

基于 WEP 模型的黄河水源涵养区水源涵养量 动态评估与关键驱动因素解析

岁姚炳,牛存稳,刘佳嘉,贾仰文,杜军凯,郝春洋

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要:基于 WEP 模型和水源涵养量评估公式,利用地理探测器和情景分析法识别了影响水源涵养的关键因素,并定量评估了气候变化和人类活动对黄河水源涵养区水源涵养的影响。结果表明:黄河水源涵养区多年平均水源涵养量为 140 mm,其中兰州以上地区水源涵养量持续增加,而渭河南山支流和伊洛河流域水源涵养量持续减少;水源涵养量高值区主要分布在祁连山区、黄河源区南部、渭河南山支流中段及伊洛河流域上游;降水量是影响研究区水源涵养量的主导因素,气温、相对湿度、地形、蒸散发等因素亦显著影响其分布,且各因素之间存在协同作用;在河湖源头及高原山区,气候变化是影响水源涵养的主导因素,而在人为干扰强度大的地区,特别是中心城区,水源涵养则主要受人类活动影响。

关键词:WEP 模型;水源涵养;地理探测器;气候变化;人类活动;黄河水源涵养区

中图分类号:P333;X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)02-0065-12

Dynamic assessment of water conservation and analysis of key driving factors in the Yellow River water conservation area based on WEP model//SUI Yaobing, NIU Cunwen, LIU Jiajia, JIA Yangwen, DU Junkai, HAO Chunfeng(*State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: Based on the WEP model and the water conservation capacity assessment formula, geographic detectors and scenario analysis were used to identify key factors influencing water conservation. The impacts of climate change and human activities on water conservation in the Yellow River water conservation area were quantitatively evaluated. The results show that the multi-year average water conservation capacity in the Yellow River water conservation area is 140 mm. The water conservation capacity in the region above Lanzhou has continued to increase, while it has consistently decreased in the southern tributaries of the Wei River and the Yiluo River Basin. High-value areas of water conservation are mainly distributed in the Qilian Mountains, the southern part of the Yellow River source region, the middle reaches of the southern tributaries of the Wei River, and the upper reaches of the Yiluo River Basin. Precipitation is the dominant factor affecting water conservation in the study area, while temperature, relative humidity, topography, and evapotranspiration also significantly influence its distribution, with synergistic effects among these factors. In the headwaters of rivers and lakes and in plateau mountain regions, climate change is the dominant factor affecting water conservation. In areas with intense human interference, particularly in central urban areas, water conservation is primarily influenced by human activities.

Key words: WEP model; water conservation; geodetector; climate change; human activity; the Yellow River water conservation area

水源涵养具有提供水源、净化水质、削峰补枯等重要功能^[1],可维护生态系统的健康和稳定,使水资源得到有效保护和管理。在全球气候变化^[2-3]和人类活动^[4-5]的双重影响下,科学评估水源涵养量和解析水源涵养的驱动因素是恢复和提升区域水源涵

养功能的重要前提。目前关于水源涵养量的评估方法主要分两类:第一类是从森林水文学角度出发的概念模型方法,如年径流法^[5]、降水贮存法^[6]等;第二类是基于水量平衡原理考虑生态系统涵养蓄水量的物理模型方法,如 InVEST 模型^[7]、SWAT 模

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3201105)

作者简介:岁姚炳(1998—),男,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:suiyaobing@edu.iwhr.com

通信作者:牛存稳(1979—),男,正高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:niucw@iwhr.com

型^[8]等。第二类方法能实现水源涵养的多时空尺度的评估,可更好满足实际工作的需求^[9],但已有模型多关注自然水循环过程下的生态系统对降水的截留、贮存、转化过程,较少考虑社会取水过程对区域水源涵养量的影响,具有一定局限性。基于“自然-社会”二元水循环理论开发的 WEP 分布式水文模型^[10],结合改进的水源涵养量评估公式,可对区域水源涵养量进行动态评价,并充分考虑了影响水源涵养的因素,包括气象^[11-12](降水、气温、蒸散发、日照)、下垫面(土地利用类型、土壤属性、地形、植被特征)^[13-15]和社会经济^[16](GDP、人口密度、人类足迹指数)等因素。尹云鹤等^[17]的研究表明降水是影响水源涵养的关键因素,两者的时空分布特征高度相似。石莹等^[18]的研究表明人类活动影响下土地利用类型的变化以及植被空间分布特征的重构将显著影响区域水源涵养功能的发挥。但由于水源涵养存在空间异质性,导致部分驱动因素对水源涵养的影响存在地区差异,龚诗涵等^[11-12]的研究表明气温和蒸散发同水源涵养的相关性在全国和武烈河流域表现出相反趋势。

黄河兰州以上地区、渭河南山支流和伊洛河流域是黄河流域发挥水源涵养功能最重要的区域(以下简称“黄河水源涵养区”),以黄河流域 38% 的面积贡献了 84% 的河川径流^[19-20],其丰枯变化决定了黄河水资源量的多寡,但其生态环境脆弱^[21-22],特别是近年来植被^[23-24]、冰川^[25]、冻土^[26]和径流^[27]均发生了较明显的变化,加之人类活动的影响逐步加剧,对保障流域水资源、生态安全提出了严峻挑战。鉴于此,本文在科学评估黄河水源涵养区水源涵养量的基础上,运用数理统计的方法识别其影响因素,借助情景分析方法定量评估气候变化和人类活动对水源涵养的影响,以期为黄河流域生态环境保护提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河水源涵养区位于 30. 89° N ~ 39. 79° N、95. 24° E ~ 114. 29° E,地处青藏高原和黄土高原的过渡地带,流域面积约 30 万 km²,属高原气候区、中温带和南温带气候区,干湿分明、冬冷夏热。研究区概况见图 1,根据流域特征,将黄河水源涵养区分为 3 部分:兰州以上地区、渭河南山支流和伊洛河流域。黄河水源涵养区多年平均降水量 573 mm,其中兰州以上地区为 503 mm,渭河南山支流为 586 mm,伊洛河流域为 687 mm;多年平均气温 2. 88 °C^[28],其中兰州以上地区为 0. 60 °C,渭河南山支流为 9. 04 °C,伊洛河

流域为 12. 90 °C;多年平均蒸散发 473 mm,其中兰州以上地区为 356 mm,渭河南山支流为 462 mm,伊洛河流域为 514 mm。土地利用类型主要以耕地、森林和草地为主,其面积总和占整个黄河水源涵养区的 90% 以上,土壤类型主要涵盖高山土、初育土、钙层土、半淋溶土,平均土壤厚度 83. 90 cm^[29]。

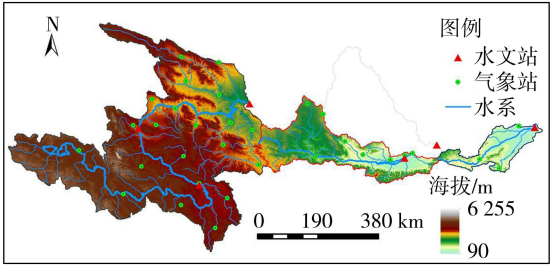


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

a. 水文气象数据。包括 32 个气象站点 1956—2021 年逐日降水量、气温、风速、相对湿度和日照数据,从中国气象数据共享服务网(<https://data.cma.cn/>)获取,采用考虑相关系数的综合插值方法,将站点数据插值到模型计算单元;1956—2021 年 6 个水文站的逐月流量数据,从黄河水文年鉴获取。

b. 卫星遥感数据。包括 DEM、土壤属性(土壤类型、土壤厚度)、土地利用类型、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、社会经济(GDP 和人口密度)等数据。DEM 数据分辨率为 30 m × 30 m,从地理空间数据云获取(<https://www.gscloud.cn/>);土壤厚度(分辨率为 1 km × 1 km)、土壤类型、土地利用类型数据(1980—2018 年,共 8 期)从国家青藏高原科学数据中心获取(<https://data.tpdc.ac.cn/>);人口密度数据(1990—2020 年,共 7 期)从资源环境科学与数据中心获取(<https://www.resdc.cn/>);GDP 数据(1990—2020 年,共 7 期)从地球资源数据云获取(<http://www.gis5g.com/>),空间分辨率为 1 km × 1 km,借助 ArcGIS 10.7 软件对数据裁剪和重分类;NDVI 数据(1982—2021 年)空间分辨率为 1/12° × 1/12°,时间分辨率为 16 d,从 GIMMS 数据集获取(<http://poles.tpdc.ac.cn/en/data/>),按最大值合成法将原始数据统计为年尺度,同时利用 ArcGIS 10.7 软件对数据裁剪和分区统计。

2 研究方法

2.1 水源涵养量评估公式

从生态学角度出发,水源涵养是指在“自然-人工”二元水循环过程中,生态系统借助土壤等介质将水分贮存、转化和利用的现象^[30]。水源涵养量评

估公式为

$$W = I - R_s - ET_0 \quad (1)$$

式中: W 为水源涵养量; I 为源项, 包括降水量(包括积融雪过程)和灌溉量(扣除渗漏损失量); R_s 为地表径流量; ET_0 为非植被蒸散发量。

2.2 WEP 模型

WEP 模型基于水量和能量平衡原理^[31], 以子流域套等高带为计算单元, 运用 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散发, 采用 Green-Ampt 模型模拟入渗过程, 使用霍顿产流和饱和坡面产流模式计算地表产流量, 借用运动波或动力波模型计算坡面和河道汇流, 应用度日因子法对积融雪过程进行模拟, 并耦合工业、生活和农业用水等人工侧支水循环过程。选择纳什效率系数 N_{SE} 和水量平衡误差 R_E 来评估模型性能。

2.3 数理统计方法

采用非参数检验方法 Mann-Kendall (M-K) 检验^[32] 评估水源涵养的演变趋势; 利用 Theil-Sen Median 方法^[33] 量化水源涵养量的变化速率; 运用冷热点分析方法^[34] 识别水源涵养的空间分布情况; 借助地理探测器解析影响水源涵养的关键驱动因素^[35]; 选用莫兰指数^[36] 和地理加权回归模型分析要素与水源涵养的空间相关关系。各方法计算过程参见文献^[37]。

2.4 归因分析方法

采用多因素综合影响贡献量分解算法评估气候变化和人类活动的影响^[38]。基于水量平衡原理, 变化期的水源涵养相对基准期的变化量等于气候变化引起的水源涵养变化量和人类活动引起的水源涵养变化量之和, 其中人类活动的影响可细分为土地利用类型和社会取用水过程的影响, 气候变化的影响可细分为降水、气温、风速、相对湿度、日照时数的影响, 表达式为

$$\Delta W = \Delta W_H + \Delta W_C \quad (2)$$

其中 $\Delta W_H = \Delta W_L + \Delta W_U$

$\Delta W_C = \Delta W_P + \Delta W_T + \Delta W_{RH} + \Delta W_V + \Delta W_{SD} + \Delta W_O$
式中: ΔW 为水源涵养的变化量; ΔW_C 为气候变化对水源涵养的影响量; ΔW_H 为人类活动对水源涵养的影响量; ΔW_P 、 ΔW_T 、 ΔW_{RH} 、 ΔW_V 、 ΔW_{SD} 、 ΔW_O 、 ΔW_L 、 ΔW_U 分别为降水量、气温、相对湿度、风速、日照、其他气候要素、土地利用类型、社会取用水过程对水源涵养的影响量。

3 结果与分析

3.1 WEP 模型构建与验证

根据预处理的地形、水文、气象等数据, 构建黄河水源涵养区 WEP 模型。将整个研究区划分成

3246 个子流域和 15272 个等高带(图 2), 其中兰州以上地区包括 2419 个子流域和 11320 个等高带; 渭河南山支流包括 602 个子流域和 2818 个等高带; 伊洛河流域包括 225 个子流域和 1134 个等高带。

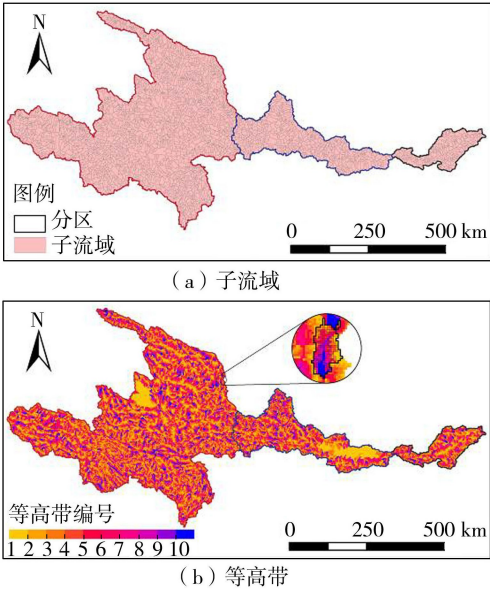


图 2 WEP 模型子流域和等高带划分

Fig. 2 Sub-basin and contour division of WEP model

考虑 1980 年以前的水循环过程受人类活动影响相对较小, 数据的一致性较高, 更有助于 WEP 模型率定合理的参数值, 同时较长的验证期可以更好地检测模型性能。因此, 划定率定期为 1957—1980 年, 验证期为 1981—2021 年。图 3 为 6 个水文站 WEP 模型模拟流量过程与实测流量过程对比, 可以看出模拟流量与实测流量具有较高的一致性, 且流量过程拟合较好。表 1 为 WEP 模型评估结果, 由表 1 可见, 率定期所有站点的 N_{SE} 均在 0.70 以上, 玛曲、兰州和唐乃亥 3 站的 N_{SE} 超过 0.80, R_E 均在 $\pm 10\%$ 范围内; 验证期模拟效果略低于率定期, 除兰州和黑石关站 N_{SE} 略低于 0.70 外, 其余站点的 N_{SE} 均在 0.70 以上, R_E 均在 $\pm 10\%$ 范围内。可见, WEP 模型在模拟黄河水源涵养区水循环过程方面表现出良好的性能, 可适用于研究区水循环要素模拟。

3.2 水源涵养量动态评估与趋势演变特征

图 4 为研究区 1957—2021 年降水量、蒸散发、水源涵养量变化过程。由图 4 可见, 1957—2021 年黄河水源涵养区多年平均水源涵养量为 140.00 mm, 其中, 兰州以上地区、渭河南山支流和伊洛河流域多年平均水源涵养量分别为 138.56、125.67、196.83 mm。表 2 为 1957—2021 年研究区水源涵养量、降水量、蒸散发趋势检验结果, 表中 Z 值表示 M-K 检验统计量, β 值表示 Theil-Sen Median

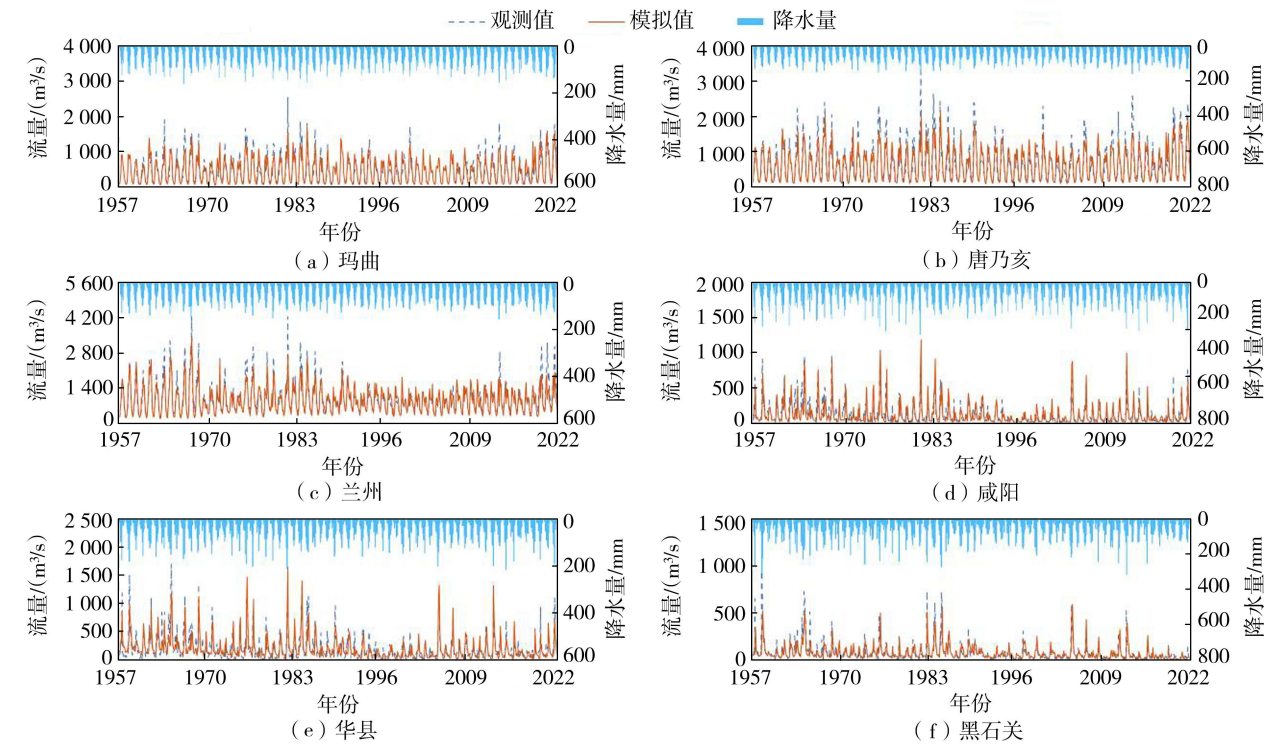


图 3 6 个水文站 WEP 模型模拟流量过程与实测流量过程对比

Fig. 3 Comparison of simulated and measured flow processes using WEP model at 6 hydrological stations

表 1 WEP 模型评估结果

Table 1 Evaluation results of WEP model

水文站	率定期		验证期		研究期	
	N_{SE}	$R_E/\%$	N_{SE}	$R_E/\%$	N_{SE}	$R_E/\%$
玛曲	0.803	-1.10	0.781	3.78	0.789	1.83
唐乃亥	0.840	-2.45	0.801	2.91	0.814	0.94
兰州	0.864	-5.91	0.647	-4.17	0.767	-4.84
咸阳	0.753	-8.53	0.731	3.08	0.750	-2.40
华县	0.746	2.16	0.760	-7.87	0.756	-3.50
黑石关	0.710	1.22	0.611	-6.36	0.664	-2.08

方法统计量。由表 2 可见,黄河水源涵养区年水源涵养量呈不显著波动变化趋势,具体表现为:兰州以上地区的水源涵养量以每 10 a 0.99 mm 的速率不显著增加($p>0.05$),渭河南山支流和伊洛河流域的水源涵养量分别以每 10 a 3.84 和 4.25 mm 的速率不显著减少($p>0.05$)。

图 5 为研究区水源涵养量变化趋势空间分布特征。由图 5 可见,黄河源区年水源涵养量呈增加趋势,平均变化速率为 1 mm/a 左右,最大变化速率超过 2 mm/a;若尔盖高原、祁连山区和龙羊峡至兰州

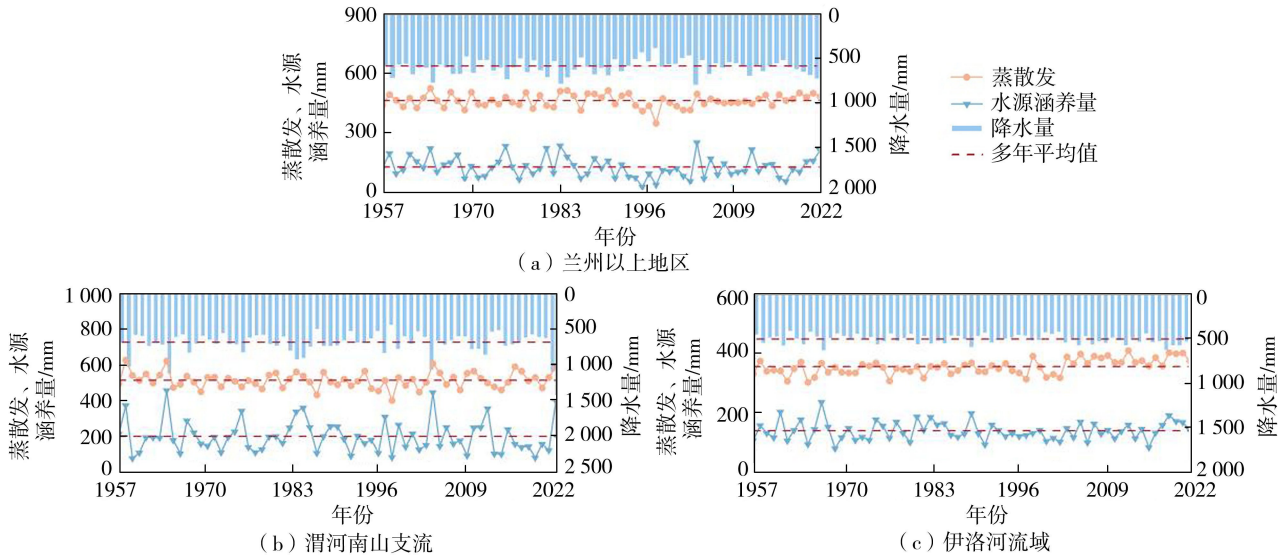


图 4 研究区 1957—2021 年水源涵养量、降水量、蒸散发变化过程

Fig. 4 Change process of water conservation, precipitation, and evapotranspiration in study area from 1957 to 2021

表 2 研究区 1957—2021 年水源涵养量、降水量、蒸散发趋势检验结果

Table 2 Test results of water conservation, precipitation, and evapotranspiration trends in study area from 1957 to 2021

区域	水源涵养量			降水量			蒸散发		
	均值/mm	Z 值	β 值	均值/mm	Z 值	β 值	均值/mm	Z 值	β 值
兰州以上地区	138.56	0.44	0.10	503.35	1.92	0.76	355.52	4.39	0.72
渭河南山支流	125.67	-1.04	-0.38	586.11	-0.85	-0.55	461.93	0.55	0.15
伊洛河流域	196.83	-0.87	-0.43	687.23	-0.75	-0.56	514.28	-0.14	0.04

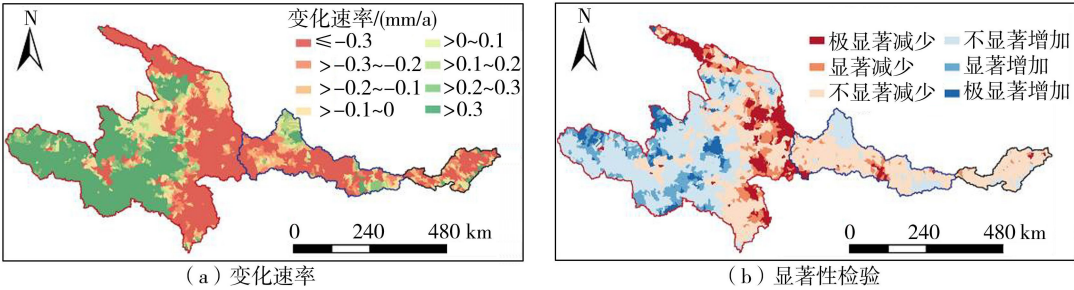


图 5 研究区水源涵养量变化趋势空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of water conservation trend in study area

段年水源涵养量呈现减少趋势,平均变化速率为 1 mm/a 左右,最大下降速率超过 3 mm/a。水源涵养量呈波动增加的地区集中分布在兰州以上地区,其显著增加的面积为 16.71%;渭河南山支流和伊洛河流域绝大部分地区水源涵养量呈减少趋势,最大下降速率超 3 mm/a,显著减少的地区分别占区域面积的 9.91%和 4.71%。

3.3 水源涵养量空间分布特征

以子流域为采样单元,统计各子流域在长时间序列下的水源涵养量。经计算,莫兰指数为 0.81,Z 值为 87.36($p<0.01$),说明研究区水源涵养量存在空间聚集现象。进一步对研究区不同时期水源涵养量进行冷热点分析,结果如图 6 所示。由图 6 可见,水源涵养量热点区(高值区)集中在祁连山区、黄河源区的南部、渭河南山支流的中段以及伊洛河流域的源头和少量南部地区。值得注意的是,在 2020 年黄河源区大部分地区变为水源涵养量高值区,祁连山区和伊洛河下游变为水源涵养量低值区,这可能

与当年降水量关系密切,黄河源区 2020 年降水量较多年平均值增长 30.8%,而伊洛河流域年降水量较多年平均值下降 10.2%,该结论与吕明轩等^[39]的研究结果一致。

3.4 水源涵养影响因素识别

基于水源涵养的空间异质性,关键驱动因素对水源涵养的影响可能存在地区差异,因此利用地理探测器分别对兰州以上地区、渭河南山支流和伊洛河流域进行分析,以各区域的子流域为采样单元,探究降水量、气温等 14 个因素对水源涵养的影响。以地理探测器的统计量 q 值为判别指标, q 值越大表示因素对水源涵养解释力越强。图 7 为不同时期各区域的地理探测器分析结果,可见,降水量是导致水源涵养空间分异的关键要素,其 q 值为 0.45~0.69,次影响因素包括土壤厚度、DEM、相对湿度、潜在蒸散发、气温等,其 q 值均大于 0.23。不同年份下因素的 q 值存在上下波动的现象,反映出不同年份下驱动因素对水源涵养的影响存在差异。同时,因水

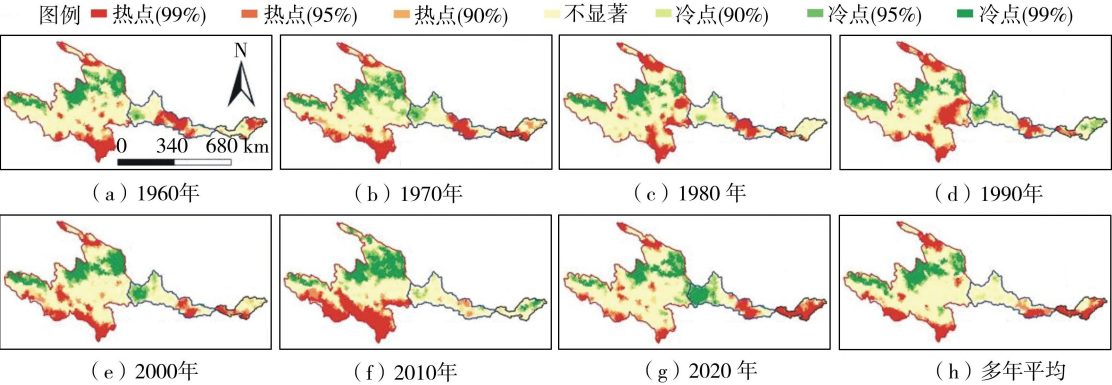
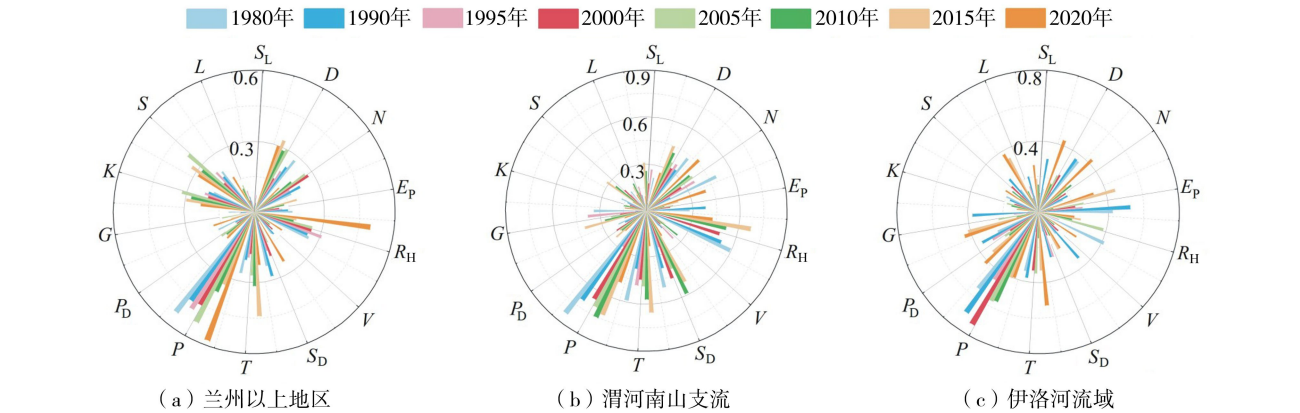


图 6 研究区不同时期水源涵养冷热点分析结果

Fig. 6 Cold and hot spots analysis results of water conservation in different periods of study area



注: P 为降水量; T 为气温; S_D 为日照; V 为风速; R_H 为相对湿度; E_P 为潜在蒸散发; N 为 NDVI 值; D 为 DEM; S_L 为坡度; L 为土地利用度; S 为土壤厚度; K 为土壤饱和和导水率; G 为 GDP; P_D 为人口密度。下同。

图 7 不同时期各区域地理探测器分析结果

Fig. 7 Geographical detector analysis results from different regions and periods

源涵养具有空间异质性,导致 3 个区域的次影响因素也存在差异。进一步利用地理探测器分析各因素的交互作用,结果如图 8 所示。由图 8 可见,各因素在发生交互作用后对水源涵养的影响大于单一因素对水源涵养的影响,且多以非线性增强为主。

3.5 水源涵养归因分析

基于地理探测器的计算结果,选择影响黄河水源涵养区水源涵养的 5 种关键因素。兰州以上地区选取降水量、土壤厚度、DEM、气温、相对湿度;渭河南山支流选取降水量、相对湿度、潜在蒸散发、气温、日照时数;伊洛河流域选取降水量、潜在蒸散发、气温、相对湿度、DEM。以子流域为最小计算单元,构建黄河水源涵养区地理加权回归模型,计算结果显示:兰州以上地区的决定系数 R^2 为 0.90,渭河南山支流的 R^2 为 0.90,伊洛河流域的 R^2 为 0.67,说明所选关键因素可对各区域的水源涵养有较好的解释性。同时,利用自然断点法将各关键因素的回归系数分类,得到关键因素的回归系数空间分布。空间上将关键因素分区与流域分区进行叠加,同时进行

破碎化斑块处理,最终将 3 个区域重新划分为 44 个分区(图 9)。其中,兰州以上地区包括 15 个,渭河南山支流包括 15 个,伊洛河流域包括 14 个。

通过对水源涵养演变趋势的分析,发现其变异年份集中在 1990 年,据此将研究期分为基准期(1957—1990 年)和变化期(1991—2021 年)。在基准期和变化期,气象数据保持原数据不变,社会取水过程和土地利用类型分别选用 1980 和 2018 年数据,共设置 8 种情景($S_0 \sim S_7$),如表 3 所示。同时,为进一步分析降水量、气温、日照、相对湿度、风速对水源涵养的影响,借用弹性系数,从气候变化的总影响中分解单个气候要素对水源涵养的贡献,每种气象要素设置 7 种缩放情景,共设置 35 种情景。

通过归因分析,得到气候变化和人类活动对各分区水源涵养的相对贡献率,如表 4 所示。由表 4 可见,兰州以上地区的 15 个分区中,气候变化作为主导因素的有 8 个,相对贡献率为 51.65%~84.00%,涵盖了黄河源区大部分地区、祁连山区以及兰州以上地区的中段;人类活动占主导因素的分

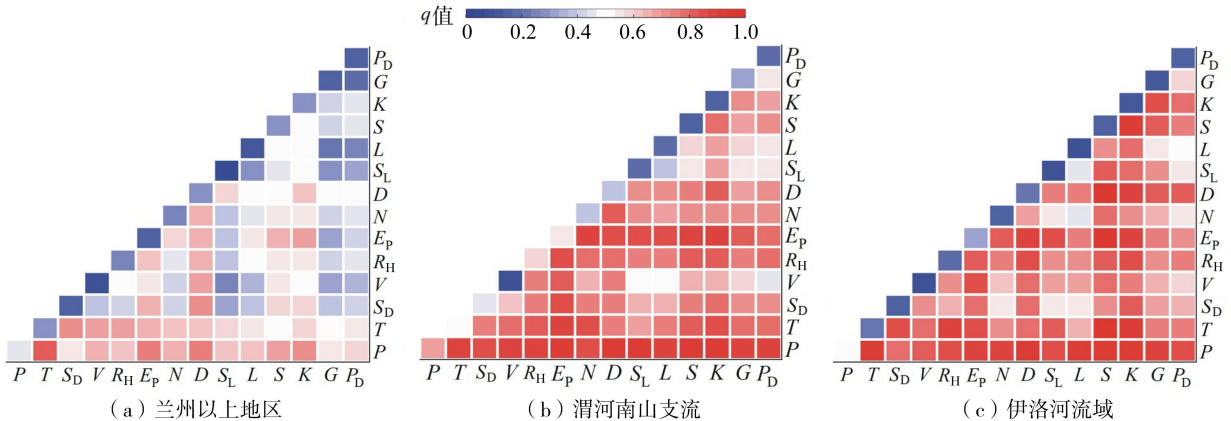


图 8 各区域因素交互作用分析结果

Fig. 8 Analysis results of factor interaction in different regions

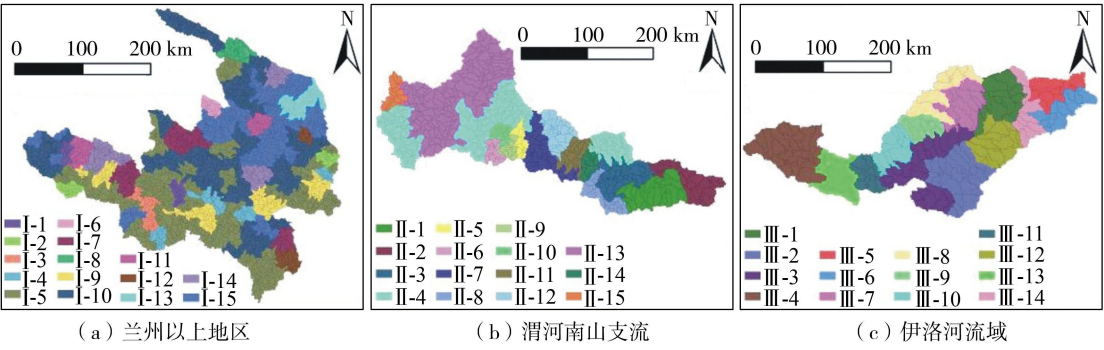


图 9 3 个区域重新分区结果
Fig. 9 Results of re-division of 3 regions

表 3 情景方案设置

Table 3 Scenario scheme setting

要素	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
气象要素	1957—1990 年	1957—1990 年	1957—1990 年	1957—1990 年	1991—2021 年	1991—2021 年	1991—2021 年	1991—2021 年
社会取用水过程	1980 年	2018 年	1980 年	2018 年	1980 年	2018 年	1980 年	2018 年
土地利用类型	1980 年	1980 年	2018 年	2018 年	1980 年	1980 年	2018 年	2018 年

表 4 气候变化和人类活动对不同分区水源涵养的相对贡献率

Table 4 Relative contribution rate of climate change and human activities on water conservation in different regions

分区编号	气候变化/%	人类活动/%	分区编号	气候变化/%	人类活动/%	分区编号	气候变化/%	人类活动/%
I-1	38.02	61.98	II-1	33.38	66.62	III-1	5.16	94.84
I-2	72.58	27.42	II-2	25.06	74.94	III-2	26.55	73.45
I-3	84.00	16.00	II-3	66.79	33.21	III-3	32.94	67.06
I-4	22.40	77.60	II-4	68.40	31.60	III-4	66.22	33.78
I-5	55.74	44.26	II-5	64.45	35.55	III-5	11.14	88.86
I-6	8.10	91.90	II-6	67.15	32.85	III-6	19.24	80.76
I-7	25.66	74.34	II-7	71.45	28.55	III-7	41.25	58.75
I-8	83.16	16.84	II-8	74.05	25.95	III-8	22.18	77.82
I-9	37.01	62.99	II-9	74.56	25.44	III-9	24.20	75.80
I-10	72.49	27.51	II-10	76.50	23.50	III-10	28.32	71.68
I-11	8.51	91.49	II-11	74.91	25.09	III-11	34.20	65.80
I-12	64.12	35.88	II-12	85.05	14.95	III-12	22.98	77.02
I-13	51.65	48.35	II-13	50.72	49.28	III-13	55.14	44.86
I-14	22.06	77.94	II-14	82.91	17.09	III-14	7.38	92.62
I-15	58.43	41.57	II-15	64.02	35.98			

区有 7 个,主要分布在黄河源区扎陵湖和鄂陵湖周围,以及东曲、黑河、大河坝河、洮河、大通河流域的部分地区和科才河、隆务河、博拉河的源区。渭河南山支流的 15 个分区中,气候要素占主导因素的有 13 个,相对贡献率为 50.72%~85.05%,占绝大部分地区;仅 II-1 和 II-2 分区的人类活动为主导因素,这两个分区土地利用类型以居民用地为主,人类活动较剧烈,对水源涵养的影响较大。伊洛河流域的 14 个分区中,仅伊洛河源上游的 III-4 和 III-13 的气候变化占主导因素,这里海拔相对较高,多山地丘陵,人为扰动少;伊洛河中游以及下游地区,土地利用类型以建设用地为主,人类活动较频繁,故人类活动占主导因素,相对贡献率为 58.75%~94.84%。

图 10 为不同分区各气象要素对水源涵养的贡

献量。由图 10 可见,相比于基准期,兰州以上地区水源涵养量在变化期减少 11.44 mm,其中降水量增加贡献了 6.68 mm,气温升高贡献了 -18.96 mm,风速降低贡献了 4.14 mm;渭河南山支流水源涵养量在变化期减少 33.99 mm,气候要素中降水量的绝对贡献量最大,为 38.72 mm,其次为湿度,绝对贡献量为 7.7 mm;伊洛河流域在变化期水源涵养量减少 39.76 mm,气候要素对水源涵养的影响规律大体与渭河南山支流的相同,降水量的绝对贡献量最大,为 15.58 mm,风速绝对贡献量最少,仅为 2.33 mm。

图 11 为不同分区人类活动对水源涵养的贡献量。由图 11 可见,土地利用类型对水源涵养的影响要高于社会用水过程的影响。下垫面条件的改变将直接影响流域对降水调蓄能力^[20],从而显著影响流

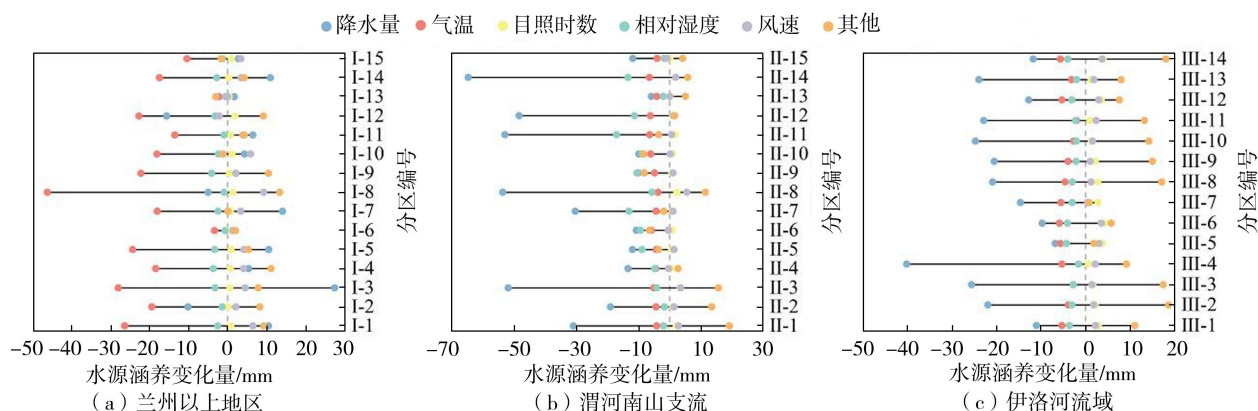


图 10 不同分区各气象要素对水源涵养的贡献量

Fig. 10 Contribution amount of meteorological elements on water conservation in different regions

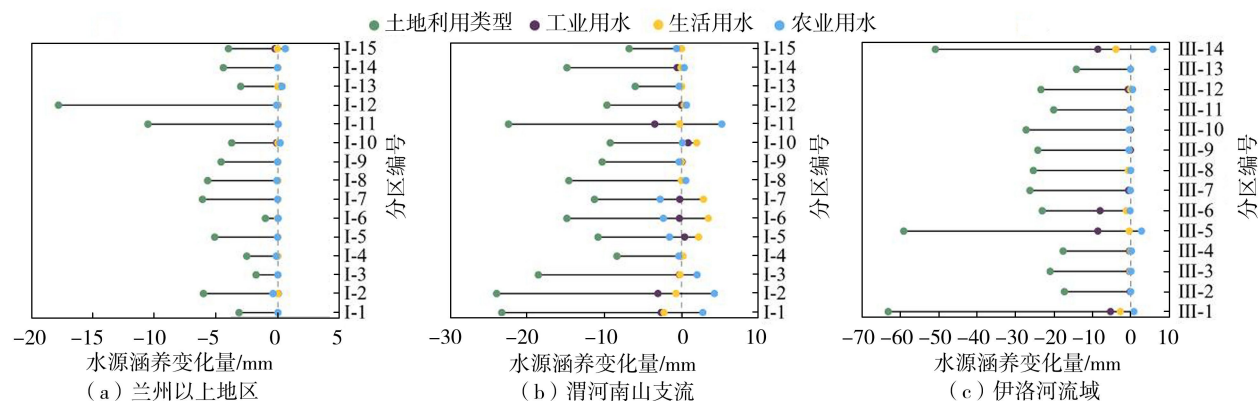


图 11 不同分区人类活动对水源涵养的贡献量

Fig. 11 Contribution amount of human activities on water conservation in different regions

域的水源涵养功能,工业、生活和农业从河道或地下水取水,影响了土壤、河道和地下水之间的水力联系,也会间接影响水源涵养,这种影响相对有限。工业、生活和农业取用地下水是消耗水源涵养量的过程,但灌溉用水满足了作物生长所需的同时增加了土壤含水量,对水源涵养有回补效应。根据水源涵养的定义,虽地表径流不发挥水源涵养功能,但引入田间的地表水同样会增加土壤含水量,对水源涵养起补充作用,在综合作用下,农业用水对水源涵养表现出一定的正效应。

3.6 讨论

兰州以上地区水源涵养量变化趋势与吕明轩等^[39]所得结论相似,但渭河南山支流水源涵养量变化趋势与曹叶琳等^[40]的研究结论相反,原因在于所选数据长度不同,曹叶琳等^[40]选择时间为 2000 年后,由图 4(b)可见渭河南山支流在 1990 年发生变异后水源涵养量呈增加趋势。伊洛河流域年水源涵养量变化趋势与贾雨凡等^[41]研究结果相似,但水源涵养量计算结果存在差异,原因在于对水源涵养的定义存在差异,本文采用的水量平衡公式考虑将降水量扣除非植被蒸散发和地表径流后的水量作为水

源涵养量,而贾雨凡等^[41]根据 InVEST 模型定义水源涵养量为产水量(降水量扣除蒸散发后的水量)乘上修正系数,认为所有的蒸散发成分都不能发挥水源涵养功能,应从降水量中扣除,所以其计算的水源涵养量偏小^[9]。兰州以上地区水源涵养量地理探测器分析结果与吕明轩等^[39]在黄河流域的探测结果较为相似,降水量是影响水源涵养的关键驱动因素。但气温、潜在蒸散发、DEM 三者对水源涵养的影响程度存在差异,许美娇^[42]认为潜在蒸散发对水源涵养量的影响仅次于降水量,但兰州以上地区未检测出该结果,造成上述差异的原因很可能是采样点密度不同,本文按子流域采样,采样点密度是许美娇^[42]的 14.77 倍,故计算驱动因素的影响存在偏差。渭河南山支流和伊洛河流域的地理探测器分析结果显示降水量、气温、DEM、潜在蒸散发等是影响水源涵养量的关键因素,这与吕明轩等^[39]的结论一致。

降水量是影响水源涵养的主导因素。兰州以上地区的水汽主要来源于东、南亚季风和西风环流的输送^[43],随全球气候变化,季风和环流协同作用增强,积雪冰川消融加剧,使该地区变得湿润,有助于

水源涵养量的增加。渭河南山支流和伊洛河流域地处干旱和半干旱区,受东南和西南风的影响,随季风异常,北风活动加强^[44],水汽输送减少,导致降水减少,同时气温升高,蒸散发增强,在降水和蒸散发的综合作用下导致该地区水源涵养呈减少趋势。气候变化和人类活动对黄河水源涵养区水源涵养量的影响存在空间差异,具体表现为:河湖的源头区,高原山地区人类足迹较少,这类地区生态系统多呈自然演变状态,气候变化为主导因素,而在人类活动频繁的地区特别是中心城区,人为干扰强度大,故人类活动为主导因素。值得注意的是,在黄河源区鄂陵湖、扎陵湖附近水源涵养对土地利用类型变化的响应更加敏感,得益于在黄河源区实施的生态修复工程^[45],相比于基准期,该区在变化期植被覆盖度显著增加,林草面积增加量在1 000 km²左右。虽受全球气候变化的影响,积雪、冰川消融加剧,使黄河源区降水量呈不显著增加趋势^[27],但气温持续升高,蒸散发不断增加^[46],降水量对水源涵养的正效应与蒸散发对水源涵养的负效应存在相抵现象,故在各要素的综合作用下,气候变化的影响弱于人类活动的影响。在河流上建水库大坝,拦蓄地表径流,进一步增大流域对水资源的调蓄能力,发挥了削减洪峰、调节局地气候等重要功能^[47]。跨流域调水工程进一步缓解了水资源时空分布不均带来的部分地区水资源短缺问题,发挥了提供水源的功能,该部分水量也应作为水源涵养量的一部分^[47]。

4 结 论

- a. 黄河水源涵养区多年平均水源涵养量为140 mm,呈不显著波动变化趋势,具体表现为:兰州以上、渭河南山支流和伊洛河流域水源涵养量分别以每10 a 0.99、-3.84、-4.25 mm 的速率变化。水源涵养高值区主要集中在祁连山区、黄河源区的南部、渭河南山支流的中段和伊洛河流域源区。
- b. 降水量是影响水源涵养的主导因素,气温、相对湿度、DEM、潜在蒸散发对水源涵养的时空分布特征也有重要影响;驱动因素之间存在非线性的关系,通过交互作用后对水源涵养的解释力增强。
- c. 气候变化和人类活动对黄河水源涵养区的影响存在空间差异。河湖的源头区、高原山地区人类足迹较少,生态系统多呈自然演变状态,气候变化是影响水源涵养的主导因素,相对贡献率为50.72%~85.05%;人类活动频繁的地区特别是中心城区,人为干扰强度大,故该地区人类活动为主导因素,相对贡献率为58.75%~94.84%。

参考文献:

- [1] COSTANZA R, D' ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] IPCC. AR6 synthesis report: climate change 2023 [R]. Berne: Interlaken, 2023.
- [3] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. 第四纪研究, 2003, 23 (2): 152-164. (SHI Yafeng, SHEN Yongping, LI Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23 (2): 152-164. (in Chinese))
- [4] YANG Menghao, GAO Xiaodong, SIDDIQUE K H M, et al. Spatiotemporal exploration of ecosystem service, urbanization, and their interactive coercing relationship in the Yellow River Basin over the past 40 years [J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159757.
- [5] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法 [J]. 生态学杂志, 2009, 28 (3): 529-534. (ZHANG Biao, LI Wenhua, XIE Gaodi, et al. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28 (3): 529-534. (in Chinese))
- [6] 司今, 韩鹏, 赵春龙. 森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究 [J]. 自然资源学报, 2011, 26 (12): 2100-2109. (SI Jin, HAN Peng, ZHAO Chunlong. Review of water conservation value evaluation methods of forest and case study [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26 (12): 2100-2109. (in Chinese))
- [7] 黄菁, 范继辉, 何晓蓉. 基于 InVEST 模型的张家口地区水源涵养功能研究 [J]. 山地学报, 2021, 39 (3): 327-337. (HUANG Jing, FAN Jihui, HE Xiaorong. InVEST-model based evaluation of water conservation function in Zhangjiakou area, China [J]. Mountain Research, 2021, 39 (3): 327-337. (in Chinese))
- [8] 林峰, 陈兴伟, 姚文艺, 等. 基于 SWAT 模型的森林分布不连续流域水源涵养量多时间尺度分析 [J]. 地理学报, 2020, 75 (5): 1065-1078. (LIN Feng, CHEN Xingwei, YAO Wenyi, et al. Multi-time scale analysis of water conservation in a discontinuous forest watershed based on SWAT model [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75 (5): 1065-1078. (in Chinese))
- [9] 王东东, 贾仰文, 牛存稳, 等. 基于分布式水文模型的水源涵养不同功能评估方法: 以渭河涵养区为例 [J]. 生态学报, 2024, 44 (10): 4342-4352. (WANG Dongdong, JIA Yangwen, NIU Cunwen, et al. Evaluation method for main functions of water retention based on WEP-L model: a case of water retention area in Wei River [J]. Acta

- Ecologica Sinica, 2024, 44 (10): 4342-4352. (in Chinese))
- [10] 贾仰文,王浩,倪广恒,等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005:133-236.
- [11] 龚诗涵,肖洋,郑华,等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报,2017,37(7): 2455-2462. (GONG Shihan, XIAO Yang, ZHENG Hua, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(7): 2455-2462. (in Chinese))
- [12] 王冶,薛忠财,王琳,等. 承德市武烈河流域水源涵养功能的时空特征[J]. 草业科学,2021,38(6): 1047-1059. (WANG Ye, XUE Zhongcai, WANG Lin, et al. Analysis of the spatio-temporal characteristics of the water retention function of the Wulie River Basin in Chengde City[J]. Pratacultural Science, 2021, 38 (6): 1047-1059. (in Chinese))
- [13] 杨静,张耀艺,谭思懿,等. 亚热带不同树种土壤水源涵养功能[J]. 生态学报,2020,40(13): 4594-4604. (YANG Jing, ZHANG Yaoyi, TAN Siyi, et al. Soil water conservation functions of different plantations in subtropical forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (13): 4594-4604. (in Chinese))
- [14] 吕乐婷,乔皓,郑德凤,等. 太子河流域景观格局时空演变及其对水源涵养的影响[J]. 水资源保护,2023,39(6): 111-120. (LYU Leting, QIAO Hao, ZHENG Defeng, et al. Spatial-temporal evolution of landscape pattern in the Taizi River Basin and its impact on water conservation [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 111-120. (in Chinese))
- [15] 顾晋怡,李一平,杜薇. 基于 InVEST 模型的太湖流域水源涵养能力评价及其变化特征分析[J]. 水资源保护,2018,34(3): 62-67. (GU Jinyi, LI Yiping, DU Wei. Evaluation on water source conservation capacity and analysis of its variation characteristics of Taihu Lake Basin based on InVEST model[J]. Water Resources Protection, 2018,34(3): 62-67. (in Chinese))
- [16] 杜乐山,刘海鸥,刘文慧,等. 热带雨林区水源涵养服务时空演变及驱动因素分析:以海南热带雨林国家公园为例[J]. 环境科学研究,2023,36(9): 1716-1727. (DU Leshan, LIU Haiou, LIU Wenhui, et al. Spatial and temporal variation of water conservation and driving factor analysis in tropical rainforests: a case study of Hainan tropical rainforest national park [J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 36 (9): 1716-1727. (in Chinese))
- [17] 尹云鹤,吴绍洪,赵东升,等. 过去 30 年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响[J]. 地理研究,2016,35(1): 49-57. (YIN Yunhe, WU Shaohong, ZHAO Dongsheng, et al. Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the source region of the Yellow River from 1981 to 2010 [J]. Geographical Research, 2016, 35(1): 49-57. (in Chinese))
- [18] 石莹,别强,苏晓杰,等. 基于 InVEST 模型的水源涵养功能评价的时空变化:以兰州市为例[J]. 干旱区地理,2024,47(9): 1518-1529. (SHI Ying, BIE Qiang, SU Xiaojie, et al. Spatiotemporal variation of water conservation function evaluation based on InVEST model: a case of Lanzhou City[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(9): 1518-1529. (in Chinese))
- [19] 王国庆. 黄河流域水源涵养区界定[J]. 水文,2022,42(2): 65. (WANG Guoqing. Definition of water conservation areas in the Yellow River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(2): 65. (in Chinese))
- [20] 王国庆,张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望[J]. 水资源保护,2024,40(2): 1-8. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 1-8. (in Chinese))
- [21] YANG Xuedi, BAI Yongping, CHE Lei, et al. Incorporating ecological constraints into urban growth boundaries: a case study of ecologically fragile areas in the Upper Yellow River[J]. Ecological Indicators, 2021, 124: 107436.
- [22] 谢灵枫,杨肖丽,吴凡,等. 黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 10-17. (XIE Lingfeng, YANG Xiaoli, WU Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 10-17. (in Chinese))
- [23] TIAN Feng, LIU Leizhen, YANG Jianhua, et al. Vegetation greening in more than 94% of the Yellow River Basin (YRB) region in China during the 21st century caused jointly by warming and anthropogenic activities [J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107479.
- [24] 陈永喆,崔艳红,张才金,等. 变化环境下黄河流域内蒙古段植被与水文要素的时空协同演变[J]. 水资源保护, 2024, 40 (2): 141-149. (CHEN Yongzhe, CUI Yanhong, ZHANG Caijin, et al. Spatio-temporal co-evolution of vegetation and hydrological elements under a changing environment in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 141-149. (in Chinese))
- [25] HUAI Baojuan, LI Zhongqin, WANG Shengjie, et al. RS analysis of glaciers change in the Heihe River Basin, Northwest China, during the recent decades[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(6): 993-1008.
- [26] SHENG Yu, MA Shuai, CAO Wei, et al. Spatiotemporal changes of permafrost in the headwater area of the Yellow River under a changing climate[J]. Land Degradation &

- Development, 2020, 31(1):133-152.
- [27] 岁姚炳,牛存稳,贾仰文,等. 黄河水源涵养区近 60a 降水、气温和径流演变及其对水源涵养的影响[J]. 山地学报, 2023, 41(1):41-55. (SUI Yaobing, NIU Cunwen, JIA Yangwen, et al. Precipitation, temperature and runoff for the recent 60 years in the Yellow River water conservation area of China and their influence on water conservation[J]. Mountain Research, 2023, 41(1):41-55. (in Chinese))
- [28] 鞠琴,吴金雨,王兴平,等. 机器学习算法在降水和气温多模式集成中的应用[J]. 水资源保护, 2024, 40(3):106-115. (JU Qin, WU Jinyu, WANG Xingping, et al. Application of machine learning algorithms in multimodal integration of precipitation and temperature[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3):106-115 (in Chinese))
- [29] SHANGGUAN Wei, DAI Yongjiu, LIU Baoyuan, et al. A China data set of soil properties for land surface modeling [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2013, 5(2):212-224.
- [30] 王浩,牛存稳,赵勇. 流域“自然-社会”二元水循环与水资源研究[J]. 地理学报, 2023, 78(7):1599-1607. (WANG Hao, NIU Cunwen, ZHAO Yong. Natural-artificial dualistic water cycle in river basins and water resources research [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7):1599-1607. (in Chinese))
- [31] 贾仰文,王浩,甘泓,等. 海河流域二元水循环模型开发及其应用: II. 水资源管理战略研究应用[J]. 水科学进展, 2010, 21(1):9-15. (JIA Yangwen, WANG Hao, GAN Hong, et al. Development and application of dualistic water cycle model in Haihe River Basin: II. strategic research and application for water resources management [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1):9-15. (in Chinese))
- [32] 杜军凯,仇亚琴,李云玲,等. 1956—2016 年中国年降水量及其年内分配演变特征[J]. 水科学进展, 2023, 34(2):182-196. (DU Junkai, QIU Yaqin, LI Yunling, et al. Evolution characteristics of the interannual and intra-annual precipitation in China from 1956 to 2016 [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2):182-196. (in Chinese))
- [33] TAN Xingyan, JIA Yangwen, NIU Cunwen, et al. Response of water-use efficiency to phenology in the natural forest and grassland of the Loess Plateau in China[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(9):2081-2096.
- [34] 李子辉,张亚,巴永,等. 云南省植被固碳能力与产水、土壤保持服务冷热点识别[J]. 中国环境科学, 2024, 44(2):1007-1019. (LI Zihui, ZHANG Ya, BA Yong, et al. Cold and hot spots identification for carbon sequestration capacity, water yield and soil conservation services of vegetation in Yunnan Province [J]. China Environmental Science, 2024, 44(2):1007-1019. (in Chinese))
- [35] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1):116-134. (WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1):116-134. (in Chinese))
- [36] 何伟军,孟旭,孔阳,等. 时空异质性视角下长江经济带水环境承载力评估及其驱动因子探究[J]. 水资源保护, 2023, 39(2):215-223. (HE Weijun, MENG Xu, KONG Yang, et al. Evaluation of water environmental carrying capacity of Yangtze River Economic Belt and its driving factors exploration from perspective of spatial-temporal heterogeneity [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2):215-223. (in Chinese))
- [37] 赵静,胡庆芳,王腊春,等. 基于 MSWEP 数据的太湖流域降水特性分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(2):27-33. (ZHAO Jing, HU Qingfang, WANG Lachun, et al. Analysis of precipitation characteristics in Taihu Lake Basin based on MSWEP [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2):27-33. (in Chinese))
- [38] 刘佳嘉,周祖昊,贾仰文,等. 水循环演变中多因素综合影响贡献量分解方法[J]. 水利学报, 2014, 45(6):658-665. (LIU Jiajia, ZHOU Zuhao, JIA Yangwen, et al. A new method to quantitatively separate the effects of multi-factors on the water cycle evolution [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6):658-665. (in Chinese))
- [39] 吕明轩,张红,贺桂珍,等. 黄河流域水源涵养服务功能动态演变及驱动因素[J]. 生态学报, 2024, 44(7):2761-2771. (LYU Mingxuan, ZHANG Hong, HE Guizhen, et al. Dynamic evolution and driving factors of water conservation service function in the Yellow River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7):2761-2771. (in Chinese))
- [40] 曹叶琳,宋进喜,李明月,等. 陕西省生态系统水源涵养功能评估分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4):217-223. (CAO Yelin, SONG Jinxi, LI Mingyue, et al. Evaluation of ecosystem water conservation function of Shaanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4):217-223. (in Chinese))
- [41] 贾雨凡,王国庆. 基于 InVEST 模型的伊洛河流域水源涵养能力评估[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3):101-108. (JIA Yufan, WANG Guoqing. Assessment of water conservation capacity of Yiluo River Basin based on the InVEST model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3):101-108. (in Chinese))
- [42] 许美娇. 黄河源区水源涵养服务价值时空变化及驱动因子研究[D]. 西安:西安理工大学, 2023.
- [43] 杨金虎,张强,杨博成,等. 黄河上游暖湿化的多时间尺度特征及对生态植被的影响[J]. 高原气象, 2023, 42(4):1018-1030. (YANG Jinhu, ZHANG Qiang, YANG

- Bocheng, et al. The multi-time scale characteristics and impacts on ecological vegetation of warming and humidification in the upper Yellow River [J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(4): 1018-1030. (in Chinese))
- [44] 董晴晴,王会肖. 60 年来渭河关中地区气温与降水变化及其原因[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 33-38. (DONG Qingqing, WANG Huixiao. Variation and reason analysis of temperature and precipitation of Weihe River in Guanzhong area in the last 60 years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(6): 33-38. (in Chinese))
- [45] 田美荣,冯朝阳,王世曦,等. 近 70 年来黄河流域生态修复历程及系统性修复思考[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1787-1797. (TIAN Meirong, FENG Chaoyang, WANG Shixi, et al. Ecological restoration of the Yellow River basin in the last 70 years and systematic restoration thinking [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(5): 1787-1797. (in Chinese))
- [46] 张鸣,朱奎,鲁帆,等. 黄河源区水文要素变化及驱动因素分析[J]. 人民黄河, 2023, 45(10): 30-37. (ZHANG Ming, ZHU Kui, LU Fan, et al. Analysis of changes of hydrological elements and driving factors in the source area of the Yellow River [J]. Yellow River, 2023, 45(10): 30-37. (in Chinese))
- [47] 左其亭,王骄阳,杨峰,等. 水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 13-19. (ZUO Qiting, WANG Jiaoyang, YANG Feng, et al. Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 13-19. (in Chinese))
- (收稿日期:2024-09-10 编辑:王芳)
-
- (上接第 57 页)
- [49] KOLLURU V, KOLLURU S, KONKATHI P. Evaluation and integration of reanalysis rainfall products under contrasting climatic conditions in India [J]. Atmospheric Research, 2020, 246: 105121.
- [50] LIU Zhenwei, DI Zhenhua, QIN Peihua, et al. Evaluation of six satellite precipitation products over the Chinese mainland [J]. Remote Sensing, 2022, 14(24): 6277.
- [51] HUANG Ruochen, YONG Bin, HUANG Fan, et al. A comprehensive investigation of three long-term precipitation datasets; which performs better in the Yellow River basin? [J]. International Journal of Climatology, 2024, 44(5): 1302-1325.
- [52] SKOFRONICK-JACKSON G, MUNCHAK S J, RINGERUD S, et al. Falling snow estimates from the global precipitation measurement (GPM) mission [C]// 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Fort Worth: IEEE, 2017.
- [53] MA Yingzhao, TANG Guoqiang, LONG Di, et al. Similarity and error intercomparison of the GPM and its predecessor-TRMM multisatellite precipitation analysis using the best available hourly gauge network over the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing, 2016, 8(7): 569.
- [54] MICHAELIDES S, LEVIZZANI V, ANAGNOSTOU E, et al. Precipitation; measurement, remote sensing, climatology and modeling [J]. Atmospheric Research, 2009, 94(4): 512-533.
- [55] YAN Songkun, MA Ziqiang, LI Xiaoqing, et al. PCSSR-DNNWA: a physical constraints based surface snowfall rate retrieval algorithm using deep neural networks with attention module [J]. Geophysical Research Letters, 2023, 50(13): e2023GL103923.
- [56] VON LERBER A, MOISSEEV D, MARKS D A, et al. Validation of GMI snowfall observations by using a combination of weather radar and surface measurements [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2018, 57(4): 797-820.
- [57] SUN Min, LIU Aili, ZHAO Lin, et al. Evaluation of multi-source precipitation products in the hinterland of the Tibetan Plateau [J]. Atmosphere, 2024, 15(1): 138.
- [58] MA Jiawei, LI Hongyi, WANG Jian, et al. Reducing the statistical distribution error in gridded precipitation data for the Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrometeorology, 2020, 21(11): 2641-2654.
- [59] 南天一, 陈杰, 丁智威, 等. 基于深度学习的青藏高原多源降水融合 [J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(4): 836-855. (NAN Tianyi, CHEN Jie, DING Zhiwei, et al. Deep learning-based multi-source precipitation merging for the Tibetan Plateau [J]. Scientia Sinica Terrae, 2023, 53(4): 836-855. (in Chinese))
- [60] LUNDQUIST J, ABEL M R, GUTMANN E, et al. Our skill in modeling mountain rain and snow is bypassing the skill of our observational networks [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(12): 2473-2490.
- [61] GAO Yanhong, CHEN Fei, JIANG Yingsha. Evaluation of a convection-permitting modeling of precipitation over the Tibetan Plateau and its influences on the simulation of snow-cover fraction [J]. Journal of Hydrometeorology, 2020, 21(7): 1531-1548.
- [62] SUN Shuai, SHI Chunxiang, PAN Yang, et al. Applicability assessment of the 1998-2018 CLDAS multi-source precipitation fusion dataset over China [J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(4): 879-892.
- (收稿日期:2024-07-18 编辑:王芳)