

基于 HJ-CCD 和 MODIS 的吉林省中西部湖泊透明度反演对比*

马建行^{1,2}, 宋开山^{1**}, 邵田田^{1,2}, 赵莹¹, 温志丹¹

(1: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 水体透明度能够反映光在水体中的穿透程度, 影响水生植被及以光为依赖条件的水生生物的分布, 获取透明度的传统方法是采用透明度盘进行测量, 但也可以通过遥感方法获得。环境减灾卫星是专门用于环境与灾害监测预报的小卫星星座, 影像覆盖范围广, 空间、时相分辨率较高, 可以为水环境遥感提供较好的数据源。MODIS 数据在近岸水体和内陆大型湖泊水环境监测中也有广泛应用, 它的时相分辨率也很高, 但空间分辨率低。利用 HJ-1A 卫星 CCD 数据和 MODIS 日反射率产品 (MOD09GA), 以 2012 年 9 月吉林省石头口门水库、二龙湖、查干湖、月亮泡等地的实测透明度为基础 (实测点数 74 个, 最小值为 0.134 m, 最大值为 1.410 m, 平均值为 0.488 m), 根据灰色关联度选取构建模型的波段组合, 建立水体透明度反演模型。HJ1A-CCD 数据与 MOD09GA 数据建立的模型 R^2 分别为 0.639 和 0.894, 均方根误差 (RMSE) 分别为 0.248 和 0.135, 模型验证的平均相对误差 (MRE) 分别为 17.1% 和 9.5%, RMSE 分别为 0.207 和 0.089。MODIS 数据以其较高的辐射分辨率使模型精度较高, 但是 HJ 数据在应用于透明度小于 1 m 的水体时精度也较高 (MRE = 13.5%, RMSE = 0.066)。HJ-CCD 数据在空间分辨率上的优势使其能够获得透明度空间分布的细节信息。比较两者反演得到的湖泊平均透明度, 结果较为一致。

关键词: 水体透明度; 遥感; HJ-CCD; MODIS; 湖泊

Comparison of water transparency retrieving of lakes in the mid-east part of Jilin Province based on HJ-CCD and MODIS imagery

MA Jianhang^{1,2}, SONG Kaishan^{1**}, SHAO Tiantian^{1,2}, ZHAO Ying¹ & WEN Zhidan¹

(1: *Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, P.R.China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

Abstract: Water transparency is widely used as an indicator for lake eutrophication assessment. It reflects the transmission of light in water, and has significant effects not only on light transmitting for the submerged vegetation but also on hydrobioses that live on the existence of light. Water transparency is measured by a Secchi disk (SD) traditionally. It could also be derived remotely by satellite imaging. The Environment and Disaster Monitoring Satellite Constellation (Huan Jing-1A or HJ-1A) series are used for environment monitoring and disaster prediction. With a wide swath, relative high spatial resolution and short revisit period, the image can provide valuable data for aquatic environment monitoring. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) is another dataset widely used which is suitable for environment monitoring in coastal and large inland water. It has high temporal resolution but low spatial resolution. Combining with *in situ* measured SDs over the Reservoirs Shitoukoumen and Xinlicheng, Lakes Erlong, Chagan, Yueliang, Dakuli and Talahong sampled in September 2012, we developed and validated two models for estimating SD based on the data of HJ-1A and MODIS daily surface reflectance (MOD09GA, spatial resolution is 500 m), respectively. The appropriate band combinations for the model development were determined by gray relative analysis. The results indicate that the models performed well with both HJ-CCD and MODIS reflectance product ($R^2=0.639$, $RMSE=0.248$ and $MRE=17.1\%$ for HJ-CCD; and $R^2=0.894$, $RMSE=0.135$ and $MRE=9.5\%$ for MOD09GA). Due to its high radiometric resolution, MODIS data performed

* 国家自然科学基金面上项目 (41171293) 资助。2015-08-08 收稿; 2015-09-29 收修改稿。马建行 (1990~), 男, 硕士研究生; E-mail: 1113773859@qq.com.

** 通信作者; E-mail: songks@iga.ac.cn.

better than HJ-CCD data. However, when applied the models to lakes that the water transparency is lower than 1 m, the accuracy of HJ-CCD data is acceptable ($MRE=13.5\%$, $RMSE=0.066$). The advantage in the spatial resolution of HJ-CCD data makes it possible to obtain detailed information on the spatial distribution of the transparency. Compared with the average lake transparencies derived from the two types of data, the results were consistent. This result provided a guideline for the SD monitoring in the lakes at a region-space scale.

Keywords: Water transparency; remote sensing; HJ-CCD; MODIS; lake

湖泊在经济、旅游、娱乐以及生物多样性保护等方面承担着多种非常重要的功能^[1],但是这些功能的实现很大程度上受到湖泊水质、营养化程度的影响. 水体透明度作为反映内陆湖泊营养化程度常用的指标之一,因其测量方法简单而被广泛使用,同时,水体透明度与真光层深度之间有很好的相关关系,因此其在湖泊生态中也有重要意义. 但是大区域的透明度实地重复性测量较难实现,因而在制定区域监测计划时通常会牺牲空间覆盖,只进行少量监测点的监测以实现时间上的重复性^[2]. 国内很多湖泊在进行透明度测量时也通常设定数个监测点以连续性观测^[3-4].

遥感技术的发展为区域环境监测提供了新的手段,利用遥感方法可以实现大区域的湖泊水体透明度监测,且能实现时间上的连续性. 国内外有很多利用遥感进行透明度反演的研究,使用的反演方法多为经验方法^[2,5-9]和半解析方法^[10-11]. Kloiber 等^[2]利用皮尔逊相关系数矩阵和多元逐步回归等统计分析方法,将 Landsat TM1、TM1/TM3 作为构建透明度反演模型的参数,建立透明度与影像像元值的经验模型, Olmanson 等^[6]利用该模型构建方法,采用 Landsat MSS、TM、ETM+ 的影像及实测透明度数据对明尼苏达州 10000 多个面积大于 8 hm² 的湖泊水体透明度进行了反演,分析了其 20 年的时空变化情况;由于他们使用的实测透明度数据大多没有 GPS 点位信息,因而取湖泊中心处的像元值与透明度进行回归分析,这样容易造成匹配上的误差. 韩留生等^[10]根据透明度与水体漫衰减系数之间的关系建立了透明度反演的半分析方法,将其应用到了近岸水体透明度反演中;Doron 等^[11]利用 MERIS、MODIS 和 SeaWiFS 数据,对比了半分析方法和经验方法的反演结果,发现经验方法对大气校正不敏感,具有更强的鲁棒性. 由此可见,虽然半分析方法考虑了透明度与水体固有光学特性和表观光学特性之间的关系,能够取得较好的反演结果,但是经验方法同样能取得较好的反演效果,且计算更简单.

在水体透明度反演中,利用国内卫星遥感数据进行研究的较少. HJ 卫星星座系统是世界上第一个专门用于环境与灾害监测预报的小卫星星座. HJ-1A/1B 卫星分别搭载了相同的 CCD 相机,可见光与近红外范围内的波段设置与 TM 传感器前 4 个波段相近,空间分辨率也相同,但是 HJ 卫星的扫描幅宽却远大于 Landsat 卫星,达到 700 km. HJ-1A/1B 卫星组网后重访周期仅为 2 d,时相分辨率高. HJ 卫星在中小型内陆湖泊水体的遥感监测中有很大的应用潜力^[12]. 利用环境卫星数据进行水体透明度反演的研究比较少,本文拟利用 HJ-CCD 数据建立透明度反演的经验模型,分析 HJ-CCD 数据在透明度反演中的适用性;同时利用 MODIS 500 m 日反射率产品 MOD09GA 构建反演模型,对比两者反演结果,分析不同分辨率下透明度反演结果的差异. 由于 HJ-CCD 数据和 MODIS 数据均有很高的时相分辨率,本文的研究方法可以为区域水体透明度的快速监测提供借鉴.

1 数据与方法

1.1 数据

2012 年 9 月 15—26 日分别对吉林省中西部地区水体石头口门水库(STKM)、二龙湖(ELH)、新立城水库(XLC)、月亮泡(YLP)、他拉红泡(TLH)、查干湖及其北湖(CGH)、大库里泡(DKL)进行了水样采集,采样点共 74 个. 采集过程中使用 GPS 进行定位,使用塞氏盘测量透明度. 按湖泊空间位置分为长春周边和吉林西部两组,长春周边包括上述前 3 个地区,吉林西部包括后 4 个地区. 由于石头口门水库在本文所用 HJ 卫星影像中未完全显示,4 个采样点无法使用,所以与 HJ-CCD 数据对应的采样点数共 70 个. MOD09GA 数据受空间分辨率限制,一些采样点所在像元受陆地影响较大,采用目视的方法进行了剔除,因而与 MOD09GA 数据对应的采样点数共 63 个. 各湖泊实测透明度数据统计信息见表 1,采样点分布见图 1.

表 1 各湖泊实测透明度统计结果
Tab.1 Statistic result of the measured transparency of each sampling lake

采样点	湖泊面积/km ²	采样日期	点数	平均值/m	最小值/m	最大值/m	标准差
石头口门水库	73.3	2012-09-15	12	0.5437	0.474	0.605	0.061
二龙湖	99.3	2012-09-16	13	1.2420	0.840	1.410	0.172
新立城水库	52.2	2012-09-19	12	0.7812	0.710	0.860	0.055
月亮泡	117.9	2012-09-24	6	0.5267	0.480	0.557	0.026
他拉红泡	13.5	2012-09-24	5	0.2542	0.215	0.290	0.029
查干湖北湖	33.4	2012-09-25	6	0.1850	0.145	0.300	0.058
大库里泡	15.1	2012-09-25	5	0.1736	0.134	0.202	0.029
查干湖	257.0	2012-09-26	15	0.1976	0.162	0.235	0.022

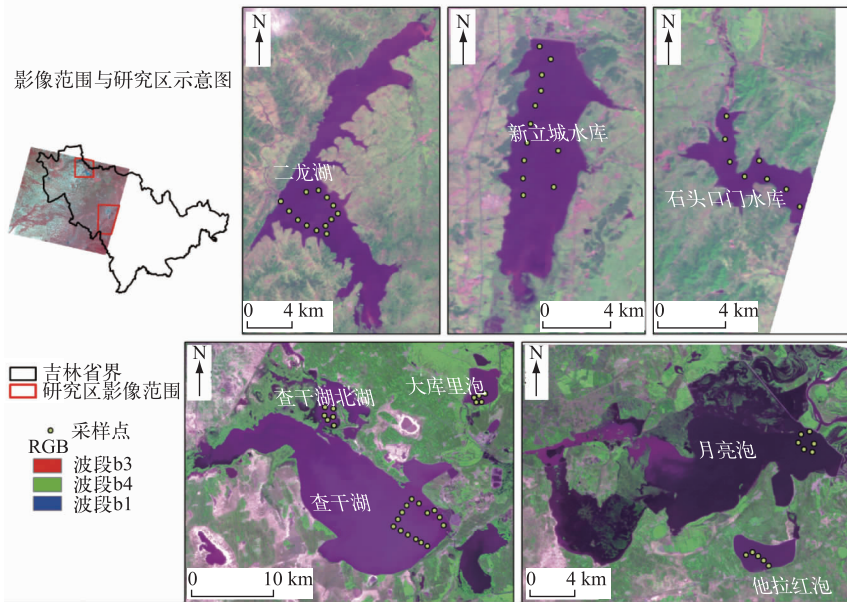


图 1 吉林省中西部湖泊采样点的空间分布

Fig.1 Distribution of sampling sites of lakes in the mid-east part of Jilin Province

遥感影像选取时要考虑成像时间与采样时间比较接近且受云的影响较小. 选取的 HJ 卫星影像成像时间是 2012 年 9 月 20 日, 为 HJ-1A 卫星 CCD1 传感器数据. MOD09GA 选择了与采样时间同步的数据, 但受云的影响吉林西部仅选取 9 月 24 日的数据. HJ-1A 数据来源于中国资源卫星应用中心 (<http://www.cresda.com>), MODIS 数据来源于 NASA LAADS Web (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>). 从中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>) 获得研究区附近气象站点的降雨量数据, 查到长春周边在 9 月 15-20 日之间没有明显降雨, 吉林西部在 9 月 20-26 日之间没有明显降雨, 且考虑到湖泊在 9 月富营养化程度相对较高, 水体透明度相对稳定, 可以认为在该时间段内水体透明度没有发生巨大变化. Kloiber 等^[13]指出采样时间与影像成像时间同步或相差 1 d 时建立经验模型精度会较高, 但是这种情况在实际中较难实现, 因此水体透明度相对稳定时可以将时间窗口扩大到 7 d, 其结果精度不会有很大改变, 因而可以认为本文所用 HJ 数据能够满足建立模型的要求.

1.2 方法

本研究首先将遥感数据和实测透明度数据进行灰色关联度分析, 对 HJ 数据和 MOD09GA 数据分别选取

与透明度关联度较高的波段组合,然后利用选取的波段与透明度进行多元线性回归分析,建立反演模型,最后对比两者的反演结果.

1.2.1 遥感数据处理 利用同区域的 Landsat8 OLI 影像对 HJ 数据进行几何校正,几何校正精度高于 1 个像元. HJ 数据未进行大气校正. 提取采样点对应的 HJ 数据像元值时,将采样点所在像元及其周围相邻 8 个像元的值取平均. 利用 MRT 对 MOD09GA 数据进行处理. HJ 数据只有 4 个波段,因而 MOD09GA 也选取了与之对应的 4 个波段. 用 b1、b2、b3、b4 分别代表蓝、绿、红、近红外波段.

1.2.2 灰色关联度分析 灰色系统理论最早由邓聚龙^[14]提出,它利用关联度来度量因素之间的关联性,其基本思想是认为刻划因素的变量所表示的曲线的几何形状越接近,则因素发展变化态势越接近,它们之间的关联程度就越大^[15]. 在邓氏关联度的基础上很多学者提出了一些新的关联度计算方法. 由于每种关联度的计算方法均存在一些缺陷,所以实际应用中可以多计算几种关联度进行综合分析^[15]. 在以往透明度反演的研究中,有利用灰色关联分析进行波段选取的^[16-17],但是都只采用了一种灰色关联度用于波段选取. 本文采用了邓氏^[14]关联度、梅振国^[18]提出的绝对关联度和曹明霞^[19]改进的广义绝对关联度 3 种关联度,将透明度作为目标因素,b1、b2、b3、b4、1/b1、1/b2、1/b3、1/b4、b1/b2、b1/b3、b1/b4、b2/b3、b2/b4、b3/b4 作为相关因素,计算目标因素与各相关因素间的关联度. 关联度计算之前要对数据进行无量纲化处理,使数据具有可比性,文中采用了均值化变换方法,具体见式(1), $x(i)$ 为原始数据序列中第 i 个元素, \bar{x} 为数据序列的均值, $x'(i)$ 为变换后的元素. 根据上述 3 种关联度的定义,计算各相关因素与目标因素间的 3 种关联度,根据结果进行综合考虑,选取参与模型建立的因素.

$$x'(i) = x(i)/\bar{x} \quad i = 0, 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

1.2.3 反演模型建立 在 SPSS 中进行多元线性回归,建立透明度的反演模型. 对于 HJ 数据,选取 50 个点建立模型,20 个点用于精度验证,对于 MOD09GA 数据,选取 45 个点建立模型,18 个点用于精度验证. 验证时采用相对误差(RE)、平均相对误差(MRE)、均方根误差(RMSE)来评价模型精度,如式(2)~(4),式中 Y 为真值, Y^* 为估计值. HJ 数据和 MOD09GA 数据建立的模型分别记为 HJ 模型和 MOD 模型.

$$RE_i = \frac{|Y_i - Y_i^*|}{Y_i} \quad (2)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RE_i \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_i^*)^2} \quad (4)$$

对研究中选取的 9 月 20 日的 HJ 卫星影像做 3×3 窗口的均值平滑处理,然后将 HJ 模型应用于该影像,将 MOD 模型应用于 9 月 20 日的 MOD09GA 数据,反演研究区的水体透明度. 由于二龙湖在 9 月 20 日 MOD09GA 数据中受到云的影响,因而针对其单独使用了 9 月 19 日的数据. 选取一部分湖泊对 HJ 模型和 MOD 模型的反演结果进行对比,对比时首先依据 HJ 数据利用 NDWI 指数^[20]提取水体边界,然后将水体边界向内缓冲 500 m,计算缓冲后边界内部水体像元的透明度反演结果的平均值,利用该平均值比较两个模型的反演结果.

2 结果与讨论

2.1 灰色关联度分析结果

透明度与各因素间的关联度如表 2. 选择各关联度中与透明度关联性最大的前 5 个因素(表 3). 对于 HJ 数据,b1/b3 与透明度的 3 种关联度都最大,且相关系数也最大,b1/b2 与透明度的邓氏关联度和梅振国绝对关联度位于第 2 位,b2/b3 与透明度的曹明霞改进的广义绝对关联度和梅振国绝对关联度位于第 3 位,综合考虑 3 种关联度,使用 b1/b3、b1/b2、b2/b3 3 个波段组合构建 HJ 模型.

对于 MOD09GA 数据,1/b3 与透明度的邓氏关联度和曹明霞改进的广义绝对关联度最大,b2/b3 与透明度的梅振国绝对关联度最大. 3 个关联度第 2 位至第 5 位中,每一位的因素各不相同,但是 b2/b3、1/b2 出现的次数最多,1/b1、b1/b3 出现的次数次之,但是 1/b1 比 b1/b3 的邓氏关联度大. 综上所述,可以从 1/b3、b2/

b3、1/b2、1/b1 选择组合用于模型构建. 文中拟选取 b2/b3、1/b2、1/b1 用于模型构建,同时因为 b1、b2 与透明度的相关系数大于它们的倒数 1/b1、1/b2. 因而最终使用 b2/b3、b2、b1 构建 MOD 模型.

表 2 灰色关联度分析结果

Tab.2 Results of gray system analysis

波段	HJ-CCD 数据				MOD09GA 数据			
	邓氏关联度	改进的广义绝对关联度	绝对关联度	相关系数	邓氏关联度	改进的广义绝对关联度	绝对关联度	相关系数
b1	0.667	0.526	0.906	-0.267	0.571	0.437	0.840	-0.647
b2	0.619	0.464	0.883	-0.561	0.587	0.437	0.868	-0.689
b3	0.618	0.481	0.898	-0.621	0.568	0.474	0.873	-0.756
b4	0.671	0.501	0.906	-0.026	0.646	0.502	0.753	-0.320
1/b1	0.676	0.504	0.909	0.188	0.792	0.731	0.848	0.558
1/b2	0.706	0.538	0.888	0.478	0.796	0.692	0.882	0.651
1/b3	0.712	0.601	0.902	0.548	0.827	0.801	0.885	0.785
1/b4	0.658	0.532	0.903	0.000	0.697	0.716	0.747	0.260
b1/b2	0.712	0.563	0.948	0.701	0.697	0.504	0.912	-0.279
b1/b3	0.718	0.625	0.954	0.777	0.726	0.590	0.916	0.628
b1/b4	0.666	0.549	0.910	-0.308	0.605	0.565	0.738	-0.461
b2/b3	0.689	0.565	0.945	0.325	0.754	0.653	0.944	0.921
b2/b4	0.630	0.483	0.889	-0.630	0.621	0.594	0.741	-0.424
b3/b4	0.628	0.488	0.900	-0.701	0.600	0.535	0.752	-0.592

表 3 关联度前 5 位排序*

Tab.3 Top 5 of each gray correlation

数据类型	关联度类型	1	2	3	4	5
HJ-CCD	邓氏关联度	b1/b3	b1/b2	1/b3	1/b2	b2/b3
	改进的广义绝对关联度	b1/b3	1/b3	b2/b3	b1/b2	b1/b4
	绝对关联度	b1/b3	b1/b2	b2/b3	b1/b4	1/b1
	相关系数	b1/b3	b3/b4	b1/b2	b2/b4	b3
MOD09GA	邓氏关联度	1/b3	1/b2	1/b1	b2/b3	b1/b3
	改进的广义绝对关联度	1/b3	1/b1	1/b4	1/b2	b2/b3
	绝对关联度	b2/b3	b1/b3	b1/b2	1/b3	1/b2
	相关系数	b2/b3	1/b3	b3	b2	1/b2

* 表 2、3 中邓氏关联度表示邓聚龙提出的关联度,改进的广义绝对关联度表示曹明霞提出的改进的广义绝对关联度,绝对关联度表示梅振国提出的绝对关联度,相关系数表示皮尔逊相关系数.

2.2 反演模型构建结果及影响因素

通过上述分析,根据所选的波段组合利用 SPSS 软件进行多元线性回归,构建的 HJ 模型和 MOD 模型分别为:

$$\text{透明度}_{HJ} = -12.247 \text{ b1/b2} + 14.287 \text{ b1/b3} - 15.162 \text{ b2/b3} + 13.154 \quad (R^2 = 0.639, RMSE = 0.248)$$

$$\text{透明度}_{MOD} = 23.503 \text{ b1} - 17.410 \text{ b2} + 1.653 \text{ b2/b3} - 1.373 \quad (R^2 = 0.894, RMSE = 0.135)$$

MOD 模型的 R^2 明显高于 HJ 模型, $RMSE$ 低于 HJ 模型,这是因为所用 MOD 09GA 数据成像时间与采样时间同步,时间变化因素影响小. MOD 模型的精度较高, MRE 为 9.5%, $RMSE$ 为 0.089. HJ 模型的 MRE 为 17.1%, $RMSE$ 为 0.207(图 2).

HJ 模型在透明度小于 1 m 时精度较高,但是透明度大于 1 m 时模型会低估. 去除透明度大于 1 m 的点后其 MRE 为 13.5%, $RMSE$ 为 0.066. HJ 模型在透明度大于 1 m 时出现低估的现象一方面可能与其辐射分辨

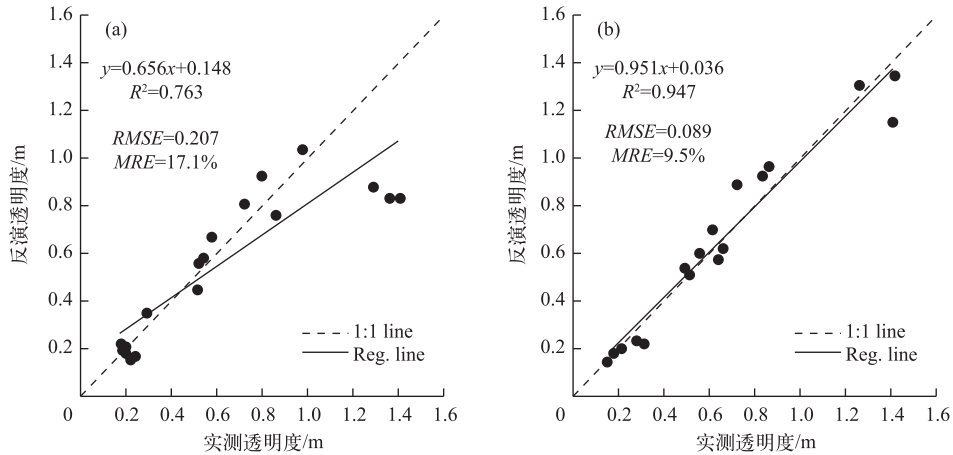


图2 实测与反演透明度对比(a: HJ模型;b: MOD模型)

Fig.2 Comparison of retrieved transparency with *in-situ* transparency (a: HJ-Model;b: MOD-Model)

率较低有关,另一方面可能与其未做大气校正有关.透明度高时,水体的离水辐射信号较弱,受大气影响较大,如果传感器辐射分辨率低,则不容易探测到该信号.我们利用 ENVI 中的快速大气校正 (QUAC) 模块对 HJ 卫星数据进行简单的大气校正,但是使用大气校正后的数据建立的 HJ 模型仍出现该现象,因此认为 HJ 模型出现该现象与其辐射分辨率低的关系比较大. MODIS 的辐射分辨率为 12 bit,而 HJ-CCD 的辐射分辨率只有 8 bit,因而 MODIS 更能捕捉到微弱的离水辐射信号.

2.3 HJ 模型与 MOD 模型反演结果对比

将构建的模型应用于影像,可以进行区域水体透明度的反演.本文选取了 10 个面积较大的水体(除了前述 7 个湖泊,还有新庙泡(XMP)、卡伦湖(KLH)和太平池水库(TPC)),对比 HJ 模型和 MOD 模型的反演结果(图 3).考虑到 HJ 数据和 MOD09GA 数据的空间分辨率相差较大,从图中可以看出多数水体的透明度反演结果比较一致,仅查干湖主湖(CGH)、二龙湖(ELH)、石头口门水库(STKM)相差较大. MOD 模型反演的查干湖主湖透明度高于 HJ 模型,与实测透明度相比 HJ 模型的反演结果比较接近实测值.二龙湖的反演结果差别较大,MOD 模型反演结果明显大于 HJ 模型的反演结果,由于实测的二龙湖透明度平均值大于 1 m,而 HJ 模型在透明度大于 1 m 时会低估,因而 MOD 模型的反演结果更接近于实际情况,且 MOD 模型的反演结果与实测透明度也比较接近.石头口门水库的 HJ 模型反演结果比较接近实测值,因为石头口门水库形状狭长且弯曲,造成水体像元值容易受到陆地的影响,导致反演的透明度偏低.

按照 1.2.3 部分所述计算每个湖泊反演的透明度取平均值(二龙湖除外),对比 HJ 模型和 MOD 模型的反演结果,可以看出 HJ 模型和 MOD 模型的结果比较一致(图 4).按照平均相对误差的计算方法计算两者差异,得到其平均相对偏差为 23.3%.

虽然 HJ 模型对于透明度大于 1 m 的湖泊不太适用,但是由于 HJ-CCD 数据空间分辨率远高于 MODIS 数据,因而可以获得湖泊透明度空间分布的细节信息(图 3).从月亮泡反演结果(图 3a)可以看出,其西部河流入口处透明度发生了较大的变化,从 HJ 模型的反演结果中可以得到透明度详细的空间分布情况,但是 MODIS 数据受空间分辨率的限制只能得到透明度的空间变化趋势,在需要透明度空间分布的细节信息或者湖泊面积较小时,MODIS 数据不能满足应用需求.

2.4 吉林省水体透明度的空间分析

从图 3 可以看出,吉林省西部的水体透明度较低(图 3a,b),特别是查干湖、大库里泡透明度较低,而月亮泡透明度较高,但是其西部即洮儿河入口处透明度较低,可能是由于河流携带泥沙等悬浮物造成的;长春市周边的水体透明度较高(图 3c~g),二龙湖透明度整体最高.这一方面与两个地区水体性质不同有一定关系,吉林省西部的查干湖、新甸泡集水区均为盐碱化农田和牧场,湖泊水质为苏打型盐碱水,叶绿素浓度

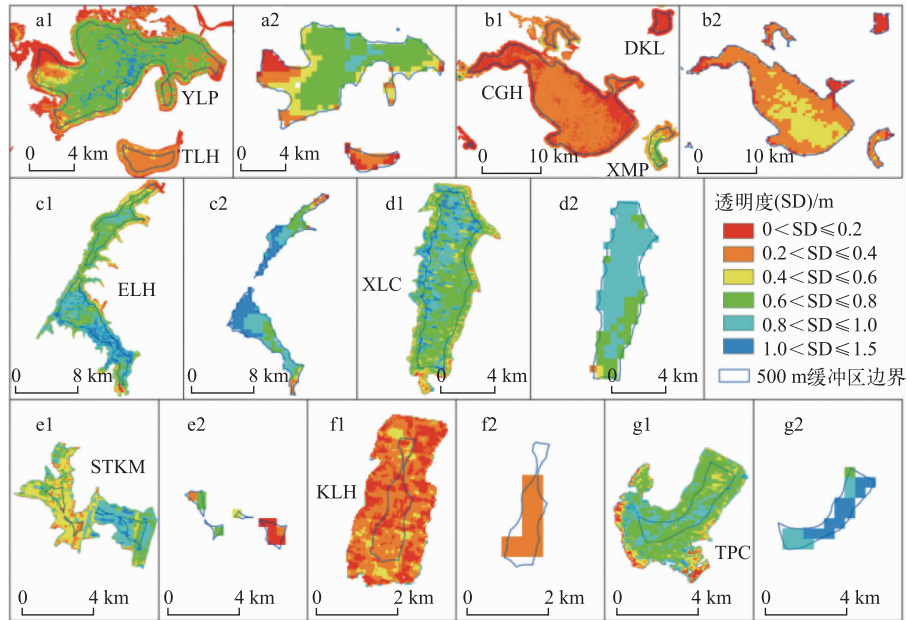


图 3 HJ 模型和 MOD 模型反演结果对比(X1: HJ 模型; X2: MOD 模型, X=a、b、...、g)

Fig.3 Comparison of transparency retrieved from HJ-Model and MOD-Model

(X1: HJ-Model; X2: MOD-Model, X=a, b, ..., g)

较低,多泥沙悬浮^[21],而长春市周边的水库多为淡水,水体光学特性受到非色素颗粒物和浮游植物色素的共同作用^[22],从前人的研究中可以发现查干湖水体透明度要低于长春市周边的一些水库^[23-24];另一方面长春市周边的水库如石头口门水库、新立城水库均向长春市进行供水,因而在管理方面要比吉林西部地区有更多的投入,水质也相应较好。

3 结论

本文以吉林省部分湖泊实测的透明度为基础,利用 HJ 卫星 CCD 和 MODIS 的 500 m 日反射率产品遥感数据,采用灰色关联度分析方法,选取与透明度关联度较高的波段组合,建立透明度反演模型,得出如下结论:

(1)HJ-CCD 和 MODIS 数据均可应用于内陆湖泊水体透明度的反演,且两者建立的模型精度均较高,反演结果一致性较好。

(2)受辐射分辨率的限制,HJ-CCD 数据在反演透明度较高的水体时会产生较大的误差。

考虑到 HJ-CCD 大空间覆盖范围、较高空间分辨率和短重访周期的特点,利用该传感器监测内陆湖泊水体透明度的时空分布与变化具有较大优势。但本文仅是初步的研究结果,在后期的研究中还需补充观测,针对内陆水体复杂的光学特性,综合考虑水体透明度与其他水体光学特性之间的关系,探讨建立解析、半解析反演模型,以发挥 HJ 卫星 CCD 传感器在内陆湖泊水体中的遥感监测潜力。

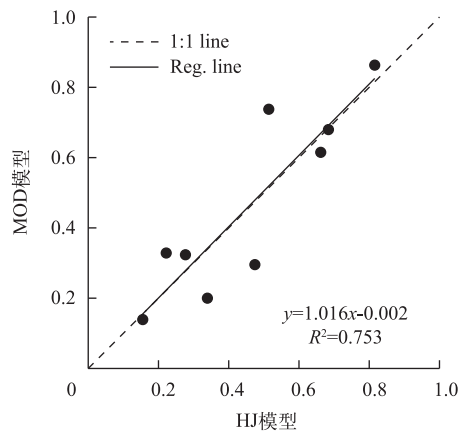


图 4 HJ 模型和 MOD 模型反演湖泊平均透明度结果对比

Fig.4 Comparison of the mean transparency of each lake retrieved from HJ-Model and MOD-Model

4 参考文献

- [1] Jørgensen SE, Löffler H, Rast W *et al.* Lake and reservoir management. Elsevier, 2005.
- [2] Kloiber SM, Brezonik PL, Bauer ME. Application of Landsat imagery to regional-scale assessments of lake clarity. *Water Research*, 2002, **36**(17): 4330-4340.
- [3] 韩晓霞, 朱广伟, 吴志旭等. 新安江水库(千岛湖)水质时空变化特征及保护策略. *湖泊科学*, 2013, **25**(6): 836-845. DOI 10.18307/2013.0607.
- [4] 江 辉. 鄱阳湖透明度遥感反演及其时空变化研究. *中国农村水利水电*, 2012, (1): 30-33.
- [5] Olmanson LG, Kloiber SM, Bauer ME *et al.* Image processing protocol for regional assessments of lake water quality. Water Resources Center Technical Report, 2001: 14.
- [6] Olmanson LG, Bauer ME, Brezonik PL. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(11): 4086-4097.
- [7] McCullough IM, Loftin CS, Sader SA. Combining lake and watershed characteristics with Landsat TM data for remote estimation of regional lake clarity. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **123**: 109-115.
- [8] McCullough IM, Loftin CS, Sader SA. High-frequency remote monitoring of large lakes with MODIS 500m imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **124**: 234-241.
- [9] 邬国锋, 刘耀林, 纪伟涛. 基于 TM 影像的水体透明度反演模型——以鄱阳湖国家自然保护区为例. *湖泊科学*, 2007, **19**(3): 235-240. DOI 10.18307/2007.0302.
- [10] 韩留生, 陈水森, 陈修治等. 以改进的半分析光谱模型反演近海岸透明度. *光谱学与光谱分析*, 2014, **34**(2): 477-482.
- [11] Doron M, Babin M, Hembise O *et al.* Ocean transparency from space: Validation of algorithms estimating Secchi depth using MERIS, MODIS and SeaWiFS data. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(12): 2986-3001.
- [12] Yu ZF, Chen XL, Zhou B *et al.* Assessment of total suspended sediment concentrations in Poyang Lake using HJ-1A/1B CCD imagery. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, **30**: 295-304.
- [13] Kloiber SM, Brezonik PL, Olmanson LG *et al.* A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multi-spectral data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **82**(1): 38-47.
- [14] 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武汉: 华中工学院出版社, 1987.
- [15] 吕 锋, 刘 翔. 七种灰色系统关联度的比较研究. *武汉工业大学学报*, 2000, **22**(2): 41-43.
- [16] 赵碧云, 贺 彬, 朱云燕等. 滇池水体中透明度的遥感定量模型研究. *环境科学与技术*, 2003, **26**(2): 16-17.
- [17] 王爱华, 史学军, 杨春和等. 基于 CBERS 数据的农区水体透明度遥感模型研究. *遥感技术与应用*, 2009, **24**(2): 172-179.
- [18] 梅振国. 灰色绝对关联度及其计算方法. *系统工程*, 1992, **10**(5): 43-44.
- [19] 曹明霞. 灰色关联分析模型及其应用的研究[学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [20] MacFeeters SK. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water feature. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, **17**(7): 1425-1432.
- [21] 杨富亿. 查干湖的综合开发与利用. *资源开发与市场*, 1998, **14**(6): 247-249.
- [22] 李 方, 徐京萍, 何艳芬等. 长春市石头口门水库颗粒物光谱吸收特性. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 280-287. DOI 10.18307/2009.0218.
- [23] 宋开山, 张 柏, 王宗明等. 半干旱区内陆湖泊透明度高光谱估测模型研究——以松嫩平原查干湖为例. *水科学进展*, 2006, **17**(6): 790-796.
- [24] 徐京萍, 张 柏, 蔺 钰等. 结合高光谱数据反演吉林石头口门水库悬浮物含量和透明度. *湖泊科学*, 2007, **19**(3): 269-274. DOI 10.18307/2007.0307.