度实测值与对应影像上的各波段遥感反射率以及它们的波段组合的线性、对数、多项式等多元逐步回归分析,经精度验证后选取相关性高而且参数参与较少的最优模型。

考虑到对水体光谱的不同波段做比值处理,可以消除部分大气因素的影响<sup>[17]</sup>,同时也可以减少在空间和时间上水面粗糙度变化的干扰,突出相关信息<sup>[18]</sup>。同时,已有学者运用地物光谱仪对水体光谱进行了实测,发现 TP 浓度含量高的水体在可见光和近红外波段反射作用明显增强,使得其在 0.545 ~ 0.670 μm 以及 0.841 ~ 0.876 μm 的波段上形成了较强的相关关系,这一位置正好位于 Landsat-8 卫星 OLI 传感器多光谱影像数据的 B2、B3、B4、B5 波段。因此,本研究尝试在丰水期和枯水期使用不同波段组合的反演模型与准同步的现场实测数据建立回归分析,计算相关系数如表 2 和表 3 所示。依据相关性理论,综合对比分析其精度,在丰水期

选用相关性较高的波段反射率组合 (B2-B4)/(lnB2-lnB3)为自变量进行三次回归定量遥感反演;在枯水期选用相关性较高的波段反射率组合 B1+B2 为自变量进行二次回归定量遥感反演。

在丰水期建模过程中,考虑到模型的适用性和稳定性,选用多项式模型构建反演模型:

$$Y = 3.618 - 0.256 * X + 0.014 * X^2 + 0.0003 * X^3 \quad (2)$$

表2 丰水期不同波段反射率组合与TP浓度实测值相关性关系表

Table 2 The correlation relational tables of different band reflectance in combination with the measured TP concentration during the rainy season

序号	波段组合	相关系数
一元线性回归	B3/B2	0.127
	B3/B1	0.522
	B3/B2 + B3/B1	0.519
	(B2-B4)/(lnB2 -ln B3)	0.397
	B4/B1	0.302
逻辑回归	B1、B2、B3、B4	-0.447
S 函数	B1、B2、B3、B4	-0.090
多元回归	B1、B2	0.684
	B1、B2、B3、B4	0.443

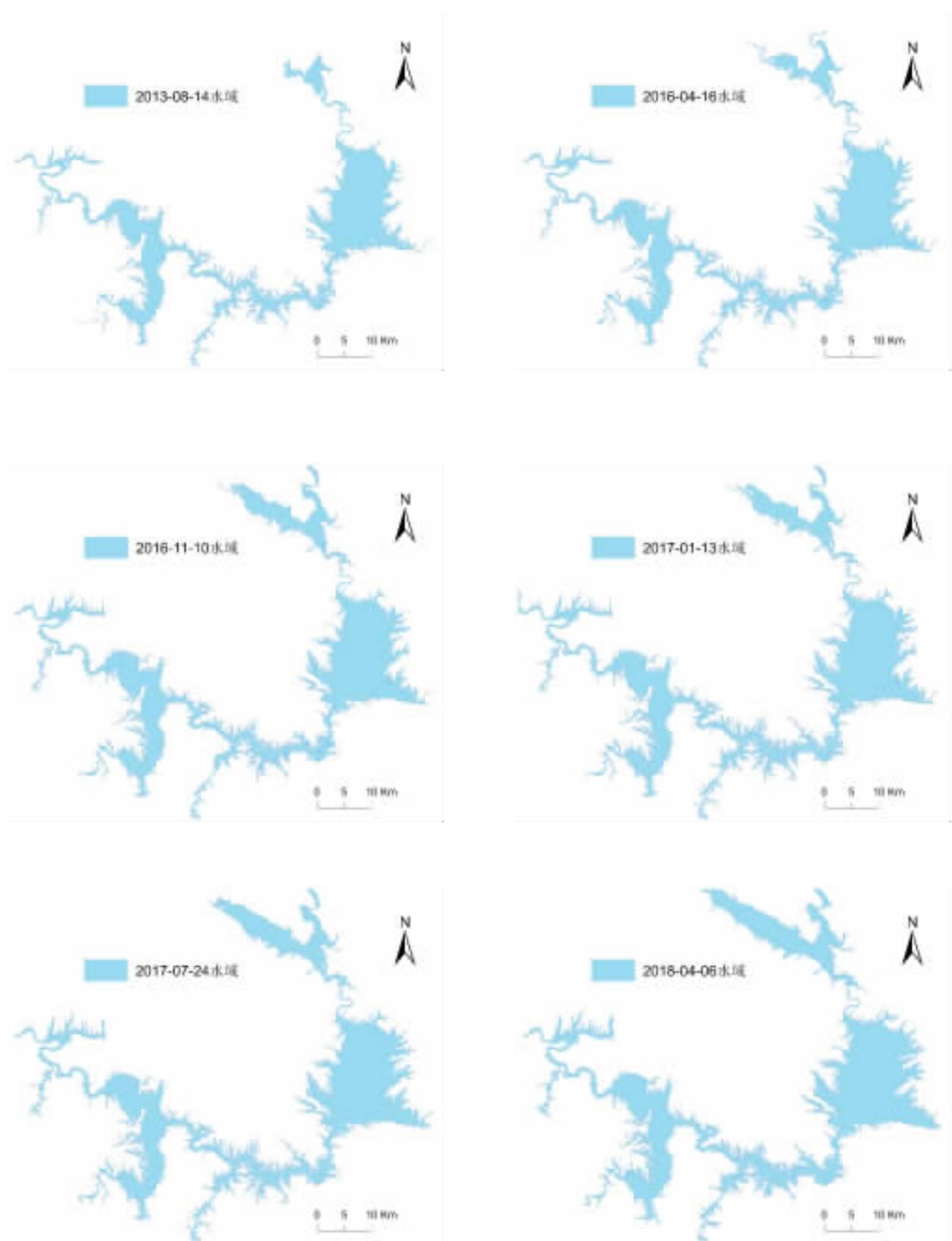


图4 2013-2018年丹江口水库水域分布图

Fig. 4 The water distribution of Danjiangkou Reservoir in 2013-2018

表3 枯水期不同波段反射率组合与TP浓度实测值相关性关系表

Table 3 The correlation relational tables of different band reflectance in combination with the measured TP concentration during the dry season

序号	波段组合	相关系数
一元线性回归	B3/B2	0.328
	B3/B1	0.203
	B3/B2 + B3/B1	0.519
	(B2-B4)/(lnB2 -ln B3)	0.746
	B4/B1	0.122
逻辑回归	B2、B3、B4、B5	-0.522
S 函数	B2、B3、B4、B5	-0.234
多元回归	B2、B3、B4、B5	0.614
	B1、B2、B3、B4	0.443

式中:Y 为遥感反演的 TP 浓度 ( $\mu\text{g/L}$ ),X 为 (B2-B4)/(lnB2 - ln B3)的反射率运算值。模型相关系数  $R^2$  为 0.746,相关关系显著,反演平均绝对误差为 5.04,均方根误差为 6.65,平均相对误差为 10.46%。

在枯水期建模过程中,选用多元二次回归模型构建反演模型:

$$Y = 0.0143 * X_1^2 - 0.1634 * X_2 + 9.733 \quad (3)$$

式中:Y 为遥感反演的 TP 浓度 ( $\mu\text{g/L}$ ), $X_1$  和  $X_2$  分别为 B1、B2 的反射率值。模型相关系数  $R^2$  为 0.684,相关关系显著,反演平均绝对误差为 8.17,均方根误差为 5.08,平均相对误差为 13.64%。

### 3 结果分析

#### 3.1 不同时期的 TP 浓度遥感反演

利用算法提取出的不同时期的丹江口水库水域范围,裁剪掩膜出经过精确大气校正和辐射校正后的遥感影像,根据丹江口水库丰水期、平水期和枯水期的 TP 浓度遥感反演模型,分别定量获得 2013 年丰水期、2016 年和 2017 年两个时期、2018 年枯水期的 TP 浓度空间分布如图 5 所示。

#### 3.2 TP 浓度的时空特征分析

丹江口水库 TP 浓度呈现明显的时空变化特征。整个库区范围呈现中部低于周边沿岸的浓度,支流及其汇合处往往出现高值。上游汉江流经十堰

市的众多城镇,沿岸多工厂企业,城镇生活污水和工业废水直接或间接随地表径流入库区。丹江口库区周围是较为平坦的农业用地,主要栽种小麦、玉米、红薯等农作物,农药、土肥流失是库区沿岸水体 TP 浓度一直居高的主要原因。沿岸水体会对土壤产生不断冲刷,使得更多的污染物元素输出,浅水区水动力较大,会扰动底部的沉积物,导致沉积物中磷元素再次被释放出来,致使沿岸水体中 TP 浓度的变大。库区一部分水体来源主要是北部滔河、老灌河和湍河径流。库区北部较高浓度 TP 与径流区水产养殖等人类活动密切相关。

库区 TP 浓度的最高值一般出现在枯水期,并且枯水期 TP 浓度一般总体上高于丰水期。丰水期对 TP 浓度的影响主要体现在两个方面:一方面是降雨带来的高径流量会搬移水体中含磷颗粒,从而降低 TP 浓度。另一方面地表径流增强,水体的总量增多,库区水体总面积变大,水体中 TP 的浓度不断被稀释<sup>[9]</sup>。而枯水期支流径流量小,水体自净能力弱,纳污能力变小,进入水库后水体交换能力较差,导致营养盐在库区积累,使得库区水体 TP 浓度较高。近年来库区 TP 浓度总体上呈现降低趋势,在枯水期 TP 浓度最高值从 2016 年的 881.891  $\mu\text{g/L}$  降低到了 2018 年的 762.394  $\mu\text{g/L}$ ;在丰水期 TP 浓度最高值从 2013 年的 593.461  $\mu\text{g/L}$  降低到了 2017 年的 554.119  $\mu\text{g/L}$ ,这是由于政府对丹江口水源地加大调查和保护以及人民生态意识的提高,水库 TP 浓度的高值逐年降低。

### 4 结论

(1)在水色遥感中建立合适的遥感反演模型尤为重要,需要获得水体要素在各波谱的反射率曲线,发现 TP 浓度值在可见光及近红外波段较为敏感。选取 Landsat-8 卫星 OLI 传感器多光谱影像数据的 B1、B2、B3、B4、B5 波段进行试验,在丰水期和枯水期使用不同波段组合的反演模型与准同步的现场实测数据建立回归分析,通过对比分析不同波段组合的线性、对数、多项式等多元逐步回归分析,经精度验证后选取相关性高而且参数参与较少的最优模型,有利于提高 TP 浓度反演精度,可以用于大面积实时动态监测 TP 浓度。

(2)丹江口水库 TP 浓度是水质的主要污染指

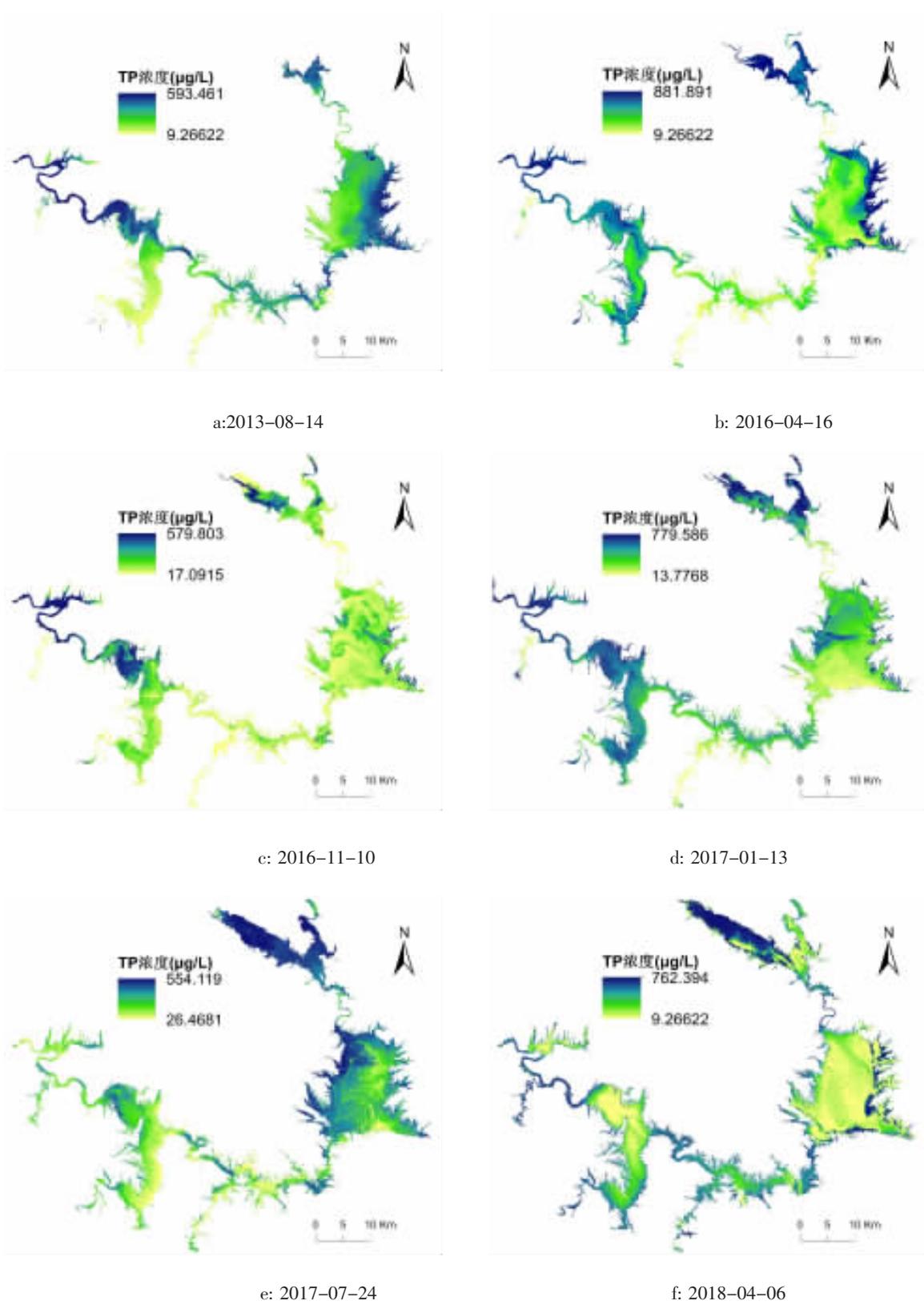


图5 2013-2018年不同时期丹江口水库总磷浓度反演图

Fig. 5 The inversion of total phosphorus concentration in Danjiangkou Reservoir in different periods from 2013 to 2018

标之一,TP浓度在不同时期,呈上升趋势。受水位、水量的变化和人类活动的影响,库区TP浓度表现为中部低于周边沿岸的浓度,支流及其汇合处往往出现高值。

(3)遥感定量反演摆脱了传统的采样调查插值的水质分析方法的局限性,已经成为一种非常重要的水质监测手段,从遥感数据信息中得到TP浓度时空分布情况,及时掌握水各区域TP浓度,可以为丹江口水库的水质监测、生态保护等快速、全面、针对性地制定相关政策提供支持。

文章撰写过程中,承蒙中国地质调查局武汉地质调查中心崔放教授级高工的悉心指导以及代贞伟、黄皓工程师等提供的实地测量数据帮助,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] 杨丽华,卓奋. 湖泊水体磷污染及其防治对策[J]. 污染防治技术, 1996,9(1):47-49.
- [2] Baban, S M J. Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads, U.K. using Landsat imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14 (7): 1247-1267.
- [3] Isenstein E M, Park M H. Assessment of nutrient distributions in Lake Champlain using satellite remote sensing[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(9): 1831-1836.
- [4] 段洪涛,张柏,宋开山,黄素军,宗明,张树清. 长春市南湖富营养化高光谱遥感监测模型[J]. 湖泊科学,2005,17(3): 282-288.
- [5] 徐炜凡,李云梅,王桥,吕恒,刘忠华,徐昕,檀静,郭宇龙,吴传庆. 基于环境一号卫星多光谱影像数据的三湖一库富营养化状态评价[J]. 环境科学学报,2011,31(1):81-93.
- [6] Chang N B, Xuan Z, Yang Y J. Exploring spatiotemporal patterns of phosphorus concentrations in a coastal bay with MODIS images and machine learning models [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 134(4):100-110.
- [7] 杜成功,李云梅,王桥,朱利,吕恒. 面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究 [J]. 环境科学,2016,37(3):862-872.
- [8] 刘庆生,张敏,宁吉才,刘高焕,傅新,黄翀. 翘碱蓬. 高光谱植被指数对土壤化学性质的响应[J]. 地理与地理信息科学,2011,(3):86-89+104.
- [9] 陈三明,吴虹,谭泛,张振. 基于ASTER的遥感地球化学统计预测模型及应用——以金川铜镍矿床外围找矿为例[J]. 桂林理工大学学报,2010,30(4):480-489.
- [10] 路鹏,周超,陈圣波,张莹,于亚凤. 基于Hyperion数据的江西德兴矿区粘土矿物信息提取及其找矿意义 [J]. 地球科学,2015,40(8):1386-1390,1440.
- [11] 吕凤军,李铭,张应刚,王娟. 冀西北银地球化学块体与遥感成矿信息集成研究[J]. 地质学刊,2014,38(2):259-263.
- [12] 夏学齐,季峻峰,陈骏,廖启林,杨忠芳. 土壤理化参数的反射光谱分析[J]. 地学前缘,2009,16(4):354-362.
- [13] 陈勇敢,刘桂阁,路彦明,王美娟,韩先菊,张慧玉,常春郊. 遥感地球化学异常信息提取研究——以青海省白日其利沟地区为例[J]. 矿床地质,2010,29(S2):35-40.
- [14] 夏玲玉. 丹江口水库库湾水体氮磷对景观背景的响应 [D]. 华中农业大学硕士学位论文,2017.
- [15] 赵忠明,孟瑜,汪承义. 遥感图像处理[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [16] 饶萍,王健力. 最优分区与最优指数联合的水体信息提取[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(5):702-712.
- [17] 唐世浩,李小文,王锦地,朱启疆,张丽华. 改进的基于订正ALPHA差值谱的TES算法 [J]. 中国科学: 地球科学, 2006, 36(7):663-671.
- [18] 光洁. 结合实测光谱数据与Landsat TM/ETM图像的太湖总悬浮物遥感估测模型研究 [D]. 南京师范大学硕士学位论文, 2006.
- [19] 李凤清,叶麟,刘瑞秋,曹明,蔡庆华. 三峡水库香溪河库湾主要营养盐的入库动态[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2073-2079.