

2000年—2020年中国大型湖泊月平均透明度 遥感监测数据集

刘东¹, 张民², 曹志刚¹, 沈明¹, 齐天赐¹, 马金戈¹, 段洪涛^{1,3}

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, 南京 210008;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008;

3. 西北大学 城市与环境学院, 西安 710127

摘要: 湖泊水体透明度是湖泊水环境状况的综合表征, 与多种水质参数关系密切, 对湖泊水环境监测具有重要意义。本文的目的是介绍一种中国大型湖泊 (>20 km²) 月平均透明度遥感监测数据集的生成流程、主要特征和应用价值。数据集生产方法是将Liu等(2020)构建的透明度遥感算法应用于GEE (Google Earth Engine) 云平台存储的MODIS地表反射率数据。对云、云阴影和陆地等非水体像元, 直接利用MODIS反射率数据状态波段所包含的像元状态信息进行快速去除。数据以GeoTiff栅格格式存储, 同时保存了像元透明度值和坐标信息, 便于各种软件平台读取。结果显示: 数据集覆盖了全国不同湖区的412个大型湖泊, 中国湖泊透明度整体上呈现出“东低西高”空间分布, 湖泊透明度季节变异呈现“夏高冬低”和“夏低冬高”两种典型类型。研究表明: 基于GEE可以实现中国大型湖泊月份平均透明度的快速计算与制图, 月尺度透明度对高动态湖泊水环境监测具有突出优势。中国湖泊透明度数据集不仅可以应用于不同湖区、不同湖泊透明度/清澈度的时空变异研究, 还可应用于可持续发展目标下的湖泊水环境评估与预测, 该数据集的公开共享对中国湖泊水环境研究发展具有重要意义。

关键词: 遥感大数据与数据集, 中国, 湖泊, 水体透明度, 遥感, MODIS

引用格式: 刘东, 张民, 曹志刚, 沈明, 齐天赐, 马金戈, 段洪涛. 2022. 2000年—2020年中国大型湖泊月平均透明度遥感监测数据集. 遥感学报, 26(1): 221–230

Liu D, Zhang M, Cao Z G, Shen M, Qi T C, Ma J G and Duan H T. 2022. Monthly mean remote sensing water transparency dataset of large lakes in China during 2000—2020. National Remote Sensing Bulletin, 26(1): 221–230 [DOI: 10.11834/jrs.20221260]

1 引言

水体透明度是指黑白赛克盘 (Secchi disk) 垂直沉入水中直至看不见的深度, 可用于表征水体清澈程度, 通常透明度越高, 水体越清澈。由于其低廉的测量成本和简易操作性, 透明度已有超过100年的测量历史, 并被广泛应用于研究湖泊水下光环境和水体浮游植物含量等的时空变化 (Carlson, 1977; Lee等, 2015)。然而, 湖泊透明度具有高时空动态性, 不同湖泊、同一湖泊不同水域或季节的透明度常存在明显时空差异 (Liu

等, 2020)。因此, 固定点位获取的一定时间频率的透明度测量结果, 对高时空动态变化的湖泊水环境监测存在局限性。卫星遥感具有长时间、大范围和周期性特点, 对大区域范围、高动态变化的湖泊水环境监测具有独特优势。

自20世纪90年代以来, 卫星遥感越来越多的被应用于水体透明度监测。在Web of Science以“water transparency” OR “water clarity” AND “satellite remote sensing”为检索词共找到1777条结果; 1990s以前每年只有几条相关的检索结果; 1990s以来数量呈爆发式增长, 从1991年的49条增长至

收稿日期: 2021-04-29; 预印本: 2021-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41901299, 41971309); 中国科学院青年创新促进会(编号: 2021313); 江苏省自然科学基金(编号: BK20181102); 中国科学院南京地理与湖泊研究所(编号: E1SL002)

第一作者简介: 刘东, 1987年生, 男, 副研究员, 研究方向为湖泊水环境遥感。E-mail: dliu@niglas.ac.cn

通信作者简介: 段洪涛, 1979年生, 男, 研究员, 研究方向为湖泊遥感与智慧流域。E-mail: htduan@niglas.ac.cn

关联数据获取: <http://lake.geodata.cn/data/datadetails.html?dataguid=36770858862020&docid=114>

2020年的709条。受限于水色卫星数据低空间分辨率,其最开始主要应用于全球海洋的透明度反演(Prasad等,1998)。伴随遥感技术的发展,进入21世纪后,卫星数据逐渐应用于内陆湖泊透明度监测,同步监测的湖泊数量也从一开始的一个或几个湖泊扩展至区域乃至全国湖泊群(Duan等,2009; Kloiber等,2002; Olmanson等,2008; Song等,2020; Wang等,2020)。例如,基于长时序Landsat数据,Olmanson等(2008)反演了美国尼苏达州近10000个湖泊在1985年—2005年间的透明度; Song等(2020)和Wang等(2020)分别基于Landsat和MODIS数据反演了中国湖泊透明度。由于湖泊水体光学的复杂性,已有的湖泊透明度遥感大多采用的是经验算法(Ma等,2010; Olmanson等,2008)。近年来, Lee等(2015)更正了关于水体透明度的错误推论,提出了一种新的水体透明度理论和半分析遥感方法。Feng等(2019)将该新方法成功应用于中国长江中下游湖泊群的透明度遥感反演,证明了该新理论在内陆复杂湖泊水体的适用性。

虽然卫星遥感透明度对高动态湖泊水环境监测具有独特优势,但目前其应用范围仍局限于少数人或部门。究其原因,主要是遥感数据辐射定标和大气校正等专业处理的复杂性使生产透明度产品具有一定门槛,同时也反映出生产湖泊透明度数据集的必要性。目前虽已有中国湖泊透明度数据集发布(Wang等,2020),但还没有关于中国湖泊月尺度透明度的数据集发布。由第二次全国湖泊调查结果可知,全国共有面积 $>1\text{ km}^2$ 的湖泊2928个(马荣华等,2011)。根据区域自然环境、湖泊资源开发利用和湖泊环境整治等特征划分为5个湖区,分别为:西北干旱湖区、青藏高原湖区、云贵高原湖区、东北平原与山地湖区和东部平原湖区(马荣华等,2011)。基于GEE(Google Earth Engine)云计算平台和Google云存储的海量遥感数据,本研究将构建的透明度遥感算法应用于中国大型湖泊,构建了中国412个湖泊2000年—2020年的月平均透明度数据集。

2 数据源介绍

2.1 全国湖泊实测透明度

为构建适用于中国不同区域湖泊水体透明度的

高鲁棒性遥感算法,收集整理了2008年—2018年采集的覆盖中国不同区域的湖泊实测透明度(图1,表1)。不同湖区有实测透明度数据的湖泊数和总样本量如表1所示:总共有2236个点位的实测透明度,这些实测透明度分布在不同湖区的299个湖泊中,采样点位置分布如图1所示。由实测数据可知,不同湖区、同一湖区内不同湖泊的透明度均有明显差异,整体呈现出西部湖区透明度高于东部湖区的分布(表1)。值得注意的是:由于实测透明度具有湖泊选择性,实测结果可能不完全代表各湖区情况,如青藏高原羌塘地区湖泊具有低透明度(Liu等,2020),但实测数据几乎没有覆盖(图1,审图号:GS(2016)1549),从而可能导致该湖区实测透明度平均值偏高。

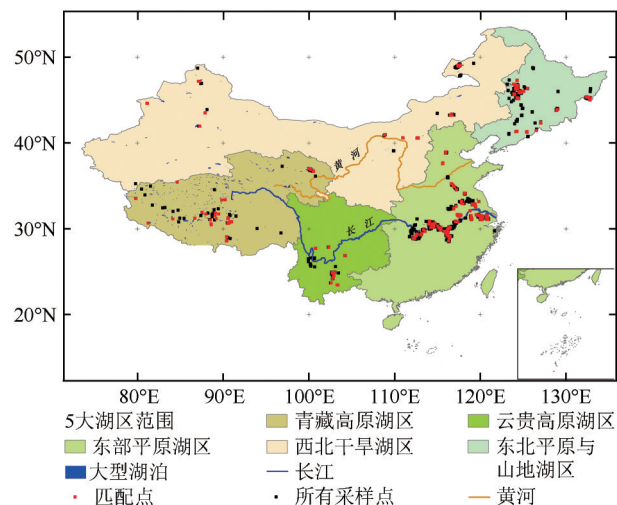


图1 中国大型湖泊及实测透明度采样点分布(中国5大湖区的划分参考马荣华等(2011))

Fig. 1 Spatial locations of large lakes and sampling stations in China (Please refer to Ma et al. (2011) for the divisions of five lake zones)

2.2 MODIS地表反射率

为遥感反演中国湖泊透明度,本文选用搭载在美国Terra卫星上的中分辨率成像光谱仪MODIS(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer)获取的地表反射率数据集MOD09GA。MOD09GA数据集由美国地质调查局地球资源观测与科学中心提供(<https://www.usgs.gov/centers/eros>[2021-03-28]),全球覆盖的时间分辨率为1d,空间分辨率为500m,时间跨度为2000-02-24至今。MOD09GA包含MODIS扫描的7个波段的地表反射率;此外,还有一个反射率数据状态波段,记录了像元的云覆

盖、云阴影、气溶胶厚度、冰雪覆盖、陆地/水体范围等信息 (Vermote 等, 2015)。GEE 平台存储 MOD09GA 数据集, 可以通过代码调用应用于中国透明度产品数据集的快速计算和制图。

表 1 2003 年—2018 年中国不同湖区实测透明度统计结果

Table 1 Statistical results of in situ water transparency in different lake zones in China from 2003—2018

湖区	采样年份/年	湖泊数	样本数	透明度范围/cm	平均透明度/cm
西北干旱湖区	2008—2010, 2015, 2018	24	148	1.3—1117	126.4±169.46
青藏高原湖区	2008, 2012—2018	52	110	10—1650	557.42±410.38
云贵高原湖区	2003, 2007, 2008, 2010, 2015	22	126	14—1390	261.08±300.4
东北平原与山地湖区	2008—2010, 2015—2018	62	285	3—690	75.37±107.33
东部平原湖区	2007—2009, 2012, 2016—2018	139	1567	5—745	51.85±46.63
所有湖区	—	299	2236	1.3—1650	96.47±178.27

2.3 数据集包含的中国大型湖泊

MOD09GA 数据一个像元覆盖的地表面积为 0.25 km², 为使每个湖泊有足够多的观测像元, 参照中国科学院南京地理与湖泊研究所第二次全国湖泊调查结果 (马荣华等, 2011), 研究只关注中

国水面面积>20 km²的大型湖泊, 全国共有 472 个, 其分布如图 1 所示。不同湖区包含的大型湖泊数量 (百分比)、面积范围和总面积 (百分比) 情况如表 2 所示。

表 2 中国不同湖区湖泊信息和 2019 年透明度

Table 2 Basic information on lakes and water transparency in 2019 for different lake zones in China

湖区	湖泊数 (占比/%)	面积范围/ km ²	总面积/km ² (占比/%)	2019 透明度范围/ cm	2019 面积加权 平均透明度/cm	2019 平均透明度>1 m 湖泊数占比/%
西北干旱湖区	66(13.98)	20.03—2203.68	12072.56(16.51)	3.07—936.01	174.54	48.72
青藏高原湖区	274(58.05)	20.03—4232.32	37694.67(51.55)	8.05—664.09	276.67	69.47
云贵高原湖区	11(2.33)	24.31—300.38	1078.43(1.47)	57.61—876.45	254.93	72.73
东北平原与山地湖区	29(6.14)	20.39—1057.02	3798.94(4.37)	22.11—113.03	43.41	15
东部平原湖区	92(19.4%)	20.01—3192.01	19083.15(26.1)	24.57—159.73	53.93	12.66

3 数据生产流程

基于多源数据和 GEE 云计算平台, 研究生产了中国大型湖泊的月平均透明度数据集。具体生产流程如图 2 所示: 首先, 基于 GEE 云计算平台, 查找现场实测透明度时空同步的无云高质量 MOD09GA 反射率; 然后, 构建适用于中国湖泊的透明度遥感算法, 并利用独立数据集进行算法性能评估; 最后, 将构建好的遥感算法应用于 GEE 云平台存储的长时序 MOD09GA 数据集, 进行透明度产品快速计算与制图 (图 2, 审图号: GS (2016) 1549)。其中, 涉及的主要步骤包括非水体像元去除、透明度遥感算法构建、透明度遥感精度评估、全国月平均透明度计算、各湖泊月平均透明度裁剪等。

3.1 非水体像元去除

MOD09GA 数据集包括 MODIS 扫描覆盖的所有

像元的地表反射率。为去除云、云阴影和陆地等非水体像元, 研究使用了 MOD09GA 的反射率数据状态波段 (Vermote 等, 2015)。该波段由 16 位组成, 第 1—2 位的值表示云状态, 第 3 位的值表示是否云阴影, 第 4—6 位的值标识陆地/水体 (Vermote 等, 2015)。根据上述位值信息, 筛选出晴空无云的内陆水体区域, 即 MOD09GA 反射率状态波段前 5 位的值为 000011 或 000101。去除云、云阴影和陆地像元后, 对剩余像元计算归一化水体指数 NDWI (Normalized Difference Water Index) (McFeeters, 1996), 并对 NDWI 应用 OTSU 算法进行双峰阈值分割, 筛选出高质量的内陆水体像元 (Otsu, 1979)。NDWI 计算公式如式 (1) 所示:

$$NDWI = \frac{R_{rs}(\text{Band}_4) - R_{rs}(\text{Band}_2)}{R_{rs}(\text{Band}_4) + R_{rs}(\text{Band}_2)} \quad (1)$$

式中, $R_{rs}(\text{Band}_2)$ 和 $R_{rs}(\text{Band}_4)$ 分别表示 MOD09GA 第 2 波段 (近红外) 和第 4 波段 (绿光) 的地表反射率。

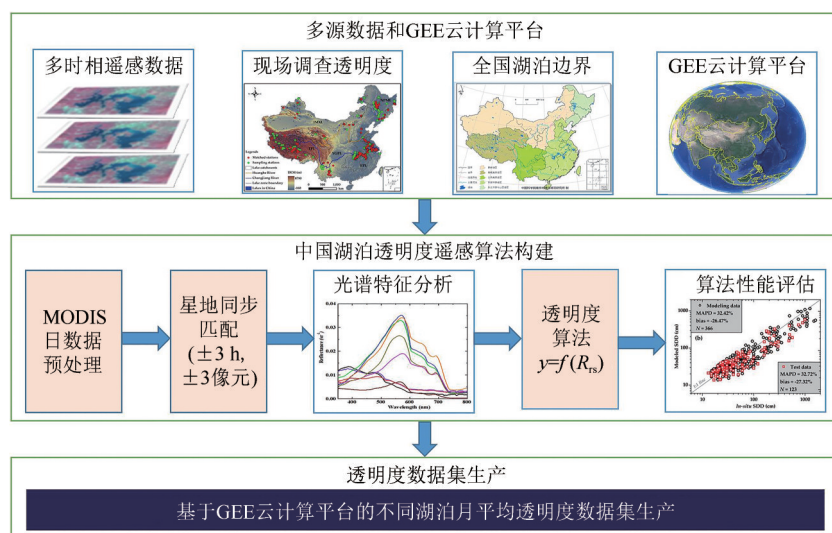


图2 中国大型湖泊月平均透明度数据集生产流程图(全国湖泊边界图参考 Ma 等(2010), 实测透明度分布和算法性能评估图参考 Liu 等(2020))

Fig. 2 Production flow chart of monthly mean water transparency dataset for large lakes in China (Please refer to Ma et al. (2010) for lake boundaries and to Liu et al. (2020) for the charts of *in situ* transparency distribution and algorithm performance evaluation)

3.2 透明度遥感算法构建

基于现场调查透明度和同步扫描获取的 MOD09GA 地表反射率, 分3步构建中国湖泊透明度遥感算法, 更多算法构建细节可以参考 Liu 等 (2020):

(1) 是进行现场调查透明度与 MOD09GA 地表反射率时空匹配。参照 NASA 采用的星地匹配规则 (Bailey 和 Werdell, 2006), 通过 GEE 平台查找实测透明度在 ± 3 h 时间窗口范围内的同步地表反射率。依据 Kloiber 等 (2002), 当时间匹配窗口放宽至 7 d 时, 不会对透明度遥感产生明显影响。为增加匹配点, 对于实测透明度大于 200 cm 的点, 同时查找 ± 7 d 内的 MOD09GA 地表反射率。

(2) 是筛选 MOD09GA 有效地表反射率。根据 3.1 节介绍的方法, 对 ± 3 h 时间窗口内的反射率去除云、云阴影和陆地等影响的像元后, 共筛选出 451 对有效匹配。对实测透明度大于 200 cm 的点, 如果在 ± 3 h 时间窗口内没有有效匹配, 则逐步扩大时间窗口至 ± 7 d 或找到有效匹配, 共筛选出 38 对有效匹配。因此, 共对 489 个实测透明度找到 MOD09GA 地表反射率的有效匹配, 分布如图 1 所示; 其中, 西北干旱湖区、青藏高原湖区、云贵高原湖区、东北平原与山地湖区和东部平原湖区各有 58、51、21、68 和 291 个。

(3) 是光谱分析与算法构建。水体透明度通常随水体悬浮物含量的增加呈指数降低 (Shi 等,

2015)。而悬浮物具有光吸收和散射特性, 随着悬浮物含量增加, 水体遥感反射率在红绿波段呈现反射峰 (He 等, 2013; Williamson 和 Grabau, 1973)。因此, 红绿波段遥感反射率常被用于湖泊悬浮物浓度或透明度遥感反演 (Feng 等, 2012; 刘翀等, 2017; Shi 等, 2015; Song 等, 2020)。研究从星地匹配对中随机选取 75% 进行算法构建, 通过评价不同波段组合 (比值、差值等) 与实测透明度的关系式 (线性、指数、幂函数和多项式等), 构建了适用于中国湖泊透明度的经验遥感算法, 如式 (2):

$$\begin{aligned} \text{SDD} &= 1699.72 \times e^{-170.92 \times R}, R \leq 0.016 \\ \text{SDD} &= 0.36 \times R^{1.39}, R > 0.016 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{SDD} = (R_{rs}(\text{Band}_4) + R_{rs}(\text{Band}_1)) / 2\pi \quad (3)$$

式中, SDD 为透明度; $R_{rs}(\text{Band}_1)$ 和 $R_{rs}(\text{Band}_4)$ 为 MOD09GA 第 1 波段 (红光) 和第 4 波段 (近红外) 的地表反射率; R 为中间变量, 表示两个波段的平均遥感反射率。

3.3 透明度遥感精度评估

研究从 3 方面评估了所构建的透明度遥感算法, 结果如表 3 所示。(1) 利用建模外的 25% 星地匹配对进行模型验证, 得到的平均绝对百分比误差 MAPD (Mean Absolute Percent Difference) 为 32.72%。(2) 与其他人的结果进行比较。对青藏高原各湖泊 2000 年—2018 年平均透明度, 与刘翀

等(2017)结果进行比较, MAPD为15.36%;对东部平原各湖泊2000年—2018年平均透明度,与Feng等(2019)结果进行比较, MAPD为35.68%。(3)将新构建的算法应用于国际水色协调组发布的模拟数据集(<https://www.ioccg.org/data> [2021-

03-28]),并和Lee等(2015)半分析计算结果进行比较, MAPD为59.32%。MAPD、均方根误差和偏差的计算公式及其他更多关于算法构建和精度评估的信息,请参考Liu等(2020)。

表3 算法验证结果及与其他已发表算法对比

Table 3 Algorithm validation results and comparisons with other published algorithms

对比数据集	对比算法	MAPD/%	均方根误差/cm	偏差/%
验证数据集	—	32.72	48.91	-27.32
青藏高原湖泊	刘翀等(2017)	15.36	31.98	-0.01
东部平原湖泊	Feng等(2019)	35.68	66.8	-35.15
模拟数据集	Lee等(2015)	59.32	1021.37	28.14

3.4 全国月平均透明度计算

为生产中国不同湖泊每个月平均透明度,研究将式(2)应用于GEE存储的日尺度MOD09GA地表反射率。在去除云、云阴影和陆地等像元后(3.1节),对晴空日水体像元计算透明度值,对非晴空水体像元赋值为0。然后,对所有像元计算月内不同天的有效遥感透明度的算术平均值,并将结果存储为对应的月平均透明度值。值得注意的是,由于西北干旱湖区、青藏高原湖区和东北平原与山地湖区湖泊在冬季10月到次年春季4月会结冰(Cai等,2019);为避免湖面结冰对水体透明度遥感的影响,对这3个湖区的所有湖泊及东部平原湖区高纬度的衡水湖、东平湖、南四湖和洪泽湖只计算了夏秋季5—9月的平均透明度。

3.5 各湖泊月平均透明度裁剪

通过3.4节得到的是所有MOD09GA可识别水体的月平均透明度,除了研究关注的中国大型湖泊,还包括一些大型河流和中小型湖泊水体,时间跨度为2000-02—2020-12。在此基础上,研究利用第二次全国湖泊调查结果(马荣华等,2011)的湖泊边界,裁剪得到全国不同湖泊、不同月份的平均透明度数据。对全国水面积>20 km²的472个大型湖泊(2.3节),由于部分湖泊水面面积变化剧烈或呈狭长型,去除邻近陆地的两个像元后,只有412个湖泊在2000年—2020年间的透明度有效观测年份大于10年。因此,最后构建的数据集只包含412个湖泊的月平均透明度,其中西北干旱湖区、青藏高原湖区、云贵高原湖区、东北平原与山地湖区和东部平原湖区分别包含40、262、11、

20和79个湖泊。

3.6 数据存储格式与命名

研究构建的是中国412个大型湖泊2000年—2020年的月平均透明度数据集,每个湖泊共有239个文件(MODIS数据从2000-02开始获取)。数据以GeoTiff栅格格式存储,同时保存有像元透明度值和坐标信息,数据类型为32位的无符号整型,空间参考地理坐标系统为WGS 84,像元空间分辨率为500 m。每个文件只包含一个波段:0值表示非水体像元或无有效MODIS观测;大于0表示遥感反演的月平均透明度,单位为cm。

每个数据文件采用字段加下划线形式命名,具体为“平台标识_载荷标识_国家_湖区_湖泊编码_年份_月份_数据类型_空间分辨率_数据生产时间_版本号.后缀名”。示例如下:

TERRA_MODIS_CHINA_EPL_F32A001_2020_08_SDD_500m_20210331125631_V1.0.tif

其中,TERRA为Terra卫星;MODIS为中分辨率成像光谱仪;CHINA表示所在国家为中国;EPL表示所在湖区为东部平原湖区,西北干旱湖区、青藏高原湖区、云贵高原湖区和东北平原与山地湖区分别用IMXL、TPL、YGPL和NPML表示(Ma等,2010);F32A001标识对应湖泊为太湖,湖泊编码参照第二次全国湖泊调查结果(马荣华等,2011);2020和08表示文件对应为2020-08的平均透明度数据;500 m表示空间分辨率为500 m;数据生产时间采用14位数字“年年年年月月日日时时分分秒秒”表示;V1.0为版本号;tif为GeoTiff数据文件的后缀名。

4 数据集的应用价值及案例

4.1 数据特点及应用优势

基于GEE平台存储的日尺度MOD09GA数据集, 研究生产的中国大型湖泊月平均透明度数据集在时空覆盖方面具有突出特点, 在数据应用方面也具有独特优势。(1) 在空间覆盖方面, 数据集包含了全国不同湖区的412个大型湖泊, 基于该数据集可以进行全国湖泊透明度的时空变异研究, 而且能避免不同算法或数据集之间的系统偏差。(2) 在时间覆盖方面, 月尺度透明度数据集可以部分避免异常值影响, 同时保留季节变异信息, 可用于研究不同湖泊透明度的季节变异特征。(3) 数据集具有强时空拓展性, 数据集之外的中国其他湖泊或其他月份, 基于上述生产流程可以实现月平均透明度的快速计算与制图。

4.2 中国不同湖区湖泊透明度对比

基于月平均透明度数据集, 可以计算得到不同湖泊的年平均透明度, 从而能分析中国不同湖区湖泊透明度的空间分布特征。2019年, 中国各湖区不同湖泊透明度范围和面积加权平均透明度如表2所示。整体上, 中国湖泊透明度呈现出“东低西高”: 东部湖泊透明度低, 西部湖泊透明度高。各湖区的年平均透明度遥感结果与实测值(表1、表2)一致: 东部平原湖区、东北平原与山地湖区的湖泊透明度较低, 而青藏高原湖区、云贵高原湖区的湖泊透明度较高。2019年, 全国不同湖泊年平均透明度如图3所示(审图号: GS(2016)1549), 不同湖区年平均透明度大于1 m的湖泊数量占比如表2所示, 云贵高原湖区最高。

4.3 典型湖泊透明度月尺度时空变异

不同湖泊月平均透明度有显著的时间变异特征。Liu等(2020)报道中国湖泊透明度的主控因素是水体悬浮物含量, 包含再悬浮的沉积物和浮游藻类。风速和水深是沉积物再悬浮的重要控制因素, 大风时湖泊易发生沉积物再悬浮(Bailey和Hamilton, 1997; Carper和Bachmann, 1984); 而气温则是浮游藻类生长繁殖的一个重要因素(Rhee和Gotham, 1981)。除青藏高原湖区和西北干旱湖区, 中国其他3个湖区都处于季风气候区, 夏季风速低、气温高, 而冬季则相反; 在青藏高原湖区和西

北干旱湖区, 也表现为夏季风速低、气温高(Liu等, 2020)。气候因子的季节变化使湖泊月平均透明度季节变异呈现两种典型类型: 第1种是悬浮物主要由沉积物组成的浅水湖泊透明度呈夏季峰值、冬季谷值; 第2种是悬浮物主要由浮游藻类组成的深水湖泊透明度呈夏季谷值、冬季峰值。对云贵高原湖区的深水湖泊—抚仙湖, 2000年—2020年夏季5—7月的透明度明显(470.44 ± 237.3 cm)低于冬季11—1月(1294.87 ± 289.75 cm), 典型的属于第2种类型(图4、图5)。而对于东部平原湖区的浅水湖泊—鄱阳湖, 2000年—2020年夏季的透明度(136.24 ± 97.35 cm)明显高于冬季(28.82 ± 14.34 cm), 典型的属于第一种类型(图4、图6)。对中国其他湖泊, 根据透明度的季节变异特征也可分为这两种类型一种(Liu等, 2020)。

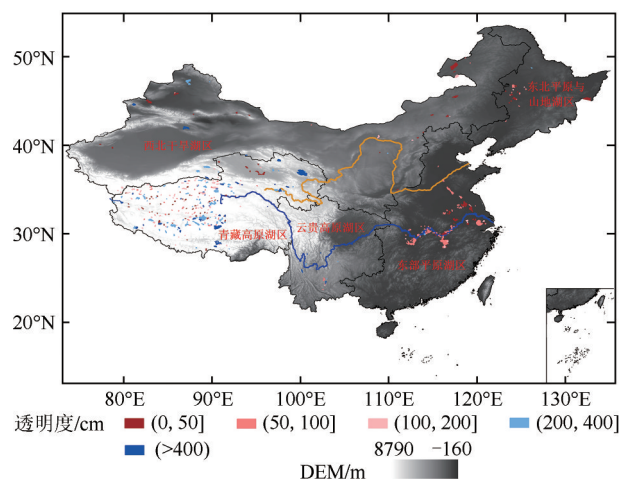


图3 2019年全国不同湖泊年平均透明度(西北干旱湖区、青藏高原湖区、东北平原山地湖区湖泊的年平均透明度计算只用了夏秋季5—9月的遥感结果)

Fig. 3 Annual mean water transparency of different lakes in 2019 (Values of lakes in the Inner Mongolia-Xinjiang Lake Zone, the Tibetan Plateau Lake Zone, and the Northeast Plain and Mountain Lake Zone was calculated using remote sensing results from May-September)

同一湖泊的月平均透明度具有明显的空间变异特征。除沉积物再悬浮和浮游藻类增殖, 入湖河流也会输运大量陆源颗粒物进入湖泊, 从而增加湖泊悬浮物含量, 尤其是在近河口水域(Shi等, 2015)。此外, 同一湖泊不同位置的水深、风速和浮游藻类繁殖所需的营养盐含量等也可能存在明显差异, 如东部平原湖区的巢湖西部具有低水深、低风速和高营养盐特征(Liu等, 2021)。

同一湖泊内，这些因子的空间差异使湖泊透明度呈现空间变异，图5和图6分别展示了鄱阳湖和抚仙湖2020年不同月份的透明度，空间分布差异明显，尤其是夏秋季5—10月。

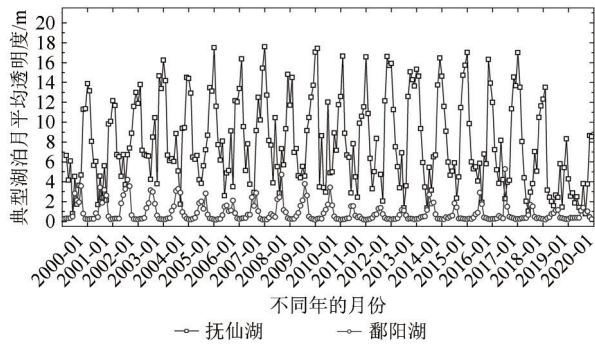


图4 遥感反演的2000年—2020年抚仙湖与鄱阳湖月平均透明度时间序列

Fig. 4 The satellite-derived monthly mean water transparency values of Lake Fuxian and Lake Poyang from 2000 to 2020

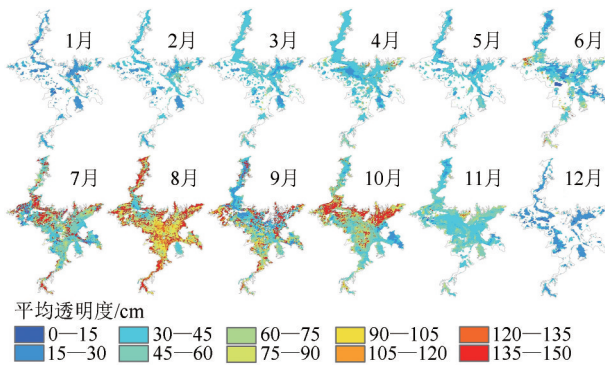


图5 遥感反演的鄱阳湖2020年不同月份平均透明度(湖泊界限范围内空白表示非水体覆盖区域或无有效观测)

Fig. 5 The satellite-derived monthly mean water transparency of Lake Poyang in 2020 (Blanks within the lake boundary show areas which are not covered by waters or have not effective observations)

4.4 湖泊水体清澈度动态监测

水体透明度是清澈度的计量表征，透明度越高、水体越清澈。参照 Lee 和 Lee (2015)，研究根据年平均透明度对不同湖泊进行清澈度类别划分：年平均透明度为 >100、(65, 100]、(25, 65] 和 ≤25 (单位 cm) 的湖泊分别划分为 I、II、III 和 IV 类清澈水体。

中国大型湖泊水体清澈程度表现整体良好。2019年中国大型湖泊清澈度类别如图7所示：监测的412个大型湖泊中，有222个(53.88%)为I类、60个(14.56%)为II类、98个(23.79%)为

III类和32个(7.77%)为IV类。I类清澈湖泊大多分布在中国西部，尤其是青藏高原湖区，东部两湖区水体浑浊(图7，审图号：GS(2016)1549)；青藏高原湖区的262个大型湖泊中，有182个(69.47%)为I类清澈度；东部平原湖区的79个大型湖泊中，只有10个(12.66%)为I类清澈度，II类和III类清澈度湖泊数分别占40.51%和46.83%。

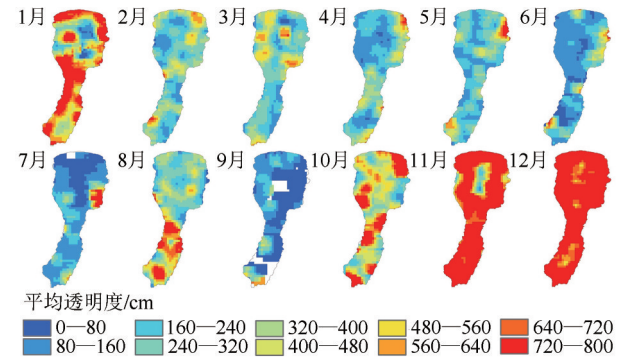


图6 遥感反演的抚仙湖2020年不同月份平均透明度(湖泊界限范围内空白表示无有效观测)

Fig. 6 The satellite-derived monthly mean water transparency of Lake Fuxian in 2020 (Blanks within the lake boundary show areas which have not effective observations)

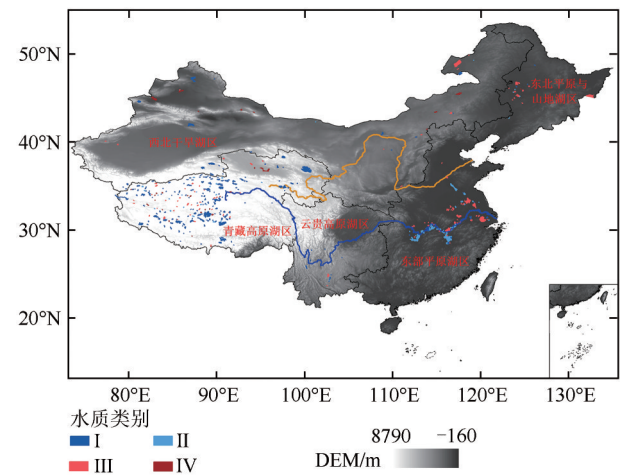


图7 2019年中国大型湖泊清澈度类别(清澈度类别根据湖泊年平均透明度确定(Lee和Lee, 2015))

Fig. 7 Water clarity types of large lakes in China in 2019 (Water clarity types are defined according to annual mean water transparency (Lee and Lee, 2015))

中国湖泊水体清澈程度在2000年—2020年呈改善趋势。不同年份、不同类型湖泊清澈度类别占比如图8所示：2000年—2020年，I类清澈度湖泊数量呈显著增加趋势， $r=0.7$ ， $p<0.01$ ；III类清澈度湖泊数量呈显著减少趋势， $r=-0.59$ ， $p<0.01$ ；IV类清澈度湖泊数量也呈显著减少趋势， $r=-0.83$ ，

$p < 0.01$ 。中国湖泊清澈度的增加是中国退耕还林还草、植树造林和富营养化控制等多种生态综合治理下的有益效果,体现出山水林田湖草是共同生命体,对其进行统一保护、统一修复是十分必要的。

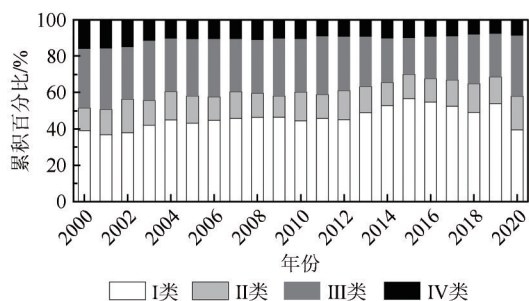


图8 2000年—2020年中国不同清澈度类别湖泊数量占比

Fig. 8 The quantity percentage of lakes in different water clarity types in China from 2000—2020

4.5 可持续发展目标下的湖泊水环境评估与预测

当前,可持续发展是社会、经济和环境发展的主旋律。2015—09,联合国在纽约总部召开可持续发展峰会,会上193个成员国正式通过17个可持续发展目标,共包含244个具体指标(<https://sdgs.un.org/>[2021-03-28])。其中,指标6.3.2为环境水质良好的水体比例,核心参数包括溶解氧、电导率、pH、氮和磷。这些参数是国家地表水环境质量标准(GB3838-2002)涉及的具体监测指标,但传统点位观测资料不具备时空连续性,监测频率通常为月尺度,监测的也只是一些代表性点位,且对青藏高原等水体缺乏监测资料。因此,目前指标6.3.2属于有方法无数据的Tier II类型,对该指标的评估结果,中国还无公开发布数据(<https://sdg-tracker.org/water-and-sanitation> [2021-03-28])。

虽然指标6.3.2的5个核心参数都不是光学活性物质,卫星遥感无法进行直接监测,但研究表明卫星可获取的水体透明度与这些水质参数有着密切关系,可作为判断水质好坏的依据(Chang等,2020; Lee和Lee,2015)。针对指标SDG 6.3.2,中国科学院在第75届联合国大会期间发布的《地球大数据支撑可持续发展目标报告(2020)》中,基于本数据集评估了2000年—2019年中国湖泊水体透明度/清澈度的时空分布格局(中国科学院,2020)。补充2020年最新数据,本文统计了

2000年—2020中国不同湖区湖泊透明度的总体变化趋势,结果表明:西北干旱湖区、青藏高原湖区、东北平原与山地湖区的湖泊透明度/清澈度呈增加趋势,而东部平原湖区、云贵高原湖区的湖泊透明度/清澈度呈降低趋势(图9)。

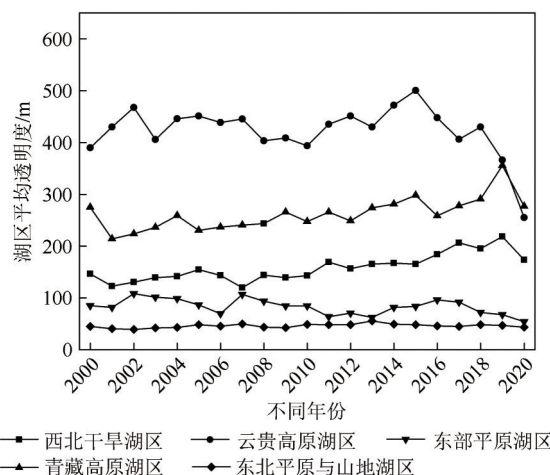


图9 2000年—2020年不同湖区平均透明度(湖区平均透明度为各湖泊透明度的面积加权平均值)

Fig. 9 Mean water transparency of different lake zones from 2000—2020 (Mean water transparency is the area-weighted average of the values in all lakes)

虽然遥感观测只能反映历史的湖泊水环境变化,但也可以支撑湖泊水环境预测。一方面,可以综合分析历史气象—水文—营养条件和月尺度透明度变化特征,判断未来短期内的湖泊透明度变化;另一方面,可以利用湖泊月透明度数据集率定湖泊生态系统模型,进而将模型应用于湖泊中长期水环境变化预测。

5 结论

基于中国299个湖泊的现场调查透明度、MOD09GA地表反射率和GEE云平台,本文构建了中国大型湖泊2000年—2020年的月平均透明度遥感数据集,并介绍了该数据集的应用价值。研究将构建的算法应用于GEE平台,创新性的实现了中国5个湖区的412个大型湖泊透明度的快速制图。中国湖泊透明度具有高时空动态变异特征:空间分布上呈“东低西高”特征,季节变异呈“夏高冬低”和“夏低冬高”两种典型类型。2000年—2020年,中国大型湖泊水体清澈程度整体表现良好,且呈改善趋势。总之,该数据集不仅可以应用于中国湖泊透明度/清澈度时空变异特征研究,

也可服务于联合国可持续发展目标下的湖泊水环境评估与模型预测, 是中国湖泊水环境动态变化监测的宝贵数据资源。目前, 中国大型湖泊2000年—2020年的年平均透明度数据已经可以通过国家地球系统科学数据中心湖泊一流域分中心访问下载 (<http://lake.geodata.cn/gxb.html> [2021-03-28]), 下一步拟处理完善月尺度透明度后进行上传共享。然而, 研究生产的数据集只包含中国大型湖泊, 下一步拟将本文介绍的方法应用于全球湖泊, 实现全球大型湖泊的透明度月尺度数据集生产。

志 谢 野外实验数据获取得到了科技部“中国湖泊水质、水量和生物资源调查”基础工作专项和中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊环境遥感团队的支持, 在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- Bailey M C and Hamilton D P. 1997. Wind induced sediment resuspension: a lake-wide model. *Ecological Modelling*, 99(2/3): 217-228 [DOI: 10.1016/S0304-3800(97)01955-8]
- Bailey S W and Werdell P J. 2006. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products. *Remote Sensing of Environment*, 102(1/2): 12-23 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.01.015]
- Cai Y, Ke C Q, Li X G, Zhang G Q, Duan Z and Lee H. 2019. Variations of lake ice phenology on the Tibetan Plateau from 2001 to 2017 based on MODIS data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(2): 825-843 [DOI: 10.1029/2018JD028993]
- Carlson R E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2): 361-369 [DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361]
- Carper G L and Bachmann R W. 1984. Wind resuspension of sediments in a prairie lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 41(12): 1763-1767 [DOI: 10.1139/f84-217]
- Chang N N, Luo L, Wang X C, Song J, Han J X and Ao D. 2020. A novel index for assessing the water quality of urban landscape lakes based on water transparency. *Science of the Total Environment*, 735: 139351 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139351]
- Chinese Academy of Sciences. 2020. Big earth data in support of the sustainable development goals (中国科学院. 2020. 地球大数据支撑可持续发展目标报告)
- Duan H T, Ma R H, Zhang Y Z and Zhang B. 2009. Remote-sensing assessment of regional inland lake water clarity in northeast China. *Limnology*, 10(2): 135-141 [DOI: 10.1007/s10201-009-0263-y]
- Feng L, Hou X J and Zheng Y. 2019. Monitoring and understanding the water transparency changes of fifty large lakes on the Yangtze Plain based on long-term MODIS observations. *Remote Sensing of Environment*, 221: 675-686 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.007]
- Feng L, Hu C M, Chen X L, Tian L Q and Chen L Q. 2012. Human induced turbidity changes in Poyang Lake between 2000 and 2010: observations from MODIS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117: C07006 [DOI: 10.1029/2011JC007864]
- He X Q, Bai Y, Pan D L, Huang N L, Dong X, Chen J S, Chen C T A and Cui Q F. 2013. Using geostationary satellite ocean color data to map the diurnal dynamics of suspended particulate matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 133: 225-239 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.01.023]
- Kloiber S M, Brezonik P L, Olmanson L G and Bauer M E. 2002. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 82(1): 38-47 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00022-6]
- Lee L H and Lee Y D. 2015. The impact of water quality on the visual and olfactory satisfaction of tourists. *Ocean and Coastal Management*, 105: 92-99 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2014.12.020]
- Lee Z, Shang S L, Hu C M, Du K P, Weidemann A, Hou W L, Lin J F and Lin G. 2015. Secchi disk depth: a new theory and mechanistic model for underwater visibility. *Remote Sensing of Environment*, 169: 139-149 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.002]
- Liu C, Zhu L P, Wang J B, Qiao B J, Ju J T and Huang L. 2017. Remote sensing-based estimation of lake water clarity on the Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 36(5): 597-609 (刘翀, 朱立平, 王君波, 乔宝晋, 鞠建廷, 黄磊. 2017. 基于MODIS的青藏高原湖泊透明度遥感反演. *地理科学进展*, 36(5): 597-609) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.05.007]
- Liu D, Duan H T, Loisel S, Hu C M, Zhang G Q, Li J L, Yang H, Thompson J R, Cao Z G, Shen M, Ma R H, Zhang M and Han W X. 2020. Observations of water transparency in China's lakes from space. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92: 102187 [DOI: 10.1016/j.jag.2020.102187]
- Liu D, Yu S J, Cao Z G, Qi T C and Duan H T. 2021. Process-oriented estimation of column-integrated algal biomass in eutrophic lakes by MODIS/Aqua. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 99: 102321 [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102321]
- Ma R H, Duan H T, Hu C M, Feng X Z, Li A N, Ju W M, Jiang J H and Yang G S. 2010. A half-century of changes in China's lakes: global warming or human influence?. *Geophysical Research Letters*, 37(24): L24106 [DOI: 10.1029/2010GL045514]
- Ma R H, Yang G S, Duan H T, Jiang J H, Wang S M, Feng X Z, Li A N, Kong F X, Xue B, Wu J L and Li S J. 2011. China's lakes at present: number, area and spatial distribution. *Science China Earth Sciences*, 54(2): 283-289 (马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 姜家虎, 王苏民, 冯学智, 李爱农, 孔繁祥, 薛滨, 吴敬禄, 李世杰. 2011. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. *中国科学: 地球科学*, 41(3): 394-401) [DOI: 10.1007/s11430-010-4052-6]
- McFeeters S K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7): 1425-1432 [DOI: 10.1080/01431169608948714]
- Olmanson L G, Bauer M E and Brezonik P L. 2008. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes. *Remote Sensing of Environment*, 112(11): 4086-4097 [DOI: 10.1016/J.RSE.2007.12.013]
- Otsu N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1): 62-66 [DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076]
- Prasad K S, Bernstein R L, Kahru M and Mitchell B G. 1998. Ocean

- color algorithms for estimating water clarity (Secchi Depth) from SeaWiFS. *Journal of Advanced Marine Science and Technology Society*, 4(2): 301-306
- Rhee G Y and Gotham I J. 1981. The effect of environmental factors on phytoplankton growth: temperature and the interactions of temperature with nutrient limitation. *Limnology and Oceanography*, 26 (4): 635-648 [DOI: 10.4319/LO.1981.26.4.0635]
- Shi K, Zhang Y L, Zhu G W, Liu X H, Zhou Y Q, Xu H, Qin B Q, Liu G and Li Y M. 2015. Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in Lake Taihu using 250m MODIS-Aqua data. *Remote Sensing of Environment*, 164: 43-56 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.02.029]
- Song K S, Liu G, Wang Q, Wen Z D, Lyu L, Du Y X, Sha L W and Fang C. 2020. Quantification of lake clarity in China using Landsat OLI imagery data. *Remote Sensing of Environment*, 243: 111800 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111800]
- Vermote E F, Roger J C and Ray J P. 2015. MODIS surface reflectance user's guide (Version 1.4)
- Wang S L, Li J S, Zhang B, Lee Z, Spyarakos E, Feng L, Liu C, Zhao H L, Wu Y H, Zhu L P, Jia L M, Wan W, Zhang F F, Shen Q, Tyler A N and Zhang X F. 2020. Changes of water clarity in large lakes and reservoirs across China observed from long-term MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111949 [DOI: 10.1016/J.RSE.2020.111949]
- Williamson A N and Grabau W E. 1973. Sediment concentration mapping in tidal estuaries//Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington, DC: [s.n.]: 1347-1386

Monthly mean remote sensing water transparency dataset of large lakes in China during 2000—2020

LIU Dong¹, ZHANG Min², CAO Zhigang¹, SHEN Ming¹, QI Tianxi¹, MA Jing¹, DUAN Hongtao^{1,3}

1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
3. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

Abstract: Lake water transparency can comprehensively reflect the lake water environment, has significant relationships to some water quality parameters, and greatly important for water environment monitoring. This study aims to introduce the generation processes, characteristics, and application values of a new monthly mean water transparency dataset for large lakes in China with a water area of >20 km². The remote sensing algorithm for retrieving water transparency proposed by Liu et al. (2020) was applied to MODIS surface reflectance data and stored on the Google Earth Engine cloud platform to realize rapid calculation and mapping of monthly mean water transparency in different lakes in China from 2000 to 2020. The MODIS surface reflectance data contain one state band, which was used to remove nonwater pixels such as cloud, cloud shadow, and land. The output data were stored in GeoTIFF grid format, which saved the pixel-based water transparency value and the geographic coordinate information. The GeoTIFF format file was also convenient for different software platforms. The dataset covers 412 large lakes in different lake zones of China. Specifically, Inner Mongolia-Xinjiang Lake Zone (IMXL), the Tibetan Plateau Lake Zone (TPL), the Yunnan-Guizhou Plateau Lake Zone (YGPL), the Northeast Plain and Mountain Lake Zone (NPML), and the Eastern Plain Lake Zone (EPL) have 40, 262, 11, 20, and 79 lakes, respectively.

This study also provided some application examples of the dataset. First, the dataset indicates that the lakes in China had high water transparency values in the west but low values in the east. In 2019, the area-weighted water transparency values in the IMXL, TPL, YGPL, NPML, and EPL zones were 174.54 cm, 276.67 cm, 254.93 cm, 43.41 cm, and 53.93 cm, respectively. Second, the comparison results of lakes Fuxian and Poyang show the two typical types of seasonal variations in water transparency. For the deep Lake Fuxian, water transparency was determined by phytoplankton content; it had low values in summer. On the contrary, for the shallow Lake Poyang, water transparency was controlled by sediment resuspension; it had low values in winter with strong wind. Third, according to water transparency, we divided the Chinese lakes into four types. Lakes in Type I with high water clarity were majorly located in the west. Lakes in Type IV with low water clarity were mainly distributed in the east. Fourth, water transparency was applied to assess the lake water environment under the sustainable development goals. In the previous two decades, water transparency values in the IMXL, TPL, and NPML zones showed a significantly increasing trend, but water transparency values in the EPL and YGPL zones showed a decreasing trend.

To our knowledge, this dataset is the first monthly mean water transparency dataset, which covers nearly all large lakes in China. The monthly scale time resolution allows the dataset to obtain outstanding advantages for dynamically monitoring the lake water environment in China. In the future, the open sharing dataset is greatly important to promote the development of lake water environment research in China.

Key words: China, lakes, water transparency, remote sensing, MODIS

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41901299, 41971309); Youth Innovation Promotion Association CAS (No. 2021313); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20181102); Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences (No. E1SL002)