

# 中国湖泊分布与变化:全国尺度遥感监测 研究进展与新编目

张闻松<sup>1,2</sup>, 宋春桥<sup>1</sup>

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. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023

**摘要:** 湖泊提供重要的生产生活用水, 在维系生态安全方面发挥显著的价值。中国地理环境复杂多样, 湖泊类型各异, 不同湖区间的湖泊时空变化特征及驱动机制复杂。两次全国湖泊调查是国家尺度的湖泊变化监测的开创性工作, 近年来伴随遥感数据源的海量积累和湖泊遥感提取方法的快速发展, 大尺度湖泊水体变化遥感监测研究取得了长足的发展。然而, 由于人工判读、湖泊类型判别依据和遥感数据源时相的差异, 湖泊水体遥感提取结果及面积估算存在不同程度的出入。首先, 本文总结了现有全国尺度湖泊监测研究的遥感数据源、方法和结果, 分析了不同研究分析结果差异的可能原因。其次, 本文基于1980s—2010s时段Landsat影像制图的湖泊水淹频率数据集的最大水域范围信息, 提取并生成了全国湖泊新编目, 以其作为该时段内湖泊判定和水体变化监测空间约束的统一参照, 避免了因遥感数据时相与年际、年内湖泊水域范围波动对遥感提取结果及湖泊面积计算带来的差异。最后, 本文从湖泊水淹范围频度的统计角度, 初次提出了可体现湖泊面积年内与年际变化情况的统计指标——概率等效面积, 用于监测和指示湖泊水域动态。结果表明, 近30年来, 中国有3741个最大水域范围大于1 km<sup>2</sup>的湖泊, 总面积约93723 km<sup>2</sup>, 其中青藏高原湖区的湖泊数量约占全国三分之一, 总面积超过了全国的一半。全国湖泊总面积呈显著上升趋势, 不同湖区的变化趋势差异明显: 青藏高原湖区和新疆湖区湖泊面积显著上升, 东部平原湖区、内蒙古高原湖区和云贵高原湖区显著下降, 东北平原与山地湖区波动式变化、趋势不显著。研究结果总体表明中国湖泊水资源的时空不平衡状况在加剧。

**关键词:** 湖泊遥感, 水域面积, 遥感监测, 中国, 全国尺度, 全球变化

**引用格式:** 张闻松, 宋春桥. 2022. 中国湖泊分布与变化: 全国尺度遥感监测研究进展与新编目. 遥感学报, 26(1): 92–103

Zhang W S and Song C Q. 2022. Spatial distribution and dynamics of lakes in China: Progress in remote sensing monitoring at national scale and new inventory of the maximum lake extent and change trajectory. National Remote Sensing Bulletin, 26(1): 92–103 [DOI: 10.11834/jrs.20221290]

## 1 引言

湖泊是重要的生产生活用水来源, 中国一半以上的城镇饮用水来自湖泊 (吴丰昌等, 2008)。中国湖泊数量众多, 据第二次全国湖泊调查, 中国有1 km<sup>2</sup>以上湖泊2693个, 总面积为81414.6 km<sup>2</sup>, 约占全国陆地总面积的0.9%。但是不同地区的湖泊分布差异悬殊, 并正经历着显著不同的面积和数

量变化趋势 (杨桂山等, 2010; Ma等, 2011; Xie等, 2018; Zhang等, 2019; Tao等, 2020)。

第一次全国湖泊调查始于20世纪60年代, 于20世纪80年代结束, 以实地直接观测为主要调查手段 (王苏民和窦鸿身, 1998; Ma等, 2010)。近年来, 遥感逐渐成为大尺度湖泊时空变化监测研究的主要手段, 包括湖泊水生植物 (Shi等, 2019a)、湖泊富营养化 (Jiang等, 2012; Song等,

收稿日期: 2021-04-30; 预印本: 2021-09-29

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(编号: XDA23100102); 国家自然科学基金(编号: 41971403, 41801321); 国家重点研发计划(编号: 2019YFA0607101, 2018YFD0900804, 2018YFD1100101); 第二次青藏高原综合科学考察研究(编号: 2019QZKK0202)

第一作者简介: 张闻松, 1998年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为水文遥感。E-mail: wensong\_z@outlook.com

通信作者简介: 宋春桥, 1986年生, 男, 研究员, 研究方向为水文遥感。E-mail: cqsong@niglas.ac.cn

2018; Wang等, 2018; Shi等, 2019b)、湖泊水质 (Duan等, 2009; Liu等, 2020; Wang等, 2020; Zhou等, 2021)、湖冰 (Cai等, 2020)、冰湖 (Li和Sheng, 2012)、湖泊面积、水位与水储量 (Song等, 2013, 2014; Jiang等, 2017; Wu等, 2019; 宋春桥等, 2020)、湖泊水域范围 (Ma等, 2010; Xie等, 2018; Zhang等, 2019; Tao等, 2020)等。第二次全国湖泊调查首次基于遥感影像开展了全国湖泊面积监测, 调查时期为2005年—2006年 (Ma等, 2011), 基于两次全国湖泊调查数据, Ma等 (2010) 首次在全国尺度研究了中国湖泊的水域面积变化。随着遥感传感器发展及可免费获取遥感数据源的增加, Xie等 (2018)、Zhang等 (2019) 和Tao等 (2020), 将遥感监测的时间范围进一步扩展至数十年, 获得了中国湖泊面积的长时序动态变化特征, 监测时间频度2—10 a不等。然而, 由于研究利用的卫星数据成像时间 (影像获取的年份及月份)、湖泊水域提取方法 (各种自动化提取算法或目视解译) 等的差别, 研究所反映的湖泊面积的变化幅度和趋势存在不一致的结果。比如, 除第二次全国湖泊调查关注了湖泊的丰水期和枯水期外, 现有研究大多从特定某几个月份内选用遥感影像, 反映的湖泊面积代表性不够。因此, 有必要系统梳理和比较现有全国尺度湖泊遥感监测研究所使用的遥感数据、方法及其质量控制手段, 并分析和探讨这些因素造成研究结果与结论差异的各种可能。

现有研究因数据方法不同, 在结果结论中引入了不同程度的差异。为克服影像成像时间与解译方法给湖泊监测结果带来的不确定性, 本文初

次基于所有可利用的1980s—2010s时段内获取的Landsat系列卫星影像所制图的水体频率数据集 (Pekel等, 2016), 采用半自动化手段生成一套全国湖泊 (>1 km<sup>2</sup>) 最大水体范围的编目数据, 为相关方向的研究提供了一套时空尺度一致的湖泊水域范围基准数据参考; 并在此基础上, 提出了衡量湖泊在某一时段内的水淹面积频度的量化新方法——概率等效面积, 逐个湖泊量化最大水体掩膜约束下的湖泊年际变化时序数据, 分析了全国湖泊在1980s—2010s时段水域面积变化特征。

## 2 全国尺度湖泊面积变化遥感监测研究进展

中国第一次全国湖泊调查开始于20世纪60年代, 至20世纪80年代结束, 填补了中国湖泊科学研究的空白 (Ma等, 2010)。本轮调查中主要以实地测量为主, 遥感技术手段基本未被用于相关参数的提取和量化。在21世纪初发起的第二次全国湖泊调查, 以遥感资料作为主要数据源, 使用了11004景/幅CBERS CCD和Landsat TM/ETM+遥感影像, 制定了针对全国的一般原则和针对不同湖区的次级原则用于遥感判译, 结合实地野外调查与当地专家访谈, 经相关领域专家研讨, 获得了2005年—2006年全国面积大于1 km<sup>2</sup>的湖泊的空间分布和水域面积 (Ma等, 2011)。其中, 每个湖泊都至少使用了两个时相的数据, 丰水期和枯水期各一期, 个别湖区或湖泊使用了2004年—2008年3—10个时相的数据 (Ma等, 2011)。Ma等 (2010) 基于两次全国湖泊调查数据进行比较分析, 首次在全国尺度研究了中国湖泊的水域面积变化, 如表1所示。

表1 现有全国尺度湖泊变化遥感监测研究使用的数据与方法

Table 1 Data and methods of existing national-scale monitoring of China lake changes by remote sensing

	Ma等, 2010	Xie等, 2018	Zhang等, 2019	Tao等, 2020
时间范围	1960s—1980s; 2005年—2006年	1985年—2015年	20世纪60年代初至 2015年(1980s缺失)	1985年—2015年
时间间隔	约30 a	5 a	10 a (1960s, 1970s) 5 a (1990年—2015年)	5 a (1985年—1990年) 3 a (1991年—2013年) 2 a (2014年—2015年)
数据源	实地调查数据; CBERS CCD, TM/ETM+	GSWD MWH	地形图、Landsat MSS, TM, ETM+, OLI	Landsat TM, ETM+, OLI
影像时间	无; 丰水期和枯水期 至少各1个时相, 个别湖泊3—10个时相	青藏高原(9—11月) 蒙新高原、东北平原与山地(6—9月) 东部平原、云贵高原(6—10月)	青藏高原(9—11月) 新疆地区、东北平原与山地(8—9月) 蒙古高原(7—9月)、云贵高原(8—10月)	6—9月
遥感判译方法	全国性的一般原则、 各湖区的次级原则	根据Google Earth影像纠正、进行拓扑 检查并与文献和公开数据集对比验证	地图和MSS: 手动数字化 TM/ETM+/OLI: Otsu-NDWI动态阈值分割	NDWI 阈值分割

随着中高空间分辨率的卫星影像数据获取的日益便捷和遥感提取水体方法的快速发展,更多的学者从不同的角度开展全国尺度的湖泊变化遥感监测工作。Xie等(2018)利用GSWD(Global Surface Water Dataset)(Pekel等,2016)的月度水体分布数据MWH(Monthly Water History),辅以人工编辑等手段提取出1985年、1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2015年共7期全国大于 $1\text{ km}^2$ 的湖泊面积,并分析其变化。GSWD MWH是一套全球逐月水体分布数据集,数据源为Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM+和Landsat 8 OLI。作者基于该水体数据集经过严格的人工判读质量控制,验证结果表明其湖泊水体提取数据精确度高,漏分误差小于5%,错分误差小于1%(Xie等,2018)。针对不同湖区,选取了不同季相和月份的影像数据源,目的是为了减小湖泊季节性变化对面积估算的影响,如表1所示。此外,考虑到云的遮挡,数据覆盖了目标年份前后至少各一年。Zhang等(2019)利用Landsat MSS/TM/ETM+/OLI数据,并结合20世纪60年代的地形图数据,生产了中国湖泊半个多世纪以来(1960年代—2015年)变化数据集,不同分析时段间隔为5—10 a。对于地形图数据和MSS数据,使用传统的人工解译方法提取湖泊边界。对于TM、ETM+和OLI影像,使用Otsu阈值分割(Otsu,1979)卫星影像导出的归一化水体指数NDWI(Normalized Difference Water Index)图像的方式提取水体。在自动化提取结果基础上,以原始遥感影像为参照,通过目视判读确认获取不同时相下的湖泊水域边界。为了减少云的影响,同时尽可能减少年内湖泊水域范围波动对提取面积的影响,针对不同湖区分别定义了最佳影像成像时间范围,如表1所示。Tao等(2020)使用了Landsat 5、Landsat 7、Landsat 8卫星的TM、ETM+和OLI传感器获取的监测时间间隔更密集影像序列,利用NDWI阈值分割提取湖泊水域范围,参照Google Earth影像去除水库、池塘和没有明显水陆边界的盐湖,获取了近30年来9个时间段的全国大于 $1\text{ km}^2$ 的湖泊的变化特征,时间间隔最密达2 a。选取的卫星数据成像时间多处于中国多数湖泊达到其年内最大面积的6—9月时段(Tao等,2020)。

上述4个研究的全国湖泊遥感监测结果组合如图1(GS(2021)8079号)所示,研究监测的湖

泊对象空间分布总体相似。因为关注的湖泊大小阈值控制在 $>1\text{ km}^2$ 以上,因此主要湖泊分布在青藏高原和东部平原湖区,特别是高原内流区的羌塘湖盆与长江中下游的两湖平原与江淮平原。本文进一步提取这几个研究公布的全国尺度遥感提取的不同时期湖泊面积数据进行对比(图2),分析发现Xie等(2018)、Zhang等(2019)和Tao等(2020)的研究结果大体一致地表明全国湖泊总面积从20世纪七八十年代至2010s大体呈上升趋势。Ma等(2010)基于对两次全国湖泊调查的两期数据的比较,揭示出中国湖泊面积从20世纪六七十年代至2005—06时段总体减小,与Zhang等(2019)对同一时期的计算结果有一定的出入。这可能是由于第一次全国湖泊调查时间跨度过长,数据源在时间上的一致性不足;此外,不同研究、不同时段所使用的数据源涉及遥感、地形图、实地调查等多种多样,在地理空间基准、投影方式、面积计算方法等方面都存在差异和定量估算的不确定性。将Xie等(2018)和Tao等(2020)的全国湖泊面积计算结果线性插值估算2005年前后的面积,与第二次全国湖泊调查和Zhang等(2019)的结果均比较接近,偏差在5%内,如图2所示。

本研究对Xie等(2018)、Zhang等(2019)和Tao等(2020)共同监测的2015年进行了比较分析,发现Xie等(2018)计算得到的全国湖泊总面积仅比Tao等(2020)高出1.63%,而Zhang等(2019)计算得到的总面积低于Tao等(2020)估算约7.57%。可能造成这些差异主要存在以下3个方面的原因:(1)湖泊解译制图选择的影像的获取季节/月份差异,将在结果中导致较大的湖泊面积波动,特别是对于季风主导的东部平原湖区的湖泊,如鄱阳湖、洞庭湖等其丰/枯期的湖泊面积可能相差4—8倍(Feng等,2012;Huang等,2012)。如表1所示,Xie等(2018)对不同的湖区选取了不同的成像月份的影像,而Tao等(2020)则都固定在了6—9月。Xie等(2018)使用的数据源GSWD利用了所有可获取的Landsat影像,其反映的是选择时段内相对丰水期的湖泊面积,因此高于其他两个研究的面积值。(2)尽管上述研究对象均为全国 $>1\text{ km}^2$ 以上的自然湖泊,但区分自然湖泊与人工水库时采取的参照影像和人工判译依据不尽相同。(3)研究在采样自动化影像分类提取湖泊面积后均采取了人工判读质量控制,但质

量控制时采用的不同的参考标准及因人而异的遥感判译标准, 也是造成湖泊提取结果及面积差异的重要因素。比如, Zhang 等 (2019) 目视解译时以原始影像为参照, 而 Xie 等 (2018) 和 Tao 等

(2020) 都使用了空间分辨率更高、使用更灵活的 Google Earth 影像。这可能也是 Zhang 等 (2019) 的估算结果整体上相对于 Xie 等 (2018) 和 Tao 等 (2020) 较小的原因之一。

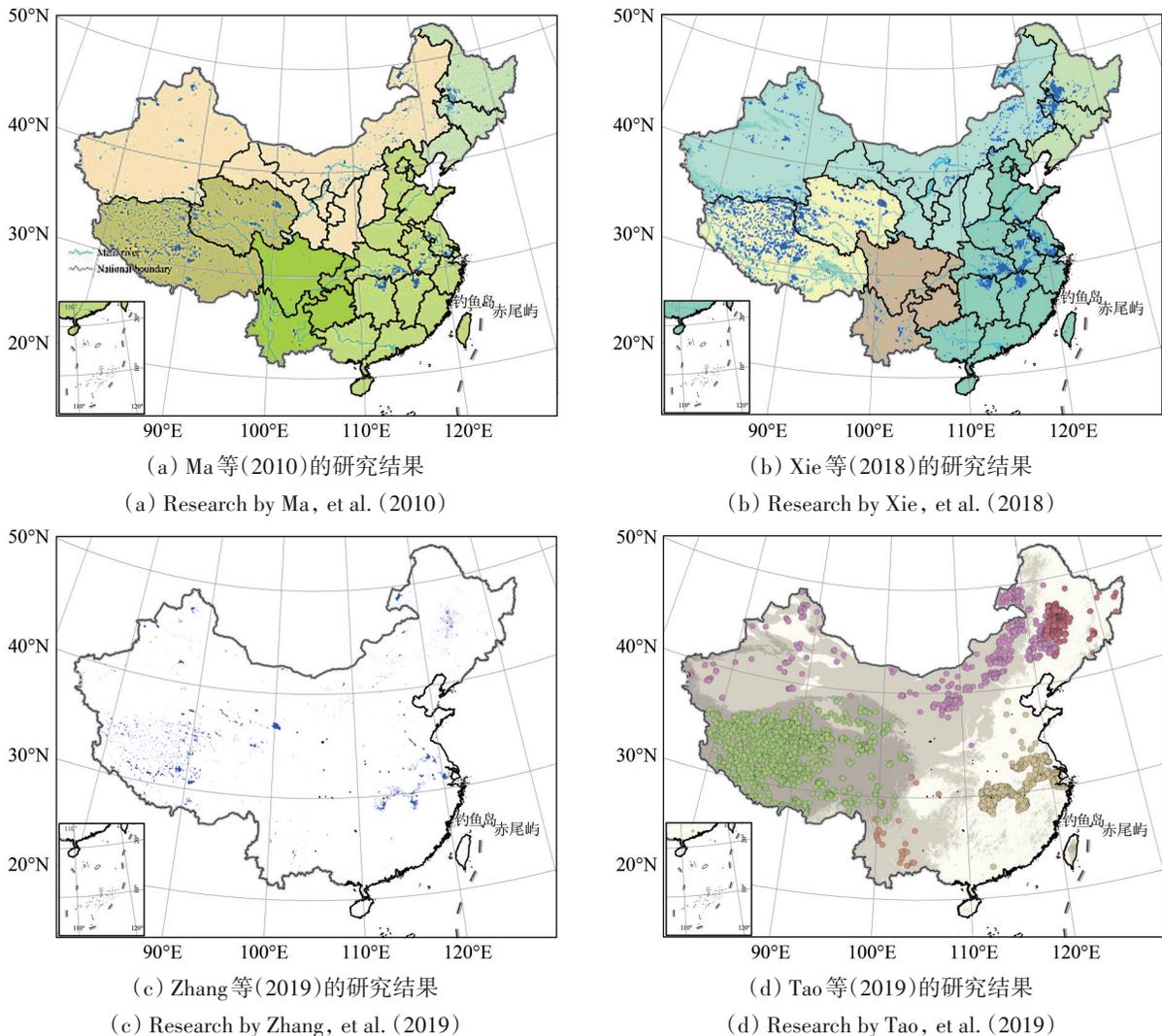


图1 基于现有全国尺度湖泊遥感监测研究的中国湖泊分布对比

Fig. 1 The spatial distribution of China lakes based on existing national-scale remote sensing monitoring researches

由于各湖区湖泊面积变化速率的分析方法不同, 现有研究结果无法直接比较, 但是可以针对其变化趋势的方向进行比较, 如表2所示, 表中箭头右侧带星号者指示其变化趋势不显著, 即 $P$ 值大于0.05。综述的4个研究仅对青藏高原湖区的面积变化分析结论一致, 这说明该湖区长期经历着比较稳定的湖泊面积扩张趋势。将新疆和内蒙古高原湖区统一归为蒙新湖区时, 得到的湖泊面积变化趋势都是显著扩大 (Xie 等, 2018; Tao 等, 2020), 但是若将这两个湖区分开, 得到的湖泊面积就变成了显著减小 (Zhang 等, 2019), 说明这

两个湖区可能正经历着截然不同的变化趋势, 其水文驱动机制也有较大的差异。因此, 本文在后续章节的湖泊面积变化研究中将分别讨论这两个湖区的湖泊面积变化趋势, 也建议之后研究者在该区湖泊变化监测及影响因子的研究时区分对待。

除第二次全国湖泊调查综合考虑了丰水期与枯水期外, 其他研究为避免湖泊季节性波动给遥感提取的面积带来偏差, 均采用湖泊在非洪泛与冬枯两个特殊时期以外的其他某一特定时段的影像进行遥感解译 (表1)。此外, 选取的影像的成像时间不同, 对遥感提取的湖泊面积年际变化估

算结果带来显著的差异。为了解决这一问题，下文对全国湖泊多年（1980s—2010s）累积最大水域面积进行编目，并基于水淹概率特征提出了湖泊概率等效面积的概念，它能够反映湖泊在某一时段内水域面积的累积概率情况。这样，以全部可用影像作为数据源，就解决了影像成像时间差异的问题；以概率等效面积作为湖泊水域面积的衡量指标，就解决了某一月度范围的面积因影像质量或湖泊自然波动等因素不能完整反应整个时段湖泊面积的问题。

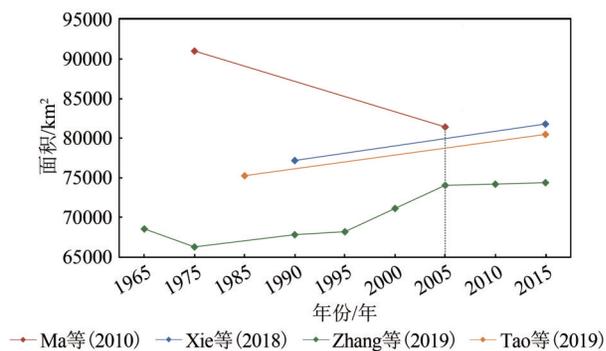


图2 现有研究的全国湖泊面积变化

Fig. 2 China lakes' area change derived from the four existing researches

表2 现有研究的全国各湖区湖泊面积增(↑)减(↓)变化状况

Table 2 Lake area change of each lake zone revealed by existing researches

湖区	Xie等, 2018	Zhang等, 2019	Tao等, 2020
东部平原	↓	↑*	↓
青藏高原	↑	↑	↑
云贵高原	↓	↑*	↓*
东北平原与山地	↓	↑	↓
内蒙古高原	↑	↓*	↑
新疆	↑	↑	↑

注: \*表示变化趋势不显著。

### 3 全国湖泊遥感新编目: 1980s—2010s 湖泊最大水域范围

#### 3.1 研究数据与方法

本文基于GSWD数据源编目1984年—2018年全国湖泊最大水域范围数据集。GSWD数据是Pekel等(2016)将专家系统、证据推理与目视解译结合生产的首套高时空分辨率、长时序的全球水体数据集, 准确度高, 被广泛作为多项研究的数据源(Feng等, 2019; Xie等, 2018)。本研究

使用该数据集的MWE(Max Water Extent)数据层(<https://global-surface-water.appspot.com/>[2021-04-30]), 版本为1.1, 它反映了全球陆地水体1984年—2018年时段约35 a内的最大水淹范围。

根据参考数据, 本文从GSWD MWE数据中基于人工判读方式逐个剔除非自然湖泊的其他水体所对应的图斑, 如河流、人工湖(水库)、水田、湿地等, 获得了1984年—2018年间全国湖泊的最大水域范围编目数据。人工判读的参照数据包括: (1) Google Earth历史影像; (2) 基础地理数据, 包括第二次全国湖泊调查湖泊点位数据、全国基础地理数据库; (3) 众源的网络电子地图数据, 包括Google Maps和Open Street Map; (4) 其他文献记录和网络资料, 例如《中国湖泊志》(王苏民和窦鸿身, 1998)和人民政府网站等。Google Earth历史影像的时间间隔可达每年, 覆盖了GSWD的时间范围, 故本研究以Google Earth历史影像为主要参照。若影像时空覆盖不完整, 则参考基础地理数据; 若基础地理数据不完善, 则根据文献记录、网络地图和网络资料最终判定。在基于上述几类参考数据进行自然湖泊与其他水体区分时, 主要依据包括以下几个方面:

(1) 湖泊和河流在形态学上差异明显。河流是地表水流的主要通道, 几何狭长, 水边线被水流塑造成平滑的形状。以此为依据, 结合Google Earth历史影像, 本文利用目视解译从最大水体范围数据中剔除了河流。湖泊水体在空间上连续, 随时间变化, 其空间范围呈现出沿岸线向外/向内周期性的扩大/缩小特征, 多年合成的水体轮廓如内部出现密集的“孔洞”, 则不符合湖泊的这一特征, 这种情况在湿地较为常见。

(2) 水库与自然湖泊极易混淆, 需要借助高时空分辨率影像检查。从Google Earth历史影像容易发现人工湖修建导致的地表水体的突然扩张, 有时还能重现其修建过程。借助近期成像的高空间分辨率Google Earth遥感影像, 能清晰观察到水库大坝。中国东部地区人口密集, 对湖泊的人工改造较多, 在遥感影像中能发现较多的人工围堰、堤防、围垦痕迹, 若不能从高分辨率Google Earth历史影像观察到水库大坝, 则归为自然湖泊。由人工挖掘形成的非自然湖泊, 有着迥异于自然湖泊的规则水边线轮廓, 其中极少数的最大水域面积大于1 km<sup>2</sup>, 多数能在历史影像中观测到其修建

过程。

(3) 水田的光谱特征与水体接近, 需要根据高空间分辨率影像所反映的地物纹理特征区分。如果在研究时段内地表一直都被水田覆盖, 或者由非湖泊地物转为水田, 则删除相应的图斑。有些湖泊逐渐被部分甚至全部围垦成水田, 这种情况下以湖泊围垦前的原始最大水域范围为准。此外, 分布在湖泊边缘的水田易被识别为水体, 根据 Google Earth 影像进行人工可视化编辑。

此外, 一些大型湖泊及其周围分布的小型湖泊, 在枯水期互不相连或以狭窄的水道相连, 但在丰水期则连成难以分割的整体。这说明它们是一个整体, 本文直接将小型湖泊归入其所属的大型湖泊。例如, 将丰水期连成一片的西台吉乃尔湖、雅湖和东台吉乃尔湖统一划为“台吉乃尔湖”, 因为东、西台吉乃尔湖枯水期时的面积都远大于雅湖, 故将三者组成的连续水体归为台吉乃尔湖; 又如, 将丰水期水体连成一片的布伦托海、加马呢格勒和死海子统一划为三者中枯水期面积远大于其他两者的“布伦托海”。

在提取最大水域范围的矢量边界数据及确定自然湖泊对象后, 进一步对研究对象确定湖泊名称。湖泊名称受历史、民间习俗等因素影响很大, 容易产生争议。本文首先以第二次全国湖泊调查数据和全国基础地理数据库为准, 若缺乏相关的记载, 则参考网络地图和各种文献资料予以确定。

### 3.2 研究结果与分析

基于 GSWD MWE 和其他辅助数据, 本研究生成了 1984 年—2018 年全国湖泊 ( $>1 \text{ km}^2$ ) 新编目, 共收录 3741 个最大水域面积大于  $1 \text{ km}^2$  的自然湖泊, 采用 WGS84 地理坐标系, 如图 3 (GS (2021) 8079 号) 所示。部分现有研究的数据已公开, 本文将在第 3.3 节讨论新编目与其他研究数据的差异及原因。

湖泊数量最多的湖区是青藏高原, 分布有 1324 个湖泊, 其后依次是东部平原 (665)、内蒙古高原 (609)、东北平原与山地 (554)、新疆地区 (535) 和云贵高原 (54)。本文采用适用于全球范围的 Mollweide 等面积投影估算湖泊面积, 结果显示, 湖泊总面积为  $93723 \text{ km}^2$ , 其中大型湖泊 ( $>1000 \text{ km}^2$ ) 有 13 个, 依次是青海湖 ( $4449.00 \text{ km}^2$ )、鄱阳湖 ( $3178.95 \text{ km}^2$ )、太湖 ( $2481.98 \text{ km}^2$ )、洞

庭湖 ( $2430.61 \text{ km}^2$ )、色林错 ( $2411.30 \text{ km}^2$ )、呼伦湖 ( $2303.34 \text{ km}^2$ )、察尔汗盐湖 ( $2087.51 \text{ km}^2$ )、纳木错 ( $2032.61 \text{ km}^2$ )、洪泽湖 ( $1753.50 \text{ km}^2$ )、艾比湖 ( $1116.85 \text{ km}^2$ )、博斯腾湖 ( $1042.04 \text{ km}^2$ )、阿雅克库木湖 ( $1035.28 \text{ km}^2$ ) 和扎日南木错 ( $1020.62 \text{ km}^2$ )。其中, 面积最大的咸水湖是青海湖, 面积最大的淡水湖是鄱阳湖。

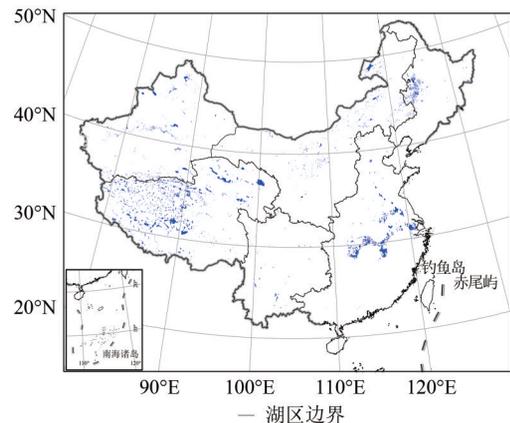


图3 1984年—2018年全国大于  $1 \text{ km}^2$  的湖泊新编目  
Fig. 3 The new inventory of China lakes ( $>1 \text{ km}^2$ ) with the maximum inundation area between 1984 and 2018

### 3.3 讨论

第二次全国湖泊调查综合采用了丰水、枯水期多时相的遥感影像, 制定了不同湖区的湖泊判译原则, 经湖泊专家委员会联合审核, 数据质量很高, 是本文的重要基础参照数据。本文编目的湖泊分布考虑历史水淹最大范围, 将研究时段从第二次全国湖泊调查的 2005 年—2006 年向前、后分别延长至 1984 年、2018 年, 将遥感观测从典型丰水、枯水期拓展至所有月份, 因此相比于第二次全国湖泊调查, 本研究得到的新编目数据多出 1048 个湖泊。

Zhang 等 (2019) 已将多个时相的全国湖泊面积数据对外公开发布, 而 Xie 等 (2018) 和 Tao 等 (2020) 尚未公开发布其数据。本文将 Zhang 等 (2019) 研究中各时相的提取湖泊结果组合, 发现其相对于本研究新编目未收录 888 个湖泊, 其空间位置与面积如图 4 (GS (2021) 8079 号) 所示。这些湖泊以小型湖泊居多, 其中面积最大的湖泊为  $76.07 \text{ km}^2$ , 位于新疆维吾尔自治区图木舒克市永安坝水库以南, 在 Google Earth 影像中可清晰辨别。面积大于  $10 \text{ km}^2$  的有 28 个, 其中多为季节性

与年际变化较大的湖泊,如普让查卡、易贡错等,造成这一偏差的原因可能是因为这些小型湖泊在选取的影像成像时间水体面积较小,由于本文生产编目数据时使用了全部可用的 Landsat 影像,因此在最大程度上避免了这一现象。地形图的生产目的不是专用于湖泊研究,测图时不一定是湖泊的丰水期,所以 1960 年代丰水期面积超过  $1 \text{ km}^2$  的小型湖泊可能已被遗漏。

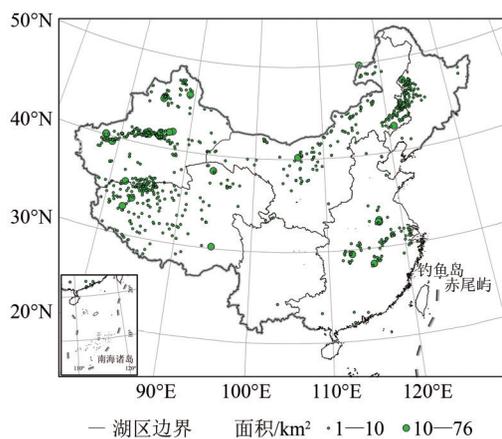


图4 新编目相较于Zhang等(2019)新收录的湖泊  
Fig. 4 Map of lakes not included in the dataset by Zhang et al. (2019) comparing to the new inventory

相对于Zhang等(2019)的研究,本文未收录的水体有919个,其空间位置与面积如图5(GS(2021)8079号)所示。叠加Google Earth影像进行核查,多数为水库(人工湖泊),其中面积较大且名称可考证的包括东江水库、小海子水库和红枫水库等。这些水库的大坝长度往往较短,从Zhang等(2019)用作参考数据的Landsat影像中难以清晰辨认,这也使其形态学特征与自然湖泊接近,因此容易导致误提。如本文3.1节所述,湿地、水田是容易被误判为湖泊的水体,而Zhang等(2019)用作参考影像的Landsat影像往往难以清晰反映这些水体的纹理特征,因此其数据集中误收录了这些水体。对于几何形状非常规整且人工围堰完整环绕的湖泊,本文将判为人工湖,而Zhang等(2019)保留了此类水体。一些与上下游河道的宽度差别较小的河道型湖泊,如位于浚河下游的香涧湖,本文未将其收录。此外,小型湖泊的面积对像元个数非常敏感,易造成其最大水体面积低于  $1 \text{ km}^2$  而未被收录,这也是造成两者之间湖泊数目差异的原因。

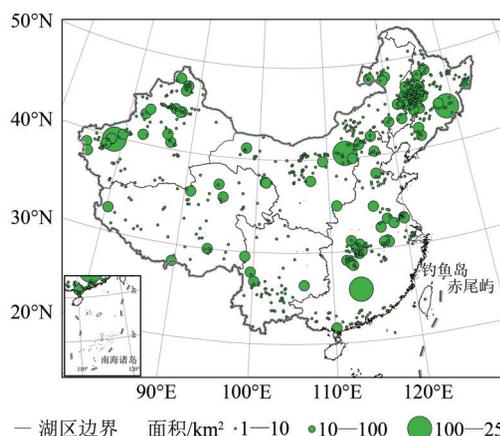


图5 新编目相较于Zhang等(2019)未收录的水体  
Fig. 5 Map of water bodies not included in this inventory, comparing to Zhang et al. (2019)

## 4 基于新编目的全国湖泊面积变化分析

### 4.1 研究数据与方法

丰/枯水期的湖泊面积无法反映整个时段的湖泊面积,而简单的多时相平均也不足够客观刻画湖区内时而被水淹没、时而裸露的变化特征。因此,本研究引入新的湖泊面积遥感监测方法:湖泊概率等效面积,即水体出现频率乘水淹范围,它是在对像元的所有观测中监测到被水淹的频率的累计。某一像元在某一时段的水淹频率可由下式计算:

$$WO = \frac{WDC}{VOC} \quad (1)$$

式中,WO (Water Occurrence) 表示观测到水体的频次(下文简称“水淹频率”);WDC (Water Detection Count) 表示该像元在对应时段水体出现的频次;VOC (Valid Observation Count) 表示对该像元在对应时段进行有效观测的次数。本文使用的GSWD MWH数据中,若像元值为0,表示“没有观测”,若像元值为1,表示“有观测,但未观测到水体”,若像元值为2,表示“有观测,且观测到水体”,计算不同时段下的像元值为1和像元值为2的出现次数,即可分别求得VOC和WDC。

基于组成湖泊水体的各个像元的水淹频率,湖泊在某一时段的概率等效面积可由下式计算:

$$PEA = \sum_{i=1}^n WO \times PA \quad (2)$$

式中,PEA (Probability Equivalent Area) 表示湖泊

的概率等效面积, 它是某一时段落在湖泊多年累积水域范围内的所有像元水淹频率与像元面积的乘积的总和。式中  $WO$  即利用式 (1) 计算得到的像元在对应时段的水淹频率。PA (Pixel Area) 代表各个像元的面积。将落在湖泊最大水域范围内所有像元的水淹频率与其面积相乘并求和, 得到各湖泊的在某一时段的概率等效面积。

选择不同时段逐个湖泊统计其概率等效面积, 进而分析中国湖泊在过去 30 年期间水域面积变化特征。1999 年之前可获取 Landsat TM 影像数量较少, 因此 1999 年之前的时段划分为 1989 年—1993 年及 1994 年—1998 年; 1999 年以后, 由于 Landsat 7 ETM+ 和 Landsat 8 OLI 影像数据的加入, 湖泊被观测的总次数显著增加, 因此将分析时段间隔缩短为 2 a。

本文提出的稳健量化湖泊面积多年变化的方法, 即概率等效面积, 它以单个像元为最小计算单位、新编目中各湖泊最大水域范围为空间约束, 利用了整个时段的全部可用影像, 因而能够提供对湖泊面积因年内及年际动态变化更综合的认知。

在获取分段湖泊概率等效面积数据的基础上, 将各时段时间轴中点时刻作为自变量, 湖泊面积作为因变量, 线性拟合湖泊面积时间序列, 其斜率用于指示湖泊面积的变化速率特征。常用的最小二乘法拟合容易受离群值影响, 稳健回归则对离群值的敏感性低 (Liu 等, 2001), 因此本文选用稳健回归拟合湖泊面积变化。

## 4.2 研究结果与分析

基于新编目数据, 计算了 1989 年—2018 年间各湖泊的概率等效面积, 时间分辨率为 2—5 a, 将全国湖泊的概率等效面积求和, 经比较发现, 全国湖泊总概率等效面积 (以下简称总面积) 最大 (Max) 时达到了 76704.85 km<sup>2</sup>, 最小 (Min) 为 67700.63 km<sup>2</sup>。各湖区湖泊总面积从高到低排序, 依次是青藏高原 (Max=45341.99 km<sup>2</sup>, Min=35913.38 km<sup>2</sup>)、东部平原 (Max=18162.69 km<sup>2</sup>, Min=15809.54 km<sup>2</sup>)、新疆维吾尔自治区 (Max=7901.79 km<sup>2</sup>, Min=5669.18 km<sup>2</sup>)、内蒙古高原 (Max=4962.06 km<sup>2</sup>, Min=3625.35 km<sup>2</sup>)、东北平原与山地 (Max=2686.67 km<sup>2</sup>, Min=1775.06 km<sup>2</sup>) 和云贵高原 (Max=1152.50 km<sup>2</sup>, Min=1098.41 km<sup>2</sup>)。

1989 年—1993 年, 全国大于 1 km<sup>2</sup> 湖泊的总面

积约为 68846.32 km<sup>2</sup>, 2017 年—2018 年, 增长至 76704.85 km<sup>2</sup>, 30 a 约增长 7858.53 km<sup>2</sup> (11.41%), 增长幅度相当于 1.79 个青海湖最大水域面积。青藏高原和新疆维吾尔自治区湖区的湖泊总面积增长, 增长幅度分别为 8766.23 km<sup>2</sup> 和 2232.60 km<sup>2</sup>, 各占全国增长的 111.55% 和 28.41%。其他 4 个湖区的湖泊总面积均呈不同程度减小趋势, 按幅度从低到高排序, 分别是云贵高原 (-6.12 km<sup>2</sup>, 0.54%)、东北平原与山地 (-476.00 km<sup>2</sup>, 6.06%)、内蒙古高原 (-730.73 km<sup>2</sup>, 9.30%) 和东部平原 (-1927.45 km<sup>2</sup>, 24.53%)。由此可知, 全国湖泊总面积变化由青藏高原湖区主导, 湖泊总面积减少幅度最大的东部平原湖区, 其湖泊总面积减少量基本抵消新疆维吾尔自治区湖区湖泊总面积增长量。

全国湖泊总面积的年增长率为 322.67 km<sup>2</sup>/a, 增长趋势显著。除东北平原与山地湖区以外, 各湖区湖泊总面积变化趋势均通过统计显著性检验 ( $p < 0.05$ ); 青藏高原 (增长率为 374.21 km<sup>2</sup>/a) 和新疆 (63.02 km<sup>2</sup>/a) 呈显著增长趋势, 云贵高原 (-1.67 km<sup>2</sup>/a)、内蒙古高原 (-37.02 km<sup>2</sup>/a) 和东部平原 (-76.52 km<sup>2</sup>/a) 呈显著减小趋势, 东北平原与山地湖泊总面积波动明显, 减小趋势不显著 (-15.56 km<sup>2</sup>/a,  $p = 0.22$ ), 在 2000 年—2010 年期间湖泊水域范围处于相对萎缩阶段。图 6 (a) — (g) 展示了全国及各湖区的湖泊面积变化趋势, 变化趋势不显著的, 其拟合直线为虚线, 反之, 则为实线。全国 3741 个湖泊中, 共 1815 个湖泊的概率等效面积的具有显著的变化趋势 ( $p < 0.05$ ), 图 7 (GS (2021) 8079 号) 展示了全国湖泊稳健回归后的年度变化趋势, 图 7 (a) 为显著, 图 7 (b) 为不显著, 单位为 km<sup>2</sup>/a。青藏高原湖区的多数湖泊都经历了显著的面积扩大, 而东部平原湖区的多数湖泊都发生了显著的面积减小。

## 4.3 讨论

如表 2 所示, Xie 等 (2018) 和 Tao 等 (2020) 将内蒙古高原和新疆维吾尔自治区湖区划为一个湖区 (蒙新湖区), 而 Zhang 等 (2019) 将这两个湖区独立。为便于与已有研究对比, 本文考虑了上述两种情况, 如图 6 (h) 所示。结果表明, 若将这两个湖区归为一个湖区, 则变化趋势并不显著, 反之, 则具有截然相反且显著的变化趋势。建议在以后的研究中, 有必要将这两个湖区分别讨论。

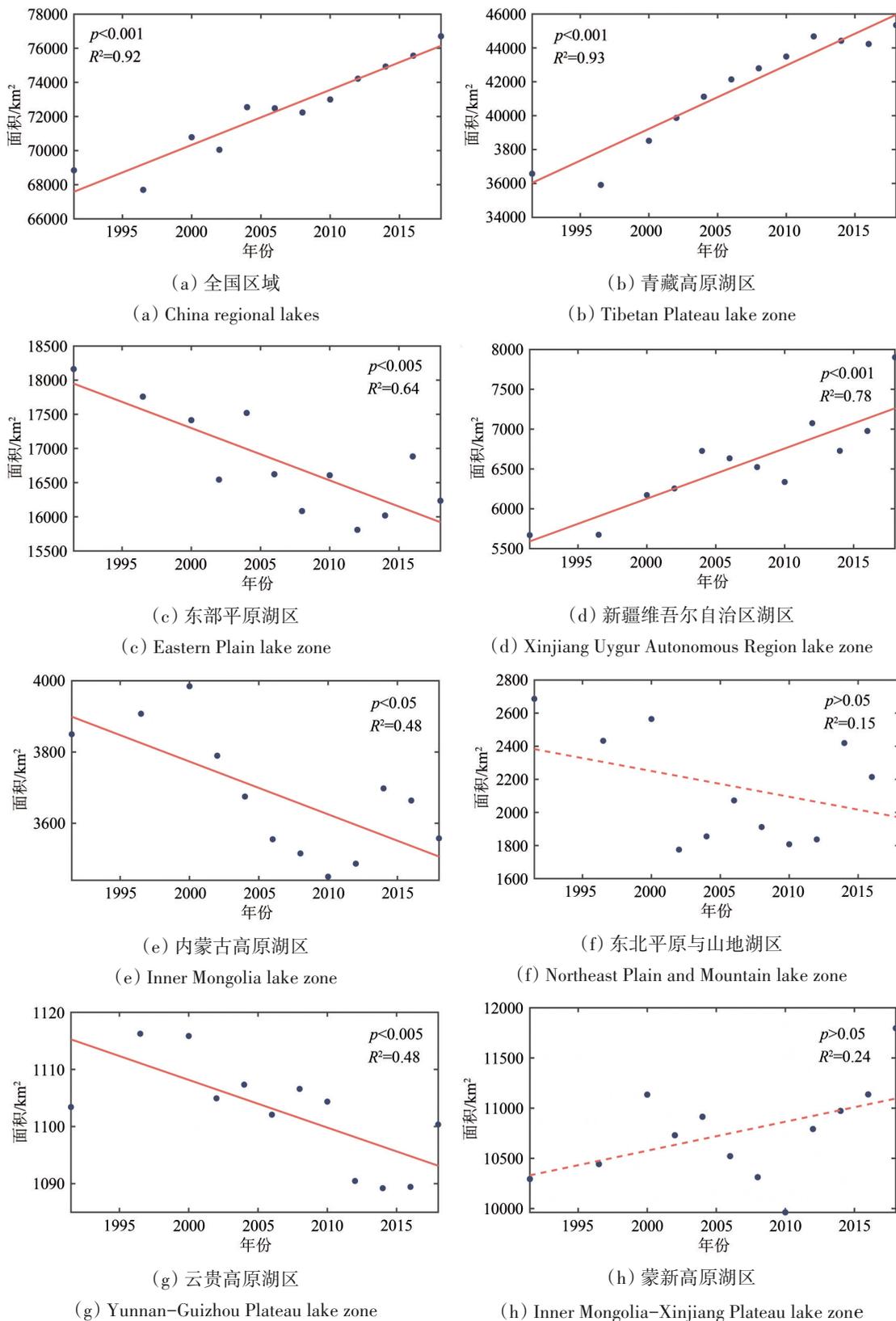


图6 过去30 a来(1989年—2018年)全国及各湖区湖泊总面积变化趋势

Fig. 6 The total lake area trend of China and each lake zone in the past 30 years (1989—2018)

本文计算的是代表一个时段的湖泊概率等效面积，而 Xie 等 (2018)、Tao 等 (2020)、Zhang

等 (2019) 都是从年内某一时期获取的影像解译湖泊面积，得到的变化趋势有少量差异。然而，

青藏高原的湖泊面积的显著上升得出一致的结论。东部平原湖区作为中国人口分布最密集、经济发展水平最高的地区, 本文得到的概率等效面积变化趋势和 Xie 等 (2018)、Tao 等 (2020) 得到的丰

水期面积变化趋势一致, 皆为显著下降。这两个湖泊分布面积最大、数量最多的湖区, 在过去近 30 a 发生显著变化趋势, 说明中国湖泊生态环境保护面临形势仍然严峻。

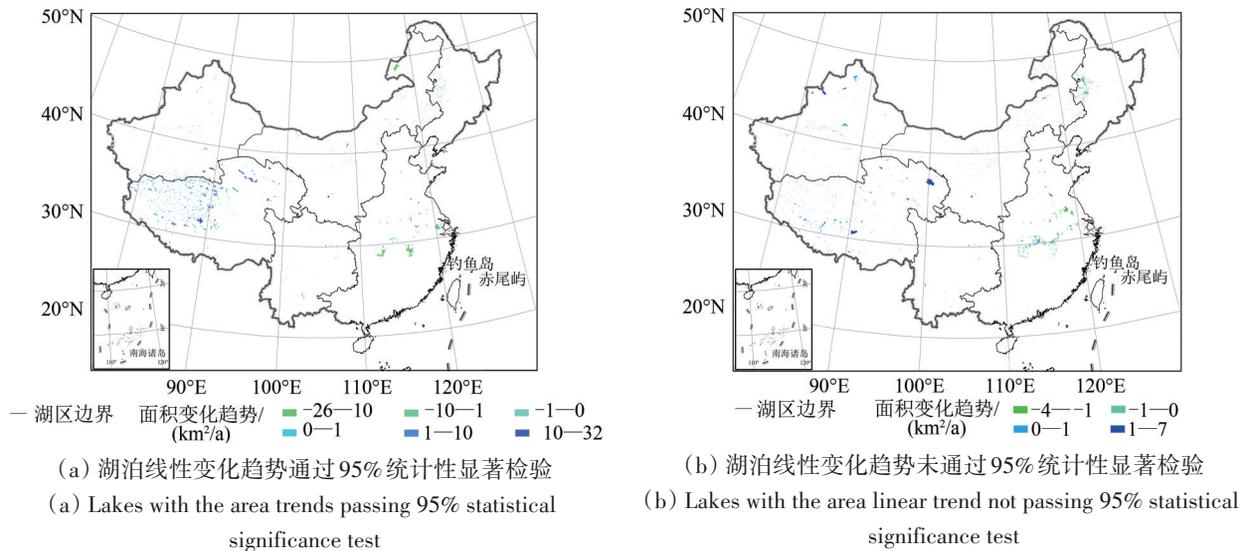


图7 过去 30 a 来 (1989 年—2018 年) 全国湖泊面积变化趋势 ( $\text{km}^2/\text{a}$ )

Fig. 7 The lake area trend ( $\text{km}^2/\text{a}$ ) of lakes in China over the past 30 years (1989—2018)

## 5 结论

湖泊是重要的生产生活用水来源, 在水循环和维系生态安全扮演着重要作用。然而, 中国湖泊水域面积与水量分布的空间差异悬殊, 且这种差异存在增强趋势。中国第一次全国湖泊调查于 1960s—1980s 基于实地调查, 第二次全国湖泊调查主要基于 2005 年—2006 年的遥感影像, 分别是全国尺度的湖泊实地调查和遥感监测的开创性工作。遥感数据源和湖泊提取手段的不断发展, 许多学者从不同角度开展全国尺度湖泊变化遥感监测。结果表明, 全国湖泊主要分布在青藏高原和东部平原湖区, 20 世纪 60 年代、70 年代至 21 世纪 10 年代面积大体呈上升趋势。然而, 由于人工判读、湖泊类型判别依据和遥感数据源时相等的不同, 湖泊面积估算结果存在一定的差异, 仅对于青藏高原湖区的湖泊面积变化达成共识。

本文生产了 1980s—2010s 的全中国湖泊编目数据, 以其作为该时段内湖泊判定的时空一致性的参照依据, 可减少湖泊不年内与年际变化造成的人工判读与湖泊区分标准的差异。该数据基于 GSWD 生产, 完整利用了该时段内的 Landsat 影像

数据集, 避免了遥感数据源不同时相差异。以高分辨率、长时序的 Google Earth 历史影像为参考, 辅以基础地理数据、众源网络电子地图、文献记录和网络资料, 将自然湖泊与河流、人工湖泊 (水库)、水田等易混分类水体区分。此外, 参照众源资料, 中国湖泊的名称做到了应赋尽赋, 扩大了数据集的泛用性。本文初次提出了可体现湖泊面积年内与年际变化情况的监测指标——概率等效面积, 基于全国湖泊编目数据与 GSWD 估算了全国及各湖区湖泊面积的变化特征。

结果表明, 全国共有  $1 \text{ km}^2$  以上湖泊 3741 个, 总面积约  $93723.00 \text{ km}^2$ , 大型湖泊 ( $>1000 \text{ km}^2$ ) 13 个, 数量上约 35.09% 的湖泊分布在人口稀疏的青藏高原湖区, 其次约 17.89% 分布在人口密集的东部平原地区, 呈现出明显的不平衡特点。全国的湖泊面积总体呈上升趋势, 青藏高原湖区的湖泊面积超过了全国一半, 且仍在快速增长, 新疆湖区的湖泊面积也在逐渐增长, 而东部平原、云贵高原和内蒙古高原的湖泊面积不同程度减小, 表明中国湖泊水资源的时空分布不平衡状况仍在加剧, 中国湖泊生态环境保护行动任重道远。

## 参考文献 (References)

- Cai Y, Ke C Q, Yao G H and Shen X Y. 2020. MODIS-observed variations of lake ice phenology in Xinjiang, China. *Climatic Change*, 158(3/4): 575-592 [DOI: 10.1007/s10584-019-02623-2]
- Duan H T, Ma R H, Xu X F, Kong F X, Zhang S X, Kong W J, Hao J Y and Shang L L. 2009. Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu. *Environmental Science and Technology*, 43(10): 3522-3528 [DOI: 10.1021/es8031852]
- Feng L, Hu C M, Chen X L, Cai X B, Tian L Q and Gan W X. 2012. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010. *Remote Sensing of Environment*, 121: 80-92 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.01.014]
- Feng S L, Liu S G, Huang Z H, Jing L, Zhao M F, Peng X, Yan W D, Wu Y P, Lv Y H, Smith A R, McDonald M A, Patil S D, Sarkissian A J, Shi Z H, Xia J and Ogbodo U S. 2019. Inland water bodies in China: Features discovered in the long-term satellite data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(51): 25491-25496 [DOI: 10.1073/pnas.1910872116]
- Huang S F, Li J G and Xu M. 2012. Water surface variations monitoring and flood hazard analysis in Dongting Lake area using long-term Terra/MODIS data time series. *Natural Hazards*, 62(1): 93-100 [DOI: 10.1007/s11069-011-9921-6]
- Jiang G J, Ma R H, Loisel S A and Duan H T. 2012. Optical approaches to examining the dynamics of dissolved organic carbon in optically complex inland waters. *Environmental Research Letters*, 7(3): 034014 [DOI: 10.1088/1748-9326/7/3/034014]
- Jiang L G, Nielsen K, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2017. Monitoring recent lake level variations on the Tibetan Plateau using CryoSat-2 SARIn mode data. *Journal of Hydrology*, 544: 109-124 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.024]
- Li J L and Sheng Y W. 2012. An automated scheme for glacial lake dynamics mapping using Landsat imagery and digital elevation models: a case study in the Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*, 33(16): 5194-5213 [DOI: 10.1080/01431161.2012.657370]
- 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 J N, Yao Y B and Shi C. 2001. Theoretic research on robustified least squares estimator based on equivalent variance-covariance. *Geo-Spatial Information Science*, 4(4): 1-8 [DOI: 10.1007/BF02826571]
- 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): 283-9 [DOI: 10.1007/s11430-010-4052-6]
- 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]
- Pekel J F, Cottam A, Gorelick N and Belward A S. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633): 418-422 [DOI: 10.1038/nature20584]
- Shi K, Zhang Y L, Song K S, Liu M L, Zhou Y Q, Zhang Y B, Li Y, Zhu G W and Qin B Q. 2019a. A semi-analytical approach for remote sensing of trophic state in inland waters: Bio-optical mechanism and application. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111349 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111349]
- Shi K, Zhang Y L, Zhang Y B, Li N, Qin B Q, Zhu G W and Zhou Y Q. 2019b. Phenology of phytoplankton blooms in a trophic lake observed from long-term MODIS data. *Environmental Science and Technology*, 53(5): 2324-2331 [DOI: 10.1021/acs.est.8b06887]
- Song C Q, Huang B and Ke L H. 2013. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 135: 25-35 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.013]
- Song C Q, Huang B, Ke L H and Richards K S. 2014. Seasonal and abrupt changes in the water level of closed lakes on the Tibetan Plateau and implications for climate impacts. *Journal of Hydrology*, 514(1): 131-144
- Song C Q, Zhan P F and Ma R H. 2020. Progress in remote sensing study on lake hydrologic regime. *Journal of Lake Sciences*, 32(5): 1406-1420 (宋春桥, 詹鹏飞, 马荣华. 2020. 湖泊水情遥感研究进展. *湖泊科学*, 32(5): 1406-1420) [DOI: 10.18307/2020.0514]
- Song K S, Wen Z D, Shang Y X, Yang H, Lyu L L, Liu G, Fang C, Du J and Zhao Y. 2018. Quantification of dissolved organic carbon (DOC) storage in lakes and reservoirs of mainland China. *Journal of Environmental Management*, 217: 391-402 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.03.121]
- Tao S L, Fang J Y, Ma S H, Cai Q, Xiong X Y, Tian D, Zhao X, Fang L Q, Zhang H, Zhu J L and Zhao S Q. 2020. Changes in China's lakes: climate and human impacts. *National Science Review*, 7(1): 132-140 [DOI: 10.1093/nsr/nwz103]
- Wang S L, Li J S, Zhang B, Spyros E, Tyler A N, Shen Q, Zhang F, Kuster T, Lehmann M K, Wu Y H and Peng D L. 2018. Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index. *Remote Sensing of Environment*, 217: 444-460 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.026]
- Wang S M and Dou H S. 1998. *Chinese Lake Catalogue*. Beijing: Science Press (王苏民, 窦鸿身. 1998. *中国湖泊志*. 北京: 科学出版社)
- Wang Y, Feng L, Liu J G, Hou X J and Chen D L. 2020. Changes of inundation area and water turbidity of Tonle Sap Lake: responses to climate changes or upstream dam construction? *Environmental Research Letters*, 15(9): 0940a1 [DOI: 10.1088/1748-9326/abac79]
- Wu F C, Meng W, Song Y H, Liu Z T, Jin X C, Zheng B H, Wang Y Y, Wang S R, Jiang X, Lu S Y, Chu Z S, Chen Y Q, Wang C, Hua Z L, Wang P F, Yu Z Q and Fu J M. 2008. Research progress in lake water quality criteria in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28(12): 2385-2393 (吴丰昌, 孟伟, 宋永会, 刘征涛, 金相灿, 郑丙辉, 王业耀, 王圣瑞, 姜霞, 卢少勇, 储昭升, 陈艳卿, 王超, 华祖林, 王沛芳, 于志强, 傅家谟. 2008. 中国湖泊水环境基准的研究

- 进展. 环境科学学报, 28(12): 2385-2393 [DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2008.12.016]
- Wu Y H, Li M R, Guo L N, Zheng H X and Zhang H Y. 2019. Investigating water variation of lakes in Tibetan Plateau using remote sensed data over the past 20 years. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7): 2557-2564 [DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2898259]
- Xie C, Huang X and Li J Y. 2018. Assessing China's lake changes and associated driving forces during 1985-2015. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 84(10): 657-666 [DOI: 10.14358/PERS.84.10.657]
- Yang G S, Ma R H, Zhang L, Jiang J H, Yao S C, Zhang M and Zeng H A. 2010. Lake status, major problems and protection strategy in China. *Journal of Lake Sciences*, 22(6): 799-810 (杨桂山, 马荣华, 张路, 姜加虎, 姚书春, 张民, 曾海鳌. 2010. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. *湖泊科学*, 22(6): 799-810)
- Zhang G Q, Yao T D, Chen W F, Zheng G X, Shum C K, Yang K, Piao S L, Sheng Y W, Yi S, Li J L, O'Reilly C M, Qi S H, Shen S S P, Zhang H B and Jia Y Y. 2019. Regional differences of lake evolution across China during 1960s—2015 and its natural and anthropogenic causes. *Remote Sensing of Environment*, 221: 386-404 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.038]
- Zhou Q, Wang J R, Tian L Q, Feng L, Li J and Xing Q G. 2021. Remotely sensed water turbidity dynamics and its potential driving factors in Wuhan, an urbanizing city of China. *Journal of Hydrology*, 593: 125893 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125893]

## Spatial distribution and dynamics of lakes in China: Progress in remote sensing monitoring at national scale and new inventory of the maximum lake extent and change trajectory

ZHANG Wensong<sup>1,2</sup>, SONG Chunqiao<sup>1</sup>

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

2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

**Abstract:** Lakes play an important role in supplying water resources and sustaining human living. The broad geographical extent and complex environment of China result in the different changing patterns and complicated driving factors of lakes. The two-epoch national lake surveys provide the groundbreaking knowledge of lake distribution and change characteristics in China. Thus, an increasing number of researchers have conducted the national-scale remote sensing monitoring of lake changes with the rapid development of satellite techniques in recent years. However, evident discrepancies exist in the results and conclusions among these prior studies due to differences in level of manual quality control, lake mapping method, and the acquisition time (year and month) of used remote sensing images. Thus, comprehensively investigating their differences and causes and producing an updated lake inventory are required.

We reviewed and compared the data sources, methods, and results of the existing works on national-scale remotely sensed lake changes and analyzed the causes of such differences. We also produced a new national lake inventory by interpreting the maximum water inundation area (1980—2010), which can minimize the differences of manual interpretation and lake mapping in different time periods. With the spatial constrain of maximum water extent for each lake from the new inventory, this study developed a novel approach, namely, the Probability Equivalent Area method, to detect the long-term change trajectory of China's lakes during 1980—2010.

A total of 3741 lakes in China had a maximum area exceeding 1 km<sup>2</sup> in the past 30 years. The Qinghai-Tibet Plateau lake zone accounted for approximately one-third in count and half in area of the inventoried lakes in China. The total area of China's lakes showed an overall upward trend, but it had strong spatial heterogeneity. The Qinghai-Tibet Plateau and Xinjiang lake zones significantly increased lake areas, while the Eastern Plain, Inner Mongolia Plateau, and Yunnan-Guizhou Plateau lake zones significantly decreased lake areas. The area changes in the Northeast Plain and Mountain lake zone were statistically insignificant.

This study suggested that the main causes of different results in previous remote sensing research of China's lakes include inconsistent timing of satellite imagery, the manual interpretation standards for lakes and reservoirs, and quality assurance procedures. To produce a more accurate estimation of lake area, a new inventory dataset, which minimized interpretation differences and provided a unified spatiotemporal constraint, was proposed on the basis of our findings. A statistics-based method named the Probability Equivalent Area, which eliminated differences in satellite imagery selection, was also proposed. The lake area changing patterns and distribution of lake water resources in different lake zones are obviously imbalanced in China. China's sparsely populated areas are generally experiencing a dramatic increase in lake area. However, the densely populated areas are experiencing a significant decline in lake area. This situation may further increase the imbalance of water resources per capita in China. Effective measures should be taken to slow down this trajectory.

**Key words:** lake remote sensing, water area, remote sensing monitoring, China, national scale, global change

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 41971403, 41801321); National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFA0607101, 2018YFD0900804, 2018YFD1100101)