

基于混合指数算法的黄河流域水体面积变化及归因分析

陶 洁^{1,2},任 磊¹,梅晓敏¹,师 晨¹,左其亭^{1,2}

(1. 郑州大学水利与交通学院,河南 郑州 450001;
2. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室,河南 郑州 450001)

摘要:基于 GEE 云平台、Landsat5/7/8 数据、JRC 数据集,利用混合指数法提取了 1986—2021 年黄河流域及典型湖库的地表水体面积,并分析了其空分布特征;采用累积量斜率变化率比较法对气候因子和人类活动对黄河流域永久性水体面积变化的贡献率进行了定量评估。结果表明:黄河流域地表水体提取的生产者精度为 99.39%、用户精度为 91.51%、总体精度为 94.22%、Kappa 系数为 0.8785,提取效果较好;1986—2021 年黄河流域地表水体面积总体呈增加趋势,典型湖库中扎陵湖、鄂陵湖、东平湖、龙羊峡水库和小浪底水库的永久性水体面积呈增加趋势,红碱淖和刘家峡水库呈略减少的趋势;人类活动是黄河流域永久性水体面积变化的主导因素,降水量贡献率逐渐增大,气温和太阳辐射贡献率降低,但气温的贡献率仍为 20% 左右。

关键词:水体提取;地表水体面积;永久性水体面积;混合指数算法;黄河流域

中图分类号:P332 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)04-0079-08

Analysis of water surface area changes and attribution in the Yellow River Basin based on hybrid index algorithm//TAO Jie^{1,2}, REN Lei¹, MEI Xiaomin¹, SHI Chen¹, ZUO Qiting^{1,2} (1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on the GEE cloud platform, Landsat 5/7/8 data, and the JRC dataset, the surface water area in the Yellow River Basin and typical lakes and reservoirs from 1986 to 2021 were extracted using the hybrid index algorithm, and the spatiotemporal distribution characteristics was analyzed. The contribution rate of climate factors and human activities to the permanent water area change in the Yellow River Basin was quantitatively evaluated using the cumulative slope change rate comparison method. The results showed that the producer accuracy of surface water extraction in the Yellow River Basin was 99.39%, the user accuracy was 91.51%, the overall accuracy was 94.22%, and the Kappa coefficient was 0.8785, indicating a good extraction effect. The surface water area of the Yellow River Basin showed an overall increasing trend from 1986 to 2021. The permanent water area of typical lakes and reservoirs, including Zhaling Lake, Eling Lake, Dongping Lake, Longyangxia Reservoir, and Xiaolangdi Reservoir, showed an increasing trend, while Hongjiannao and Liujiaxia Reservoirs showed a slight decreasing trend. Human activities are the dominant factor in the permanent water surface area changes in the Yellow River Basin. The contribution rate of precipitation gradually increases, while the contribution rates of temperature and solar radiation decrease, but the contribution rate of temperature is still around 20%.

Key words: water body extraction; surface water area; permanent water body area; hybrid index algorithm; the Yellow River Basin

黄河流域是我国水资源最短缺的地区之一,其径流量仅占全国的 2.2%,却承担全国 15% 的耕地、12% 的人口和 50 多座大中型城市的供水。随着气

候变化和人类活动的加剧,未来黄河流域水资源短缺形势将更加严峻^[1]。作为水资源的重要组成部分,地表水在供水、水文调节、生态保护和平衡等过

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200201);河南省科技攻关项目(232102320032, 232102320026);河南省水利科技攻关项目(GG202404, GG202405)

作者简介:陶洁(1986—),女,副教授,博士,主要从事河流生态水文、水环境与水资源管理研究。E-mail:taojie2015@zzu.edu.cn

通信作者:左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zuoqt@zzu.edu.cn

程中起重要作用^[2],监测流域地表水体面积变化可为水资源利用和生态保护提供重要依据。目前利用遥感影像提取地表水信息的技术日益成熟,常见的方法包括基于目标导向的影像分类法和基于像元分类的阈值法。影像分类法有支持向量机^[3]、决策树^[4]、随机森林^[5]等,但这些算法计算速度较慢且精度受训练样本和参数影响^[6]。阈值法通过水体光谱特征选择相关波段,构建水体指数并设定阈值来提取水体信息^[7]。常用水体指数包括归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI)^[8]、改进型归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)^[9]、自动水体提取指数(automated water extraction index, AWEI)^[10]等。然而,不同地理环境中相同地物的光谱特征差异显著,难以精准设定水体分类阈值。近年来,结合 MNDWI、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)的混合指数算法无需设定阈值,已在全球^[11]、长江流域^[12]以及黄河流域的河套灌区^[13]、红碱淖^[14]、黄河源区^[15]等地区得到应用,但针对黄河整个流域的系统研究较少。高吉喜等^[16]虽然分析了 2000—2019 年黄河流域水体的时空变化,但其运用的遥感水体指数和流域相对高程 Hand 根据阈值来提取水体,结果存在一定的主观性。

谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)作为地理数据分析处理的综合性平台,可以高效调用大尺度和长时间序列海量数据,并实现影像的镶嵌、裁剪、去云以及指数计算、主成分分析等。本文基于 GEE 平台与混合指数算法,提取 1986—2021 年黄河流域及其典型湖库的地表水体面积,运用累积量斜率变化率比较法定量开展永久性水体面积变化的归因分析,以期为黄河流域地表水资源的协调管理提供支撑,助力生态保护与经济社会的可持续发展。

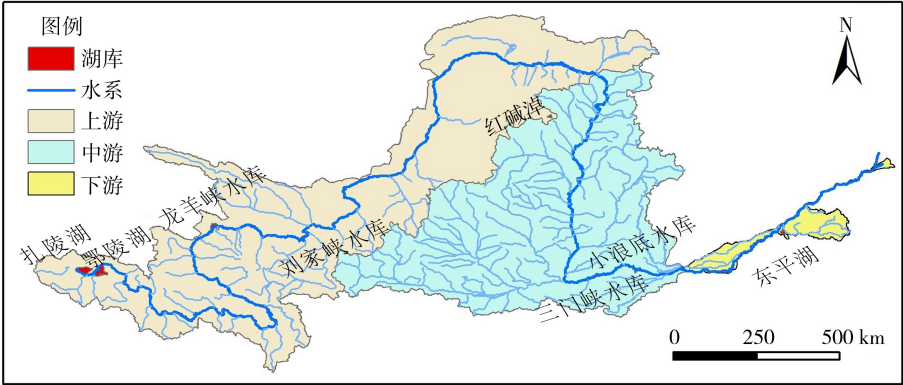


图 1 研究区概况
Fig. 1 Overview of study area

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域位于 32°10'N ~ 41°50'N、95°53'E ~ 119°05'E,流域面积约 79.5 万 km²,其上、中、下游流域面积分别约为 41.7 万 km²(占比 52.4%)、35.5 万 km²(占比 44.7%)、2.3 万 km²(占比 2.9%),如图 1 所示。至 2023 年,黄河流域已建成大中型水库 242 座,现存约 30 多个大型天然湖泊。为了更好地进行黄河流域水资源管理,发挥防洪灌溉等任务,从湖库大小和空间分布角度选择典型湖库开展地表水体面积变化分析,其中典型湖泊包括扎陵湖、鄂陵湖、红碱淖和东平湖;典型水库包括龙羊峡水库、刘家峡水库、三门峡水库和小浪底水库。

1.2 数据来源

- a. Landsat 遥感影像。选用 1986—2021 年 Landsat5/7/8 的表面反射率 Tier 1 产品,共有影像 39 630 幅。该产品是经过大气校正后的影像数据,可提供高精度地表信息。
- b. DEM。DEM 数据源自美国 NASA 发布的 NASADEM 雷达地形测绘数据,具有 30 m 分辨率,常用于坡度数据生成,并用于辅助去除山体阴影效应。
- c. 其他影像数据。主要包括 JRC 全球水体数据和 Sentinel-2 遥感影像。JRC 数据集通过系统对每个像元分类进而识别水体,并将地表水分为季节性和永久性。由于利用混合指数法提取地表水体面积时,可能会存在将其他影像错误当成水体影像的情况,因此利用 JRC 数据集剔除 Landsat 卫星影像误提的水体。Sentinel-2 遥感影像由于其高空间分辨率、丰富的光谱信息和全球覆盖性,可以提供准确、可靠的数据^[17],因而用来验证水体提取的精度。
- d. 气象数据。从影响地表水体面积的主要气象因素角度出发,气象数据主要考虑气温、太阳辐射、风速和降水量 4 个因子。其中气温、太阳辐射和

风速数据源自 ERA5 再分析资料,其在中国区域的可靠性已通过站点卫星资料和观测数据等得到验证^[18]。由于 ERA5 再分析资料中的降水量会出现地区海拔(>500 m)越高精度越低的情况,导致数据偏差较大^[19],因此,降水量数据取自国家地球系统科学数据中心。相关数据信息见表 1。

2 研究方法

2.1 地表水体提取

混合指数法是通过加权组合多个光谱指数来更精确提取地表水体面积的遥感技术。基于混合指数算法的地表水体面积提取步骤^[20]包括:①基于 GEE 平台,获取 1986—2021 年覆盖研究区的 Landsat 时序影像数据集,利用 F-mask 算法对影像进行去云及云阴影处理,并利用 DEM 生成坡度掩膜,进一步消除山体阴影。②采用混合指数算法提取地表水体,加入 JRC 数据集剔除明显分类错误;确定水体范围的规则为在 EVI 值小于 0.1 的条件下,MNDWI 值大于 NDVI 值或 MNDWI 值大于 EVI 值,各指数计算公式见式(1)~(3)。③通过迭代方法计算每个像元的水体频度(F),从而识别出不同类型的水体面积,计算公式见式(4);根据刘宇晨等^[12,20]的研究,将 $F \geq 25\%$ 的像元划分为有效水体, $F < 25\%$ 视为临时水体;参考 Deng 等^[21]的研究,将 $25\% \leq F \leq 75\%$

的水体定义为季节性水体, $F > 75\%$ 的水体定义为永久性水体。地表水体提取的流程如图 2 所示。

$$I_M = (\rho_g - \rho_{SR}) / (\rho_g + \rho_{SR}) \tag{1}$$

$$I_N = (\rho_{NR} - \rho_r) / (\rho_{NR} + \rho_r) \tag{2}$$

$$I_E = 2.5(\rho_{NR} - \rho_r) / (\rho_{NR} + 6\rho_r - 7.5\rho_b + 1) \tag{3}$$

$$F = (N_s / N_0) \times 100\% \tag{4}$$

式中: I_M 为 MNDWI 值; I_N 为 NDVI 值; I_E 为 EVI 值; ρ_g 、 ρ_r 、 ρ_b 、 ρ_{NR} 、 ρ_{SR} 分别为 Landsat 图像的绿、红、蓝、近红外、短波红外波段的地表反射率值; N_0 为总观测次数; N_s 为水体识别次数。

由于混合指数法提取出的黄河流域地表水体面积最大的年份为 2020 年,故选用 2020 年的 Sentinel-2 高分辨率影像,经过人工目视解译,随机选取 4 707 个样本点(3 005 个水体和 1 702 个非水体)验证水体提取精度。根据水体提取结果构建混淆矩阵^[22],利用生产者精度、用户精度、总体精度和 Kappa 系数进行精度评估,计算公式为

$$A_{Pi} = (S_i / C_i) \times 100\% \tag{5}$$

$$A_{Ui} = (S_i / G_i) \times 100\% \tag{6}$$

$$A_o = \sum_{i=1}^M S_i / N \times 100\% \tag{7}$$

$$K = (N \sum_{i=1}^M S_i - \sum_{i=1}^M C_i G_i) / (N^2 - \sum_{i=1}^M C_i G_i) \tag{8}$$

式中: A_{Pi} 为第 i 类生产者精度; A_{Ui} 为第 i 类用户精

表 1 数据信息
Table 1 Data information

数据分类	数据名称	数据来源	时间	分辨率
遥感影像	Landsat 5 TM	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	1986—2011 年	30 m
	Landsat 7 ETM+	LANDSAT/LE07/C02/T1_L2	2012 年	30 m
	Landsat 8 OLI	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	2013—2021 年	30 m
	Sentinel-2	COPERNICUS/S2_SR	2020 年	30 m
	JRC 数据集	JRC/GSW1_4/YearlyHistory	1986—2021 年	30 m
气象数据	逐月降水量数据	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)	1986—2021 年	1 km
	月平均气温数据		1986—2021 年	0.25°
	月平均 10 m 高度风速		1986—2021 年	0.25°
	月平均地表净辐射数据		1986—2021 年	0.25°

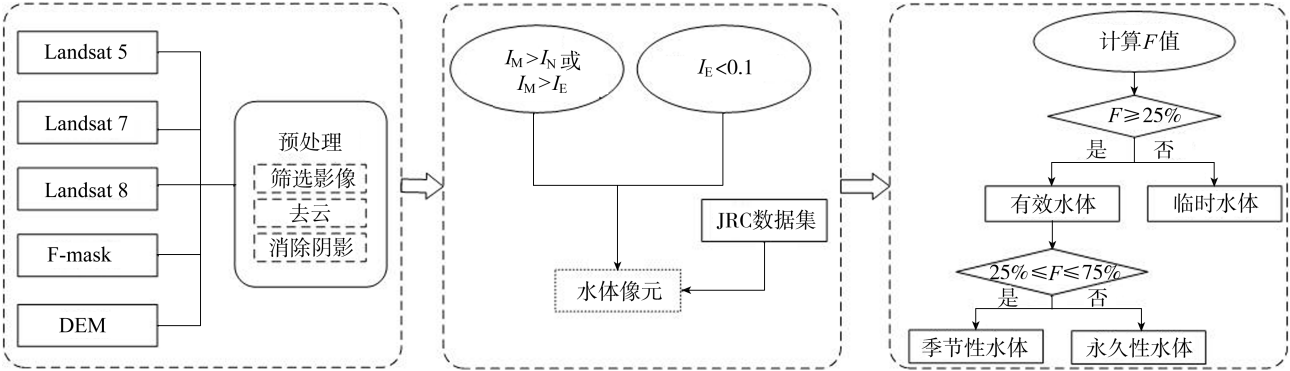


图 2 地表水体提取流程
Fig. 2 Extraction process of surface water bodies

度; A_0 为总体精度; S_i 为第 i 类的分类正确样本数; C_i 为第 i 类的实际样本数; G_i 为第 i 类的预测样本数; M 为类别总数; N 为样本总数; K 为 Kappa 系数。

2.2 相关分析与偏相关分析

利用相关系数分析各气候因子之间的相关性, 并进行 $\alpha<0.05$ 显著性水平的 F 检验。若某气候因子与其他气候因子均不存在显著相关, 则开展永久性水体面积与该气候因子之间的相关分析; 若某气候因子与其他气候因子存在显著性相关, 则将其他气候因子作为控制因子, 在消除控制因子的影响下, 开展永久性水体面积与该气候因子的偏相关分析^[23], 并进行 F 检验。

2.3 累积量斜率变化率比较法

累积量斜率变化率比较法是王随继等^[24] 提出的用于定量分析气候变化和人类活动对径流变化影响的方法。具体步骤为: ①计算地表水体面积、降水量、气温随时间变化的累积距平, 并绘制累积距平曲线。②找到累积距平曲线上的拐点, 拐点反映了变量趋势发生变化, 这种变化标志着系统驱动力的变化或累积效应的转折; 对变量的分段累积量进行线性回归, 得到线性回归方程; 分别计算永久性地表水体面积、降水量、气温在拐点前、后的分段斜率。③计算永久性地表水体面积、降水量、气温的斜率变化率, 见式 (9) ~ (11)。④计算各影响因子对永久性地表水体面积的贡献率, 见式 (12)。

$$R_W = (K_{Wb}/K_{Wa} - 1) \times 100\% \tag{9}$$

$$R_P = (K_{Pb}/K_{Pa} - 1) \times 100\% \tag{10}$$

$$R_T = (K_{Tb}/K_{Ta} - 1) \times 100\% \tag{11}$$

$$C_H = 1 - C_P - C_T \tag{12}$$

其中 $C_P = (R_P/R_W) \times 100\%$

$$C_T = (R_T/R_W) \times 100\%$$

式中: K_{Wa} 、 K_{Wb} 分别为地表水体面积在拐点前、后的分段斜率; K_{Pa} 、 K_{Pb} 分别为降水量在拐点前、后的分段斜率; K_{Ta} 、 K_{Tb} 分别为气温在拐点前、后的分段斜率; R_W 、 R_P 、 R_T 分别为永久性地表水体面积、降水量、气温的斜率变化率; C_H 、 C_P 、 C_T 分别为人类活动、降水量、气温对永久性地表水体面积变化的贡献率。

3 结果与分析

3.1 水体提取精度

基于 1986—2021 年 Landsat5/7/8 遥感影像数据, 利用混合指数法提取黄河流域地表水体面积, 获得水体样本点 3 005 个, 非水体样本点 1 702 个。精度评价结果表明, 生产者精度为 99.39%, 用户精度为 91.51%, 总体精度为 94.22%, Kappa 系数为 0.878 5, 满足精度要求。

3.2 地表水体面积变化规律

3.2.1 黄河流域地表水体面积

图 3 为 1986—2021 年黄河流域地表水体面积。由图 3 可见, 1986—2021 年黄河流域平均有效水体面积为 7 103.76 km², 整体呈上升趋势, 但在 1998 年明显下降, 在 2000 年出现跳跃式增加。1998 年黄河流域永久性水体大量减少, 究其原因, 1998 年黄河水量继续偏枯, 上游来水偏少, 下游断流开始时间和次数为历史之最; 2000 年后季节性水体幅度较大, 究其原因, 与《黄河水量调度管理办法》的实施、小浪底水库的投入使用和国家启动了退耕还林还草的政策有关。1986—2021 年, 黄河流域平均永久性水体面积为 4 878.37 km², 其变化趋势与有效水体面积相似, 但增加幅度稍低; 1986—2021 年黄河流域平均季节性水体面积为 2 225.39 km², 在 1999 年之后整体较之前普遍增加, 其主要原因是生态调水和湿地修复等人类活动增强了水体的动态变化和土地利用类型的变化, 增加了洪泛区和湿地的蓄水能力。永久性水体作为较为稳定的水体形式, 其面积变化能够更加准确地反映区域水资源的长期趋势, 同时也能有效避免由于季节性或临时性水体变化所带来的干扰, 后续分析聚焦于永久性水体面积。

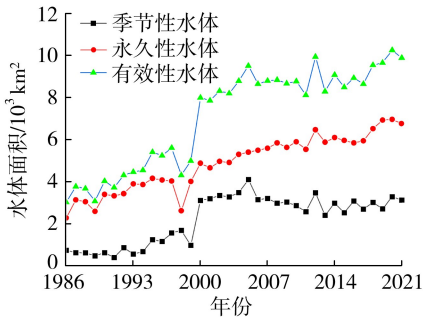


图 3 1986—2021 年黄河流域地表水体面积
Fig. 3 Surface water area in the Yellow River Basin from 1986 to 2021

3.2.2 黄河流域上、中、下游永久性水体面积

图 4 为 1986—2021 年黄河流域上、中、下游的永久性水体面积。由图 4 可见, 1986—2021 年黄河流域上、中、下游永久性水体面积平均值分别为 3 621.40、767.65、489.32 km², 均呈增加趋势, 但增加速率差异明显, 上、中、下游增加速率分别为 82.91、31.88、13.16 km²/a。上、中游永久性水体面积在 1998 年出现了明显下降。

3.2.3 典型湖泊永久性水体面积

图 5 为黄河流域典型湖泊 (扎陵湖、鄂陵湖、红碱淖、东平湖) 永久性水体的时空变化。图 6 为 1986—2021 年黄河流域典型湖泊的永久性水体面积。由图 5 和图 6 可见, 扎陵湖和鄂陵湖作为黄河

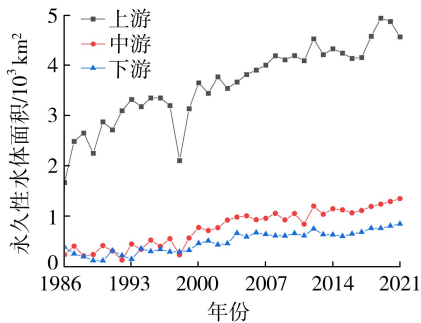


图 4 1986—2021 年黄河流域上、中、下游的永久性水体面积
Fig. 4 Permanent water area in upper, middle, and lower reaches of the Yellow River Basin from 1986 to 2021

源区两个大型姊妹湖,其永久性水体面积在 1986—2021 年均呈缓慢增加的趋势,速率为 $0.82 \text{ km}^2/\text{a}$ 和 $0.97 \text{ km}^2/\text{a}$ 。东平湖永久性水体面积呈略增加的趋势,速率为 $0.43 \text{ km}^2/\text{a}$,1995 年之后永久性水体面积波动较大,1989 年降到最低值 (6.20 km^2)。调查发现,1989 年大汶河流域遭遇极端干旱,使东平湖在 1989—1990 年连续 8 月处于几乎干湖状态^[25]。红碱淖永久性水体面积呈略减少的趋势,速率为 $-0.64 \text{ km}^2/\text{a}$ 。究其原因,可能是人类活动下红碱淖流域清水产流机制遭到破坏严重,建坝、抽取地下水以及矿产资源开采等行为大量截留水资源,使得入湖水量大幅减少^[26]。



图 5 黄河流域典型湖泊永久性水体的时空变化

Fig. 5 Spatiotemporal changes in permanent water of typical lakes in the Yellow River Basin

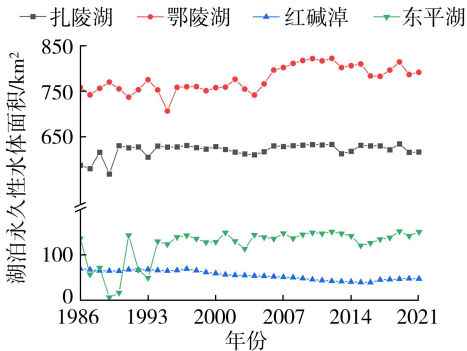


图 6 1986—2021 年黄河流域典型湖泊的永久性水体面积
Fig. 6 Permanent water area of typical lakes in the Yellow River Basin from 1986 to 2021

3.2.4 典型水库永久性水体面积

图 7 为黄河流域典型水库(龙羊峡水库、刘家峡水库、三门峡水库、小浪底水库)永久性水体的时

空变化。图 8 为 1986—2021 年黄河流域典型水库的永久性水体面积。由图 7 和图 8 可见,1986—2021 年,龙羊峡水库永久性水体面积呈较剧烈的波动性增加趋势,速率为 $9.06 \text{ km}^2/\text{a}$;刘家峡水库永久性水体面积总体呈较稳定的下降趋势,速率为 $-0.20 \text{ km}^2/\text{a}$;三门峡水库永久性水体面积总体呈波动性弱增加趋势,速率为 $0.54 \text{ km}^2/\text{a}$ 。小浪底水库 1999 年 10 月投入运行,2000 年之前仍属于河流,2000 年水体面积发生突增,至 2005 年之后水体面积基本维持稳定,但在 2011 年和 2019 年突然降低。调查发现,2011 年山东出现特大干旱,河南出现严重干旱,为了保证居民生活用水和农作物灌溉,大量调用水库水资源;2019 年中上游地区,特别是青海、甘肃、宁夏等省份,经历了较为严重的干旱,以及黄河下游生态补水的实施,直接影响了小浪底水库的

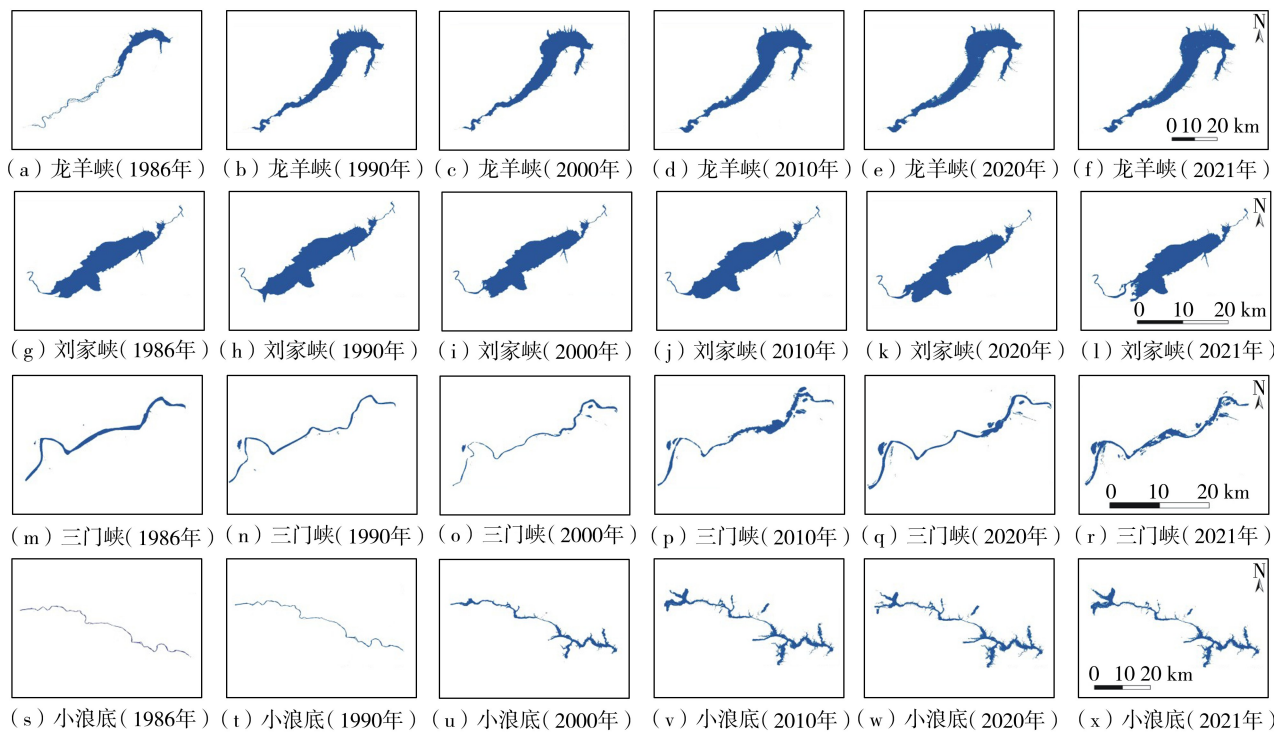


图7 黄河流域典型水库永久性水体的时空变化

Fig. 7 Spatiotemporal changes in permanent water of typical reservoirs in the Yellow River Basin

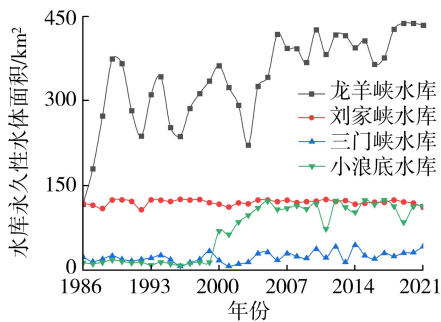


图8 1986—2021年黄河流域典型水库的永久性水体面积

Fig. 8 Permanent water area of typical reservoirs in the Yellow River Basin from 1986 to 2021

入库流量。

3.3 黄河流域永久性水体面积变化归因分析

选取气温、降水量、风速、太阳辐射等气候因子,以及人类活动因子,开展黄河流域永久性水体面积变化归因分析。通过相关分析得到,降水量与其他气候因子之间呈不显著相关关系,气温与太阳辐射呈显著相关关系,风速与太阳辐射呈显著相关关系。因此,采用相关分析法分析黄河流域永久性水体面积与降水量的关系,采用偏相关分析法分析黄河流域永久性水体面积与其他气候因子的关系。最终得到,气温和降水量与黄河流域永久性水体面积呈显著中等相关关系,相关系数均为0.47,都达到了95%的置信水平;风速和太阳辐射与黄河流域永久性水体面积呈不显著弱相关性关系,相关系数分别为0.17和0.19。这里黄河流域永久性水体面积与

气温呈正相关关系,与常识中气温升高,蒸发增大,水体面积减少的结论相反。究其原因,可能是由于水库建设运行调控了水体的动态变化,将部分季节性水体转化为永久性水体,这种转化减少了水体面积的季节性波动,进而降低了地表温度升高引发蒸发散发对水体面积的影响^[27]。此外,Zhang等^[28-29]的研究也证实,在高降水量和高温条件下,气温上升虽然会增强太阳辐射和蒸发,促进水循环导致水体面积减少,但区域降水量增加会因为补充了地表水资源,从而导致降水量、气温和太阳辐射与水体面积变化呈正相关关系。因此,黄河流域永久性水体面积变化与气候因子(尤其是降水量和气温)呈显著正相关关系表明了气候变化对区域水资源动态具有重要影响。同时,水利工程的调控作用减小了水体面积的季节波动,有助于平衡区域水资源分配,但也可能对蒸发量和气温产生长期影响。风速和太阳辐射与黄河流域永久性水体面积之间为不显著弱相关关系,因此后续贡献率分析只考虑气温和降水量。

3.4 气候变化和人类活动对永久性水体面积的影响

3.4.1 时段划分

图9为黄河流域永久性水体面积不同时期的累积距平变化。由图9(a)可见,1986—2021年黄河流域永久性水体面积累积距平在1999年出现了明显的拐点。这一拐点的形成主要是多年持续干旱和河流断流的结果,1999年之后,由于相关政策的干

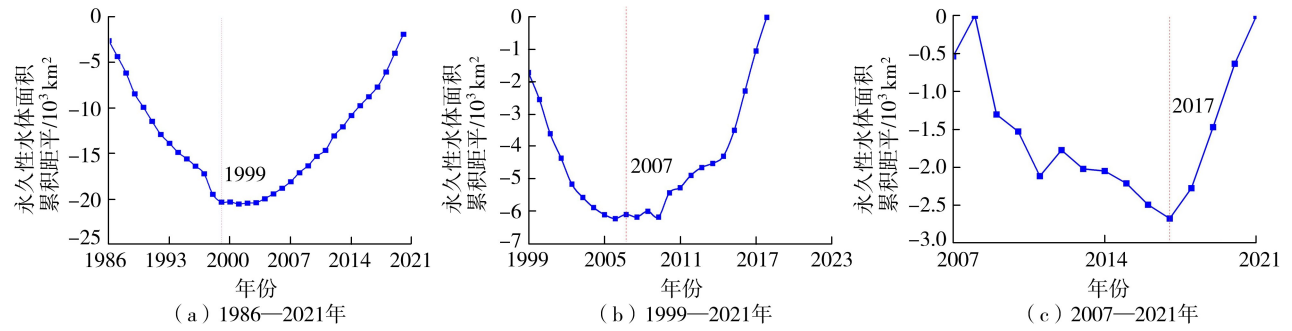


图9 黄河流域永久性水体面积不同时期的累积距平变化

Fig. 9 Cumulative anomaly changes of permanent water body area in the Yellow River Basin at different periods

预,黄河流域永久性水体面积的下降趋势得到了有效遏制。由图 9(b) 可见,1999—2021 年黄河流域永久性水体面积累积距平在 2007 年出现了新的拐点。这一拐点反映了流域内水资源利用与自然供给之间矛盾的加剧,可能是由于《黄河水量调度条例》的实施和流域用水需求变化共同作用的结果。由图 9(c) 可见,2007—2021 年黄河流域永久性水体面积累积距平在 2017 年再次出现拐点。这一拐点标志着生态保护政策的成效开始显现,水资源供需矛盾也在这一时期得到了阶段性的缓解。基于 1999 年、2007 年和 2017 年 3 个拐点,将研究期划分为 1986—1998 年、1999—2007 年、2008—2016 年、2017—2021 年 4 个时段。

3.4.2 贡献率分析

表 2 为不同时段永久性水体面积和气候因子的累积量斜率及其变化率。由表 2 可见,与 1986—1998 年相比,1999—2007 年降水量、气温和人类活动对黄河流域永久性水体面积增加的贡献率分别为 6.33%、37.24%和 56.43%;2008—2016 年的贡献率分别为 10.24%、19.58%和 70.18%;2017—2021 年的贡献率分别为 18.17%、19.83%和 62.00%。可

见,人类活动在各时段都对黄河流域水体面积变化起主导作用,其原因可能是生态流域修复政策和大规模的水利工程建设,这些措施直接或间接调控了水体面积的变化。降水量贡献率逐渐增加,可能是由于研究期内黄河流域降水量有所增加,并且人工调蓄水资源的效率增强^[30]。气温贡献率逐渐降低,但不同时段气温的贡献率仍为 20%左右,可能是因为水资源管理、调控水体存储等措施对蒸发效应有一定缓冲。

4 结 论

a. 选用 1986—2021 年 Landsat5/7/8 的表面反射率 Tier 1 产品,并结合 JRC 全球水体数据,采用混合指数算法进行黄河流域水体提取,利用 Sentinel-2 遥感影像进行精度验证。水体提取结果的 Kappa 系数为 0.8758,提取效果较好,混合指数算法能够有效捕捉黄河流域地表水体面积的变化。

b. 1986—2021 年,黄河流域及其上、中、下游地表水体面积呈增加趋势;典型湖库中扎陵湖、鄂陵湖、东平湖、龙羊峡水库和小浪底水库的永久性水体面积呈增加趋势,红碱淖和刘家峡水库呈现略减少的趋势。

c. 相对于 1986—1998 年,1999—2007 年、2008—2016 年、2017—2021 年的降水量对黄河流域永久性水体面积的贡献率分别为 6.33%、10.24%、18.17%,气温的贡献率分别为 37.24%、19.58%、19.83%,人类活动的贡献率分别为 50.34%、66.37%、59.75%。人类活动是黄河流域永久性水体面积增加的主导因素。4 个时段中。降水量的贡献率逐渐增加,气温的贡献率逐渐降低,但气温的贡献率仍占 20%左右。

参考文献:

[1] 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. (MA Zhuguo, FU Congbin, ZHOU Tianjun, et al.

表 2 不同时段永久性水体面积和气候因子的累积量斜率及其变化率			
Table 2 Slope and rate of change of accumulated permanent water body area and climate factors at different time periods			
时段	累积量斜率		
	永久性水体面积	降水量	气温
1986—1998 年	3 558.30	452.07	6.05
1999—2007 年	5 148.00	464.86	6.90
2008—2016 年	5 958.70	483.31	6.85
2017—2021 年	6 830.10	527.61	7.16
时段	斜率变化率/%		
	永久性水体面积	降水量	气温
1986—1998 年			
1999—2007 年	44.68	2.83	16.64
2008—2016 年	67.46	6.91	13.21
2017—2021 年	91.95	16.71	18.32

- Status and ponder of climate and hydrology changes in the Yellow River Basin[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 52-60. (in Chinese))
- [2] 徐宗学,班春广,张瑞.我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 1-8. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 1-8. (in Chinese))
- [3] JAKOVLJEVIĆ G, GOVEDARICA M, ÁLVAREZ-TABOADA F. Waterbody mapping: a comparison of remotely sensed and GIS open data sources [J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(8): 2936-2964.
- [4] WANG Yingbing, MA Jun, XIAO Xiangming, et al. Long-term dynamic of Poyang Lake surface water: a mapping work based on the Google Earth Engine cloud platform [J]. Remote Sensing, 2019, 11(3): 313.
- [5] DEVRIES B, HUANG Chengquan, LANG M W, et al. Automated quantification of surface water inundation in wetlands using optical satellite imagery [J]. Remote Sensing, 2017, 9(8): 807.
- [6] BERHANE T M, LANE C R, WU Qiusheng, et al. Decision-tree, rule-based, and random forest classification of high-resolution multispectral imagery for wetland mapping and inventory [J]. Remote Sensing, 2018, 10(4): 580.
- [7] 李丹,吴保生,陈博伟,等.基于卫星遥感的水体信息提取研究进展与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(2): 147-161. (LI Dan, WU Baosheng, CHEN Bowei, et al. Review of water body information extraction based on satellite remote sensing[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(2): 147-161. (in Chinese))
- [8] MCFEETERS S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [9] 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[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595. (XU Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595. (in Chinese))
- [10] 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.
- [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] 刘宇晨,高永年. Sentinel 时序影像的长江流域地表水体提取[J]. 遥感学报, 2022, 26(2): 358-372. (LIU Yuchen, GAO Yongnian. Surface water extraction in Yangtze River Basin based on sentinel time series image [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(2): 358-372. (in Chinese))
- [13] WANG Ruimeng, XIA Haoming, QIN Yaochen, et al. Dynamic monitoring of surface water area during 1989-2019 in the Hetao Plain using landsat data in Google Earth Engine[J]. Water, 2020, 12(11): 3010.
- [14] LIANG Kang, LI Yanzhong. Changes in lake area in response to climatic forcing in the endorheic Hongjian Lake Basin, China [J]. Remote Sensing, 2019, 11(24): 3046.
- [15] LUO Dongliang, JIN Huijun, DU Heqiang, et al. Variation of alpine lakes from 1986 to 2019 in the headwater area of the Yellow River, Tibetan Plateau using Google Earth Engine[J]. Advances in Climate Change Research, 2020, 11(1): 11-21.
- [16] 高吉喜,王永财,侯鹏,等.近20年黄河流域陆表水域面积时空变化特征研究[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1157-1164. (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[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1157-1164. (in Chinese))
- [17] 王波,黄津辉,郭宏伟,等.基于遥感的内陆水体水质监测研究进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 117-124. (WANG Bo, HUANG Jinhui, GUO Hongwei, et al. Progress in research on inland water quality monitoring based on remote sensing[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 117-124. (in Chinese))
- [18] 黄建平,张国龙,于海鹏,等.黄河流域近40年气候变化的时空特征[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1048-1058. (HUANG Jianping, ZHANG Guolong, YU Haipeng, et al. Characteristics of climate change in the Yellow River Basin during recent 40 years [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1048-1058. (in Chinese))
- [19] 刘婷婷,朱秀芳,郭锐,等. ERA5 再分析降水数据在中国的适用性分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 66-79. (LIU Tingting, ZHU Xiufang, GUO Rui, et al. Applicability of ERA5 reanalysis of precipitation data in China[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 66-79. (in Chinese))
- [20] ZOU Zhenhua, DONG Jinwei, MENARGUEZ M A, et al. Continued decrease of open surface water body area in Oklahoma during 1984-2015 [J]. Science of the Total Environment, 2017, 595: 451-460.

(下转第 114 页)

forecasting in Xiangxi River Basin, China [J]. Sustainability,2021,13(9):4627.

[33] WANG Sen,ZHONG Pingan,ZHU Feilin, et al. Analysis and forecasting of wetness-dryness encountering of a multi-water system based on a Vine Copula function-Bayesian network[J]. Water,2022,14(11):1701.

[34] 冯平,牛军宜,张永,等. 南水北调西线工程水源区河流与黄河的丰枯遭遇分析[J]. 水利学报,2010,41(8): 900-907. (FENG Ping, NIU Junyi, ZHANG Yong, et al. Analysis of wetness-dryness encountering probability among water source rivers and the Yellow River in the Western Route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(8): 900-907. (in Chinese))

(上接第 86 页)

[21] DENG Xinyuan,SONG Chunqiao,LIU Kai, et al. Remote sensing estimation of catchment-scale reservoir water impoundment in the upper Yellow River and implications for river discharge alteration [J]. Journal of Hydrology, 2020,585:124791.

[22] CONGALTON R G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data[J]. Remote Sensing of Environment,1991,37(1):35-46.

[23] 汪柳皓,魏显虎,张宗科,等. 青藏高原地区植被指数变化及其与温湿度因子的关系[J]. 森林与环境学报, 2022,42(2): 141-148. (WANG Liuhao, WEI Xianhu, ZHANG Zongke, et al. NDVI variation and its relationship with temperature and precipitation on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(2): 141-148. (in Chinese))

[24] 王随继,闫云霞,颜明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报,2012,67(3):388-397. (WANG Suiji, YAN Yunxia, YAN Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan Drainage Basin: application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity[J]. Acta Geographica Sinica, 2012,67(3):388-397. (in Chinese))

[25] 何振芳,牟婷婷,郭庆春,等. 1979—2019 年大汶河流域湿地时空演变与分异研究[J]. 水资源保护,2024,40(2): 134-140. (HE Zhenfang, MOU Tingting, GUO Qingchun, et al. Spatial-temporal evolution and differentiation study of wetlands in the Dawen River Basin from 1979 to 2019[J]. Water Resources Protection,2024, 40(2):134-140. (in Chinese))

[26] 江维,李英杰,邓彦,等. 红碱淖水面面积演变及其原因[J]. 人民黄河,2018,40(4): 72-75. (JIANG Wei, LI Yingjie, DENG Yan, et al. Water area changing of Hongjiannao lake and its reasons[J]. Yellow River,2018, 40(4):72-75. (in Chinese))

[27] ZHANG Yangchengsi, DU Jiaqiang, GUO Long, et al. Long-term detection and spatiotemporal variation analysis of open-surface water bodies in the Yellow River Basin from 1986 to 2020[J]. Science of The Total Environment, 2022,845:157152.

[28] ZHANG Wenxia,FURTADO K,WU Peili, et al. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world[J]. Science Advances,2021,7(31): eabf8021.

[29] LIU Qiang, YANG Zhifeng. Quantitative estimation of the impact of climate change on actual evapotranspiration in the Yellow River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2010,395(3/4):226-234.

[30] WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, JIN Junliang, et al. Impacts of climate change on water resources in the Yellow River basin and identification of global adaptation strategies [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,2017,22(1): 67-83.

(收稿日期:2024 - 12 - 09 编辑:王芳)