

顾及悬浮颗粒物浓度的黄河流域地表水体提取及时空变化

乔兴坡¹, 张志强², 李二山¹, 曹连海², 魏萌萌¹, 张璐², 郭浩然²

(1. 河南省水利第一工程局集团有限公司, 河南 郑州, 450016;

2. 华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 河南 郑州 450046)

摘要:【目的】研发适用于多泥沙河流的地表水体识别方法,厘清黄河流域地表水体时空变化特征,对于降低地表水体极端变化事件的风险意义重大。【方法】通过揭示6种典型水体指数水体提取精度随悬浮颗粒物浓度的变化规律,基于分级分类理念建立顾及悬浮颗粒物浓度的黄河流域地表水体提取方法(SWE-CSPM),从全域尺度、水资源二级分区尺度综合分析1991—2023年黄河流域地表水体时空变化。【结果】①相比6种典型水体指数和多指数水体提取规则法,SWE-CSPM方法的水体提取精度最高(总体精度95.44%,Kappa系数90.62%)。②在全域尺度,黄河流域最大水域面积呈现波动减小趋势,但变化量小。永久性水域面积呈逐年增大趋势,季节性水域面积呈逐年减小趋势。在水资源二级分区尺度,除内流区外,其他水资源二级分区永久性水域面积均呈现不同程度的增大趋势。【结论】黄河流域永久性水域面积逐年增大,主要得益于流域内降水量逐年增加和气候变暖导致冰川融水增加。季节性水域面积呈逐年减小趋势,主要原因在于水库工程建设、湖泊湿地补水使得部分季节性水域转为永久性水域。

关键词:悬浮颗粒物浓度;地表水体提取;水域面积时空变化;黄河流域

中图分类号:P90

文献标识码:A

河流、湖泊、水库、坑塘等地表水体是陆地生态系统的重要组成部分,对于维持生态系统健康,保障社会稳定和区域经济高质量发展至关重要^[1]。受气候变化和人类活动共同影响,全球地表水体的空间格局发生着巨大变化^[2-4]。地表水体的极端变化通常引发严重的水灾害,如洪涝、干旱等,制约区域经济发展甚至危害人民生命财产^[5]。因此,开展区域地表水体动态监测,厘清地表水体时空变化特征对于降低地表水体极端变化事件的风险意义重大。

卫星遥感影像为地表水体动态监测提供了良好数据源^[6-7]。水体指数法是广泛采用的多光谱卫星遥感影像地表水体提取方法。该类方法通常根据水体在绿光波段具有高反射率,且随着波长增大光谱反射率逐渐降低的光谱特征,通过不同波段的组合运算,达到增强水体信号且抑制非水体信号的目的。

的。归一化水体指数(Normalized Difference Water Index,NDWI)是最早被提出且广泛采用的水体指数^[8],但该指数在复杂的城市场景中水体提取效果较差^[9]。徐涵秋^[10]将NDWI中的近红外波段地表反射率替换为中红外波段地表反射率,提出改进的归一化水体指数(MNDWI),在一定程度上抑制了建筑物阴影对水体提取的干扰,提高了城市场景地表水体提取精度。针对阴影干扰问题,FEYISA G L等^[11]研发了自动水体提取指数(Automated Water Extraction Index,AWEI),该水体指数包含AWEI_{nsh}和AWEI_{sh}两种形式,其中AWEI_{sh}能够有效抑制阴影对水体提取的干扰。通过文献综述发现,现阶段已有上百种水体指数被开发^[9,12-18]。

机器学习分类法是另一种广泛采用的水体提取方法,包括监督分类法^[19-20]和非监督分类法。基

收稿日期/Received:2025-02-21

修回日期/Revised:2025-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52109017,32101591);河南省科技攻关项目(252102320224,232102111014,232102321108);河南省水利科技攻关计划项目(GG202541,GG202404,GG202405,GG202338);基于GIS\Catia技术的土方平衡技术研究与应用(HHGD-064);华北水利水电大学学科建设与发展研究一般项目(13)。

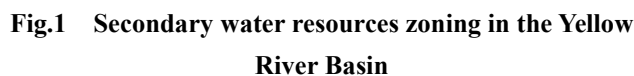
第一作者:乔兴坡(1985—),男,高级工程师,从事水利水电工程施工及管理方面的研究。E-mail:506692618@qq.com。

通信作者:曹连海(1970—),男,教授,博导,博士,从事水土资源高效利用方面的研究。E-mail:caolianhai1970@163.com。

黄河是我国乃至世界含沙量最大的河流^[25]。巨大的含沙量导致黄河流域水体光谱特征复杂,给地表水体提取提出了巨大挑战。已有学者建立多指数水体提取规则^[26],实现了黄河流域长时序地表水体的提取和动态监测。然而,这些方法通常未考虑黄河流域地表水体的多泥沙特征和水体光谱异质性特征,采用全局水体指数和水体规则,水体提取精度有待进一步提升。鉴于此,本研究充分考虑黄河流域地表水体的多泥沙特征,基于分级分类理念,建立顾及悬浮颗粒物浓度的地表水体提取方法,从全域和水资源二级分区 2 个尺度厘清 1991—2023 年黄河流域地表水体变化特征。

1.1 研究区概况和研究数据

河口镇、河口镇至龙门、龙门至三门峡、三门峡至花园口、花园口以下和内流区,如图 1 所示。



根据分层随机采样原则,以最小云量合成的 2021 年 Landsat 卫星遥感影像为主要数据源,通过目视解译并辅助 Sentinel-2 MSI 遥感影像选取 2 900 个样本点,其中 70%的样本点用于模型分割阈值的确定,30%用于精度评价。样本点空间分布如图 2 所示。



选取 6 种典型水体指数进行黄河流域水体提取适用性分析。各水体指数计算模型见表 1。

表 1 典型水体指数

Tab.1 Typical water body index

水体指数	数据	参考文献
$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{MIR}}{\rho_{Green} + \rho_{MIR}}$	Landsat 5	文献[10]
$AWEI_{sh} = 4(\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}) - 0.25\rho_{NIR} - 2.75\rho_{SWIR2}$	Landsat 5	文献[11]
$AWEI_{nsh} = \rho_{Blue} + 2.5\rho_{Green} - 1.5(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1}) - 0.25\rho_{SWIR2}$	Landsat 5	
$MBWI = 2\rho_{Green} - \rho_{Red} - \rho_{NIR} - \rho_{SWIR1} - \rho_{SWIR2}$	Landsat 7	文献[12]
$WI2021 = \frac{\rho_{Blue} + \rho_{Green} + \rho_{Red} - \rho_{NIR} - \rho_{SWIR1} - \rho_{SWIR2}}{\rho_{Blue} + \rho_{Green} + \rho_{Red} + \rho_{NIR} + \rho_{SWIR1} + \rho_{SWIR2}}$	Landsat 8	文献[15]
$WI2015 = 1.7204 + 171\rho_{Green} + 3\rho_{Red} - 70\rho_{NIR} - 45\rho_{SWIR1} - 71\rho_{SWIR2}$	Landsat 7	文献[9]

*注: ρ_{Blue} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{MIR} 、 ρ_{SWIR} 分别表示蓝色、绿色、红色、近红外、中红外、短波长红外波段的反射率。

2.2 悬浮颗粒物浓度反演

悬浮颗粒物浓度(Suspended Particulate Matter, SPM)是重要的水质参数,与水体光谱特征密切相关。黄河流域水体中悬浮颗粒物主要是悬浮泥沙,因此选用悬浮颗粒物浓度表征水体中泥沙含量。采用刘振宇等^[27]提出的悬浮颗粒物浓度反演算法,该算法已被 LI P 等^[28]验证,并应用于黄河河口区悬浮颗粒物浓度反演。模型如下:

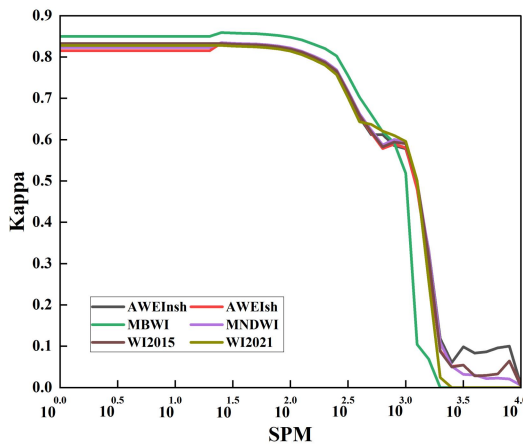
$$SPM = 10^{0.5897 \frac{\rho_{Red}}{\rho_{Green}} + 0.9864 \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{Green}} + 1.3166} \quad (1)$$

式中:SPM 表示水体悬浮颗粒物浓度,mg/L; ρ_{Green} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{NIR} 分别表示绿光波段、红光波段、近红外

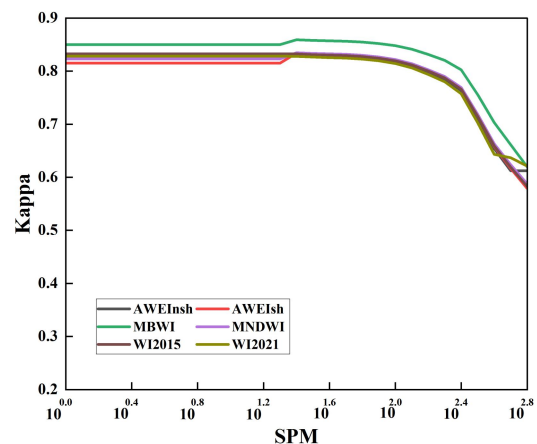
波段的地表反射率。

2.3 顾及悬浮颗粒物浓度的黄河流域地表水体提取方案

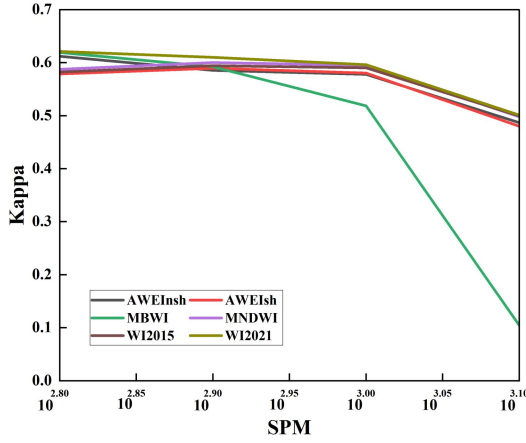
为建立顾及悬浮颗粒物浓度的黄河流域水体提取方案,以最小云量合成的 2021 年 Landsat 卫星遥感影像为主要数据源,结合样本点,分析了不同水体指数水体提取精度与悬浮颗粒物浓度的关系(如图 3 所示)。SPM 介于 $[0, 10^{2.8}]$ 时,6 个水体指数均能够得到较高的水体提取精度,MBWI 的水体提取精度最高。SPM 介于 $(10^{2.8}, 10^{3.1}]$ 时,MBWI 的水体提取精度显著降低,WI2021 的水体提取精度最高。SPM 介于 $(10^{3.1}, 10^4]$ 时,AWEI_{nsh} 的水体提取精度显著优于其它指标。



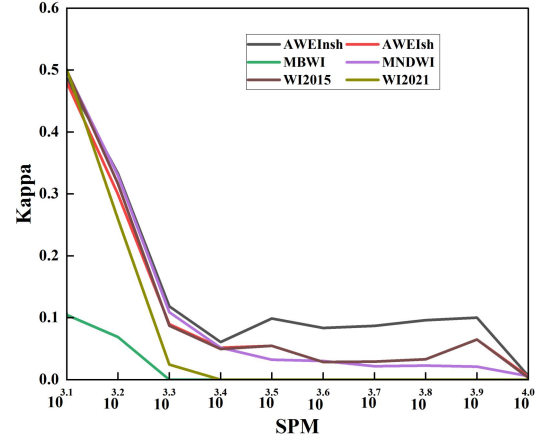
(a) SPM 介于 $[0, 10^4]$



(b) SPM 介于 $[0, 10^{2.8}]$



(c) SPM 介于 $(10^{2.8}, 10^{3.1}]$



(d) SPM 介于 $(10^{3.1}, 10^4]$

图3 不同SPM下各水体指数水体提取精度的变化

Fig.3 Changes in the extraction accuracy of each water body index under different SPMS

基于上述关系,通过反复试验,建立顾及悬浮颗粒物浓度的黄河流域地表水体提取方法(Surface Water Extraction Method Considering the Concentration of SPM,SWE-CSPM)。模型如下:

$$WI_{SPM} = \begin{cases} MBWI \geq -0.15 & (0 \leq SPM \leq 10^{2.8}) \\ WI2021 \geq 0.04 & (10^{2.8} < SPM \leq 10^{3.1}) \\ AWEI_{nsh} \geq 0.05 & (10^{3.1} < SPM \leq 10^4) \end{cases} \quad (2)$$

式中 WI_{SPM} 表示像元被识别为水体。SPM 介于 $[0, 10^{2.8}]$ 时,利用 $MBWI \geq -0.15$ 模型识别水体;SPM 介于 $(10^{2.8}, 10^{3.1}]$ 时,利用 $WI2021 \geq 0.04$ 模型识别水体;SPM 介于 $(10^{3.1}, 10^4]$ 时,利用 $AWEI_{nsh} \geq 0.05$ 模型识别水体。各模型阈值的选取通过反复试验确定。

为消除云、建筑、植被等高反射地物和山体阴影对地表水体识别的干扰,制定一系列后处理规则。首先利用红光波段、绿光波段和蓝光波段光谱反射率均小于 0.3 的规则剔除高反射地物。其次利用坡度小于 8° 的规则剔除山体阴影。

2.4 水体提取精度评价

选用总体精度(Overall Accuracy,OA)、Kappa 系数、错分误差(Commission Error,CE)、漏分误差(Omission Error,OE)作为精度评价指标。模型如下:

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^k n_{ii}}{N} \quad (3)$$

$$Kappa = \frac{N \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k (n_{i+} \cdot n_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (n_{i+} \cdot n_{+i})} \quad (4)$$

$$OE_i = \frac{n_{+i} - n_{ii}}{n_{+i}} \quad (5)$$

$$CE_i = \frac{n_{i+} - n_{ii}}{n_{i+}} \quad (6)$$

式中: n_{ii} 表示水体提取结果和真实地物类型均为第 i 类($i=1, 2, \dots, k$)的样本数量; N 表示样本的总数

量; n_{+i} 表示精度评价样本中第 i 类地物的样本数量; n_{i+} 表示水体提取结果中第 i 类地物的样本数量。

2.5 水体频率

根据水体频率将地表水体分为永久水体、季节性水体和最大水体。水体频率(Water Inundation Frequency,WIF)的计算模型如下:

$$WIF = \frac{W}{N} \quad (7)$$

式中 W 和 N 分别表示某年像元被识别为水体的次数和该像元本年度的有效观测次数。参考文献[29]: $WIF > 25\%$,为最大水体; $25\% < WIF \leq 75\%$,为季节性水体; $WIF > 75\%$,为永久性水体。

采用一元线性回归分析和最小二乘法研究黄河流域各水资源二级区永久水体、季节性水体和最大水体的年际变化,然后对比各二级区地表水体的年际变化特征,分析黄河流域地表水体的空间格局。

3 结果

3.1 水体提取精度评价

表 2 显示了各水体提取方法的提取精度。不难发现,6 种典型水体指数中,MBWI 的水体提取精度最高,其次是 $AWEI_{nsh}$ 和 $WI2021$ 。相比 6 种典型水体指数和多指数水体提取规则法^[29](Multi-Index Water Extraction Rule,MIWER),SWE-CSPM 的水体提取精度最高,总体精度 95.44%,Kappa 系数 90.62%。相比 MBWI 和 MIWER,SWE-CSPM 的水体提取总体精度分别提升了 2.84%和 1.44%,Kappa 系数分别提升了 5.64%和 2.88%。值得注意的是,相比 6 种典型水体指数,SWE-CSPM 和 MIWER 水体提取的错分误差显著减小,漏分误差略有增大。究其原因可能在于 SWE-CSPM 和 MIWER 均采用坡度数据和地物光谱特征进行后处理,有效消除了高反射地物和山体阴影对地表水体提取的干扰。

表 2 不同方法的 2021 年地表水体提取结果精度评价

Tab.2 Accuracy evaluation of surface water extraction by different methods in 2021

水体提取方法	OA	Kappa 系数	CE	OE
AWEI _{nsh}	91.71%	83.18%	11.76%	6.95%
AWEI _{sh}	90.92%	81.52%	11.72%	9.13%
MBWI	92.60%	84.98%	10.35%	6.45%
MNDWI	91.49%	82.79%	12.70%	6.20%
WI ₂₀₁₅	91.45%	82.65%	11.70%	7.71%
WI ₂₀₂₁	91.53%	82.81%	11.80%	7.37%
SWE-CSPM	95.44%	90.62%	2.58%	8.21%
MIWER	94.00%	87.74%	6.59%	7.45%

为进一步验证 SWE-CSPM 的有效性,后处理前的地表水体提取被评价。总体精度、kappa 系数、错分误差(CE)和漏分误差(OE)分别是 94.00%、87.74%、6.59%和 7.45%。总体精度和 Kappa 系数均大于单一水体指数,表明 SWE-CSPM 能够有效提高黄河流域地表水体提取精度。

图 4 显示了不同水体提取方法在高山地区的水体提取效果。该区域位于黄河源区,属于高海拔山地,冰雪和山体阴影是水体识别的重要干扰因素。不难发现,SWE-CSPM(图 4i)在高山地区的水体提取效果显著优于 6 种水体指数和 MIWER,能够有效区分冰雪、山体阴影和地表水体。

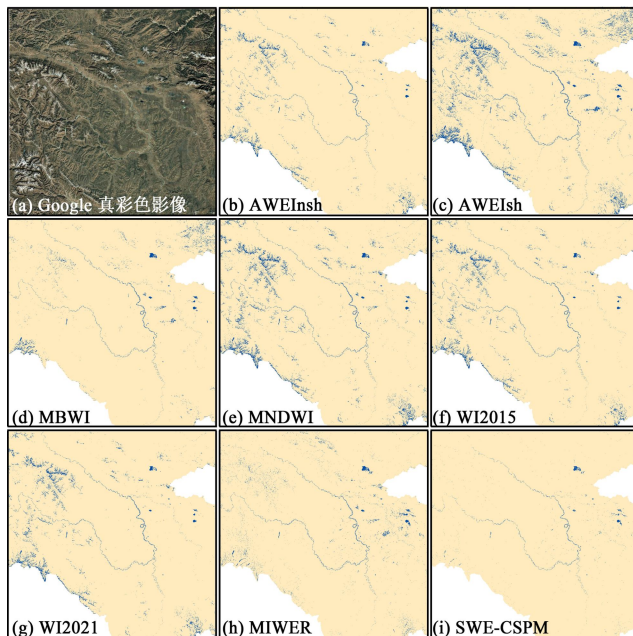


图 4 高山场景的水体提取结果

Fig.4 Water extraction in the mountain scene

图 5 显示了不同水体提取方法在城市区域的水体提取效果。该区域位于黄河中游,地处陕西省西安市,地表类型复杂多样,高发射建筑物、低反射建筑物、建筑物阴影是水体识别的主要干扰。对比发现,在城市区域,SWE-CSPM(图 5i)的水体提取效

果最优,错误提取最少,AWEIsh(图 5c)的水体提取效果较差,许多地物被错误识别为水体。

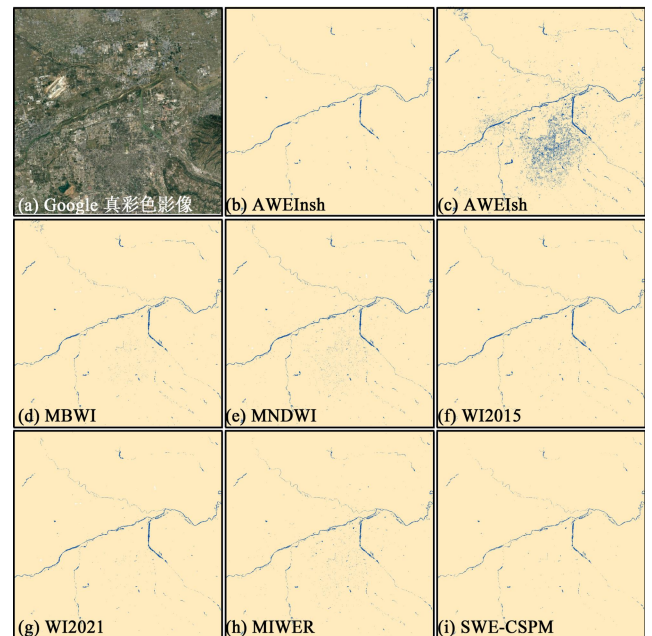


图 5 城市场景的水体提取效果

Fig.5 Water extraction in the urban scene

3.2 黄河流域地表水体水域面积变化

3.2.1 全域尺度水域面积变化

图 6(a)显示了 1991—2023 年黄河流域最大水体、永久性水体和季节性水体的水域面积变化。不难发现,1991—2023 年最大水体水域面积呈现波动变化,虽然整体呈现减小趋势,但变化量相对较小。永久性水体水域面积先减小(1991—2001 年)后增大(2001—2023 年),水域面积总体呈现增大趋势。季节性水体水域面积呈现减小趋势。相比 1991 年,2023 年季节性水体水域面积减小了 624 km²。

通过面积统计发现,1991—2023 年黄河流域全域尺度最大水体水域面积的年平均值为 8 414 km²,仅占黄河流域总面积的 1.05%,表明黄河流域水体外显面积较少,这可能与黄河流域降水少但蒸发量大的气候特征密切相关。永久性水体、季节性水体

水域面积的年平均值分别为 4 662 km²、3 751 km², 分别占最大水体水域面积的 55%和 45%,表明黄河流域水体以永久性水体占主导。

3.2.2 水资源二级分区尺度水域面积变化

图 6(b-i)显示了黄河流域各水资源二级分区最大水体、永久性水体和季节性水体的水域面积变化。1991—2023 年黄河流域各水资源二级分区最大水体水域面积排序为:龙羊峡以上>兰州至河口镇>花园口以下>龙门至三门峡>龙羊峡至兰州>三门峡至花园口>河口镇至龙门>内流区。龙羊峡以上二级分区水域面积最大,主要原因在于该区域是黄河流域主要产水区,水资源充沛,河流、湖泊等广泛分布。内流区二级分区水域面积最小,主要原因在于

该区域是毛乌素沙漠的主要分布区,属于干旱气候,降水少但蒸发量大。除了内流区,各水资源二级分区的永久性水体水域面积均呈不同程度的缓慢增大,增长速率从大到小依次为:龙羊峡以上>兰州至河口镇>花园口以下>龙门至三门峡>三门峡至花园口>河口镇至龙门>龙羊峡至兰州,年平均增长率介于 0~12 km²/年。总体而言,流域西部和南部水资源二级分区的永久性水体水域面积年平均增长率大于流域中部和北区。各水资源二级分区的季节性水体呈波动下降趋势,其中,龙门至三门峡下降速率最大。2022 年兰州至河口镇和内流区的季节性水体水域面积均呈现突变性增大,究其原因可能是 2022 年黄河流域西北部降水量显著增大。

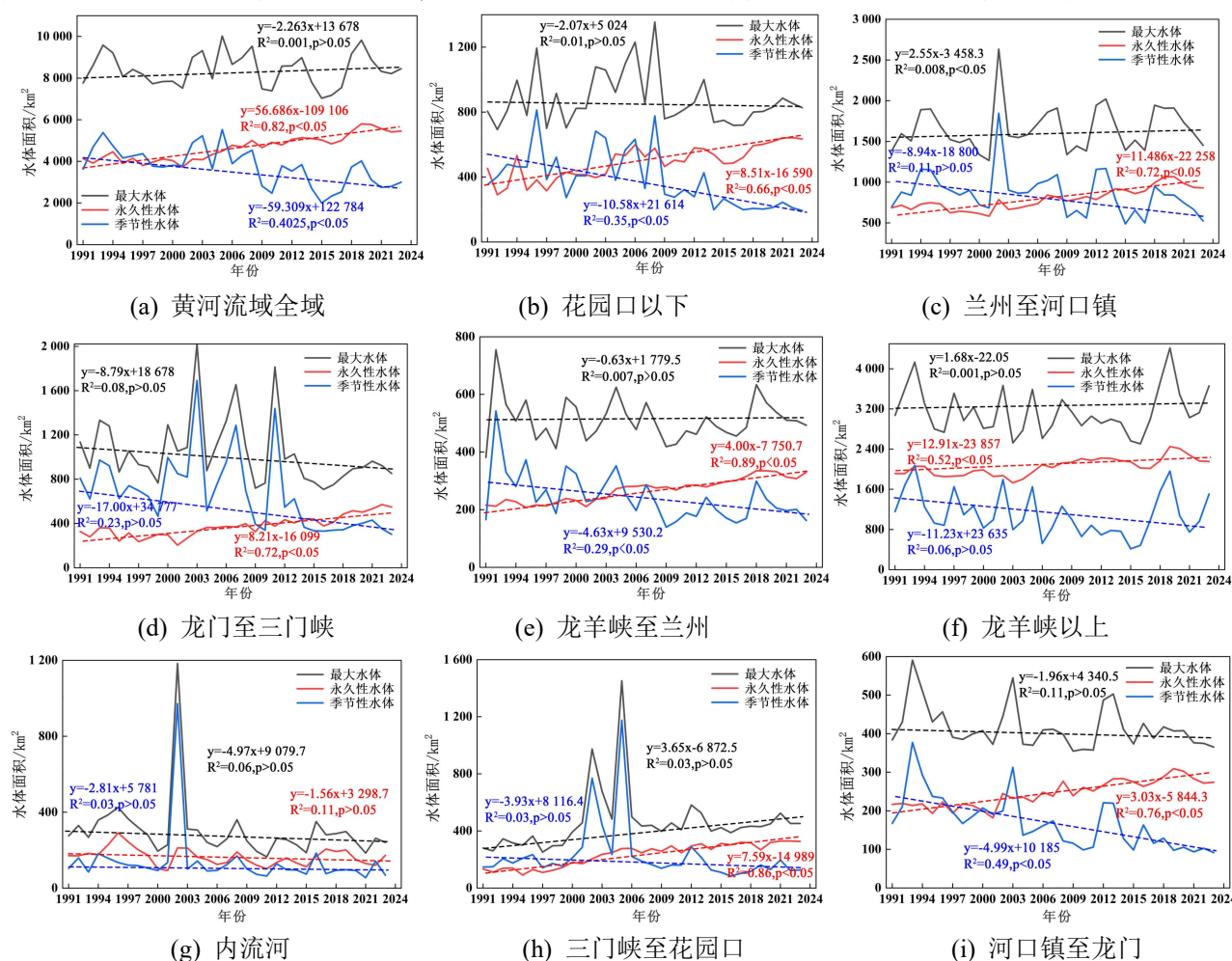


图 6 黄河流域全域及各水资源二级区最大水体、永久性水体和季节性水体的水域面积变化

Fig.6 Changes in the water area of the largest water body, permanent water body and seasonal water body throughout the Yellow River Basin and in each secondary water resource zone

4 讨论

4.1 水体指数适用性

黄河流域地表水体具有显著的多泥沙特征,且地表水体泥沙含量存在较大空间异质性,这给黄河流域地表水体识别提出了巨大挑战。相比 6 种典型

水体指数和多指数水体提取规则法(MIWER),本研究提出的 SWE-CSPM 具有最高水体提取精度(表 2)。究其原因可能在于:一方面 SWE-CSPM 利用总体悬浮颗粒物浓度指标将黄河流域复杂的水体类型简化为多个单一水体类型,对每种单一水体类型选用最适用的水体指数,减小了类内水体指数方差,

增大了类间方差,从而提升了水体与其他地物的可分离度,降低了水体提取的错分误差。另一方面 SWE-CSPM 采用坡度数据和地物光谱特征进行后处理,有效消除了高反射地物和山体阴影对地表水体提取的干扰(图 3 和图 4)。

本研究还对比分析了 6 种典型水体指数在黄河流域地表水体提取中的适用性。各水体指数的水体提取精度排序(表 2): $MBWI > AWEI_{nsh} > WI_{2021} > MNDWI > WI_{2015} > AWEI_{sh}$ 。因此,在采用单一水体指数进行黄河流域全域地表水体提取时,建议优先选用 MBWI、 $AWEI_{nsh}$ 和 WI_{2021} 。

对于黄河干流、重要支流和大型湖库,6 种水体指数均有较好的提取结果。但对于狭窄河流,尤其是宽度小于 15 m 的天然河道,受 Landsat 遥感影像空间分辨率(30 m)限制,各水体指数提取效果均较差。因此,在开展狭窄河流较多的西北干旱区水体提取时,建议选用更高空间分辨率的遥感影像,如 Sentinel-2 MSI 影像、高分二号卫星遥感影像等。从图 3 可知,MBWI 能够更加有效区分水体和冰雪(图 3d),因此对于黄河源区等冰雪覆盖较多的区域,建议优先选用 MBWI 进行水体提取。从图 4 可知, $AWEI_{nsh}$ 和 WI_{2021} 能够有效消除建成区对水体提取的干扰(图 5b 和图 5g),因此对于建成区较多的区域,建议优先选用 $AWEI_{nsh}$ 和 WI_{2021} 进行水体提取。

4.2 水域面积时空变化特征

本研究研究发现,在全域尺度,最大水体水域面积呈波动减小趋势,但变化量小。永久性水域面积呈逐年增大趋势,季节性水域面积呈逐年减小趋势。该趋势与 Zhang 等^[2]、李崇巍等^[29]的研究基本一致,但水域面积略小于李崇巍等研究,主要原因在于 SWE-CSPM 提高了地表水体提取精度,减小了错分误差。参考已有研究成果^[30,31],黄河流域永久性水域面积逐年增大,主要得益于黄河流域降水量逐年增加和气候变暖导致冰川融水增加。季节性水域面积呈逐年减小趋势,主要原因在于水库工程建设、湖泊湿地补水使得部分季节性水域转为永久性水域。

黄河流域地表水体变化呈现较大的空间异质性。内流区的永久性水域面积保持稳定,其他分区永久性水域面积均呈不同程度的增大趋势。其中,龙羊峡以上永久性水域面积增长速率最大,且最大水域面积最大,究其原因在于该区域是黄河流域主要产水区,水资源充沛。

4.3 本研究的不足和未来工作

本研究采用刘振宇等学者^[27]提出的悬浮颗粒物浓度反演算法反演水体中悬浮颗粒物浓度,并依此对黄河流域地表水体进行分类分级。尽管该算法

已在黄河河口进行了成功应用,但模型略显复杂,且在黄河流域全域的精度尚未验证。在后续研究中,我们将努力探索更为简单有效的黄河流域地表水体分类分级指标。此外,将针对悬浮颗粒物浓度达的极度浑浊水体,研发新的水体提取算法。

从全域和水资源二级分区两个尺度分析了黄河流域地表水体时空变化特征,但尚未深入分析气候变化和人类活动对不同尺度黄河流域地表水体时空变化的驱动机制。在后续研究中,我们将辅助地形数据和更高空间分辨率的遥感影像开展黄河流域地表水体分类研究,将黄河流域地表水体分类为:黄河干流、一级支流、二级支流、三级支流、水库、天然湖泊、坑塘、湿地等。针对每类水体分析其时空变化特征,并结合降水、气温等气象数据和人类活动取用水数据,阐明黄河流域地表水体时空变化的驱动机制,以期为黄河流域防洪管理、干旱应急处置、气候变化适应性管理等提供数据支撑和决策支持。

5 结论

针对黄河流域地表水体悬浮颗粒浓度大且时空异质性大的问题,本研究在深入分析典型地表水体指数与悬浮颗粒浓度相关关系的基础上,基于分级分类理念,提出了顾及悬浮颗粒物浓度的黄河流域地表水体提取方法。相比 6 种典型水体指数和多指数水体提取规则法(MIWER),SWE-CSPM 显著降低了地表水体提取的错分误差,地表水体提取精度最高(总体精度 95.44%,Kappa 系数 90.62%)。

对比 6 种典型水体指数,当采用单一水体指数进行黄河流域全域地表水体提取时,建议选用 MBWI、 $AWEI_{nsh}$ 和 WI_{2021} 。开展局部水体提取时,对于冰雪覆盖较多的区域,建议优先选用 MBWI;对于建成区较多的区域,建议优先选用 $AWEI_{nsh}$ 和 WI_{2021} 。

在全域尺度,黄河流域最大水体水域面积呈波动减小趋势,但变化量小。永久性水域面积呈逐年增大趋势,季节性水域面积呈逐年减小趋势。在水资源二级分区尺度,除内流区的永久性水域面积保持基本稳定外,其他分区永久性水域面积均呈现不同程度的增大,其中龙羊峡以上分区永久性水域面积增长速率最大。后续将进一步开展黄河流域地表水体分类研究,并结合降水、气温等气象数据和人类活动取用水数据,深入探究不同水体类型水域面积时空变化特征和驱动机制,以期为黄河流域水资源规划管理提供更为详细的决策支撑。

参 考 文 献

- [1] YAMAZAKI D, TRIGG M A. The dynamics of earth's surface water[J]. *Nature*, 2016, 540: 348-349.
- [2] ZHANG Z Q, GUO X Y, CAO L H, et al. Multi-scale variation in surface water area in the Yellow River Basin (1991–2023) based on suspended particulate matter concentration and water indexes[J]. *Water*, 2024, 16, 2704.
- [3] COOLEY S W, RYAN J C, SMITH L C. Human alteration of global surface water storage variability[J]. *Nature*, 2021, 591: 78-81.
- [4] SCANLON B R, FAKHREDDINE S, RATEB A, et al. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4: 87-101.
- [5] SOGNO P, KLEIN I, KUENZER C. Remote sensing of surface water dynamics in the context of global change: a review[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14: 2475.
- [6] ZHANG Z Q, ZHANG X C, JIANG X, et al. Automated surface water extraction combining sentinel-2 imagery and openstreetmap using presence and background learning (PBL) algorithm[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(10): 3784-3798.
- [7] 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[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3471.
- [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.
- [9] FISHER A, FLOOD N, DANAHER T. Comparing landsat water index methods for automated water classification in eastern australia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 175: 167-182.
- [10] 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 H Q. 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.]
- [11] 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, 40: 23-35.
- [12] 王小标, 谢顺平, 都金康. 水体指数构建及其在复杂环境下有效性研究[J]. *遥感学报*, 2018, 22(2): 360-372. [WANG X B, XIE S P, DU J K. Water index formulation and its effectiveness research on the complicated surface water surroundings[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(2): 360-372.]
- [13] WANG S, BAIG M H A, ZHANG L, et al. A simple enhanced water index (EWI) for percent surface water estimation using landsat data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8: 90-97.
- [14] 吴庆双, 汪明秀, 申茜, 等. Sentinel-2 遥感图像的细小水体提取[J]. *遥感学报*, 2022, 26(4): 781-794. [WU Q S, WANG M X, SHEN Q. Small water body extraction method based on sentinel-2 satellite multi-spectral remote sensing image[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2022, 26(4): 781-794.]
- [15] 胡荣明, 姚晓宙, 李鹏飞, 等. Landast-8 影像的水体指数构建及稳定性研究[J]. *测绘科学*, 2022, 47(5): 150-155. [HU R M, YAO X Y, LI P F, et al. Research on the construction and stability of the water index of Landsat-8 images[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, 47(5): 150-155.]
- [16] 李辉, 高学睿, 谢治国, 等. 陕西省黄土高原地表水体遥感监测与时空演变特征分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(3): 19-27. [LI H, GAO X R, XIE Z G, et al. Remote sensing monitoring and analysis of spatiotemporal evolution characteristics of surface water bodies in the Loess Plateau of Shaanxi Province[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electricpower (Natural Science Edition)*, 2022, 43(3): 19-27.]
- [17] 朱宝山, 张绍华, 徐大龙, 等. 综合水体指数及其应用[J]. *测绘科学技术学报*, 2013, 30(1): 19-23. [ZHANG B S, ZHANG S H, XU D L. Comprehensive water index and its application[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2013, 30(1): 19-23.]
- [18] 张磊, 韩秀珍, 翁富忠, 等. 基于 Sentinel-2A MSI 数据的水体信息提取算法对比研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(12): 505-515. [ZHANG L, HAN X Z, WENG F Z, et al. Comparison of water information extraction algorithms based on sentinel-2A MSI data[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022,

- 59(12):1228007.]
- [19] LI Y S,DANG B,ZHANG Y J,et al.Water body classification from high-resolution optical remote sensing imagery:achievements and perspectives[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2022,187: 306-327.
- [20] 李振轩,黄敏儿,高飞,等.基于 U-Net、U-Net++和 Attention-U-Net 网络的遥感影像水体提取[J].测绘通报,2024,(8):26-30.[LI Z X,HUANG M,GAO F,et al.Remote sensing image water body extraction based on U-Net,U-Net++ and attention-U-Net networks[J].Bulletin of Surveying and Mapping, 2024,8:26-30.]
- [21] XING H Q,NIU J G,FENG Y Y,et al.A coastal wetlands mapping approach of Yellow River Delta with a hierarchical classification and optimal feature selection framework[J].Catena,2023,223:106897.
- [22] LI Z S,ZHANG X L,XIAO P F.Spectral index-driven FCN model training for water extraction from multispectral imagery[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2022,192: 344-360.
- [23] CHANG L C,WANG W H,CHANG F J.Explore training self-organizing map methods for clustering high-dimensional flood inundation maps[J].Journal of Hydrology,2021,595:125655.
- [24] 王宇航,杨肖丽,吴凡,等.黄河流域未来陆地水储量时空演变趋势[J].人民黄河,2024,46(5):80-84,97. [WANG Y H,YANG X L,WU F,et al.Estimation of the temporal and spatial evolution trend of future terrestrial water reserves in the Yellow River Basin[J].Yellow River,2024,46(5):80-84,97.]
- [25] 张志强,刘欢,左其亭,等.2000—2019 年黄河流域植被覆盖度时空变化[J].资源科学,2021,43(4): 849-858.[ZHANG Z Q,LIU H,ZUO Q T,et al. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000-2019[J]. Resources Science,2021,43(4):849-858.]
- [26] 涂焱,陈阳,夏江周,等.2002—2020 年海河流域陆地水储量变化的时空变化特征[J].天津师范大学学报(自然科学版),2024,44(2):56-61.[TU Y,CHEN Y,XIA J Z,et al.Temporal and spatial variation characteristics of terrestrial water storage change in the Haihe River Basin from 2002 to 2020[J].Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition),2024,44(2):56-61.]
- [27] 刘振宇,崔廷伟,张胜花,等.黄河口海域悬浮物浓度 Landsat8 OLI 分段线性反演[J].光谱学与光谱分析,2018,38(8):2536-2541.[LIU Z Y,CUI T W, ZHANG S H.Piecewise linear retrieval suspended particulate matter for the Yellow River Estuary based on Landsat8 OLI[J].Spectroscopy and Spectral Analysis,2018,38(8):2536-2541.]
- [28] LI P,KE Y H,WANG D W,et al.Human impact on suspended particulate matter in the Yellow River Estuary, China: evidence from remote sensing data fusion using an improved spatiotemporal fusion method[J].Science of the Total Environment,2021, 750:141612.
- [29] 李崇巍,王志慧,汤秋鸿,等.1986—2019 年黄河流域地表水体动态变化及其影响因素[J].地理学报, 2022,77(5):1153-1168. [LI C W,WANG Z H,TANG Q H,et al.Dynamics of surface water area in the Yellow River Basin and its influencing mechanism during 1986-2019 based on Google Earth Engine[J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(5):1153-1168.]
- [30] JING W L,YAO L,ZHAO X D,et al.Understanding terrestrial water storage declining trends in the Yellow River Basin[J].Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2019,124(23):12963-12984.
- [31] LIN M,BISWAS A,BENNETT E M.Spatio-temporal dynamics of groundwater storage changes in the Yellow River Basin[J].Journal of Environmental Management,2019,235:84-95.

Surface Water Extraction and Spatiotemporal Changes in the Yellow River Basin Considering the Suspended Particulate Matter Concentration

QIAO Xingpo¹, ZHANG Zhiqiang², LI Ershan¹, CAO Lianhai², WEI Mengmeng¹, ZHANG Lu², GUO Haoran²

(1.Henan Provincial Water Resources First Engineering Bureau Group Co., Ltd, Zhengzhou 450016, China; 2.College of

Abstract: **【Objective】** The development of surface water identification methods suitable for high sediment content rivers, and the clarification of the spatio-temporal variations of surface water in the Yellow River Basin (YRB), are of great significance for reducing the risks of extreme changes in surface water. **【Methods】** This study reveals the variation laws of the extraction accuracy of six typical water body indices with the suspended particulate matter (SPM) concentrations. On this basis, a surface water extraction method considering SPM concentrations (SWE-CSPM) is proposed. Finally, this study examines the dynamic variations of surface water in the YRB at two scales: the global scale, the secondary water resource zoning scale. **【Results】** ① Compared with six typical water body indices and the multi-index water body extraction rule method, the water extraction accuracy of SWE-CSPM is the highest (overall accuracy 95.44%, Kappa coefficient 90.62%). ② At the global scale, the maximum water area of the YRB shows a decreasing trend, but the change amount is small. The permanent water area shows an uptrend, whereas the seasonal water area shows a downtrend year by year. At the secondary water resource zoning scale, the permanent water area of other secondary water resource zonings shows an increasing trend in different degrees, except for the Interior Drainage Area. **【Conclusion】** The area of permanent water in the YRB has been increasing year by year, mainly due to the increasing precipitation and the increase in glacial meltwater caused by climate warming within the basin. The area of seasonal water has been decreasing year by year, mainly due to the construction of reservoirs and the replenishment of lakes and wetlands, which has led to some seasonal water turning into permanent water.

Keywords: suspended particulate matter concentration; surface water extraction; surface water spatiotemporal variation; Yellow River Basin