

黄河水源涵养区水源涵养量对土地利用变化的敏感性分析

毛海睿^{1,2}, 杜军凯², 谢敏², 张守平¹, 仇亚琴², 谈幸燕², 郝春沅², 石洪源²

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 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:【目的】揭示黄河水源涵养区水源涵养量的时空分布规律、探究其对土地利用变化的敏感性,为黄河流域水资源管理、土地利用规划和生态修复提供参考。【方法】从土地利用类型变化角度出发,采用 WEP-L 模型和基于流域水循环视角的水源涵养量计算方法,估算了黄河水源涵养区水源涵养量并探究了其对不同土地利用类型的敏感程度。【结果】①研究区多年平均水源涵养量 184.32 亿 m^3 ,折合单位面积涵养量为 61 mm,空间分布表现为东高西低;汛期时段、过渡时段和枯水时段的水源涵养量分别为 114.37 亿、37.82 亿、32.13 亿 m^3 。②水源涵养量呈不显著增加趋势,梯度值为 0.37 亿 m^3 /年,突变年份为 1964 年和 2002 年;水源涵养量序列存在两个明显的周期,分别为 56 年和 35 年。③水源涵养量对土地利用类型的敏感系数依次为林地 0.594、耕地 0.341、水域 0.301、草地 0.232、其他 0.063。【结论】WEP-L 模型和基于流域水循环视角的水源涵养量计算方法能有效应用于黄河流域水源涵养功能评估;研究区水源涵养功能受土地利用变化影响显著,林地是调控区域水源涵养能力的关键地类。

关键词:黄河水源涵养区; WEP-L 模型; 水源涵养量; 土地利用变化; 敏感分析

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-6792(2025)06-0044-12

水源涵养是生态服务功能评价的重要内容,其功能通过植被结构对来水进行蓄滞、截留、蒸散等过程,实现对区域水循环的调控^[1]。因此,对水源涵养功能的研究可作为评价区域水资源健康状况的一种方式。黄河流域是我国重点保护的生态环境脆弱区域^[2],其环境因子易受到近几十年来高强度的人类生产建设活动^[3]和气候变化大背景^[4]的影响。环境因子变化引起的水源涵养功能改变,不仅直接影响流域内自然要素状况与生态系统过程,还会对下游地区的生态系统和水资源状况产生间接影响。

水源涵养功能与植被的关系是早期相关研究的重点内容^[5]。19 世纪末,学者就已经开始探索植被对水源涵养功能的影响机理,涉及林区的蒸发、截留、水土流失等方面,包括林区砍伐量对水资源的影响以及有林地与无林地水源涵养功能的差

异研究^[6]。随着水源涵养功能研究方法发展为公式定量计算与模型辅助分析,植被覆盖动态变化对水源涵养功能的影响研究成为可能。李威等^[7]基于生态系统服务和权衡的综合评估(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST)模型和 Pearson 相关系数,分析了乌江流域水源涵养量与土地利用的相关性,结果表明不同地类的水源涵养能力大小依次为草地>林地>耕地。ZUO D P 等^[8]通过土壤与水评估(Soil and Water Assessment Tool, SWAT)模型研究了退耕还林政策对伊洛河流域水源涵养功能的影响,得出每 10%的耕地转为林地,区域水源涵养量增加 19.30 mm 的结论。余新晓等^[9]基于 InVEST 模型评估了北京市不同森林景观类型的水源涵养量,发现落叶松人工林的水源涵养量最大(148 mm),其他阔叶人工林的最小(47.6 mm)。目前,水源涵养功能研究处于动态发

收稿日期/Received: 2024-07-29

修回日期/Revised: 2024-10-26

基金项目:流域水循环模拟与调控国家重点实验室课题(SKL2024YJZD02);云南省重点研发计划项目(202303AC100020);国家重点研发计划项目(2023YFF1304202);重庆市水利科技项目(CQSLK-2022005)。

第一作者:毛海睿(1999—),男,硕士研究生,从事流域水循环模拟方面的研究。E-mail:622220960130@mails.cqjtu.edu.cn。

通信作者:杜军凯(1987—),男,高级工程师,博士,从事流域水循环及其伴生过程模拟方面的研究。E-mail:du_djk@163.com。

展阶段^[10],多数研究聚焦小流域范围,对大时空尺度水源涵养功能的研究相对欠缺^[11]。黄河流域已有研究涉及水碳变量^[12]、径流情势^[13]以及降水气温^[14]等方面,尚需对其水源涵养功能进行完整性分析。

本文从厘清黄河水源涵养区水源涵养功能的特征出发,采用 WEP-L (Modeling Water and Energy Transfer Processes in Large River Basins) 模型和基于流域水循环视角的水源涵养量评价方法,分析区域水源涵养量的时空变化特征,并探究不同土地利用类型下水源涵养量的敏感程度,以期揭示黄河水源涵养区水文-生态过程的耦合机理^[15]、推进区域生态文明建设及优化下游地区水资源配置提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 研究区域及数据

黄河水源涵养区范围为 95°55'E~113°09'E、32°10'N~38°19'N,包括以下 3 个子区域:以三江源、若尔盖、祁连山生态功能区为主的兰州以上区

域(B1),面积为 22.25 万 km²;以六盘山、秦岭生态功能区为主的渭河华县站以上(不包含泾河流域)区域(B2),面积为 6.33 万 km²;以秦岭东麓余脉为主的伊洛河流域(B3),面积为 1.86 万 km²。研究区总面积为 30.44 万 km²,占黄河流域总面积的 38.3%。根据 1956—2016 年统计资料^[16],黄河水源涵养区的多年平均天然径流量为 412 亿 m³,约占黄河流域总径流量的 84.1%,是黄河流域主要的径流来源区。

研究用到的数据为 WEP-L 模型输入数据,主要包括:①30 m 分辨率的 GTOPO30 DEM (Digital Elevation Model) 数据;②407 个国家气象站和 1 245 个雨量站的逐日气象数据,采用反距离平方法展布到各子流域形心;③中国科学院地理科学与资源研究所提供的 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2018 年共 5 期 30 m 分辨率的土地利用数据;④基于全国第二次土壤普查获取的土壤特征信息;⑤黄河流域 119 处大型灌区数据,来源于黄河水利委员会;⑥用水数据,来源于黄河流域水资源公报。

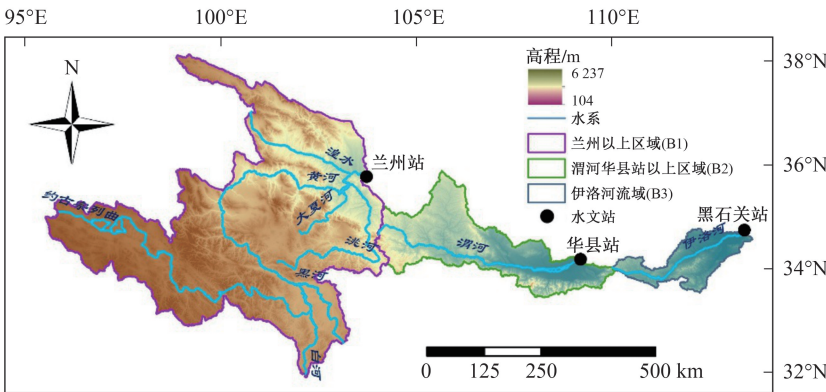


图 1 黄河水源涵养区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Yellow River water source conservation area

1.2 研究方法

1.2.1 WEP-L 模型原理、率定和验证

WEP-L 模型是基于二元水循环过程开发的具有物理机制的分布式水文模型。该模型综合考虑了气象、下垫面条件、人类取水活动及水利工程对水循环的影响^[17],实现了“自然-社会”二元水循环过程的耦合模拟和分析,对于区域尺度大、社会活动复杂的黄河水源涵养区的水文计算具有优势^[18]。模型输入为水循环各通量要素值,其中蒸散发过程采用 Penman 公式与 Penman-Monteith 公式计算,入渗过程采用 Green-Ampt 模型和 Richards 方程模拟,地表径流采用非饱和状态的达西定律和连续方程计算,斜坡面土壤层中考虑壤中流;浅层

地下水过程采用 Boussinesq 方程描述,积雪融化过程采用温度指标法进行计算。根据模型原理,将研究区划分为 3 322 个子流域,其空间分布如图 2 所示。

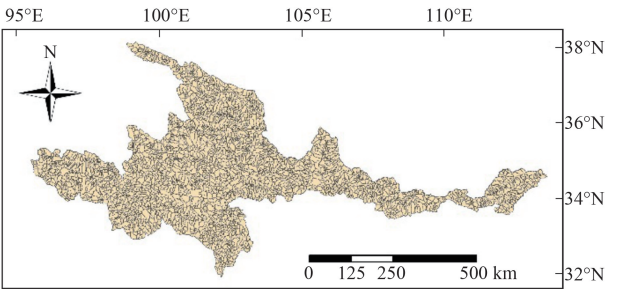


图 2 研究区子流域划分

Fig. 2 Sub-basin division of study area

模型模拟了 1960—2018 年长系列水循环过程。以 1960—1980 年为率定期, 1981—2010 年为验证期, 分别对比了兰州站(位于 B1 区域)、华县站(位于 B2 区域)、黑石关站(位于 B3 区域)的模拟月径流量与实测月径流量系列, 结果如图 3 所示。由图 3 可知: ①率定期, 兰州站、华县站、黑石关站模拟径流系列与还原径流系列的决定系数 R^2

分别为 0.87、0.83、0.86, 纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)分别为 0.78、0.76、0.84。②验证期, 兰州站、华县站、黑石关站逐月模拟径流系列与还原径流系列的决定系数 R^2 分别为 0.81、0.79、0.82, NSE 分别为 0.67、0.66、0.63。模型在研究区表现出较好的模拟性能^[19], 可用于流域水循环模拟与水源涵养量评价。

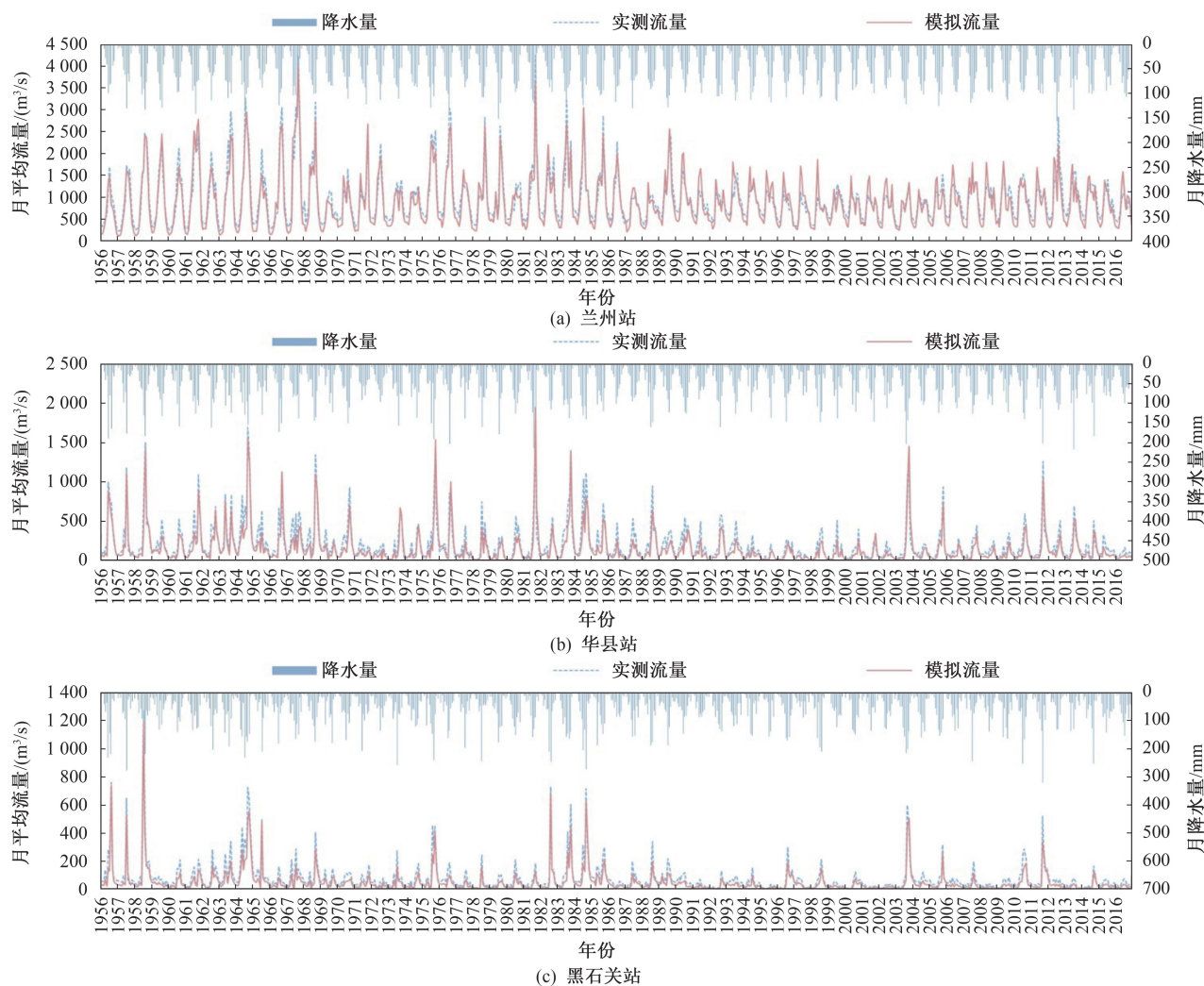


图 3 水文站模拟月径流与还原径流过程对比

Fig. 3 Comparison of simulated monthly runoff with restored runoff at hydrological stations

1.2.2 基于流域水循环视角的水源涵养量计算方法

水源涵养量是指通过水源涵养功能蓄滞的水量。采用杜军凯等^[20]于 2023 年提出的基于流域水循环视角的黄河水源涵养量计算方法, 并利用 WEP-L 模型输出的蒸散发、下渗、河道径流量等数据。该方法能够多维度统筹上下游、左右岸利益相关方的关系, 适用于黄河源区水源涵养量的评估。如图 4 所示, 水源涵养量的计算包括汛期(6—10 月)的调洪部分、过渡期(3—5 月及 11 月)的蓄滞部分、枯水期(1—2 月及 12 月)的产水部分, 3 个部

分水源涵养量之和即为研究区水源涵养总量。汛期关注“调洪”, 该时段的水源涵养量为植被冠层、土壤层和地下含水层对洪水过程的调节量(计算中涉及的参照下垫面为覆盖率 100% 的裸地, 本文假定裸地不具有水源涵养能力); 过渡期关注“蓄滞”, 该时段水源涵养量为在生态系统中发挥重要作用的滞留水量; 枯水期关注“产水”, 在水资源紧缺的黄河流域, 应将涵养区全部产流量均纳入水源涵养量。

计算公式为:

$$\begin{cases} W_{\text{涵}}^j = \sum_{i=1}^{N_{\text{汛}}} W_{i,\text{汛}}^j + \sum_{i=1}^{N_{\text{过}}} W_{i,\text{过}}^j + \sum_{i=1}^{N_{\text{枯}}} W_{i,\text{枯}}^j, \\ N_{\text{汛}} + N_{\text{过}} + N_{\text{枯}} = 12. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $W_{\text{涵}}^j$ 为第 j 年的流域水源涵养量, m^3 ; $W_{i,\text{汛}}^j$ 为第 j 年汛期 i 个月的水源涵养量, m^3 ; $W_{i,\text{过}}^j$ 为第 j 年过渡期 i 个月的水源涵养量, m^3 ; $W_{i,\text{枯}}^j$ 为第 j 年枯水期 i 个月的水源涵养量, m^3 ; $N_{\text{汛}}$ 、 $N_{\text{过}}$ 和 $N_{\text{枯}}$ 分别表示汛期、过渡期和枯水期的月数。

水源涵养量分时段计算公式为:

$$W_{\text{汛}} = R_{\text{汛}}^{\text{参}} - R_{\text{汛}}^{\text{现}} = (ET_{\text{汛}}^{\text{参}} - ET_{\text{汛}}^{\text{现}}) + (\Delta V_{\text{汛}}^{\text{参}} - \Delta V_{\text{汛}}^{\text{现}}); \quad (2)$$

$$\begin{cases} W_{\text{过}} = \lambda R_{\text{过}} = \lambda (P_{\text{过}} - ET_{\text{过}} - \Delta V_{\text{过}}), \\ \lambda = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{K}{300}\right) \times \min\left(1, 0.9 \times \frac{\text{TI}}{3}\right); \end{cases} \quad (3)$$

$$W_{\text{枯}} = P_{\text{枯}} - ET_{\text{枯}} - \Delta V_{\text{枯}}. \quad (4)$$

式中: $W_{\text{汛}}$ 为汛期水源涵养量, m^3 ; $R_{\text{汛}}^{\text{参}}$ 为参照下垫面条件对应的汛期径流量, m^3 ; $R_{\text{汛}}^{\text{现}}$ 为现状下垫面条件对应的汛期径流量, m^3 ; $ET_{\text{汛}}^{\text{参}}$ 为参照下垫面条件对应的汛期蒸散发量, m^3 ; $ET_{\text{汛}}^{\text{现}}$ 为现状下垫面条件对应的汛期蒸散发量, m^3 ; $\Delta V_{\text{汛}}^{\text{参}}$ 为参照下垫面条件对应的汛期蓄变量, m^3 ; $\Delta V_{\text{汛}}^{\text{现}}$ 为现状下垫面条件下对应的汛期蓄变量, m^3 ; $W_{\text{过}}$ 为过渡期水源涵养量, m^3 ; λ 为过渡期涵养系数, 无量纲; $P_{\text{过}}$ 为过渡期降水量, m^3 ; $ET_{\text{过}}$ 为过渡期蒸散发量, m^3 ; $\Delta V_{\text{过}}$ 为过渡期蓄变量; V 为流速系数, 无量纲; K 为涵养层饱和水利传导系数, mm/d ; TI 为地形指数, 无量纲; $W_{\text{枯}}$ 为枯水期水源涵养量, m^3 ; $P_{\text{枯}}$ 为枯水期降水量, m^3 ; $ET_{\text{枯}}$ 为枯水期蒸散发量, m^3 ; $\Delta V_{\text{枯}}$ 为枯水期蓄变量, m^3 。

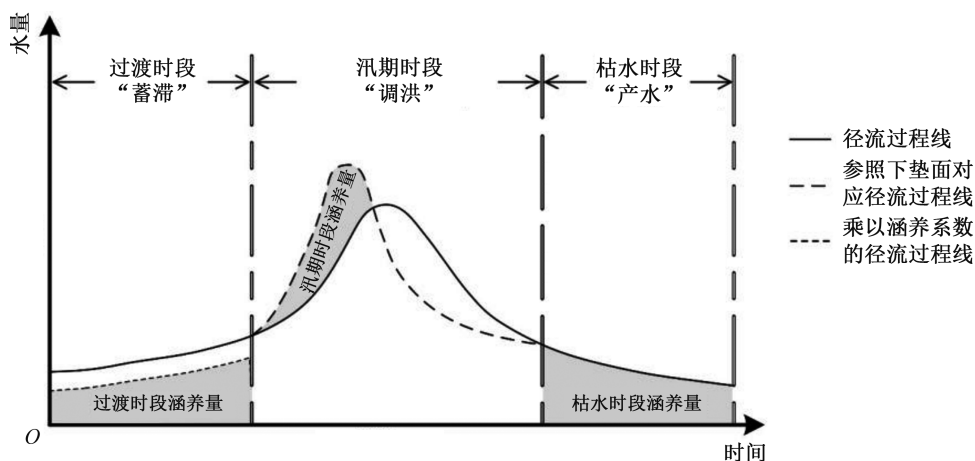


图 4 不同时段水源涵养量组成

Fig. 4 Composition of water conservation amount at different times

1.2.3 序列演变分析

采用 Mann-Kendall 趋势检验法^[21]和 Spearman 秩次相关检验法^[22]对 1960—2018 年研究区水源涵养量的变化情况进行分析。若 Spearman 系数为负且 Mann-Kendall 统计量为正, 表明序列呈上升趋势, 反之为下降趋势, 且使用显著性水平 $\alpha=0.05$ 检验趋势显著性。采用有序聚类法识别序列突变点, 并采用小波分析 Morlet 函数对水源涵养序列的周期变化进行分析, 预测其未来变化趋势。

1.2.4 敏感性分析

分别采用土地利用转移矩阵、水源涵养量的地类展布以及情景分析法分析地类对水源涵养量的敏感程度。其中, 土地利用转移矩阵能够直观反映不同时期各地类面积的变化和转移方向^[23], 用于定量分析黄河水源涵养区各地类面积情况并进行

水源涵养量的地类展布。根据展布情况设计土地利用变化情景, 分析不同地类情景下水源涵养量较原始情景的变化情况, 从而识别水源涵养量对地类变化的敏感程度。

敏感性系数的计算公式为:

$$\begin{cases} m_i = (\Delta W_{\text{涵}} / W_{\text{涵}}) / (\Delta S_i / S_i), \\ M_i = m_i + m_{i-1} + \dots + m_1. \end{cases} \quad (5)$$

式中: m_i 为情境 i 下的水源涵养量 $W_{\text{涵}}$ 关于土地利用面积 S_i 的相对敏感性系数, 无量纲, $m_i > 0$ 表示水源涵养量 $W_{\text{涵}}$ 随土地利用面积 S_i 的增加而增加, 反之为减少, m_i 绝对值越大, 表明下垫面面积 S_i 对水源涵养量 $W_{\text{涵}}$ 的影响越大; $\Delta W_{\text{涵}}$ 为水源涵养量变化量; ΔS_i 为土地利用面积改变量; M_i 为敏感性系数, 是相对敏感性系数的顺次累加值。

2 结果分析

2.1 水源涵养量演变

2.1.1 空间分布

1960—2018 年研究区水源涵养量分布如图 5 所示,各时段水源涵养量占比见表 1。由图 5 可知:①研究区水源涵养量总体呈现东高西低的分布格局。多年平均水源涵养量为 184.32 亿 m³,折合单位面积水源涵养量为 61 mm。其中,汛期水源涵养量占比为 72.86%,过渡期的占比为 20.83%,枯水期的占比为 6.31%。②B1 区域多年平均水源涵养量为 125.56 亿 m³,折合单位面积水源涵养量为 56 mm,其中汛期水源涵养量占比为 64.09%,过渡期的占比为 29.41%,枯水期的占比为 6.50%。B2 区域多年平均水源涵养量为 33.96 亿 m³,折合单

位面积水源涵养量为 54 mm,其中汛期水源涵养量占比为 86.81%,过渡期的占比为 6.83%,枯水期的占比为 6.36%。B3 区域多年平均水源涵养量为 24.8 亿 m³,折合单位面积水源涵养量为 133 mm,其中汛期水源涵养量占比为 88.80%,过渡期的占比为 5.84%,枯水期的占比为 5.36%。

3 个区域不同时段水源涵养量的组成如图 6 所示。由图 6 可知:①研究区水源涵养量以汛期贡献为主,过渡期的次之,枯水期的最小。②从 B1 到 B3 区域,水源涵养量的时段组成越来越不均匀,汛期占比越来越大。具体来看,B1 区域枯水期水源涵养量的贡献较低,过渡期和汛期水源涵养量占比较多;B2 和 B3 区域过渡期和枯水期对水源涵养量的贡献较为均衡但非常有限,汛期贡献较大。

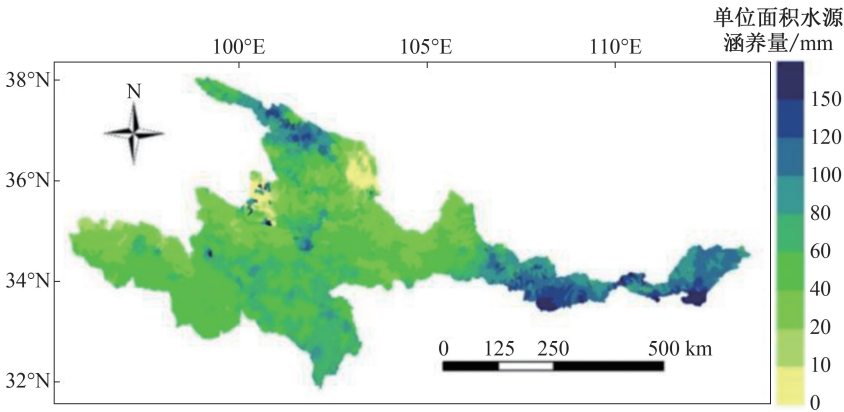


图 5 1960—2018 年研究区单位面积水源涵养量分布

Fig. 5 Distribution of water conservation amount per unit area in study area (1960–2018)

表 1 水源涵养量计算结果

Tab. 1 Computed results of water conservation amount

区域	汛期		过渡期		枯水期		总涵养量/ (亿 m ³)	单位面积 涵养量/mm
	涵养量/ (亿 m ³)	占比/%	涵养量/ (亿 m ³)	占比/%	涵养量/ (亿 m ³)	占比/%		
B1	80.47	64.09	36.93	29.41	8.16	6.50	125.56	56
B2	29.48	86.81	2.32	6.83	2.16	6.36	33.96	54
B3	22.02	88.80	1.45	5.84	1.33	5.36	24.80	133
总	134.30	72.86	38.39	20.83	11.63	6.31	184.32	61

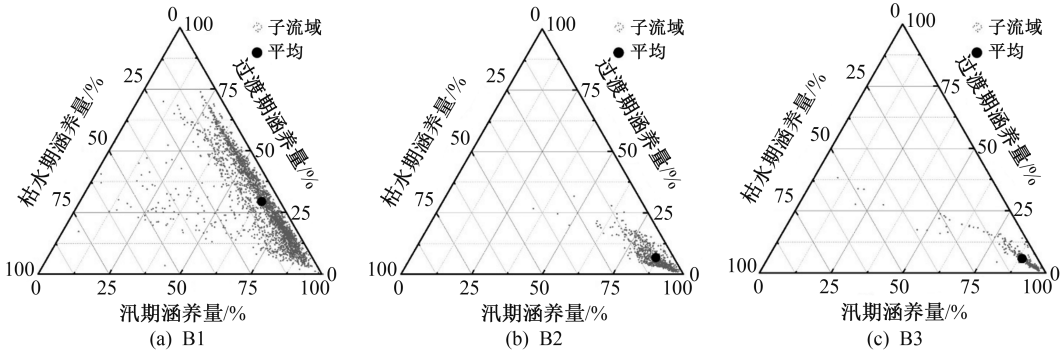


图 6 水源涵养量分时段组成

Fig. 6 Temporal composition of water conservation amount

2.1.2 序列趋势性

研究区水源涵养量的年际变化情况如图 7 所示,Mann-Kendall 趋势检验法和 Spearman 秩次相关检验法的结果见表 2。由图 7 和表 2 可知:从年际变化来看,不同年份水源涵养量波动较大。其中,B1 区域的水源涵养量在整个计算时段内都远大于其他两个区域的;B2 区域面积为 B3 区域的 3 倍多,但其水源涵养量并未显著高于 B3 区域的,相

反在 1971 年、1996 年、2002 年等年份 B3 区域的水源涵养量大于 B2 区域的,该现象在 2000 年以后较为突出。

整体上,黄河水源涵养区多年水源涵养量呈不显著增加趋势,梯度值为 0.37 亿 m³/年。分区来看,B1 区域呈现出显著增加趋势,梯度值为 0.51 亿 m³/年,B2 区域和 B3 区域均呈现出不显著减少趋势,梯度值分别为-0.37 亿 m³/年和-0.22 亿 m³/年。

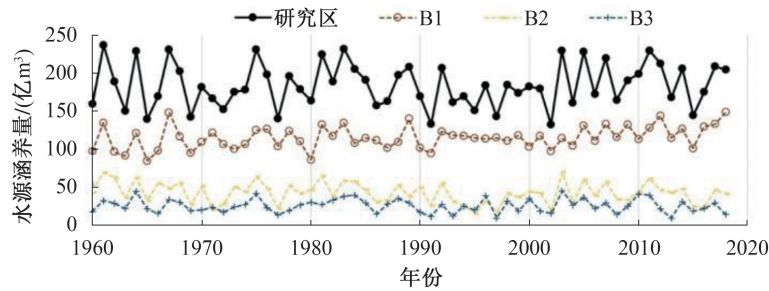


图 7 研究区水源涵养量年际变化
Fig. 7 Annual changes in water conservation amount in study area

表 2 水源涵养量变化趋势

Tab. 2 Trend of water conservation amount

区域	Spearman 检验法 数值	Mann-Kendall 检验法 数值	变化 趋势	梯度值/ (亿 m ³ · 年 ⁻¹)	显著性
总	-0.63	0.61	增加	0.37	不显著
B1	-2.69	2.70	增加	0.51	显著
B2	1.71	-1.70	减少	-0.37	不显著
B3	0.40	-0.35	减少	-0.22	不显著

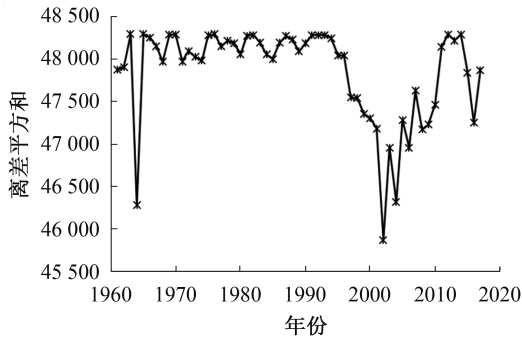
2.1.3 水源涵养量突变点和周期分析

采用有序聚类突变点检测法分析研究区水源涵养量序列的突变情况,结果如图 8 所示。由图 8 可知:B1 区域水源涵养量序列在 1966 年和 2004 年发生突变;B2 区域水源涵养量序列突变发生在 1971 年、1985 年、2014 年;B3 区域水源涵养量序列

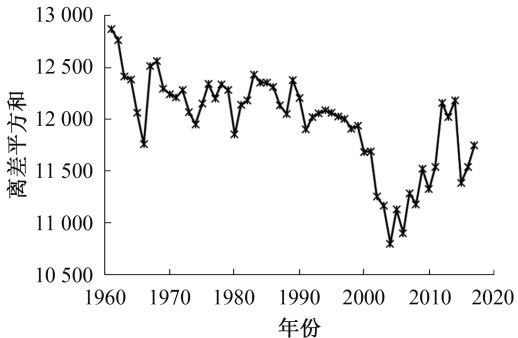
突变发生在 1964 年和 2011 年。各区域水源涵养量序列的突变时间主要集中在 19 世纪 60 年代和 21 世纪初期,对研究区水源涵养量序列进行突变分析发现其也在 1964 年和 2002 年发生突变。

通过 Morlet 小波函数对研究区水源涵养量序列进行周期分析,结果如图 9 所示。由图 9 可知,研究区的水源涵养量序列存在两个明显周期,第一主周期为 56 年,第二主周期为 35 年。其中:B1 区域仅存在一个明显的周期,为 56 年;B2 区域有两个明显的周期,第一主周期是 35 年,第二主周期是 57 年;B3 区域和 B2 区域的周期变化相似,也存在两个较为明显的周期,第一主周期为 35 年,第二主周期为 55 年。

水源涵养量序列的突变点和周期与区域降水量序列的变化特征相似,表明水源涵养量的变化与降水量的变化密切相关。



(a) 研究区



(b) B1区域

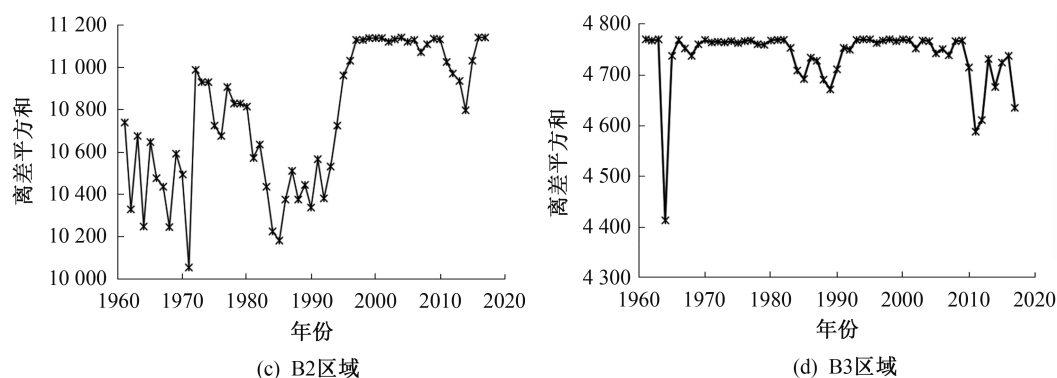


图 8 突变点分析

Fig. 8 Change-point analysis

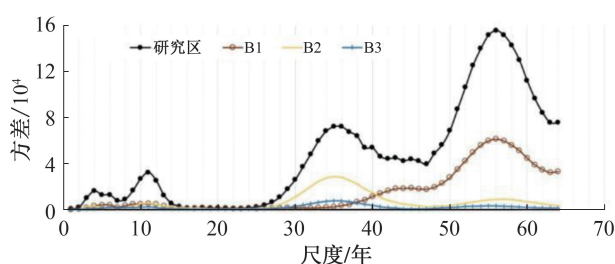


图 9 小波方差图

Fig. 9 Wavelet variance plot

2.2 土地利用变化及敏感性分析

2.2.1 土地利用转移

将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域

和其他用地(包括居民工矿用地与未利用地)5 类别。1980—2018 年研究区土地利用类型的空间分布如图 10 所示。由图 10 可知,研究区西部的土地利用类型以草地为主,中部和东部以耕地和林地为主。具体来看,B1 区域西南部多林地、草地和水域,东北部多林地和耕地,区域整体以草地为主要地类;B2 区域的以耕地和草地为主,南部也有部分林地;B3 区域的以耕地和林地为主,林地主要分布在该区域中部和西部,耕地主要分布在该区域东部。

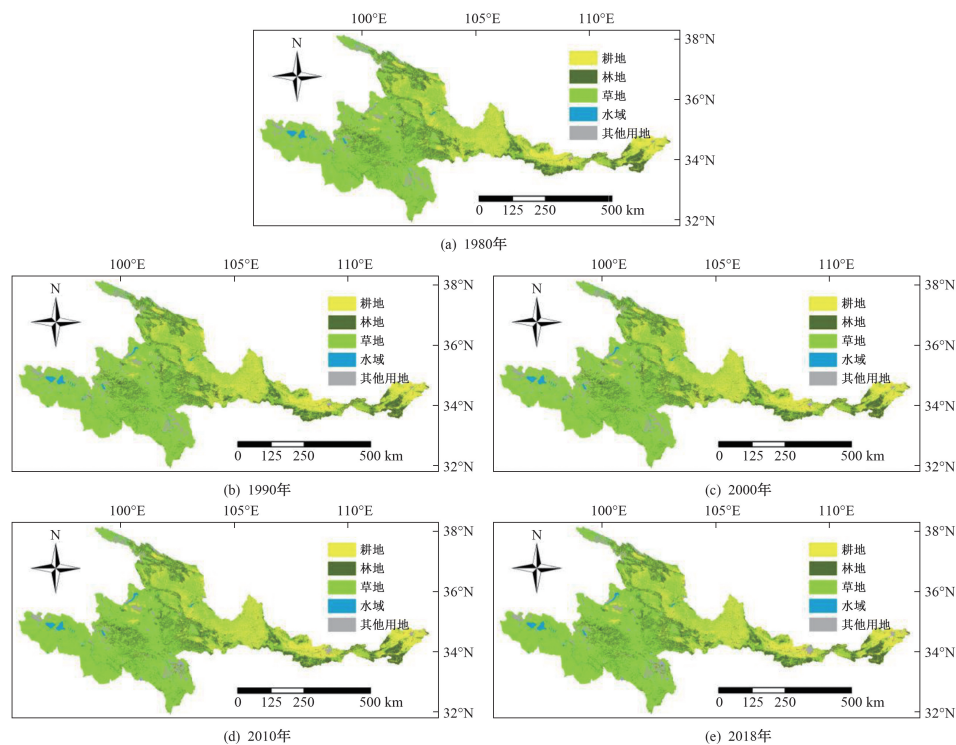


图 10 研究区 1980—2018 年土地利用类型分布情况

Fig. 10 Distribution of land use types in study area (1980–2018)

研究区土地利用面积变化情况如图 11 所示。由图 11 可知,1980—2018 年间耕地减少 1 311 km²,

林地增加 102 km²,草地增加 4 135 km²,水域增加 730 km²,其他用地减少 3 655 km²。其中,B1 区域耕地

增加 108 km²,林地增加 343 km²,草地增加 3 966 km²,水域增加 704 km²,其他用地减少 5 121 km²;B2 区域耕地减少 1 508 km²,林地增加 193 km²,草地增加 224 km²,水域减少 98 km²,其他用地增加 1 189 km²;B3 区域耕地减少 219 km²,林地减少 332 km²,草地减少 62 km²,水域增加 87 km²,其他用地增加

526 km²。B1 为黄河源区,耕地、林地、草地、水域面积均有增加,其他用地面积减少明显,植被恢复情况良好;B2、B3 区域增加面积均主要为其他用地,耕地面积均减少,林地、草地面积 B1、B2 区域增加,B3 区域减少,B3 区域主要发展城镇化建设。

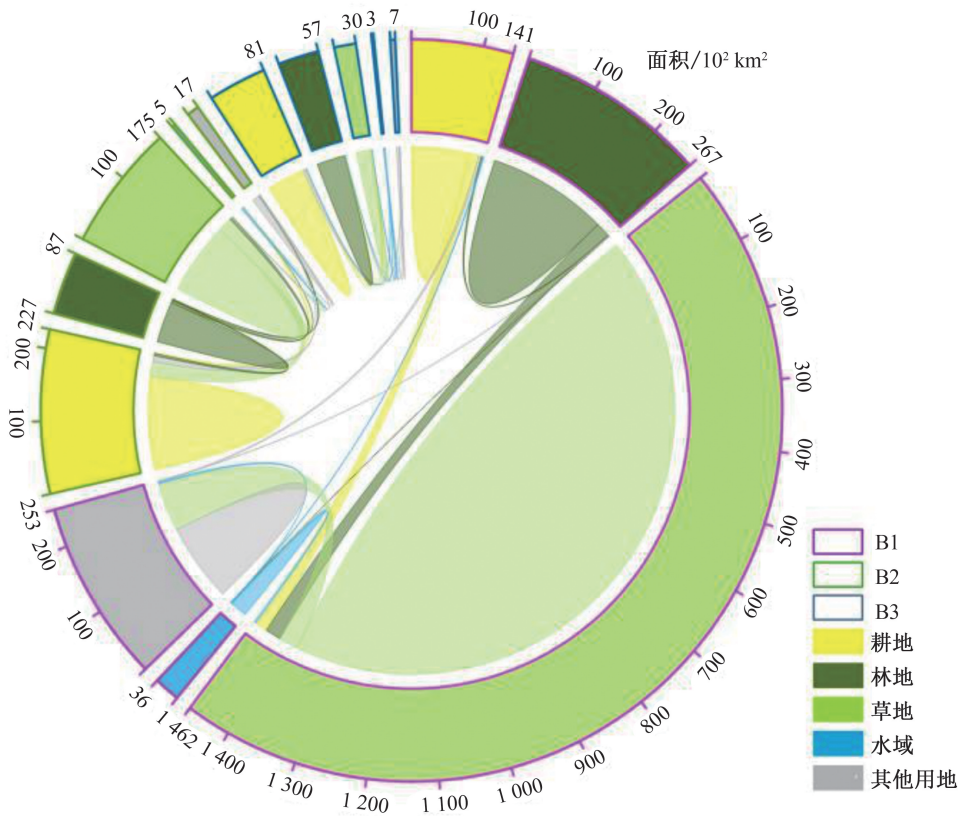


图 11 研究区 1980—2018 年土地利用转移情况

Fig. 11 Land use change in study area (1980–2018)

根据土地利用类型分布情况和平均单位面积水源涵养量分布可得出不同土地利用类型的水源涵养量如图 12 所示。由图 12 可知,区域平均单位面积水源涵养量排序为林地的最大,耕地和水域的次之,其他用地和草地的最小。根据不同地类水源涵养量的分类情况,设置 7 种情景模拟土地利用变化下水源涵养量的变化。

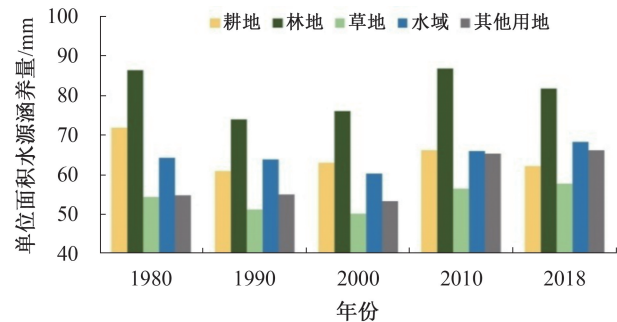


图 12 不同土地利用类型的水源涵养量

Fig. 12 Water conservation capacity by land use type

2.2.2 水源涵养量敏感性分析

采用情景模拟方法,结合 WEPL 模型对不同土地利用情景下的水循环要素进行模拟,分析水源涵养量对不同土地利用类型的敏感程度。设置的 7 种情景及情景模拟结果见表 3,其中 S1 情景表示将研究区林地面积的 50%转变为耕地,以此类推。此方法能够排除气象因子对模型输出结果的影响。

由表 3 可知:S1 情景下,研究区水源涵养量从 184.32 亿 m³ 降至 180.58 亿 m³,其中 B1、B2、B3 区域均出现下降,表明相同面积下水源涵养量对林地的敏感程度高于耕地的。S2 情景下,研究区水源涵养量变为了 193.57 亿 m³,比原始情景的水源涵养量大,表明相同面积下水源涵养量对耕地的敏感程度低于水域的;B1 和 B2 区域均出现这个现象,而 B3 区域水源涵养量为 21.66 亿 m³,小于原始情景下的水源涵养量 24.80 亿 m³,表明 B3 区域水源涵养量对耕地的敏感程度高于水域的。类似地,S3 情景表明相同面积下水源涵养量对水域的敏感程

度高于草地的,S4 情景表明相同面积下水源涵养量对草地的敏感程度高于其他用地的。S7 情景能够得出其他用地相对于裸地(无水源涵养功能)的敏感程度。

表 3 情景模拟结果
Tab. 3 Scenario simulation results

情景	处理方法	面积变化率/%	多年平均水源涵养量/(亿 m ³)			
			总	B1	B2	B3
原始	—	—	184.32	125.56	33.96	24.80
S1	林地→耕地	50	180.58	122.95	33.08	24.55
S2	耕地→水域	50	193.57	134.73	37.18	21.66
S3	水域→草地	50	181.99	123.43	33.82	24.74
S4	草地→其他	50	168.70	112.15	31.86	24.69
S5	林地→水域	50	207.61	150.77	34.42	22.42
S6	耕地→草地	50	179.55	123.94	31.21	24.40
S7	其他→裸地	50	178.74	122.37	32.28	24.09

S5、S6 为 S2 的补充情景,用于探究研究区不同土地利用类型转换对水源涵养量的影响。S5 情景下,研究区水源涵养量从 184.32 亿 m³ 增长到 207.61 亿 m³,表明相同面积下水源涵养量对林地的敏感程度低于水域的,但 B3 区域水源涵养量从 24.80 亿 m³ 增长到 22.42 亿 m³,表明 B3 区域水源涵养量对林地的敏感程度高于水域的。S6 情景表明相同面积下水源涵养量对耕地的敏感程度高于草地的。

计算得出研究区水源涵养量对各土地利用类型的敏感系数,见表 4。由表 4 可知,研究区水源涵养量对林地的敏感系数最大,为 0.594,其次是耕地 0.341、水域 0.301、草地 0.232、其他用地 0.063。

表 4 敏感系数
Tab. 4 Sensitivity coefficients

区域	敏感系数 M_i				
	耕地	林地	草地	水域	其他
研究区	0.341	0.594	0.232	0.301	0.063
B1	0.292	0.334	0.266	0.735	0.053
B2	0.388	0.440	0.226	0.467	0.102
B3	0.326	0.346	0.068	0.073	0.059

3 讨论

本文基于具有水循环物理机制的分布式水文模型 WEP-L 和水源涵养量评价方法,建立了分时段的水源涵养量计算方程,对黄河水源涵养区的水源涵养量进行了评估。此该方法充分考虑了气候、植被、土壤、含水层及资源开发利用等要素对水源涵养量的影响,为分析植被对水源涵养量的敏感程度提供了基础。现有水源涵养量的评价方法包括降水贮存量法、林冠截留剩余量法、水量平衡法

等^[24],这些方法大都仅体现了水源涵养的某一功能,不能实现对多涵养功能的综合评价^[25]。水量平衡法结合 InVEST 模型可用于大尺度区域的水源涵养动态评价^[26],但 InVEST 模型的计算结果仅为年尺度地下径流和土壤蓄水量的总和,不能体现削洪和维持植被生态用水等涵养功能。如本文中黄河水源涵养区多年平均水源涵养量的计算结果为 184.32 亿 m³,折合单位面积水源涵养量为 61 mm。岁姚炳等^[27]和贾雨凡等^[28]采用 InVEST 模型得出的黄河水源涵养区多年平均水源涵养量为 113.01 亿 m³、伊洛河流域单位面积多年平均水源涵养量为 11.3 mm,均低于本文结果。此外,SWAT 模型在单一洪水过程的精细模拟方面存在欠缺^[29],对水源涵养区调洪功能的评价能力存在不足。WEP-L 模型侧重水分与能量交换过程,在模拟计算单元的蒸散发方面具有优势,能输出更加完备的水循环要素。本文水源涵养量计算数值的下降趋势与黄河实测径流量的变化趋势一致^[30],不同土地利用类型对水源涵养量的影响也与国内其他区域的研究结论相符^[31]。研究区水源涵养量对不同土地利用类型的敏感程度与太子河流域相关研究结果相近^[32],此结果可为生态系统模型中的水源涵养量计算提供参数参考^[33]。

水源涵养量对土地利用类型敏感程度方面,林地因其较强的滞水固沙能力成为水源涵养敏感程度最高的地类,扩大林地面积可以显著提高区域水源涵养能力。耕地和草地因冠层结构简单、枯落物少等,截留降水能力不足,且叶片蒸发量大,故敏感程度低于林地的。水域(湿地、湖泊)具有一定蓄水能力,也具有水源涵养功能。其他用地受人类活动影响,水源涵养能力较低。本文研究结果可为防

风固沙、生态修复工程的作物选取提供参考。

未来可进一步探讨水源涵养内涵,如水源涵养功能和能力的具体定义,水源涵养量能够作为哪些功能的指标。此外,在研究水源涵养量对土地利用敏感性的基础上,还可分析其对气候要素的敏感性,结合实际情况研究未来土地利用、气候要素的演变形式^[34],预测水源涵养量的演变趋势。

4 结论

通过对黄河水源涵养区水源涵养量的定量计算、变化趋势及其对不同土地利用类型的敏感性分析,得到如下结论:

1) 1960—2018年黄河水源涵养区多年平均水源涵养量为184.32亿 m^3 ,折合单位面积涵养量为61mm,空间上呈现东部高西部低的分布格局。其中,汛期、过渡期、枯水期的水源涵养量分别为114.37亿、37.82亿、32.13亿 m^3 ,占比分别为72.86%、20.83%、6.31%。

2) 研究区水源涵养量整体呈不显著增加趋势,梯度值为0.37亿 $\text{m}^3/\text{年}$,水源涵养量序列在1964年和2002年发生突变,且存在两个明显的周期,分别为56年和35年。

3) 研究区水源涵养量对土地利用类型的敏感系数依次为林地0.594、耕地0.341、水域0.301、草地0.232、其他用地0.063。

参 考 文 献

- [1] 高红凯,刘俊国,高光耀,等. 水源涵养功能概念的生态和水文视角辨析[J]. 地理学报, 2023, 78(1): 139–148. [GAO H K, LIU J G, GAO G Y, et al. Analysis of the concept of water conservation function from ecological and hydrological perspectives[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(1): 139–148.]
- [2] 马晓琳,郭莎莎,徐扬,等. 生态脆弱区生态安全格局构建研究[J]. 生态学报, 2023, 43(22): 9500–9513. [MA X L, GUO S S, XU Y, et al. Construction of ecological security pattern in ecologically fragile regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9500–9513.]
- [3] 罗君,张学斌,石培基. 兰州—西宁城市群国土空间演化特征及分区优化[J]. 中国沙漠, 2024, 44(3): 182–193. [LUO J, ZHANG X B, SHI P J. Evolution characteristics and zoning optimization of territorial space in Lanzhou–Xining urban agglomeration[J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 182–193.]
- [4] SI J H, LI J M, LU S J, et al. Effects of climate change on surface runoff and soil moisture in the source region of the Yellow River[J]. Water, 2023, 15(11): 2104.
- [5] 片冈顺,王丽. 水源林研究述评[J]. 水土保持科技情报, 1990(4): 44–46, 55. [PIAN G S, WANG L. A review of research on water conservation forests[J]. Soil and Water Conservation Science and Technology Information, 1990, 55(4): 44–46, 55.]
- [6] MCCULLOCH J S G, ROBINSON M. History of forest hydrology[J]. Journal of Hydrology, 1993, 150(2): 189–216.
- [7] 李威,吕思思,赵祖伦,等. 土地利用对流域水源涵养及水质净化的影响:以乌江流域为例[J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8375–8389. [LI W, LYU S S, ZHAO Z L, et al. Impacts of land use on water conservation and water purification in a river basin: a case study of the Wujiang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8375–8389.]
- [8] ZUO D P, CHEN G, WANG G Q, et al. Assessment of changes in water conservation capacity under land degradation neutrality effects in a typical watershed of Yellow River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 148: 110145.
- [9] 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. [YU X X, ZHOU T, LYU X Z, et al. Assessment of forest water conservation function in Beijing mountain area using InVEST model[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(10): 1–5.]
- [10] 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. [ZHANG J N, ZHANG J J, ZHANG H B, et al. Evaluation of water conservation capacity of typical forest stands in the loess region of western Shanxi Province of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(8): 105–114.]
- [11] WANG S, ZHANG B, WANG S, et al. Dynamic changes in water conservation in the Beijing–Tianjin sandstorm source control project area: a case study of Xilin Gol league in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 293: 126054.
- [12] 公丽,梁康,刘昌明. 黄河水源涵养区水碳变量的时空变化特征及其影响因素[J]. 地理科学进展, 2023, 42(9): 1677–1690. [GONG L, LIANG K, LIU C M. Spatiotemporal variation characteristics of water and carbon variables and their influencing factors in the water conservation area of the Yellow River Basin[J]. Progress in Geography, 2023, 42(9): 1677–1690.]
- [13] 曹灿,张永勇,刘玉,等. 黄河水源涵养区源头小流域径流情势变化的模式辨识[J]. 地理科学进展, 2023, 42(9): 1667–1676. [CAO C, ZHANG Y Y, LIU Y, et al. Pattern identification of runoff regime changes in headwater catchments of the Yellow River water conservation area[J]. Progress in Geography, 2023, 42(9): 1667–1676.]
- [14] 吴金雨,鞠琴,刘小妮,等. CMIP6模式对黄河水源涵养区降水和气温模拟能力的评估[J]. 水利水运工程学报, 2023(6): 1–12. [WU J Y, JU Q, LIU X N, et al. Evaluation of the simulation capability of CMIP6 models for precipitation and temperature over the water conservation area]

- of the Yellow River Basin[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(6):1-12.]
- [15] 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 G Q, ZHANG J Y. Research progress on runoff effects of environmental changes and research prospects for the water conservation area of the Yellow River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(2):1-8.]
- [16] 王国庆. 黄河流域水源涵养区界定[J]. *水文*, 2022, 42(2):65. [WANG G Q. Definition of water conservation area in the Yellow River Basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(2):65.]
- [17] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. *水利学报*, 2006(12):1496-1502. [WANG H, WANG J H, QIN D Y, et al. Theory and method of water resources assessment based on dualistic water cycle model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006(12):1496-1502.]
- [18] 王云飞, 叶爱中, 乔飞, 等. 水源涵养内涵及估算方法综述[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(6):1041-1071. [WANG Y F, YE A Z, QIAO F, et al. Connotation of water conservation and its estimation methods: a review[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(6):1041-1071.]
- [19] MORIASI D, GITAU M, PAI N, et al. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria[J]. *Transactions of the Asabe*, 2015, 58(6):1763-1785.
- [20] 杜军凯, 贾仰文, 李晓星, 等. 基于流域水循环视角的黄河水源涵养区水源涵养量评价方法[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(10):71-82. [DU J K, JIA Y W, LI X X, et al. Evaluation method of water conservation amount in the water conservation area of the Yellow River Basin from the perspective of watershed water cycle[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(10):71-82.]
- [21] 李志刚, 娄嘉慧, 史冲. 1960—2020年河南省极端降水时空演变特征[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(4):16-26. [LI Z G, LOU J H, SHI C. Spatiotemporal evolution characteristics of extreme precipitation in Henan Province from 1960 to 2020[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2024, 45(4):16-26.]
- [22] 孟莹, 刘俊国, 王子丰, 等. 气候变化和人类活动对中国陆地水储量变化的影响研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(4):47-57. [MENG Y, LIU G J, WANG Z F, et al. Impacts of climate change and human activities on terrestrial water storage changes in China[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2021, 42(4):47-57.]
- [23] 曹宇鹏, 方江平. 基于Fragstats的日喀则市土地利用景观格局分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2022, 45(9):69-72. [CAO Y P, FANG J P. Analysis of land use landscape pattern in Shigatse City based on fragstats[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2022, 45(9):69-72.]
- [24] 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 B, LI W H, XIE G D, et al. Water conservation function of forest ecosystem and its measurement methods[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(3):529-534.]
- [25] 王东东, 贾仰文, 牛存稳, 等. 基于WEP-L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(10):1-11. [WANG D D, JIA Y W, NIU C W, et al. Assessment methods for different functions of water conservation based on the WEP-L model: a case study of the Wei River water conservation area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024(10):1-11.]
- [26] WANG Y F, YE A Z, PENG D Z, et al. Spatiotemporal variations in water conservation function of the Tibetan Plateau under climate change based on InVEST model[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 41:101064.
- [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, 18. [SUI Y B, NIU C W, JIA Y W, et al. Evolution of precipitation, temperature, and runoff over the past 60 years in the water conservation area of the Yellow River Basin and its impact on water conservation[J]. *Mountain Research*, 2023, 41(1):41-55, 18.]
- [28] 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 Y F, WANG G Q. Assessment of water conservation capacity in the Yiluo River Basin based on the InVEST model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3):101-108.]
- [29] 刘欢. 考虑产流机制空间差异的全国尺度分布式水文模型构建及应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019. [LIU H. Development and application of a national-scale distributed hydrological model considering spatial differences in runoff generation mechanisms[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.]
- [30] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018年中国江河径流演变及其变化特征[J]. *水科学进展*, 2020, 31(2):153-161. [ZHANG J Y, WANG G Q, JIN J L, et al. Evolution and variation characteristics of river runoff in China during 1956-2018[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(2):153-161.]
- [31] 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 S H, XIAO Y, ZHENG H, et al. Spatial characteristics of water conservation function and the influencing factors in ecosystems of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7):2455-2462.]

- [32] 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, 159. [LYU Y T, QIAO H, ZHENG D F, et al. Spatiotemporal evolution of landscape pattern and its impact on water conservation in the Taizi River Basin[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 111–120, 159.]
- [33] 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, 84. [GU J Y, LI Y P, DU W. Evaluation of water conservation capacity and analysis of its variation characteristics in Taihu Lake Basin based on InVEST model[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 62–67, 84.]
- [34] 梁康,公丽,宋小青,等. 黄河水源涵养区土地利用变化的区域分异特征及未来格局[J]. 水科学进展, 2024, 35(2): 325–337. [LIANG K, GONG L, SONG X Q, et al. Regional differentiation characteristics and future pattern of land use change in the water conservation area of the Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(2): 325–337.]

Sensitivity Analysis of Water Conservation Amount to Land Use Changes in Yellow River Water Source Conservation Area

MAO Hairui^{1,2}, DU Junkai², XIE Min², ZHANG Shouping¹, QIU Yaqin²,
TAN Xinyan², HAO Chunfeng², SHI Hongyuan²

(1. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] Revealing the spatiotemporal distribution patterns of water conservation amount in the Yellow River water source conservation area and exploring its sensitivity to land use changes aim to provide references for water resource management, land use planning, and ecological restoration in the Yellow River Basin. [Methods] This study, from the perspective of land use type change, employed the WEP-L model and a calculation method based on the watershed water cycle perspective to estimate the water conservation amount in the Yellow River water source conservation area and investigated its sensitivity to different land use types. [Results] (1) The multi-year average water conservation amount was 18.432 billion m³, equivalent to 61 mm per unit area, of which 11.437 billion m³ during the flood period, 3.782 billion m³ during the transitional period, and 3.213 billion m³ during the dry period. (2) The distribution showed higher values in the east and lower in the west. The water conservation capacity showed a slight increasing trend of 0.037 billion m³ per year, with abrupt changes in 1964 and 2002. The sequence displayed two significant cycles of 56 years and 35 years. (3) The sensitivity coefficients were 0.594 for forest, 0.341 for cropland, 0.301 for water bodies, 0.232 for grassland, and 0.063 for other areas. [Conclusion] The WEP-L model and the water conservation calculation method based on the watershed water cycle perspective can be effectively applied to assess the water conservation function in the Yellow River source area. The water conservation function in the study area is significantly influenced by land use changes, with forested land being the key category regulating regional water conservation capacity.

Keywords: Yellow River water source conservation area; WEP-L model; water conservation amount; land use change; sensitivity analysis

(编辑:马伟希)