

基于修正的增强归一化差异水体指数的富营养化水体信息提取研究^{*}

宋昊^{1,3,4}, 潘鑫^{2,3**}, 谢文英^{1,3}, 杨子^{1,3}, 黄祚继⁴, 王春林⁴, 杨英宝^{2,3**}

(1: 河海大学地球科学与工程学院, 南京 211100)

(2: 河海大学地理与遥感学院, 南京 210098)

(3: 河海大学, 流域水土过程省高校重点实验室, 南京 211100)

(4: 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 合肥 230088)

摘要: 增强归一化差异水体指数(augmented normalized difference water index, ANDWI)是一种新颖、稳健的水体指数,但在某些情况下 ANDWI 可能对表面聚集型水华的水体提取效果较差;因此,本文依据水体指数 ANDWI 的特点及富营养化水体指数(improved eutrophic water body index, MEWI)的构建思路,基于富营养化水体等地物的光谱特性,构造了修正的增强归一化差异水体指数(modified augmented normalized difference water index, MANDWI)。本文以不同季节、不同水华等级的太湖进行水体提取验证,将 MANDWI 与双红外水体指数(double infrared band water index, DIBWI)、MEWI、多波段组合水体指数(multi-band combination water index, MBCWI)和 ANDWI 进行对比,结果表明 MANDWI 适用于不同季节且具有较好的水体提取效果,随着水华等级提升,MANDWI 仍具有较高的水体提取精度(总体精度为 0.99, Kappa 系数为 0.98),而其他水体指数的提取效果较差。MANDWI 的提出增强了遥感水体提取能力,对于水资源管理和保护具有重要意义,同时也为类似水体指数的构建提供参考。

关键词: MANDWI; 富营养化; 水体提取; 大津法

Eutrophic water information extraction based on modified augmented normalized difference water index^{*}

Song Hao^{1,3,4}, Pan Xin^{2,3**}, Xie Wenying^{1,3}, Yang Zi^{1,3}, Huang Zuojì⁴, Wang Chunlin⁴ & Yang Yingbao^{2,3**}

(1: College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, P.R.China)

(2: College of Geography and Remote Sensing, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(3: Key Laboratory of Watershed Soil and Water Processes, Hohai University, Nanjing 211100, P.R.China)

(4: Water Conservancy Research Institute of Huaihe River Water Conservancy Committee, Ministry of Water Resources, Anhui Province, Hefei 230088, P.R.China)

Abstract: The augmented normalized difference water index (ANDWI) is novel and robust. However, in some cases, ANDWI may be less effective in extracting water body with more surface-floating algal bloom. Therefore, considering the characteristics of ANDWI and the construction of the improved eutrophic water body index (MEWI), this paper constructed the modified augmented normalized difference water index (MANDWI) based on the spectral characteristics of eutrophic water body and other surface features. In this paper, water extraction verification was carried out in Lake Taihu with different seasons and different algal bloom levels. MANDWI was compared with DIBWI (double infrared band water index), MEWI, MBCWI (multi-band combination water index), and ANDWI. The results showed that MANDWI was suitable for different seasons and had a good water extraction effect. With the increase of algal bloom level, MANDWI still has high water extraction accuracy (overall accuracy is 0.99, Kappa coefficient is 0.98).

^{*} 2024-03-29 收稿;2024-05-13 收修改稿。

国家自然科学基金项目(41701487,42230112,42071346)、江苏省海洋科技创新项目(JSZRH YKJ202302)、中央高校基本科研业务费专项(2019B02714)和国家留学基金项目联合资助。

^{**} 通信作者;E-mail:px1013@hhu.edu.cn,yyb@hhu.edu.cn。

cient is 0.98), while the extraction effects of other indices were poor. The proposal of MANDWI enhanced the ability of remote sensing water extraction, which was of great significance for water resource management and protection, and also provided a reference for the development of similar water body index.

Keywords: MANDWI; eutrophication; water body extraction; Otsu

水面面积是描述湖泊水情变化的基本水文量,精确提取水面面积有助于水资源合理调节、利用和保护;然而,水质污染造成的富营养化水体在水体提取中常被忽略,导致特定时期的富营养化水体被漏检,因此,考虑富营养化水体的光谱特征,改进水体提取方法,从遥感影像中正确提取富营养化水体,对提高水体提取精度及提供正确的水面信息具有重要意义。

水体提取通常采用单波段法或多波段法,其中多波段法利用多个波段信息相较于单波段法更有优势^[1],目前,多波段法中水体指数法的应用频次最高。常用的水体指数包括归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI)^[2]、改进的归一化差异水体指数(MNDWI, modified normalized difference water index)^[3]、自动水体提取指数(automated water extraction index, AWEI)^[4]、2015 水体指数(2015 water index, WI2015)^[5]、多波段水体指数(multi-band water index, MBWI)^[6]、归一化多波段水体指数(normalized difference multi-band water index, NDMBWI)^[7]、植被红边水体指数算法(RWI, vegetation red edge based water index)^[8]、三角水指数(triangle water index, TWI)^[9]、增强归一化差异水体指数(augmented normalized difference water index, ANDWI)^[10]等。但上述水体指数只适用于表征清洁水体,对富营养化水体的表征较弱。目前针对富营养化水体特征,已经出现了一些适用于提取这类水体的水体指数,例如改进富营养化水体指数(the improved eutrophic water body index, MEWI)^[11]、双红外水体指数(double infrared band water index, DIBWI)^[12]、多波段组合水体指数(multi-band combination water index, MBCWI)^[13]等,这些指数具有一定的水体提取精度,但对水华严重程度较高的太湖水体的提取效果有待验证;此外,结合光学遥感数据及 SAR 数据的水体指数也可用于提取富营养化水体,例如基于 SAR 和光学影像的水指数(sar and optical imagery water index, SOWI)可以准确识别水华下的水体^[14],但 SOWI 指数需要具有相近日期的 SAR 影像和光学影像。与其他指数(NDWI、MNDWI、AWEI)相比,大津法的 ANDWI 具有最高的总体精度^[10],因此,为了实现太湖富营养化水体的提取,本文基于 ANDWI,顾及传统富营养化水体指数的原理,提出了修正的增强归一化差异水体指数(modified augmented normalized difference water index, MANDWI),结合大津法的 MANDWI 对富营养化水体及清水均具有较高的水体提取精度。MANDWI 指数的提出使水体指数方法更加完善,扩展了水体指数对富营养化水体的适用性,对水体监测、水资源合理规划与利用具有重要意义。

1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区

本文选择太湖(30°55'40"~31°32'58"N, 119°52'32"~120°36'10"E)作为研究区。太湖位于长江三角洲的南缘,江苏省南部,为五大淡水湖之一,位居第三,总面积约为 2427 km²。太湖地势较为平坦,属于亚热带季风气候,四季分明,夏季多雨、炎热、潮湿,冬季相对较冷^[15]。受气候变暖及人为因素影响,太湖水质退化,夏、秋两季常有大范围蓝藻水华暴发,严重影响太湖水生态环境,对当地居民生活造成危害。

1.2 研究数据

本文的研究数据为 Landsat 8 Collection 2 Level 2 数据及 MYD09GQ 数据,Landsat 8 Collection 2 Level 2 为辐射定标、大气校正后的产品,用于水体指数构造、精度验证、光谱采样;MYD09GQ 数据用于水华等级的确定(附表 I)。

2 研究方法

2.1 水华等级划分

本文采用 Landsat 8 对应或相邻日期的 MYD09GQ 数据,参考 Shi 等^[16]的方法反演叶绿素 *a* 浓度,结果如图 1 所示;采用调整的浮游藻类指数(adjusted floating algae index, AFAI)^[17-19]及 Landsat 8 数据获取水华

分布并计算面积,通过计算叶绿素 *a* 浓度均值并结合蓝藻水华面积,采用刘聚涛等^[20] 的水华等级划分方法确定了 5 个时期的太湖蓝藻水华等级,如表 1 所示。不同水华等级的太湖数据用于验证水体指数对富营养化水体的识别效果。

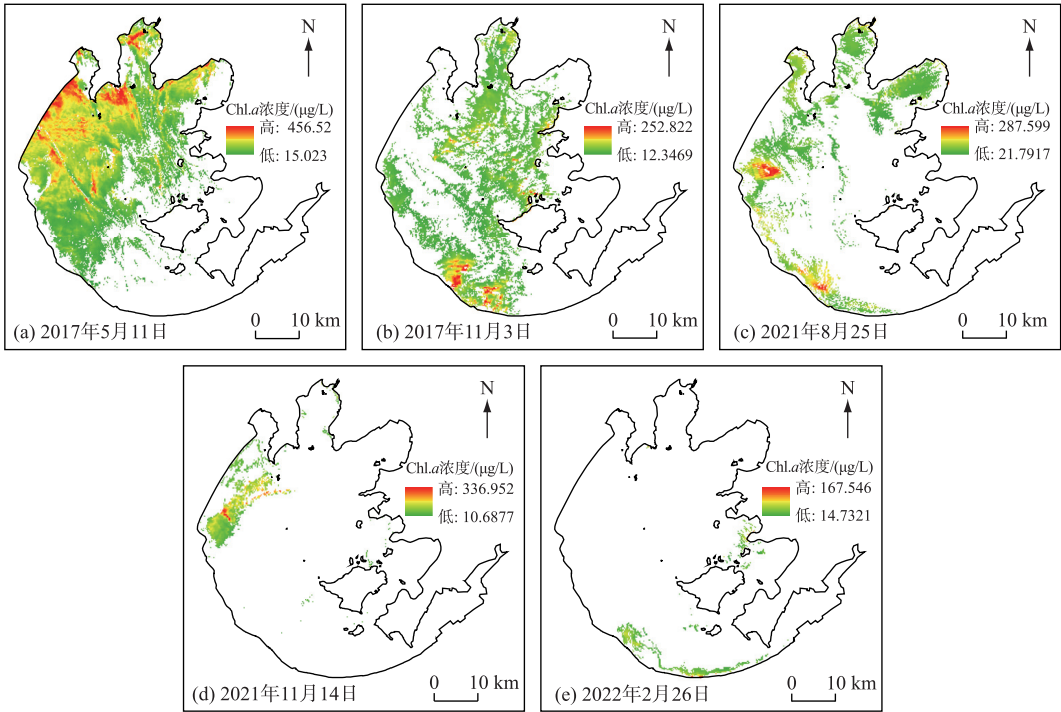


图 1 太湖叶绿素 *a* 浓度反演结果
Fig.1 Inversion results of chlorophyll-*a* concentration in Lake Taihu

表 1 太湖蓝藻水华等级划分结果
Tab.1 The grading results of algae bloom in Lake Taihu

	2017 年 5 月 11 日	2017 年 11 月 3 日	2021 年 8 月 26 日	2021 年 11 月 14 日	2022 年 2 月 26 日
Chl. <i>a</i> 浓度均值/($\mu\text{g/L}$)	127.62	39.56	64.10	86.66	44.23
水华面积/ km^2	1016.23	628.188	332.099	84.0753	36.6875
水华等级	特大型	大型	中型	小型	小型

2.2 MANDWI 水体指数构建

本文根据建筑、水体等地物的假彩色在 Landsat 8 影像上选择一定范围的样本,计算不同地物样本像素的平均反射率,将所有期数据得到的反射率取平均值得到最终的地物光谱曲线;普通水体和富营养化水体等地物的光谱曲线如图 2 所示。

图 2 中,富营养化水体、清水及浅水在可见光及 SWIR2 波段的反射率差距较小,富营养化水体在 NIR 波段反射率与其他水体差距较大,在 SWIR1 波段的反射率也高于其他水体,因此,参考 MEWI 的构建思路去除 ANDWI 中的 NIR 波段,再将 SWIR1 替换为 SWIR2 构建出 MANDWI 指数,用以提取包括富营养化水体在内的各类水体,如下式所示:

$$MANDWI = \frac{B + G + R - \alpha \times SWIR2}{B + G + R + \alpha \times SWIR2}$$

(1)

式中,B、G、R、SWIR2 分别为 Landsat 8 中的蓝、绿、红、短波红外 2 波段的反射率; α 为 SWIR2 的系数,值为 2。由式(1)可知,增大 α 会减小非水与水体的 MANDWI 数值,由于非水地物的 SWIR2 波段反射率较高,其 MANDWI 值减小的幅度更大,则更不容易将非水错分为水体,但水体类内的 MANDWI 数值差距增大,会导致水体容易漏分;同理,减小 α 会增大非水的 MANDWI 数值,减小水体的漏分率。为了确定 α 在太湖的数值,本文以 6 期包含不同季节、不同水华等级的太湖 Landsat 8 数据为研究数据,基于不同 α 条件下($1 \leq \alpha \leq 3$)的 MANDWI 指数通过大津法得到水体分类图像,采用随机点验证方法验证水体提取精度,验证区域为太湖研究区,每期影像随机选取 2000 个验证点,通过目视解译判读验证点地物类型,作为水体指数的验证基准。采用的精度指标为总体精度(overall accuracy, OA)、Kappa 系数、错分误差(commission error, CE)及漏分误差(omission error, OE)。不同 SWIR2 系数的 MANDWI 精度结果如图 3 所示,结果表明系数 2.2 在不同季节不同水华等级的验证中具有较高的精度及稳定性,因此, α 应为 2.2。

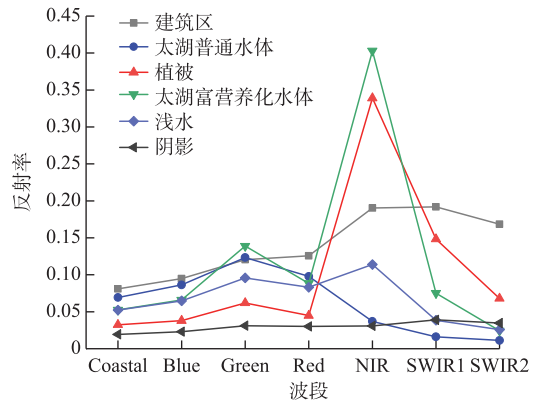


图 2 Landsat 8 地物光谱特征

Fig.2 Spectral characteristics of different land surface features from Landsat 8 images

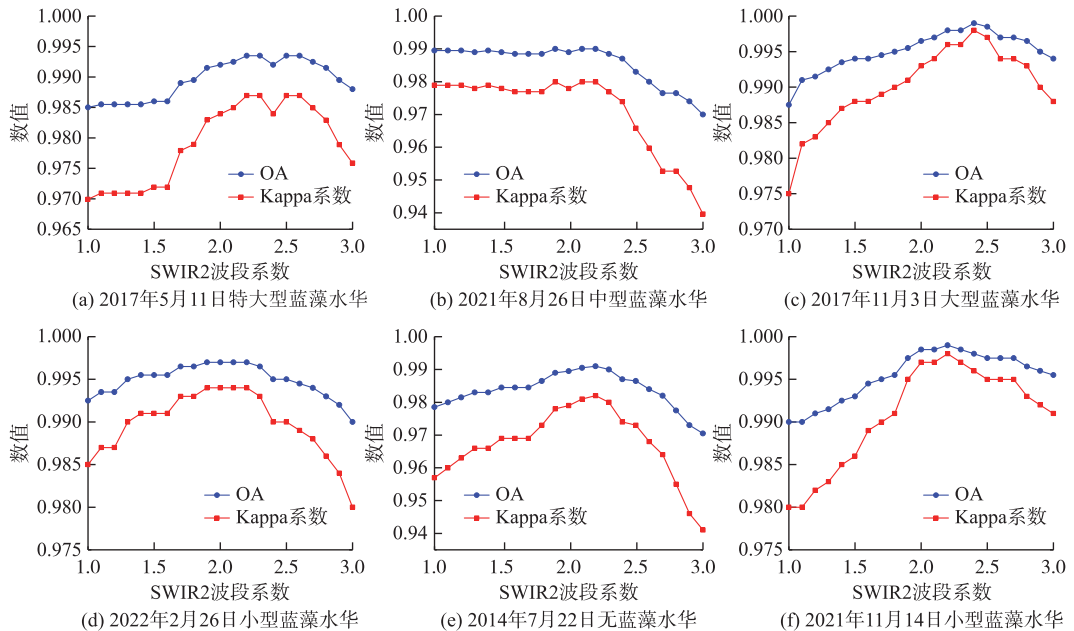


图 3 不同 SWIR2 系数 MANDWI 的 Kappa 及 OA

Fig.3 Kappa coefficient and OA of MANDWI with different SWIR2 coefficients

3 水体指数对比及分析

3.1 5 种水体指数的区分度及直方图对比

本文将 MANDWI 与 4 种水体指数(DIBWI、MEWI、MBCWI、ANDWI)进行对比,为了比较不同指数的地区区分效果,本文以太湖普通水体为提取目标,计算了普通水体与其他地物的区分度^[21],如表 2 所示,

MANDWI 的普通水体与富营养化水体区分度较低,而其他水体指数的区分度均高于 MANDWI,因此,MANDWI 对普通水体与富营养化水体区分效果最差,即对富营养化水体识别效果最好;MANDWI 对普通水体与浅水区区分度最低,即对浅水识别效果最好;5 种水体指数对普通水体与植被或建筑的区分度均大于 100%,则这些指数都具有很好的区分普通水体与植被或建筑的能力;MANDWI 对普通水体与阴影区分度接近 90%,而其他指数的区分度均大于 100%,因此,MANDWI 对普通水体与阴影区分效果不够理想。

本文以特大型蓝藻水华太湖 Landsat 8 数据(2017 年 5 月 11 日)作为直方图分析数据,得到了 5 种水体指数的直方图如图 4 所示。在直方图中,最优阈值一般选定在“双峰”之间的低谷区间,图 4 中 MANDWI 的双峰及谷底特征最显著,其余水体指数的特征不够突出,表明 MANDWI 能有效抑制富营养化水体的干扰。

表 2 5 种水体指数提取太湖普通水体的区分度

Tab.2 Division degree of five water indexes in extracting Lake Taihu ordinary water body

提取目标	水体指数	区分度/%				
		富营养化水体	浅水	植被	建筑	阴影
普通水体	MANDWI	10.29	15.53	104.12	110.23	89.17
	DIBWI	65.98	72.43	318.61	190.69	388.69
	MEWI	120.93	45.68	1397.20	295.07	221.20
	MBCWI	187.16	187.07	164.00	281.24	177.07
	ANDWI	234.10	61.61	1823.49	212.04	140.04

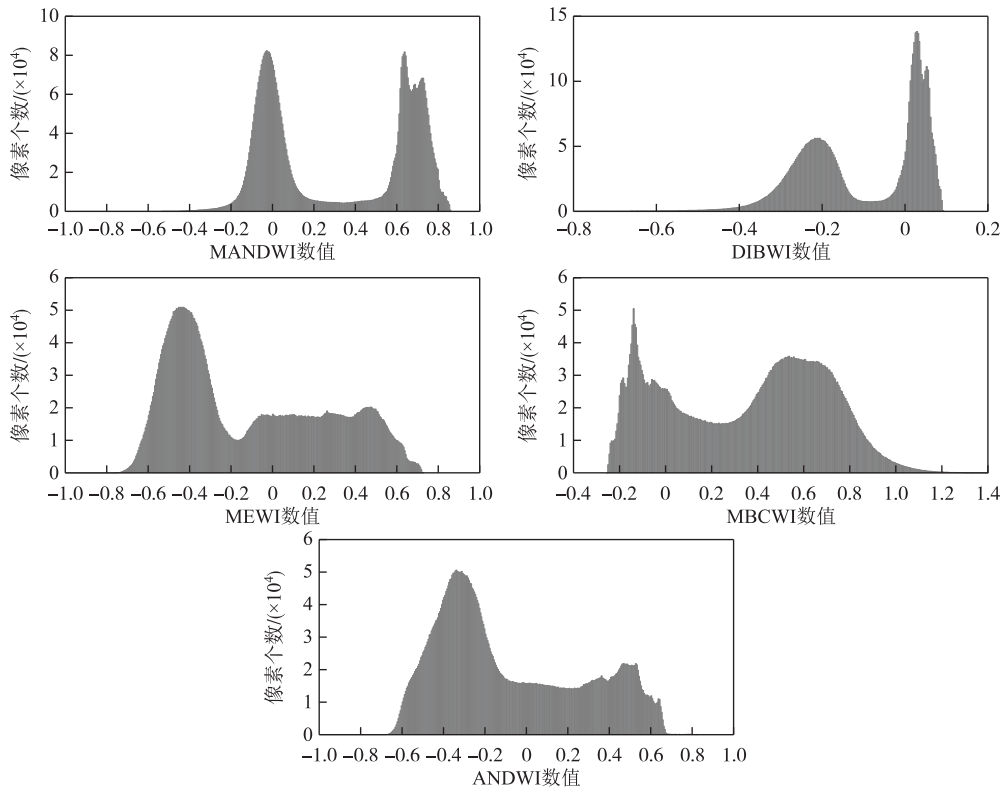


图 4 2017 年 5 月 11 日太湖 5 种水体指数直方图

Fig.4 Histogram of five kinds of water indexes in Lake Taihu on May 11, 2017

3.2 5 种水体指数的水体提取结果对比

3.2.1 不同水华等级水体提取结果对比 本文以水华等级不同的 4 期影像对 5 种水体指数进行水体提取验证,按照不同指数的要求采用大津法自动获取阈值或 0 阈值生成二值图像(图 5)。由图 5 可知,对于不同季节、不同水华等级的太湖水体,二值图像的差别主要在框出部分,蓝框部分为云遮挡,MANDWI 与 MEWI 水体提取受云遮挡影响较小,仅部分云分为非水,其余 3 种水体指数均将该部分区域分为非水;绿框部分为浑浊水体,5 种指数均无法完全识别该部分水体;红框部分主要为富营养化水体,为了更直观地区分不同指数的富营养化水体识别效果,本文选择特定区域放大以对比不同指数,如图 6 所示。通过图 5、6 的对比可以看出,

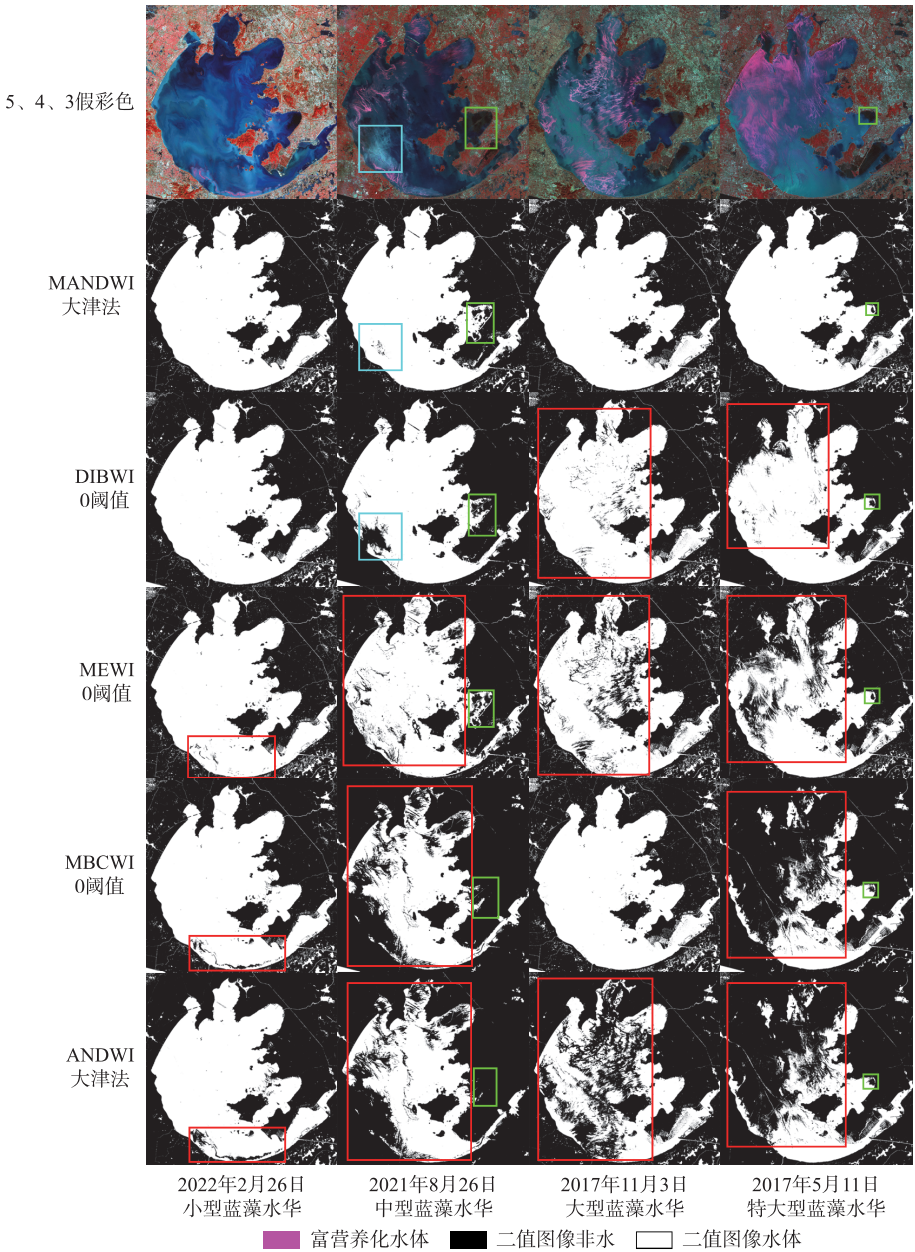


图 5 5 种水体指数在 4 种水华等级下对太湖水体的提取结果对比

Fig.5 Comparison of water extraction results of the Lake Taihu under four algal bloom levels for five water indexes

MANDWI 在 4 种水华等级下水体提取效果均较好, DIBWI 在大型和特大型蓝藻水华的水体提取中均存在较多漏分, MEWI 和 ANDWI 在 4 种水华等级下的水体提取均存在较多漏分, MBCWI 对大型蓝藻水华的提取效果较好, 其他水华等级提取效果较差, 综合 4 种水华等级来看, 本验证中 MANDWI 对太湖水体的提取效果最好。

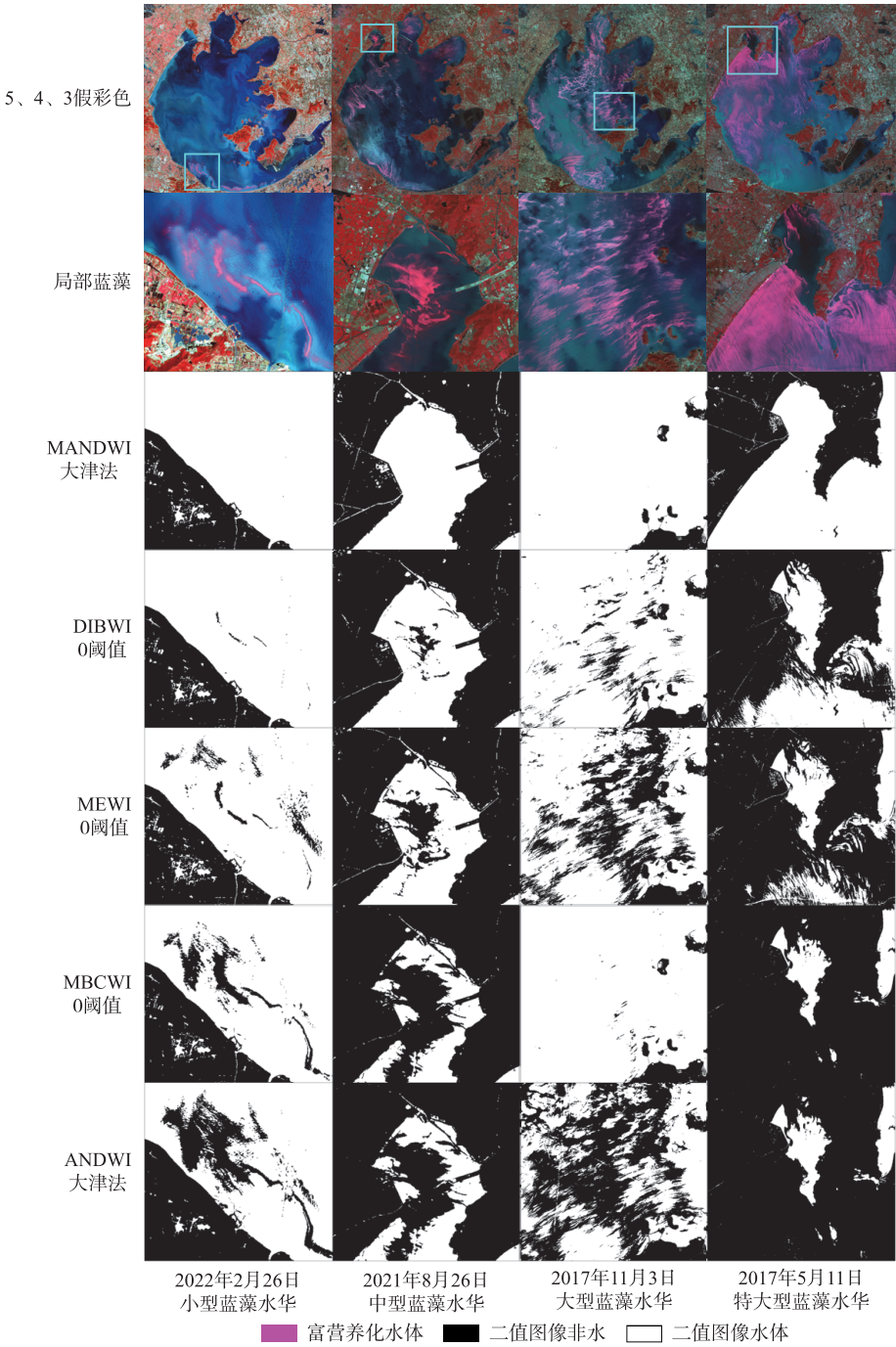


图 6 5 种水体指数的蓝藻水华识别细节对比

Fig.6 Comparison of the details of algae bloom identification for five water indexes

3.2.2 不同水华等级水体提取结果精度分析 为了研究 MANDWI 的太湖水体提取精度,本文使用了前文中的随机点及不同水华等级的影像对 5 种水体指数进行精度分析,表明随着水华等级提升及季节变化,MANDWI 的 OA 及 Kappa 系数始终较高且变化较小(OA = 0.99, Kappa>0.97),在中型和特大型水华中存在漏分(OE=0.02);DIBWI 在小型和大型水华中的精度较高(OA>0.97, Kappa >0.94, OE<0.06),在中型和特大型水华中的精度降低(OA = 0.95, Kappa = 0.90, OE = 0.10);MBCWI 在小型和大型水华中的精度较高(OA=0.99, Kappa >0.96, OE<0.03),在中型和特大型水华中的精度降低(中型 OA=0.85, Kappa = 0.69, OE = 0.33;特大型 OA=0.77, Kappa=0.52, OE=0.49);MEWI 与 ANDWI 的精度均逐渐降低,MEWI 的 OA 由 0.99 降低到 0.90, Kappa 系数由 0.98 降低到 0.80, OE 由 0 增加至 0.20, ANDWI 的 OA 由 0.97 降低到 0.78, Kappa 系数由 0.95 降低到 0.53, OE 由 0.05 增加至 0.48(表 3)。综上所述,MANDWI 对不同季节、不同水华等级的太湖水体提取具有较好的精度和稳定性。因此,MANDWI 适用于不同季节、不同水华等级的太湖水体提取。

表 3 5 种水体指数在 4 种水华等级下的太湖水体提取精度评估
Tab.3 Evaluation of water extraction accuracy of the Lake Taihu under four algal bloom levels for five water indexes

精度指标	2022 年 2 月 26 日					2021 年 8 月 26 日				
	小型蓝藻水华					中型蓝藻水华				
	MANDWI	DIBWI	MEWI	MBCWI	ANDWI	MANDWI	DIBWI	MEWI	MBCWI	ANDWI
总体精度 OA	0.99	0.99	0.99	0.99	0.97	0.99	0.95	0.95	0.85	0.85
Kappa 系数	0.99	0.98	0.98	0.97	0.95	0.98	0.90	0.89	0.69	0.68
错分误差 CE	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
漏分误差 OE	0.00	0.01	0.00	0.02	0.05	0.02	0.10	0.11	0.33	0.33

精度指标	2017 年 11 月 3 日					2017 年 5 月 11 日				
	大型蓝藻水华					特大型蓝藻水华				
	MANDWI	DIBWI	MEWI	MBCWI	ANDWI	MANDWI	DIBWI	MEWI	MBCWI	ANDWI
总体精度 OA	0.99	0.98	0.94	0.99	0.83	0.99	0.95	0.90	0.77	0.78
Kappa 系数	0.99	0.95	0.88	0.98	0.66	0.98	0.90	0.80	0.52	0.53
错分误差 CE	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
漏分误差 OE	0.00	0.05	0.12	0.01	0.35	0.02	0.10	0.20	0.49	0.48

3.3 MANDWI 长时序精度验证及局限性

上述研究仅用部分时期数据对 MANDWI 指数进行验证,为了验证 MANDWI 在长时序、更多情形下对太湖水体提取的适用性,本文选择了 2017—2021 年间的 19 期太湖 Landsat 8 影像,采用随机点精度验证,每期影像随机点个数为 200 个,统计精度结果如表 4 所示,精度变化折线如图 7 所示。MANDWI 的总体精度 OA 最低为 0.96,最高为 1,均值为 0.99;Kappa 系数最低为 0.91,最高为 1,均值为 0.98;最低的 OA 及 Kappa 均在 2017 年 5 月 27 日,该期数据出现一些水体错分问题。对 MANDWI 的水体提取结果进行分析,发现 MANDWI 存在错分和漏分问题,如图 8 所示,MANDWI 对浑浊水体和山体植被阴影的识别效果待进一步提升。

4 讨论

富营养化水体的近红外波段反射率较高,传统的水体指数若含有近红外波段会导致富营养化水体错分为陆地^[11],本文的 MANDWI 指数不仅去除了近红外波段,还通过去除短波红外 1 波段进一步缩小水体与富营养化水体的波段差距,从而使 MANDWI 具有更好的富营养化水体提取效果。山体阴影在近红外波段的反射率远高于其他波段,在蓝、绿、红波段的反射率低于水体^[22],去除近红外波段后,理论上山体阴影与水体在蓝、绿、红波段的差距会使阴影分为非水,但在实际水体提取中,这种差距不足以使天津法将所有阴影分为

表 4 基于 MANDWI 的太湖长时序水体提取精度结果

Tab.4 Accuracy results of long-time sequence water extraction from the Lake Taihu based on MANDWI

精度指标	2017-03-08	2017-05-27	2017-12-21	2018-03-11	2018-04-28	2018-12-24	2019-04-15	2019-11-09	2019-12-11	2020-05-03
总体精度 OA	0.99	0.96	1.00	0.99	0.98	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00
Kappa 系数	0.98	0.91	0.99	0.97	0.96	1.00	0.98	0.99	1.00	0.99

精度指标	2020-05-19	2020-09-08	2020-11-11	2020-12-13	2021-01-14	2021-01-30	2021-06-23	2021-09-27	2021-11-14	均值
总体精度 OA	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99
Kappa 系数	0.99	0.96	1.00	0.99	1.00	0.98	0.98	1.00	1.00	0.98

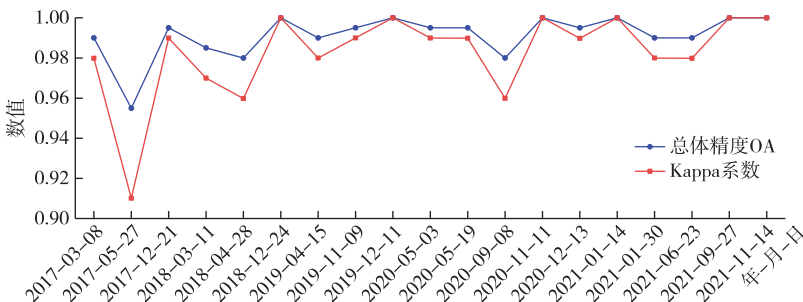


图 7 基于 MANDWI 的太湖长时序水体提取精度

Fig.7 Long-time sequence water extraction accuracy from the Lake Taihu based on MANDWI

非水,因此,大津法的 MANDWI 会引入阴影误差。针对该部分阴影区域,可以使用其他能够识别阴影的水体指数去除阴影,例如增强归一化差异水体指数(ANDWI)和自动水体提取指数(AWEI_{sh})^[4]。

在本实验中,考虑到了使用涵盖不同季节、不同水华等级水体的 Landsat 8 C2L2 数据测试 MANDWI 的水体提取能力,但由于数据限制,无法验证所有季节在各种水华等级下的水体提取效果;MANDWI 对其他传感器数据的适用性也有待验证,不同大气校正方法、大气成分也会影响阈值和精度;水体的生物成分和化学性质的变化,如浮游植物的密度变化也可能影响水体的反射模式^[23],在本文中也存在部分浑浊水体无法识别。虽然 MANDWI 指数对太湖水体的提取效果较好,但在其他区域以及复杂水环境中的普适性还有待验证。

5 结论

本文针对 ANDWI 的富营养化水体漏检问题,通过删除 ANDWI 中的 NIR 及 SWIR1 波段并调整 SWIR2 波段的系数,引入了 MANDWI 水体指数,以太湖为研究区域,将 MANDWI 与 4 种水体指数(DIBWI、MEWI、MBCWI、ANDWI)进行对比,得到了以下结论:

1) 本文依据 ANDWI 的特点及 MEWI 的构建思路,根据普通水体、富营养化水体等地物的光谱特征,设计了水体指数 MANDWI,实现了太湖富营养化水体的提取。

2) MANDWI 适用于不同季节、不同水华等级的太湖水体提取。在本文太湖水体提取验证中,随着水华等级提升及季节变化,MANDWI 相较于其他能够提取富营养化水体的指数(DIBWI、MEWI、MBCWI)具有更好的精度及稳定性。

当今社会迅速发展,水资源的合理利用与监测成为至关重要的话题,水域面积及时精确的提取对水体指数提出了更高的要求。MADNWI 实现了太湖富营养化水体提取,大津法的 MANDWI 可以应用于不同富营养化程度的水体,是一种精度较高、稳健的水体指数,MANDWI 的提出为精确把握水体动态、水体信息的

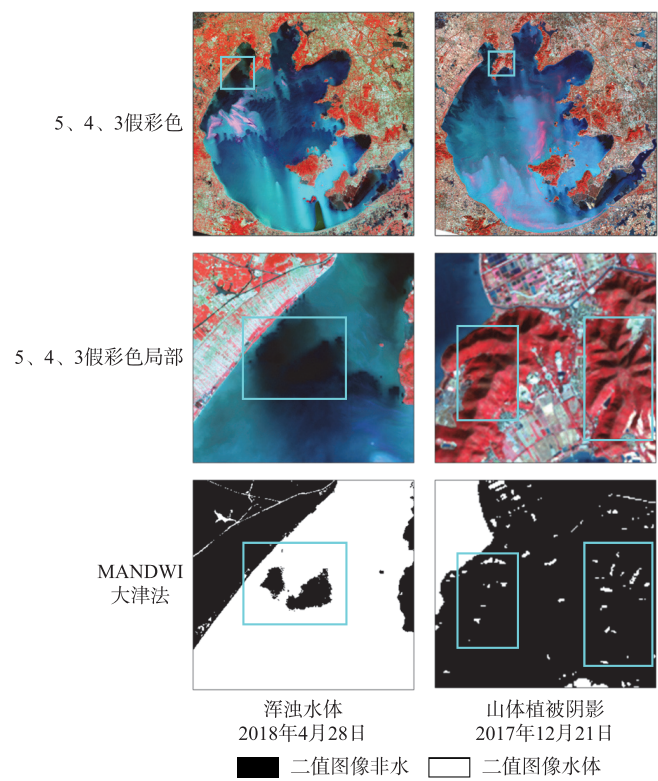


图 8 MANDWI 对浑浊水体和山体植被阴影的识别效果

Fig.8 The recognition effect of MANDWI on turbid water bodies and mountain vegetation shadows

获取以及水资源规划等提供了更多手段。

6 附录

附表 I 见电子版(DOI:10.18307/2025.0212)。

7 参考文献

- [1] Su LF, Li ZX, Gao F *et al.* A review of remote sensing image water extraction. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2021, **33**(1): 9-19. DOI: 10.6046/gtzyyg.2020170. [苏龙飞, 李振轩, 高飞等. 遥感影像水体提取研究综述. 国土资源遥感, 2021, **33**(1): 9-19.]
- [2] McFeeters SK. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**(7): 1425-1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
- [3] Xu HQ. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *National Remote Sensing Bulletin*, 2005, **9**(5): 589-595. [徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, **9**(5): 589-595.]
- [4] Feyisa GL, Meilby H, Fensholt R *et al.* Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **140**: 23-35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.
- [5] Fisher A, Flood N, Danaher T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **175**: 167-182. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.055.
- [6] Wang XB, Xie SP, Du JK. Water index formulation and its effectiveness research on the complicated surface water surroundings. *Journal of Remote Sensing*, 2018, **22**(2): 360-372. DOI: 10.11834/jrs.20186463. [王小标, 谢顺平, 都金康. 水体指数构建及其在复杂环境下有效性研究. 遥感学报, 2018, **22**(2): 360-372.]
- [7] Deng KY, Ren C. Water extraction model of multispectral optical remote sensing image. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, **50**(10): 1370-1379. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200482. [邓开元, 任超. 多光谱光学遥感影像水体提取模型. 测绘学报, 2021, **50**

- (10): 1370-1379.]
- [8] Wu QS, Wang MX, Shen Q *et al.* Small water body extraction method based on Sentinel-2 satellite multi-spectral remote sensing image. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, **26**(4): 781-794. DOI: 10.11834/jrs.20229340. [吴庆双, 汪明秀, 申茜等. Sentinel-2 遥感图像的细小水体提取. 遥感学报, 2022, **26**(4): 781-794.]
- [9] Niu LF, Kaufmann H, Xu GC *et al.* Triangle water index (TWI): An advanced approach for more accurate detection and delineation of water surfaces in Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 2022, **14**(21): 5289. DOI: 10.3390/rs14215289.
- [10] Rad AM, Kreitler J, Sadeh M. Augmented Normalized Difference Water Index for improved surface water monitoring. *Environmental Modelling & Software*, 2021, **140**: 105030. DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105030.
- [11] Wang CP, He MQ, Wang JX. A new method of information extraction of eutrophic water body. *China Rural Water and Hydropower*, 2022, (8): 23-28, 34. [汪承平, 何孟琦, 王建雄. 富营养化水体信息提取新方法. 中国农村水利水电, 2022, (8): 23-28, 34.]
- [12] Wang L, Xie HB, Wen GC *et al.* A study on water information extraction method of cyanobacteria lake based on Landsat8. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2020, **32**(4): 130-136. DOI: 10.6046/gtzyyg.2019351. [王琳, 谢洪波, 文广超等. 基于 Landsat8 的含蓝藻湖泊水体信息提取方法研究. 国土资源遥感, 2020, **32**(4): 130-136.]
- [13] Wang CX, Zhang J, Li YX *et al.* A multi-band combination water index model based on Landsat 8. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022, (5): 20-25. [王春霞, 张俊, 李屹旭等. 一种基于 Landsat 8 的多波段组合水体指数模型. 测绘通报, 2022, (5): 20-25.]
- [14] Tian B, Zhang FF, Lang FK *et al.* A novel water index fusing SAR and optical imagery (SOWI). *Remote Sensing*, 2022, **14**(21): 5316. DOI: 10.3390/rs14215316.
- [15] Wang J, Zhang YF, Zhi L *et al.* Comparative analysis of multiple blue-green algae bloom monitoring methods in Taihu Lake using MODIS time series data. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2023: 1-11. [王健, 张逸飞, 智力等. 基于 MODIS 时间序列数据的太湖蓝藻水华监测方法比较与分析. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023: 1-11.]
- [16] Shi K, Zhang YL, Xu H *et al.* Long-term satellite observations of microcystin concentrations in Lake Taihu during cyanobacterial bloom periods. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(11): 6448-6456. DOI: 10.1021/es505901a.
- [17] Fang C, Song KS, Li L *et al.* Spatial variability and temporal dynamics of HABs in Northeast China. *Ecological Indicators*, 2018, **90**: 280-294. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.03.006.
- [18] Fang C, Song KS *et al.* Remote sensing of harmful algal blooms variability for Lake Hulun using adjusted FAI (AFAI) algorithm. *Journal of Environmental Informatics*, 2018, **34**(2): 108-122. DOI: 10.3808/jei.201700385.
- [19] Li SM, Liu JP, Song KS *et al.* Analysis on spatial and temporal character of algae bloom in Lake Chaohu and its driving factors based on landsat imagery. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(5): 1205-1213. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201905020. [李晟铭, 刘吉平, 宋开山等. 基于 Landsat 影像巢湖蓝藻水华暴发时空变化特征及其驱动因素分析. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(5): 1205-1213.]
- [20] Liu JT, Gao JF, Zhao JH *et al.* Method of cyanobacteria bloom hazard degree evaluation in Taihu Lake. *China Environmental Science*, 2010, **30**(6): 829-832. [刘聚涛, 高俊峰, 赵家虎等. 太湖蓝藻水华灾害程度评价方法. 中国环境科学, 2010, **30**(6): 829-832.]
- [21] Lu JG. Information extraction of water body with the new combined index using MODIS data. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, **46**(3): 49-52. [陆吉贵. 利用组合水体指数(NCIWI)提取水体信息研究. 安徽农业科学, 2018, **46**(3): 49-52.]
- [22] Chen L, Deng RR, Chen QD *et al.* The extraction of water body information from TM imagery based on water quality types. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2012, (1): 90-94. DOI: 10.6046/gtzyyg.2012.01.16. [陈蕾, 邓孺孺, 陈启东等. 基于水质类型的 TM 图像水体信息提取. 国土资源遥感, 2012, (1): 90-94.]
- [23] Zhang YL, Feng LQ, Li JS *et al.* Seasonal-spatial variation and remote sensing of phytoplankton absorption in Lake Taihu, a large eutrophic and shallow lake in China. *Journal of Plankton Research*, 2010, **32**(7): 1023-1037. DOI: 10.1093/plankt/fbq039.

附表 I 研究数据
Attached Tab.I Research data

数据名称	参数	时空分辨率	数据用途	所用数据日期
遥 感 数据	Landsat 8	16 d, 30 m	水体指数系数验证, 不同水华等级水体提取、精度分析	2014 年 07 月 22 日
				2017 年 05 月 11 日
				2017 年 11 月 03 日
				2021 年 08 月 26 日
				2021 年 11 月 14 日
				2022 年 02 月 26 日
			光谱曲线数据采样	2014 年 10 月 26 日
				2015 年 10 月 13 日
				2016 年 01 月 15 日
				2017 年 05 月 11 日
				2017 年 11 月 03 日
				2018 年 04 月 28 日
				2020 年 05 月 03 日
				2021 年 09 月 27 日
				2021 年 11 月 14 日
				2019 年 01 月 14 日
			时序精度验证	2017 年 03 月 08 日
				2017 年 05 月 27 日
				2017 年 12 月 21 日
				2018 年 03 月 11 日
				2018 年 04 月 28 日
				2018 年 12 月 24 日
				2019 年 04 月 15 日
				2019 年 11 月 09 日
				2019 年 12 月 11 日
				2020 年 05 月 03 日
	MYD09GQ	1 d, 250 m	水华等级的确定	2020 年 05 月 19 日
				2020 年 09 月 08 日
				2020 年 11 月 11 日
				2020 年 12 月 13 日
				2021 年 01 月 14 日
				2021 年 01 月 30 日
	MYD09GQ	1 d, 250 m	水华等级的确定	2021 年 06 月 23 日
				2021 年 09 月 27 日
				2021 年 11 月 14 日
				2022 年 02 月 26 日