水　利　学　报

2020年9月　SHUILI　XUEBAO　第51卷　第9期

文章编号:0559-9350(2020)09-1157-08

近20年黄河流域陆表水域面积时空变化特征研究

高吉喜，王永财，侯　鹏，万华伟，张文国

（生态环境部卫星环境应用中心，北京　100094）

摘要：黄河流域生态保护和高质量发展是国家重大战略之一。开展陆表水域的动态变化监测，有助于掌握黄河流域水资源分布与变化状况，对于了解人类活动对水资源的影响，保障流域生态安全具有重要意义。本文基于Landsat数据提取2000—2019年黄河流域陆表水域分布，分析了黄河流域陆表水域面积的动态变化状况，结果表明：(1)流域陆表水域空间分布不均衡，上游陆表水域面积占流域陆表水域总面积的60.3%、中下游占39.7%，其中青海省和内蒙古自治区的陆表水域面积占比最高，分别占40.3%和17.0%；(2)近20年间，流域陆表水域面积总体呈增加趋势，增幅约为49.0%，其中上游地区对流域陆表水域总面积增加的贡献度最大，达到47.7%，中游地区贡献度次之，为42.7%，下游地区贡献度较小，只有9.6%；(3)从流域来看，渭河和汾河流域的陆表水域面积增加较为明显，2000—2019年期间，分别扩大了113.17 km^2和55.75 km^2，增幅约为139.9%和152.4%。

关键词：黄河流域；陆表水域；遥感；水域面积监测

中图分类号：X87　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20200591

1　研究背景

黄河是中华民族的母亲河，也是我国第二长河。黄河流域在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位，2019年黄河流域涉及的地级行政区人口总量为3.24亿，占全国人口的23.3%，2018年的国内生产总值(GDP)为19.4万亿元，占全国GDP的比重为21.55%[1]。作为我国主要的能源基地，黄河流域煤炭资源占全国的70%，石油储量占50%。2019年9月18日黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上，习近平总书记的讲话中把黄河流域的生态保护和高质量发展同京津冀协同发展、长江经济带发展、粤港澳大湾区建设、长三角一体化发展一样，上升为重大国家战略[2]，进一步说明了黄河流域在国家安全中的重要地位。黄河流域以其占全国2.2%的径流量，承担着占全国15%的耕地和12%人口的供水任务[3-4]。在气候变暖和人类活动的双重影响下，黄河流域水资源的供需矛盾更加突出，已成为我国水资源极其短缺的地区之一[5-6]，并在未来仍将继续面临水资源严重短缺的严峻挑战[7-8]。在此背景下，坚持黄河流域生态保护和高质量发展，对黄河水资源综合开发利用和保护提出了更高的要求。为此，快速、及时、准确地监测黄河流域陆表水域分布和时空变化，对黄河流域水域水资源管理、生态保护政策的制定等有着重要的意义。

遥感技术是目前水资源调查常用的技术手段之一，具有覆盖面广、时效性强等优势，为大范围水体变化监测提供了全新的技术手段，光学遥感、微波雷达等技术的不断完善，遥感数据水体提取算法日趋完善[9-10]。同时，基于地理大数据平台在水体中的应用日益广泛[11-12]，使得遥感在水体变化、洪水淹没监测等方面发挥越来越重要的作用[13-23]。本文利用遥感技术，分析2000—2019年黄河

收稿日期：2020-08-02；网络首发时间：2020-09-10

网络首发地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200909.1149.001.html

基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFC0506506，2016YFC0500206，2018YFC0507200)

作者简介：高吉喜(1964-)，博士，研究员，主要从事区域生态学研究。E-mail：gjx@nies.org

流域陆表水域分布变化，以期为黄河流域水资源保护与利用的决策提供依据。

2 研究区概况、资料与方法

2.1 研究区概况 黄河流域包括青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省份，全长5464 km，流域面积79.6万km²，其中上游36.5万km²，中游40.8万km²，下游2.3万km²。黄河上游是指从河源到内蒙古自治区托克托县河口镇以上的黄河河段，主要位于青藏高原、宁蒙河套地区，但在提及上游陆地面积时，通常还包含鄂尔多斯地表内流区。为此，黄河上游区域覆盖青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区。黄河中游是指从河口镇到河南郑州花园口的河段，包括陕西省、山西省、内蒙古自治区、甘肃省、宁夏回族自治区、河南省。黄河下游指黄河干流自花园口到进入渤海的区域，包括河南省、山东省，如图1所示。黄河流域水资源二级分区总共8个，包括龙羊峡以上、龙羊峡至兰州、兰州至河口镇、河口镇至龙门、龙门至三门峡、三门峡至花园口、花园口以下、内流区，如图1所示。

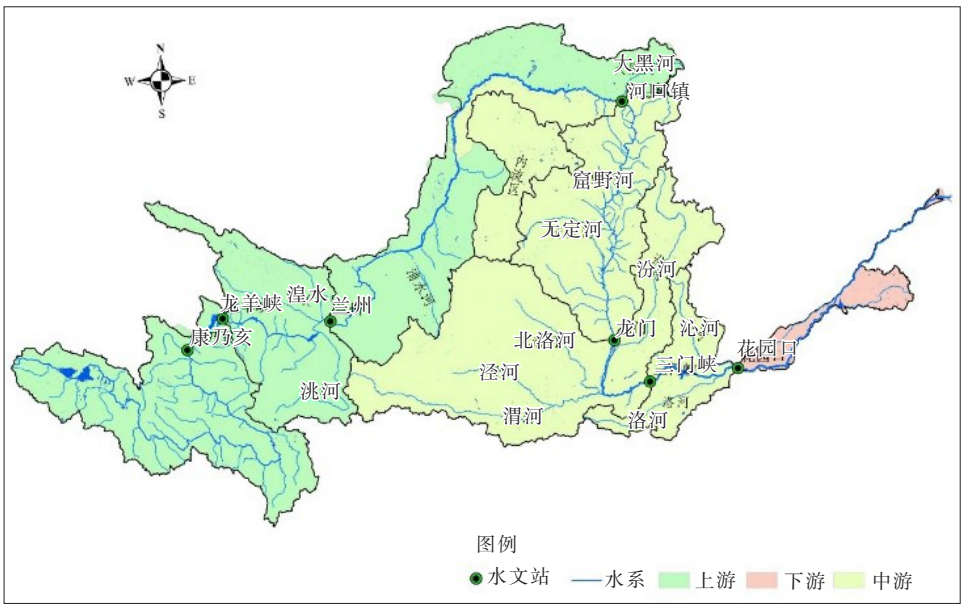


图1 黄河流域主要水系及河段分布

2.2 研究资料与方法 为获取研究区近20年水体信息，本文使用了研究区2000—2018年长时间序列的Landsat5、Landsat7、Landsat8的表面反射率Tier 1产品，该产品可以在谷歌地球引擎(Google Earth Engine，GEE)上进行查询、可视化和分析。通过使用Landsat 5、Landsat7和Landsat8表面反射代码(LarSRC)校正了大气散射和气溶胶吸收，包括云、阴影和每个像素的饱和度，获得了黄河流域2000—2019年共45 424景影像。水体提取具体过程如下。

首先，通过SRTM高程数据计算流域相对高程，具体计算方法可参考Donchyts等[24]的计算方法。基于Landsat表面反射率数据计算植被指数、水体指数、干裸指数，具体各个指数的计算方法如下：

$$NDVI=\frac{\rho_{\mathrm{NIR}}-\rho_{\mathrm{red}}}{\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{red}}} \tag{1}$$

$$MNDVI=\frac{\rho_{\mathrm{green}}-\rho_{\mathrm{SWIR}}}{\rho_{\mathrm{green}}+\rho_{\mathrm{SWIR}}} \tag{2}$$

$$AWEI=\rho_{\mathrm{blue}}+2.5\times\rho_{\mathrm{green}}-1.5\times\left(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{SWIR1}}\right)-0.25\times\rho_{\mathrm{SWIR2}} \tag{3}$$

$$DBSI = \frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{green}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{green}} - NDVI \tag{4}$$

式中：$NDVI$为归一化植被指数；$MNDWI$为改进的归一化差异水体指数；$AWEI$为自动水体提取指数；$DBSI$为干裸指数；ρ_{blue}为蓝波段；ρ_{green}为绿波段；ρ_{NIR}为近红外波；ρ_{red}为红波段；ρ_{SWIR}为短波红外波段；ρ_{SWIR1}为短波红外波段1；ρ_{SWIR2}为短波红外波段2。

其次，基于遥感水体指数、流域相对高程Hand根据阈值提取水体，并结合植被指数、干裸指数过滤非水体。

最后，利用每年每期水体数据构建水淹频度(一年中某一地点被水淹没的次数占有效观测次数的比例)，为了分析不同年份水域面积动态变化，利用62.0%的阈值提取水域分布，相当于一年62.0%时间淹水的范围。经过抽样和人工目视与每年多期遥感影像比对，提取水体分布与影像中水体分布一致。

3 结果与分析

3.1 流域陆表水域面积空间分布及变化特征 流域陆表水域空间面积分布分析表明，2014—2019年期间，黄河流域的陆表水域面积平均为6705.84 km²。从不同河段来看，河口镇以上的上游地区陆表水域面积平均为4046.03 km²，约占整个流域陆表水域面积的比例为60.3%；龙羊峡以上黄河源区的陆表水域面积平均为2572.20 km²，约占整个流域陆表水域面积的比例为38.4%；河口镇至花园口的中游地区陆表水域面积平均为1965.38 km²，约占整个流域陆表水域面积的比例为29.3%；花园口以下的下游地区陆表水域面积平均为694.44 km²，约占整个流域陆表水域面积的比例为10.4%。从不同省份来看，青海省和内蒙古自治区的比例最大，四川省的比例最小；青海省的陆表水域面积平均为2701.63 km²，占流域陆表水域面积的比例为40.3%；内蒙古自治区的陆表水域面积平均为1137.47 km²，占整个流域陆表水域面积的比例为17.0%；四川省的陆表水域面积平均为52 km²，占流域陆表水域面积的比例为0.8%。2000—2019年间，黄河流域的陆表水域面积总体呈增加趋势、约为103 km²/a，2015年之后，陆表水域面积增加趋势更加明显，如图2所示。

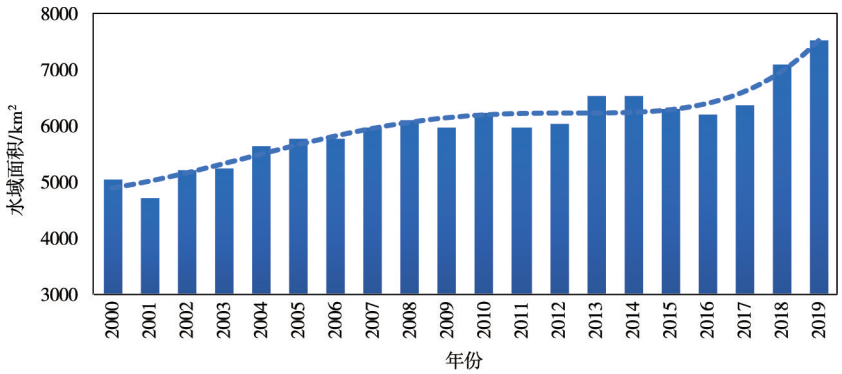


图2 黄河流域2000—2019年水域面积变化

从流域陆表水域面积变化来看，2019年，陆表水域面积为7532.06 km²，比2000年增加了约2475.68 km²，增加的面积相当于半个青海湖面积，增幅约为49.0%。从不同河段来看，上游地区的陆表水域面积每年增加约54 km²，近20年间陆表水域面积共增加约1181.50 km²、增加幅度为34.7%，对流域的陆表水域面积增加贡献度为47.7%；中游地区的陆表水域面积每年增加约44 km²，近20年间陆表水域面积共增加1058.50 km²，对流域的陆表水域面积增加贡献度为42.7%；下游地区的陆表水域面积每年增加约7.5 km²，近20年间陆表水域面积共增加约235.68 km²，对流域的陆表水域面积增加贡献度为9.6%。从不同省份来看，陆表水域面积增加最大的省份是青海省和内蒙古自治区，增幅最大

表1　黄河流域陆表水域面积变化及对流域水域面积变化的贡献度

	2000年面积/km²	2019年面积/km²	增加面积/km²	增加幅度/%	贡献度/%
青海省	2410.31	3030.11	619.80	25.71	25.7
四川省	48.48	68.36	19.88	41.01	0.8
甘肃省	341.93	436.19	94.26	27.57	3.9
宁夏回族自治区	237.80	422.63	184.83	77.73	7.7
内蒙古自治区	695.53	1276.16	580.63	83.48	24.1
陕西省	313.42	504.48	191.06	60.96	7.9
山西省	252.07	525.00	272.93	108.28	11.3
河南省	378.66	637.11	258.46	68.26	10.7
山东省	377.19	568.03	190.84	50.59	7.9

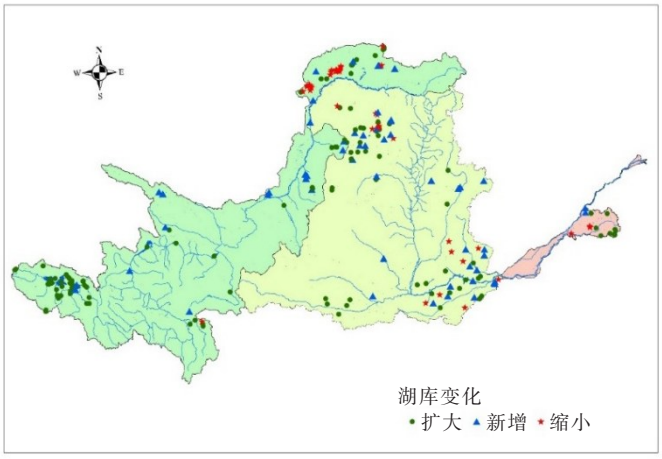


图3　2019年相比2000年湖库水域面积变化

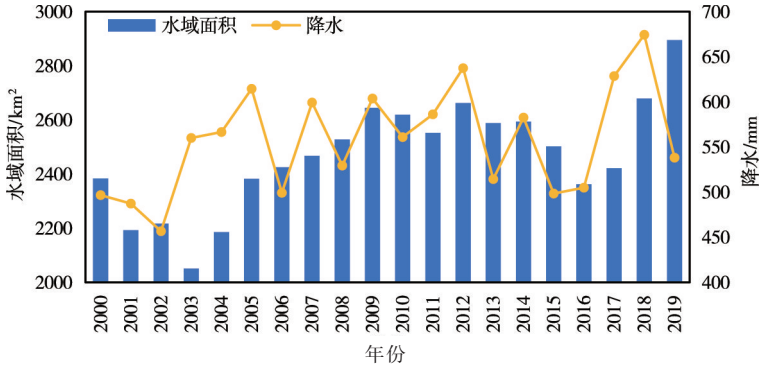


图4　黄河源区水域面积与年降水变化关系

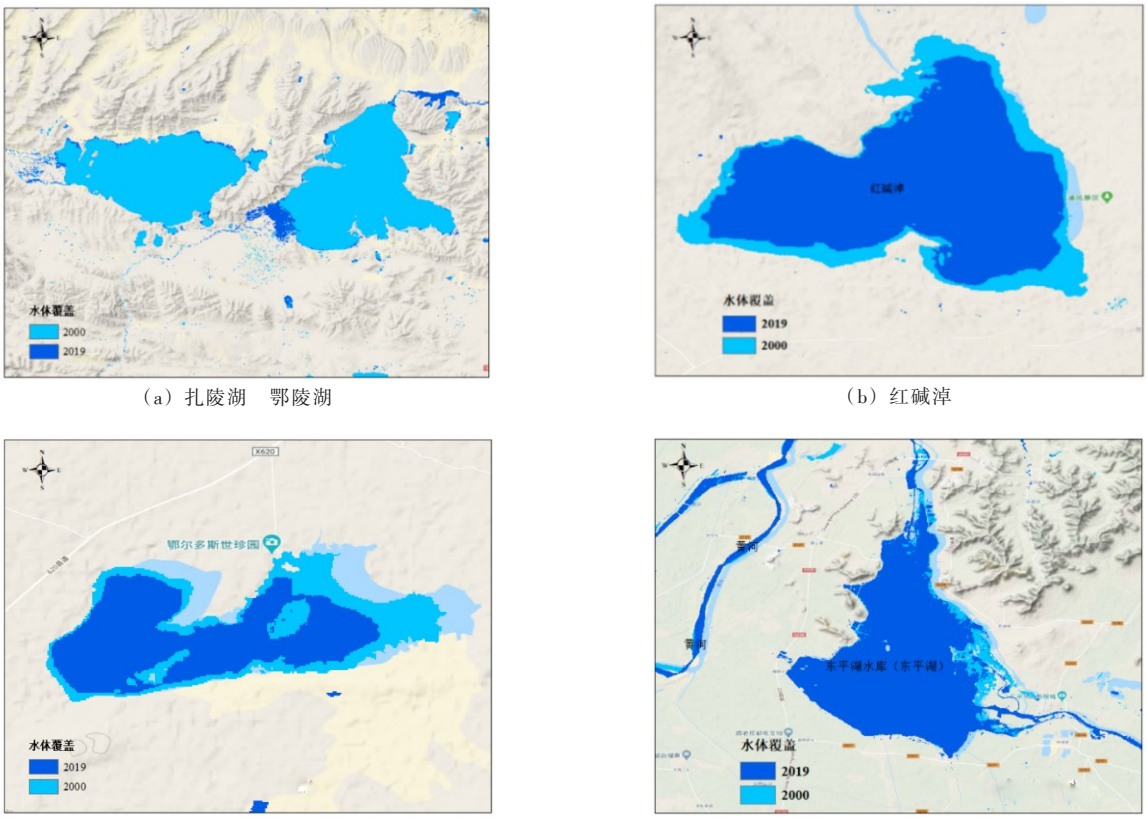
的是山西省；青海省的陆表水域面积增加约619.80 km²，对流域的陆表水域面积增加贡献度为25.7%；内蒙古自治区的陆表水域面积增加580.63 km²，对流域的陆表水域面积增加贡献度为24.1%；山西省的陆表水域面积增加幅度为108.28%，对流域的陆表水域面积增加贡献度为11.3%。如表1所示。

3.2　流域内主要湖库水域面积变化特征　与2000年相比，2019年水域面积大于1 km²的湖库中有217个发生了显著变化，空间分布如图3所示。其中，水域面积扩大的有115个，位于上游的66个、中游的40个、下游的9个；水域面积缩小的有45个，位于上游的26个、中游的16个、下游的3个；新增加的湖库有57个，位于上游的24个、中游的31个、下游的2个。

上游地区的湖库多数是高原湖泊，特点是面积小、数量多，两个面积较大湖泊为扎陵湖和鄂陵湖。龙羊峡以上的黄河源区超过1 km²的湖库中，面积发生变化的有46个，其中面积扩大的湖库有45

个，这种变化与降水变化趋势基本一致，如图4所示。龙羊峡-龙门镇的干旱半干旱区河段的面积大于1 km²湖库中，水域面积缩小的有33个；中游内流区是鄂尔多斯高原盐湖的聚集区，面积大于1 km²的32个湖库中，面积缩小的有8个。通过对内流区重点53个湖泊进行分析，发现有35个存在不同程度的开发活动，无序的开发活动和水开采可能加剧区域水资源紧张程度。2000—2019年间，下游地区的湖库水面积增加以人工水库、水塘为主，大于1 km²的新增加和面积扩大的人工水域有11个。

作为源头区的重要湖泊，近20年间扎陵湖和鄂陵湖水域面积增加80 km²，入湖径流量增加是扎陵湖、鄂陵湖水面扩大的主要原因。红碱淖湿地作为重要的沙漠淡水湖和遗鸥繁殖栖息地，近20年间湿地面积总体在下降，2000—2015年间减少约34%。同时鄂尔多斯湿地面积也在减少，减少约85%。初步分析表明，导致湿地面积下降的主要原因有气候持续暖干、周边水库建设和煤矿开采共同导致的补给河流被截断，地下水层遭到破坏[25-28]，2015年采取补水措施之后红碱淖湿地和鄂尔多斯湿地水域面积逐年增加。作为国家南水北调东线工程重要枢纽，东平湖水域面积在2014年以前先增后减，2015年之后水域面积持续增加，2019年的水域面积增加了2.4 km²。如图5所示。



（a）扎陵湖　鄂陵湖　（b）红碱淖　（c）鄂尔多斯湿地　（d）东平湖

图5　黄河流域典型湖库水域面积变化

3.3　流域内主要子流域的变化特征　作为黄河生态保护与高质量发展的关注区域，渭河和汾河子流域的水文特征和水环境特征在近20年间均发生了很大变化。在渭河流域，2000—2019年，渭河流域陆表水域面积扩大了113.17 km²，增幅约为139.9%，约有62.3%区域内植被覆盖度呈明显增加趋势。根据水文统计年鉴资料，渭河流域华县水文监测站的含沙量连续多年下降，下降幅度达到67.1%。在汾河流域，2000—2019年，汾河流域陆表水域面积扩大了55.75 km²、增幅约152.4%，约有69.7%区域植被覆盖度呈明显增加趋势。根据水文统计年鉴，流域内河津站水文监测的含沙量连续多年下

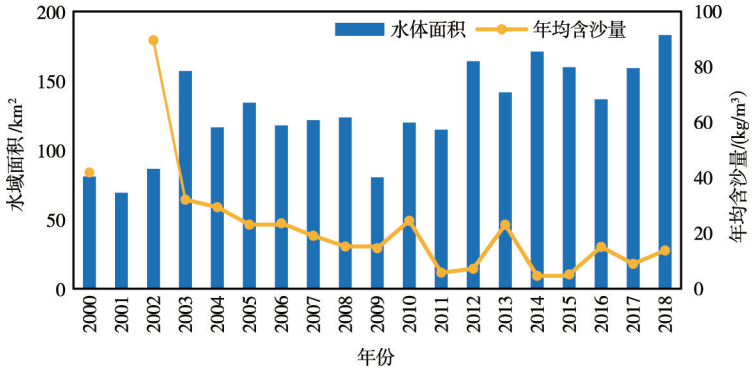


图6　2000—2019年渭河流域水域面积和含沙量变化

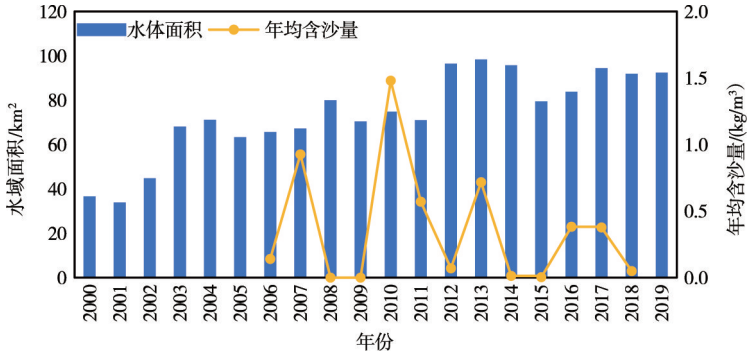


图7　2000—2019年汾河流域水域面积和含沙量变化

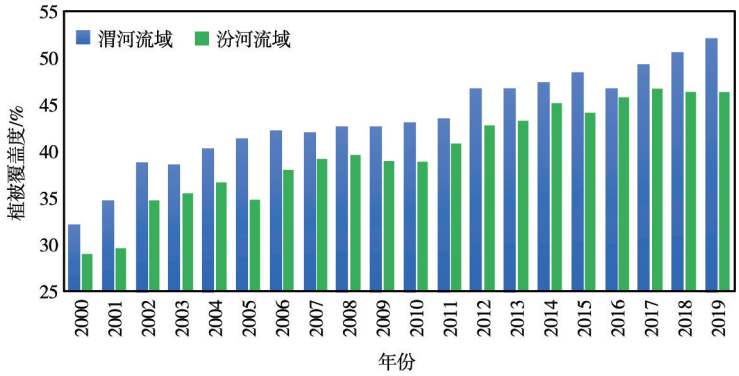


图8　2000—2019年渭河和汾河流域植被覆盖度变化

降、下降幅度达到65.0%。参见图6、图7和图8。

4　主要结论

本文基于卫星遥感数据提取了2000—2019年黄河流域陆表水域分布，开展了陆表水域面积的动态变化监测，以期为黄河流域水资源保护与利用的决策提供依据，对于了解全球变化和人类活动对水资源的影响具有重要意义。

(1)流域陆表水域空间分布不均衡，空间分布主要集中在上游。近5年，黄河流域陆表水域平均面积为6705.84 km²。作为黄河流域水源涵养区和干流源头区，上游陆表水域面积约为4046.03 km²，占黄河流域陆表水域总面积的60.3%；作为黄河流域重要水土保持区，中游地区陆表水域面积约为1965.38 km²，占黄河流域陆表水域总面积的29.3%。下游地区陆表水域面积约为694.44 km²，占黄河流域陆表水域总面积的10.4%。从不同省份来看，黄河流域陆表水域面积的比例，青海省最大、内蒙古次之、四川省最小。

(2)近20年流域陆表水域面积呈动态增加趋势。2019年流域陆表水域总面积为7532.06 km^2，比2000年增加了2475.68 km^2，增幅为49.0%。其中，上游黄河源区湖库面积整体在扩大，中上游干旱半干旱区部分湖泊面积在萎缩，下游人工库塘在扩大。2000—2019年期间，上游地区对流域陆表水域总面积增加贡献度达到47.7%，中游地区贡献度为42.7%，下游地区贡献度为9.6%。从省域来看，青海省的流域陆表水域面积增加最大，增加约619.80 km^2，对流域陆表水域总面积增加的贡献度为25.7%。

(3)2000—2019年期间，渭河和汾河流域的陆表水域面积分别扩大了113.17 km^2和55.75 km^2，增幅约为139.9%和152.4%。近年来，渭河和汾河流域有60.0%以上地区的植被覆盖度呈现出明显的改善，导致含沙量持续下降，下降幅度分别为67.1%和65.0%。

参 考 文 献：

[1] 徐勇，王传胜．黄河流域生态保护和高质量发展：框架、路径与对策[J]．中国科学院院刊，2020，35(7)：875-883．

[2] 习近平．在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J]．中国水利，2019(20)：1-3．

[3] 汤秋鸿，刘星才，周园园，等．“亚洲水塔”变化对下游水资源的连锁效应[J]．中国科学院院刊，2019，34(11)：1306-1312．

[4] 贾绍凤，梁媛．新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J]．资源科学，2020，42(1)：29-36．

[5] 夏军，彭少明，王超，等．气候变化对黄河水资源的影响及其适应性管理[J]．人民黄河，2014，36(10)：1-15．

[6] 刘昌明，田巍，刘小莽，等．黄河近百年径流量变化分析与认识[J]．人民黄河，2019，41(10)：11-15．

[7] 马柱国，符淙斌，周天军，等．黄河流域气候与水文变化的现状及思考[J]．中国科学院院刊，2020，35(1)：52-60．

[8] 张建云，贺瑞敏，齐晶，等．关于中国北方水资源问题的再认识[J]．水科学进展，2013，24(3)：303-310．

[9] SARP G，OZCELIK M．Water body extraction and change detection using time series：A case study of Lake Burdur，Turkey[J]．Journal of Taibah University for Science，2016，11(3)：381-391．

[10] ACHARYA T D，SUBEDI A，LEE D H．Evaluation of Machine Learning Algorithms for Surface Water Extraction in a Landsat 8 Scene of Nepal[J]．Sensors，2019，19(12)．doi:10.3390/S19122769.

[11] 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．

[12] YANG X C，QIN Q M，HERVÉ YÉSOU，et al．Monthly estimation of the surface water extent in France at a 10-m resolution using Sentinel-2 data[J]．Remote Sensing of Environment，2020，244：111803．

[13] 周岩，董金玮．陆表水体遥感监测研究进展[J]．地球信息科学学报，2019，21(11)：1768-1778．

[14] 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，2014，8(8)：701-714．

[15] 马建威，黄诗峰，许宗男．基于遥感的1973-2015年武汉市湖泊水域面积动态监测与分析研究[J]．水利学报，2017，48(8)：903-913．

[16] FEYISA G L，MEILBY H，FENSHOLT R，et al．Automated Water Extraction Index：A new technique for surface water mapping using Landsat imagery[J]．Remote Sensing of Environment，2014，140：23-35．

[17] 张行清，丁美花，陈燕丽，等．基于HJ-1卫星遥感的广西水库水面监测[J]．水利学报，2014，45(4)：427-434．

[18] HUANG C，CHEN Y，ZHANG S，et al．Detecting，extracting，and monitoring surface water from space using optical sensors：A review[J]．Reviews of Geophysics，2018，56：333-360．

[19] 宋平，刘元波，刘燕春．陆地水体参数的卫星遥感反演研究进展[J]．地球科学进展，2011，26(7)：731-740．

[20] 王庆，廖静娟．基于SAR数据的鄱阳湖水体提取及变化监测研究[J]．国土资源遥感，2010，22(4)：91-97．

[21] CONDE F C，MARA D E，MATA MUOZ．Flood monitoring based on the study of Sentinel-1 SAR Images：the

Ebro River case study[J]. Water, 2019, 11(12). doi: 10.3390/W11122454.
[22] MOHAMMADIMANESH F, SALEHI B, MAHDIANPARI M, et al. Wetland water level monitoring using interferometric synthetic aperture radar (InSAR): A review[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2018, 44(4): 247-262.
[23] 谷鑫志，曾庆伟，谌华，等. 高分三号影像水体信息提取[J]. 遥感学报，2019，23(3)：555-565.
[24] DONCHYTS G, WINSEMIUS H, SCHELLEKENS J, et al. Global 30m Height Above the Nearest Drainage[C]// European Geosciences Union 2016. 2016.
[25] 尹立河，张茂省，董佳秋. 基于遥感的毛乌素沙地红碱淖面积变化趋势及其影响因素分析[J]. 地质通报，2008(8)：1151-1156.
[26] 赵宁，马超，杨亚莉. 1973-2013年红碱淖水域水质变化及驱动力分析[J]. 湖泊科学，2016，28(5)：982-993.
[27] 邢小军，于向芝，白兆勇，等. 鄂尔多斯遗鸥自然保护区湿地水量平衡分析[J]. 干旱区资源与环境，2009，23(6)：100-103.
[28] 何芬奇，邢小军，白兆勇，等. 鄂尔多斯高原湿地危情及水资源永续利用的探讨[J]. 湿地科学与管理，2008(1)：56-58.

Temporal and spatial variation characteristics of land surface water area in the Yellow River basin in recent 20 years

GAO Jixi, WANG Yongcai, HOU Peng, WAN Huawei, ZHANG Wenguo
(*Satellite Environmental Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing* 100094, *China*)

Abstract: Ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin is one of the major national strategies in China. Monitoring the dynamic change of land surface water is helpful to understand the distribution and change of water resources in the Yellow River basin, and it is of great significance to understand the impact of global change and human activities on water resources. Based on Landsat remote sensing data, this paper extracts the land surface water area distribution of the Yellow River basin from 2000 to 2019, and analyzes the changes of the land surface water area in the Yellow River basin. The results show that: (1) the spatial distribution of the land surface water area in the Yellow River basin is not balanced, and land surface water area in the upper reaches accounts for 60.3% of the total land surface water area in the Yellow River basin, and the middle and lower reaches accounted for 39.7%. The land surface water area of Qinghai and Inner Mongolia accounted for 40.3% and 17.0% of the total land surface water area, respectively. (2) In recent 20 years, land surface water area of the basin showed an increasing trend, with an increase rate of 49.0%. The contribution of the upstream area to the total land surface water area is about 47.7%, 42.7% in the middle reaches and 9.6% in the lower reaches, respectively. About the province, the largest contribution of increase of land surface water area was found in Qinghai, accounting for 25.7% of the total land surface water area. (3) From 2000 to 2019, the land surface water area of Weihe River basin and Fenhe River basin expanded by 113.17 square kilometers and 55.75 square kilometers respectively, with an increase of 139.9% and 152.4%.

Keywords: Yellow River basin; land surface water; remote sensing; water area monitoring

（责任编辑：杨　虹）