

基于 VIIRS 数据洪泽湖悬浮物浓度估算算法研究

曹志刚^{1,2}, 段洪涛^{1*}, 崔海山³, 马荣华¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 广州大学 地理科学学院, 广东 广州 510006)

摘要: 基于 2012~2015 年洪泽湖 4 次星地同步试验数据, 建立了较高精度的水体悬浮物浓度单波段 (671 nm) 模型 ($R^2 = 0.74$, $RMSE = 8.58$ mg/L), 并进行了验证 ($R^2 = 0.72$, $RMSE = 11.98$ mg/L); 然后, 将该算法成功应用到了 2012~2015 年 464 景 VIIRS 无云影像上. 结果表明, 洪泽湖悬浮物浓度呈现春夏低、秋冬高的季节特征和东、中部高, 西、北部低的空间分布特征; 在年际变化尺度上, 悬浮物浓度年均值呈现较小的减少趋势. 总体来说, VIIRS 在浑浊水体悬浮物浓度上表现了较好的探测能力, 在湖泊水色遥感领域具有较大潜力.

关键词: 可见光红外成像辐射计 (VIIRS); 悬浮物 (SPM); 洪泽湖; 真实性检验; 遥感

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

Remote estimation of suspended matters concentrations using VIIRS in Lake Hongze, China

CAO Zhi-Gang^{1,2}, DUAN Hong-Tao^{1*}, CUI Hai-Shan³, MA Rong-Hua¹

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou, 510006, China)

Abstract: Based on 86 satellite-ground synchronous samples taken from four measurement campaigns in Lake Hongze in 2014~2015, a single band (671 nm) model was developed to estimate the suspended particulate matter (SPM). The model performed well ($R^2 = 0.74$, $RMSE = 8.58$ mg/L), with validation ($R^2 = 0.72$, $RMSE = 11.98$ mg/L). Then, 464 VIIRS images (2012~2015) were used to estimate SPM concentrations. The results show that the concentrations of SPM increase in the autumn and winter and decrease in the spring and summer. While it is higher in the east and central area of the lake than in the north and west sections of the lake. Inter-annual comparisons show a decrease of suspended particulate matter (SPM) over the short four year period. The visible/infrared imager radiometer suite (VIIRS) performs well in estimating SPM in Lake Hongze, allowing for an extension of MODIS analysis approaches and improving the remote sensing of inland lakes in the future.

Key words: visible/infrared imager radiometer suite (VIIRS), suspended particulate matter (SPM), Lake Hongze, validation, remote sensing

PACS: 07.07.Df

收稿日期: 2015-10-19, 修回日期: 2016-04-01

Received date: 2015-10-19, revised date: 2016-04-01

基金项目: 国家公益性行业科研专项 (201104072), 中国科学院青年创新促进会专项基金 (2012238)

Foundation items: Supported by the Project of National Public Specific Research Foundation (201104072), Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (2012238)

作者简介 (Biography): 曹志刚 (1991-), 男, 安徽亳州人, 硕士, 研究领域为湖泊环境遥感. E-mail: zhigang_niglas@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: htduan@niglas.ac.cn

引言

获取长时间序列地表观测数据,生成相关参数产品,是地球观测卫星发射的主要目标之一^[1];但由于卫星寿命有限,保持卫星之间的交替和延续性尤为重要.自 1978 年 CZCS 传感器开始,历经 SeaWiFS、MODIS、MERIS 等十数个传感器,初步形成了全球海洋和湖泊生物地球参数观测网络^[2].目前 MODIS 是全球海洋和内陆水体水色遥感的主要传感器,但从 Terra(1999 年)和 Aqua(2002 年)相继升空以来,MODIS 已超期服役 6 年多,远超设计寿命,服务面临着随时终止的可能.2011 年 NASA 发射的 NPP 卫星,其搭载的可见光红外成像辐射仪(VIIRS)拥有和 MODIS 相似的 7 个水色波段(412~862 nm),但拥有更高的性能,比如双增益动态观测,更高的波宽(图 2),有助于更好地接收水体信号,同时信号不易饱和^[3].这些都为全球水体,特别是饱受 MODIS 多数波段饱和之苦的内陆水体遥感提供了更好的卫星数据源.但是,当前 VIIRS 的研究多集中在大洋开阔水体和近海岸水体^[4-6],内陆湖泊还鲜有涉及.

与大洋水体不同,内陆水体光学特性复杂,水中物质组成和来源复杂,时空差异大.悬浮物(Suspend Particular Matter, SPM)作为水色参数三要素之一,影响着水体的光学特性和物质交换^[7],对湖泊水质和生物地球化学循环具有重要作用.实际上,悬浮物在水体中信号较强,是最为容易遥感的水色要素.当前,已有大量的研究利用 Landsat、SPOT、MERIS 和 MODIS 等卫星数据构建悬浮物浓度模型^[8-13],用于水质监测.但已有模型多基于遥感反射率 R_{rs} 进行估算,而由于内陆水体中气溶胶复杂,水体较为浑浊,目前没有通用的浑浊水体精确大气校正算法可用,特别是在长时间序列卫星数据大规模反演时更为困难.由于瑞利校正可以精确计算,本文尝试利用去除瑞利散射后的 R_{rc} 数据^[13],结合洪泽湖 2012~2015 年的 4 次星地同步实测数据,通过简单大气校正方法,构建洪泽湖水体悬浮物浓度遥感估算模型,并应用到长时间序列 VIIRS 数据上,为 VIIRS 在内陆水体遥感研究提供参考.

1 数据与方法

1.1 研究区

洪泽湖(33°06' N ~ 33°40' N, 118°10' E ~ 118°52' E),位于江苏省淮安市,跨洪泽、淮阴、泗阳、

泗洪和盱眙五县,面积 1 576.9 km²,平均水深 1.77 m,是我国第四大淡水湖(见图 1)^[14].湖西南部是淮河的入湖口,湖水在湖东部经入江水道、苏北灌溉总渠流入长江、黄海,水量交换频繁(换水周期约 35 天).另外,由于洪泽湖位于北亚热带与南暖温带的过渡地带,季风气候显著,加之其独特湖湾形状易受风浪影响,导致湖水常年浑浊,水体悬浮物质季节变动较大.

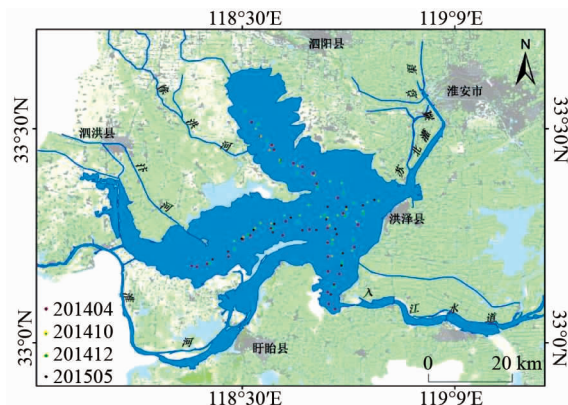


图 1 研究区与实测样点分布

Fig. 1 Location and distribution map of Lake Hongze, China

1.2 水质数据采样与分析

2014 年 4 月至 2015 年 5 月先后 4 次在洪泽湖进行全湖采样,共 100 个实测数据,其中和卫星过境时间 ± 3 小时以内的样点 86 个.每个采样点利用 GPS(0.3~3 m 精度)记录位置,同时测量水体反射率数据,并收集水表面 ~50 cm 的水样用以实验室分析.

水体遥感反射率(Remote Sensing Reflectance, R_{rs})利用 FieldSpec Pro FR 便携式分光辐射光谱仪(350~1 050 nm),采用“水上测量法”进行测量,测量标准遵循 NASA 海洋光学协议.浮游藻类色素吸收系数(a_{ph})、非色素颗粒物吸收系数(a_d)的测量采用“T”法,CDOM 吸收系数 a_g 通过“比色皿”法,分别在室内使用分光光度计(UV-2700)测量^[15].叶绿素 a 使用丙酮萃取,离心后采用分光光度法测定叶绿素 a 的含量^[16].悬浮物浓度的测量使用“称重法”,利用 450°烘烤过后的 47 mm 的 GF/F 膜过滤水样,过滤后的膜放至烘箱 105°烘烤 4 h,用 0.000 1 g 精度的天平称重计算得到总悬浮物(SPM)浓度,而后使用马弗炉将膜用 450°高温烘烤 4 h 再次称重计算得到无机悬浮物(SPIM)浓度^[16],实测主要物质浓度数据如表 1 所示.

表 1 实测主要水色物质参数浓度

Table 1 Water quality properties collected from 4 cruise surveys in Lake Hongze

		总悬浮物 浓度(mg/L)	无机悬浮物 浓度(mg/L)	有机悬浮物 浓度(mg/L)	叶绿素 <i>a</i> 浓度 ($\mu\text{g/L}$)
2014 年 4 月	范围	13.33 ~ 78.67	4.67 ~ 64.67	6.00 ~ 14.67	2.70 ~ 42.84
	均值	39.46 ± 13.90	28.77 ± 13.47	10.09 ± 2.22	9.10 ± 8.03
2014 年 10 月	范围	29.33 ~ 58.67	5.00 ~ 52.00	1.00 ~ 37.00	2.97 ~ 85.64
	均值	44.98 ± 8.94	32.83 ± 9.63	12.15 ± 8.27	15.17 ± 15.14
2014 年 12 月	范围	14.00 ~ 100.00	7.00 ~ 74.00	6.00 ~ 50.00	5.30 ~ 23.73
	均值	52.35 ± 23.55	32.35 ± 17.97	20.00 ± 10.85	10.58 ± 4.75
2015 年 5 月	范围	19.00 ~ 110.00	5.00 ~ 80.00	5.00 ~ 30.00	3.49 ~ 28.60
	均值	49.25 ± 25.55	32.22 ± 20.38	13.04 ± 6.02	12.39 ± 5.91

1.3 VIIRS 卫星数据处理

根据 NOAA STAR 团队研究结果,VIIRS 数据在 2012 年 2 月 6 日之前定标存在较大问题,不能使用^[5]. 因此,从 NASA GSFC 处下载得到 2012 年 2 月至 2015 年 7 月期间超过 1200 景的 VIIRS L1A 数据,然后经过人工挑选,去除有云、湖面有冰和太阳耀斑的影像,得到 464 景有效影像. 使用基于 SeaDAS 7.2 的软件包开发的程序,对 VIIRS L1A 产品进行替代定标(定标文件为 NASA OBPG 提供的 R2014.0 版本定标系数)得到 VIIRS L1B 数据,经瑞利散射校正后得到 R_{rc} .

1.4 统计方法

在对模型估算值和实测值进行验证和比较时,使用了常规的指标:相关性系数 r 、拟合确定系数 R^2 、均方根误差 RMSE;另外,还采用了无偏差差异百分比(Unbiased Percentage Difference, UPD)作为额外的评价指标^[1]:

$$UPD = \frac{1}{N} \sum \frac{|x_i - y_i|}{|x_i + y_i|} \times 200\% \quad , \quad (1)$$

其中, N 为样本数, i 代表数据点序列; x 和 y 代表两个评价变量,此处为估算值和实测值.

2 结果

2.1 洪泽湖水体光学特性

根据 2012 ~ 2015 年 4 次实测数据统计结果(表 1),洪泽湖水体悬浮物浓度和叶绿素 a 浓度平均值分别是 44.83 mg/L、13.42 $\mu\text{g/L}$,悬浮物浓度较高,叶绿素 a 浓度偏低. 无机悬浮物浓度和有机悬浮物浓度均值分别是 31.41 mg/L、13.42 mg/L,无机悬浮物浓度大大高于有机悬浮物浓度;而且,无机悬浮物浓度与总悬浮浓度的相关性高达 0.94 ($p < 0.001$)(见图 3(a)). 从分月数据看,10 月和 12 月份秋冬季悬浮物浓度(均值分别为 44.98 mg/L、

52.35 mg/L),高于 4 月和 5 月春夏季(均值分别为 39.46 mg/L、49.25 mg/L),呈现一定的季节差异.

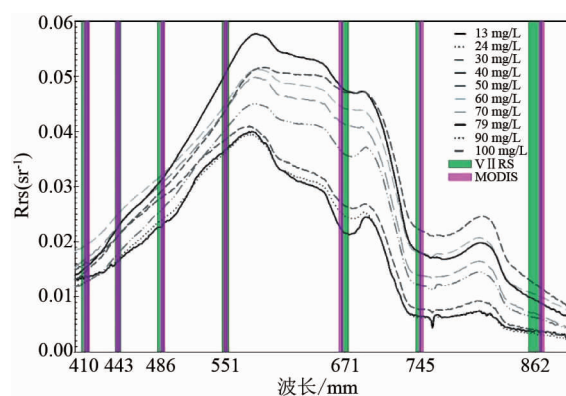


图 2 不同 SPM 浓度下水体遥感反射率光谱及其在 VIIRS 和 MODIS 波段上的响应

Fig. 2 Variation reflectance spectra in the MODIS and VIIRS bands for different concentrations of SPM

非有机颗粒物吸收系数 a_d 、黄色物质吸收系数 a_g 和浮游植物吸收系数 a_{ph} 的均值分布曲线普遍随波长增加而下降(图 3b),仅 a_{ph} 在 650 ~ 700 nm 有峰值;在 400 ~ 700 nm 之间, a_d 远大于 a_g 和 a_{ph} ,与水质参数浓度数据一致. 三者特定波长处的吸收三角图通常能更好地表达水体的光学特性. 在 443 nm 处, a_d 对于总吸收的贡献占有绝对的优势,远大于 a_g 和 a_{ph} (图 3(c));而在 671 nm 处(图 3d), a_{ph} 的贡献占主导, a_d 次之, a_g 最小,这是由于色素在该波段范围有一个吸收峰造成的. 总结来看,洪泽湖水体光学特征明显,无机悬浮物占主导.

2.2 基于实测光谱的悬浮物浓度估算方法探究

目前,卫星数据反演悬浮物以经验性算法为主,根据使用的波段数可分为三类:单波段算法、波段比值法以及三波段算法(表 2). 参考 VIIRS 的波段设置,选择 4 次实测采样光谱数据 $R_{rs}(486)$ 、 $R_{rs}(551)$ 、 $R_{rs}(671)$ 、 $R_{rs}(745)$ 、 $R_{rs}(862)$,结合实测悬

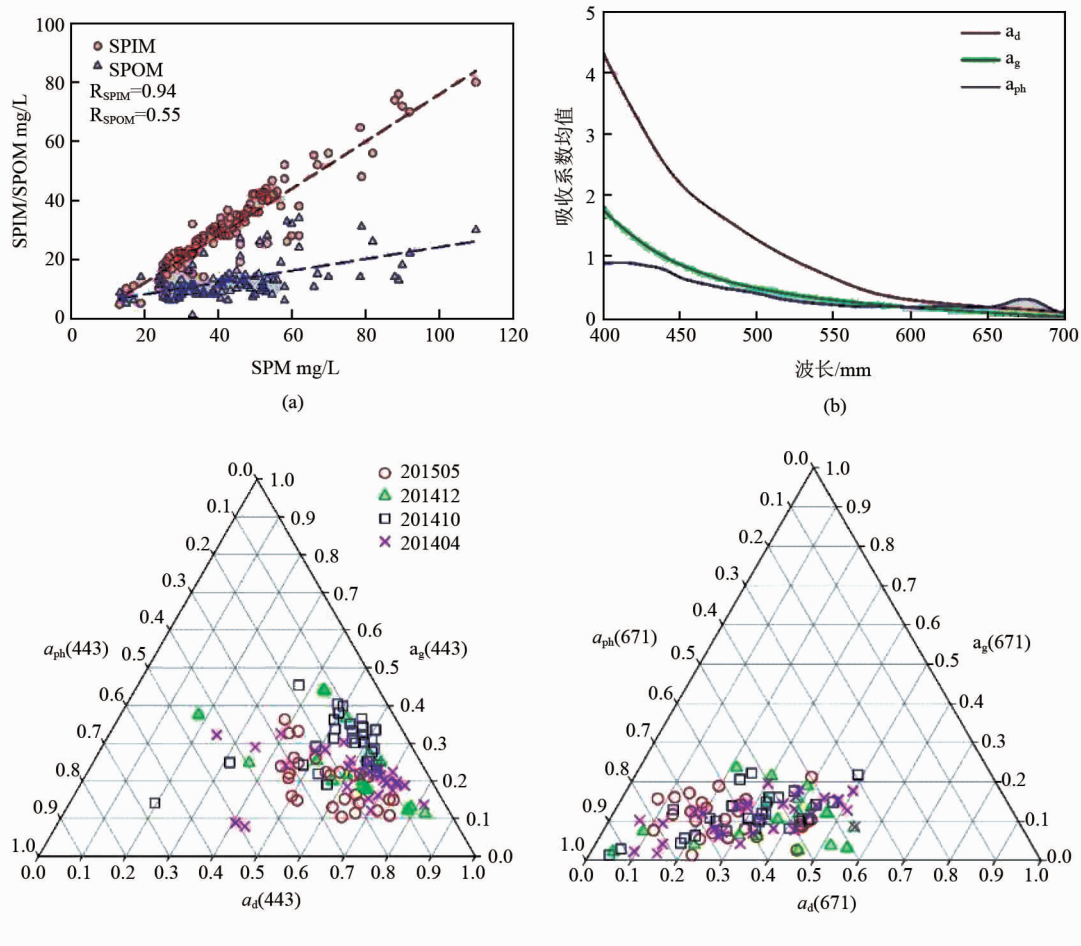


图3 (a) 不同悬浮物浓度之间关系, (b) a_d 、 a_g 、 a_{ph} 均值曲线, (c ~ d) 水体三组分吸收系数分别在 443 nm 和 671 nm 的贡献
 Fig.3 (a) The relationship between SPM and SPIM or SPOM, (b) The mean curves for a_d 、 a_g 、 a_{ph} , (c ~ d) Relative contributions of optically active constituents at 443 nm and 671 nm, respectively

浮物浓度数据,对实测光谱反演悬浮物浓度模型分别进行了探究(表 3):5 个波段的 R_{rs} 与悬浮物浓度 Pearson 系数表明,671、745、862 nm 的结果皆大于 0.8,分别按照指数、乘幂、线性的方式得到了最好的估算效果;同时,862、671 nm 的比值估算模型显示了较好的精度,但基于 486、551、671 nm 得到的三波段反演模型效果较差,各模型方程及评价指标详见表 3.

2.3 基于 VIIRS 数据的悬浮物估算模型

针对 VIIRS R_{rc} 数据,遴选与卫星过境时间不超过 ± 3 小时的实测样点;每个点经过云判定和 3×3 窗口检验(变异系数 < 0.1),共得到 86 个有效数据集,分布在 2014、2015 两年.考虑到 2014 年具有全季节的数据,故选用该年 69 个样点建模;2015 年 17 个样点用于验证,一定程度上也能够体现算法在时间上的普适性.首先,将 671 nm、745 nm、862 nm 处

的 R_{rc} 数据与实测悬浮物进行拟合,结果显示拟合的效果都不好(图 4(a)),仅 671 nm 模型具有一定的拟合精度($R^2 = 0.52$),无法用于 VIIRS 影像的反演.这是由于气溶胶在洪泽湖上空浓度较厚,不能忽略.根据水体辐射传输方程^[20], R_{rc} 可以近似表示为气溶胶散射和遥感反射率之和;假设短波红外处信号为气溶胶贡献^[21],分别使用 $R_{rc}(671)$ 、 $R_{rc}(745)$ 、 $R_{rc}(862)$ 减去 $R_{rc}(1238)$,则可去除部分气溶胶信号.于是,将减去 $R_{rc}(1240)$ 后的结果分别与实测数据拟合(图 4b-c), $R_{rc}(671) - R_{rc}(1238)$ 和悬浮物浓度具有较好的指数关系($R^2 = 0.74$),精度较高(RMSE = 8.58 mg/L, UPD = 15.24%).为了进一步验证 671 nm 波段反演模型的可用性,使用 2015 年 17 个实测数据对模型进行独立验证(图 4(d)),结果表明,相关系数较高($R^2 = 0.72$),估算误差较小(RMSE = 11.98 mg/L, UPD = 20.32%).从模型训

表 2 悬浮物经验估算模型^[8-13]

Table 2 Several published algorithms on SPM concentrations

作者	模型方程	R ²	N	C _{SPM} (mg/L)	传感器	研究区
Feng (2012)	SPM = 0.6786 * exp(34.366 * (R _{rc} (645) - R _{rc} (1240)))	0.87	38	3.00 ~ 200.00	MODIS	鄱阳湖
Loisel(2014)	SPM = 10 * [0.695 + 27.29 * (R _{rs} (560) + R _{rs} (645)) - 0.638 * R _{rs} (490)/R _{rs} (560)]	0.70	-	0.01 ~ 150.00	MERIS	Eastern Sea, Vietnam
Miller (2004)	SPM = -1.91 + 1140.25 * R _{rs} (645)	0.89	52	0.00 ~ 60.00	MODIS	Biloxi Bay
Shi (2015)	SPM = 9.65 * exp(58.81 * R _{rs} (645))	0.70	150	15.80 ~ 218.6	MODIS	太湖
Zhang (2010)	log ₁₀ (SPM) = 0.631 1 + 22.215 8 * (R _{rs} (555) + R _{rs} (645)) - 0.523 9 * (R _{rs} (488)/R _{rs} (555))	26% ^{re}	-	-	MODIS	黄海和东海
Doxaran(2002)	ln(SPM) = (R _{rs} (840)/R _{rs} (545) + 0.961 4)/0.319 3	0.58	42	35.00 ~ 500.0	SPOT	Gironde
Zhao (2011)	SPM = 2.12 * exp(45.92 * R _{rs} (645))	0.78	63	0.00 ~ 87.80	MODIS	Mobile Bay
Kutser (2007)	SPM = 349.83 * R _{rs} (645) + 2.966 3	0.86	11	2.00 ~ 8.00	MODIS	Muuga Port

表 3 利用洪泽湖实测数据评价已有遥感估算悬浮物模型

Table 3 The general characters of SPM algorithms based on *in-situ* data collected in Lake Hongze

模型	论文模型	洪泽湖实测数据调整模型	R ²	RMSE	UPD
比值模型	R _{rs} (840)/R _{rs} (545) = 0.319 3 * ln(SPM) - 0.961 4	ln(SPM) = 5.576 * R _{rs} (862)/R _{rs} (551)) + 2.929	0.73	9.66	26.16
三波段模型	log ₁₀ (SPM) = 0.631 1 + 22.215 8 * (R _{rs} (555) + R _{rs} (645)) - 0.523 9 * (R _{rs} (488)/R _{rs} (555))	log ₁₀ (SPM) = 0.005 9 + 11.274 6 * (R _{rs} (551) + R _{rs} (671)) - 1.132 6 * (R _{rs} (486)/R _{rs} (551))	0.56	11.82	39.04
671 nm	SPM = 9.65 * exp(58.81 * R _{rs} (645))	SPM = 1.576 * exp(38.491 * R _{rs} (671))	0.74	8.21	27.40
745 nm	/	SPM = 2 303.1 * R _{rs} (745) ^{0.882 5}	0.87	6.23	20.04
862 nm	/	SPM = 5 852.3 * R _{rs} (862) + 9.730 4	0.81	6.86	23.36

注:671 nm 模型为 Shi *et. al*(2015) 提出的太湖悬浮物估算模型

练数据集和独立验证的结果来看,可以很好的用来估算 0 ~ 80 mg/L 浓度范围内的悬浮物浓度,建议该模型用于 VIIRS 洪泽湖悬浮物浓度估算:

$$SPM = 11.25 * e^{12.86 * [R_{rc}(671) - R_{rc}(1238)]} \quad (2)$$

2.4 洪泽湖悬浮物时空变化

2.4.1 悬浮物时间变化结果

将式(2)应用到所有 464 景 VIIRS 影像上,得到洪泽湖水体悬浮物月均、季节和年际平均时空分布图(见图 5).其中,用于反演的卫星数据,每月至少有 1 景无云影像,结果具有较强的参考性(影像分布见表 4).洪泽湖悬浮物在一年中浓度都相对较高,月均值在 22.53 ~ 34.97 mg/L 之间(图 5(a)),其中月最高出现在 11 月份,最低在 5 月;从季节来看(图 5(b)),洪泽湖水体悬浮物呈现秋冬高(9 ~ 12 月、1 ~ 2 月),均值分别为 30.57 mg/L、33.24 mg/L;但春夏低(3 ~ 8 月),均值分别为 24.09 mg/L、24.57 mg/L.在年际变化上,2012 和 2013 年均值浓度分别为 29.40 mg/L、27.64 mg/L(图 5(c)),2014 和 2015 年均值为 27.64 mg/L、24.49 mg/L,年际尺度上悬浮物浓度呈现微小的减小趋势.但需要

指出的是,2015 年 VIIRS 数据只有前 7 个月数据,不能完全代表全年的悬浮物变化.

表 4 洪泽湖 2012-2015 年 VIIRS 卫星数据列表

Table 4 The list of VIIRS imageries

	2012	2013	2014	2015	总和
1 月	-	16	16	12	44
2 月	2	7	6	8	23
3 月	4	13	12	13	42
4 月	8	19	7	12	46
5 月	10	12	18	8	48
6 月	5	9	6	3	23
7 月	13	8	9	4	34
8 月	13	15	5	-	33
9 月	16	11	6	-	33
10 月	18	16	17	-	51
11 月	16	17	9	-	42
12 月	13	11	21	-	45
总和	118	154	132	60	464

2.4.2 悬浮物浓度空间分布结果

洪泽湖悬浮物分布具有明显的空间异质性(图 5),呈现东、中部敞水区浓度高、西部(溧河洼)和北部(成子湖)浓度低的规律.以 2012 ~ 2015 这 4 年的

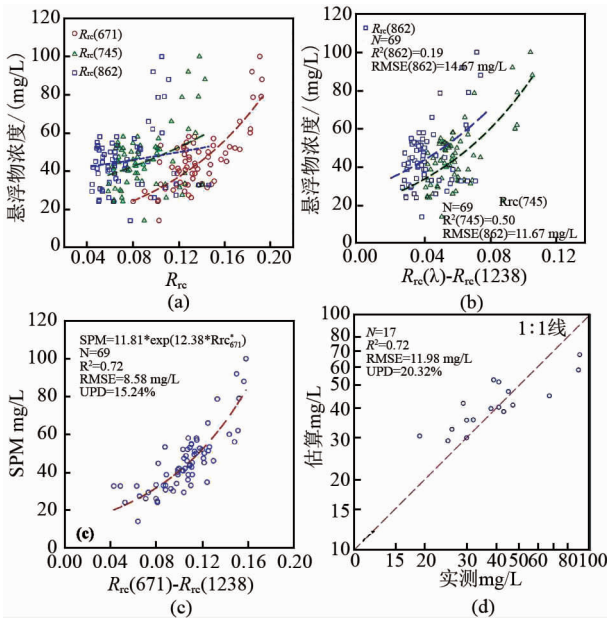


图4 (a~c)不同 R_{rc} 数据和 SPM 的指数拟合结果, (d) R_{rc} (671) ~ R_{rc} (1238) 模型验证结果

Fig. 4 (a~c) Exponential regressions between SPM and R_{rc} combinations, (d) validations between SPM derived from VIIRS and *in situ* measured data in May 2015

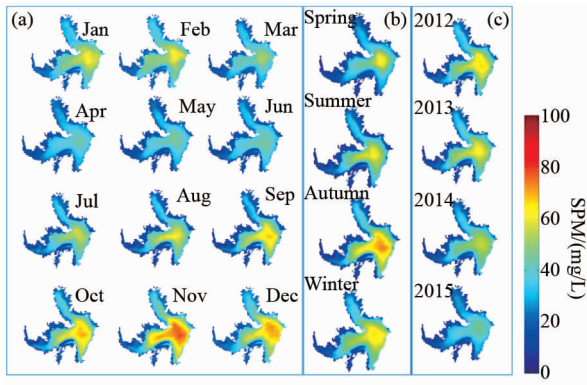


图5 (a) 悬浮物月均时空分布, (b) 季节平均时空分布, (c) 年均时空分布

Fig. 5 The mean values of SPM spatial-temporal distributions (a) monthly, (b) seasonally, and (c) annually

年均值影像为例,按照纬度和经度取均值,洪泽湖悬浮物浓度由南向北表现为先上升、后下降的趋势,大约在 33.4° ~ 33.5° N 的区域内呈现最大值(图 6(a)),对照图 1 湖区经纬度范围,是湖区中心范围;同样,悬浮物浓度从西往东逐步增加,在湖中心区域内达到最大值,然后下降(图 6(b)).

3 讨论

3.1 悬浮物浓度算法性能分析

训练数据集是经验模型建立的基础,数据集的

质量,包括所选择波段对悬浮物变化的区分性和训练样本数据的代表性等,制约着模型自身的精度. 针对不同悬浮物浓度水体的光谱曲线和 VIIRS 波段设置(图 2),671 nm 对于不同浓度悬浮物具有较好区分性,这是悬浮物算法构建的基础. 当构建好的模型(式 2)应用于 VIIRS 数据时(图 4d),发现在 80 mg/L 以下时,模型精度较高($RMSE = 9.1$ mg/L);高于 80 mg/L 时,精度开始下降,估算小于实测结果($RMSE = 23.4$ mg/L). 这可以从两个角度进行解释:(1)建立模型使用的悬浮物浓度数据主要分布在 10 ~ 70 mg/L 范围之内,80 mg/L 以上数据分布较少,使得经验模型在高悬浮物水体适用性下降;(2)卫星数据没有经过严格的大气校正,使用的是 R_{rc} 数据,且尝试通过减去短波红外(1 238 nm)去除气溶胶信号;但在超高悬浮物水体时,水体在短波红外仍有信息,但在计算过程中认为此处信号完全是气溶胶信号予以去除,降低了水体信号值,结合公式(2)可知,估算值将低于实测结果. 但考虑到洪泽湖水体悬浮物浓度主要在 13.33 ~ 110 mg/L 范围,均值(44.83 ± 18.44) mg/L,这样简单的大气校正算法,在无法完全获得 R_{rs} 数据时,仍是有效且可以使用的. 其他人的研究,也证实了该方法的有效性^[10,16].

本文通过分别选取清洁大气、轻度雾霾天、重度雾霾天三种情况的影像和反演结果进行分析,尝试评价模型在不同气溶胶条件下的稳定性. 对于清洁大气(图 7(a))和轻度雾霾天(图 7(b)),模型得到的结果空间纹理特征明显,高低浓度特征分明,与原图对比,悬浮物浓度分布合理,多集中在 0 ~ 100 mg/L 范围内,并呈现湖区中部和东部较高,其余区域较低的规律. 但对于重度雾霾天(图 7(c))的影像,算法估算值非常高且空间分布不合理,结果明显错误,说明模型无法适用. 重度雾霾天下大气情况复杂,卫星接收的水体信号较之平常更弱,大气信号尤其气溶胶颗粒信号较强,仅仅考虑 R_{rc} 无法有效反映水体信息,导致算法失效. 幸运的是,在本文实际研究中使用的 464 景影像,类似天气较少(仅 4 景),该类情况基本可以忽略.

3.2 悬浮物时空差异原因简单分析

VIIRS 卫星估算结果显示,洪泽湖悬浮物浓度在季节上呈现秋冬高、春夏低的规律,并且湖中、东部的季节变动高于西、北部;空间上呈现东、中部敞水区浓度高,西部溧河洼和北部成子湖区浓度低的分布特点. 这与洪泽湖开展的悬浮泥沙调查结果基

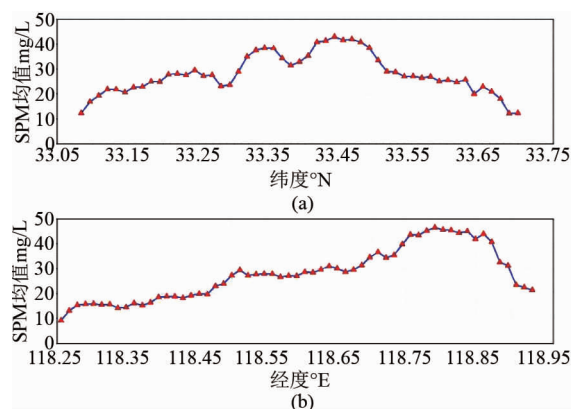


图6 洪泽湖 2012-2015 年悬浮物均值分布图(a)随纬度变化,(b)随经度变化

Fig. 6 Mean value of SPM distribution map during year of 2012 ~ 2015 (a) along latitude; (b) along longitude

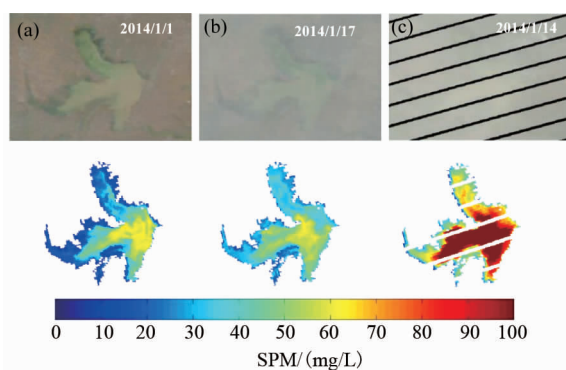


图7 VIIRS 影像 RGB 图和估算结果(a)无雾霾天气,(b)轻度雾霾,(c)重度雾霾

Fig. 7 VIIRS RGB images and estimated results of SPM in (a) no-haze sky, (b) low haze sky, (c) heavy haze sky

本一致^[14],也和李波等人研究结果相同^[22].这种时空分布特点和洪泽湖水体生态特征密切相关,主要是由于湖区西部和北部大多是湿地,分布有丰盛的水草,水体本身有较强的净化能力,因此悬浮物浓度较低且季节变动小;而东部、中部的敞水区由于水体较深,受季风影响严重,且具有较多采砂船,导致悬浮物浓度较高且季节变动大.

同时,入湖河流,特别是水量较大的河流,也会引起湖体悬浮物浓度的空间差异.淮河在南部注入洪泽湖,带来较多的悬浮泥沙颗粒,导致在淮河口附近的悬浮物浓度较高(约 50 ~ 60 mg/L 之间);湖区东部的苏北灌溉总渠和入江水道是洪泽湖最重要的出湖河流,悬浮颗粒会随着水体流动由西向东的迁移,东部、中部的敞水区水体较深,风浪大,水流快,导致悬浮物质再悬浮,所以此处水体相对于其他

区域更为浑浊,与 VIIRS 估算的空间分布一致(约 60 ~ 70 mg/L).

4 结论

本文以洪泽湖实测数据为基础,通过简单大气校正算法,建立了适用于 VIIRS 的洪泽湖 671 nm 单波段悬浮物估算模型($N = 69$, $R^2 = 0.74$, $RMSE = 8.58$ mg/L),且验证结果较好($N = 17$, $R^2 = 0.72$, $RMSE = 11.98$ mg/L);并应用到了 2012 ~ 2015 年 400 余景 VIIRS 卫星影像上.从卫星估算结果来看,空间分布合理,季节变化明显,与实际情况吻合.模型对于不同浓度悬浮物和气溶胶都有较好的处理,适应性较好,可以作为监测洪泽湖水体悬浮物变化的区域性算法.总体上,VIIRS 数据对于洪泽湖而言,750 m 的空间分辨率能够体现水体水质变化;据此,相信 VIIRS 将在大型内陆湖泊水体环境研究中具有较好的前景.下一步工作,建议:(1)构建和开发 VIIRS 其它水色产品模型算法,进一步拓展其应用范围;(2)加强 VIIRS 水色产品与 MODIS 产品的一致性评价,为 VIIRS 未来接替 MODIS 打好基础.

致谢

感谢美国佛罗里达大学“Optical Oceanography Laboratory”提供 VIIRS 数据处理支持;感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所“湖泊-流域科学数据共享平台”提供洪泽湖水体边界等数据;感谢锡耶纳大学(University of Siena)的 Steven Arthur Loiselle 教授帮助修改英文摘要;感谢薛坤、李晶、陶懋、吴静汇、何兆骏、梁其椿、沈明等在洪泽湖野外数据采集中的辛勤工作.

References

- [1] Hu C, Le C. Ocean color continuity from VIIRS measurements over Tampa Bay[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2014, **11**(5):945-949.
- [2] IOCCG. Mission Requirements for Future Ocean-Colour Sensors[C]. In: McClain, C. R. and Meister, G. (eds), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, Dartmouth, Canada: IOCCG, 2012. 10-11.
- [3] Cao C. Visible infrared imaging radiometer suite (viirs) sensor data record (sdr) user's guide. Version 1.2, 10 September 2013 [J]. *NOAA Technical Report NESDIS*, 2013,142.
- [4] Hlaing S, Harmel T, Gilerson A, et al. Evaluation of the VIIRS ocean color monitoring performance in coastal regions [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **139**(0):398-414.
- [5] Wang M, Li X, Tian L, et al. Evaluation of VIIRS ocean color products [J]. *Ocean Remote Sensing and Monitoring from Space*, 2014, **9261**:92610E-92610E-15.

- [6] Ladner S, Arnone R, Vandermeulen R, *et al.* Inter-satellite comparison and evaluation of Navy SNPP VIIRS and MODIS-Aqua ocean color properties [C]. In: Ocean Sensing and Monitoring VI, Baltimore, USA; Proc. SPIE, 2014.
- [7] ZHANG Yun-Lin, QIN Bo-Qiang, CHEN Wei-Min, *et al.* Experimental study on underwater light intensity and primary productivity caused by variation of total suspended matter [J], *Advances in Water Science* (张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 悬浮物浓度对水下光照和初级生产力的影响. *水科学进展*, 2004, **15**: 615 - 620.
- [8] Doxaran D, Froidefond J-M, Lavender S, *et al.* Spectral signature of highly turbid waters; Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **81**(1): 149 - 161.
- [9] Miller R, McKee B A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **93**(1-2): 259 - 266.
- [10] Feng L, Hu C, Chen X, *et al.* Human induced turbidity changes in Poyang Lake between 2000 and 2010: Observations from MODIS [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(C7).
- [11] Shi K, Zhang Y, Liu G, *et al.* Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in Lake Taihu using 250m MODIS-Aqua data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **164**(0): 43 - 56.
- [12] HUANG Chang-Chun, LI Yun-Mei, WANG Qiao, *et al.* Bio-optical retrieval model of suspended particles in Tai Lake using MERIS image [J]. *Journal of Infrared Millim Waves* (黄昌春, 李云梅, 王桥, 等. 太湖水体悬浮颗粒物生物光学模型及 MERIS 数据反演. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(4): 367 - 374.
- [13] Hu C, Chen Z, Clayton T, *et al.* Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands; Initial results from Tampa Bay, FL [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **93**(3): 423 - 441.
- [14] WANG Su-Min, DOU Hong-Shen. *Chinese Lakes* [M]. Beijing: Science press (王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社), 1998.
- [15] MA Rong-Hua, DUAN Hong-Tao, TANG Jun-Wu. *Remote sensing of lakes environment* [M]. Beijing: Science press (马荣华, 段洪涛, 唐军武. 湖泊水环境遥感. 北京: 科学出版社), 2010.
- [16] Duan H, Feng L, Ma R, *et al.* Variability of particulate organic carbon in inland waters observed from MODIS Aqua imagery [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, **9**(8): 084011.
- [17] Zhang M, Tang J, Dong Q, *et al.* Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(2): 392 - 403.
- [18] Loisel H, Mangin A, Vantrepotte V, *et al.* Variability of suspended particulate matter concentration in coastal waters under the Mekong's influence from ocean color (MERIS) remote sensing over the last decade [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **150**(0): 218 - 230.
- [19] Kutser T, Metsamaa L, Vahtmae E, *et al.* Operative monitoring of the extent of dredging plumes in coastal ecosystems using MODIS satellite imagery [J]. *Journal of Coastal Research*, 2007, **50**(50): 180 - 184.
- [20] Gordon H. Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System era [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102**(D14): 17081 - 17106.
- [21] Wang M. Remote sensing of the ocean contributions from ultraviolet to near-infrared using the shortwave infrared bands: simulations [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(9): 1535 - 1547.
- [22] LI Bo, PU Pei-Min, HAN Ai-Min. Spatio-temporal correlation analysis of water quality in Hongze Lake [J]. *Journal of Lake Science* (李波, 濮培民, 韩爱民. 洪泽湖水质的时空相关性分析. *湖泊科学*), 2002, **14**(3): 259 - 266.