

引用格式: Jin Yanli, Xu Maolin, Gao Shuai, *et al.* Analysis on the Dynamic Changes and Driving Forces of Surface Water in the Three-River Headwater Region from 2001 to 2018 [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(5): 1147-1154. [金岩丽, 徐茂林, 高帅, 等. 2001~2018年三江源地表水动态变化及驱动力分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(5): 1147-1154.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.5.1147

2001~2018年三江源地表水动态变化及驱动力分析

金岩丽¹, 徐茂林¹, 高 帅², 万华伟³

(1. 辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114051;

2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101;

3. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100029)

摘要: 当前很多研究利用遥感影像关注地表水动态变化情况, 但不同算法得到的变化情况尚待进一步分析。基于GEE平台, 以三江源为例, 利用JRC全球地表水产品对三江源2001~2018年的地表水体面积进行动态变化分析, 并结合大气再分析产品ERA5和PERSIANN-CDR进行驱动力分析。结果表明: 2001~2018年期间, 三江源常年性水体面积从6 403.61 km²增加至7 473.09 km², 主要增加部分分布于长江源区; 三江源常年性水体面积变化和年降水量有显著正相关关系, 常年性水体面积变化和气温没有显著相关关系; 卓乃湖自2011年起溃坝, 引起自身萎缩, 导致其下游的盐湖扩张严重, 有溃坝的风险。

关键词: GEE平台; 三江源; 驱动力; 地表水体面积; 动态变化

中图分类号: P333; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)05-1147-08

1 引言

三江源(Three-River Headwater, TRH)素有“中华水塔”之称, 也因其独特的地理位置被认为是亚洲最重要的生态安全屏障和全球最敏感的气候启动区之一。近年来, 在全球气候变化和人类活动的双重影响下, 三江源地区生态系统表现出退化迹象: 草地退化与沙化加剧、生物多样性急剧下降^[1-3]、源头产水量减少、湖泊及湿地萎缩甚至干涸、冰川退缩、冰湖溃决、冰崩、泥石流等灾害风险加剧^[4-5], 不仅影响到当地居民的生产生活, 还影响我国及“一带一路”沿线国家20多亿人的生存和发展。

三江源严峻的生态环境态势, 不仅受到了社会各界的广泛关注, 也得到了国内许多学者的重视。三江源高寒高海拔气候恶劣, 是唯一有着丰富人类

生存活动的极地地带, 且极易受云及云阴影、山体阴影、冰川、终年不化积雪的影响, 因此对整个三江源地区的研究存在较大难度。目前研究主要集中在分区土地利用分类、草地退化、生态系统评价、气候变化等方面, 关于整个三江源地表水方面的研究较少, 如郝亚蒙^[6]基于MODIS09A1每年7、8月影像, 运用NDWI(Normalized Difference Water Index)归一化法和目视解译得到2001~2015年的三江源湖泊面积, 并结合气象等数据对面积变化成因进行分析, 但是遥感影像空间分辨率仅为500 m, 难以描述精细的地表水变化。赵静等^[7]利用MODIS影像估算三江源地区蒸发量, 并结合湖泊湿地资料, 分析2000~2007年蒸发量对湖泊湿地变化的响应关系, 未考虑到河流等其他水体。冯蜀青等^[8]基于2000年和2004年的TM/ETM影像, 运用计算机

收稿日期: 2020-07-01; 修订日期: 2021-07-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0507201), 高分项目 High Score Project of China (30-Y20A34-9010-15/17), 广州市科技计划项目(201710010114, 2020B121202019), 智慧广州时空信息云平台建设项目(GZIT2016-A5-147)。

作者简介: 金岩丽(1996—), 女, 甘肃敦煌人, 硕士研究生, 主要从事水体提取及遥感图像处理研究。E-mail: 1901014627@qq.com

通讯作者: 徐茂林(1964—), 男, 山东青岛人, 教授, 主要从事测绘工程、数字矿山、边坡监测与预报方面的研究。E-mail: xml1964@163.com

人工解译的方法对三江源湖泊进行提取,并分析了降水、气温对其面积的影响。李晖等^[9]对三江源24个典型湖泊1976~2006年分4个时期的图谱与面积变化进行研究,但时相不连续,难以捕捉湖泊长期动态变化。李林等^[10]利用MODIS影像对2001~2006年逐年汛前期和汛后期两个时相黄河源区湖泊总面积、数量与气候因子做相关分析,定量揭示了它们之间的关系。万玮等^[11]以青海和西藏自治区2005年和2006年共408景CBERS CCD影像和5景Landsat影像为主,结合1975年左右的两种比例尺共计1200多张地形图完成了青藏高原1 km²以上湖泊卫星遥感调查,并将其结果与20世纪60~80年代第一次全国湖泊调查进行比较,对青藏高原湖泊数量、面积、空间分布的变化情况进行分析。

针对上述空间分辨率较低、时相不连续、水体单一等问题,实验借助GEE平台对18 a以来JRC全球地表水产品、大气再分析产品PERSIANN-CDR、ERA5进行在线访问和分析处理等操作,以实现三江源地表水体逐年时空变化、三江源年降水量、年均气温和年最高平均气温数据的获取及对三江源2001年以来18 a的地表水体进行动态变化以及驱动力分析。Google在2010年就拥有超过100万台服务器,其下GEE支持用户访问网络的API和基于Web的交互式开发环境实现对云端海量数据的访问、操作^[12],且尤以注重算法,利于大尺度研究见长^[13-19],JRC全球地表水产品即于此背景产生。

实验旨在分析三江源地表水体的时空变化特征和地表水体面积与气候因素变化的相关性,为三江源水管理决策的制定及生态工程成效的评估提供及时准确的科学依据和技术支持。

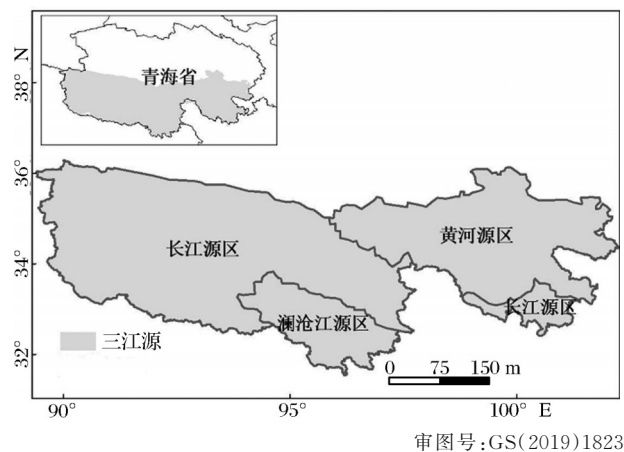


图1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

2 研究区概况、数据处理、研究方法

2.1 研究区概况

三江源(31°32'~36°16' N, 89°24'~102°15' E)位于青海省南部,是青藏高原的主体和腹地,分为长江源区、黄河源区、澜沧江源区三部分,总面积34.02万 km²,占青海省总面积的48%(图1),区内有著名的可可西里自然风景区,也是世界上高海拔生物多样性最集中的地区之一。三江源地域广阔,地形复杂多变,以山地地貌为主,总体上呈西高东低,东西部海拔差异较大,虽然西部海拔较高,但地形起伏却不大,而东部海拔相对较低,地形起伏却较大。三江源地区属高原大陆性气候,全年温度不高,昼夜温差大,无明显季节变化,降水集中且分布不均匀^[20-22]。区内河流密布、沼泽湖泊众多、雪山冰川广布,沼泽湖泊主要集中在长江源区西部和黄河源区西部。雨水、雪山冰川融水、湖泊和沼泽的调蓄功能致使长江总水量的25%、黄河总水量的49%、澜沧江总水量的15%均源自于此。

2.2 数据及处理

2.2.1 数据处理平台——GEE

GEE(Google Earth Engine)是Google公司开发的一款数据处理工具,世界上先进的基于云的行星尺度地理空间分析平台^[23-25],即结合了ArcGIS的空间数据分析和ENVI的遥感影像处理功能,并存有近40 a来主要公开的遥感影像数据集(可达PB级)、可高性能并行处理的云平台。

实验中三江源逐年地表水体数据、降水、气温数据皆是基于GEE平台处理得到的。

2.2.2 三江源地表水体数据

实验选用JRC全球地表水产品^[26],该产品是欧空局研发绘制了过去30多年全球地表水的位置和时间分布的数据集,其使用1984年至今的具有多光谱、多时间属性的Landsat数据以及其他辅助数据自动提取地表水体。通过构造地物多光谱库、基于NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)和色调—饱和度—亮度(HSV)的空间变换,再借助由视觉分析光谱库所存储信息获得多维特征空间描述的聚类方程,就此构建专家系统,进而将每个像元分别分类为水体和非水体,并结合人类认知与GEE计算云平台的处理能力通过视觉分析及证据推理进一步完善分类结果,最终达到水体分类总体的错分误差少于1%,总体的漏分误差少于5%(1984~2015年的精度),该产品将水体分为常年性

水体和季节性水体,常年性水体是指1 a期间内,位于地表的恒以液态形式存在的水体如水库、湖泊、河流等,季节性水体即指相同条件下非恒以液态形式存在的季节性变化的水体,如湿地、稻田、鱼塘等。该方法能最大限度减少云阴影的干扰,适用于三江源地区这种云覆盖率高的高原地区。

2.2.3 三江源气候数据

研究所用的气候数据主要是气温和降水数据,利用大气再分析产品获取气温和降水数据,大气再分析产品是20世纪80年代后期科学家们提出利用数值天气预报中的资料同化技术来恢复长期历史气候记录的新方法^[27]。实验选择第五代欧洲中期天气预报中心产品ERA5和人工神经网络降水数据产品PERSIANN-CDR,并用源于国家气象科学数据共享平台的月值观测数据经ANUSPLIN软件插值得到空间分辨率为90 m的年降水量、年均气温、年最高平均气温进行相关性验证^[28-30],ANUSPLIN插值方法已被证明在三江源地区具有较高的插值精度^[31]。相关性验证结果(表1)表明:年降水量的相关性达0.64、年均气温的相关性达0.57、年最高平均气温达0.88,均通过了 $P=0.05$ 的显著性水平检验,因此,从这两类大气再分析产品得到的年降水量、年均气温以及年最高平均气温均可用于后续研究。

表1 相关性验证结果

Table 1 Correlation verification results

	年降水量	年均气温	年最高平均气温
Pearson相关性	0.643**	0.565*	0.881**
显著性(双尾)	0.004	0.015	0.000
N	18	18	18

注:* $p<0.05$,** $p<0.01$

气温数据为ERA5^[32],ERA-Interim经较多学者验证在高原地区的适用性较好^[33],而ERA5是在对它的前身ERA-Interim优化的基础上生成的时间分辨率为每日、空间分辨率为 0.25° ,时间跨度从1979年1月1日至2020年6月1日的气候数据集。实验借助GEE平台,首先从GEE服务器调用气温数据集ERA5,然后对提取的“平均气温”和“最高平均气温”波段分别裁剪、栅格计算求均值、单位换算处理生成三江源18 a的年均气温、年最高平均气温数据。

降水数据为PERSIANN-CDR^[34],PERSIANN-CDR是美国国家海洋与大气局(National

Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)发布的GridSat-B1卫星气象再分析产品,由加利福尼亚大学水文气象和遥感中心(University of California Hydrometeorology and Remote Sensing Center, CHRS)使用人工神经网络模型,结合气象要素分类算法开发,确保得到的降水量与全球降水计划(Global Precipitation Climatology Project, GPCP)相关产品一致。它提供时间分辨率为每日、空间分辨率为 0.25° ,时间跨度从1983年1月1日至2020年12月31日的日降水量数据集。

2.3 研究方法

为了分析三江源地表水体的时空变化特征和地表水体面积与气候因素变化的相关性,实验主要使用了一元线性回归、线性相关分析方法。

一元线性回归,即利用最小二乘法得到变化趋势斜率,并将自变量与因变量之间的关系以 $y=kx+b$ 的形式表达出来。研究三江源常年性水体面积和年降水量的相关性变化趋势时,即采用了此方法。

简单线性相关(皮尔逊,Pearson)是研究随机变量之间相关关系的一种统计方法,可用来表示两个要素之间相关的紧密程度。主要通过对相关系数的计算与检验来测定。

对于任意两个要素 x 和 y ,若其值分别为 x_i 与 y_i ($i=1, 2, \dots, n$),则这两个要素间的相关系数为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

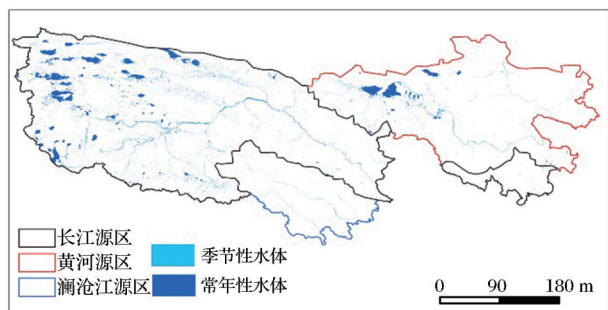
其中: r_{xy} 为两要素之间的相关系数,其值介于区间 $[-1, 1]$; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为两个要素的平均值。 $r_{xy} > 0$ 表示正相关; $r_{xy} < 0$ 表示负相关; r_{xy} 的绝对值越接近于1,表示两要素的相关性越高,越接近于0,表示两要素的相关性越低^[35]。研究三江源常年性水体面积与降水、气温的相关性时即采用简单线性相关分析的方法。

3 结果与分析

3.1 三江源地表水体面积变化结果

利用三江源2001年以来18 a的地表水体数据,绘制了三江源地区2018年地表水体面积变化分布图(图2,来源:EC JRC/Google)、2001年至2018年水体与非水体相互转换变化分布图(图3)、2001年至2018年三江源地表水体面积变化折线图(图4)。研究表明,三江源地表水体分布不均,水体主要分

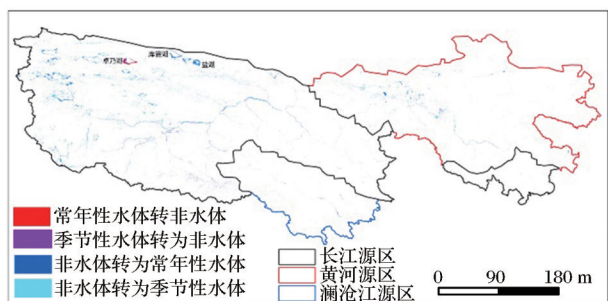
布在长江源区和黄河源区的西部;水体与非水体相互转换主要分布在长江源区,水体转变为非水体,明显集中在长江源区一个湖泊(卓乃湖)的西南部,而非水体转变为水体,大多分布在长江源区西北部,表现为湖泊出现扩张,其中卓乃湖下游的库赛湖和盐湖也出现了扩张,特别是盐湖,扩张较为严重(图3);2001~2018年期间,三江源水体面积呈现出逐年增长的趋势,其常年性、季节性水体面积的增长幅度分别为16.7%和7.42%。2018年三江源常年性水体面积比2001年增加了1 069.48 km²,常年性水体面积除2004年猛跌外,其他年份都基本保持稳步上升。三江源季节性水体面积总体上呈“凹”字形变化,在2003~2015年期间始终保持在1 377.60 km²上下起伏,之后有缓慢上升。



审图号:GS(2019)1823

图2 三江源地表水体变化分布(2018年)

Fig.2 Distribution of surface water bodies in TRH (2018)



审图号:GS(2019)1823

图3 2001~2018年水体与非水体相互转换变化分布

Fig.3 Distribution of change between water body and non-water body from 2001 to 2018

3.2 三江源气候因素变化结果

将历年年降水量、年均气温、年最高平均气温变化以折线的形式表示(图5、图6),在2001~2018年期间,三江源年均气温平均为-4.8℃,以10.57%的幅度呈现波动中有上升的趋势。2012年年均气温达到18 a来最低值(-5.62℃),2003年年均温度达到18 a来最高值(-4.18℃);三江源年降水量平均

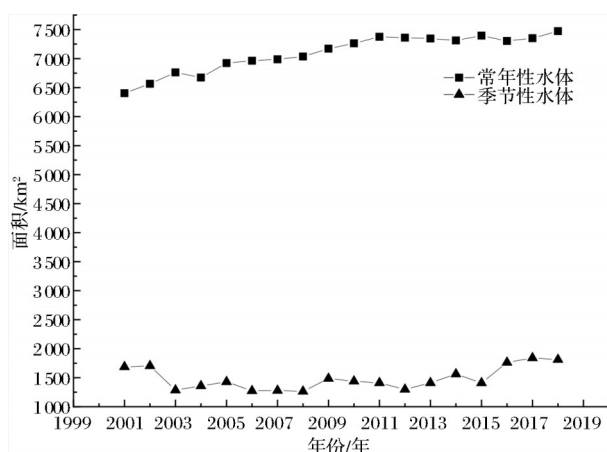


图4 2001~2018年三江源地表水体面积变化

Fig.4 Surface water area change in TRH from 2001 to 2018

为484.85 mm,以31.74%的幅度呈波动式上升增长,其中,2018年达到了18 a以来最大降水量577.52 mm。年最高平均气温平均为(1.68℃),以44.75%的幅度呈波动式上升增长,其在2010年达到了最高气温(2.51℃)。

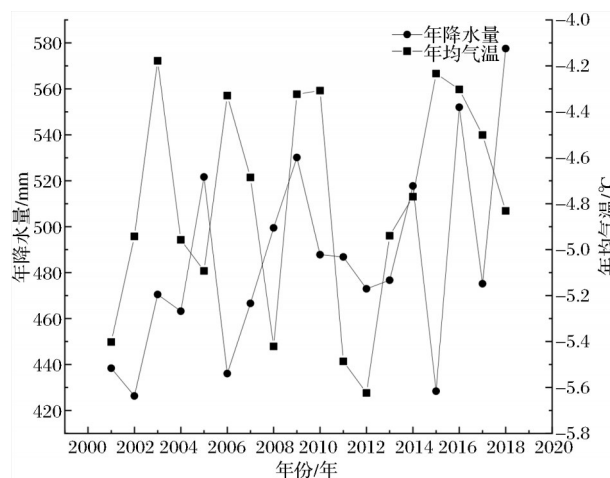


图5 2001~2018年三江源年降水量、年均温度逐年变化

Fig.5 Yearly variation of average annual temperature and precipitation in TRH from 2001 to 2018

3.3 三江源地表水体面积变化与气候因素分析

研究发现18 a以来,三江源地表水体面积、年降水量、年均气温、年最高平均气温都呈上升趋势,相比季节性水体,常年性水体更能代表三江源地表水的总体动态变化,故对三江源常年性水体面积与年降水量、年均气温、年最高平均气温作相关性分析(表2),发现在 $P=0.05$ 的显著性水平下,常年性水体面积和年降水量相关性较一致($R=0.497$),作线性回归(图7),可明显看出常年性水体面积和年降水量呈显著性正相关,而常年性水体面积和年均

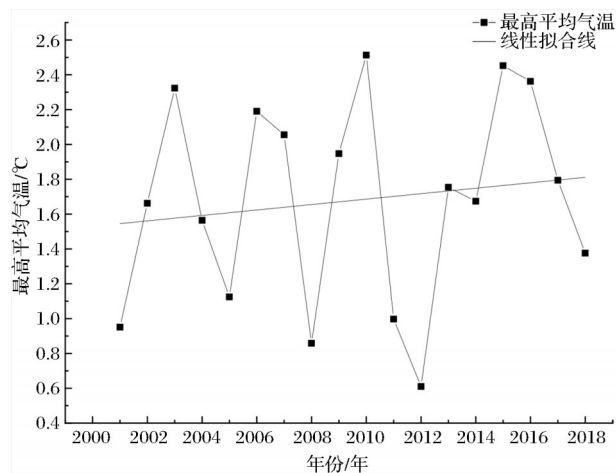


图6 2001~2018年三江源地区年最高平均气温逐年变化
Fig.6 Yearly average highest temperature changes in TRH from 2001 to 2018

气温、年最高平均气温均未通过显著性水平($P=0.05$)检验,可见常年性水体面积变化和气温没有显著直接相关关系。

表2 相关性验证结果

Table 2 Correlation verification results

		年降水量	年均气温	年最高平均气温
常年性	Pearson相关性	0.497*	0.148	0.117
水体面积	显著性(双尾)	0.036	0.559	0.645

注: * $p < 0.05$

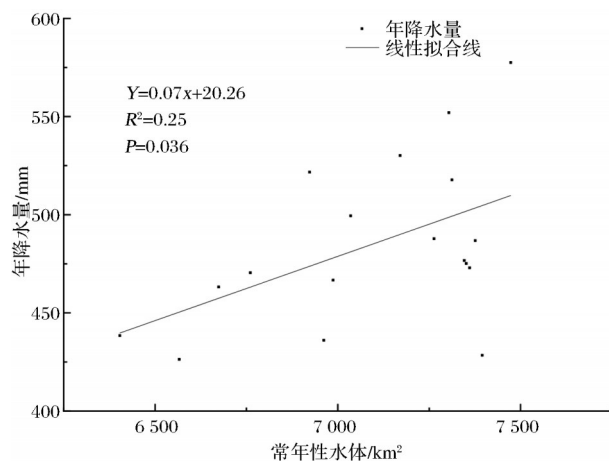


图7 2001~2018年三江源常年性水体与年降水量相关性分析
Fig.7 Relationship between Permanent water bodies and annual precipitation in TRH from 2001 to 2018

4 结 语

从上述对三江源地表水体面积动态变化及驱动力分析表明,2001~2018年期间三江源地表水体面积呈现出逐年增加的趋势,三江源常年性水体面积从 6 403.61 km² 增加至 7 473.09 km²,增加了

1 069.48 km²,增加幅度达 16.7%,主要增加部分分布在长江源区;三江源常年性水体面积变化和年降水量有显著正相关关系;常年性水体面积变化和气温没有显著直接相关关系;此外,通过对比卓乃湖 18 a 的变化情况,发现自 2011 年起卓乃湖开始出现明显缩小,而其下游几个湖泊:盐湖、库赛湖等开始逐渐扩大,这与刘文惠等^[36-37]的研究中“自 2011 年起卓乃湖湖水溃坝外溢有关”相一致。

受三江源地区复杂的自然人文环境的影响,在不同分区引起地表水体面积变化的原因不尽相同,降水增加、气温升高导致的雪山冰川融水增加是地表水体面积呈现增长趋势的主要影响因素,但同时湿度、日照时长、风速、湿度、蒸散发以及冻土等的变化也可能发挥重要作用^[37-39],后续可从这些因素入手,使用灰色关联分析等方法进一步研究。三江源地表水体面积增长,有利于周边气候暖湿化,对遏制周边生态系统退化及生态环境保护产生积极影响,且能充分满足各大河流的径流量需求,但是该地区水体增长并非均匀,盐湖等湖泊的扩张有引发溃坝的风险,进而对周边交通设施等产生不利影响,建议今后可开展盐湖外溢区地质条件调查并适当调整水管理决策。

参考文献(References):

- [1] Li Huixia, Liu Guohua, Fu Bojie. Research on the response of vegetation growth to climate change and human activities based on NDVI in the Three-River Headwaters Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5495-5504. [李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5495-5504.]
- [2] Xiao Tong, Wang Changzuo, Feng Min, et al. Dynamic change characteristics of grassland coverage in the Three-River Headwaters region of Qinghai from 2000 to 2011 [J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(1): 39-45. [肖桐, 王昌佐, 冯敏等. 2000~2011 年青海三江源地区草地覆盖度的动态变化特征[J]. 草地学报, 2014, 22(1): 39-45.]
- [3] Xu Xinliang, Wang Jing, Li Jing, et al. Analysis of the grassland restoration trend and degradation situation in the Three-River Headwaters region since the implementation of the ecological [J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(1): 50-58. [徐新良, 王靓, 李静, 等. 三江源生态工程实施以来草地恢复态势及现状分析[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(1): 50-58.]
- [4] Guo Peipei. The characteristics of climatic productivity and its

- effect on the climatic change in the Three-River Headwaters region from 1960 to 2011 [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2014: 8-23. [郭佩佩. 近 52 年来三江源地区气候生产力的变化特征及其对气候变化的响应[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014: 8-23.]
- [5] Zheng Zimei, Lü Meixia, Ma Zhuguo. Climate, hydrology, and vegetation coverage changes in Source Region of Yellow River and countermeasures for challenges [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 61-72. [郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 61-72.]
- [6] Hao Yameng. Analysis of the area changes of the Three-River Headwaters region lakes and the influencing factors based on remote sensing [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018. [郝亚蒙. 基于遥感的三江源湖泊面积变化及影响因子分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.]
- [7] Zhao Jing, Jiang Qigang, Chen Fengzhen, *et al.* RS based evaporation estimation of the Three-River Headwaters region in Qinghai-Tibet Plateau and its response to lakes and wetlands [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) 2009, 39(3): 507-513. [赵静, 姜琦刚, 陈凤臻, 等. 青藏三江源区蒸发量遥感估算及对湖泊湿地的响应[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(3): 507-513.]
- [8] Feng Shuqing, Su Wenjiang, Xiao Jianshe, *et al.* Research on remote sensing investigation of water resources changes in the Three-River Headwaters Region since 2000 [J]. Qinghai Science and Technology, 2008, 15(5): 20-26. [冯蜀青, 苏文将, 肖建设, 等. 2000 年以来三江源地区水资源变化遥感调查研究[J]. 青海科技, 2008, 15(5): 20-26.]
- [9] Li Hui, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, *et al.* Lake change maps and area changes in the Three-River Headwaters region in the past 30 years [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 862-873. [李晖, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 近 30 年三江源地区湖泊变化图谱与面积变化[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 862-873.]
- [10] Li Lin, Wu Suxia, Zhu Xide, *et al.* Response of plateau lake groups in the source region of the Yellow River to climate change since the 21st century [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 245-253. [李林, 吴素霞, 朱西德, 等. 21 世纪以来黄河源区高原湖泊群对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 245-253.]
- [11] Wan Wei, Xiao Pengju, Feng Xuezhi, *et al.* Satellite remote sensing monitoring lake changes in the Qinghai-Tibet Plateau in the past 30 years [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(8): 701-714. [万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 卫星遥感监测近 30 年来青藏高原湖泊变化[J]. 科学通报, 2014, 59(8): 701-714.]
- [12] Zhang Tao, Tang Hong. Research on vegetation cover change and urban expansion of Beijing-Tianjin-Hebei from 2001 to 2015 based on Google Earth Engine [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(4): 593-599. [张滔, 唐宏. 基于 Google Earth Engine 的京津冀 2001~2015 年植被覆盖变化与城镇扩张研究[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(4): 593-599.]
- [13] Dong J, Xiao X, Menarguez M A, *et al.* Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine [J]. Remote sensing of environment, 2016, 185: 142-154. DOI:10.1016/j.rse.2016.02.016.
- [14] Xiong J, Thenkabail P S, Gumma M K, *et al.* Automated cropland mapping of continental Africa using Google Earth Engine cloud computing [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 126: 225-244. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2017.01.019.
- [15] Xiong J, Thenkabail P S, Tilton J C, *et al.* Nominal 30 m cropland extent map of continental Africa by integrating pixel-based and object-based algorithms using Sentinel-2 and Landsat-8 data on Google Earth Engine [J]. Remote Sensing, 2017, 9(10): 1065. DOI:10.3390/rs9101065.
- [16] Liu X, Hu G, Chen Y, *et al.* High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 209: 227-239. DOI:10.1016/j.rse.2018.02.055.
- [17] Patel N N, Angiuli E, Gamba P, *et al.* Multitemporal settlement and population mapping from Landsat using Google Earth Engine [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 35: 199-208. DOI:10.1016/j.jag.2014.09.005.
- [18] Shelestov A, Lavreniuk M, Kussul N, *et al.* Exploring Google Earth Engine platform for big data processing: classification of multi-temporal satellite imagery for crop mapping [J]. Frontiers in Earth Science, 2017, 5: 17. DOI:10.3389/feart.2017.00017.
- [19] Hansen M C, Potapov P V, Moore R, *et al.* High-resolution global maps of 21st-century forest cover change [J]. Science, 2013, 342(6160): 850-853. DOI:10.1126/science.1244693.
- [20] Xu Xinliang, Liu Jiyuan, Shao Quanqin, *et al.* The dynamic changes of ecosystem spatial pattern and structure in the Three River Headwaters region in Qinghai Province during recent 30 years [J]. Geographical Research, 2008, 27(4): 829-838. [徐新良, 刘纪远, 邵全琴, 等. 30 年来青海三江源生态系统格局

- 和空间结构动态变化[J]. 地理研究, 2008, 27(4): 829-838.]
- [21] Fan Jiangwen, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, *et al.* Dynamic analysis of grass yield changes in the Three-River Headwaters Region grassland from 1988 to 2005[J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(1): 5-10.[樊江文, 邵全琴, 刘纪远, 等. 1988~2005年三江源草地产草量变化动态分析[J]. 草地学报, 2010, 18(1): 5-10.]
- [22] Li Lin, Li Fengxia, Guo Anhong, *et al.* Study on the climate change trend and its catastrophe over the Three-River Headwaters region in recent 43 years[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 79-85.[李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 近43年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 79-85.]
- [23] Zhang Kun. Research on Carbon source and sink estimation method based on big data[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2019.[张坤. 基于大数据的碳源汇估算方法研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2019.]
- [24] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, *et al.* Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. Remote sensing of Environment, 2017, 202: 18-27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- [25] Xu Hanzeyu, Liu Chong, WangJunbang, *et al.* Research on remote sensing extraction of Gannan citrus orchard supported by Google Earth Engine platform[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(3): 396-404.[徐晗泽宇, 刘冲, 王军邦, 等. Google Earth Engine平台支持下的赣南柑橘果园遥感提取研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(3): 396-404.]
- [26] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, *et al.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. Nature, 2016, 540(7633): 418-422. DOI: 10.1038/nature 20584.
- [27] Bengtsson L, Shukla J. Integration of space and in situ observations to study global climate change[J]. Bulletin of American Meteorology Society, 1988, 69(10): 1130-1143. DOI: 10.1175/1520-0477(1988)069<1130:iosais>2.0.co;2.
- [28] Qian Yonglan, Lü Houquan, Zhang Yanhong. Application and evaluation of daily meteorological elements interpolation method based on ANUSPLIN software[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2010, 26(2): 7-15.[钱永兰, 吕厚荃, 张艳红. 基于ANUSPLIN软件的逐日气象要素插值方法应用与评估[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(2): 7-15.]
- [29] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J I, *et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(15): 1965-1978. DOI: 10.1002/joc.1276.
- [30] Price DT, Mckennedy D W, Nalder I A, *et al.* A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 101(2-3): 81-94. DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00169-0.
- [31] Peng Honglan, Liu Fang, Duo Hairui, *et al.* Comparison of spatial interpolation methods for temperature and precipitation in the Three-River Headwaters region[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(18): 9646-9649.[彭红兰, 刘芳, 朵海瑞, 等. 三江源地区温度和降水量空间插值方法比较. 安徽农业科学, 2010, 38(18): 9646-9649.]
- [32] Qin Yanhui, Wu Tonghua, Li Ren, *et al.* Applicability of ERA-Interim surface temperature data in the Three-River Headwaters Region on the Qinghai-Tibet Plateau ERA-Interim[J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(3): 666-675.[秦艳慧, 吴通华, 李韧, 等. 地表温度资料在青藏高原多年冻土区的适用性[J]. 高原气象, 2015, 34(3): 666-675.]
- [33] Hersbach H. The ERA5 atmospheric reanalysis[C]//AGU Fall Meeting Abstracts, 2016: NG33D-01, 2016.
- [34] MIAOC, Ashouri H, Hsu K L, *et al.* Evaluation of the PERSIANN-CDR daily rainfall estimates in capturing the behavior of extreme precipitation events over China[J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16: 1387-1396. DOI: 10.1175/jhm-d-14-0174.1.
- [35] Xu Jianhua. Mathematical methods in modern geography (second edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.[徐建华. 现代地理学中的数学方法(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.]
- [36] Liu Wenhui, Xie Changwei, Wang Wu, *et al.* Analysis on expansion trend and outburst risk of the Yan hu Lake in HohXil region, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(6): 1467-1474.[刘文惠, 谢昌卫, 王武, 等. 青藏高原可可西里盐湖水位上涨趋势及溃决风险分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1467-1474.]
- [37] Li Xiaofeng, Yao Xiaojun, Sun Meiping, *et al.* Spatial-temporal changes of lake area in Northwest my country from 2000 to 2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 96-104.[李晓峰, 姚晓军, 孙美平, 等. 2000~2014年我国西北地区湖泊面积的时空变化[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 96-104.]
- [38] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Li Long, *et al.* Spatial-temporal variations of lake area in Hoh Xil region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 68(7): 886-896.[姚晓军, 刘时银, 李龙, 等. 近40年可可西里地区湖泊时空变化特征[J]. 地理学报, 2013, 68(7): 886-896.]
- [39] Chen S B, Liu Y F, Thomas A. Potential evapotranspiration trends and its spatial distributions on the Tibetan Plateau from 1961 to 2000[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(6): 990-1008.

Analysis on the Dynamic Changes and Driving Forces of Surface Water in the Three-River Headwater Region from 2001 to 2018

Jin Yanli¹, Xu Maolin¹, Gao Shuai², Wan Huawei³

(1. *University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;*

2. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

3. *Satellite Environment Center Ministry, of Environmental Protection, Beijing 100029, China)*

Abstract: Many current studies use remote sensing images to pay attention to the dynamic changes of surface water, but the changes obtained by different algorithms need to be further analyzed. Based on the GEE platform, taking Three River Headwater (TRH) as an example, using JRC global surface aquatic products to analyze the dynamic change of the surface water area of TRH from 2001 to 2018, and combining the atmospheric reanalysis products ERA5 and PERSIANN-CDR for driving force analysis. The results show that during the period 2001–2018, the permanent water area of the TRH increased from 6 403.61 km² to 7 473.09 km², and the increase was mainly distributed in the source area of the Yangtze River; the change of the permanent water area of the TRH has a significant positive correlation with the annual precipitation. There is no significant direct correlation between changes in the area of water bodies and temperature; Zhuonai Lake has been dam-breaking since 2011, causing its own shrinkage, leading to serious expansion of the Salt Lake downstream and the risk of dam-breaking.

Key words: GEE platform; Three River Headwater (TRH) ; Driving force; Surface water area; Dynamic change