

1986—2019年黄河流域地表水体动态变化及其影响因素

李崇巍^{1,2}, 王志慧^{2,3}, 汤秋鸿⁴, 胡青峰¹, 肖培青², 吕锡芝^{2,3}, 刘 杨²

(1. 华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 郑州 450046; 2. 黄河水利科学研究院水利部黄土高原水土保持重点实验室, 郑州 450003; 3. 黄河水利科学研究院河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室, 郑州 450003; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 黄河流域水资源严重短缺, 对地表水面积(SWA)开展动态监测有助于明晰地表水资源时空变化规律及其驱动机制。本文基于 Google Earth Engine 云平台技术, 综合利用混合指数规则集、线性斜率、多元线性回归和偏微分分解等方法, 揭示了黄河流域SWA的年际变化及其空间分异规律, 厘定了降雨、温度、植被叶面积指数、前一年SWA和水利水保措施与人类用水活动等其它因素对SWA的影响量和相对影响率。结果表明: ① 地表水体总体识别精度为97%。1986—2019年全流域永久性SWA年际增长速率49.82 km²/a, 其中主河道区贡献83.2%, 且2001年为SWA变化由减小到增加的转折点; 季节性SWA年际减小速率-79.2 km²/a, 其中子流域区贡献61.8%。② 除红碱淖SWA呈显著持续减小外, 其他主要天然湖泊SWA均较为稳定; 6个主河道大型水库中, 小浪底和龙羊峡水库SWA增加趋势最为显著; 在86个子流域中, 50个子流域SWA呈增加趋势, 主要分布于流域中下游。③ 非气象要素对SWA的影响均大于气象要素影响作用。降雨对SWA的增加作用最小, 温度上升造成中游地区SWA减小, 但却导致源区SWA增加。植被叶面积指数增加导致主河道区和子流域区SWA变化斜率分别增加10.12 km²/a和7.26 km²/a。其他因素对子流域区SWA增加呈负作用, 这表明子流域内剧烈用水活动对SWA的减小作用大于水利水保措施对SWA的增加作用, 但是分布于主河道中的大型梯级水库调蓄功能可显著提升其对主河道区SWA的增加作用。

关键词: 黄河流域; 地表水体面积; Google Earth Engine (GEE); 时空变化; 影响因素分析

DOI: 10.11821/dlxb202205008

1 引言

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^[1-2], 同时还承担着向流域外部分地区远距离调水的任务。黄河流域人均河川径流量473 m³, 不足全国平均水平的1/4, 在气候变暖和人类活动的双驱动影响作用下, 黄河流域水资源的供需矛盾日益突出, 已成为中国水资源极其短缺的地区之一^[3-4], 并在未来仍将继续面临水资源严重短缺的严峻挑战^[5-6]。2019年9月18日黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上, 习近平总书记把黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略^[7]。

收稿日期: 2021-08-23; 修订日期: 2022-03-18

基金项目: 中国科协青年人才托举工程(2017QNRC023); 国家自然科学基金项目(51779099, 42041006); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2020-09) [Foundation: Young Elite Scientist Sponsorship by CAST, No.2017QNRC023; National Natural Science Foundation of China, No.51779099, No.42041006; Special Research Fund of the YRIHR, No.HKY-JBYW-2020-09]

作者简介: 李崇巍(1995-), 男, 黑龙江宝清人, 硕士生, 主要从事水文遥感研究。E-mail: lxy327115054@163.com

通讯作者: 王志慧(1985-), 男, 山西太原人, 博士, 高级工程师, 主要从事水循环与生态环境遥感研究。

E-mail: wzh8588@aliyun.com

地表水是陆地生命的重要水源,是维持生态系统稳定和保持经济社会可持续发展的关键环境因子,因此对黄河流域地表水面积(Surface Water Area, SWA)动态变化进行监测具有非常重要的意义。

由于光学遥感数据容易获取、处理简易,且水体提取精度较高,已成为大区域范围地表水自动化动态监测的主要数据源。单波段地表反射率阈值法最早用于地表水体自动提取^[8-9],该方法虽简单易行,但难以提取小面积地表水体,且阴影和水体的混分现象严重^[10]。Mcfeeters^[11]提出了归一化差分水体指数(NDWI),并在全球范围内得到应用。随后徐涵秋^[12]基于该指数提出了改进的归一化差异水体指数(MNDWI),显著提高了建筑物背景下的水体提取精度,且成为目前应用最为广泛的水体指数。虽阈值法运算效率高,但水体和非水体的最优阈值却难以精确确定,因而支持向量机(SVM)、最大似然(ML)、随机森林(RF)^[13-14]等监督分类算法也被用于水体分类,但这类算法计算过程耗时,且提取精度受训练样本和算法参数的影响较大。Zou等^[15]基于MNDWI、归一化植被指数(NDVI)和增强植被指数(EVI),构建了自动提取水体的混合指数规则集,该规则集不需要对MNDWI设定阈值,且比已有水体指数对湿地水体的提取效果更优^[16],并在全球和洲际尺度得到广泛应用^[17]。随着近年来Google Earth Engine(GEE)地理计算云平台技术的快速发展,基于长时序海量中分辨率遥感数据(如:Landsat、Sentinel等)的全球或洲际大范围区域地表覆盖制图能力获得跨越式提高^[18-19],尤其是地表水体动态变化制图^[20]。Pekel等^[20]利用GEE云平台技术,生产了第一个30 m分辨率全球地表水连续动态变化遥感产品。Mueller等^[21]、Zhou等^[22]和Wang等^[23]利用GEE云平台技术分别定量分析了澳大利亚、内蒙古高原和中国区域的SWA动态变化及其影响因素。

目前在黄河流域开展的SWA动态变化遥感监测研究主要集中在河套灌区^[24]、红碱淖^[25]、黄河源区^[26]等局部地区。针对整个黄河流域范围内SWA动态变化的研究较少,高吉喜等^[27]利用GEE云平台分析了整个黄河流域2000—2018年SWA时空变化特征,但目前黄河流域SWA动态变化的影响机制及其空间分异规律仍不明晰。为此,本文基于GEE云平台技术,利用混合指数规则集方法,生产1986—2019年的黄河流域30 m分辨率地表水体频率时序数据集,揭示整个黄河流域、主河道区、子流域、不同区间和主要湖泊水库的SWA的时空变化特征,定量计算降雨、温度、植被和其他因素对SWA变化趋势的影响作用。以为黄河流域地表水资源管理与优化配置,维持生态系统和经济社会用水可持续发展提供理论基础与技术支持。

2 研究区概况与数据

2.1 研究区概况

黄河是中国第二大河流,全长5464 km,黄河流域多年平均降雨量300~600 mm,多年平均温度-4~14 ℃,多年平均径流量580亿m³,多年平均输沙量16亿t^[28]。黄河上游为黄河径流量主要来源区,中游为黄河泥沙主要来源区。历史上气候变化与剧烈人类活动导致上中游地区生态系统严重退化。为改善黄河流域生态环境,1999年中国开始在黄河上中游地区相继实施重大生态保护修复工程,经过20年的水土保持与生态环境治理,流域下垫面已发生重大变革,上游水源涵养能力稳定提升,中游蓄水保土能力显著增强。除此之外,为了黄河调水调沙和水资源优化配置,国家已在黄河干流上相继修建了多个大型水库(图1)。

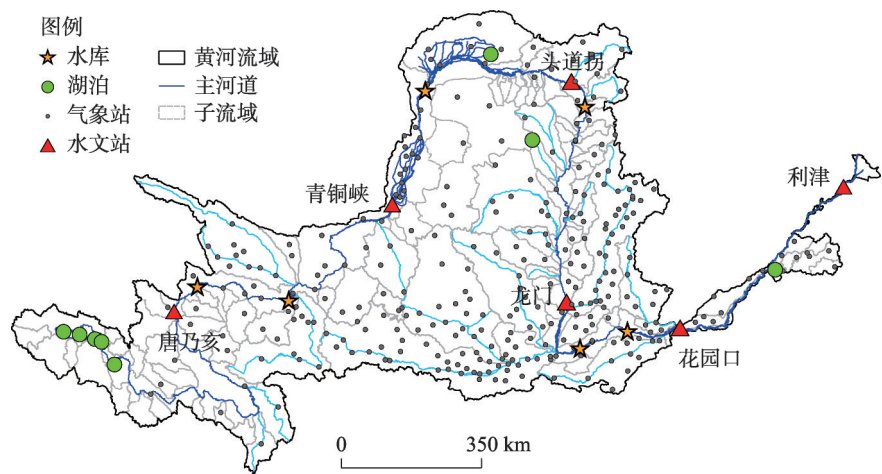


图1 黄河流域河湖水库与气象水文观测站点分布

Fig. 1 Spatial distribution of natural lakes, reservoirs and meteorological and gauging stations in the Yellow River Basin

2.2 数据

本文利用1986—2018年的Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM+和Landsat 8 OLI数据,植被叶面积指数(LAI)选用GLASS产品(<http://www.glass.umd.edu/>),水库数据来自全球水库和大坝数据库GranDv1.3(<http://globaldamwatch.org/grand/>),湖泊数据来自国家青藏高原科学数据中心的湖泊数据集(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)。气象站点实测数据下载于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)。所有数据的详细信息见表1。

表1 数据详细参数介绍			
Tab. 1 All the datasets used in this study			
数据	时间范围	空间分辨率	时间分辨率
Landsat 5 TM	1986—2012	30 m	15 d
Landsat 7 ETM+	1999—2002	30 m	15 d
Landsat 8 OLI	2013—2019	30 m	15 d
ASTER DEM	—	30 m	—
GLASS	2000—2019	1 km	8 d
GranD(v1.3)	1986—2019	—	1 a
China lake dataset	1986—2019	—	1 a
降雨量、温度	1986—2019	295个站点	1 d

本文基于GEE平台,利用Landsat大气辐射校正算法(Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System, LEDAPS)^[29]生产了1986—2019年覆盖整个黄河流域(65景)的所有可用Landsat系列卫星数据的地表反射率,并利用F-mask算法^[30-31]提取云、云阴影和雪覆盖等无效观测像元。1986—2019年Landsat像元尺度的有效观测次数在黄河流域的空间分布见图2,北部区域有效观测次数大于云覆盖较多的南方区域,观测次数高值出现在卫星观测重叠区域,低值主要分布在黄河源区。Landsat不同有效观测次数在黄河流域面积占比的年际变化如图3。利用AUSPLINE气象专业插值软件^[32]将降雨和温度站点数据进行空间插值。

3 方法

3.1 地表水体自动提取及验证方法

本文采用混合指标规律集^[16]提取地表水体,该方法基于水体区域的水体信号大于植被信号的原理,利用MNDWI>NDVI或者MNDWI>EVI,且EVI<0.1这一规则提取水体范围。不同指数计算公式如下:

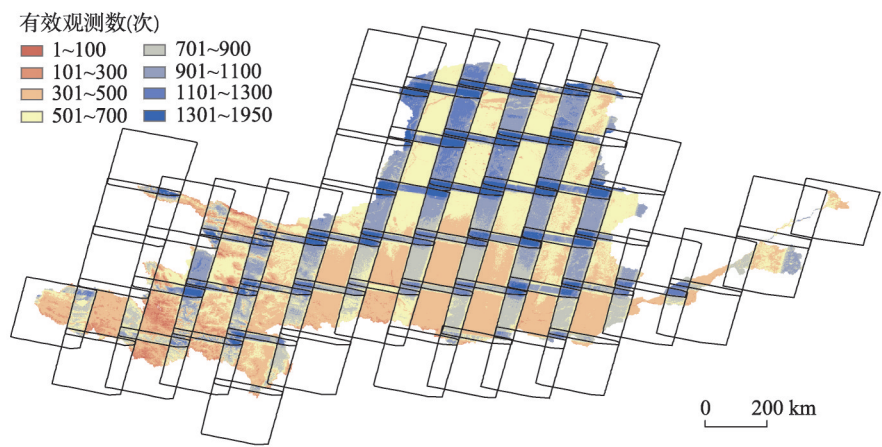


图2 1986—2019年Landsat有效观测次数在黄河流域的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the frenqucy of clear Landsat observations over the Yellow River Basin from 1986 to 2019

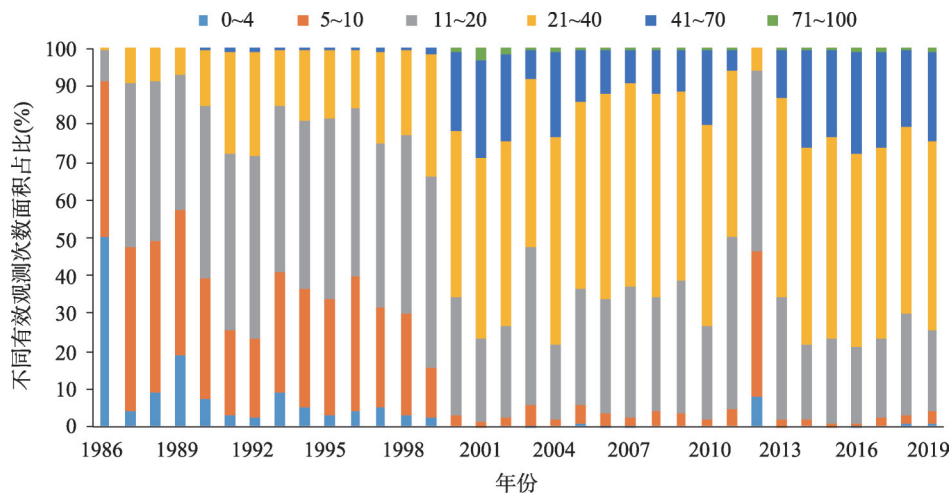


图3 Landsat不同有效观测次数在黄河流域的面积占比的年际变化

Fig. 3 Interannual variation of the area ratio of different levels of clear Landsat observations over the Yellow River Basin

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

$$MNDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{green} + \rho_{SWIR1}} \tag{2}$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + 6 \times \rho_{red} - 7.5 \times \rho_{blue} + 1} \tag{3}$$

式中： ρ_{red} 、 ρ_{green} 、 ρ_{blue} 、 ρ_{NIR} 和 ρ_{SWIR1} 分别为红光、绿光、蓝光、近红外和短波红外波段的地表反射率。

由于混合光谱指数方法提取水体仍存在大量山体阴影。本文参考前人研究结果^[33]，利用小于地形坡度8°规则剔除水体中山体阴影，改善光谱指数方法提取结果。将年内最终识别为水体的次数除以有效观测次数计算得到水体频率（Water Inundation Frequency, WIF），根据前人经验^[34-35]将25% < WIF ≤ 75%的水体定义为季节性水体，将WIF>75%的

水体定义为永久性水体。WIF计算公式如下:

$$WIF = \frac{W}{N} \times 100\% \quad (4)$$

式中: N 为一年内所有有效观测次数; W 为识别为水体的次数。

基于 Google Earth 高分辨率影像, 在黄河流域范围选取了 995 个水体样本, 类型包括河道、湖泊、水库、淤地坝等。由于 Google Earth 中的高分辨率影像均为 2019—2020 年获取影像, 则本文利用 Google Earth 水体样本对 2019 年 Landsat 时序数据所提取的地表水体结果进行验证, 且对基于不同 WIF 阈值 (0.05、0.10、0.15、0.25、0.35、0.50、0.75) 提取的水体结果分别开展精度验证。

3.3 SWA 趋势斜率分析方法

永久性或季节性水体的 SWA 时间序列年际变化率 Slope 计算公式如下:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times X_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n X_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (5)$$

式中: X_i 为第 i 年的 SWA 值; n 为总年数; 当 $slope > 0$ 时, SWA 呈增加趋势, 当 $slope < 0$ 时, SWA 呈减小趋势; 当通过 $\alpha < 0.05$ 显著性水平的 F 检验时, SWA 呈显著变化趋势。

由于整个流域 SWA 是由不同子区域的 SWA 相加求和得到, 因此子区域 SWA 年际变化对整个流域 SWA 年际变化率的贡献率可用公式 (6) 计算得到。

$$\mu_{SWA_i} = \frac{Slope_{SWA_i}}{Slope_{SWA}} = \frac{Slope_{SWA_i}}{\sum_{i=1}^n Slope_{SWA_i}} \quad (6)$$

式中: $Slope_{SWA}$ 为整个流域 SWA 的年际变化率; $Slope_{SWA_i}$ 为第 i 个子区域 SWA 的年际变化率; n 为子区域个数; μ_{SWA_i} 为第 i 个子区域对整个流域 SWA 年际变化率的贡献率。

3.4 SWA 年际变化趋势定量归因方法

根据前人研究经验^[23, 31], 本文选取当年的降水 (Pre)、温度 ($Temp$)、植被叶面积指数 (LAI) 和前一年的 SWA (Pre_SWA), 以及其他因素 ($Resi$) (包括修建水库和淤地坝、引水灌溉、工业和生活供水等) 作为影响永久性水体 SWA 变化的主要驱动因素。为了解决具有趋势的 SWA 与各影响要素之间相关性高估问题, 本文首先对所有时序数据进行去趋势处理^[36], 再利用多元回归分析求解 SWA 对不同影响要素的敏感性系数:

$$de_SWA = \beta_0 + \beta_{pre} \times de_Pre + \beta_{temp} \times de_Temp + \beta_{LAI} \times de_LAI + \beta_{pre_SWA} \times de_Pre_SWA \quad (7)$$

式中: de_SWA 、 de_Pre 、 de_Temp 、 de_LAI 、 de_Pre_SWA 为去趋势后的 SWA、 Pre 、 $Temp$ 、 LAI 和 Pre_SWA 时间序列; β_{pre} 、 β_{temp} 、 β_{LAI} 、 β_{pre_SWA} 分别表示 SWA 对 Pre 、 $Temp$ 、 LAI 、 Pre_SWA 的敏感性系数。

本文将 SWA 净变化斜率认为是由 Pre 、 $Temp$ 、 LAI 、 Pre_SWA 和其他要素所引起的 SWA 变化斜率之和, 采用微分形式表达即为:

$$\frac{dSWA}{dt} = \frac{dSWA_{pre}}{dt} + \frac{dSWA_{temp}}{dt} + \frac{dSWA_{LAI}}{dt} + \frac{dSWA_{pre_SWA}}{dt} + \frac{dSWA_{Resi}}{dt} \quad (8)$$

式中: $\frac{dSWA}{dt}$ 为 SWA 净变化斜率; $\frac{dSWA_{pre}}{dt}$ 、 $\frac{dSWA_{temp}}{dt}$ 、 $\frac{dSWA_{LAI}}{dt}$ 、 $\frac{dSWA_{pre_SWA}}{dt}$ 、 $\frac{dSWA_{Resi}}{dt}$ 分别表示 P 、 $Temp$ 、 LAI 、 Pre_SWA 和其他要素对变化的影响量。

依据全微分的基本思想,对公式(8)中影响因素对SWA趋势的影响量进行偏微分分解可得:

$$\begin{aligned} \frac{dSWA}{dt} = & \frac{\partial SWA}{\partial Pre} \times \frac{dPre}{dt} + \frac{\partial SWA}{\partial Temp} \times \frac{dTemp}{dt} + \frac{\partial SWA}{\partial LAI} \times \\ & \frac{dLAI}{dt} + \frac{\partial SWA}{\partial Pre_SWA} \times \frac{dPre_SWA}{dt} + \frac{dSWA_{Resi}}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\frac{dPre}{dt}$ 、 $\frac{dTemp}{dt}$ 、 $\frac{dLAI}{dt}$ 、 $\frac{dPre_SWA}{dt}$ 分别为 Pre 、 $Temp$ 、 LAI 和 Pre_SWA 的年变化率; $\frac{\partial SWA}{\partial Pre}$ 、 $\frac{\partial SWA}{\partial Temp}$ 、 $\frac{\partial SWA}{\partial LAI}$ 、 $\frac{\partial SWA}{\partial Pre_SWA}$ 分别为公式(7)求解出的SWA对 Pre 、 $Temp$ 、 LAI 、 Pre_SWA 的敏感性系数; $\frac{dSWA_{Resi}}{dt}$ 可由残差法计算得到。

各影响要素对SWA变化的相对影响率采用式(9)计算:

$$Contr.X_i = \frac{\left| \frac{dSWA_{X_i}}{dt} \right|}{\sum_{i=1}^n \left| \frac{dSWA_{X_i}}{dt} \right|} \times 100\% \quad (10)$$

式中: $Contr.X_i$ 表示第 i 个影响要素 (Pre 、 $Temp$ 、 LAI 、 Pre_SWA 和 $Resi$) 对SWA变化的相对影响率。

4 结果与讨论

4.1 黄河流域地表水体提取结果与精度验证

本文计算了黄河流域1986—2019年逐年的水体频率(WIF),黄河流域各类型典型地表水体类型的WIF如图4所示。从图4中可明显看出,红碱淖SWA呈逐渐减小的变化趋势;龙羊峡水库SWA则保持持续增加;小浪底水库自修建之后,水库蓄水导致SWA突增;乌梁素海由于受降雨和人工引水等影响作用较大,SWA年际波动剧烈;20世纪80年代修建的淤地坝不仅可淤积泥沙,也起到一定蓄水功能,坝地区域的SWA呈逐渐增加趋势;下游开封段游荡河势变化显著,2015年后河势相对稳定。结果表明,水体提取算法可有效捕捉各类型地表水体的年际动态变化过程。

利用Google Earth样本,对基于不同WIF阈值提取的地表水体进行精度验证,结果表明以0.05、0.10、0.15、0.25、0.35、0.50、0.75为WIF阈值的识别精度分别为97.33%、97.23%、97.17%、97.08%、97.00%、96.86%和96.38%(图5),总体识别精度的平均值高达97.00%,因而本文所用地表水体提取算法具有较高的可信度。

4.2 黄河流域SWA动态变化规律

4.2.1 黄河流域总体SWA动态变化 1986—2019年黄河流域多年平均永久性SWA为5482.79 km²,年际增长速率为49.82 km²/a。2001年为变化转折点,1986—2000年SWA呈减少趋势(-55.8 km²/a),2001—2019年呈显著上升趋势(111 km²/a),这与高吉喜等^[27]研究结果基本一致。2019年SWA比1986年增加了1334.76 km²,增长幅度23.11%。1986—2019年主河道区永久性水体年际增长速率为41.46 km²/a,对全流域永久性SWA年际变化的贡献率为83.2%(图6a)。

黄河流域多年平均季节性SWA为4208.04 km²,年际变化速率-79.2 km²/a。2019年季

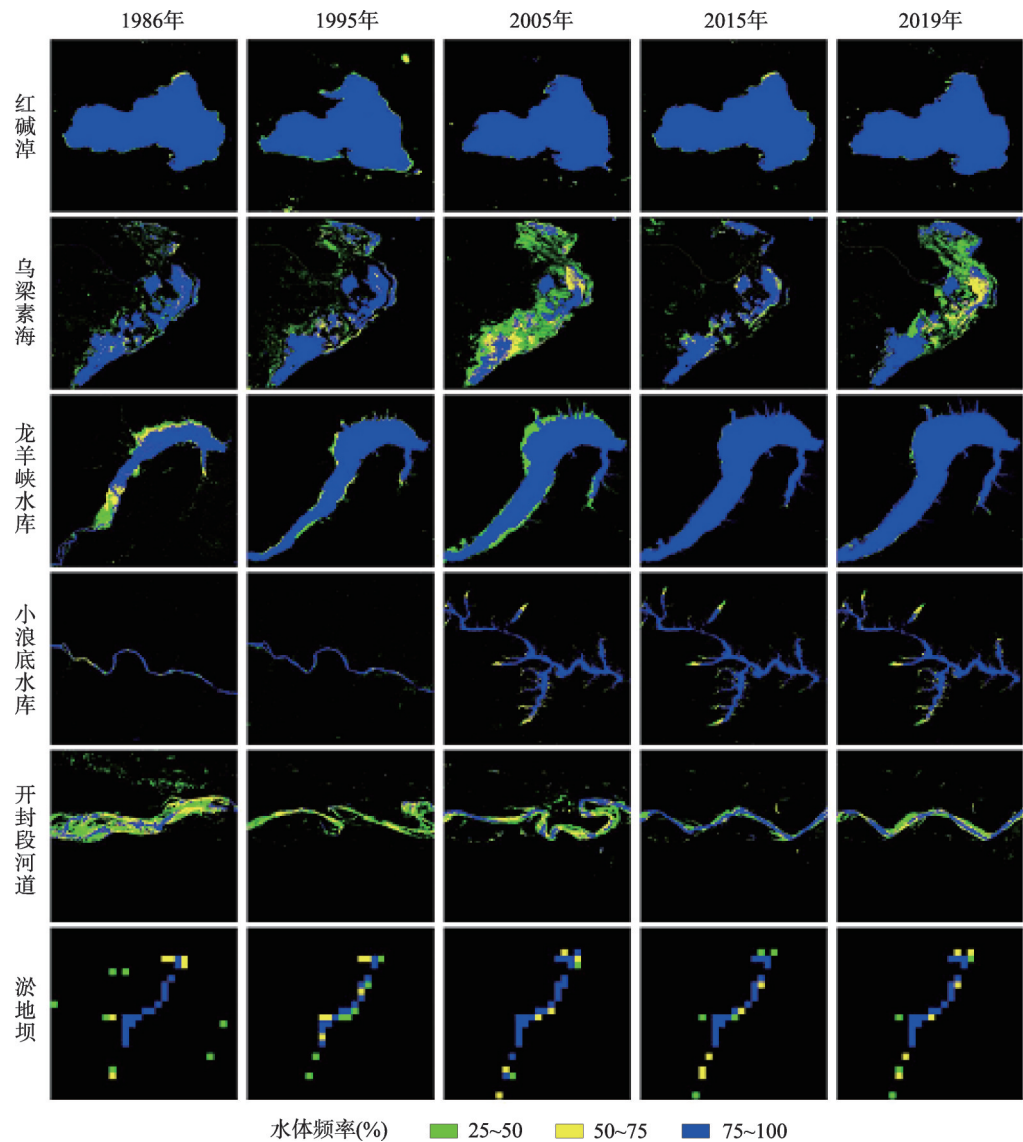


图4 1986—2019年黄河流域不同典型水体类型的水体频率

Fig. 4 WIF variation of different typical water body types in the Yellow River Basin during 1986-2019

节性SWA比1986年减少了2432.52 km², 减少幅度为40.05%。子流域区季节性水体积极性年际变化速率为-48.9 km²/a, 对全流域季节性SWA年际变化的贡献率为61.8% (图6b)。

4.2.2 不同区间SWA动态变化 本文分析了6个区间SWA时间变化特征。唐乃亥以上区域多年平均SWA为1983.67 km², 占全流域的36.18%, 而头道拐—龙门区间多年平均SWA最小, 仅占全流域的9.23%。不

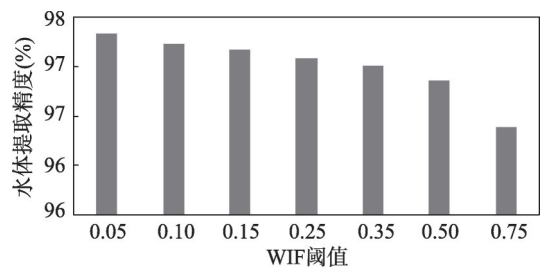


图5 基于不同WIF阈值提取的水体验证精度

Fig. 5 Validation accuracy of water body extracted using different WIF thresholds

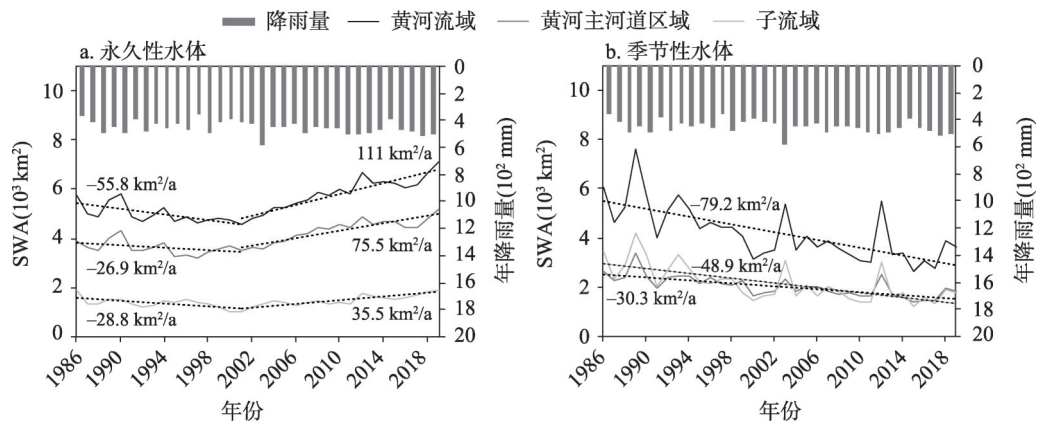


图6 1986—2019年黄河流域降雨量与永久性和季节性SWA年际变化

Fig. 6 Interannual variation of precipitation and year-long and seasonal SWA in the Yellow River Basin during 1986-2019

同区间多年平均SWA的排序为：唐乃亥以上>花园口—利津>青铜峡—头道拐>唐乃亥—青铜峡>龙门—花园口>头道拐—龙门。不同区间SWA年际动态变化如图7所示。唐乃亥以上、青铜峡—头道拐、头道拐—龙门、龙门—花园口区间的SWA均呈现出先减小后增加的变化特征，唐乃亥以上的突变发生于2004年，而其他3个区间的突变均发生于2001年。1986—2019年唐乃亥—青铜峡和花园口—利津区间的SWA增长速率分别为11.4 km²/a和17.1 km²/a，对全流域SWA年际变化的贡献率分别为22.1%和34.3%。

4.2.3 主要湖泊水库SWA动态变化 本文分析了黄河流域8个主要天然湖泊SWA时间变化特征。从图8中可看出，鄂陵湖SWA呈现缓慢增长趋势（2.01 km²/a），与梁超^[37]的研究结果基本一致，1995年降至最低值，仅为659.33 km²（图8a）；位于源区的其余4个湖泊（扎陵湖、岗纳格玛错、星星海、阿涌该马错）均呈现出先减小后增加的时间变化特

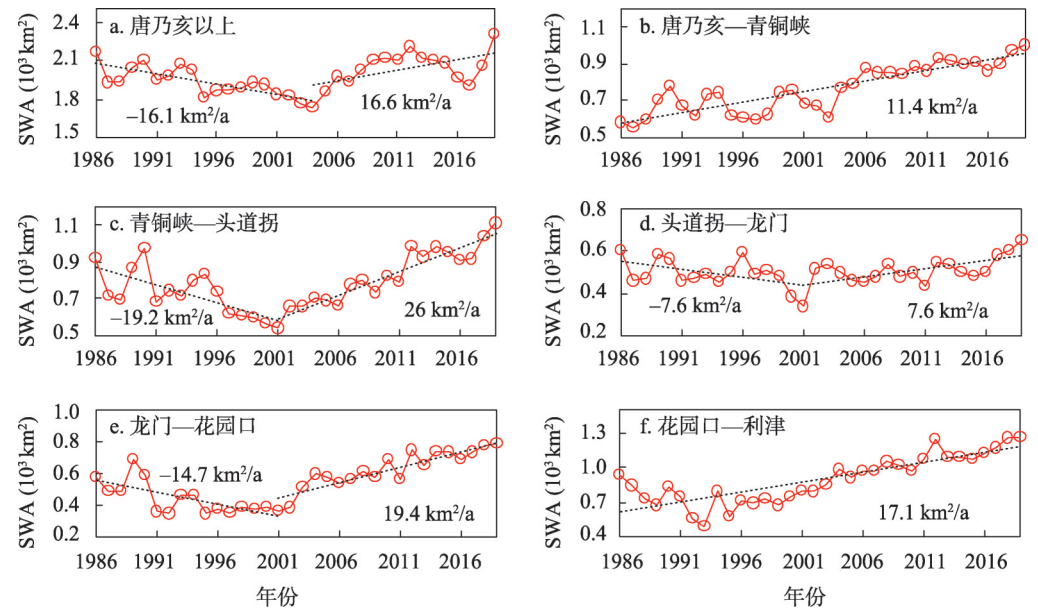


图7 1986—2019年黄河流域不同区间SWA动态变化

Fig. 7 Interannual variations of SWA of six sub-basins from the upper to the lower Yellow River Basin during 1986-2019

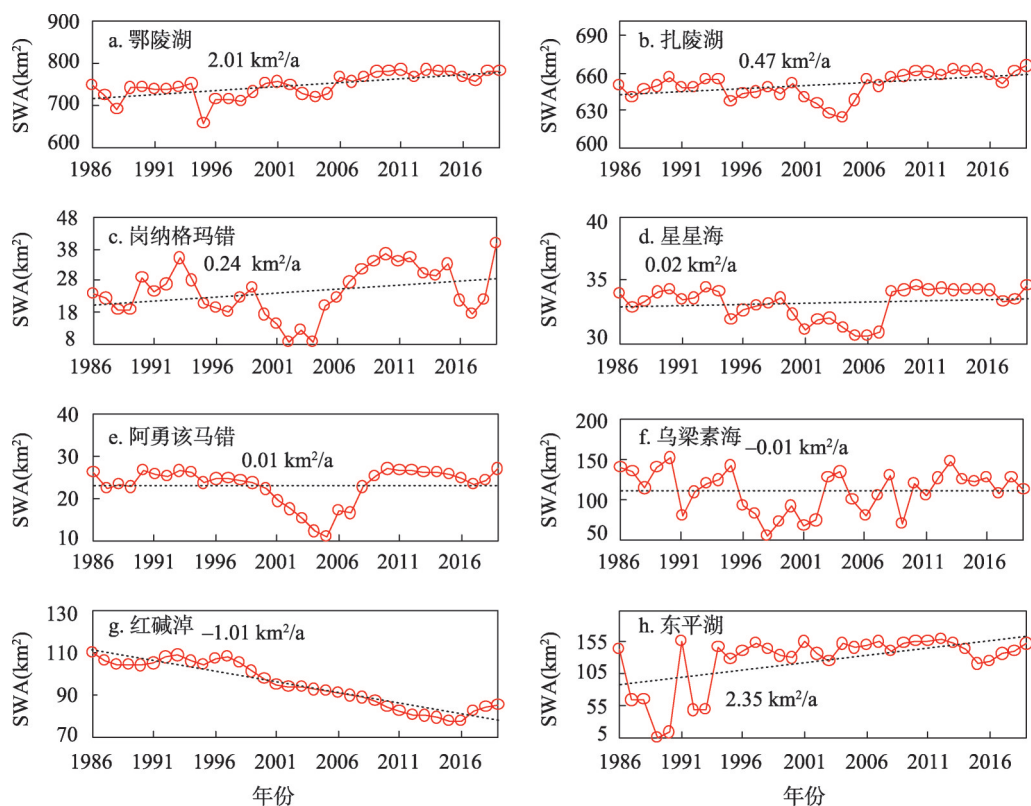


图8 1986—2019年黄河流域主要天然湖泊SWA动态

Fig. 8 Interannual variations of SWA of eight major natural lakes in the Yellow River Basin during 1986-2019

征, 增长速率分别为 $0.47 \text{ km}^2/\text{a}$ 、 $0.24 \text{ km}^2/\text{a}$ 、 $0.02 \text{ km}^2/\text{a}$ 和 $0.01 \text{ km}^2/\text{a}$, 突变时间主要发生在2004—2006年(图8b~8e)。乌梁素海和红碱淖均为沙漠淡水湖, 具有十分重要的生态屏障作用。从图7f中乌梁素海SWA呈强烈波动变化特征, 1998年之前总体变化为下降趋势, 1998年之后总体变化趋势呈显著增加。由于气候变化与人类活动对该湖泊的双重影响, 导致乌梁素海SWA波动剧烈。由于当地地下水开采严重, 1986—2019年红碱淖SWA呈显著减少趋势, 年减少速率达 $1.01 \text{ km}^2/\text{a}$, 2015年之后SWA又重新出现小幅上涨。位于下游的东平湖SWA总体呈现增加趋势 ($2.35 \text{ km}^2/\text{a}$), 1994年之后SWA基本保持稳定。

本文分析了黄河主河道上6个大型水库SWA时间变化特征。1986—2019年龙羊峡水库SWA呈持续增加趋势 ($6.88 \text{ km}^2/\text{a}$), 自2006年之后SWA较为稳定(图9a); 刘家峡水库SWA总体保持稳定 ($0.4 \text{ km}^2/\text{a}$) (图9b); 三盛公和三门峡水库SWA均呈现先减小后增加变化趋势特征(图9c、9f); 从图9d~9e可看出基于Landsat卫星数据提取的SWA时序信息可准确探测水库正常蓄水开始时间与蓄水量年际变化规律, 万家寨和小浪底水库SWA分别于1999年和2000年发生突增, 这与两个水库的正常蓄水时间基本吻合。2000年小浪底开始运行后, 水库蓄水量显著增加, 在2005年之后SWA基本维持稳定。万家寨水库开始蓄水后SWA变化波动较大, 整体呈缓慢减少趋势。其中龙羊峡水库、刘家峡水库和小浪底水库SWA变化趋势与梁超^[37]的研究结果基本一致。

4.2.4 子流域SWA动态变化 本文对黄河流域86个子流域1986—2019年SWA动态变化进行分析, 其中50个子流域SWA呈增加趋势, 主要分布在中下游区; 36个子流域SWA

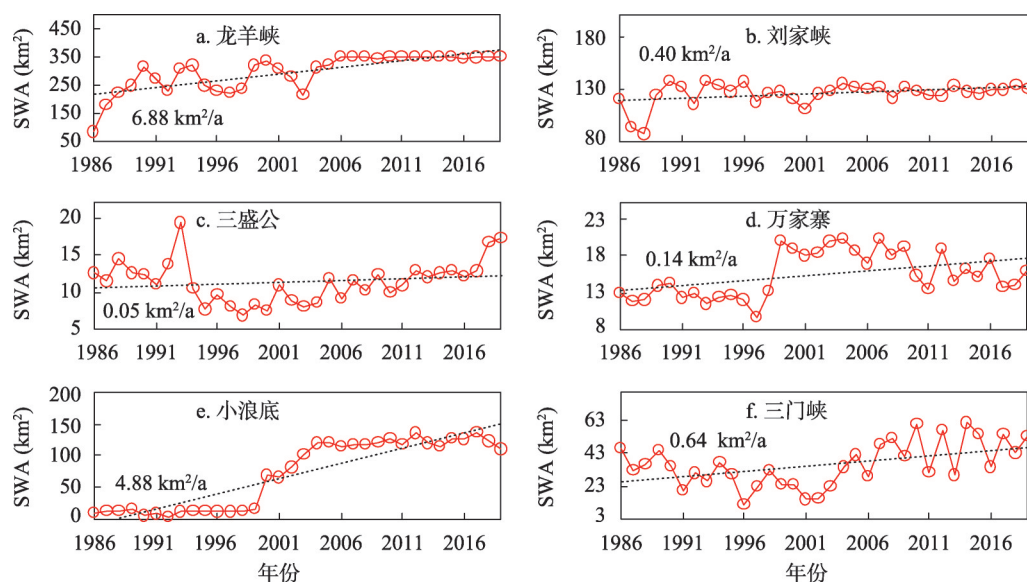


图9 1986—2019年黄河流域主要大型水库SWA年际动态

Fig. 9 Interannual variations of SWA of six major reservoirs located at the main channel in the Yellow River Basin during 1986-2019

呈减小趋势，主要分布在上游区。图10显示了1986—2019年黄河流域86个子流域SWA的绝对变化率和相对变化率。

流域上游区SWA增长率最大的流域为洮河 ($0.9 \text{ km}^2/\text{a}$)，变化率最大的流域为柯曲 ($-0.237 \text{ km}^2/\text{a}$)；流域中游区伊洛河SWA增长率最大 ($1.36 \text{ km}^2/\text{a}$)，葫芦河变化率最大 ($-0.063 \text{ km}^2/\text{a}$)；流域下游区SWA增长率最大为大汶河 ($1.63 \text{ km}^2/\text{a}$)。整个黄河流域，年际SWA增长程度最大的是红柳沟 (13.3%)，减少程度最大的为达日勒曲 (-11.3%)。

4.3 不同影响因素对黄河流域SWA趋势的定量影响作用

根据公式 (7) ~ (10)，分别计算了降水、温度、叶面积指数、前一年水体面积和其他因素对主河道区和子流域区SWA趋势的影响量与相对影响率 (图11)。

从图11中可以看出，虽然降水是流域SWA的主要水源，但降水是5个影响因素中对1986—2019年SWA趋势影响作用最小的因素。温度对SWA趋势均起到减小作用，这主要是由于温度抬升可增加潜在蒸散发和大气饱和水汽差，从而加快水面蒸发速率，导致SWA减少^[24]。非气象因素对SWA的影响作用均大于气象要素。

在非气象因素中，前一年水体面积对主河道区SWA的影响作用最大 (49.18%)，这主要是由于前一年SWA可间接表征陆地水储量状况，而前一年水储量状态对当年的SWA存在延续效应，且区域内SWA占比越大该效应越明显^[23]。

叶面积指数对子流域区的SWA的影响作用最大 (45%)，且主河道区的叶面积指数对SWA的影响作用 (19.88%) 也仅次于前一年水体面积。这主要是由于近20年黄河流域植被恢复显著，随着植被冠层对降雨的截留作用增强，植被对地表径流阻滞作用增强，流域水源涵养能力提高。另外，植被叶面积指数增加可减小地表反照率，植被冠层吸收更多太阳入射辐射，植被蒸腾作用增强，极大改变了下垫面的潜热和显热分配，对局地大气条件起到了降温和增湿作用，从而水面蒸发速率减小^[38]，因此植被叶面积指数增加对SWA起到了一定增加作用^[39-40]。

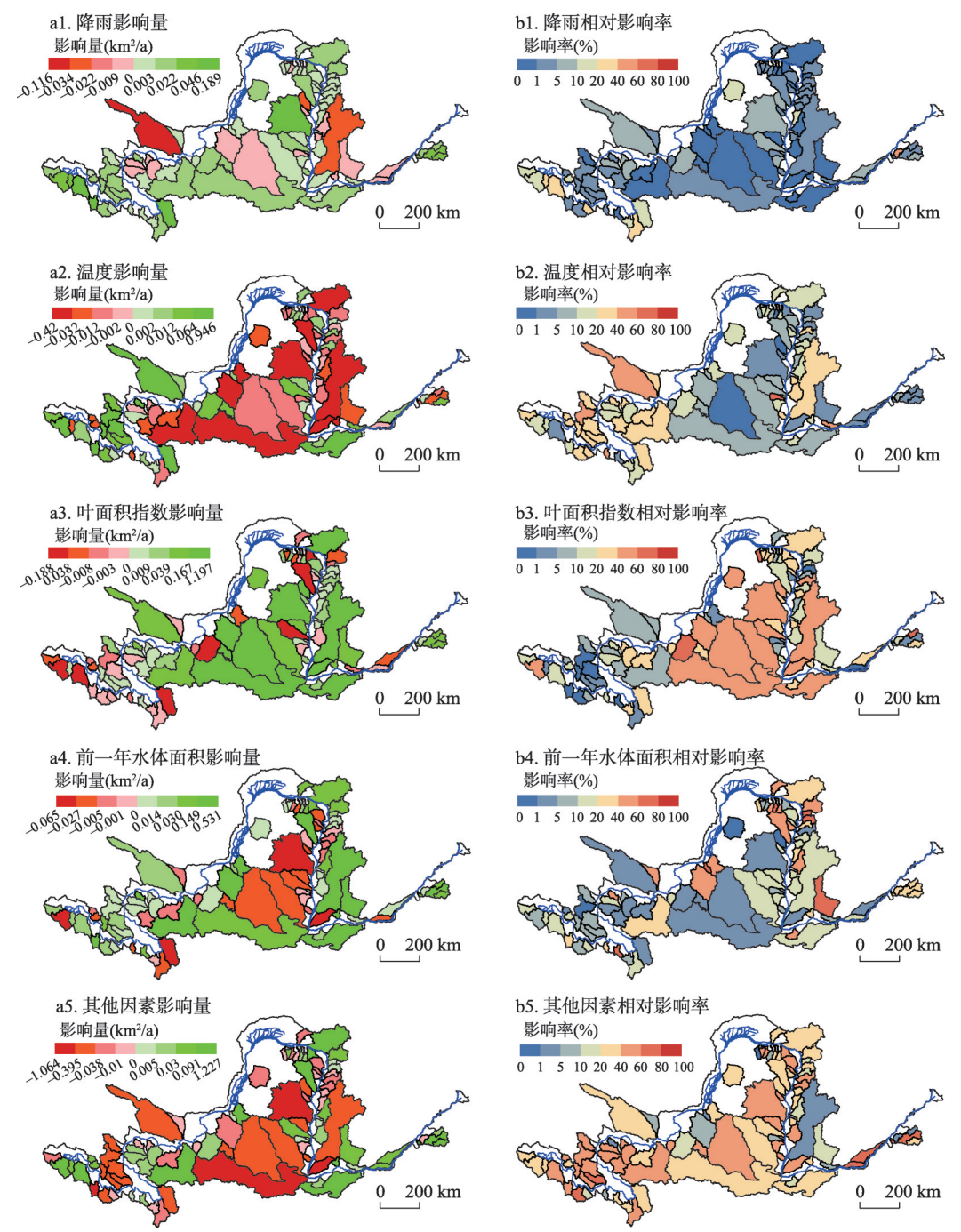


图 12 降水、温度、叶面积指数、前一年水体面积和其他要素对各支流 SWA 的影响量和相对影响率
Fig. 12 Impacts and relative impact rates of Pre, Temp, LAI, Pre_SWA and residual factors on SWA trend for each sub-basin in the Yellow River Basin

黄河源区，温度升高加速了源区冰川积雪和冻土融化速率^[26]，导致 SWA 明显扩张。叶面积指数对 SWA 趋势起增加作用的流域个数占 59.3%，主要分布于中游区域，其中对渭河 SWA 的正影响作用最大。前一年水体面积对 SWA 趋势起到增加作用的流域个数占

61.6%, 分布于整个黄河流域, 其中对洮河SWA的正影响作用最大。其他因素对SWA趋势起到减小作用的流域个数占53.4%, 分布于上中游区域, 其中对大汶河SWA的正影响作用最大。

4.4 不确定性分析

本文采用F-mask算法已剔除了部分云和云阴影覆盖像元, 但未检测出的薄云或山区阴影区域仍然会对水体提取产生一定影响。所采用的混合指数规则集方法对水体提取精度虽然较高, 但经过与Google Earth高分影像对比仍然存在一定识别误差。本文划分永久性和季节性水体的判断规则是参考前人大量研究结果。本文利用多元线性回归方法计算SWA对不同影响因素的敏感性系数, 计算过程中假设不同影响因素之间相互独立, 且不存在相互影响作用, 这一假设为研究结果带来一定不确定性。但本文首先对SWA及其影响因素时间序列进行了去趋势处理, 可解决由于时序数据的共同趋势性所带来的敏感性系数高估问题^[36, 42]。

5 结论

针对黄河流域SWA长期动态变化及其空间分异特征和SWA趋势变化影响机制仍不清晰的问题, 本文基于Google Earth Engine云平台, 生产了1986—2019年30 m分辨率黄河流域SWA时间序列数据集, 并揭示了SWA年际变化规律及其影响机制, 研究结论如下:

(1) 通过Google Earth所选水体样本验证结果表明, 本文水体提取算法识别总体精度为97%, 具有高可信度, 且能够有效捕捉到各类地表水体的年际动态变化轨迹。

(2) 全流域多年平均SWA为5482.79 km², 全流域永久性SWA年际增长速率49.82 km²/a, 其中主河道区的贡献为83.2%。2001年为SWA趋势由减小到增加的变化转折点。除了红碱淖SWA呈持续减小, 其他主要天然湖泊SWA均较为稳定。主要大型水库SWA均呈现增加趋势, 其中小浪底和龙羊峡SWA增加显著。在86个子流域中, 50个子流域SWA呈增加趋势, 主要分布在中下游, 36个子流域SWA呈减小趋势, 主要分布于上游。

(3) 在主河道区, 前一年水体面积能够解释SWA变化量的49.18%, 植被叶面积指数对SWA趋势的影响作用(19.88%)大于气象要素的影响作用(11.34%), 且温度对SWA趋势的负作用(9.24%)大于降雨的正作用(2.1%)。在子流域区, 植被叶面积指数能够解释SWA变化量的45%, 起主导作用。温度对中游区SWA趋势起到减少作用, 但却导致黄河源区SWA增加。子流域内剧烈人类用水活动对SWA减小作用大于水库调蓄作用, 因而其他要素对子流域SWA表现为负影响。

本文有助于明晰黄河流域地表水资源时空变化规律及其驱动机制, 对地表水资源变化归因、合理开发利用和未来规划管理提供了数据与技术支持。但目前水体提取方法仍存在不足, 归因分析方法较为单一, 今后可结合雷达卫星等多源遥感数据和高级水体识别算法提高水体提取精度, 结合水文模型或陆面模式等多种手段综合研判SWA变化的影响作用。

参考文献(References)

- [1] Tang Qihong, Liu Xingcai, Zhou Yuanyuan, et al. Cascading impacts of Asian water tower change on downstream water systems. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1306-1312. [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. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1306-1312.]
- [2] Jia Shaofeng, Liang Yuan. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new

- situation. *Resources Science*, 2020, 42(1): 29-36. [贾绍凤, 梁媛. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究. *资源科学*, 2020, 42(1): 29-36.]
- [3] Xia Jun, Peng Shaoming, Wang Chao, et al. Impact of climate change on water resources and adaptive management in the Yellow River Basin. *Yellow River*, 2014, 36(10): 1-4, 15. [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. *人民黄河*, 2014, 36(10): 1-4, 15.]
- [4] Liu Changming, Tian Wei, Liu Xiaomang, et al. Analysis and understanding on runoff variation of the Yellow River in recent 100 years. *Yellow River*, 2019, 41(10): 11-15. [刘昌明, 田巍, 刘小莽, 等. 黄河近百年径流量变化分析与认识. *人民黄河*, 2019, 41(10): 11-15.]
- [5] Ma Zhuguo, Fu Congbin, Zhou Tianjun, et al. Status and ponder of climate and hydrology changes in the Yellow River Basin. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(1): 52-60. [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. *中国科学院院刊*, 2020, 35(1): 52-60.]
- [6] Zhang Jianyun, He Ruimin, Qi Jing, et al. A new perspective on water issues in north China. *Advances in Water Science*, 2013, 24(3): 303-310. [张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 等. 关于中国北方水资源问题的再认识. *水科学进展*, 2013, 24(3): 303-310.]
- [7] Xi Jinping. Speech at the forum on ecological protection and quality development in the Yellow River basin. *China Water Resources*, 2019(20): 1-3. [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. *中国水利*, 2019(20): 1-3.]
- [8] Liu Jianbo, Dai Changda. The application of TM image in reservoir situation monitoring. *National Remote Sensing Bulletin*, 1996(1): 54-58. [刘建波, 戴昌达. TM图象在大型水库库情监测管理中的应用. *遥感学报*, 1996(1): 54-58.]
- [9] Bi Haiyun, Wang Siyuan, Zeng Jiangyuan, et al. Comparison and analysis of several common water extraction methods based on TM image. *Remote Sensing Information*, 2012, 27(5): 77-82. [毕海芸, 王思远, 曾江源, 等. 基于TM影像的几种常用水体提取方法的比较和分析. *遥感信息*, 2012, 27(5): 77-82.]
- [10] Lu Jiaju, Li Shihong. Improvement of the techniques for distinguishing water bodies from TM data. *National Remote Sensing Bulletin*, 1992(1): 17-23. [陆家驹, 李士鸿. TM资料水体识别技术的改进. *环境遥感*, 1992(1): 17-23.]
- [11] McFeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [12] Xu Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *National Remote Sensing Bulletin*, 2005, 9(5): 589-595. [徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI)提取水体信息的研究. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595.]
- [13] Gómez C, White J C, Wulder M A. Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 116: 55-72.
- [14] Khatami R, Mountrakis G, Stehman S V. A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 177: 89-100.
- [15] Zou Z H, Dong J W, Menarguez M A, et al. Continued decrease of open surface water body area in Oklahoma during 1984-2015. *Science of the Total Environment*, 2017, 595: 451-460.
- [16] Zhou Y, Dong J W, Xiao X M, et al. Open surface water mapping algorithms: A comparison of water-related spectral indices and sensors. *Water*, 2017, 9(4): 256. DOI: 10.3390/w9040256.
- [17] Zou Z H, Xiao X M, Dong J W, et al. Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016. *PNAS*, 2018, 115(15): 3810-3815.
- [18] Liu X P, Hu G H, Chen Y M, et al. High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 227-239.
- [19] Dong J W, Xiao X M, Menarguez M A, et al. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 185: 142-154.
- [20] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, 540(7633): 418-422.
- [21] Mueller N, Lewis A, Roberts D, et al. Water observations from space: Mapping surface water from 25 years of Landsat imagery across Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 341-352.
- [22] Zhou Y, Dong J W, Xiao X M, et al. Continuous monitoring of lake dynamics on the Mongolian Plateau using all available Landsat imagery and Google Earth Engine. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 366-380.
- [23] Wang X X, Xiao X M, Zou Z H, et al. Gainers and losers of surface and terrestrial water resources in China during 1989-

2016. *Nature Communications*, 2020, 11: 3471. DOI: 10.1038/s41467-020-17103-w.
- [24] Wang R M, Xia H M, Qin Y C, et al. Dynamic monitoring of surface water area during 1989-2019 in the Hetao Plain using landsat data in google earth engine. *Water*, 2020, 12(11): 3010. DOI: 10.3390/w12113010.
- [25] Liang K, Li Y Z. Changes in lake area in response to climatic forcing in the endorheic Hongjian Lake basin, China. *Remote Sensing*, 2019, 11(24): 3046. DOI: 10.3390/rs11243046.
- [26] Luo D L, Jin H J, Du H Q, et al. Variation of alpine lakes from 1986 to 2019 in the headwater area of the Yellow River, Tibetan Plateau using Google Earth Engine. *Advances in Climate Change Research*, 2020, 11(1): 11-21.
- [27] Gao Jixi, Wang Yongcai, Hou Peng, et al. Temporal and spatial variation characteristics of land surface water area in the Yellow River Basin in recent 20 years. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1157-1164. [高吉喜, 王永财, 侯鹏, 等. 近 20 年黄河流域地表水域面积时空变化特征研究. *水利学报*, 2020, 51(9): 1157-1164.]
- [28] Liu Xiaoyan. Causes of Sharp Decrease in Water and Sediment in Recent Years in the Yellow River. Beijing: Science Press, 2016. [刘晓燕. 黄河近年水沙锐减成因. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [29] Ju J C, Roy D P, Vermote E, et al. Continental-scale validation of MODIS-based and LEDAPS Landsat ETM+ atmospheric correction methods. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 122: 175-184.
- [30] Xia H M, Zhao J Y, Qin Y C, et al. Changes in water surface area during 1989-2017 in the Huai River basin using landsat data and google earth engine. *Remote Sensing*, 2019, 11(15): 1824. DOI: 10.3390/rs11151824.
- [31] Zhu Z, Wang S X, Woodcock C E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: Cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 159: 269-277.
- [32] Liu Zhihong, McVicar T R, Van Niel T G, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(2): 92-100. [刘志红, Tim R McVicar, Van Niel T G, 等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用. *气象*, 2008, 34(2): 92-100.]
- [33] Zhang X, Liu L Y, Wang Y J, et al. A SPECLib-based operational classification approach: A preliminary test on China land cover mapping at 30 M. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 71: 83-94.
- [34] Deng X Y, Song C Q, Liu K, et al. Remote sensing estimation of catchment-scale reservoir water impoundment in the upper Yellow River and implications for river discharge alteration. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124791. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124791.
- [35] Wang C, Jia M M, Chen N C, et al. Long-term surface water dynamics analysis based on landsat imagery and the google earth engine platform: A case study in the middle Yangtze River basin. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1635. DOI: 10.3390/rs10101635.
- [36] Li Y, Yao N, Chau H W. Influences of removing linear and nonlinear trends from climatic variables on temporal variations of annual reference crop evapotranspiration in Xinjiang, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 592: 680-692.
- [37] Liang Chao. Temporal and spatial variation of surface water and its impact on precipitation in the Yellow River basin in recent 18 years [D]. Kaifeng: Henan University, 2020. [梁超. 近 18 年来黄河流域地表水体时空变化与降水影响分析 [D]. 开封: 河南大学, 2020.]
- [38] Chen X Z, Liu L Y, Su Y X, et al. Quantitative association between the water yield impacts of forest cover changes and the biophysical effects of forest cover on temperatures. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: 126529. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126529.
- [39] Zhou G Y, Sun G, Wang X, et al. Estimating forest ecosystem evapotranspiration at multiple temporal scales with a dimension analysis approach. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(1): 208-221.
- [40] Wang S, Fu B J, He C S, et al. A comparative analysis of forest cover and catchment water yield relationships in Northern China. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(7): 1189-1198.
- [41] Ji L, Duan K Q. What is the main driving force of hydrological cycle variations in the semiarid and semi-humid Weihe River Basin, China? *Science of the Total Environment*, 2019, 684: 254-264.
- [42] Tong S Q, Li X Q, Zhang J Q, et al. Spatial and temporal variability in extreme temperature and precipitation events in Inner Mongolia (China) during 1960-2017. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 75-89.

Dynamics of surface water area in the Yellow River Basin and its influencing mechanism during 1986-2019 based on Google Earth Engine

LI Chongwei^{1,2}, WANG Zhihui^{2,3}, TANG QiuHong⁴, HU Qingfeng¹,
XIAO Peiqing², LYU Xizhi^{2,3}, LIU Yang²

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation on the Loess Plateau of Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic, Zhengzhou 450003, China; 3. Henan Key Laboratory of Ecological Environment Protection and Restoration of the Yellow River Basin, Yellow River Institute of Hydraulic, Zhengzhou 450003, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The Yellow River Basin (YRB) has been facing severe water shortages, hence the monitoring of long-term dynamics of surface water area (SWA) is essential to better understand the spatial and temporal variation of surface water resources and its driving factors. In this study, the spatial and temporal change characteristics of SWA in the YRB were revealed, and then the impacts and relative impact rate of precipitation (Pre), temperature (Temp), leaf area index (LAI), SWA in the previous year (Pre_SWA) and residual factors (e.g. water conservation measures and human water use activities) on SWA were determined in the combination of water detection index, linear slope, multiple linear regression and partial differential decomposition. The results show that: (1) the overall accuracy of classification of surface water bodies is 97%. The increase rate of year-long SWA in the study area from 1986 to 2019 is 49.82 km²/a, of which 83.2% was contributed by the SWA increment from the main river channel area, and the year 2001 is the turning point of SWA trend from decreasing to increasing; the seasonal SWA decreased at a rate of -79.2 km²/a, of which 61.8% was contributed by the SWA decrease in the sub-basin areas. (2) The SWA changes of all major natural lakes are relatively stable, and the only decreasing trend of SWA was observed in the Hongjiannao lake; the SWA of Xiaolangdi and Longyangxia reservoirs changed significantly with an increasing trend among the large reservoirs in the main river channel, and SWA increasing trends can be observed in the 50 sub-basins located in the middle and lower reaches. (3) Precipitation had the least effect on the increasing trend of SWA, and warming caused a decrease of SWA in the middle reaches, but led to an increase of SWA in the source area. The impacts of vegetation greening on the SWA trend in the main channel area and sub-basin areas are 10.12 km²/a and 7.26 km²/a, respectively. Residual factors had a negative reffect on the SWA trend in the sub-basin areas, where the SWA reduction induced by human water use was much greater than the SWA increment induced by small water conservancy projects. However, residual factors had a positive effect on the SWA increase due to the great regulating storage capacity of large reservoirs in the main river channel area.

Keywords: Yellow River Basin; surface water area; Google Earth Engine; spatio-temporal change; influencing factor