

# 基于 InVEST 模型的伊洛河流域水源涵养能力评估

贾雨凡<sup>1,2,3</sup>, 王国庆<sup>2,3,4</sup>

(1.河海大学水文水资源学院,南京 210098;2.河海大学水安全与水科学协同创新中心,  
南京 210098;3.长江保护与绿色发展研究院,南京 210098;  
4.南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210029)

**摘要:** 水源涵养是生态系统最重要的服务功能之一,黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要强调聚焦重点区域,恢复重要生态系统,对强化水源涵养能力提出了新的要求。收集并分析伊洛河流域 1975—2019 年的气象及下垫面资料,采用 InVEST 模型产水模块计算 1975—2019 年伊洛河流域每 5 年 1 期共 9 个时段的产水量,采用流速系数、土壤饱和导水率等对产水量进行修正,估算流域的水源涵养量,具体分析伊洛河流域降水、产水与水源涵养的特征及其相关关系。结果表明:1975—2019 年,伊洛河流域多年平均水源涵养量为 11.3 mm,多年平均产水量为 143.2 mm,产水量及水源涵养量整体呈现先增后减的变化趋势,在 1980—1984 年达到峰值;流域水源涵养能力空间分布特征为上游植被丰富、土石山区水源涵养能力强,中下游相对较弱;对流域气象要素单相关及复相关分析,水源涵养能力与降水显著正相关,与参考作物蒸散发相关性不显著;流域内土地利用变化在一定程度上影响水源涵养能力空间分布,上游水源涵养高值区及退耕还林还草区受影响显著。研究结果可为相似流域水源涵养能力的评估提供参考。

**关键词:** 水源涵养能力; InVEST 模型; 伊洛河流域

**中图分类号:** Q948.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2023)03-0101-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.014

## Assessment of Water Conservation Capacity of Yiluo River Basin Based on the InVEST Model

JIA Yufan<sup>1,2,3</sup>, WANG Guoqing<sup>2,3,4</sup>

(1.College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098;  
2.Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098;  
3.Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098; 4.State Key Laboratory of  
Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029)

**Abstract:** Water conservation is one of the most important service functions of the ecosystem, and the outline of the Yellow River Basin Ecological Protection and High-quality Development Plan emphasizes focusing on key areas and restoring important ecosystems, which puts forward new requirements for strengthening water conservation capacity. We collected and analyzed meteorological and subsurface data of the Yiluo River basin from 1975 to 2019, calculated the water yield of the basin for a total of nine time periods in every five-year period during 1975 to 2019 using the water yield module of the InVEST model, and the water conservation was obtained by using the flow rate coefficient and soil saturation conductivity to correct the water yield. This study specifically analyzed the characteristics and correlations between precipitation, water yield and water conservation in the Yiluo River Basin. The results show that from 1975 to 2019, the annual average water conservation in the Yiluo River Basin is 11.3 mm, and the annual average water yield is 143.2 mm, and the overall water yield and water conservation show a trend of first increasing and then decreasing, reaching a peak from 1980 to 1984. The spatial distribution of water conservation capacity in the river basin is characterized by abundant vegetation in the upstream and strong water conservation capacity in mountainous areas of earth and rock, while the middle and lower reaches are relatively weak. The results of single-correlation and complex correlation analysis of meteorological elements in the basin show that the water conservation

收稿日期:2022-09-26

资助项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFC3201104);国家自然科学基金项目(U2243228,52121006,41961124007)

第一作者:贾雨凡(2000—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:Jyf20000509@163.com

通信作者:王国庆(1971—),男,博士,教授,主要从事气候变化、水文水资源等方面的研究。E-mail:gqwang@nhri.cn

capacity is significantly positively correlated with precipitation, but not with evapotranspiration of reference crops. To a certain extent, the change of land use in the river basin affects the spatial distribution of water conservation capacity, and the areas with high value of water conservation in the upper reaches and the areas where farmland is returned to forest and grassland are significantly affected. The results can provide a reference for the assessment of water conservation capacity in similar river basins.

**Keywords:** water conservation capacity; InVEST model; Yiluo River Basin

联合国政府间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)第六次评估报告<sup>[1]</sup>明确指出, 2010—2019 年全球平均气温较 1850—1900 年升高 1.07 °C, 气候变化已是毋庸置疑的事实<sup>[2]</sup>。工业革命以来, 随着科学技术的发展, 人类活动对于生态环境的影响日趋显著。如何应对人类活动和气候变化共同影响下的变化环境成为生态及水文等多学科多领域的研究重点。水源涵养作为水文生态交叉学科—生态水文学的研究范畴, 是生态系统服务功能的重要内容之一。水源涵养功能是一个动态的、不断发展的概念<sup>[3-4]</sup>, 主流观点<sup>[5]</sup>认为, 水源涵养功能是指生态系统在特定时间、特定条件下的保水能力, 进一步可细分为狭义和广义 2 种定义。狭义的水源涵养功能通常指林地、草地等生态系统拦蓄降水、调节径流的功能; 广义的水源涵养功能则考虑森林、草地、林地、沼泽、湖泊多种生态系统, 以及水、土、气多种生态因子, 涵盖拦蓄降水、调节径流、净化水质、水土保持、减少植被退化、改善下垫面条件、保护生物多样性、调节气候等多方面的生态环境保护功能。厘清水源涵养能力的概念和内涵、系统分析影响水源涵养能力的驱动因素、科学认识水源涵养能力评价方法的适应条件, 不仅是环境科学、生态科学和水文科学交叉研究的核心内容, 而且对生态恢复措施建设、区域水土保持和水资源合理调配具有相当重要的意义<sup>[6]</sup>。

如何有效评估生态系统水源涵养能力是水源涵养功能研究的重点。主流的评估方法包括传统水文学方法和水文模型法 2 大类<sup>[7]</sup>。传统方法注重试验, 结果相对准确, 但多以点尺度为主, 无法很好反映空间分布情况。典型的方法如林冠截留剩余量法<sup>[8]</sup>、降水储存法、年径流量法<sup>[9]</sup>等均存在类似缺陷。相对完善的是综合蓄水能力法, 该法统筹考虑林冠层、枯落物层和土壤层, 将 3 个层面的总拦蓄降水作为森林水源涵养量, 全面分析森林生态系统的各个水文过程。但由于层次较多, 实测资料需求复杂, 实际操作存在困难<sup>[10]</sup>。与传统方法相对的水文模型法则在大尺度研究中具有显著优势, 但计算准确度受计算资料的精度和长度控制, 对资料的要求较高<sup>[11]</sup>。目前, 国内外学者常用的水文模型包括美国农业部水土保持局开发的 SCS 模型<sup>[12]</sup>、生态系统服务和权衡的综合评估

模型<sup>[13]</sup>、温度植被干旱指数模型<sup>[14]</sup>和 SWAT 模型<sup>[15]</sup>等, 以斯坦福大学环境研究所、世界自然保护基金会等联合开发的 InVEST 模型在水源涵养评估领域应用最为广泛。

通过收集到的气象站点数据及下垫面资料分析伊洛河流域降水的演变特征。在此基础上, 采用 InVEST 模型产水模块对伊洛河流域 1975—2019 年每 5 年 1 期的产水量进行计算。对计算得到的产水量数据, 采用土壤饱和导水率、流速系数等进行修正, 得到伊洛河流域 9 期平均水源涵养量并分析其时空分布特征, 以期为流域水源涵养能力的评估与提升提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究流域

伊洛河流域发源于河南省栾川县(34°49′30″N, 111°28′01″E), 是黄河三门峡以下最大的支流, 同时也是河南省境内最大的黄河支流。河流分有伊河、洛河两支, 全长 447 km, 总面积 18 881 km<sup>2</sup>。流域大部分隶属于华北山地丘陵区和华北平原区, 上游为土石山区, 植被丰富; 下游多低山丘陵、河谷平原。伊洛河地处湿润半湿润区, 是黄河流域重要的水源涵养区之一, 属大陆性季风气候区, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷多雪<sup>[16]</sup>。研究区域多年平均降水量为 660 mm, 其中 6—9 月汛期降水占全年的 60%。从空间分布上看, 上游降水相对丰沛, 下游偏少<sup>[17]</sup>。流域多年平均参考作物蒸散发为 1 100 mm, 东西部蒸散发较中部偏少。研究区域地理位置及气候站点分布情况见图 1。

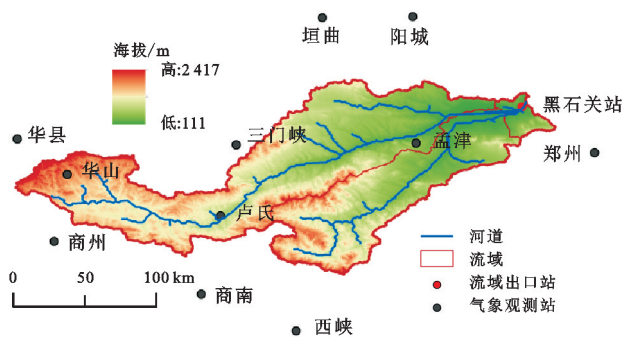


图 1 伊洛河流域地理位置及气象站点分布

研究采用地理空间数据云提供的 DEM(90 m×90 m)数据和基于美国陆地卫星 Landsat TM 影像的 1 km 栅格数据, 将流域的主要土地利用分为耕地、林地、草

地、水体、建设用地以及未利用地 6 种类型。收集整理研究区域及周边共 11 个气象站点逐日降水资料、最高和最低气温资料,采用改进 Hargreaves 公式计算参考作物蒸散发( $ET_0$ )<sup>[18]</sup>。土壤数据采用国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心—土壤分中心(<http://soil.geodata.cn>)提供的资料<sup>[19]</sup>。植物可利用水量由周文佐<sup>[20]</sup>提出的土壤质地相关公式计算。

## 1.2 InVEST 模型

InVEST 模型是由斯坦福大学环境研究所、世界自然保护基金会等联合开发的生态系统服务评估与权衡模型,模型产水模块基于 Budyko 水热耦合公式及水量平衡方程对区域各网格产水进行评估,其基本原理见图 2。

InVEST 模型产水模块计算的基本公式为:

$$Y_x = (1 - \frac{AET_x}{P_x}) \cdot P_x \quad (1)$$

式中: $AET_x$  表示栅格单元  $x$  的实际蒸散发(mm); $P_x$  栅格单元  $x$  的年降水量(mm)。

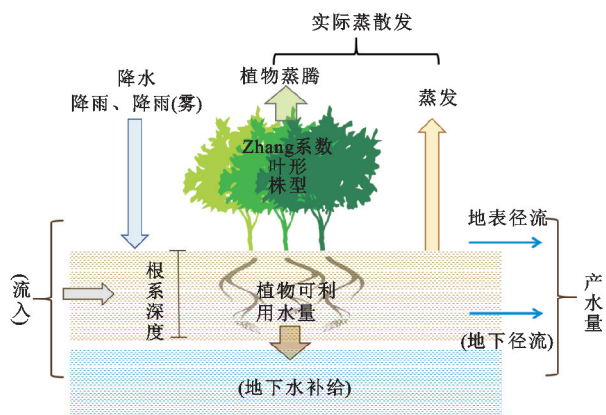


图2 InVEST 模型产水模块水量平衡示意

产水水量平衡公式中土地利用为植被的实际蒸

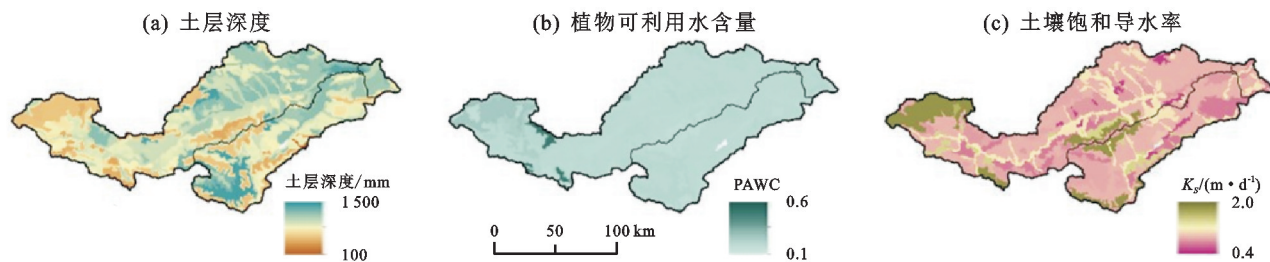


图3 伊洛河流域土壤植被参数空间分布

## 2 结果与分析

### 2.1 伊洛河流域降水演变特征

伊洛河流域多年平均降水量为 669 mm,由图 4 可知,1975—2019 年流域年降水量及其 5 年滑动平均过程,年降水量呈现非显著性下降趋势,降水量最低值为 443 mm,出现于 1997 年;最大值为 944 mm,出现于 1984 年。从滑动平均过程来看,1983 年前后明显偏高,达 940 mm,此后,年降水量总体稳定在 660 mm 左右。

散由 Zhang 等<sup>[21]</sup>提出的 Budyko 水热耦合公式计算,公式为:

$$\frac{AET_x}{P_x} = 1 + \frac{PET_x}{P_x} - [1 + (\frac{PET_x}{P_x})^{\omega_x}]^{\frac{1}{\omega_x}} \quad (2)$$

式中: $AET_x$  表示潜在蒸散发量(mm); $\omega_x$  表示自然气候—土壤性质的非物理参数。

其他土地利用/覆被类型(开放水域、城市、湿地)的实际蒸散发通过参考作物蒸散发直接计算,由降水量决定其最大值,计算公式为:

$$AET_x = \text{Min}(K_c(l_c) \cdot ET_0, P_x) \quad (3)$$

式中: $K_c(l_c)$  为特定土地利用类型对应的植被蒸散系数,通过生物物理系数表进行匹配。

模型得到的产水还需利用地形指数等将其进行修正为水源涵养量<sup>[22]</sup>,修正公式为:

$$WR = \text{Min}(249/V, 1) \times \text{Min}(1, 0.9 \times TI/3) \times \text{Min}(1, K/300) \times Y \quad (4)$$

式中:WR 为研究区域水源涵养量(mm);TI 为地形指数;V 为流速系数;K 为土壤饱和导水率(cm/day);Y 为模型计算的产水量(mm)。

地形指数通过流域 DEM 计算得到,公式为:

$$TI = \log(D/S \times P) \quad (5)$$

式中:D 为集水区栅格数量,无量纲;S 为土层深度(mm);P 为百分比坡度,由流域 DEM 计算得到。

流速系数根据植被类型查阅参考文献<sup>[23]</sup>获得,水田、水体、建设用地取 2 012,林地、草地、岩石及裸地分别取 200,500,1 500。土壤饱和导水率采用 Cosby 土壤传递公式计算<sup>[24]</sup>,公式为:

$$K_s = 1.148 \times 10^{(-0.6 + 1.26 \times 10^{-2} c_2 - 6.4 \times 10^{-3} c_1)} \quad (6)$$

式中: $K_s$  为土壤饱和导水率(m/d); $c_1$ 、 $c_2$  分别为土壤的黏粒和砂粒含量(%)。

研究区域土壤饱和导水率计算结果见图 3。

对研究区域各栅格单元的降水及参考作物蒸散发 45 年数据进行线性拟合,拟合斜率即为研究时段内流域降水及蒸散发率。由降水变率的空间分布情况(图 5a)可知,年降水量呈现自西南向东北、自上游向下游递减的空间格局;从多年平均降水量的空间分布(图 5b)来看,1975—2019 年伊洛河降水量在流域下游表现出较显著的下降趋势,而在上游则有所增加,二者互相抵消,流域整体降水量变化不大。



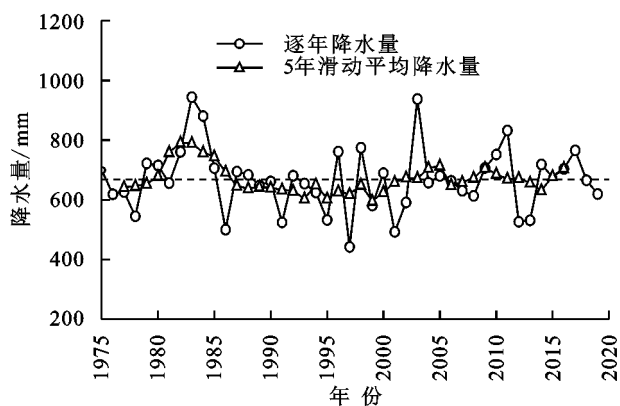


图 4 1975—2019 年伊洛河流域年降水量变化过程

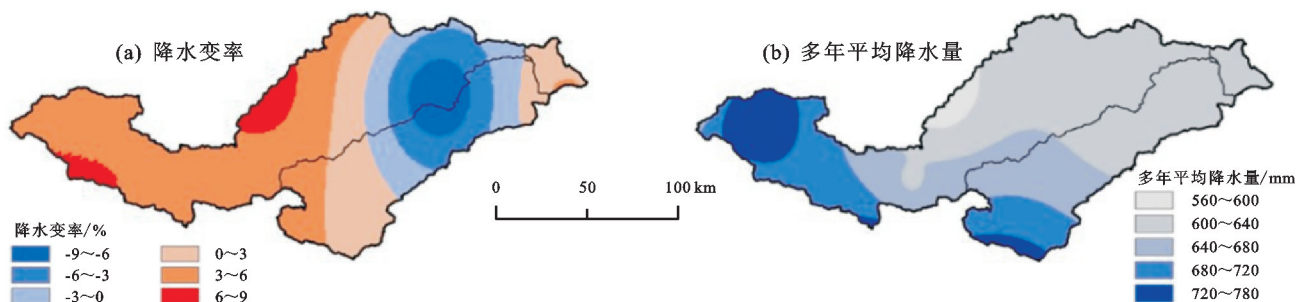


图 5 伊洛河流域多年平均降水量及年降水变率的空间分布

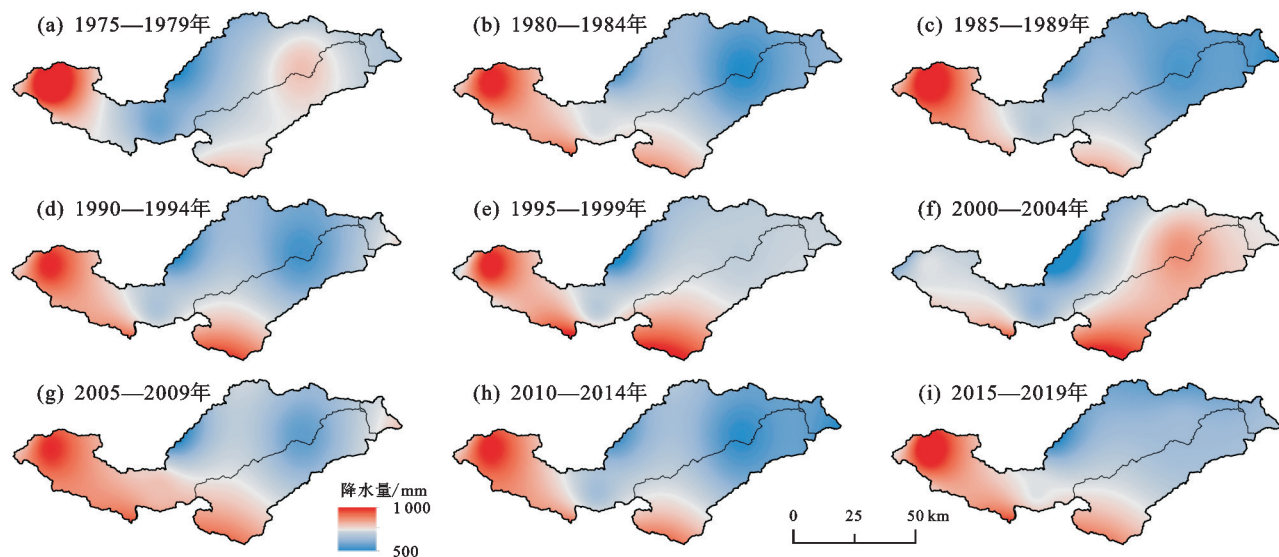


图 6 伊洛河流域降水空间分布情况

## 2.2 伊洛河流域产水量时空变化

以 5 年为 1 个时段,将 1975—2019 年划分为 9 个时段,采用伊洛河流域气象资料 5 年平均栅格数据及对应时段末年份的土地利用资料,输入 InVEST 模型计算流域的 5 年平均产水量。由于缺少 1979 年的土地利用资料,1975—1979 年土地利用资料采用 1980 年的资料替代。研究采用伊洛河流域控制站黑石关站多年平均天然径流数据对模型产水模块进行校准。图 7 和图 8 分别为伊洛河流域产水量的年际变化过程和流域 9 个时段产水量的空间分布状况。

由图 7 可知,伊洛河流域多期平均产水量为 143.2 mm。其中,1980—1984 年流域产水量最高,达 222.1 mm;1995—1999 年产水量最低,仅为 107.3 mm。流域整体产

降水是影响流域水源涵养能力的重要气象要素,由图 6 可知,1975—2019 年伊洛河流域 5 年平均降水量的空间分布情况,伊洛河源头区 2005 年以前降水呈现明显的先增加后减少的趋势,此后稳定在 675 mm 左右。其中,2000—2004 年源头区降水显著减少,流域下游降水显著增加,呈现出与整体相反的趋势。对该特殊规律进行进一步分析发现,上游华山站在 2001—2002 年降水量均在 600 mm 以下,明显低于该站多年平均值(783 mm)。相对应的是,中游孟津站在 2003 年降雨则罕见地达到 1 000 mm 以上。这一降水分布规律同时对该时段产水及水源涵养造成一定的影响。

水量呈现先增后减的趋势,1985 年及 1980 年降水量较高,对应的产水在 1980—1984 年达到峰值。同理可见,1985—1994 年连续的降水减少使产水在 1990—1994 年跌入低谷。从年际变化上看,产水和降水呈现高度一致,表明模型在产水模拟上准确性较高。

由图 8 可知,流域产水量在 1975—2019 年间呈现相似的规律为上游降水丰沛的地区产水量高,中下游产水相对较少。源头区产水量呈现先减少后略增加的趋势。2000—2004 年受华山站附近降水的减少及孟津降水剧烈增加的影响,源头区产水呈现明显的降低趋势,2005 年以后降水恢复平均水平,源头区产水逐步回升。产水的 9 期空间分布规律基本与降水分布对应,进一步论证 InVEST 模型在该流域的适应性。

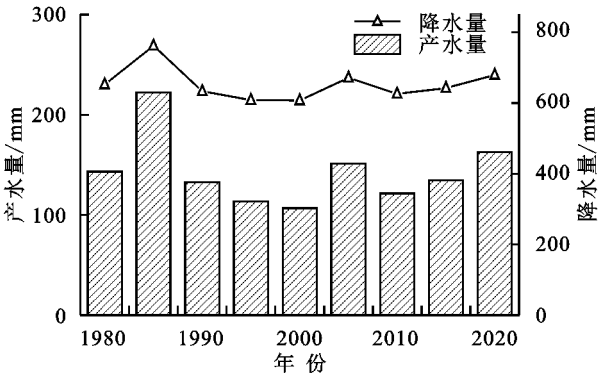


图 7 伊洛河流域降水量及产水量过程

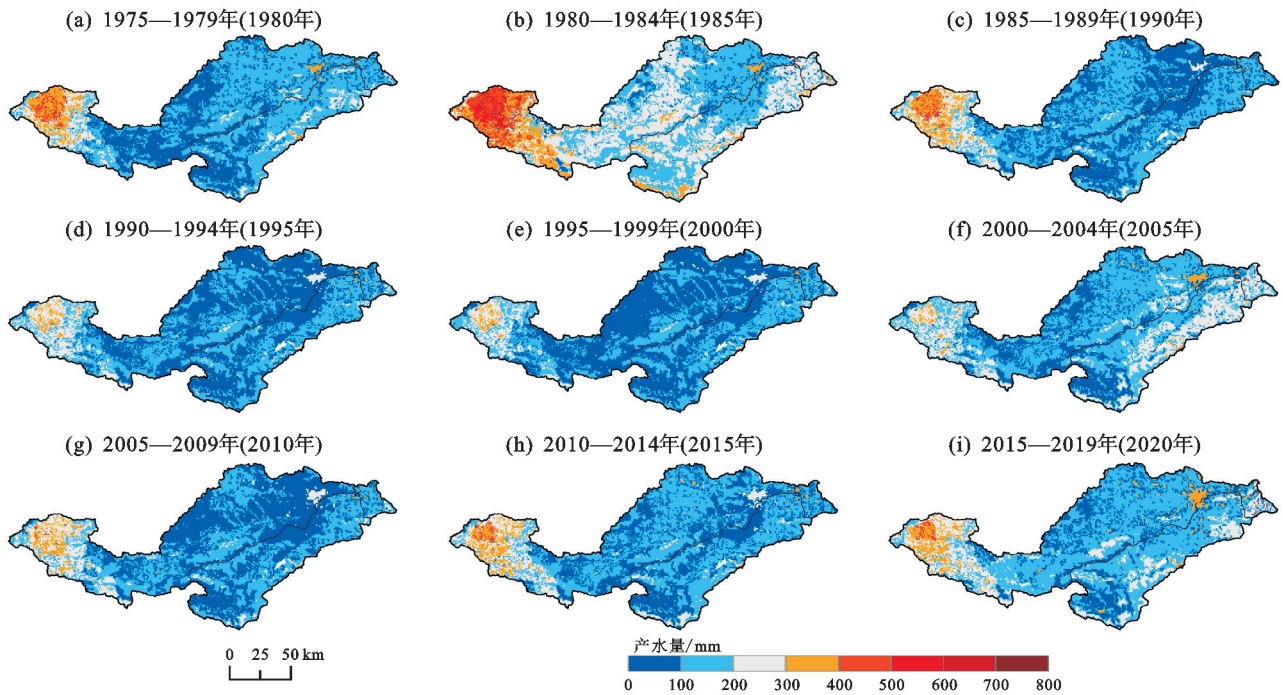


图 8 伊洛河流域产水量空间分布

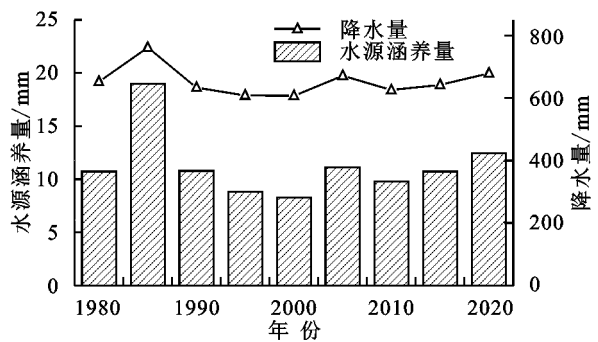


图 9 伊洛河流域水源涵养量及降水量年代际变化过程

图 10 为伊洛河流域水源涵养量的空间分布情况,伊洛河水源涵养高值区出现在流域上游西北部,低值区广泛分布于流域中部和东北部地区,整体呈现自东向西增加趋势,这一趋势与降水空间变化基本一致。此外,流域内不同地区水源涵养量存在较大的差异。降水量大且蒸散相对较小的地区水源涵养能力显著高于其他地区。相反,从年际分布上看,流域水源涵养量整体下降,1975—1984 年以后出现明显下降趋势。

2.3 伊洛河流域水源涵养量时空分布

研究采用土壤饱和导水率、流速系数等对模型计算的产水量进行修正,进而估算各期水源涵养量。图 9 和图 10 分别为伊洛河流域水源涵养量年代际变化过程和 9 个时段水源涵养量的空间分布特征。伊洛河流域多年平均水源涵养量 11.30 mm。其中,1980—1984 年水源涵养量最大,达 18.98 mm;1995—1999 年水源涵养量最低,仅为 8.26 mm。水源涵养量在 45 年间变化趋势与产水量基本一致,水源涵养量与产水量比值在 8% 左右,波动不大,且该比值与降水量的正相关关系。

3 讨论

为进一步分析水源涵养量时空分布变化的原因,研究对评估过程各要素进行具体分析。水源涵养能力的空间分布主要受气候条件和土地利用变化的影响。由图 9 可知,水源涵养量较高的时期降水量较大,随着降水减少和温度逐年上升,流域水源涵养量出现逐期下降的趋势。为量化体现降水对水源涵养量的影响程度,对二者进行单相关和偏相关分析,由图 11 可知,气象要素与水源涵养量的相关系数分布情况,降水量在流域绝大部分地区与水源涵养量存在显著的正相关关系。

为分析人类活动影响下土地利用变化对流域水源涵养功能的影响过程,选取受人类活动影响前的土地利用资料(1980 年)计算当前气象条件(2015—2019 年)背景下的伊洛河流域水源涵养量(图 12)。结果显示,流域整体水源涵养量变化不大,平均水源涵养量较变化前降低 0.08 mm,仅占 2020 年水源涵养的 0.15%。表 1 为 1980—2019 年间流域土地利用



的变化情况,由表 1 可知,1980—2020 年虽然耕地和林地草地总面积变化幅度不大,但相互转化面积较

多。西部水源涵养高值区和退耕还林还草区水源涵养量变化相对剧烈,其余地区则变化较小。

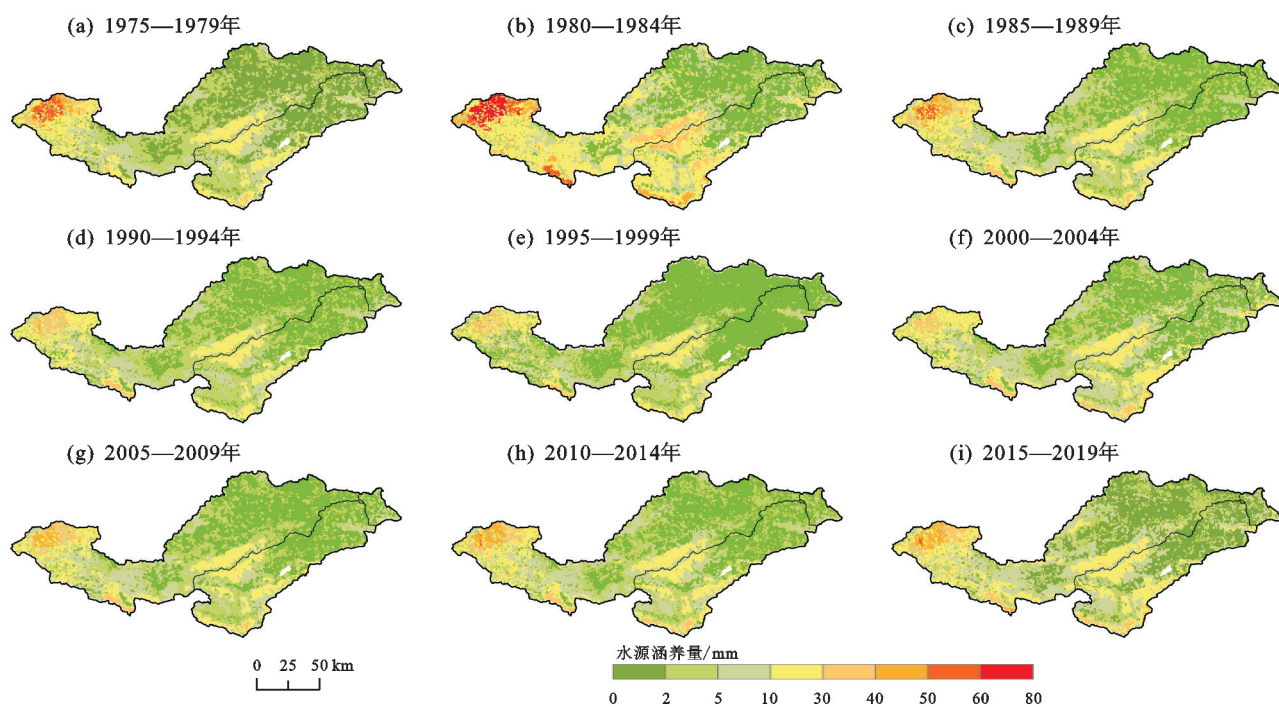
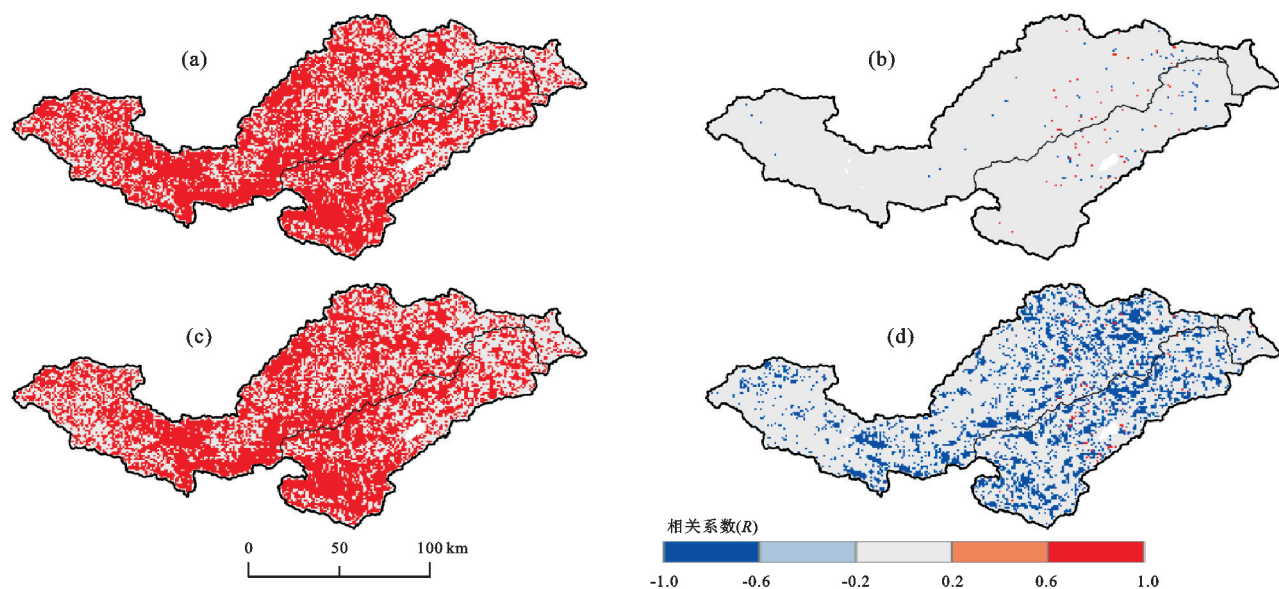


图 10 伊洛河流域水源涵养量空间分布



注: a、b、c、d 分别为降水量与水源涵养量单相关系数分布、参考作物蒸散发与水源涵养量单相关系数分布、降水量与水源涵养量偏相关系数分布、参考作物蒸散发与水源涵养量偏相关系数分布。

图 11 气象要素相关分析

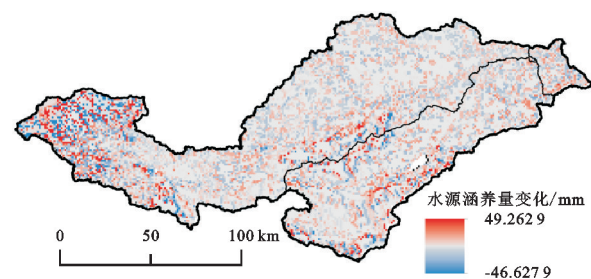


图 12 水源涵养量变化量分布

基于水文模型对区域水源涵养能力进行大时空尺度评估是生态系统服务功能中水源涵养研究的未

来发展方向。其中, InVEST 模型在湿润半湿润地区水源涵养能力评估具有良好的适应性, 能够有效反映区域水源涵养的空间分布情况。不同学者采用 InVEST 模型的水源涵养评估存在一定的差异, 刘树锋等<sup>[26]</sup>在杨溪河流域的研究显示流域水源涵养在一定程度上高于流域产水; 刘宥延等<sup>[27]</sup>在黄土高原评估的水源涵养则占产水的 12% 左右。本文计算的水源涵养量大约占产水的 8%, 该占比随降水波动轻微变化。水源涵养与产水的数量关系主要受产水修正公

式中参数取值的影响,修正公式中的流速系数与土壤饱和率和地形指数为主要控制指标。针对不同地区选取不同流速系数和地形指数可能对水源涵养评估结果产生较大的影响。

表 1 伊洛河流域土地利用变化

| 年份   | 农田                 |       | 林地                 |       | 草地                 |       | 水体                 |      | 建设用地               |      | 未利用地               |      |
|------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|------|--------------------|------|--------------------|------|
|      | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/% | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/% | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/% |
| 1980 | 6444               | 34.94 | 8898               | 48.25 | 2621               | 14.21 | 356                | 1.93 | 123                | 0.67 | 1                  | 0.01 |
| 1990 | 6420               | 34.75 | 8940               | 48.38 | 2658               | 14.39 | 337                | 1.82 | 120                | 0.65 | 2                  | 0.01 |
| 1995 | 6358               | 34.36 | 8882               | 48.00 | 2697               | 14.58 | 384                | 2.08 | 182                | 0.98 | 0                  | 0    |
| 2000 | 6349               | 34.31 | 8873               | 47.95 | 2706               | 14.62 | 389                | 2.10 | 186                | 1.01 | 0                  | 0    |
| 2005 | 6289               | 33.99 | 8875               | 47.97 | 2712               | 14.66 | 414                | 2.24 | 213                | 1.15 | 0                  | 0    |
| 2010 | 6266               | 33.91 | 8872               | 48.02 | 2700               | 14.61 | 413                | 2.24 | 224                | 1.21 | 2                  | 0.01 |
| 2015 | 6192               | 33.46 | 8865               | 47.91 | 2724               | 14.72 | 449                | 2.43 | 273                | 1.48 | 0                  | 0    |
| 2020 | 5908               | 31.91 | 8816               | 47.62 | 2846               | 15.37 | 563                | 3.04 | 380                | 2.05 | 0                  | 0    |

4 结 论

为进一步分析水源涵养量时空分布变化的原因,研究对评估过程各要素进行具体分析,水源涵养能力的空间分布主要受气候条件和土地利用变化的影响。本文根据 InVEST 模型<sup>[25]</sup>输入数据对降水量、蒸散发和土地利用类型 3 种水源涵养能力影响因素进行分析。由降水与水源涵养逐期演变(图 9)可见,水源涵养量较高时期降水量较大,随着降水减少和温度逐年上升,流域水源涵养量出现逐期下降趋势。温度升高在 InVEST 模型产水计算中主要体现为参考作物蒸散发的变化,为量化体现降水和参考作物蒸散发对水源涵养量的影响程度,对二者分别进行单相关和偏相关分析,由图 11 气象要素与水源涵养量的相关系数分布情况可知,降水量在流域绝大部分地区与水源涵养量存在显著正相关关系,参考作物蒸散发的影响相对较小。

为分析人类活动影响下土地利用变化对流域水源涵养功能的影响过程,研究选取受人类活动影响前土地利用资料(1980 年)计算当前气象条件(2015—2019 年)背景下的伊洛河流域水源涵养量(图 12)。结果显示,流域整体水源涵养量变化不大,平均水源涵养量较变化前降低 0.08 mm,仅占 2020 年水源涵养量的 0.15%。由 1980—2019 年流域土地利用的变化情况(表 1)可知,1980—2020 年建设用地和水体增加显著,农田面积有所减少,林地草地总面积变化幅度不大,但二者和耕地间相互转化较多。由于伊洛河流域 1980 年至今各土地利用类型相互转换多,总量变化少,因此,研究模拟的水源涵养量空间分布变化大,总量下降不显著。与土地利用变化相对应的西部水源涵养高值区和退耕还林还草区水源涵养量变化剧烈,其余地区变化较小。

参考文献:

[1] Innvae S, Vist G, Trommald M, et al. Health policy-makers' perceptions of their use of evidence: A systematic review[J]. Journal of Health Services Research and Policy, 2002, 7(4): 239-244.

[2] 赵晓涵,张方敏,卢琦,等.未来气候情景内蒙古蒸散和产水量的变化特征[J].水土保持学报,2022,36(4):151-159.

[3] 张佳楠,张建军,张海博,等.晋西黄土区典型林分水源涵养能力评价[J].北京林业大学学报,2019,41(8):105-114.

[4] 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.

[5] 周佳雯,高吉喜,高志球,等.森林生态系统水源涵养服务功能解析[J].生态学报,2018,38(5):1679-1686.

[6] Hu W M, Li G, Gao Z H, et al. Assessment of the impact of the poplar ecological retreat project on water conservation in the Dongting Lake wetland region using the InVEST model[J]. Science of the Total Environment, 2020, 733: e139423.

[7] 宫渊波,麻泽龙,陈林武,等.嘉陵江上游低山暴雨区不同水土保持林结构模式水源涵养效益研究[J].水土保持学报,2004,18(3):28-32.

[8] 侯晓臣,孙伟,李建贵,等.森林生态系统水源涵养能力计量方法研究进展与展望[J].干旱区资源与环境,2018,32(1):121-127.

[9] 李文华,何永涛,杨丽韞.森林对径流影响研究的回顾与展望[J].自然资源学报,2001,16(5):398-406.

[10] 王晓学,沈会涛,李叙勇,等.森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J].生态学报,2013,33(4): 1019-1030.

[11] 贾雨凡,杨勤丽,胡非池,等.变化环境下的水源涵养能力评估研究进展[J].水利水运工程学报,2022(1):37-47.

[12] 聂忆黄.基于地表能量平衡与 SCS 模型的祁连山水源涵养能力研究[J].地学前缘,2010,17(3):269-275.

[13] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service

- model at a national scale[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570: 1418-1426.
- [14] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213-224.
- [15] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment; Part I, Model development[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89.
- [16] 郭屹立, 卢训令, 丁圣彦. 伊洛河河岸带生态系统草本植物功能群划分[J]. *生态学报*, 2012, 32(14): 4434-4442.
- [17] 贺瑞敏, 王国庆, 张建云. 环境变化对黄河中游伊洛河流域径流量的影响[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(2): 297-298.
- [18] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. Hargreaves 公式的全局校正及适用性评价[J]. *水科学进展*, 2011, 22(2): 160-167.
- [19] 国家地球系统科学数据中心. 国家科技基础条件平台[R/OL]. (2022-12-02) <http://www.geodata.cn>.
- [20] 周文佐. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
- [21] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(2): 1-14.
- [22] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 等. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J]. *林业科学*, 2012, 48(10): 1-5.
- [23] Allen R G. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [24] Cosby B J, Hornberger G M, Clapp R B, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils[J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(6): 682-690.
- [25] 顾铮鸣, 金晓斌, 沈春竹, 等. 近 15 年江苏省水源涵养功能时空变化与影响因素探析[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(11): 2453-2462.
- [26] 刘树锋, 陈记臣, 关帅, 等. 基于 InVEST 模型的未来土地利用变化对水源涵养功能的影响: 以杨溪河流域为例[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(15): 67-70.
- [27] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 等. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(17): 6161-6170.
- (上接第 100 页)
- [22] 高君亮, 高永, 吴波, 等. 戈壁地表土壤颗粒的空间变异特征研究[J]. *土壤*, 2019, 51(1): 135-141.
- [23] 曹媛, 孟明, 王磊, 等. 宁夏中部干旱带天然草地土壤颗粒空间分布特征[J]. *中国水土保持*, 2021(2): 56-59.
- [24] 杨振奇, 秦富仓, 李旻宇, 等. 砒砂岩区不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(4): 733-739.
- [25] 杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区小流域土壤有机质空间分布特征及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 154-161.
- [26] 王晨洋. 不同近地表土壤水文条件下黄壤坡面细沟间侵蚀过程机理[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [27] 张合兵, 聂小军, 程静霞. <sup>137</sup>Cs 示踪采煤沉陷坡土壤侵蚀及其对土壤养分的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 137-143.
- [28] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 12-22.
- [29] 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. *水科学进展*, 2010, 21(5): 593-599.
- [30] 余新晓, 张晓明, 武思宏, 等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. *山地学报*, 2006(1): 19-26.
- [31] 王冬冬, 高磊, 陈效民, 等. 红壤丘陵区坡地土壤颗粒组成的空间分布特征研究[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 361-367.
- [32] 钱秋颖, 秦富仓, 李龙, 等. 自然降雨条件下坡面侵蚀地表粗糙度的空间异质性[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 46-52.
- [33] 石建省, 叶浩, 王强恒, 等. 水岩作用对内蒙古南部砒砂岩风化侵蚀的影响分析[J]. *现代地质*, 2009, 23(1): 171-177.