

基于 HJ CCD 的杭州湾海域水质评价*

Preliminary Study on the Application of HJ CCD Imagery to Water Quality Assessment for Hangzhou Bay

孟庆辉¹, 王 林¹, 毛志华^{2**}, 陈艳拢¹

MENG Qing-hui¹, WANG Lin¹, MAO Zhi-hua², CHEN Yan-long¹

(1. 国家海洋环境监测中心海域监管中心, 辽宁大连 116023; 2. 国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江杭州 310012)

(1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian, Liaoning, 116023, China; 2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, Zhejiang, 310012, China)

摘要:【目的】筛选适用于杭州湾海域卫星遥感反演算法的水质参数, 探明基于 HJ CCD 的研究区遥感水质评价方法。【方法】利用有色可溶性有机物(CDOM)、透明度(SD)、叶绿素 a(Chl a)及总磷(TP)的遥感定量反演结果, 分析最差因子判别法、均值法、内梅罗指数法及模糊综合评价法的优劣。【结果】与其它 3 种评价方法相比, 模糊综合评价法突出了 HJ CCD 高空间分辨率特性, 较为完整地评价出杭州湾海域水质类别, 与海洋环境状况公报中的评价结果具有较好的一致性。【结论】选用恰当的水质评价方法, 高分辨率的环境卫星可以用于我国近岸海域水质日常评价分析。

关键词: HJ CCD 水质评价 杭州湾

中图分类号: P76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)03-0322-07

Abstract:【Objective】Based on HJ CCD imagery, retrieval algorithms of water quality parameters for Hangzhou Bay were appropriately chosen to establish remote sensing water quality assessment method.【Methods】The worst factor discriminance, the mean method, the Nemerow index method and the fuzzy comprehensive evaluation method are analyzed by using remote sensing inversion results of CDOM, SD, Chl a and TP.【Results】Compared with the other three methods, the fuzzy comprehensive evaluation method highlights HJ CCD high spatial resolution characteristics and gives more complete assessment of different water quality categories in Hangzhou Bay and its adjacent waters, and the results match well with the data released by the State Oceanic Administration.【Conclusion】By using appropriate water quality assessment method, high-resolution HJ CCD imagery has an advantage for routine assessment of the water quality in coastal waters.

Key words: HJ CCD, water quality assessment, Hangzhou Bay

收稿日期: 2015-03-25

修回日期: 2015-05-25

作者简介: 孟庆辉(1987-), 女, 研究实习员, 硕士, 主要从事海洋水环境遥感研究。

* 国家海洋公益性行业科研专项经费项目(201305003)和国家自然科学基金项目(41476156, 41321004)资助。

** 通讯作者: 毛志华(1966-), 男, 研究员, 主要从事海洋遥感方面的研究, E-mail: mao@sio.org.cn.

0 引言

【研究意义】21 世纪是海洋的世纪。海洋水质研究已成为各国海洋科学与技术研究的重要课题^[1]。目前, 海洋水质监测多以调查船断面定点监测为主, 导致水质评价结果站点分散、缺乏时空连续性, 难以全面、及时监测和预警水质状况, 不能全面地反映自然水体生态环境的总体时空变化。而遥感水质监测技术具有宏观、动态、价廉等显著特点, 其在水质监测

上的应用有着常规监测不可替代的优点。【前人研究进展】Hu 等^[2]2004 年使用 MODIS 数据对佛罗里达州的 Tampa 海湾河口区域二类水体进行盐度、叶绿素、CDOM、悬浮物浓度 4 种水质因子的评价,证明 MODIS 数据用于水质评价的可量化性和实用性;Alicia 等^[3]2004 年使用 LANDSAT 7 ETM+ 卫星图像数据对阿根廷 Medrano 河口一带的污染水域进行水质跟踪监测;Gitelson 等^[4]2006 年使用三波段、两波段模型对具有二类浑浊水体特性的 Chesapeake 海湾进行叶绿素 a 反演及反演精度对比;Katlane 等^[5]2012 年使用 MODIS 数据,以叶绿素、浊度为水质指数因子对突尼斯 Gabes 海湾水质进行评价;张穗等^[6]基于对水体叶绿素光谱特征的分析 and 河口水体富营养化指标的研究,利用总磷、总氮与叶绿素的相关特征得出适合河口特征的富营养化评价方法,并在长江口的遥感影像上选取合适的实验区对方法进行试验,取得较好的结果。【本研究切入点】以上研究均有效地对不同近岸海域水质进行评价,在一定程度上体现了遥感水质监测的优势,但这些研究大多是基于单一或多因子进行水质评价,主流传感器较低的空间分辨率和时间分辨率还不能充分描述小尺度高动态沿海区域的水质特征,利用高时空分辨率卫星数据进行近岸海域水质评价的研究还鲜有报道。【拟解决的关键问题】依托国产高分辨率环境卫星数据 HJ CCD,以杭州湾海域作为研究区,开展有色可溶解有机物(CDOM)、透明度(SD)、叶绿素 a(Chl a)及总磷(TP)遥感定量反演,利用不同的水质评价方法对研究区进行评价分析,最终确定水体质量和污染状况,为水污染治理、水功能区划、水环境规划以及水环境管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

杭州湾,中国东南沿海最大的海湾,位于浙江省和上海市之间,地处浙江省北部,长江口南面,地理位置为 120.95°~122.07°E,29.92°~30.86°N。它是钱塘江流入海而形成的喇叭形河口湾,从湾顶澉浦断面到湾口芦潮港断面,长 85 km,湾宽变幅从 19.4 km 到 98.5 km,其间的乍浦至庵东断面宽 32.2 km,金山至四灶浦宽 45.5 km,湾口北部与长江口相毗连,南部有甬江注入,东部则通过舟山群岛间的诸多水道与东海沟通。据近几年国家海洋局发布的中国海洋环境状况公报显示,杭州湾几乎全海域均为劣四类海水水质,在统计的 16 个海湾质量评价结果中海水水质最差。

1.2 数据来源

用于杭州湾水质因子遥感反演的实测光谱数据以及其它环境参数数据均来自于航次船测以及浮标数据。航次时间是 2011 年 6 月 18 日至 6 月 29 日,浮标数据来自于上海海洋气象中心放置在杭州湾湾口的气象浮标,其采样频率为 3 h/次,地理位置为 122.3625°E,30.5509°N,如图 1 所示。

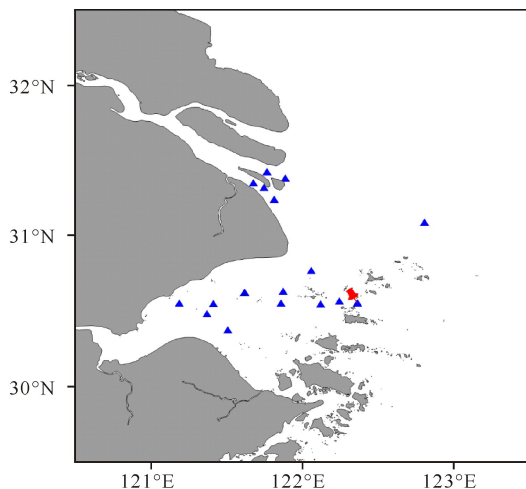


图 1 杭州湾实测站点图(蓝色三角表示航次实测站点,红色标志为浮标所在位置)

Fig. 1 Locations of Hangzhou Bay, the in-situ sampling stations during the cruise (blue symbols) and the buoy station (red symbol)

1.3 水质评价方法

水环境质量评价方法主要有两类,一类是以水体的物理化学参数的实测值为依据的评价方法;另一类是以水生物种群与水质的关系为依据的生物学评价方法。目前,研究者多采用基于物理化学参数的评价方法,其又分为单因子评价和多因子综合评价两种类型,多因子综合评价有很多方法,如最差因子判别法,有机污染综合指数评价法,主分量分析法、模糊综合评价法、聚类分析、人工神经网络模型、遗传算法等^[7]。本文选择最差因子判别法、均值法、内梅罗指数法和模糊综合评价法。

1.3.1 最差因子判别法

最差因子判别法利用实测数据和标准对比分类,以几种评价因子中污染最为严重(即水质最差)的那个因子所属的水质类别来确定水体的总体水质类别。该法只要依次判别出所选择的每个因子的水质类别,然后以最差的那个类别作为水质综合评价的类别即可。目前单指标最差因子评价方法仍为最基本的评价方法。

1.3.2 加和法和均值法

均值法和加和法是一种把各因子对水体的质量

影响看成等效的评价方法,计算公式分别为

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i, I = \sum_{i=1}^n I_i,$$

式中, I 为水样的多因子水质综合指数, n 为所测水样评价因子的个数。

1.3.3 内梅罗指数法

内梅罗指数是一种兼顾极值或者突出最大值的加权型多因子水质评价指数,计算公式为

$$I = \sqrt{\frac{I_{\max}^2 + \bar{I}_i^2}{2}},$$

式中, I_{\max} 为各因子水质指数中最大的单项质量指数, \bar{I}_i^2 为各单因子质量指数的平均值。

1.3.4 模糊综合评价法

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评标方法。该综合评价法根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价,即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。模糊综合评价向量 Y 计算公式为

$$Y = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n) \times \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{i1} & f_{i2} & f_{i3} & f_{i4} \end{pmatrix} =$$

(y_1, y_2, y_3, y_4) 。

式中, W 为各评价因子的权重集, n 为评价因子的个数, f 为各级水质的隶属函数, i 为某类评价因子, 1, 2, 3, 4 为对应的海水等级, y_1, y_2, y_3, y_4 即为评价结果, 是综合考虑所有因子的影响作用时评价对象对 4 级水体分别的隶属度, 根据贴近度评价的择近原则, 取 4 个隶属度中最大的贴近度所属的水质类别作为评价水体的总体水质类别。

1.4 水质评价因子及标准

水体中可遥感监测的水质指标有叶绿素 a (Chl a)、悬浮泥沙 (SSC)、有色可溶性有机物 (CDOM)、透明度 (SD)、溶解性有机碳 (DOC)、水温 (T)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、溶解氧 (DO)、化学耗氧量 (COD)、五日生化需氧量 (BOD₅) 等。在这些指标中, Chl a、SSC、CDOM、SD 等可以通过光谱特征直接进行遥感分析, 其它指标较难找到独立的光谱特征, 主要通过

表 1 遥感水质评价因子及标准 (一至四类水体分别代表水质由好到差)

Table 1 The standard value of each remote sensing indicator for water quality

参数 Indicators	一类水体 Level 1	二类水体 Level 2	三类水体 Level 3	四类水体 Level 4	来源 Reference
Chl a ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 5	5~20	20~60	> 60	NEEA Standard (USA)
SD (m)	> 15	4~15	2.5~4	≤ 2.5	GHZB 1-1999
TP ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 0.025	0.025~0.05	0.05~0.10	> 0.10	GB3838-2002
CDOM (m^{-1})	≤ 0.5	0.5~0.7	0.7~1.0	> 1.0	Empirical values

其与光敏感物质之间的相关关系间接进行遥感分析。

目前没有任何一个标准中同时包含以上几项因子, 因此, 本文选择评价标准的原则如下: 我国已经颁布的环境质量标准里包含评价因子的则优先采用我国颁布的环境质量标准; 对于国内没有规定的, 选择国外标准, 或采用目前被国内外同行专家认可的、并已有应用实例的阈值。本文采用 Chl a、SD、CDOM、TP 作为遥感水质评价因子, 并将研究区水体质量划分为四类, 而中国海洋环境质量公报中显示的劣四类在此并入第四类, 各因子的评价标准如表 1 所示。

1.5 水质评价因子遥感反演

本文采用 2011 年 4 月 20 日 HJ1B CCD2 数据反演杭州湾海域 Chl a、SD、CDOM、TP 4 项水质评价因子。反演算法采用已有的相关成果, 具体如下:

a. CDOM — MODIS

Kowalczyk 等^[8] 2005 年在波罗的海使用 MODIS 数据建立了 $a_{\text{CDOM}}(400)$ 遥感反演算法, 表达式为

$$a_{\text{CDOM}}(400) = 10^{(-20-0.50x+0.65x^2)},$$

$$x = \lg(R_{rs}(490)/R_{rs}(590)).$$

b. Chl a — HY-1 CCD

马超飞等^[9] 利用 2003 年春季黄海、东海区现场实测数据, 建立了 HY-1 卫星 4 波段 CCD 成像仪水色要素反演算法, 算法表达如下:

当悬浮泥沙浓度 $\text{SSC} < 5 \text{ mg/L}$ 时, 为中低浑浊水体,

$$\text{Chl a} = -0.1961x^3 + 2.6833x^2 - 11.903x + 17.953,$$

$$x =$$

$$(R_{rs}(461)/R_{rs}(566)) * (R_{rs}(652)/R_{rs}(566))^{-0.62};$$

当悬浮泥沙浓度 $\text{SSC} > 4 \text{ mg/L}$ 时, 为中高浑浊水体,

$$\text{Chl a} = 474.81x^3 - 461.41x^2 + 44.008x + 37.95,$$

$$x =$$

$$(R_{rs}(461)/R_{rs}(566)) * (R_{rs}(652)/R_{rs}(566))^{0.3}.$$

c. SD — Landsat TM

王得玉等^[10] 在水体透明度的遥感监测方法研究

基础上,将其应用于钱塘江入海口水体的时空变化监测中,其透明度 SD 反演算法为

$$SD = a * e^{(R_{rs1}/r_{rs3})} + b.$$

d. TP - HY-1 CCD

长三角沿海海域的总磷(TP)与总悬浮物浓度(TSM)具有较好的正相关关系,可以利用 TSM 反演 TP。模型建立时间和区域为 2002 年春季长江口海域。此处,TSM 采用何贤强等^[11]建立的杭州湾悬浮物模型,表达式如下:

$$TP = 0.0006x + 0.0163,$$

$$x = 10^{1.0758 + 1.1230 \times Ratio},$$

$$Ratio = R_{rs}(745)/R_{rs}(490).$$

2 结果与讨论

2.1 水质评价因子遥感反演结果

本文采用的遥感数据为环境减灾小卫星的 CCD 数据,共 4 个波段,空间分辨率为 30 m,数据采集时间分别为 2011 年 4 月 20 日、2011 年 6 月 26 日。由于 HJ 卫星 CCD 传感器没有短波红外波段,无法有

效获得浑浊水体上空的大气气溶胶光学厚,而准同步的具有较高灵敏度的 MODIS/Terra 可利用两个短波红外波段同时获得气溶胶类型和光学厚度。因此,利用 MODIS/Terra 星的 NIR-SWIR 大气校正方法所得的 2011 年 6 月 26 日杭州湾区域出现概率最高的 551 nm 波段的气溶胶光学厚度值,转换成能见度之后,再用 FLAASH 大气校正模型计算得到 HJ CCD 影像的反射率。本文利用 HJ CCD 各波段的光谱响应函数计算实测遥感反射率的波段等效值,进而对大气校正结果进行验证。结果表明基于 MODIS 气溶胶数据辅助的 FLAASH 大气校正具有较好精度,此方法可用于后续遥感反演研究,其中第 3、第 4 波段结果精度较高。

由于模型中不同卫星传感器的波段设置有所不同,因此本文中根据 HJ CCD 的波段设置,对应选择相同波段通道或最为相近波段代替模型中波段。另外,为减小影像噪声影响结果图像显示效果,文中对最终结果进行了 3×3 像元的平滑(图 2)。

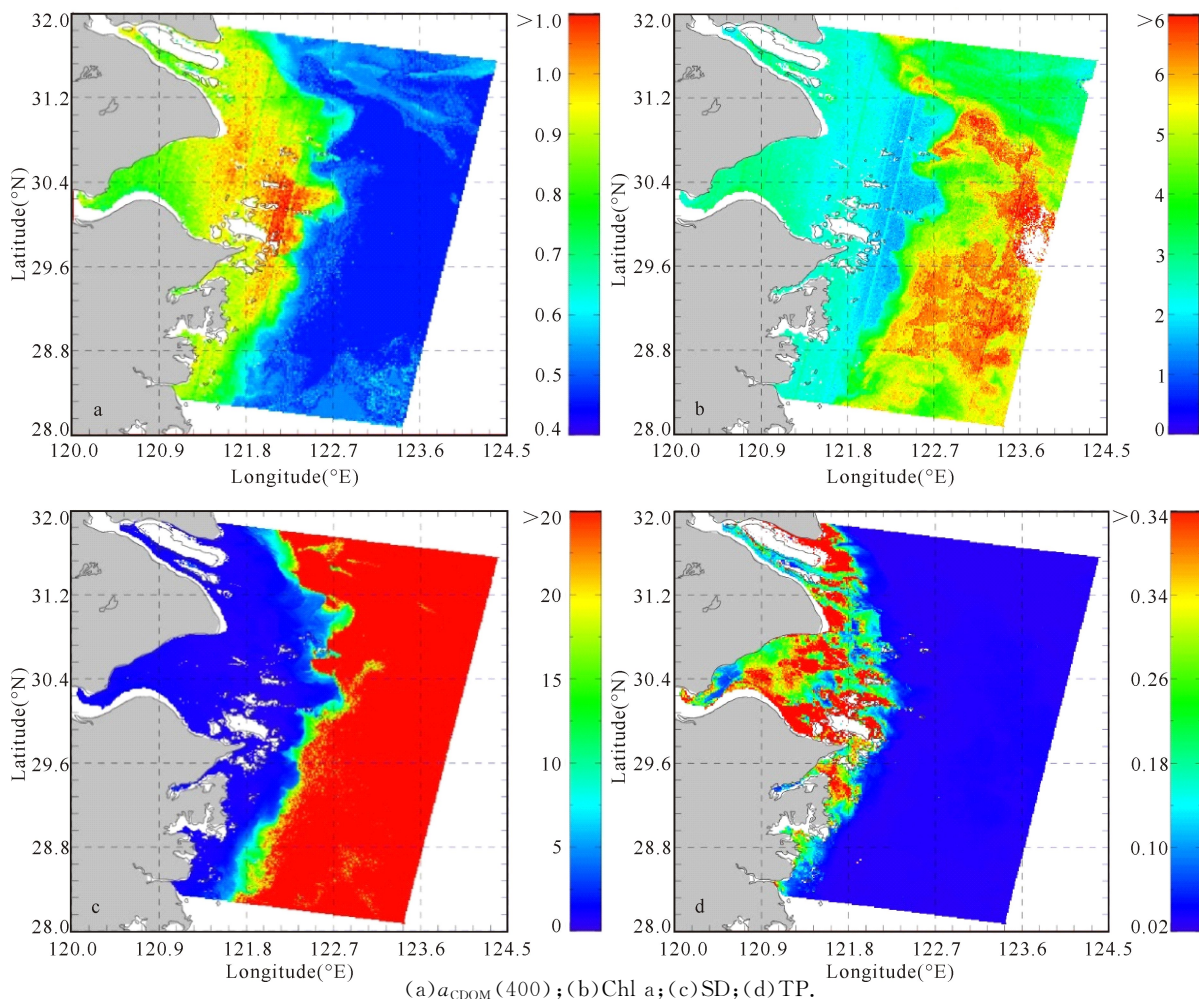


图 2 2011 年 4 月 20 日杭州湾水质评价因子遥感反演结果

Fig. 2 Inversion results of assessment indicators for water quality in Hangzhou Bay on April 20, 2011

表 2 为统计的各水质因子反演的最大、最小及平均值。经与已有的现场调查结果(中国近海海域海洋环境趋势性监测、浙江省重点港湾生态环境综合调查以及我国近海海洋综合调查与评价专项调查等)对比发现,以上 4 个水质因子反演结果基本符合本研究区分布趋势,量级一致,浓度值也落于调查公布的取值区间,可用于杭州湾遥感水质评价。

表 2 各反演水质因子统计值

Table 2 Statistics of each inversion indicator

项目 Item	TP (mg/L)	$a_{CDOM}(400)$ (m^{-1})	Chl a (mg/L)	SD (m)
最小值 Min	0.020378	0.4	1.188894	1.235294
最大值 Max	1.2077	1.039231	8.012067	35
平均值 Mean	0.083149	0.605511	5.017966	14

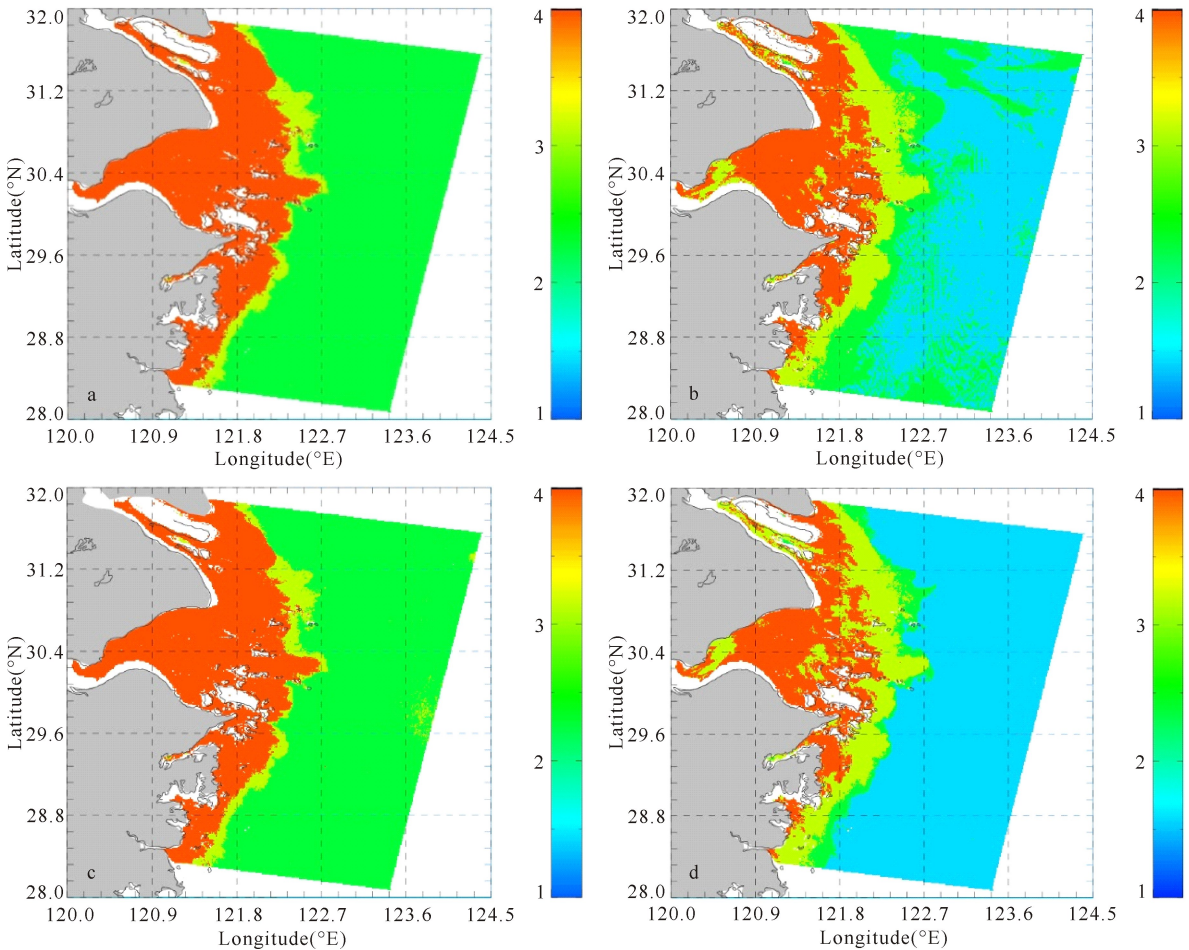
2.2 杭州湾遥感水质评价

基于以上各水质评价因子的反演结果,选取最差因子判别法、均值法、内梅罗指数法和模糊综合法分别进行多参数水质评价,其结果如图 3 所示。

对于 SD、CDOM、TP 和 Chl a 4 个评价因子进行模糊数学综合评价所得水质等级结果,水质等级分

布杂乱无章,无规律可循,完全不符合实际海洋水质调查结果。由于 Chl a 评价因子的加入,反而得不到较满意又符合实际的水质评价结果,因此只选择除 Chl a 以外的其它 3 种水质评价因子进行本文水质评价方法的探讨。

采用最差因子判别法进行杭州湾海域遥感水质评价的结果如图 3a 所示。此方法是操作最为简单的一种水质综合评价方法。由于最差因子判别法以 3 种评价因子中水质等级最差的那个因子所属的水质类别来确定水体的总体水质类别,其评价结果非常保守,使得本次杭州湾海域水质评价结果中只有二、三、四类水质,第一类水质像元个数近乎为 0;从最差因子判别法的评价结果中可以看到,杭州湾及长江口以内区域水质等级均为最差等级。此方法只考虑了污染状况最为严重的评价因子对整个评价结果的影响,充分显示超标最严重的评价因子对整个评价结果的决定性作用,而使得其他因子的作用被弱化。



(a)最差因子判别法;(b)均值法;(c)内梅罗指数法;(d)模糊综合法。

(a)Worst factor;(b)Mean;(c)N. L. Nemerow;(d)Fuzzy.

图 3 2011 年 4 月 20 日杭州湾水质遥感评价等级结果

Fig. 3 Assessment results of water quality in Hangzhou Bay on April 20, 2011 based on remote sensing methods

采用均值法进行杭州湾海域遥感水质评价的结果如图 3b 所示。从图中不难发现,均值评价能较好的反映出研究区近岸海域水质状况,与实际调查结果较为符合。近岸区细节上,本方法也体现了其优点,未将杭州湾内海水一概而论评价为第四类最差水质。但是从长江口向外,评价结果中除有第一类水体外,零星不连续地分布着其它类别水体,与水体连续性相背,影响了整体评价效果,究其原因,是该评价方法把各因子对水的质量影响看成等效,而且对每种水质因子的污染程度都进行了平均,掩盖了主要因子的作用,同时也会放大一些监测值量级较低、远低于其标准值的水质因子,夸大水污染状况,不能全面真实反映水质的整体面貌。但在众多评价方法的结果差别较大、无从决策时,均值评价仍可在一定程度上克服采用单一综合评价方法时所导致的评价结果的片面性。

采用内梅罗指数法进行杭州湾海域遥感水质评价的结果如图 3c 所示。由于此方法考虑了主要污染因子在评价中的作用,强调了最大值,因此其评价结果与最差因子差别法的结果大同小异。内梅罗综合指数过分突出污染指数最大的污染物对环境质量的影响和和作用,在评价时可能会人为地夸大或缩小一些因子的影响作用,使其对环境质量评价的灵敏性不够高,在某些情况下,它的计算结果难以区分水质污染程度的差别。不过值得一提的是,此方法比较适合评价某一水域某一特定类别水质因子的污染程度。

采用模糊数学综合评价法进行杭州湾海域遥感水质评价的结果如图 3d 所示。评价结果突出了 HJ CCD 高空间分辨率的特性,较为完整地评价出杭州湾海域水质类别。首先,杭州湾内水体并未类似于先前各海洋环境监测机构发布的环境公报,被全部划分为水质最差极别,而是更加符合实际调查,钱塘江入湾处北部、舟山海域靠近湾内一侧、湾口北部附近评价结果均好于周围其它水域,体现了杭州湾水域与外部东海清洁水体的交换。其次,象山港附近水体水质也捕捉到丰富的水质类别信息,此港区并未像公报显示一样全部评价为第四类最差水体,而是有一个过渡性的干净与污染水体交汇。对于湾口外及长江口外区域,由于存在大量东海清洁水体,一大片区域评价结果显示为水质较好的一类水体区域,这也正符合水质实际调查结果。因为评价区域水环境的复杂性、评价对象的层次性、评价标准中存在的模糊性以及评价影响因素的模糊性或不确定性,使水质评价难以绝对客观准确,但模糊综合评价可将定性和定量因素相结合,扩大信息量,从而较好地解决模糊的、难以量化的

问题,使评价速度得以提高,评价结论可信。

本次进行杭州湾水质遥感评价的总面积约为 76948.76 km²,为更加直观量化四种评价方法评价结果的差别,表 3 列出了四种方法分别所得到的四类水体总面积,以及各评价方法的平均评价等级结果。从表 3 不难看出,最差因子判别法和内梅罗指数法评价出的一类水体几乎为 0,其平均水质等级也比较接近,进一步证实了二者的共性:过度关注污染最为严重的水质因子而忽视了其它因子的作用。均值法对各类别水体均不同程度地对应评价,除一类水体外,评价出的各水质等级相差比较小,这也反映了本方法的对水质评价结果的均衡化,中和了各因子的作用,掩盖了某些类别中主要污染因子的作用;另外,此方法评价结果中的三类和四类水体与模糊综合评价结果较为接近。模糊数学综合评价所得到的水质类别显示,一类水体所占比例超过 50%,二类水体所占比例较小,基本符合中国海洋环境公报实际调查结果。

表 3 不同水质评价方法水质等级面积比较(km²)

Table 3 Area comparison of four water quality assessment methods(km²)

水质等级 Water Level	最差因子 判别法 Worst factor	均值法 Mean	内梅罗 指数法 N. L. Nemerow	模糊 数学法 Fuzzy
一类水体 Level 1	0.0243	30034.11	0.0243	47484.11
二类水体 Level 2	49172.56	19904.19	49172.57	3612.986
三类水体 Level 3	4033.508	10861.03	4329.28	12086.6
四类水体 Level 4	23742.67	16149.44	23446.89	13765.06
平均等级 Mean	2.669521	2.165765	2.665677	1.897758

图 4 列出了 2011 年国家海洋局发布的海洋环境公报中杭州湾邻近海域夏季水质评价结果与本文模糊数学综合评价结果的对比图,二者分布趋势基本一致,但由于公报显示结果是使用最差因子判别法所得,因此在杭州湾内全海域水质均显示为四类及四类以上等级,将整片杭州湾水质一概而论,未考虑湾内与外海水交换等实际情况;加之结果是夏季调查数据所得,与本文所用春季影像数据不同,长江口外区域冲淡水舌伸展至 123°E。对比之后不难发现,高分辨率的环境卫星用于近岸水域水质评价有着不可忽视的优势,通过选用合适恰当的水质评价方法,完全可以适用于我国近海水域水质日常评价分析,为相关管理决策部门提供技术支持和监测结果。

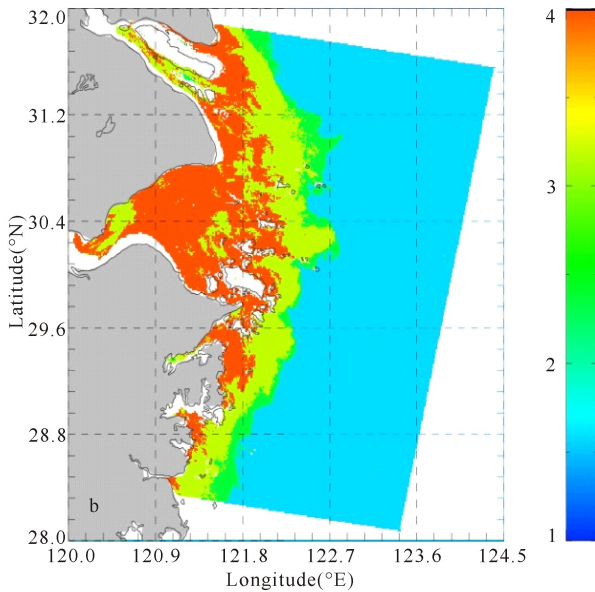
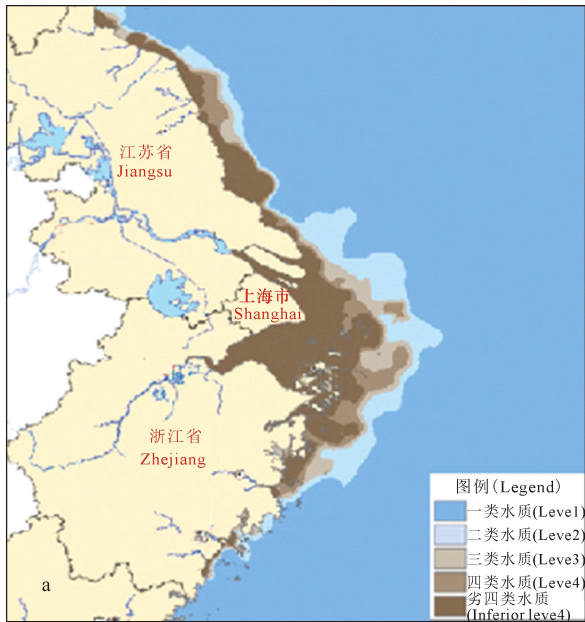


图4 2011年国家海洋环境公报结果(a)与本文模糊综合评价结果(b)对比

Fig. 4 Comparison between the result from National Marine Environmental Communication (a) and our result (b) based on fuzzy synthetic assessment

3 结论

针对高动态的近岸复杂水体,本文利用国产环境减灾卫星 HJ CCD 数据,通过遥感反演得到水质评价因子,选取不同方法对杭州湾海域水质进行评价。从评价结果来看,模糊数学综合评价结果与海洋环境状况公报基本趋势一致,高分辨率遥感数据的使用直观反映了杭州湾与外部东海清洁水体的交换情况,更加

符合实际。

参考文献:

[1] 苏纪兰,唐启升.我国海洋生态系统基础研究的发展——国际趋势和国内需求[J].地球科学进展,2005,20(2):139-143.
Su J L,Tang Q S. A new direction for China's research on marine ecosystems——international trend and national needs[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(2):139-143.

[2] Hu C,Chen Z,Clayton T D,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.

[3] Vignolo A,Pochettino A,Cicerone D. Water quality assessment using remote sensing techniques: Medrano Creek, Argentina[J]. Journal of Environmental Management,2006, 81(4):429-433.

[4] Gitelson A A,Schalles J F,Hladik C M. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study[J]. Remote Sensing of Environment,2007,109(4):464-472.

[5] Katlane R,Dupouy C,Zargouni F. Chlorophyll and turbidity concentrations as an index of water quality of the Gulf of Gabes from Modis in 2009 [J]. Revue Télédétection,2012,11(1):265-273.

[6] 张穗,何报寅. 河口 II 类水体富营养化的遥感定量方法研究[J]. 长江科学院院报,2004, 21(3):29-31.
Zhang S,He B Y. Remote sensing quantitative analysis on red tide of Changjiang estuary water[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004, 21(3):29-31.

[7] 毛兴华. 以上海市为例对比分析几种常用水质评价方法[J]. 上海水务,2006,22(3):50-52.
Mao X H. Comparison and analysis of four typical water quality assessment methods——taking Shanghai for example[J]. Shanghai Water,2006,22(3):50-52.

[8] Kowalczyk P,Olszewski J,Darecki M, et al. Empirical relationships between coloured dissolved organic matter (CDOM) absorption and apparent optical properties in Baltic Sea waters[J]. International Journal of Remote Sensing,2005,26(2):345-370.

[9] 马超飞,蒋兴伟,唐军武,等. HY-1 CCD 宽波段水色要素反演算法[J]. 海洋学报,2005,27(4):38-44.
Ma C F,Jiang X W,Tang J W, et al. Inverse algorithms of ocean constituents for HY-1/CCD broadband data [J]. Acta Oceanologica Sinica,2005,27(4):38-44.

(下转第 336 页 Continue on page 336)

Wang J, Zhang J, Wang J. Quality assessment of space-borne microwave radiometer Aquarius data product based on Argo buoy data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 37(3): 46-53. doi: 10. 3969/j. issn. 0253-4193. 2015. 03. 005.

- [6] Ratheesh S, Sharma R, Sikhakolli R, et al. Assessing sea surface salinity derived by Aquarius in the Indian Ocean [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2014, 11(4): 719-722.
- [7] Abe H, Ebuchi N. Evaluation of sea surface salinity observed by Aquarius [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(11): 8109-8121.
- [8] Tang W, Yueh S H, Fore A G, et al. Validation of Aquarius sea surface salinity with in situ measurements from Argo floats and moored buoys[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(9): 6171-6189.
- [9] Patt F S. 2014, Aquarius level-2 data product, Aquarius project document AQ-014-PS-0018 Version 3. 0 [EB/OL]. [2015-02-10]. [ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/all-](ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/all-Data/aquarius/docs/v3/AQ-014-PS-0018_Aquarius-Level2_specification_DatasetVersion3.0.pdf)

[Data/aquarius/docs/v3/ AQ-014-PS-0018_Aquarius-Level2_specification_DatasetVersion3. 0. pdf.](ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/all-Data/aquarius/docs/v3/AQ-014-PS-0018_Aquarius-Level2_specification_DatasetVersion3.0.pdf)

- [10] Riser S, Ren L, Wong A. Salinity in argo: A modern view of a changing ocean [J]. *Oceanography*, 2008, 21(1), 56-67. doi:10. 5670/ oceanog. 2008. 67.
- [11] Busalacchi A, Alory G, Arkin P, et al. Satellite sea surface salinity error in the Tropics [C/OL] // 2011 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, College Park: Earth System Science Interdisciplinary Center, 2011 [2013-06-10]. <http://essic.umd.edu/joom2/index.php/publications/posters-2>.
- [12] Drucker R, Riser S C. Validation of Aquarius sea surface salinity with Argo: Analysis of error due to depth of measurement and vertical salinity stratification [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(7): 4626-4637.

(责任编辑: 陆 雁)

(上接第 328 页 Continue from page 328)

- [10] 王得玉, 冯学智. 基于 TM 影像的钱塘江入海口水体透明度的时空变化分析[J]. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2005, 2: 185-189.
- Wang D Y, Feng X Z. Analysis of temporal and spatial changes of water clarity based on TM image in the estuary of Qiantang River [J]. *Journal of Jiangxi Normal University: Natural Science*, 2005, 2: 185-189.

- [11] He X, Bai Y, Pan D, et al. Using geostationary satellite ocean color data to map the diurnal dynamics of suspended particulate matter in coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 133: 225-239.

(责任编辑: 米慧芝)