#### DOI: 10.5846/stxb202101150156

王伟,阿里木·赛买提,马龙,葛拥晓,吉力力·阿不都外力.1986—2019 年新疆湖泊变化时空特征及趋势分析.生态学报,2022,42(4):1300-1314. Wang W, Samat Alim, Ma L, Ge Y X, Abuduwaili Jilili. Spatio-temporal variations and trend analysis of lake area in Xinjiang in 1986—2019. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4):1300-1314.

## 1986—2019年新疆湖泊变化时空特征及趋势分析

王 伟 $^{1,2,3}$ , 阿里木・赛买提 $^{1,2,3}$ , 马 龙 $^{1,2,3}$ , 葛拥皖 $^{1,2}$ , 吉力力・阿不都外力 $^{1,2,3,*}$ 

- 1 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室,乌鲁木齐 830011
- 2 中国科学院中亚生态与环境研究中心,乌鲁木齐 830011
- 3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:干旱区湖泊是区域水资源系统的重要组成部分,不仅在维系区域生态系统平衡上发挥重要支撑作用,而且也对区域气候变化和人类活动具有重要的指示意义。基于 Google Earth Engine (GEE) 遥感云计算平台,以 Landsat 5/7/8 卫星遥感影像为主要数据源,分析了 1986—2019 年新疆维吾尔自治区湖泊数量以及面积变化的时空特征,并从气候要素变化、人类活动干扰等方面初步探讨了新疆湖泊变化的主要原因。结果表明:1986—2019 年间,气温升高使得冰川积雪融水增加,新疆湖泊整体上呈现出扩张趋势。然而受人类活动的干扰程度以及地形海拔等因素,这种趋势存在显著的空间差异。全球变暖背景下,由于受到丰富稳定的雪冰融水的补给,受人为干扰较小的青藏高原北部地区湖泊呈现显著扩张。相反由于环天山地区强烈的人类活动以及冰川加速退缩影响,该区域湖泊面积持续高位波动状态。

关键词:湖泊;新疆;水体识别;Google Earth Engine;时间序列分析

# Spatio-temporal variations and trend analysis of lake area in Xinjiang in 1986—2019

WANG Wei<sup>1,2,3</sup>, SAMAT Alim<sup>1,2,3</sup>, MA Long<sup>1,2,3</sup>, GE Yongxiao<sup>1,2</sup>, ABUDUWAILI Jilili<sup>1,2,3,\*</sup>

- 1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China
- 2 Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China
- ${\it 3\ University\ of\ Chinese\ Academy\ of\ Sciences\ ,\ Beijing\ 100049\ ,\ China}$

Abstract: Lake is one of the important surface water resources in arid regions. They not only play an important role in maintaining the regional ecosystem balance, but also as a sensitive indicator of climate and environmental changes. Mapping and monitoring the lake area changes are essential to formulate the regulation policy on local water resources utilization. According to the second National Lake Survey (2007—2011), there are 108 lakes (more than 1km²) in Xinjiang Uygur Autonomous Region. Compared with the first National Lake Survey (1960s—1980s), there are 62 Lakes (more than 1km²) disappeared in Xinjiang, which accounting for 87% of the total area of disappeared lakes in China. Disappeared lakes are the main sources of saline dust storm which become a serious threat to regional ecological security and human health. Spectral indices method was mostly conceived for water body identification on imagery from medium resolution, broad-band multispectral sensors like Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), SPOT-5, etc. Thus, this study proposed a water body extraction method based on dynamic threshold of multiple remote sensing spectral indices. Based on the remote sensing cloud computing platform-Google Earth Engine (GEE), this study has analyzed the spatio-temporal characteristics of the lake numbers and areas in Xinjiang from 1986 to 2019 based on Landsat images. The main

基金项目: 国家自然科学基金(U1903115, 42071424); 中国科学院青年创新促进会项目(2018476)

收稿日期:2021-01-15; 网络出版日期:2021-11-04

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jilil@ ms.xjb.ac.cn

reasons for the lake changes were preliminarily discussed in aspects such as climate change and human activities. The results were as follows: 1) The water body extraction method based on multiple spectral indices proposed in this study has a better identification result in different types of lakes in arid region. 2) The number of lakes in Xinjiang (more than  $0.5 \text{km}^2$ ) has been increasing overall since 1986. Especially in the past 10 years, the lake number has shown a sharp increase, mainly in the area around Tianshan Mountains. And in the northern part of the Qinghai-Tibet Plateau, the number of lakes (less than  $5 \text{km}^2$ ) has increased significantly. 3) During the study period, the area of main lakes (more than  $10 \text{km}^2$ ) showed a significant expansion trend, and lakes with significant expansion were mainly concentrated in the northern part of the Qinghai-Tibet Plateau. Ayakum Lake had the most significant expansion trend (+16.52km²/a., P<0.01) in the study area. However, lakes around Tianshan Mountains have a frequent inter-annual fluctuation in recent years. 4) Under the background of global warming, plateau lakes continued to expand steadily after 1997 due to the supply of abundant snow and ice melt water and minor human disturbances. On the contrary, the lakes around the Tianshan Mountain were simultaneously affected by accelerated retreat of glaciers and human activities. Therefore, the lakes have been fluctuating violently in recent years.

Key Words: lake; Xinjiang; water body extraction; Google Earth Engine; time series analysis

全球气候变化背景下,西北干旱区从 20 世纪 80 年代以来,年平均气温出现"突变型"升高(0.517℃/10年),尤其是冬季气温升高,雪冰消融加快,河湖流域内潜在蒸散显著增加<sup>[1]</sup>。同时由于流域内规模化农业开发及人口压力的增加,使得西北干旱区水资源的供需矛盾存在较大不确定性<sup>[2]</sup>。根据全国第二次湖泊调查(2007—2011)的数据,新疆维吾尔自治区共有面积大于 1km²湖泊 108 个,总面积 6236.4km²。相比于全国第一次湖泊调查(20 世纪 60—80 年代),新疆消失湖泊(大于 1km²)数量达 62 个,总面积共计 6952.8km²,占全国消失湖泊总面积的 87%<sup>[3]</sup>。湖泊消失或萎缩不仅导致周边绿洲湿地沙化,同时裸露的干涸湖底沉积物成为风力侵蚀和搬运的源,造成盐碱尘暴频发,对流域内生产生活和居民健康构成严重威胁<sup>[4]</sup>。因此开展长时间序列的新疆湖泊时空变化研究,对干旱区湖泊预警、水资源管理及可持续发展等有着重要现实意义。

随着 20 世纪 50 年代以来新疆绿洲农业的发展,大量水库、灌溉水渠等水利工程开始修建<sup>[5]</sup>,截止至 2016 年 12 月,全疆共有水库 538 座,其中大型水库 21 座<sup>[6]</sup>。实际上干旱区许多天然湖泊也承担着农业灌溉、防洪调蓄、水源保障等功能,因此天然湖泊和水库(人工湖泊)难以从影像、命名、功能等方面加以区分。这些天然和人工湖泊的变化不仅受区域气候变化影响,更容易受到灌溉引水等人类活动的影响。受新疆"绿洲经济,灌溉农业"经济结构制约,农业灌溉对地表水资源的过渡消耗逐渐成为制约全疆经济社会跨越式发展的主要矛盾<sup>[7]</sup>。因此深刻剖析过去几十年新疆湖泊的时空变化特征,可为开展全疆水资源统筹调配和合理开发利用,实现经济社会可持续发展提供科学依据。

随着可获取的卫星遥感数据量的增加,利用遥感技术进行水体识别是目前最常用的湖泊面积变化监测方法<sup>[8-9]</sup>。Landsat 系列数据由于其空间分辨率高(30m),时间序列长(1972 年起运行)而被广泛应用于水体识别,土地覆盖分类等研究<sup>[10-11]</sup>。Pekel 等<sup>[12]</sup>基于 Landsat 遥感数据,依托专家系统方法和 GEE 平台探讨了1984—2015 年全球地表水体面积变化特征,但是专家系统的构建、测试、验证过程复杂且费时费力,另外水体识别结果在一定程度上受到监督样本影响。与此同时,近些年基于机器学习的图像识别方法广泛应用于水体提取研究中<sup>[13]</sup>,但是这些方法结果精度高度依赖训练样本的选择。光谱指数法作为传统的非监督分类方法,由于该方法无须选择样本,只需依靠简单的数学运算就可以快速提取水体信息,因此多用于 Landsat、SPOT、Sentinel 系列卫星遥感数据的水体识别研究中<sup>[14]</sup>。张飞等<sup>[15]</sup>基于 1998—2013 年 5 期 Landsat 数据,利用归一化水体指数(NDWI)和修正归一化水体指数(MNDWI)提取艾比湖水体面积,探讨了近年来艾比湖湖面的动态变化特征及其驱动机制。Jing等<sup>[16]</sup>基于 MODIS 数据,利用混合水体指数(CWI)探讨了 2005—2015 年新疆湖泊面积年际与季节变化特征。Yan 等<sup>[17]</sup>基于 Landsat 数据,综合 NDWI 和归一化雪被指数(NDSI)来区分青

藏高原湖泊水体和雪盖/冰川。但是由于水体识别同时受水质、水深等自身因素以及山地阴影等外界因素干扰,水体识别方法的普适性有待提高[18]。

新疆维吾尔自治区地处西北内陆腹地,地形地貌复杂,湖泊类型多样,不同类型水体光谱反射特性差异显著。再加上山地阴影、冰川积雪、植被等因素干扰,基于单一光谱指数的水体识别存在较大误差,难适用于整个区域。由于不同光谱指数所增强的地物信息不同,因此构建基于多种光谱指数的水体识别方法,使其有效抑制非水体地物信息,提高水体信息的识别精度。本文基于遥感云计算平台 GEE 开发了基于多种光谱指数的动态阈值水体识别方法,借助于 GEE 平台海量的遥感影像数据集和强大的云计算能力对 1986—2019 年新疆湖泊面积变化遥感监测,探讨了湖泊数量面积的时空变化特征及空间差异特征,初步定性分析新疆湖泊面积变化的主要原因,旨在为气候变化和人类活动下水资源开发利用与保护提供科学依据。

## 1 研究区域及数据

## 1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区位于中国西北内陆(34°22′—49°33′N,73°22′—96°21′E),是中国陆地面积最大的省级行政区(图1)。由于深居中纬度欧亚大陆中心,来自海洋的湿润水汽难以到达,年均降水量不足200mm,且空间分布不均<sup>[19]</sup>。同时境内分布着全国面积最大的盆地—塔里木盆地,以及众多的山系,北有阿尔泰山系,南有昆仑山系,中有横亘全境的天山山系。高大而绵长的山脉拦截了西风环流带来的水汽,成为干旱区的"湿岛",在加上区内复杂的地形地貌条件,使得区域内湖泊类型多样,平原、山地、高原等不同地貌类型均有湖泊分布,如博斯腾湖、乌伦古湖、赛里木湖、阿雅克库木湖等<sup>[20]</sup>。流域作为封闭的地形单元,往往具有相似的气候环境和下垫面条件,流域内的任何变化都会直接快速的通过河流反馈到湖泊。本研究基于中国1:25万二级流域分级数据集(http://www.geodata.cn),将研究区划分为11个主要流域分区(图1),以探讨不同流域内湖泊面积的变化特征。

## 1.2 主要数据来源

GEE 平台包含 Landsat 数据集在内的总量超过 20Pb 的历史卫星影像数据集和地理空间数据<sup>[21]</sup>。Landsat 系列卫星是目前全球连续运行时间最长的地球观测计划(Landsat-1 1972 年 7 月 23 日发射),同时也是应用最广泛的卫星遥感数据。因此本研究以 GEE 平台上 Landsat 系列多光谱遥感卫星影像为主要数据来源。鉴于研究区范围较大,单一年份需要对至少 113 景原始卫星影像进行镶嵌拼接才能覆盖整个研究区。综合考虑数据质量、数量以及连续性等因素,本研究决定采用 1986—2019 年的 Landsat 5、7、8 的大气层顶(TOA)反射率数据(已完成大气辐射校正和几何校正),其中 1986—1998 年、2008—2009 年的遥感数据来源于 Landsat 5 TM 传感器,1996—2007 年、2010—2012 年的遥感数据来源于 Landsat 7 ETM+传感器,2013—2019年的遥感数据来源于 Landsat 8 OLI 传感器。另外考虑到于旱区湖泊的季节差异性和冬季积雪的影响,本研究所用遥感影像获取月份主要集中在 8 月—10 月,最后基于 GEE 平台对所有数据筛选出云量小于 20%的影像进行镶嵌拼接。

为研究气候因素对湖泊数量和面积变化的影响,本文获取了新疆维吾尔自治区 42 个气象站点 1986—2019 年的逐日降水和平均气温数据,首先对降水数据进行年累加处理,对气温数据进行年均处理,本数据来源于国家气象科学数据中心的中国地面气候资料日值数据集(http://data.cma.cn/data/)。

## 2 研究方法

## 2.1 遥感水体提取方法

本研究依据不同地物的光谱反射率特点,提出了基于多种遥感光谱指数的动态阈值的水体识别方法,其流程图如图 2 所示,主要采用 5 种遥感光谱指数,分别为  $NDWI^{[22]}$ ,  $MNDWI^{[23]}$ ,多波段水体指数(MBWI)  $^{[24]}$ , 归一化植被指数(NDVI)  $^{[19]}$ ,  $NDSI^{[25]}$ 。 NDWI 和 MNDWI 主要针对 Landsat 5 和 Landsat 7 的获取的 TM 和

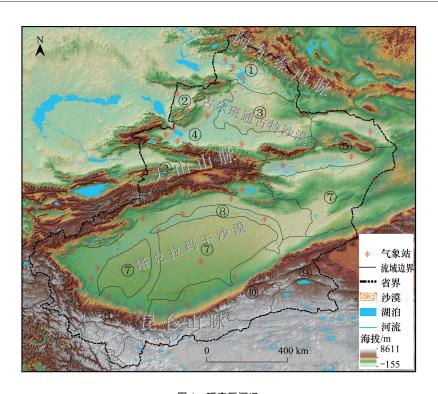


图 1 研究区概况 Fig.1 Study area

① 阿尔泰山南麓诸河,②中亚西亚内陆河区,③古尔班通古特荒漠区,④天山北麓诸河,⑤吐哈盆地小河,⑥塔里木河源流区,⑦塔里木盆地荒漠区,⑧塔里木河干流区,⑨柴达木盆地,⑩昆仑山北麓小河,⑪羌塘高原内陆河

ETM+影像进行水体像元提取, Wang 等<sup>[24]</sup>提出的 MBWI 主要针对 Landsat 8 获取的 OLI 影像进行水体像元提取, NDVI 和 NDSI 主要为了过滤湿地植被和山地积雪对水体识别的影响。

为了去除山体阴影对水体提取的影响,参考李均力等<sup>[26]</sup>在喜马拉雅山地湖泊遥感识别研究,基于数字高程模型(DEM)数据,结合研究区内地形特征,将研究区分为高原地区(DEM>3500m),高山地区(1500m<DEM <3500m),平原地区(DEM<1500m),并对不同区域山体坡度和光谱指数的阈值进行动态调整,减少对其他非水体信息的误分,最大程度提高水体综合识别效果。最后生产逐年水体空间分布图后,为得到准确的湖泊面积变化信息,还需对河流水体进行删除。由于 Landsat 7 ETM+影像数据自 2003 年 5 月 31 日以来的数据条带缺失现象,尽管数据预处理中对条带进行插补修复,但是在部分区域仍然出现条带状水体缺失和错误识别现象,因此再次对湖泊边界进行检查和简单编辑,以保证数据结果的准确性。

## 2.2 趋势分析法

本研究基于最小二乘法的一元线性回归模型对湖泊变化率进行趋势分析,主要对 1986—2019 年 84 个湖泊面积(>10km²)进行最小二乘拟合获得湖泊面积变化率,计算公式为<sup>[19]</sup>

$$S = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} (i \times L_i) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} L_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2}$$
(1)

式中,n 为研究时段的年数; $L_i$ 为第i年的湖泊面积;S 表示湖泊面积变化率,当S 为正值,则该湖泊面积呈现出上升的趋势,相反有下降的趋势。

为了更好地表达湖泊的变化趋势,采用 F 检验对湖泊面积的变化率进行显著性检验,显著性检验结果用统计显著性 P 值来表示,根据显著性检验结果和变化趋势斜率 S 的大小将湖泊的变化趋势分为 S 种类型<sup>[19]</sup>,如表 S 所示。

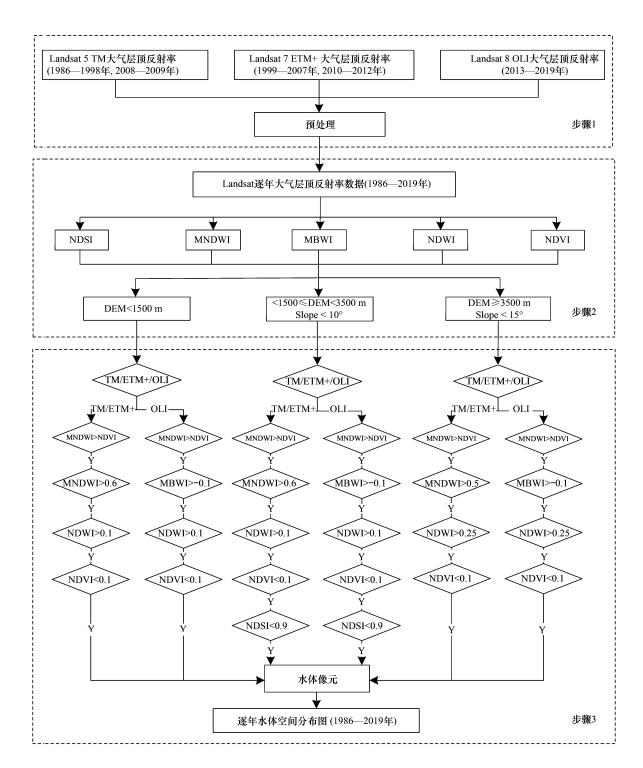


图 2 基于 GEE 平台和 Landsat 遥感影像的水体制图技术路线

Fig.2 Work flow of the water body mapping method based on GEE platform and Landsat remote sensing imagery

TM: 专题制图仪 Thematic Mapper; ETM+: 增强型专题制图仪 Enhanced Thematic Mapper Plus; OLI: 陆地成像仪 Operational Land Imager; NDSI: 归一化雪被指数 Normalized Difference Snow Index; MNDWI: 修正归一化水体指数 Modified Normalized Difference Water Index; MBWI: 多波段水体指数 Multi-Band Water Index; NDWI: 归一化水体指数 Normalized Difference Water Index; NDVI: 归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index; DEM: 数字高程模型 Digital Elevation Model; Slope: 坡度

#### 表 1 湖泊变化趋势类型

Table 1 Types of lake change trend

湖泊变化趋势类型 Types of lake change trend	变化趋势斜率 S Slopes of trend	P	
极显著扩张 Extremely significant expansion	(0, +∞)	(-∞, 0.01]	
显著扩张 Significant expansion	(0, +∞)	[0.01, 0.1)	
变化不显著 Not significant	( −∞ , +∞ )	$(0.1, +\infty)$	
极显著收缩 Extremely significant shrinkage	$(-\infty, 0)$	(-∞, 0.01]	
显著收缩 Significant shrinkage	$(-\infty, 0)$	[0.01, 0.1)	

## 3 结果与讨论

## 3.1 湖泊识别精度评价与有效性验证

本研究对基于单一水体指数的固定阈值方法与多指数动态阈值方法的不同湖泊水体识别效果进行对比,从图 3 中可以看出,本文方法在识别高原湖泊水体有效去除山地积雪对水体识别的干扰。另外在山地阴影的干扰去除上,该方法也明显优于 MNDWI 和 NDWI 方法。针对平原水库和沙漠尾间湖周边的涉水湿地,本方法也能更好将湿地与水体进行区分。为了定量评价遥感影像水体识别结果的准确性以及提取方法的可靠性,本研究以 2017 年 10m 分辨率全球土地覆盖产品(FROM-GLC10)作为参考数据,为避免混合像元造成的误差,首先对参考数据源空间分辨率进行重采样至 30m,然后建立水体识别混淆矩阵(表 2)对结果进行精度评价。对比两种数据水体分类结果,本研究的水体识别的错分误差为 5.98%,漏分误差为 23.79%。通过对比两种数据,由于参考参考数据采用 10m 分辨率的 Sentential-2 作为数据源,对于细小水体的识别效果要优于本实验数据,因此本研究结果在细小水体提取中存在一定的漏提现象。

同时从国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data)上收集 1990—2015 年新疆主要湖泊(大于  $1 \text{km}^2$ )面积数据与本研究结果进行对比,从而对湖泊面积数据的有效性进行验证。该数据为 Zhang 等  $^{[10]}$ 基于 Landsat 卫星影像和地形图绘制了 8 期中国湖泊数据(1960s,1970s,1990,1995,2000,2005,2010,2015)。本研究选择其中 6 期数据(1990—2015)的湖泊面积结果作为参考值,来验证本文提取的新疆维吾尔自治区主要湖泊面积的有效性,两组湖泊面积的相关性如图 4 所示。1990—2015 年两组数据的拟合曲线的  $R^2$ 均大于 0.99,拟合斜率均接近于 1,尤其以 1995 年和 2015 年的湖泊提取结果最接近该数据集( $R^2 \ge 0.999$ ),这也验证了基于多种水体指数的动态阈值水体提取方法的可行性。

表 2 水体识别混淆矩阵

Table 2 Confusion matrix of water body extraction

		\$ * * n	d n. c		
实验类别 Classification	参考类别 Reference				
	水体像元	非水体像元	合计	错分误差	
	Water pixel	Non-Water pixel	Total pixel	Commission errors	
水体像元 Water pixel	13998193	890098	14888291	5.98%	
非水体像元 Non-Water pixel	4370188	2394896462	2399266650	0.18%	
合计 Total pixel	18368381	2395786560	2414154941	_	
漏分误差 Omission errors	23.79%	0.04%	_	_	

## 3.2 湖泊现状及数量变化特征

根据 2019 年新疆湖泊水体提取的结果显示,新疆现有面积大于  $0.5 \text{km}^2$  的湖泊有 611个,大于  $1 \text{km}^2$  的湖泊有 375个,其中面积在  $1-5 \text{km}^2$  的湖泊有 254个,面积在  $5-10 \text{km}^2$  的湖泊有 42个,面积在  $10-50 \text{km}^2$  的湖泊有 61个,面积在  $50-100 \text{km}^2$  的湖泊有 8个,面积在  $100-500 \text{km}^2$  的湖泊有 5个,面积在  $500-1000 \text{km}^2$  的湖泊有 3个,面积大于  $1000 \text{km}^2$  的湖泊有 2个。从空间分布上看(图 1),新疆地区湖泊分布极不均衡,这也是造

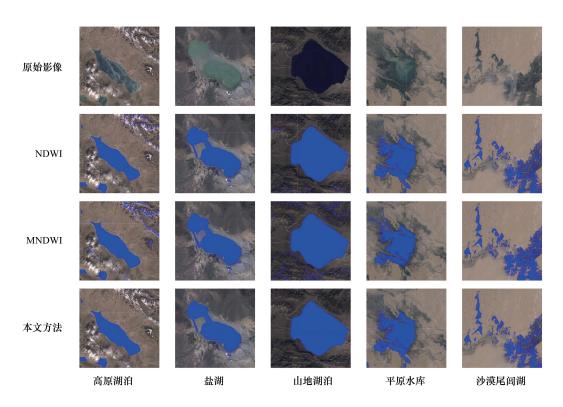


图 3 不同水体识别方法在不同类型湖泊中的识别结果

Fig.3 Water body extraction results of different lake types by different method

成区域水资源空间差异的重要原因<sup>[27]</sup>。从湖泊数量空间分布上看,约40%的湖泊集中在环天山地区,约30%的湖泊集中在南部羌塘高原区,约21%的湖泊集中分布在阿尔泰山南麓,塔里木盆地和准噶尔盆地湖泊分布较少。本研究结合高程数据计算了不同湖泊平均海拔高度,结果显示约有37%的湖泊分布在海拔低于1000m的低海拔地区,约有34%的湖泊在海拔1000—3000m的中海拔地区,约有27%的湖泊在海拔大于3000m的高海拔地区。

另外本文研究了 1986 年以来不同面积湖泊数量的变化情况(图 5),1986—2012 年湖泊总数量保持周期性平稳波动,但是近 10 年来湖泊总数量呈现出显著增加的趋势(35.4 个/a),主要以 5km²以下湖泊数量增加明显。根据湖泊空间分布特征,将研究区分为 4 个区域-环天山地区、阿尔泰山南麓地区,羌塘高原区以及其他区域,对比分析不同区域湖泊数量的变化特征(图 6)。从图 6 可以看出,环天山地区的湖泊数量经历了先减少后增加的过程,羌塘高原区的湖泊数量处于持续增加状态,且近 10 年来的显著增加湖泊主要集中在环天山地区,其次是羌塘高原地区。

## 3.3 湖泊面积变化及其空间差异特征

## 3.3.1 主要湖泊面积变化特征

本研究选取了 1986—2019 年平均水体面积大于 10km²的湖泊(84个),通过趋势分析法研究了湖泊面积的变化趋势,研究发现,54个湖泊面积发生显著变化,其中 41个湖泊呈现出显著扩张态势,13个湖泊呈现出显著收缩态势,共有 36个湖泊发生极显著变化趋势。表 3中列举了研究区内 1986—2019 年平均水体面积大于 100 km²的大型湖泊属性特征和变化趋势,从表中可以看出,所有的大型高原湖泊发生极显著扩张,尤其以阿雅克库木湖扩张速率(+16.52km²/a)最快,其次是阿其克库勒湖(+8.20km²/a)。其余主要大型湖泊呈现出不同程度变化,但是变化均不显著。值得注意的是,修建于 2002 年的罗布泊钾盐池的面积从最初的 9.89km²已经增长至 2019 年的 225.39km²,已经成为新疆的第十大湖泊。

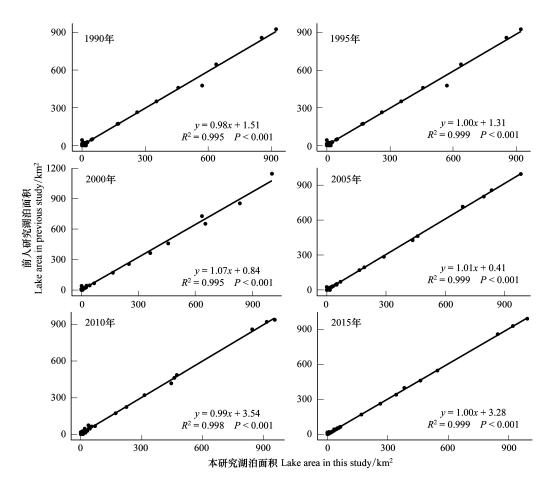


图 4 本研究湖泊提取结果和前人湖泊提取结果比较

Fig.4 Comparisons between the lake extraction results in this study and the lake extraction results in previous research

## 表 3 新疆大型湖泊基本情况和变化趋势

Table 3 Basic conditions and change rates of major lakes in Xinjiang

湖泊 Lake name	平均水体面积/km² Average area	海拔/m Elevation	变化率/(km²/a) Change rate	变化趋势 Trend	P
博斯腾湖	951.71	1037	1.16	显著扩张	<0.1
乌伦古湖	842.76	469	0.40	变化不显著	>0.1
阿雅克库木湖	765.89	3867	16.52	极显著扩张	< 0.01
艾比湖	580.06	182	-0.55	变化不显著	>0.1
赛里木湖	459.40	2069	0.17	极显著扩张	< 0.01
阿其克库勒湖	423.30	4239	8.20	极显著扩张	< 0.01
鲸鱼湖	287.44	4696	3.70	极显著扩张	< 0.01
阿克赛钦湖	199.99	4832	3.64	极显著扩张	< 0.01
吉力湖	168.25	466	0.02	变化不显著	>0.1
罗布泊钾盐池	117.64	878	12.68	极显著扩张	< 0.01
玛纳斯湖	100.72	244	2.85	变化不显著	>0.01

## 3.3.2 不同流域湖泊面积变化特征

根据中国 1:25 万二级流域分级数据集,研究区被划分为 11 个流域分区,因此本文对二级流域内湖泊面积变化特征进行分析。从湖泊变化趋势的空间分布上看,呈现扩张趋势的湖泊主要集中在青藏高原北部以及阿尔泰山南部(图 7)。天山北坡以平原水库为主的湖泊呈现出显著收缩趋势,但变化速率不高。塔里木河流

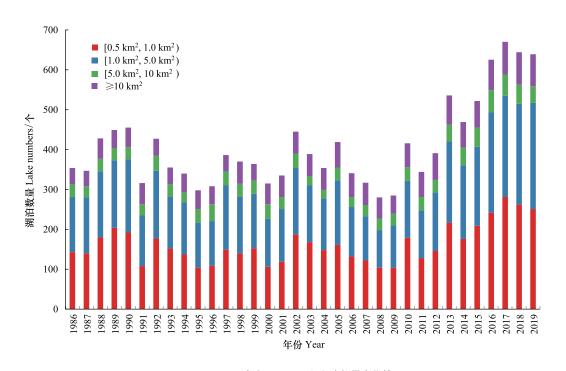


图 5 1986—2019 年新疆不同面积湖泊数量变化情况 Fig.5 The number change of different area lakes in Xinjiang during 1986—2019



Fig.6 Changes in the number of lakes in different regions of Xinjiang during 1986—2019

域的湖泊既有扩张也有收缩,但总体呈现波动上升趋势。塔里木河干流区的大西海子水库呈极显著的收缩趋势(-0.50km²/a),而位于塔里木河干流尾闾的康拉克湖(+1.80km²/a)和台特玛湖(+4.06km²/a)分别呈现出极显著和显著的扩张趋势。

图 8 为 1986—2019 年不同流域湖泊总面积变化趋势图(虚线为线性趋势),横坐标为年,纵坐标为流域湖泊总面积。从图 8 上看,人为干扰较少的昆仑山北麓小河流域、羌塘高原内陆河流域湖泊面积处于显著增长

态势,以羌塘高原内陆河流域最为显著( $37.72 \text{km}^2/\text{a}$ ,  $R^2 = 0.92$ )。以天山北麓诸河流域和塔里木河流域为代表的环天山地区湖泊面积却存在显著的年际波动,位于东天山吐哈盆地小河流域湖泊面积呈现出波动下降的趋势。

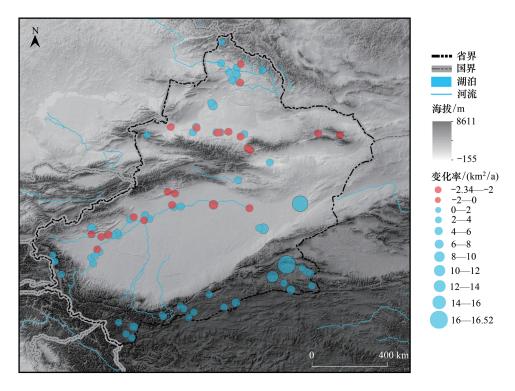


图 7 1986—2019 年湖泊面积变化趋势空间分布

Fig.7 The spatial distribution of the change trend of lake areas during 1986—2019

## 3.3.3 不同湖泊类型面积变化特征

综合研究区内湖泊的地貌特征、海拔高度,如图 9 所示将湖泊划分为 3 种类型。平原湖泊,主要海拔低于1500m 的自然形成的湖泊或者人工修建用于灌溉的水库,主要有博斯腾湖,乌伦古湖,蘑菇海水库等,这些湖泊由于位于海拔较低的平原地区,受灌溉引水、拦洪蓄水等影响也比较大。高山湖泊,主要指海拔位于1500—3500m 的湖泊,这些湖泊多直接依靠冰雪融水补给,主要有赛里木湖、琼块勒巴什湖、喀纳斯湖等,这些湖泊受人类活动影响较小,受气候因素影响较大。高原湖泊,主要指海拔大于3500m 以上的湖泊,主要集中在青藏高原北部,主要有阿雅克库木湖、阿其格库勒湖、鲸鱼湖等,这类湖泊面积变化主要受气候因素影响,基本上不受人类活动干扰。

正因为这些湖泊所处地理位置的气候特征和人类活动的强度和方式不同,不同湖泊变化特征各异。从图 10 中可以看出高原湖泊总面积自 1995 年以来一直处于稳定的线性增加趋势,总面积从 1995 年 1530km²扩张 到 2019 年的 2810km²,平均每年扩张 51.2km²。1986—2009 年高山湖泊一直处于平稳波动的状态,主要因为赛里木湖、喀纳斯湖、托勒库勒湖等面积一直处于平稳波动态势,由于 2009 年后硝尔库勒湖(阿图什)、巴里坤湖面积恢复以及帕米尔高原的琼块勒巴什湖不断扩张,高山湖泊总面积在 2009 年后处于急速增加状态。与此同时,平原湖泊从 1986 年到 2003 年处于波动扩张态势,2003 年以后进入一个高位震荡的时期,这主要是因为艾比湖和玛纳斯湖受流域气候变化和人类活动双重作用下发生强烈的年际波动<sup>[28]</sup>。

## 3.4 湖泊动态变化的影响因素分析

## 3.4.1 气候变化影响因素分析

流域降水和雪冰融水形成的地表径流是干旱区湖泊的重要补给来源[29],因此气温和降水作为主要气候

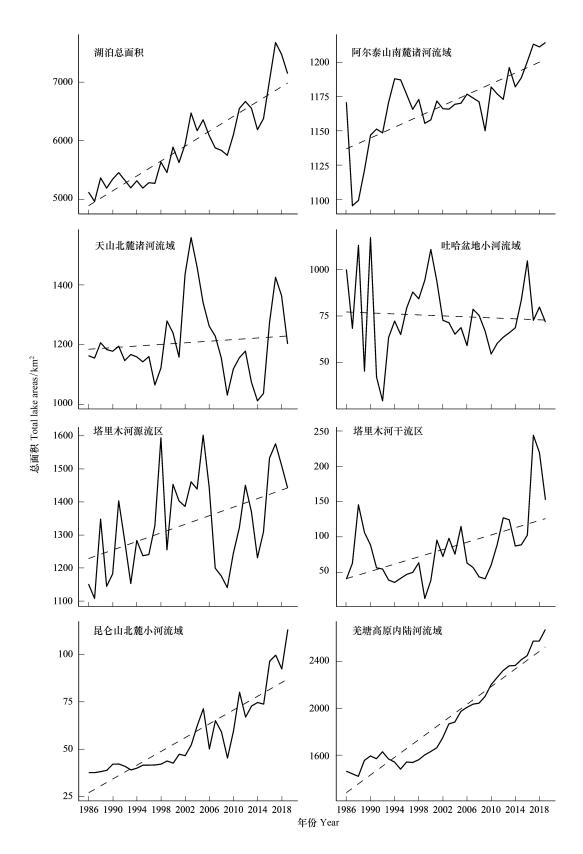


图 8 1986—2019 年不同流域湖泊总面积变化趋势

Fig.8 The change trend of total lake areas in different basins during 1986—2019

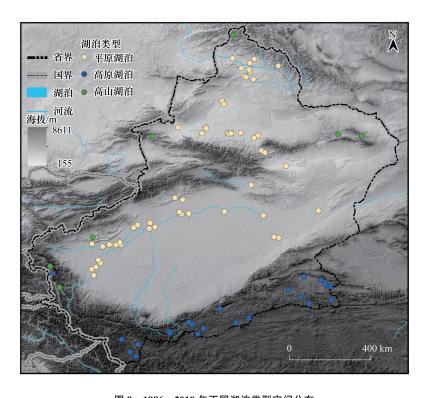


图 9 1986—2019 年不同湖泊类型空间分布

Fig.9 The spatial distribution of different lake types during 1986—2019

因素对湖泊动态变化有重要影响。因此本文基于全疆 42 个气象站的逐日监测数据,计算得到 1986—2019 年 新疆年均气温和年降水量变化趋势(图 11)。研究结果表明,新疆年均气温在 1997 年发生"突变型"升高,之后一直保持高位震荡的态势,这点与前人研究一致[1]。在气候因素中,气温对以雨水补给型湖泊的影响为负效应,而对雪冰融水补给型湖泊的影响为正效应[30—31]。研究区内高原湖泊主要位于羌塘高原内陆河流域,属于典型的冰川-冻融水补给流域[31],同时这一区域快速增长的气温导致高原湖泊面积迅速扩张[32—33]。在降水量年际变化方面,1986—2001 年年降水量整体呈下降趋势,2002 年以后降水量开始呈现波动上升趋势,降水量变化与湖泊总面积的关系并不显著。但是受厄尔尼诺现象影响,2010 年和 2016 年降水量异常增多可能是造成高山湖泊发生显著扩张的原因[34—36]。气候变化对湖泊面积的影响不只受单一气候变量作用,而取决于区域的水热组合[37]。在全球气候变暖背景下,相比于青藏高原地区,环天山地区冰川分布海拔较低,气温升高导致的天山地区冰川加速退缩是导致区域湖泊面积高位波动的重要原因之一[38]。同时水循环要素的改变也加剧了整个水文过程的不确定性以及区域地表水资源的不均衡分布[1,36]。

## 3.4.2 人类活动影响因素分析

近些年来不断增强的人类活动也是导致湖泊数量增加的主要原因之一,在河流中上游修建拦引蓄等水利设施进行农业灌溉是区域重要的水资源开发利用方式。自 20 世纪 50 年代以来,全疆共建设各类水库 578 座,一半以上集中环天山地区<sup>[6]</sup>。从修建时间上看,2010—2020 年是水库建设高峰期,这 10 年内全疆共建水库 136 座,占全疆水库总量的 23.53%<sup>[5]</sup>。因此,近些年来人工水库数量的增加也从人类活动角度解释了湖泊数量增加原因。近 40 年来,新疆人口由 1978 年的 1283 万人增加到 2018 年的 2486 万人,耕地面积增加了约 3.15×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,增幅超过 50%<sup>[39]</sup>。人口和耕地面积的增加使得工农业用水生产生活需求增加,尤其在环天山地区,该区域人口及城市群分布密集,灌溉农业发达,河流湖泊等地表水资源受人为干扰较大,因此强烈的人类活动减弱了湖泊的扩张过程<sup>[40—42]</sup>。比如柴窝堡湖作为曾经乌鲁木齐市的主要水源地,由于城市用水量和农业灌溉用水的增加,湖泊面积从 2011 年的 28km<sup>2</sup>骤降至 2014 年枯水期的不足 1km<sup>2</sup>。跨区域生态输水工程

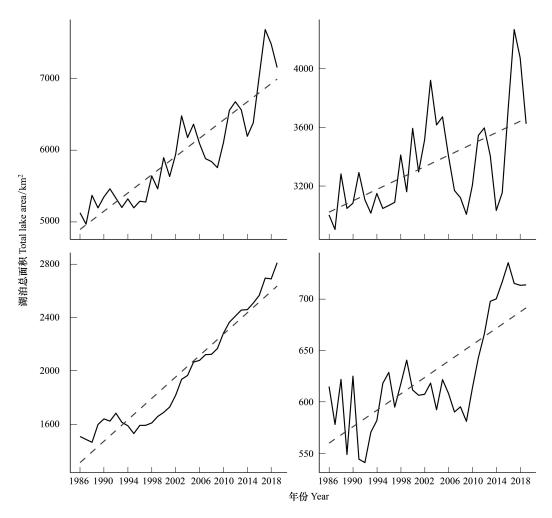


图 10 1986—2019 年不同湖泊类型面积变化(实线:面积变化,虚线:线性趋势)

Fig.10 The area changes of different lake types during 1986—2019 (Solid line: Area change, Dashed line: Linear trend)

对部分区域湖泊面积也产生显著影响,自 2000 年 4 月开始,塔里木河流域管理局先后向塔里木河下游实施生态输水 21 次,自大西海子水库累计下泄生态水达 8.43×10<sup>10</sup> m³。受塔里木河干流生态输水工程影响<sup>[43]</sup>,大西海子水库的面积不断减少,台特玛湖的面积不断增加,但是塔里木河干流区湖泊总面积呈增加趋势(图 10)。

#### 4 结论

本研究主要基于 GEE 平台和 Landsat 数据,对新疆地区湖泊数量和面积变化逐年动态监测,讨论分析了 1986—2019 年湖泊数量和面积的时空动态变化特征,并初步定性分析气候变化和人类活动对湖泊面积变化的影响,主要结论如下:

- (1) 本研究提出的基于多种遥感光谱指数的动态阈值水体识别方法可以较好识别干旱区不同类型的湖泊水体,并有效抑制山地阴影、冰川积雪、湿地植被对水体识别的影响,并结合前人的研究成果对该方法进行有效性验证,取得了较好的验证结果。
- (2) 1986 年以来新疆地区湖泊(>0.5km²)在数量上整体处于增加态势,尤其是近10年来以来,湖泊数量呈现出急剧增加的趋势(35.4个/a),主要集中在环天山地区和青藏高原北部地区,面积小于5km²的湖泊数量增加较为显著。
- (3) 1986—2019 年,主要湖泊(>10km²)面积整体上呈现出显著扩张趋势,显著扩张的湖泊主要集中在 青藏高原北部地区,其中以阿雅克库木湖扩张趋势最为显著(+16.52km²/a,*P*<0.01)。然而环天山地区湖泊

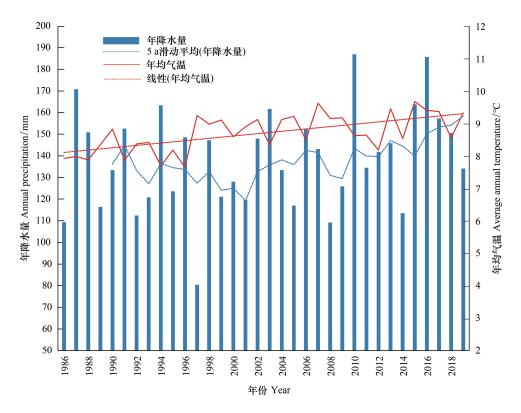


图 11 1986—2019 年新疆年均气温和降水量变化

Fig.11 Changes in annual average temperature and precipitation in Xinjiang from 1986 to 2019

面积则处于频繁的年际波动,塔里木河源流区湖泊面积受外界干扰程度较高。

(4)温升背景下,由于受到丰富的雪冰融水的补给和较小的外界干扰,高原湖泊面积在1997年后持续稳定扩张,相反环天山地区同时受冰川加速退缩以及人类活动影响,近些年来湖泊面积持续高位波动。

## 参考文献 (References):

- [1] 陈亚宁,李稚,范煜婷,王怀军,方功焕. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304.
- [ 2 ] 张振龙, 孙慧. 新疆区域水资源对产业生态系统与经济增长的动态关联——基于 VAR 模型. 生态学报, 2017, 37(16): 5273-5284.
- [3] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 中国湖泊调查报告. 北京: 科学出版社, 2019.
- [4] 吉力力・阿不都外力,徐俊荣,穆桂金,徐曼,Gabchenko M V. 艾比湖盐尘对周边地区土壤盐分及景观变化的影响.冰川冻土,2007,29 (6):928-939.
- [5] 李江,柳莹,吴涛,彭兆轩. 新疆水库大坝70年建设成就. 中国水利水电科学研究院学报,2020,18(5):322-330.
- [6] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴—2017. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [7] 邓铭江,李湘权,龙爱华,章毅,汪党献.支撑新疆经济社会跨越式发展的水资源供需结构调控分析.干旱区地理,2011,34(3):379-390.
- [8] 马荣华,杨桂山,段洪涛,姜加虎,王苏民,冯学智,李爱农,孔繁翔,薛滨,吴敬禄,李世杰.中国湖泊的数量、面积与空间分布.中国科学:地球科学,2011,41(3):394-401.
- [9] 董斯扬, 薛娴, 尤全刚, 彭飞. 近 40 年青藏高原湖泊面积变化遥感分析. 湖泊科学, 2014, 26(4): 535-544.
- [10] Zhang G Q, Yao T D, Chen W F, Zheng G X, Shum C K, Yang K, Piao S, Sheng Y W, Yi S, Li J L, O'Reilly C M, Qi S H, Shen S S P, Zhang H B, Jia Y Y. Regional differences of lake evolution across China during 1960s—2015 and its natural and anthropogenic causes. Remote Sensing of Environment, 2019, 221; 386-404.
- [11] 杜培军,陈宇,谭琨. 江苏滨海湿地土地利用/覆盖变化与地表温度响应遥感监测. 国土资源遥感, 2014, 26(2): 112-120.
- [12] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, Belward A S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature, 2016, 540 (7633): 418-422.

- [13] Nashait A F, Jasim O Z, Ismail M M, Saad F H. Integrating various satellite images for identification of the water bodies through using machine learning: A case study of Salah Adin, Iraq. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 737: 012223.
- [14] Chen F, Chen X Z, Van De Voorde T, Roberts D, Jiang H J, Xu W B. Open water detection in urban environments using high spatial resolution remote sensing imagery. Remote Sensing of Environment, 2020, 242; 111706.
- [15] 张飞,王娟, 塔西甫拉提·特依拜,周梅,王东芳,李瑞,李晓航. 1998-2013 年新疆艾比湖湖面时空动态变化及其驱动机制. 生态学报, 2015, 35(9); 2848-2859.
- [16] Jing Y Q, Zhang F, Wang X P. Monitoring dynamics and driving forces of lake changes in different seasons in Xinjiang using multi-source remote sensing. European Journal of Remote Sensing, 2018, 51(1): 150-165.
- [17] Yan D J, Huang C, Ma N, Zhang Y S. Improved landsat-based water and snow indices for extracting lake and snow cover/glacier in the Tibetan Plateau. Water, 2020, 12(5); 1339.
- [18] 张兵,李俊生,申茜,吴艳红,张方方,王胜蕾,姚月,郭立男,殷子瑶.长时序大范围内陆水体光学遥感研究进展.遥感学报,2021,25 (1):37-52.
- [19] 王伟, 阿里木·赛买提, 吉力力·阿不都外力. 基于地理探测器模型的中亚 NDVI 时空变化特征及其驱动因子分析. 国土资源遥感, 2019, 31(4): 32-40.
- [20] 陈曦, 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 张建明. 中国干旱区自然地理. 北京: 科学出版社, 2010.
- [21] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18-27.
- [22] Gao B C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 257-266.
- [23] Xu H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [24] Wang X B, Xie S P, Zhang X L, Chen C, Guo H, Du J K, Duan Z. A robust Multi-Band Water Index (MBWI) for automated extraction of surface water from Landsat 8 OLI imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 68: 73-91.
- [25] Salomonson V V, Appel I. Development of the Aqua MODIS NDSI fractional snow cover algorithm and validation results. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(7): 1747-1756.
- [26] 李均力,盛永伟,骆剑承. 喜马拉雅山地区冰湖信息的遥感自动化提取. 遥感学报, 2011, 15(1): 29-43.
- [27] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 孙占东, 李宇安. 论中国干旱区湖泊研究的重要意义. 干旱区研究, 2007, 24(2): 137-140.
- [28] 吴敬禄, 林琳. 新疆艾比湖湖面波动特征及其原因. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(1): 57-60.
- [29] 胡汝骥,马虹,樊自立,吴素芬,何文勤. 近期新疆湖泊变化所示的气候趋势. 干旱区资源与环境, 2002, 16(1): 20-27.
- [30] 程志刚, 刘晓东, 范广洲, 白爱娟, 王炳赟. 21世纪青藏高原气候时空变化评估. 干旱区研究, 2011, 28(4): 669-676.
- [31] 李均力, 盛永伟. 1976—2009 年青藏高原内陆湖泊变化的时空格局与过程. 干旱区研究, 2013, 30(4): 571-581.
- [32] 冀钦,杨建平,陈虹举,贺青山,唐凡.基于综合视角的近 55 a 青藏高原气温变化分析. 兰州大学学报:自然科学版,2020,56(6):755-764
- [33] 李晓锋, 姚晓军, 孙美平, 宫鹏, 安丽娜, 祁苗苗, 高永鹏. 2000—2014 年我国西北地区湖泊面积的时空变化. 生态学报, 2018, 38(1): 96-104.
- [34] 新疆气象局. 新疆 2016 年十大天气气候事件. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(1): 2-2.
- [35] 新疆气象局. 2010年新疆十大天气气候事件. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(1): 61-63.
- [36] 姚俊强, 毛炜峄, 陈静, 迪丽努尔·托列吾别克. 新疆气候"湿干转折"的信号和影响探讨. 地理学报, 2021, 76(1): 57-72.
- [37] 徐丹蕾, 丁靖南, 伍永秋. 1989—2014 年毛乌素沙地湖泊面积. 中国沙漠, 2019, 39(6): 40-47.
- [38] 李龙,姚晓军,刘时银,卜亚平,宫鹏,李晓锋.近50年丝绸之路经济带中国境内冰川变化.自然资源学报,2019,34(7):1506-1520.
- [39] 贺可,吴世新,杨怡,王丹,张寿雨,尹楠.近40a新疆土地利用及其绿洲动态变化.干旱区地理,2018,41(6):1333-1340.
- [40] 高倩,方创琳,张小雷,刘海猛,任宇飞.丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展的时空演变特征及影响机理.生态学报,2019,39(4):1263-1277.
- [41] 白瑞东, 何隆华, 吴敬禄. 基于 MODIS 数据的近期新疆主要湖泊水面变化分析. 干旱区研究, 2012, 29(4): 561-566.
- [42] 张丽芳, 方创琳, 高倩. 天山北坡城市群城市景观时空扩张过程及多情景模拟. 生态学报, 2021, 41(4): 1267-1279.
- [43] 霍天赐, 颜伟, 马晓飞. 内陆河尾闾湖泊水域面积变化及驱动因素研究——以台特玛湖地区为例. 国土资源遥感, 2020, 32(3): 149-156.