

叶晗, 史玥双, 梁涵玮, 等. 南黄海透明度的时空分异特征及影响因素分析[J]. 海洋学报, 2022, 44(3): 128–136. doi:10.12284/hyxb2022019  
Ye Han, Shi Yueshuang, Liang Hanwei, et al. Spatiotemporal characteristics and driving factors of water transparency in the South Yellow Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(3): 128–136. doi:10.12284/hyxb2022019

# 南黄海透明度的时空分异特征及影响因素分析

叶晗<sup>1</sup>, 史玥双<sup>1</sup>, 梁涵玮<sup>2,3</sup>, 毛颖<sup>4</sup>, 周振宇<sup>5</sup>, 郑秀蕊<sup>1</sup>, 王胜强<sup>1\*</sup>, 孙德勇<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 江苏 南京 210024; 3. 南京信息工程大学 地理科学学院, 江苏 南京 210044; 4. 福建省气象灾害防御技术中心, 福建 福州 350005; 5. 南京信息工程大学 长望学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 水体透明度 ( $Z_{sd}$ ) 是评价水质状况的重要光学参数。本文针对南黄海海域, 面向 MODIS 传感器校正了  $Z_{sd}$  遥感反演模型, 进而利用 MODIS 近 20 年 (2002–2020 年) 数据分析了南黄海  $Z_{sd}$  的时空变化特征及其驱动力, 结果显示: 建立的  $Z_{sd}$  反演模型具有良好的精度 (决定系数为 0.91, 均方根误差为 1.69 m, 平均相对误差绝对值为 25.1%); 南黄海  $Z_{sd}$  在空间上呈现外海高近岸低的特点、在时间上呈现冬低夏高的季节变化特征, 近 20 年来南黄海中部、南黄海南部、长江口的  $Z_{sd}$  均在缓慢增加, 而江苏近岸的  $Z_{sd}$  呈现出缓慢降低趋势;  $Z_{sd}$  受悬浮颗粒物浓度的负向驱动, 其影响最大; 此外, 海表温度和光照强度对  $Z_{sd}$  都呈正向驱动, 而风速呈负向驱动。

**关键词:** 水体透明度; MODIS 遥感数据; 南黄海海域; 时空特征; 驱动因素

中图分类号: P714+.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)03-0128-09

## 1 引言

水体透明度 ( $Z_{sd}$ ) 指光穿透水体的程度, 能够有效反映水体的浑浊程度, 是评价水体水质最为直观的光学参数<sup>[1-2]</sup>之一。水体透明度的变化与诸多海洋生物化学过程和水动力环境过程密切相关, 如海洋初级生产力、物质输送等<sup>[1]</sup>, 因此研究水体透明度的变化特征对于海洋水团分析、初级生产力研究、海洋生态环境保护等具有重要的意义<sup>[3]</sup>。

对于  $Z_{sd}$  的监测, 传统方法常采用赛克盘进行现场测量<sup>[4-5]</sup>, 该方法耗时耗力, 而且调查样本有限, 难以获取  $Z_{sd}$  有效的时空分布信息。相比之下, 卫星遥感技术具有覆盖范围广、动态性强等诸多优势, 逐渐成为  $Z_{sd}$  的主要监测方法。目前针对  $Z_{sd}$  的卫星遥感反演算法大致可以分成两类: 经验算法和分析/半分

析算法<sup>[6]</sup>。经验算法主要通过建立  $Z_{sd}$  和遥感反射率光谱之间的经验定量关系, 从而实现对  $Z_{sd}$  的反演, 该方法往往依赖于大量的现场数据, 区域性较强; 分析/半分析方法则基于  $Z_{sd}$  与水体光学特性之间的物理理论关系, 来实现对  $Z_{sd}$  的遥感反演, 模型机理清晰、普适性好<sup>[7-8]</sup>。

近年来, Lee 等<sup>[9]</sup>通过光学理论推导修正了传统的  $Z_{sd}$  理论模型, 提出了新的  $Z_{sd}$  理论模型, 该理论模型的核心输入参数是水体漫衰减系数 ( $K_d$ )。基于此, Lee 等<sup>[9]</sup>利用半分析算法 (Quasi-analytical Algorithm, QAA) 从遥感影像先反演了  $K_d$ , 进而估算了全球海洋的  $Z_{sd}$ 。当研究者们将 Lee 等<sup>[9]</sup>的模型用于区域水体时, 发现新的  $Z_{sd}$  理论模型在整体上表现出良好的普适性<sup>[10-12]</sup>, 然而 QAA 算法反演的  $K_d$  在某些区域 (如近岸浑浊水体) 存在一定的偏差, 这导致  $Z_{sd}$  的遥感反演精度不

收稿日期: 2021-03-01; 修订日期: 2021-07-27。

基金项目: 国家自然科学基金 (42176181, 42176179, 42106176); 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室开放基金 (2019CZEPK07); 遥感科学国家重点实验室开放基金 (OFSLRSS202103); 江苏省自然科学基金 (BK20211289, BK20210667); 大学生创新创业训练计划 (202010300189)。

作者简介: 叶晗 (1999—), 女, 安徽省黄山市人, 主要从事水色遥感方面的研究。E-mail: hchuantingyu@163.com

\* 通信作者: 王胜强, 博士, 教授, 主要从事海洋光学和水色遥感方面的研究。E-mail: shengqiang.wang@nuist.edu.cn

高,因此,在实际应用中需要根据研究水域的水体光学特性对 $K_d$ 进行重新遥感反演。例如, Mao等<sup>[10]</sup>和毛颖等<sup>[13]</sup>针对渤海、黄海海域提出了 $K_d$ 的加权联合反演算法,再利用 Lee等<sup>[9]</sup>的新理论模型从地球静止水色仪(Geostationary Ocean Color Imager, GOCI)传感器数据反演了 $Z_{sd}$ ,结果与现场实测数据相比具有很好的 consistency。

南黄海海域中国沿岸受到陆地径流输入、季风、洋流等因素影响,水体特性复杂多变<sup>[14]</sup>,另外沿岸地区人类活动强度高,对近岸海洋环境的影响越来越引起人们的关注<sup>[15-16]</sup>。因此,本文以南黄海为研究区域,通过优化校正 Mao等<sup>[10]</sup>的 $Z_{sd}$ 算法,使其适用于中等分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)传感器,进而利用 MODIS 长时序的遥感数据资料,分析揭示近 20 年(2002-2020 年)南黄海水体透明度的时空变化特征,并探讨其影响因素。

## 2 研究区域与数据方法

### 2.1 研究区域

本文以南黄海海域为研究区域,具体的经纬度范围为 $30.8^{\circ}\sim 36.7^{\circ}\text{N}$ , $119^{\circ}\sim 126.9^{\circ}\text{E}$ (图 1)。此外,为深入分析 $Z_{sd}$ 的时间变化特征及其影响因素,本文选取了 4 个具有代表性的子区域(如图 1 红色方框所示),包括:(1)南黄海中部(Central South Yellow Sea, CSYS),经纬度为 $34.7^{\circ}\sim 35.7^{\circ}\text{N}$ , $123.8^{\circ}\sim 124.8^{\circ}\text{E}$ ,面积为 $9\ 101.2\ \text{km}^2$ 。(2)南黄海南部(Southern South Yellow Sea, SSYS),经纬度为 $32.7^{\circ}\sim 33.7^{\circ}\text{N}$ , $124.2^{\circ}\sim 125.2^{\circ}\text{E}$ ,面积为 $9\ 101.2\ \text{km}^2$ ;CSYS 和 SSYS 代表了水体较为清澈的外海海域,选取这两个区域可以对比分析近岸与外海 $Z_{sd}$ 的时空分布及其驱动因素的差异性。(3)长江口(Changjiang River Estuary, CRE),经纬

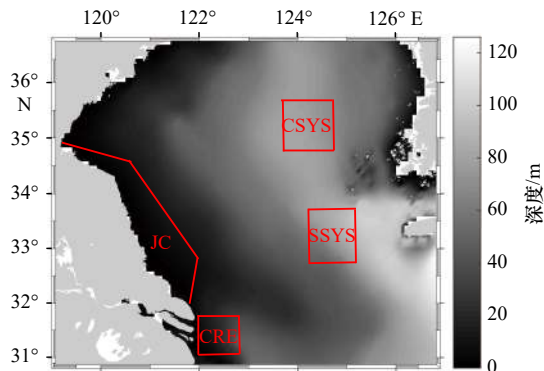


图 1 研究区域图  
Fig. 1 The study area

度为 $31^{\circ}\sim 31.7^{\circ}\text{N}$ , $122^{\circ}\sim 122.8^{\circ}\text{E}$ ,面积为 $5\ 096.7\ \text{km}^2$ ;该海域代表了长江冲淡水影响区域,选取该海域的目的是对比凸显南黄海海域 $Z_{sd}$ 的季节性变化以及悬浮物对其的影响特征。(4)江苏近海(Jiangsu Coast, JC),从左到右,从上到下 4 个顶点的经纬度分别为( $34.8^{\circ}\text{N}$ , $119.2^{\circ}\text{E}$ ),( $34.6^{\circ}\text{N}$ , $120.6^{\circ}\text{E}$ ),( $32.8^{\circ}\text{N}$ , $122^{\circ}\text{E}$ ),( $32^{\circ}\text{N}$ , $121.8^{\circ}\text{E}$ ),总面积为 $21\ 615.3\ \text{km}^2$ ;该海域为典型的近岸海域,其受潮汐影响明显,水体常年处于浑浊状态,此外,江苏近岸人类活动频繁,对 $Z_{sd}$ 也可能存在一定的影响,因而选作代表性区域之一。

### 2.2 透明度遥感模型

Lee等<sup>[9]</sup>提出的新的 $Z_{sd}$ 理论模型可表示为

$$Z_{sd} = \frac{1}{2.5 \min(K_d)} \ln \left( \frac{0.14 - R_{rs}}{0.013} \right), \quad (1)$$

式中, $K_d$ 表示下行辐照度的漫衰减系数(单位: $\text{m}^{-1}$ ); $R_{rs}$ 表示与 $K_d$ 相同波段的遥感反射率; $\min$ 表示所有波段对应的 $K_d$ 最小值。对于 $K_d$ 的计算, Lee等<sup>[9]</sup>建立了如下反演模型

$$K_d = (1 + 0.005\theta_0)a + 4.18[1 - 0.52 \exp(-10.8a)]b_b, \quad (2)$$

式中, $\theta_0$ 表示太阳天顶角; $a$ 表示水体总吸收系数(单位: $\text{m}^{-1}$ ); $b_b$ 表示水体总后向散射系数(单位: $\text{m}^{-1}$ ),对于 $a$ 和 $b_b$ 的计算, Lee等<sup>[9]</sup>采用了 QAA 模型<sup>[17]</sup>。然而, Mao等<sup>[10]</sup>和毛颖等<sup>[13]</sup>发现 QAA 模型反演的 $K_d$ 在黄海、渤海近岸浑浊水体存在一定误差,使得透明度反演精度较低。为此, Mao等<sup>[10]</sup>和毛颖等<sup>[13]</sup>提出了 $K_d$ 遥感反演联合算法,以提高 $K_d$ 的遥感反演精度,具体表示为

$$K_{d\_hybrid} = w_1 \times K_{d\_clear} + w_2 \times K_{d\_turbid}, \quad (3)$$

式中, $K_{d\_hybrid}$ 表示联合算法计算的 $K_d$ ; $K_{d\_clear}$ 为清澈水体的漫衰减系数,仍由 QAA 模型计算; $K_{d\_turbid}$ 为浑浊水体的漫衰减系数,由针对黄海、渤海近岸浑浊水体的区域算法计算<sup>[13]</sup>。 $K_{d\_turbid}$ 的计算最后仍然使用的是式(2),但是其 $a(490)$ 和 $b_b(490)$ 的计算方法有所不同,如式(4)、式(5)和式(6)所示:

$$R(\lambda) = 1.89QR_{rs}(\lambda), \quad (4)$$

$$b_b(490) = b_{bw}(490) - \frac{Ba_w(665)R(710)f(665)b_{bw}(665)}{f(710)a_w(665)R(665)} + \frac{Ba_w(665)R(710)}{f(710)}, \quad (5)$$

$$a(490) = \frac{f(490)b_b(490)}{R(490)}, \quad (6)$$

式中, $f=0.305$ ;  $Q=4$ ;  $B=1.13$ ;  $b_{bw}(490)=1.1 \times 10^{-3}$ ;  $a_w(665)=0.309$ ;  $b_{bw}(665)=3 \times 10^{-4}$ 。式(3)中的 $w_1$ 和 $w_2$ 为权重,如式(7)、式(8)所示。该联合算法的具体推导过程可参见文献[13]。

$$w_1 = \frac{1.2 - R_{rs}(683)/R_{rs}(490)}{1.2 - 0.5}, \quad (7)$$

$$w_2 = 1 - \frac{1.2 - R_{rs}(683)/R_{rs}(490)}{1.2 - 0.5}. \quad (8)$$

本文基于现场实测数据, 根据 MODIS 传感器的波段设置, 对毛颖等<sup>[13]</sup>的  $K_d$  遥感反演联合算法进行校正, 使其适用于 MODIS 传感器, 进而利用 Lee 等<sup>[9]</sup>的  $Z_{sd}$  新理论模型估算南黄海的水体透明度。

### 2.3 距平计算方法

在后续的时空特征分析中, 本文分别计算了 4 个子区域水体透明度的距平。由于 2002 年和 2020 年的水体透明度数据不全, 所以计算距平时仅选择了 2003–2019 年的数据。具体计算过程为: 设 2003–2019 年的某子区域  $i$  年  $j$  月的水体透明度的空间平均值为  $M_{ij}$  ( $i = 2003, 2004, \dots, 2019; j = 1, 2, \dots, 12$ ), 该子区域 2003–2019 年期间  $j$  月的平均值  $M_j$  计算为

$$M_j = \frac{1}{17} \sum_{i=2003}^{2019} M_{i,j}, \quad (9)$$

该子区域  $i$  年  $j$  月的距平  $DL_{ij}$  则计算为

$$DL_{ij} = M_{i,j} - M_j, \quad (10)$$

同理可以计算其他子区域的透明度距平。

### 2.4 数据资料来源

本研究的现场数据资料采集于 2002 年至 2003 年间以及 2014 年至 2016 年间的 6 个海上调查航次, 调查航次的详细信息及参数测量方法可参见 Mao 等<sup>[10]</sup>和毛颖等<sup>[13]</sup>的研究。简而言之, 本文的数据信息及其用途如表 1 所示: 其中, 数据子集 A 的测量参数包括  $R_{rs}$  和  $K_d$ , 用于校正毛颖等<sup>[13]</sup>的  $K_d$  遥感反演联合算法; 数据子集 B 的测量参数包括  $R_{rs}$ 、 $K_d$  和  $Z_{sd}$ , 用于验证评价耦合毛颖等<sup>[13]</sup> $K_d$  遥感反演联合算法和 Lee 等<sup>[9]</sup> $Z_{sd}$  新理论模型估算的  $Z_{sd}$  的精度。

表 1 本研究中现场实测数据的相关信息及用途

数据源	采样时间	测量参数	样本数	用途
子集A	2002年4月、8月和11月	$R_{rs}$ 和 $K_d$	42	校正毛颖等 <sup>[13]</sup> 的 $K_d$ 遥感反演联合算法
	2003年3月和9月	$R_{rs}$ 和 $K_d$	156	
子集B	2014年5月	$R_{rs}$ 、 $K_d$ 和 $Z_{sd}$	13	验证评价 $Z_{sd}$ 的遥感估算精度
	2014年11月	$R_{rs}$ 、 $K_d$ 和 $Z_{sd}$	20	
	2015年8月	$R_{rs}$ 、 $K_d$ 和 $Z_{sd}$	10	
	2016年7月	$R_{rs}$ 、 $K_d$ 和 $Z_{sd}$	30	

注:  $R_{rs}$ 表示遥感反射率,  $K_d$ 表示漫衰减系数,  $Z_{sd}$ 表示水体透明度。

本文所使用的卫星数据主要包括遥感反射率  $R_{rs}$ 、海表温度 (Sea Surface Temperature, SST)、风速

(Wind Speed, WS)、光合有效辐射 (Photosynthetic Active Radiation, PAR) 以及悬浮颗粒物浓度 (Total Suspended Matter, TSM)。其中  $R_{rs}$ 、SST 和 PAR 均来源于 MODIS 的 L3 月产品, 空间分辨率都为 4 km, 从 <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> 网站下载获得; WS 数据从 <https://www.esrl.noaa.gov/> 网站获得, 其空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ 。TSM 数据则利用 YOC 算法<sup>[18]</sup>从  $R_{rs}$  数据反演得到。以上数据的时间范围为 2002 年 7 月至 2020 年 9 月。

## 3 结果与讨论

### 3.1 基于 MODIS 数据的水体透明度遥感反演精度

利用本文构建的适用于 MODIS 传感器的遥感模型反演  $Z_{sd}$ , 即先利用优化校正后的毛颖等<sup>[13]</sup>的遥感反演联合算法反演  $K_d$ , 再利用 Lee 等<sup>[9]</sup>的新理论模型计算  $Z_{sd}$ ; 然后利用现场实测数据资料对反演结果进行精度检验, 本文采用的精度检验指标包括: 决定系数  $R^2$  (Coefficient of Determination)、均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 和平均相对误差绝对值 (Mean Absolute Percent Error, MAPE)。RMSE 和 MAPE 计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (11)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \times 100\%, \quad (12)$$

式中,  $x_i$  和  $y_i$  分别表示第  $i$  个样本的实测值和估测值;  $N$  表示样本数, 本研究中  $N = 73$ 。验证结果如图 2 所示, 可以看出, MODIS 传感器的  $Z_{sd}$  遥感模型反演结果与实测数据具有很好的一致性, 数据样本较均匀地分布在 1:1 线附近, 其中  $R^2$ 、RMSE 和 MAPE 分别为

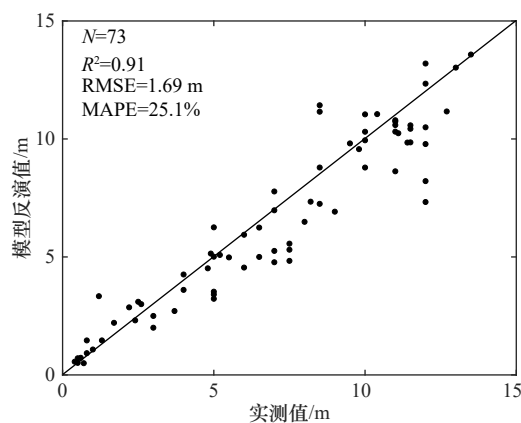


图 2 水体透明度 ( $Z_{sd}$ ) 遥感反演模型的验证

Fig. 2 Verification of water transparency ( $Z_{sd}$ ) remote sensing inversion model

0.91, 1.69 m 和 25.1%。以上结果表明 MODIS 传感器的  $Z_{sd}$  遥感模型具有良好的反演精度。

### 3.2 南黄海水体透明度的时空变化特征

将  $Z_{sd}$  的遥感反演模型应用于 2002 年 7 月至 2020 年 9 月的 MODIS 长时序  $R_{rs}$  数据, 构建了近 20 年南黄海海域每个月的  $Z_{sd}$  遥感产品, 将  $Z_{sd}$  遥感月产品再进行平均得到了南黄海海域的平均  $Z_{sd}$  (图 3a)。从图中可以看出, 南黄海海域的  $Z_{sd}$  总体呈现出外海高近

岸低的特征。其中, 江苏近岸海域  $Z_{sd}$  明显低于外海, 长江口的  $Z_{sd}$  进一步降低, 同时长江口的低值区呈现出舌状延伸。为了消除量纲的影响、更好地分析数据的离散程度, 计算了  $Z_{sd}$  的变异系数 (Coefficient of Variation, CV) (图 3b)。可以看出, 江苏近海以及长江口的 CV 值较低, 表明这些区域的  $Z_{sd}$  变化不大, 长期处于较低值; 而外海区域的 CV 值普遍较高, 表明这些区域的  $Z_{sd}$  可能存在较大的时间变化。

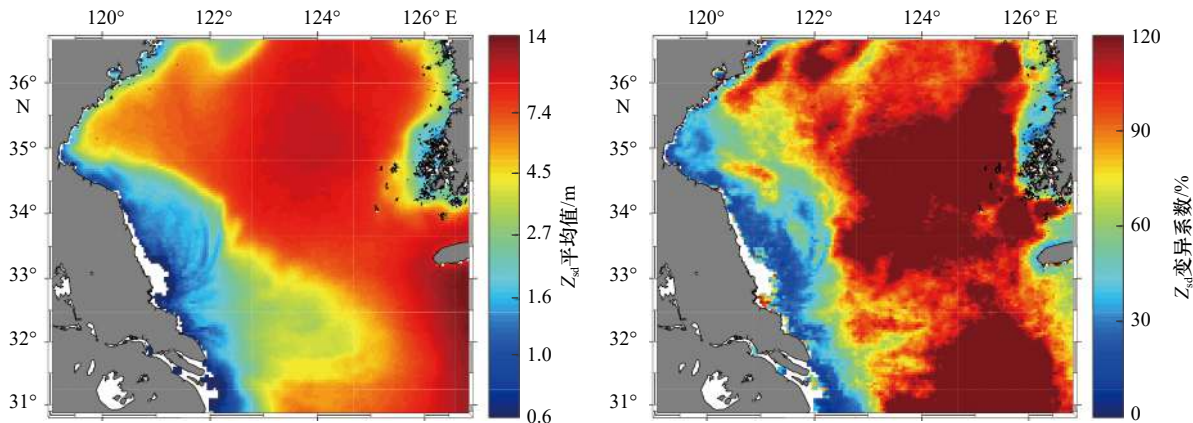


图 3 南黄海水体透明度 ( $Z_{sd}$ ) 的平均值 (a) 和变异系数 (b)

Fig. 3 The mean value (a) and coefficient of variation (b) of water transparency ( $Z_{sd}$ ) in the South Yellow Sea

针对每个月, 进一步计算了  $Z_{sd}$  所有年份的平均值, 并以此分析了南黄海  $Z_{sd}$  的时间变化特征, 结果如图 4 所示, 可以看出: 整体上在不同月份南黄海海域  $Z_{sd}$  都呈现出外海高近岸低的特点, 但在不同季节也表现出一定的差异。在冬季 (12 月至翌年 2 月), 外海的  $Z_{sd}$  基本处于较低值, 随着时间的推移, 在夏季 (6-8 月)  $Z_{sd}$  达到峰值, 之后外海的  $Z_{sd}$  又逐渐降低, 相比之下, 近岸的  $Z_{sd}$  常年处于低值。以上时间变化特征也使得在冬、春两季 (12 月至次年 5 月), 外海  $Z_{sd}$  与近岸  $Z_{sd}$  差异远小于夏、秋两季 (6-11 月), 这种差异在 6 月达到最大, 在 1 月达到最小。

对于中国近海水体透明度, 学者们也有开展过一定的研究, 例如: 薛宇欢等<sup>[9]</sup> 利用 2006 年和 2007 年的中国近海环境调查的透明度数据, 分析了中国近海的水体透明度时空分布特征; Mao 等<sup>[10]</sup> 利用 2015 年的 GOCI 传感器数据, 反演分析了渤海、黄海  $Z_{sd}$  的日变化和月变化; 何贤强等<sup>[9]</sup> 利用 1998 年和 1999 年的 SeaWiFS 卫星数据, 反演分析了中国近海水体透明度的时空变化规律。虽然这些学者对中国近海水体透明度的时空分布特征做了一定的分析, 但其数据仅限于某些年份。相比之下, 本文是利用了 MODIS 近 20 年 (2002-2020 年) 的数据展开分析研究, 长时序的数据资料有利于更深入地挖掘水体透明度的时空分布特征。此

外, 本文定量计算并深入分析了 PAR、SST、TSM 和 WS 4 种因子对水体透明度时空变化的影响。

为了更深入地明晰南黄海  $Z_{sd}$  的时空变化特征, 本文选取了 4 个典型区域进行分析, 包括南黄海中 (CSYS)、南黄海南部 (SSYS)、江苏近海 (JC) 和长江口 (CRE), 具体位置如图 1 所示。各区域  $Z_{sd}$  时间变化结果如图 5 所示, 可以看出: 总体上 4 个区域的水体透明度呈现出冬低夏高的变化规律, 其中南黄海中、南黄海南部和江苏近海的  $Z_{sd}$  的最大值都出现在夏季, 而长江口的  $Z_{sd}$  值在夏季却偏低, 这可能是由于夏季长江淡水排放达到最大, 导致悬浮泥沙增多, 进而使得  $Z_{sd}$  降低。此外, 在不同季节, 南黄海中  $Z_{sd}$  值的年际波动比较小, 特别是在冬季,  $Z_{sd}$  值很稳定。类似地, 南黄海南部的  $Z_{sd}$  值在冬季的年际波动也很不明显, 但在春、夏、秋 3 个季节的  $Z_{sd}$  值相比南黄海中部的波动要大一些。相比之下, 江苏近海和长江口区域的  $Z_{sd}$  的年际波动在每个季节都比较大。

为进一步探究南黄海  $Z_{sd}$  的长时序变化趋势, 本文计算了南黄海中、南黄海南部、江苏近海和长江口 4 个子区域  $Z_{sd}$  的距平, 结果如图 6 所示, 可以看出: 在南黄海中、南黄海南部以及长江口的  $Z_{sd}$  都呈现出显著性上升趋势 ( $p < 0.01$ ), 尤其是南黄海中, 可以看出在 2018 年以后有着明显的上升趋势。相比

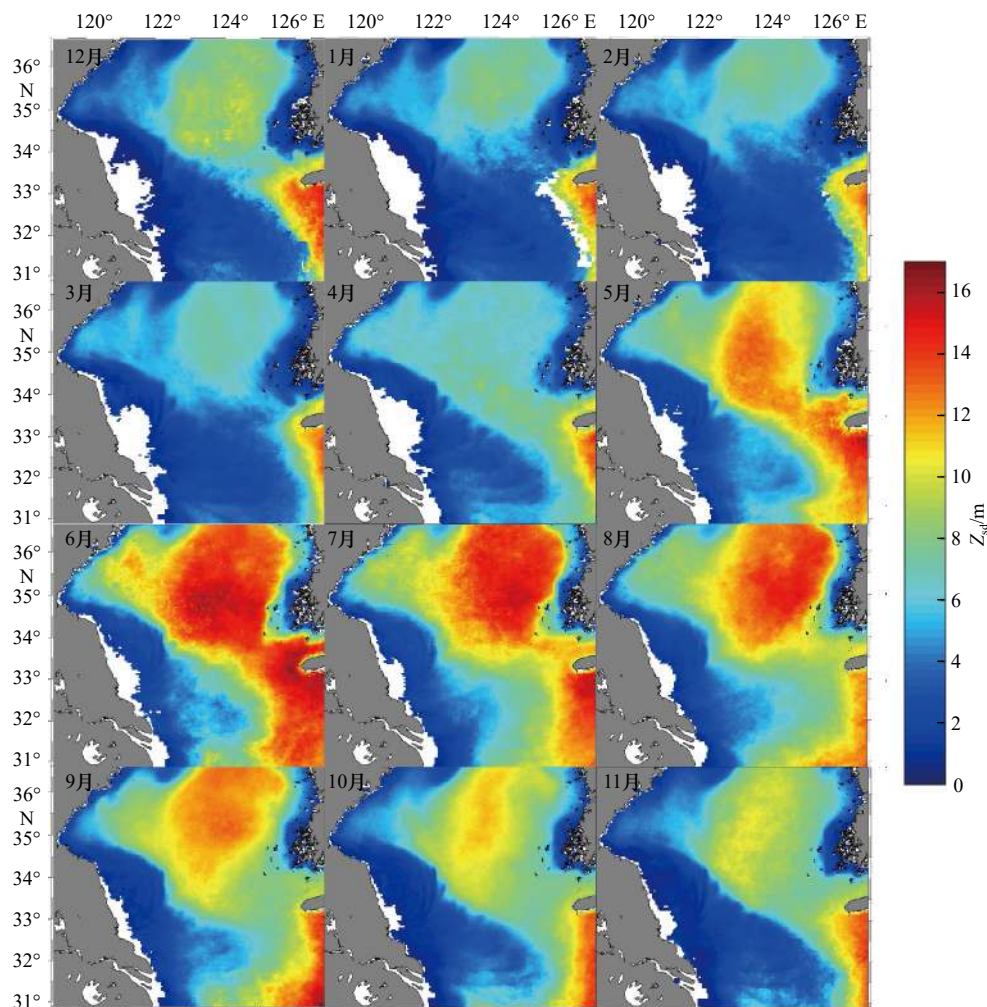


图4 基于MODIS数据的南黄海水体透明度( $Z_{sd}$ )月变化

Fig. 4 Monthly distributions of water transparency ( $Z_{sd}$ ) in the South Yellow Sea derived from MODIS data

之下,江苏近海的 $Z_{sd}$ 却呈现出显著下降趋势( $p < 0.01$ )。

### 3.3 南黄海透明度变化的影响因素分析

针对南黄海海域的 $Z_{sd}$ 时空变化特征,本文对其影响因素(4个子区域)进行了分析探究。本文选取了PAR、SST、TSM以及WS 4种环境因素(每月一组数据),分别计算了它们与南黄海中部、南黄海南部、江苏近海和长江口 $Z_{sd}$ 空间均值的皮尔森相关系数,依此分析了它们对 $Z_{sd}$ 的影响。由图7可以看出,PAR和SST在4个子区域都与 $Z_{sd}$ 呈正相关,而TSM和WS在4个子区域都与 $Z_{sd}$ 呈负相关,而且4个区域的TSM与 $Z_{sd}$ 均呈现出很强的负相关性(相关系数 $R$ 均大于0.65)。然而,4个区域 $Z_{sd}$ 的影响因素也呈现出一定的差异,其中江苏近海和南黄海南部的 $Z_{sd}$ 受TSM和PAR的影响更为强烈,其 $R$ 值分别为-0.88、-0.86和0.75、0.61,而南黄海中部则主要受TSM与SST的影响, $R$ 值分别为-0.93和0.81;在长江口,TSM是 $Z_{sd}$ 影响因素中最大的一个( $R = -0.68$ ),相比

于PAR、SST和WS,其 $R$ 值的绝对值最大相差0.54,最小相差0.31。此外,可以看出在长江口,PAR、SST、TSM以及WS 4种环境因子与 $Z_{sd}$ 的相关性相对于其他区域都要低一些,这可能是影响长江口 $Z_{sd}$ 的变化因素复杂多变,对于其具体原因仍需进一步的研究。

在夏季,由于太阳辐射强度最大,使得SST升高,导致表层海水密度小于底层海水密度,上下层海水不能有效混合使得海水出现层化现象<sup>[20]</sup>,海中悬浮物沉积,上层海水TSM降低,进而导致 $Z_{sd}$ 增大;在秋季,太阳辐射逐渐减弱,SST降低,水体层化现象逐渐减弱,海水混合逐渐增强, $Z_{sd}$ 分布情况向冬季过渡;到冬季时,太阳辐射达到最低,SST最小,此时上下层水体的密度差减小,又因为盛行季风的作用海水上下混合强烈,水体层化现象消失,并且风速越大,混合越强烈<sup>[21]</sup>,这个过程使得上层海水的TSM升高,导致 $Z_{sd}$ 很低;在春季,太阳辐射逐渐增强,SST升高,WS迅速减弱,海水混合减弱,水体层化增强,使得 $Z_{sd}$ 分

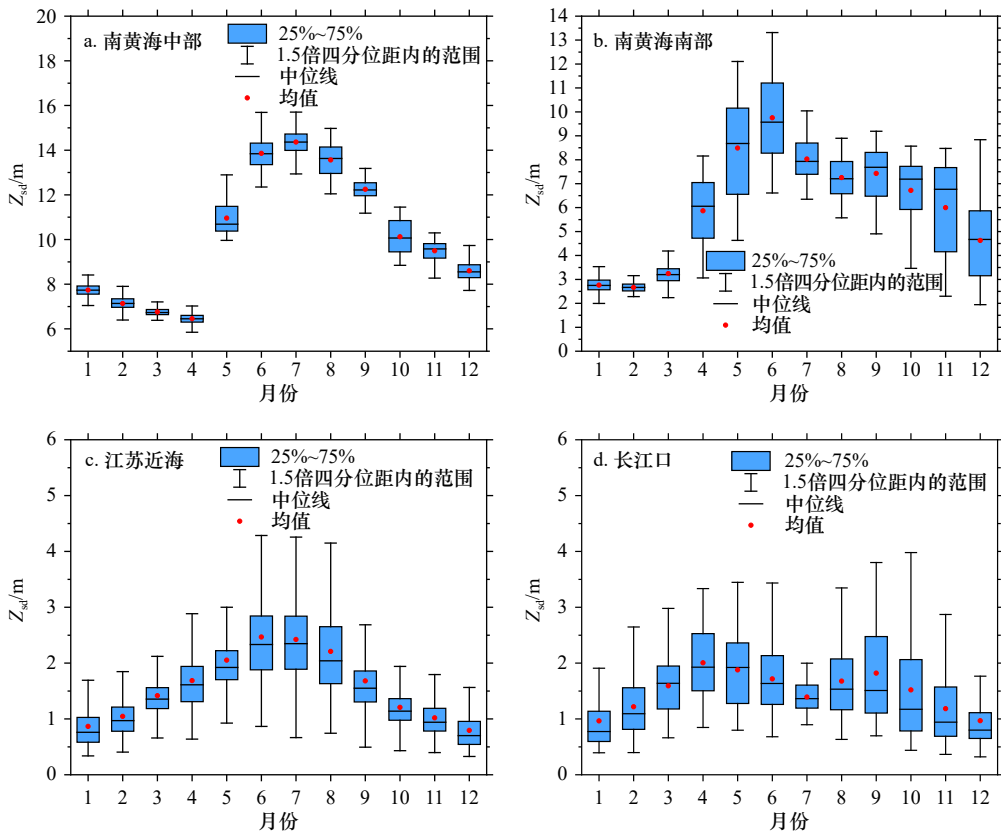


图5 子区域的水体透明度( $Z_{sd}$ )时间变化箱式图

Fig. 5 Boxplots of temporal variation of water transparency ( $Z_{sd}$ ) of each sub-area

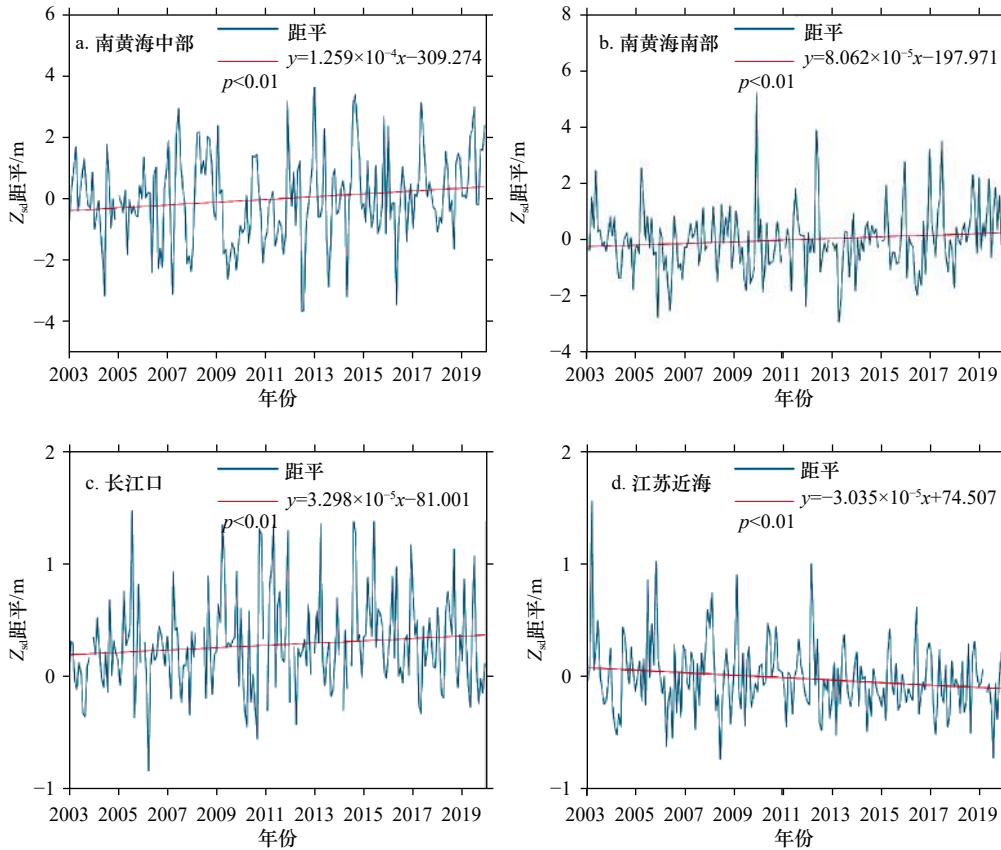


图6 子区域的水体透明度( $Z_{sd}$ )年际变化趋势

Fig. 6 Annual trends of water transparency ( $Z_{sd}$ ) of each sub-area

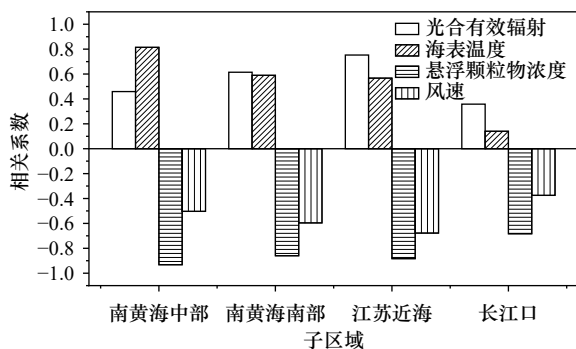


图7 各子区域  $Z_{sd}$  与光合有效辐射、海表温度、悬浮颗粒物浓度以及风速的相关关系

Fig. 7 Correlation coefficients of  $Z_{sd}$  with photosynthetic active radiation, sea surface temperature, total suspended matter and wind speed

布特征逐渐开始向夏季过渡。以上环境变化过程使得  $Z_{sd}$  与 PAR 和 SST 呈现出明显的正相关关系, 而与 WS 和 TSM 呈现出明显的负相关关系。此外, 为了进一步明晰长江口  $Z_{sd}$  的影响因素, 本文收集了大通水文站径流量数据以代表长江径流量, 将其与长江口洪季的水体透明度做了相关分析, 结果发现长江径流量与长江口的  $Z_{sd}$  呈现显著负相关性 ( $R=-0.50, p<0.01$ ), 表明径流量越大水体透明度越低, 这主要是由于径流携带大量悬浮物入海<sup>[22-24]</sup>, 降低了水体透明度。

#### 参考文献:

- [1] Megard R O, Berman T. Effects of algae on the Secchi transparency of the southeastern Mediterranean Sea[J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(8): 1640-1655.
- [2] He Xianqiang, Pan Delu, Bai Yan, et al. Recent changes of global ocean transparency observed by SeaWiFS[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 143: 159-166.
- [3] 薛宇欢, 熊学军, 刘衍庆. 中国近海海水透明度分布特征与季节变化[J]. *海洋科学进展*, 2015, 33(1): 38-44.  
Xue Yuhuan, Xiong Xuejun, Liu Yanqing. Distribution features and seasonal variability of the transparency in offshore waters of China[J]. *Advances in Marine Science*, 2015, 33(1): 38-44.
- [4] 张绪琴. 海水透明度[J]. *海洋湖沼通报*, 1982(4): 14-18.  
Zhang Xuqin. Seawater transparency[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1982(4): 14-18.
- [5] Lee Z, Shang Shaoling, Qi Lin, et al. A semi-analytical scheme to estimate Secchi-disk depth from Landsat-8 measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 177: 101-106.
- [6] 张居诗, 魏国妹, 林供, 等. 一个基于固有光学特性的透明度半分析算法适用性探讨[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2014, 53(4): 549-554.  
Zhang Jushi, Wei Guomei, Lin Gong, et al. Evaluation of the applicability of an IOP-based algorithm to derive secchi depth[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2014, 53(4): 549-554.
- [7] 郝艳玲, 曹文熙, 崔廷伟, 等. 基于半分析算法的赤潮水体固有光学性质反演[J]. *海洋学报*, 2011, 33(1): 52-65.  
Hao Yanling, Cao Wenxi, Cui Tingwei, et al. The retrieval of oceanic inherent optical properties based on semianalytical algorithm during the red tide[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 33(1): 52-65.
- [8] 何贤强, 潘德炉, 毛志华, 等. 利用SeaWiFS反演海水透明度的模式研究[J]. *海洋学报*, 2004, 26(5): 55-62.  
He Xianqiang, Pan Delu, Mao Zhihua, et al. The study on the inversing model of water transparency using the SeaWiFS data[J]. *Haiyang Xuebao*, 2004, 26(5): 55-62.
- [9] Lee Z, Shang Shaoling, Hu Chuanmin, et al. Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 139-149.
- [10] Mao Ying, Wang Shengqiang, Qiu Zhongfeng, et al. Variations of transparency derived from GOCI in the Bohai Sea and the Yellow

## 4 结论

通过本文的相关研究, 得到了以下几点重要结论:

(1) 在空间上, 南黄海水体透明度  $Z_{sd}$  呈现外海高近岸低的特点, 从季节变化来看, 南黄海中部、南黄海南部和江苏近海  $Z_{sd}$  均呈现出冬低夏高的特点, 但对于长江口, 夏季的  $Z_{sd}$  相对较低, 可能与长江淡水排放量在夏季达到最大有关。

(2) 近 20 年来, 南黄海中部、南黄海南部和长江口的  $Z_{sd}$  基本呈上升趋势, 而江苏近海的  $Z_{sd}$  却表现出下降趋势。

(3) 整体上, 南黄海  $Z_{sd}$  与 PAR 和 SST 呈正相关关系, 而与 TSM 和 WS 呈负相关, 相比之下, TSM 是  $Z_{sd}$  的最主要驱动因素。

本研究分析了南黄海海域  $Z_{sd}$  的时空变化特征及其影响因素, 这为南黄海海域的海洋生态环境、区域海洋学等相关研究提供了一定的科学参考。对于  $Z_{sd}$  时空变化的驱动因素分析中, 本研究仅做了自然环境影响因素的分析。然而对于江苏近海,  $Z_{sd}$  可能受到人类活动的影响, 针对该问题, 仍需在下一步工作中结合人类活动数据资料进行深入分析研究。

- Sea[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 12191–12209.
- [11] 贾后磊, 苏文, 黄华梅, 等. 海岸带和内陆水体透明度动态变化特征及其主导影响因素[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0301001.  
Jia Houlei, Su Wen, Huang Huamei, et al. Dynamic change characteristics and its dominant influencing factors of secchi disk depth in coastal and inland waters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0301001.
- [12] Bai Shuying, Gao Jixi, Sun Deyong, et al. Monitoring water transparency in shallow and eutrophic lake waters based on GOCI observations[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 163.
- [13] 毛颖, 丘仲锋, 孙德勇, 等. 渤海海水体漫衰减系数的遥感反演[J]. *广西科学*, 2016, 23(6): 513–519.  
Mao Ying, Qiu Zhongfeng, Sun Deyong, et al. A novel remote sensing algorithm for estimating diffuse attenuation coefficient in the Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *Guangxi Sciences*, 2016, 23(6): 513–519.
- [14] Wang Shengqiang, Huan Yu, Qiu Zhongfeng, et al. Remote sensing of particle cross-sectional area in the Bohai Sea and Yellow Sea: Algorithm development and application implications[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 841.
- [15] 殷子瑶, 江涛, 杨广普, 等. 1986–2017年胶州湾水体透明度时空变化及影响因素研究[J]. *海洋科学*, 2020, 44(4): 21–32.  
Yin Ziyao, Jiang Tao, Yang Guangpu, et al. The spatial-temporal variation of water clarity and its influencing factors in Jiaozhou Bay from 1986 to 2017[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(4): 21–32.
- [16] Shang Shaoling, Lee Z, Shi Lianghai, et al. Changes in water clarity of the Bohai Sea: Observations from MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 22–31.
- [17] Lee Z, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755–5772.
- [18] Siswanto E, Tang Junwu, Yamaguchi H, et al. Empirical ocean-color algorithms to retrieve chlorophyll-*a*, total suspended matter, and colored dissolved organic matter absorption coefficient in the Yellow and East China Seas[J]. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(5): 627–650.
- [19] 何贤强, 潘德炉, 黄二辉, 等. 中国海透明度卫星遥感监测[J]. *中国工程科学*, 2004, 6(9): 33–37.  
He Xianqiang, Pan Delu, Huang Erhui, et al. Monitor of water transparency in the China Sea by using satellite remote sensing[J]. *Engineering Science*, 2004, 6(9): 33–37.
- [20] 李娜. 中国东部近海热状况变化特征及与华北夏季气候变化关系的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 15–17.  
Li Na. Analysis about thermal condition characteristics in marginal seas east of china and relationship between it and North China climate change[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012: 15–17.
- [21] 任杰, 刘宏坤, 贾良文, 等. 磨刀门水道盐度混合层化机制[J]. *水科学进展*, 2012, 23(5): 715–720.  
Ren Jie, Liu Hongkun, Jia Liangwen, et al. Research on salinity mixing and stratification mechanisms at the Modaomen channel[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(5): 715–720.
- [22] 禹定峰. 海水透明度的遥感研究[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2013: 89–90.  
Yu Dingfeng. Remote sensing of secchi disk depth[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2013: 89–90.
- [23] Kukushkin A S. River runoff effects on the coastal water transparency in the western black sea[J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2018, 43(7): 464–472.
- [24] 丁梦娇, 丘仲锋, 张海龙, 等. 基于NPP-VIIRS卫星数据的渤海海浊度反演算法研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0601002.  
Ding Mengjiao, Qiu Zhongfeng, Zhang Hailong, et al. Inversion algorithm for turbidity of Bohai and Yellow Seas based on NPP-VIIRS satellite data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0601002.

## Spatiotemporal characteristics and driving factors of water transparency in the South Yellow Sea

Ye Han<sup>1</sup>, Shi Yueshuang<sup>1</sup>, Liang Hanwei<sup>2,3</sup>, Mao Ying<sup>4</sup>, Zhou Zhenyu<sup>5</sup>,  
Zheng Xiurui<sup>1</sup>, Wang Shengqiang<sup>1</sup>, Sun Deyong<sup>1</sup>

(1. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210024, China; 3. School of Geographic Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. Meteorological Disasters Defending Technique Centre of Fujian Province, Fuzhou 350005, China; 5. Changwang School of Honors, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Water transparency ( $Z_{sd}$ ) is an important optical parameter for evaluating water quality. This paper tuned a remote sensing model for estimating  $Z_{sd}$  from MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) data in the South Yellow Sea. This model was then used to analyze the spatial and temporal variations of  $Z_{sd}$  in the South Yellow Sea based long-term MODIS data in the past 20 years (2002–2020), and their driving factors were examined. The results show that the  $Z_{sd}$  estimation model has good accuracy with  $R^2$ , root mean square error and mean absolute percent error values of 0.91, 1.69 m and 25.1%, respectively. The  $Z_{sd}$  levels are generally high in the offshore but low in the coastal area. Meanwhile,  $Z_{sd}$  indicates high values in summer but low values in winter. In the past 20 years,  $Z_{sd}$  in the central South Yellow Sea, the southern South Yellow Sea and the Changjiang River Estuary showed slowly increase trends, while  $Z_{sd}$  in the Jiangsu coast was decreasing slowly. In general, the  $Z_{sd}$  is negatively driven by the concentration of suspended particulate matter, of which the influence is the greatest. In addition, sea surface temperature and solar radiation have positive driving effects on  $Z_{sd}$ , while wind speed has negative driving effect.

**Key words:** water transparency; MODIS data; South Yellow Sea; spatiotemporal variations; driving factors