

丹江口水库水质的遥感监测

吴川^{1,2}, 张玉龙^{1,2}, 张克荣¹, 叶琛¹, 张全发¹

(1. 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 丹江口水库作为南水北调中线工程的水源地, 其水质安全将直接影响到调水工程的成败。根据丹江口库区2012年3月25日和8月9日的两幅HJ卫星遥感影像, 结合同步的实测水质参数, 采用经验反演模型对丹江口水库叶绿素a(Chl_a)浓度、总磷(TP)浓度和水体透明度(SD)进行了定量反演研究。结果显示, 无论是枯水期和丰水期, 丹库和汉库入库口的Chl_a浓度和TP浓度都要高于其他区域, 而入库口区域的SD要低于其他区域。通过分析14项实测水质指标的主成分分析结果和丹江口库区LULC遥感解译结果发现, 枯水期库区TP主要来源于库区上游城镇生活污水和工业废水, 而丰水期TP主要来自于农业面源污染。SD反演结果还显示, 由于汉江上游降雨量大, 水土流失严重, 使得汉库水体透明度明显低于丹库。利用Chl_a反演结果对丹江口水库的水体营养状态进行分析后发现, 在丹库、汉库入库口区域以及水体流通性较小的狭小水体, 水库水体达到了轻度富营养化状态, 因此, 应该加强对库区面源污染的控制和生态环境修复。

关键词: 丹江口水库; 遥感; 水质监测; 定量反演

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)06-0075-06

Remote Sensing Monitoring of Water Quality in the Danjiangkou Reservoir

WU Chuan^{1,2}, ZHANG Yulong^{1,2}, ZHANG Kerong¹, YE Chen¹, ZHANG Quanfa¹

(1. Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Danjiangkou Reservoir is the water source area of the Middle Route of the South to North Water Transfer Project (MRSTN WTP). Thus, its water quality is of great significance to the project. In this study, we collected two HJ 1A/B remote sensing images of the Danjiangkou Reservoir in March and August, 2012. Combined with the in situ water quality data, retrieval models were established to analyze three water quality variables quantitatively, including the chlorophyll a (Chl_a) concentration, total phosphorus (TP) concentration, and water transparency (SD). The results showed that Chl_a and TP concentrations were much higher in the mouth of Dan region and Han region of the Danjiangkou Reservoir during both the dry and wet seasons, while SD was lower than that in other areas. Principal component analysis of the 14 water quality indicators and the remote sensing interpretation of LULC image in Danjiangkou Reservoir indicated that TP mainly comes from the domestic sewage and urban wastewater during the dry season, and from agriculture non-point source pollution during the wet season. The retrieval results of SD indicated that water loss and soil erosion in the upstream of Han River have negative effects on the water clarity of the Danjiangkou Reservoir, resulting in a lower SD in Han region than that in Dan region. Sediment deposition caused by soil erosion may decrease the storage capacity of the Danjiangkou Reservoir and endanger the safety of the MRSTN WTP. The retrieval results of Chl_a were used to analyze the water trophic status in Danjiangkou Reservoir, which indicated that Danjiangkou Reservoir was lightly eutrophicated in the mouth of the Dan region and Han region and some small water bodies. Thus, controlling the non-point source pollution in the upstream of Han River and ecological environment restoration should be implemented for water source conservation in the reservoir.

Key words: Danjiangkou Reservoir; remote sensing; water quality monitoring; quantitative retrieval

收稿日期: 2013-04-24 修回日期: 2013-09-12 网络出版时间: 2013-10-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1029.033.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(31130010; 31200354); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAC06C03)

作者简介: 吴川(1988), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事水质遥感方面研究。E-mail: wuchuan@wbgcas.cn

通讯作者: 张全发(1965), 男, 湖北武汉人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事流域生态学、森林生态学、遥感/GIS应用等领域的研究工作。E-mail: qzhang@wbgcas.cn

南水北调是我国为了缓解北方用水紧张,从 2002 年开始实施的一项战略性跨区域的人工调水工程。其中中线工程不但能缓解我国华北地区的水资源短缺,并能兼顾到沿线生态用水和灌溉用水,有力地推进沿线京、津、冀等用水区的社会经济发展和宜居生态环境建设^[1-3]。丹江口水库作为中线工程水源地,年平均调水能力可达到 145 亿 m^3 ,是中线工程顺利实施的重要保障。然而,自 20 世纪 80 年代以来,汉江流域点源污染及人为活动引起的面源污染呈现快速恶化的趋势,已有研究表明水库存在较严重的氮污染和汞(Hg)、铅(Pb)等重金属超标等问题^[4-5]。因此,加强丹江口水库水质监测,分析和追踪污染来源,对改善水库水质情况,保障调水工程顺利进行有极其重要的意义。

现有的丹江口水库水质研究大多是基于原位观测技术,分析水库的水质时空特性和水化学特征,如有机物污染、氮污染、重金属污染、主要离子化学季节变化和来源分析等^[2,5-9]。但是原位观测的覆盖范围有限,不能体现水体在大面积范围内的水质特征,而且观测工作容易受地形、水质、天气等因素影响。事实上,水质遥感技术能够提供各种空间分辨率和时间分辨率的遥感影像,且不受地形等因素的限制,能很好地弥补原位观测的不足,为大范围多时相的水域监测和各种水质参数的反演创造了条件^[10-11]。有不少学者在水质遥感方面做了一些探讨,如 Olmanson 等^[12]运用 1985 年-2005 年的 Landsat TM/ETM 遥感影像分析了美国明尼苏达州大于 8 hm^2 所有湖泊 20 年间的水体透明度变化情况;He 等^[13]运用 TM 影像反演了北京官厅水库水体叶绿素浓度、总氮和溶解性磷浓度,得到较好的反演结果;Wang 等^[10]利用 MODIS 遥感影像分析了太湖水体悬浮物浓度,发现太湖水体常年都比较浑浊,其中夏季和春季总悬浮物浓度分别达到最大和最小值;Alcantara 等^[14]采用 1 km 分辨率的 MODIS 影像反演了巴西 Itumbiara 水库水表温度和热通量,并对其时空特性进行了分析。

本文拟利用收集的丹江口库区 2012 年枯水期和丰水期的两幅环境减灾卫星(HJ 1A/B)遥感影像,结合与遥感影像同步的实测水质数据,进行水库叶绿素 a(Chl_a)浓度、总磷(TP)浓度和水体透明度(SD)的反演研究,为丹江口水库水质监测和水库管理提供科学依据。

1 研究区概况

丹江口水库位于湖北河南两省之间(32°36'N-33°48'N, 110°59'E-111°49'E),地处汉江、丹江交汇处,见图 1。库区属北亚热带大陆性季风气候,年平均气温 15℃~16℃,年均降雨量 800~1000 mm,主要集中在 5 月-10 月,约占全年降雨量的 80%,其中 7 月降雨量最多,约占全年降雨量的 20%^[15]。库区自然植被包括温带常绿针叶林、暖性常绿针叶林、落叶阔叶林、常绿阔叶林、针阔叶混交林、灌丛和草丛等;主要土壤类型有黄棕壤、山地黄棕壤、水稻土、潮土和黄褐土^[16]。

2 研究方法

2.1 样品采集与数据分析

本次工作对丹江口水库水体进行了水质采样与分析。

在库区共设置了 31 个采样点(图 1),采样时间分别为 2012 年 3 月 25 日(枯水期)和 2012 年 8 月 9 日(丰水期),采样深度均为水下 0.5 m。两次野外采样均安排在晴朗无大风的天气进行,以减小水面波动对水质参数的影响,同时确定采样当天有卫星过境,便于获取与采样时间同步的遥感影像。

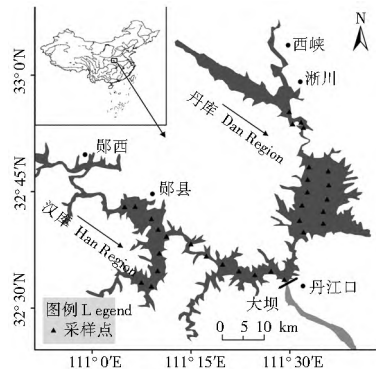


图 1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Dangjiangkou Reservoir

采样过程中,采用 YSI6600(YSI Inc., USA)现场测定了水温(T)、pH 值、浊度(Turb)、溶解氧(DO)、电导率(EC)、总溶解固体(TDS)、铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮($NO_3^- - N$)和叶绿素浓度(Chl_a),采用直径 25 cm 塞克盘测定水体透明度(SD)。样品采集后现场用孔径 0.45 μm 、直径 47 mm 的 Millipore 硝酸纤维滤膜过滤 1000 mL 水样,滤液和原液均用聚乙烯瓶收集带回实验室。

实验室的样品分析工作在采样后一个星期内完成。滤膜过滤前后均经 63℃烘 24 h 称重,过滤前后重量差计算悬浮颗粒浓度(SPM)。化学需氧量(COD_{Mn})采用高锰酸钾滴定法测定,总磷(TP)用过硫酸钾消解钼锑分光光度法测定,采用 MultiN/C 2100(Aanalytik Jena AG., Germany)测定总氮(TN)。

为了辅助遥感影像的反演结果进行丹江口水库水质分析,利用 SPSS19.0 软件对野外采样测定的 14 项水质指标进行了主成分分析。主成分分析是一种既可以减少变量维数,又可以对变量进行分类的广泛应用的多元统计方法,在水质分析中常用于污染源识别^[17-18]。

2.2 遥感影像处理

从中国资源卫星应用中心(<http://www.cresda.com/n16/index.html>)收集了与采样时间同步的两幅 HJ 卫星影像,从中国科学院对地观测与数字地球科学中心的对地观测数据共享平台(<http://ids.ceode.ac.cn/index.aspx>)下载了覆盖丹江口库区的两幅经过精纠正的 Landsat TM 四级影像数据,影像基本信息见表 1。然后对影像数据处理如下。

首先是影像校正。将两幅 TM 影像进行镶嵌得到丹江口库区完整影像,以 TM 影像作为基准影像,对 HJ 卫星影像进行几何校正,使总误差 RMS 控制在 0.5 个像元以内,图像重采样采用最邻近像元法,以避免光谱信息的丢失。为了获取地表真实反射率,减少大气散射、折射等对光谱信息的干扰,运用 Flaash 大气校正模块对遥感影像进行大气校正^[19]。

其次是水体边界提取。采用较为成熟的归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)法,从两幅校

表1 遥感影像基本信息

Table 1 General information of the collected remotely sensed images

遥感器	过境时间	空间分辨率	条带号与行编号	数据级别	数据说明
HJ1A-CCD	2012-03-25	30m	Path3 Row 76	Level2	经过系统几何校正
HJ1B-CCD	2012-08-09	30m	Path7 Row 76	Level2	
Landsat5 TM	2008-03-09	30m	Path125 Row37	Level4	经过几何精校正
Landsat5 TM	2008-03-09	30m	Path125 Row38	Level4	

正影像中分别提取丹江口水库水体边界。NDWI方法由McFeeters于1996年提出^[20],通过非线性拉伸的方式增加地物的绿光波段和近红外波段反射率的差异,使遥感影像中的水体信息和非水体信息之间的对比度加强。水体与陆地信息的分割阈值采用最大类间方差法^[21]计算得到,计算过程在MatlabR2010a软件上实现。

然后,利用水库水体边界进行影像裁剪,得到丹江口水库水面真实反射率。

最后,采用了监督分类的方法,以TM影像为基础进行了丹江口库区土地利用/土地覆盖(Land Use/Land Cover, LULC)类型解译。LULC分类系统参照了中国国土资源部的最新土地利用分类系统,并结合丹江口库区实际土地情况,设置了10种土地利用类型:水体、针叶林、阔叶林、混交林、灌丛、荒草地、沙地、耕地、裸地和城镇。

2.3 反演模型构建

本研究采用了经验反演模型对丹江口水库水体Chl_a浓度、TP浓度和SD进行了遥感反演,因为这三项水质指标是最能反映水体营养状态的参数^[2]。经验反演模型就是将

表2 主成分分析的因子成分矩阵

Table 2 Matrix of factor component of principal component analysis

枯水期	成份				提取比例	丰水期	成份			提取比例
	F1	F2	F3	F4			F1	F2	F3	
TSS	0.85	-0.26	0.23	0.21	0.89	TSS	0.33	0.88	-0.13	0.89
COD _{Mn}	-0.18	0.80	-0.04	0.06	0.69	COD _{Mn}	0.62	0.50	0.34	0.75
T	0.26	-0.25	-0.80	0.13	0.79	T	0.16	-0.67	0.49	0.71
EC	0.93	0.05	-0.12	-0.33	0.98	EC	0.85	-0.48	-0.05	0.96
DO	-0.03	0.58	0.48	0.51	0.83	DO	-0.87	0.36	0.25	0.94
pH	-0.41	-0.82	0.18	-0.08	0.88	pH	-0.95	0.16	0.19	0.97
NH ₄ ⁺ -N	0.66	0.50	-0.21	0.38	0.88	NH ₄ ⁺ -N	0.62	0.49	0.33	0.74
NO ₃ ⁻ -N	0.90	0.26	0.08	-0.19	0.93	NO ₃ ⁻ -N	0.76	-0.36	-0.07	0.70
TN	0.93	0.29	0.04	-0.14	0.98	TN	0.95	0.03	-0.08	0.92
TP	0.26	-0.39	-0.34	0.70	0.82	TP	0.34	0.89	-0.02	0.91
T _{urb}	0.91	-0.17	0.18	0.15	0.92	T _{urb}	0.35	0.87	-0.15	0.90
TDS	0.93	0.07	-0.12	-0.32	0.99	TDS	0.85	-0.48	-0.05	0.96
Chl _a	0.48	-0.47	0.51	0.10	0.73	Chl _a	0.20	0.76	0.33	0.72
SD	-0.86	0.4	-0.03	-0.09	0.91	SD	0.19	-0.25	0.78	0.71
特征值	6.72	2.76	1.46	1.27		特征值	5.81	4.62	1.34	
累积贡献率(%)	47.99	67.71	78.10	87.14		累积贡献率(%)	41.50	74.53	84.08	

注:表中F1至F4分别代表主成分分析中的第一主成分至第四主成分。

3.2 LULC分类结果

LULC具体分类结果见图3。从图中可以看到库区范围内西南地区植被覆盖较好,以灌丛、阔叶林和针阔混交林为主,说明这一地区受人干扰较小。从LULC解译结果中还可以发现,丹江口水库周边地势较为平坦,农田和裸地主要分布在这一地区,也使得这一区域生态环境更加脆弱。库区范围类林地(针叶林、阔叶林、混交林)覆盖面积约占

水质参数的实测值与遥感影像上对应点的光谱反射率进行统计回归,构建回归模型。具体方法是,将31个采样点的实测数据与HJ卫星的B1至B4波段以及各种波段组合在SPSS19.0软件上进行Pearson相关性分析,得到最佳的波段或波段组合;再进行指数模型、线性模型、多项式模型、对数模型和幂函数模型的模型拟合,得到最佳的反演模型;最后利用反演模型进行对应水质参数的定量反演。

以上遥感影像的处理和水质参数的定量反演过程均是在ENVI4.7软件上实现。本文中数据处理的具体操作步骤见图2。

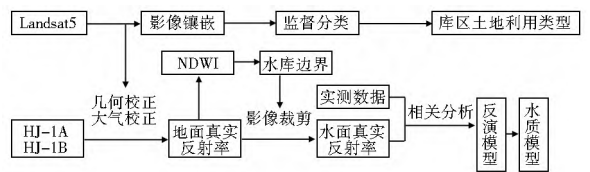


图2 数据处理流程

Fig. 2 Flow chart of processing remote sensing images

3 结果与讨论

3.1 主成分分析结果

对两次采样的14个水质指标进行主成分分析(表2),球形假设检验的结果为 $0 (< 0.05)$,说明各变量之间并非独立,因此可以进行主成分分析。按照特征值大于1的原则,在枯水期提取了4个主成分,累积贡献率87.14%;在丰水期提取了3个主成分,累积贡献率为84.04%。同时,各水质指标的提取比例也达到较高水平,因此认为能够反映原始数据的基本信息。

47.14%,灌丛覆盖面积占16.33%,耕地和裸地面积分别占库区面积的13.0%和12.34%,这一结果与沈泽昊等2006年的解译结果基本一致^[23]。

3.3 反演模型及水质定量反演

通过Chl_a浓度、TP浓度和SD三项水质指标的实测数据与HJ卫星影像各波段和波段组合构建的反演模型见表3,所有模型均达到了极显著水平($P < 0.01$),遥感反演模型

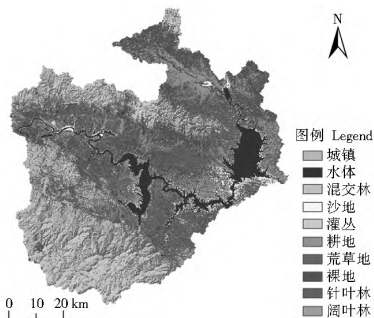


图 3 丹江口库区土地利用/土地覆盖分类

Fig. 3 Land use and land cover distribution of Danjiangkou Reservoir area

和反演指标达到了较好的拟合程度,说明反演模型具有实际应用价值。运用以上各水质参数的反演模型定量反演得到

了三项水质指标在枯水期和丰水期的分布情况,见图 4。

3.3.1 Chl_a 反演结果

从图 4 中可以看到,汉库的 Chl_a 浓度在枯水期和丰水期均高于丹库,其中在枯水期丹库和汉库入库口 Chl_a 浓度明显高于其他地区。水库枯水期 Chl_a 浓度(1.93 μg/L)相对要比丰水期(1.11 μg/L)略高,这主要是由于库区整体 Chl_a 浓度常年都处于相对较低水平(最高 15.26 μg/L),而丰水期水库上游入库流量较大,对 Chl_a 浓度有一定的稀释效果。从枯水期 Chl_a 的反演图中还可以看到,丹库上游 Chl_a 浓度明显高于其他地方,这是因为这一区域下游是一段曲折狭窄的水道,而枯水期丹江入库水量减少,使得这一区域营养物质更易于聚集,促进了藻类的聚集生长。

表 3 各水质参数反演模型

Table 3 Retrieval models of the three water quality variables from HJ 1A/B remote sensing images

水质指标	波段/波段组合	拟合方程	R ²	F	
枯水期	Chl _a /(μg · L ⁻¹)	B2- B1	Chl _a = 0.0244X + 1.8382	0.656	55.366
	TP/(μg · L ⁻¹)	(B2- B4) (lnB2- lnB3)	TP= 0.0143X ² - 0.1634X + 9.733	0.679	29.614
	SD/m	B2+ B3- B1	lnSD= - 0.002X + 2.7302	0.756	89.841
丰水期	Chl _a /(μg · L ⁻¹)	B4	lnChl _a = 0.0017X- 1.2721	0.808	122.289
	TP/(μg · L ⁻¹)	lnB3lnB4	lnTP= - 0.052X ² + 6.308X- 186.648	0.664	27.719
	SD/m	B2+ B4	SD= - 7.936lnX + 67.402	0.682	62.253

注: B1 至 B4 代表 HJ 卫星影像第一到第四波段, X 为波段或波段组合; R² 及 F 分别代表回归方程的决定系数和显著性检验值。

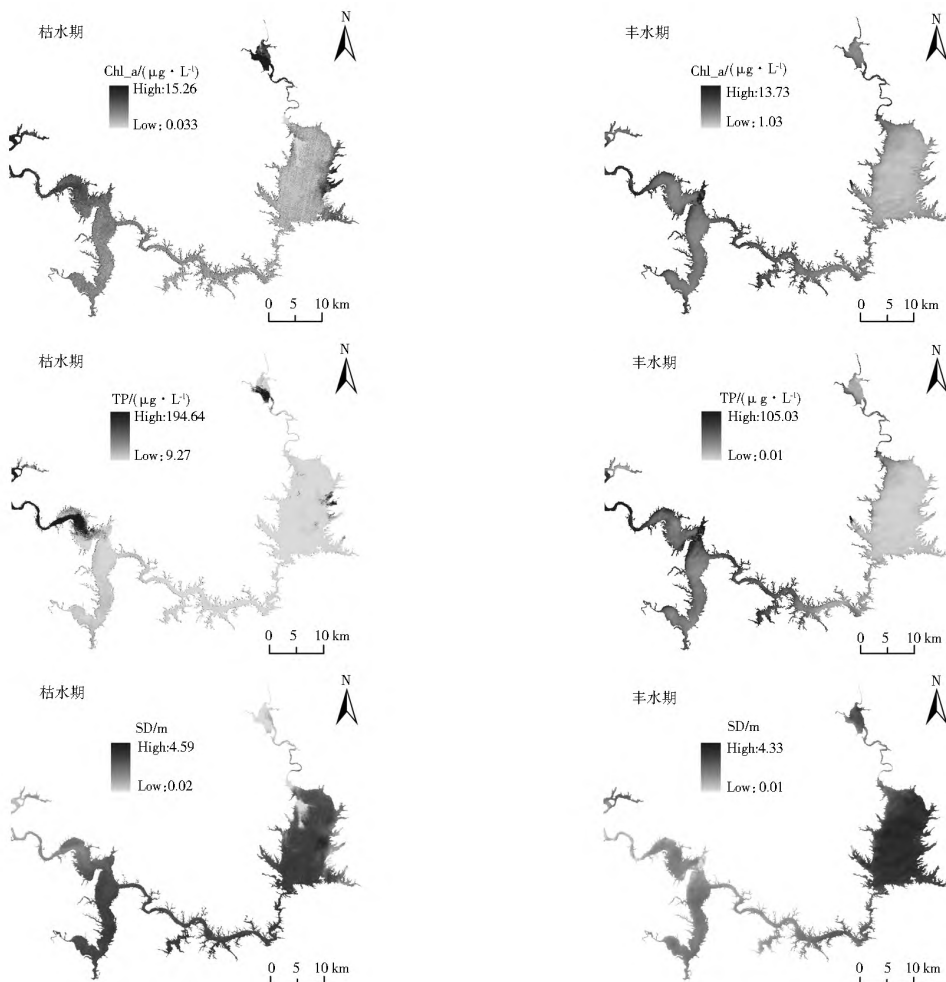


图 4 丹江口水库水体 Chl_a 浓度、TP 浓度和 SD 反演结果

Fig. 4 Spatial distributions of model retrieval results for the three water quality variables (Chl_a concentration, TP concentration, and SD) in Dangjiangkou Reservoir

3.3.2 TP 反演结果

TP 的反演结果表明, 汉库的 TP 浓度在枯水期和丰水期均高于丹库, 枯水期和丰水期水库 TP 平均浓度分别为 $16.39 \mu\text{g/L}$ 和 $36.35 \mu\text{g/L}$ 。从枯水期水库 TP 的反演结果中可以看到, 在丹库和汉库入库口有两条明显的污染带, TP 浓度随着水流方向降低, 说明枯水期水库 TP 主要来源于水库上游地区。结合枯水期主成分分析结果(表 2) 可以看到, 第一主成分 F1 中 TSS、EC、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、Turb 和 TDS 所占的因子载荷较大, 且与 F1 正相关, SD 因子载荷也较大, 但与 F1 呈负相关关系, 表明 F1 主要代表了上游地区春季降雨和融雪所带来的面源污染^[9]。而 TP 和 DO 却与 F4 具有较好的相关性, 说明枯水期水库 TP 来源并不是降雨导致的农业面源污染, 而是主要来源于上游地区的城镇生活污水和工业废水等点源污染^[9,17]。从丰水期水库主成分分析结果来看, TSS、TP、Turb、 NH_4^+-N 和 Chl_a 在 F2 中所占因子载荷较大, 说明丰水期水库 TP 主要来源于农业上化肥的大面积使用所导致的面源污染。另一方面, 从 LU/LC 分类(图 3) 中可以看到丹江口水库周边有大面积耕地和裸地, 但枯水期水库水体仅入库口 TP 浓度较高, 而丰水期水库整体 TP 浓度都相对较高, 特别是沿岸区域, 这也从侧面说明丰水期水库 TP 主要来源是农业面源污染。

3.3.3 SD 反演结果

SD 在两次采样中的平均深度分别为 4.36 m 和 1.70 m , 无论是枯水期还是丰水期, 丹库 SD 都要明显高于汉库, 主要原因是汉库上游泥沙量较大, 而丹库水面较宽阔, 利于泥沙沉积。从 SD 的反演结果中可以看到丹库入库口区域水体透明度较低, 水体十分浑浊, 导致这一现象的原因正是由于这一区域藻类的积累生长, 使得水体叶绿素浓度较高。此外, 从图中还可以看到枯水期丹库水域右岸地区水体透明度较低, 对比图 3 库区土地利用分类图发现, 这一地区分布大面积沙地, 坡度平缓, 而且这片水域水浅, 当水面风浪较大时容易激起水底泥沙, 导致这一区域水体透明度下降。根据丰水期水库 SD 反演结果可以发现, 汉库整体水体透明度都较低, 平均只有 1.70 m 。这主要是由于丰水期野外采样(2012 年 8 月 9 日)前, 丹江口水库及其上游汉江流域经历了一次大范围强降雨过程, 大量泥沙随水流带入了汉库水域。

3.4 水体营养状态评价

Chl_a、TP 和 SD 三项水质指标中的任何一个都可以用水体的营养状态进行评价^[22], 而三项指标中 Chl_a 浓度又比其他两项指标更适合进行水体营养状态评价^[24]。因此, 本文基于 Chl_a 浓度的反演结果采用 Carlson 营养指数(Tropic State Index, TSI)法进行了丹江口水库水体营养状态评价, 结果见图 5。可以看出, 丹江口水库大部分区域处于贫营养或中营养状态, 但在丹库和汉库入库口或狭小水体的部分水域达到了轻度的富营养化状态, 可见水库也面临着一定的水体富营养化威胁。

随着南水北调中线工程的推进, 库区还会新增约 380 km^2 的淹没面积, 主要分布在水库东部和北部地势较平坦地区, 而这一区域主要的土地利用类型是耕地和裸地(图 3), 因此水库面临的面源污染和水土流失问题将更加严峻。

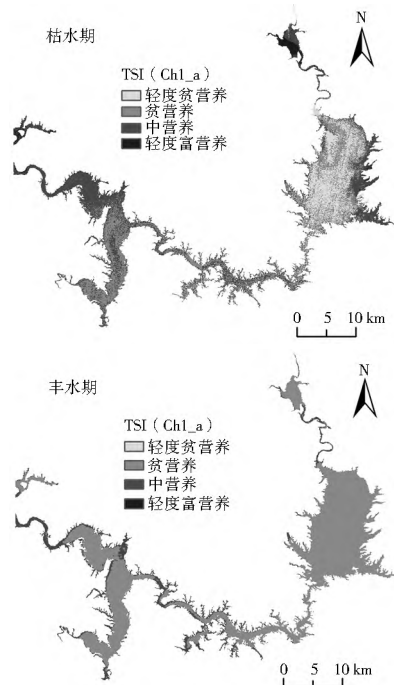


图 5 丹江口水库水体营养状态分布

Fig. 5 Distribution of the TSI (Chl_a) in Dangjiangkou Reservoir

4 结论

本文利用丹江口库区枯水期和丰水期的两幅 HJ 卫星遥感影像, 结合实测的水质参数, 采用经验反演模型对库区水体 Chl_a 浓度、TP 浓度和 SD 进行了定量反演。研究发现, 无论枯水期和丰水期, 丹库和汉库入库口的 Chl_a 浓度和 TP 浓度都高于其他区域, 同时入库口区域的 SD 要低于其他区域, 说明丹江口水库上游汉江流域水质污染情况相对严重。结合主成分分析结果, 认为枯水期库区 TP 主要来源于库区上游城镇生活污水和工业废水等点源污染, 而丰水期农业面源污染是水库 TP 的主要来源。SD 反演结果还表明, 由于汉江上游降雨量大, 水土流失严重, 入库水体泥沙含量较高, 使得汉库水体透明度明显低于丹库。大量的泥沙在水库淤积势必会使得水库的蓄水能力降低, 威胁水库的蓄水安全, 因此水库上游流域水土流失问题应引起重视。

利用 Chl_a 反演结果计算的水体营养状态显示, 丹库和汉库入库口和水体流动性较小或水域面积较狭窄的区域, 部分水域出现了富营养化情况, 可见水库上游地区点源污染较为严重。考虑到水库周边地区多分布耕地和裸地, 生态环境较为脆弱, 存在一定面源污染和水土流失的威胁, 因此应加强这一区域的天然植被恢复、坡改梯、退耕还林还草等生态修复措施, 以保障水库的水质安全。

参考文献(References):

- [1] Li S Y, Zhang Q F. Geochemistry of the Upper Han River Basin, China, 1: Spatial Distribution of Major Ion Compositions and Their Controlling Factors[J]. Applied Geochemistry, 2008, 23(12): 3535-3544.
- [2] 成庆利, 朱铁群. 丹江口水库库区环境质量评价[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 202-205. (CHENG Li qing, ZHU Tie qun. Water Environmental Assessment for the Danjiangkou

- Reservoir[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1): 202-205. (in Chinese)
- [3] Zhang Q F. The South to North Water Transfer Project[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2005, 3: 75-76
- [4] Liu S M, Zhang J, Chen H, et al. Nutrients in the Changjiang and Its Tributaries[J]. Biogeochemistry, 2003, 62(1): 1-18.
- [5] Li S Y, Zhang Q F. Water Chemistry and Water Quality Variation in the Danjiangkou Reservoir, As A Function of Water Management for the Middle Route of South to North Water Divert Project, China[J]. Chinese journal of geochemistry, 2006, 25: 274.
- [6] 张丽丽, 殷峻暹, 蒋云钟. 丹江口水库农业及生态可补水规模研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(2): 24-27. (ZHANG Li li, YIN Jun xian, JIANG Yun zhong. Scale of Agricultural and Ecological Water Supply of Danjiangkou Reservoir [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(2): 24-27. (in Chinese))
- [7] 袁峥, 韩沛. 南水北调中线丹江口水库及汇水支流水质现状与污染防治对策[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(4): 50-53. (YUAN Zheng, HAN Pei. Water Quality Condition and Pollution Control Strategy About Danjiangkou Reservoir and the Main Tributaries for the Middle Line of South to North Water Diversion[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2006, 17(4): 50-53. (in Chinese))
- [8] Li S Y, Zhang Q F. Major Ion Chemistry and Weathering Processes of the Danjiangkou Reservoir, China[J]. Hydrological Sciences Journal, 2010, 55(8): 1385-1395
- [9] Li S Y, Cheng X L, Xu Z F, et al. Spatial and Temporal Patterns of the Water Quality in the Danjiangkou Reservoir, China[J]. Hydrological Sciences Journal, 2009, 54(1): 124-134.
- [10] Wang M, Shi W, Tang J. Water Property Monitoring and Assessment For China's Inland Lake Taihu From MODIS Aquatic Measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(3): 841-854.
- [11] 王海波, 马明国. 基于遥感的湖泊水域动态变化监测研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(5): 674-684. (WANG Hai bo, MA Ming guo. A Review of Monitoring Change in Lake Water Areas Based on Remote Sensing. Remote Sensing Technology And Application, 2009, 24(5): 674-684. (in Chinese))
- [12] Olmanson L G, Bauer M E, Brezonik P L. A 20 year Landsat Water Clarity Census of Minnesota's 10, 000 Lakes[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(11): 4086-4097.
- [13] He W, Chen S, Liu X, et al. Water Quality Monitoring in A Slightly-Polluted Inland Water Body Through Remote Sensing-A Case Study of the Guanting Reservoir in Beijing, China[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2008, 2(2): 163-171.
- [14] Alcantara E H, Stech J L, Lorenzetti J A, et al. Remote Sensing of Water Surface Temperature and Heat Flux Over A Tropical Hydroelectric Reservoir[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(11): 2651-2665.
- [15] 李仁东, 李劲峰, 黄进良. 南水北调对湖北丹江口水库区土地资源的影响[J]. 长江流域资源与环境, 1998, 7(2): 109-114. (LI Ren dong, LI Jing feng, HUANG Jin liang. Application of RS and GIS Techniques To Analyze the Effects of "South to North Water Transfer Project" on the Land Resource in Danjiangkou Area of Hubei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1998, 7(2): 109-114. (in Chinese))
- [16] 金义兴, 沈泽昊, 江明喜. 南水北调中线工程对陆生植物的影响及其对策初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 1995, 4(4): 154-162. (JIN Yi xing, SHEN Ze hao, JIANG Ming xi. The Influence of the Middle Route Plan of "South To North Water Transferring" Project on Terrestrial Plants and the Strategy To It[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1995, 4(4): 154-162. (in Chinese))
- [17] Yang Y H, Zhou F, Guo H C, et al. Analysis of Spatial and Temporal Water Pollution Patterns in Lake Dianchi Using Multivariate Statistical Methods[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 170(1): 407-416.
- [18] Coskun H G, Tanik A, Alganci U, et al. Determination of Environmental Quality of A Drinking Water Reservoir By Remote Sensing, GIS and Regression Analysis[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2008, 194(1): 275-285.
- [19] 吕恒, 江南, 罗淑葱. 基于 TM 数据的太湖叶绿素 a 浓度定量反演[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 472-476. (LV Heng, JIANG Nan, LUO Shu cong. Quantitative Retrieval of Chlorophyll A by Remote Sensing in Taihu Lake Based on TM Data[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(4): 472-476. (in Chinese))
- [20] McFeeters S. 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): 1425-1432
- [21] Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray Level Histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [22] Carlson R E. A Trophic State Index for Lakes[J]. Limnology and Oceanography, 1977, 22(2): 361-369
- [23] 沈泽昊, 张全发, 岳超, 等. 南水北调中线水源区土地利用/土地覆被的空间格局[J]. 地理学报, 2006, 61(6): 633-644. (SHEN Ze hao, ZHANG Quan fa, YUE Chao, et al. The Spatial Pattern of Land Use/Land Cover in the Water Supplying Area of the Middle Route of the South to North Water Diversion (MR-SNWD) Project[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(6): 633-644. (in Chinese))
- [24] Osgood R A. Using Differences Among Carlson's Trophic State Index Values in Regional Water Quality Assessment[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1982, 18(1): 67-74.