

王舒雪, 汪潇, 张智超, 等. 沙颍河流域河南段产水量时空分布格局及未来多情景模拟[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(11): 47-56. Wang Shuxue, Wang Xiao, Zhang Zhichao, et al. Spatiotemporal distribution pattern of water yield in the Henan section of Shaying River Basin and future multi-scenario simulation[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(11): 47-56.

沙颍河流域河南段产水量时空分布格局及未来多情景模拟

王舒雪^{1,2}, 汪潇^{1,2}, 张智超^{1,2}, 文倩^{1,2*}

(1. 河南农业大学资源与环境学院, 河南 郑州 450002;

2. 河南农业大学土地与乡村可持续发展研究中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 文章选取沙颍河流域河南段为研究区, 采用InVEST模型对1990–2020年产水服务功能进行评估, 并结合PLUS模型预测了2030年和2050年3种情景下土地利用变化特征及其产水服务未来演变趋势。研究结果表明: (1) 1990–2020年, 沙颍河流域河南段产水深度呈先增加后减少的趋势; 垂直方向上, 产水能力随着海拔的增加先降低后增加; 空间上, 产水能力呈东高西低的分布特征。(2) 土地利用类型的产水能力由强到弱依次为未利用地、建设用地、耕地、草地、林地、水域, 其中耕地和建设用地是研究区产水服务的主要地类, 占总产水量的77%和18%。(3) 3种情景下, 到2050年研究区产水总量由高到低依次为: 城镇发展情景、自然发展情景、耕地保护情景。该研究可为区域制定土地利用政策、水资源管理措施和国土空间治理方案提供支持。

关键词: 产水量; InVEST模型; 土地利用变化; PLUS模型; 沙颍河流域河南段

中图分类号: X321 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.1143.24.338 **文章编号:** 1003-6504(2024)11-0047-10

Spatiotemporal Distribution Pattern of Water Yield in the Henan Section of Shaying River Basin and Future Multi-scenario Simulation

WANG Shuxue^{1,2}, WANG Xiao^{1,2}, ZHANG Zhichao^{1,2}, WEN Qian^{1,2*}

(1. College of Resource and Environmental Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Center for Land and Rural Sustainable Development Research, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Henan section of Shaying River Basin was selected as the study area, and used the InVEST model to assess the function of water yield services from 1990 to 2020, and combined with the PLUS model to predict the evolutionary characteristics of land use/cover and the trend of future changes in water production services under the three scenarios in 2030 and 2050, and the results of the study show that from 1990 to 2020, the depth of water production showed a tendency of increasing and decreasing, and the average water production depth of the section increased and decreased. The water yield depth showed a trend of increasing and then decreasing, showing a spatial distribution characteristic of high in the east and low in the west. The water yielding capacity of land use types, from strong to weak, is unused land, construction land, arable land, grassland, forest land, and watershed, and cultivated land and construction land were the main types of water production services in the study area, accounting for 77% and 18% of the total water yield. Under the three scenarios, the total amount of water production in the study area by 2050 is in descending order: urban development scenario, business-as-usual, and cropland protection scenario. This study can provide support for the regional development of land use policies, water resource management measures, and territorial spatial governance programmes.

Key words: water yield; InVEST model; land use change; PLUS model; Henan section of Shaying River Basin

产水是生态系统最重要的供给服务, 不仅影响生物量、碳循环以及泥沙输出等多种生态功能, 而且对维持人类生产生活 and 促进区域可持续发展至关重要。

要^[1-3]。土地利用是生态系统产水服务变化的主要驱动因素之一^[4], 通过改变流域的水循环、蒸发与渗透过程、土壤的水分保持模式, 对自然环境、生态过程、食

物供应、产水可持续性 & 水土保持等造成深远影响^[5]。探索产水量对未来土地利用变化的响应已成为当代地理学与生态研究的热点议题,对协调区域经济增长与生态保护,实施以可持续发展为目标的土地利用规划具有重要意义^[6]。

水文模型的快速发展推动了生态系统产水服务的定量化、可视化研究。目前,常用的产水模型主要有 InVEST 模型^[7]、SWAT 模型^[8]和 ARIES 模型^[9]等。其中,InVEST 模型因其参数设置简单,所需数据相对较少的优点而得到了广泛的使用。研究内容涵盖不同区域产水量的时空格局演变^[10],土地利用^[11]、气候变化^[1]、城镇化对产水服务的影响^[12]、产水量与产水深度驱动因素的识别与分析^[13,14]等方面。但目前研究多集中于对区域现状产水能力的评估,而对未来产水服务的模拟预测相对缺乏。PLUS 模型因其能有效探究土地利用变化的驱动因素以及快速处理数据的优势,从而实现了对未来土地类型的高精度模拟^[15],将 PLUS 模型和 InVEST 模型相结合有助于科学预测未来土地利用变化及生态系统产水服务的响应,对水资源的合理利用与保护、生态系统可持续发展具有重要意义。

沙颍河流域河南段位于河南省中东部,区域内土地利用强度大、人地矛盾突出,水资源供给与需求之间的矛盾日益突显,同时洪涝、干旱等自然灾害的风险也在加剧,可持续发展面临威胁^[16]。因此,本文以沙颍河流域河南段为研究区,基于中国年度土地覆盖数据集(CLCD),采用 InVEST 模型和 PLUS 模型,系

统模拟与分析了 1990–2050 年土地利用变化及产水量响应。研究旨在揭示沙颍河流域河南段产水量的时空演变特征和未来发展趋势,为提高该地区生态系统产水量、促进水资源的合理开发与利用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

沙颍河是淮河最大的支流,发源于河南鲁山县伏牛山东麓,流域总面积 39 075.3 km²,其中 88.21% 位于河南省。沙颍河流域河南段地理位置为 112°14′~115°39′E、33°03′~34°58′N,主要包括沙河、颍河、贾鲁河 3 条河流。参考已有研究成果并考虑行政区划的完整性,本文将沙颍河流域河南段界定为郑州、平顶山、许昌、漯河、周口 5 个地级市,总面积 35 049.21 km²。地势西高东低、海拔范围 31~2 137 m,西部多山地丘陵、东部为平原;属暖温带半湿润季风气候,平均气温 14~15 °C,降水量约 750 mm;主要土壤类型为褐土和砂姜黑土。土地利用类型以耕地、建设用地为主,分别占研究区总面积的 72.09%、20.15%。2023 年区域人口总计 3 335 万人、GDP 总量为 24 672.6 亿元、粮食总产量为 1 741.74 万 t,分别占河南省的 33.99%、41.72% 和 26.29%,是河南省重要的粮食主产区和经济发展中心(图 1)。因此,以沙颍河流域河南段为研究区开展产水量及预测研究可为维护国家粮食安全和区域高质量发展提供支撑。

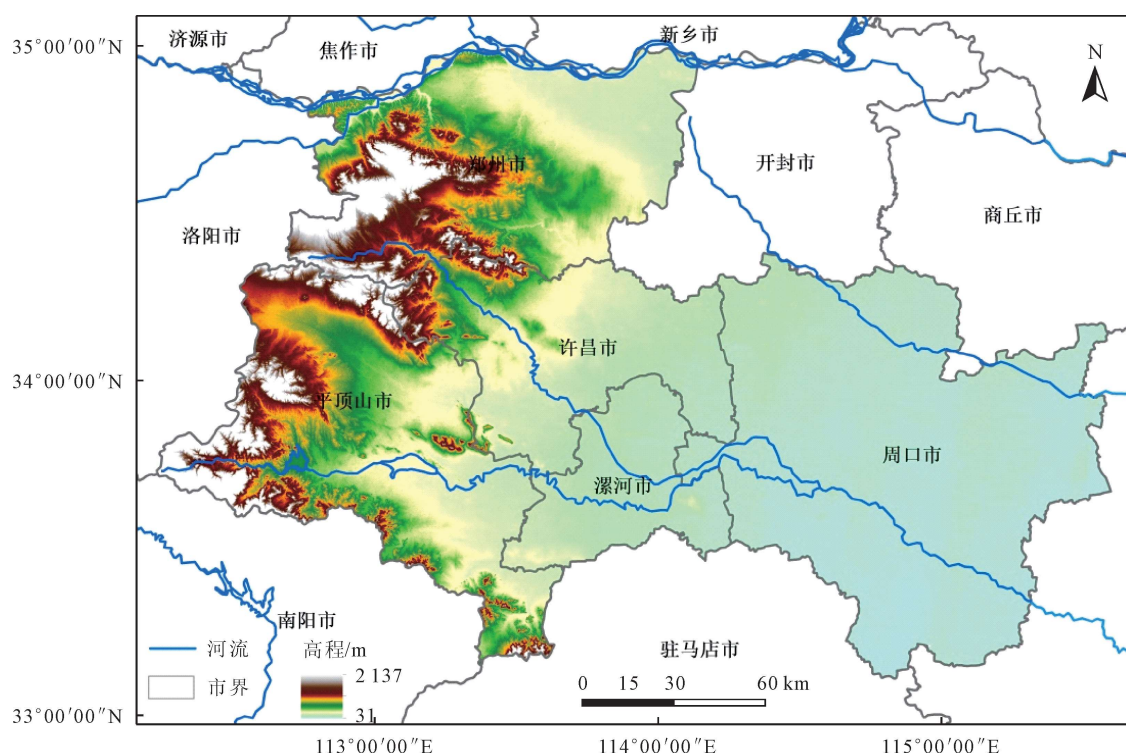


图1 研究区概况
Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源与处理

考虑到土地利用变化的时间累计效应,本文以 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年为研究截面,揭示沙颍河流域河南段 1990–2020 年产水量的时空分异。本研究采用的数据包括土地利用数据、气象数据、土壤数据、DEM 数据以及社会经济数据等。土地利用数据来源于武汉大学中国年度土地覆盖数据集 (CLCD)(<http://doi.org/10.5281/zenodo.5210928>),将其划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种类型。年均降水量数据来源于中科院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn),年蒸散发数据来源于国家地球系统科学数据中心(www.geodata.cn)。土壤数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(data.casnw.net/portal/),土壤有效含水量 (PAWC) 基于周文佐^[17]定义的非线性拟合土壤 PAWC 估算模型进行计算。DEM 数据来源于地理空间数据云平台(www.gsccloud.cn/),同时采用 ArcGIS 空间分析生成坡度和坡向数据。社会经济数据中的人口密度和地区生产总值来源于国家地球系统科学数据中心(www.geodata.cn/),原始路网数据来源于 OSM(openstreetmap)(www.openstreetmap.org/),利用 ArcGIS 欧式距离工具分别计算生成到铁路、主干道、一级道路、二级道路、三级道路、河流、政府的距离栅格数据。以上数据经过 ArcGIS 10.2 预处理,根据研究区范围裁剪并定义投影,得到研究区 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 4 个时段的数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 产水量评估

本文采用 InVEST 模型中的产水子模块模拟产水量空间分布。该模块以水量平衡原理为基础,在栅格尺度上通过降水量减去蒸散量得到栅格水平的产水量值,该值包括地表产流、土壤含水量、枯落物持水量及冠层截留量^[18]。模型主要算法如下:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) P_x \quad (1)$$

式中, Y_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格单元 x 的年产水量, AET_{xj} 为土地利用类型 j 在栅格 x 上的年实际蒸散发量, P_x 为栅格单元 x 的年降水量。其中, AET_{xj}/P_x 依据 Zhang 等在 Budyko 曲线基础上发展而来,计算公式为:

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + w_x R_{xj}}{1 + w_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (2)$$

$$w_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} \quad (3)$$

$$R_{xj} = \frac{k_{xj} ET_{0x}}{P_x} \quad (4)$$

$$AWC_x = \min(D_s, D_r) \times PAWC_x \quad (5)$$

式中, R_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格单元 x 的 Budyko 干燥指数, 定义为潜在蒸散发与降水量的比值, w_x 为自然气候条件下表示土壤性质的一个无量纲非物理参数, AWC_x 为栅格 x 的植被有效含水量, Z 为 Zhang 系数, 用于表征降水的季节性特征, k_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的植被蒸散系数, ET_{0x} 表示栅格 x 的参考蒸散量; D_s 为土壤深度, D_r 为根系深度, $PAWC_x$ 为栅格单元 x 的植被可利用水分。

1.3.2 PLUS 模型

PLUS 模型是基于 FLUS 模型的改进型元胞自动机 (CA) 模型。该模型从斑块层面出发, 能够同时考虑政策驱动和引导作用, 以实现土地利用类型的精细预测^[15]。首先对两期土地利用数据的格式进行转换, 接着在 LEAS 模块中提取初期土地利用覆被向末期土地利用覆被的扩张部分。考虑了自然、社会经济和可达性等方面的因素, 本研究共选取 12 个空间驱动因子, 包括高程、坡度、坡向、国内生产总值、人口密度、距铁路距离、距一级道路距离、距二级道路距离、距三级道路距离、距主干道距离、距河流距离、距政府距离。通过输入各项驱动因子, 采用随机森林算法对各类用地的发展概率及贡献程度进行计算并输出, 同时将水域作为限制因子, 在 CARS 模块中对未来土地格局进行模拟。

由于 2030 年、2050 年是全球和国家多项可持续发展规划与战略目标实现的关键年份, 因此本研究以 2020 年为初始时间, 设定 3 种情景来模拟研究区 2030 年和 2050 年的土地利用情况。

(1) 自然发展情景 (BAU)。该情景下, 保持 2010–2020 年的发展变化规律不变, 研究区各类土地利用变化受自然条件和经济因素影响, 不受政策等因素影响。

(2) 耕地保护情景 (CPS)。该情景下, 根据《河南省国土空间总体规划》, 严格落实耕地保护, 在自然发展情景的基础上, 对土地转移概率矩阵进行修正, 控制耕地向建设用地转移概率减少 60%。

(3) 城镇发展情景 (UDS)。该情景下, 根据《河南省国土空间总体规划》, 河南省当前及今后将成为中部地区高质量发展引领区, 设置林地、草地、耕地向建设用地转移概率增加 20%, 建设用地向林地、草地、未利用地的转移概率减少 30%, 向耕地的转移减少 10%。

1.3.3 模型验证

本研究以 2000 年作为初始年份, 以 2010 年作为末期年份, 对研究区 2020 年的土地利用变化情况进行模拟预测, 并将模拟结果与 2020 年实际情况进行精度验证 (图 2)。模型计算输出的 Kappa 系数为 0.838, 整体

精度达到0.916,表明模拟精度较高,模拟结果可信。

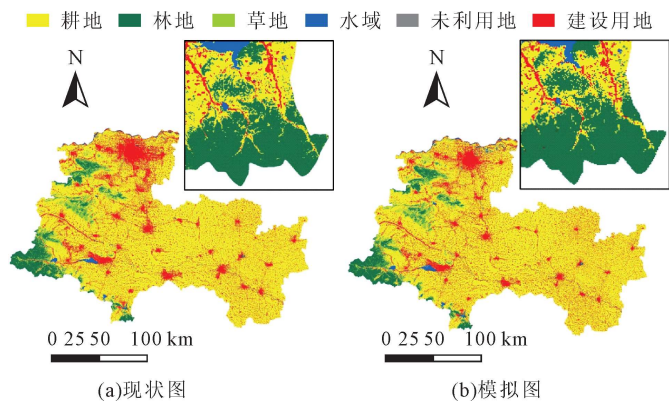


图2 研究区2020年土地利用现状图与模拟图
Fig.2 Land use status map and simulation map of the study area in 2020

2 结果与分析

2.1 沙颍河流域河南段产水量的时间变化特征

1990–2020年沙颍河流域河南段平均产水深度变化范围为205.19~260.94 mm,产水总量为 $73.81 \times 10^8 \sim 91.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图3)。近30年来,研究区产水总量呈先增加后减少再增加的波动变化,总体呈减少趋势;2000年产水量最高($91.06 \times 10^8 \text{ m}^3$),2010年产水量最低($73.81 \times 10^8 \text{ m}^3$),二者相差23.37%。1990–2020年,产水深度先增大后减小,2000年平均产水深度最大(260.94 mm),比1990年增加了35.29 mm;2020年平均产水深度最小(205.19 mm),比2000年减少了55.75 mm,降幅为21.37%。

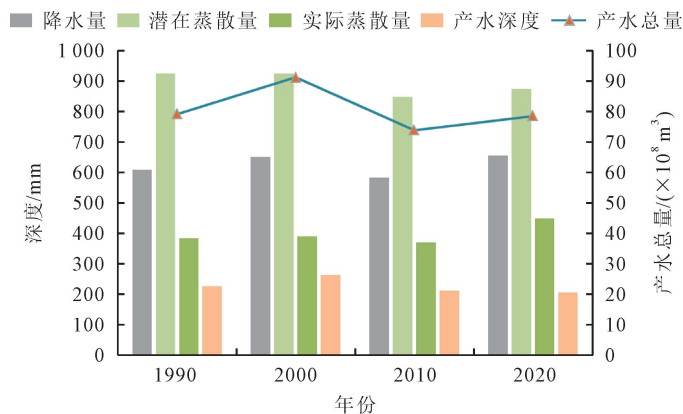


图3 1990-2020年研究区平均产水深度、降水量及蒸散量
Fig.3 The average water yield depth, precipitation and evapotranspiration in the study area from 1990 to 2020

从空间格局年际变化来看,1990–2000年沙颍河流域河南段平均产水深度整体以增加为主,增加面积占研究区总面积的87.33%,81.74%的区域产水增长深度在100 mm以下(图4(a))。研究区产水增加幅度东南高、东北低,由北向南递增、呈条带状变化,其中东南部增加幅度超过100 mm,是区域产水增加最多的地区;产水量减少区域主要位于研究区东北部,约占研究区总面积的12.39%。2000–2010年,产水深度明显降低、产水量减小。产水量呈减少趋势的区域约占研究区总面积的78.49%,其中21.88%的区域减少深度在100~200 mm(图4(b))。产水减少地区主要分布在研究区东部的周口市,中部的漯河、许昌及平顶山东南部,产水减少幅度由西北向东南递增,东部地区减少深度大于100 mm;产水深度增加区域位于研究

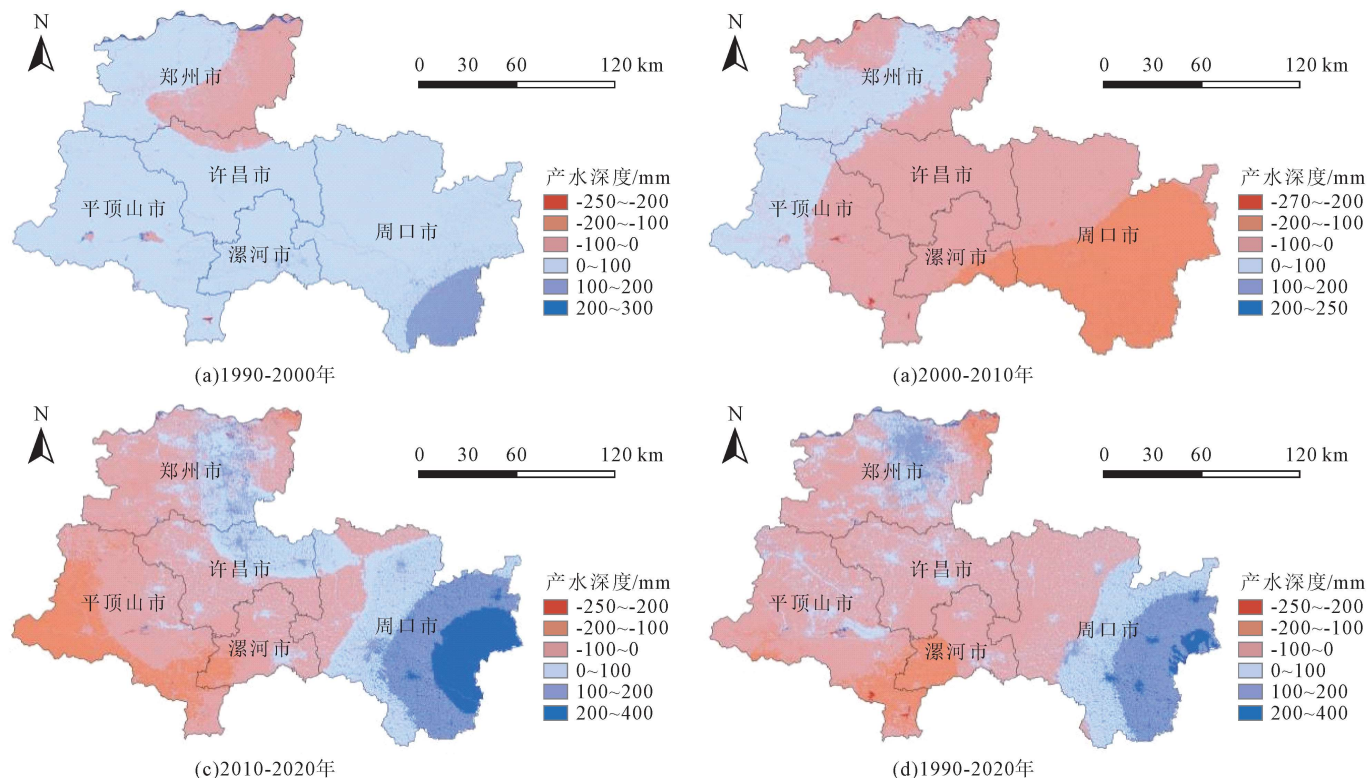


图4 1990-2020年沙颍河流域河南段产水年际变化空间格局

Fig.4 Spatial pattern of interannual variation of water production in the Henan section of Shaying River Basin from 1990 to 2020

区西部,且增加幅度多低于 100 mm。2010–2020 年,产水量总体仍以减少趋势为主(图 4(c))。产水深度减小区域占总面积的 56.01%,9.92% 的区域减少幅度高于 100 mm。减小区域主要位于研究区中部及西部,减幅由东向西递增;增加区域集中分布在研究区东部和北部,约占总面积的 43.99%,增幅 0~400 mm。总体上,1990–2020 年研究区 64.36% 的区域产水深度呈现减小趋势,35.64% 的区域产水量呈增加趋势,其变化幅度由东南向西北递减(图 4(d))。

2.2 沙颍河流域河南段产水量的空间分布格局

沙颍河流域河南段产水深度在 1990–2020 年期间呈现出相似的空间分布格局,总体表现为东高西低(图 5)。2020 年,产水高值区主要集中于研究区东部的周口市,次高值区分布于高值区外围以及郑州市北部,中值区则主要分布在周口西部、许昌东北部、郑州西部及平顶山西北部;区域产水低值区主要分布在研究区西部的平顶山市、中部的许昌市以及郑州西北部,次低值区多分布在中值区外围地带,如周口西部与北部、许昌东北部与西北部、郑州西南部。

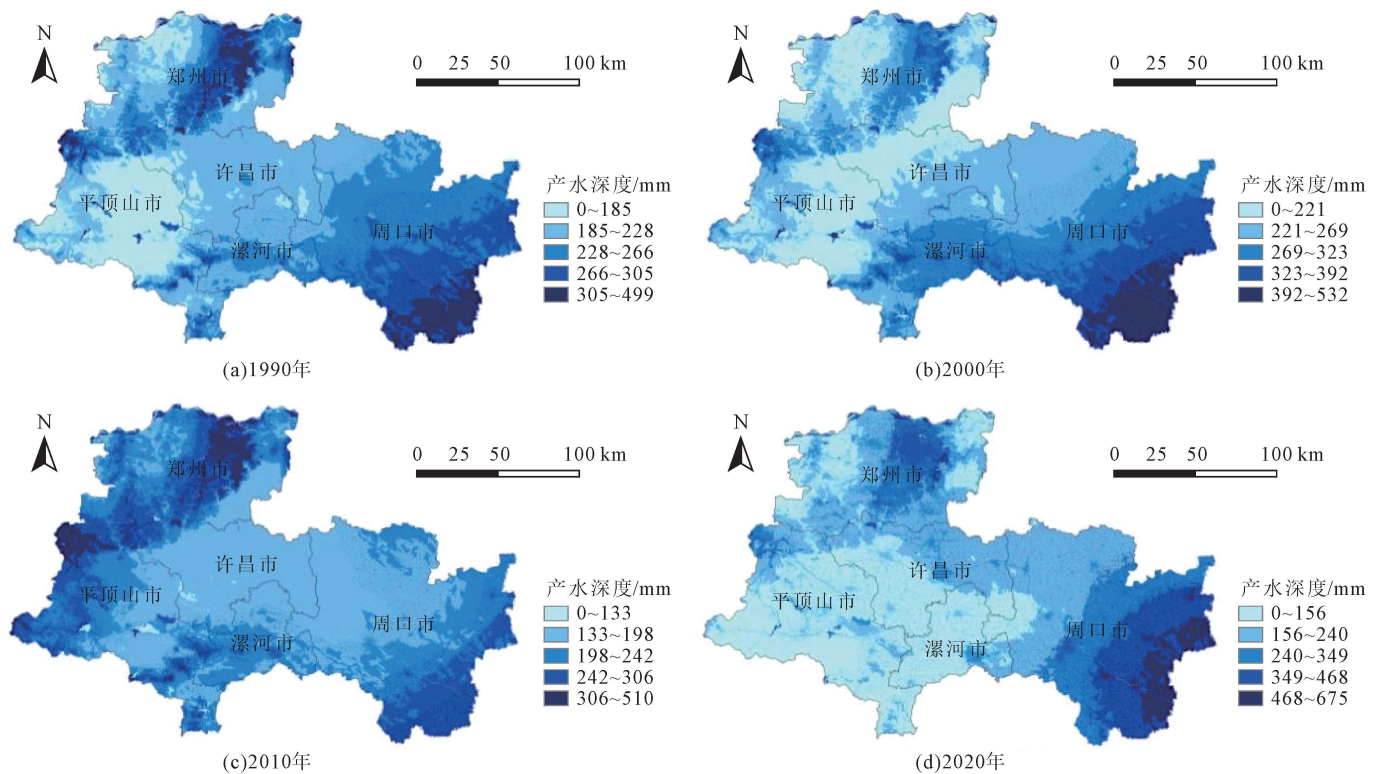


图5 1990–2020年沙颍河流域河南段产水量空间分布格局
Fig.5 Spatial distribution pattern of water yield in the Henan section of Shaying River Basin from 1990 to 2020

在垂直方向上,按照 100 m 海拔的间隔对沙颍河流域河南段平均产水能力进行统计以表示其在垂直梯度上的变化,由图 6 可见,随着海拔的增加产水能力先降低后增加,但整体呈下降趋势。产水深度在海拔 200 m 以下区域保持高水平,此区域的土地利用类型以耕地和建设用地面积为主;在海拔 200~1 400 m 内,随着海拔的增加,耕地下降明显、建设用地逐渐消失,林地、草地面积逐渐扩大,平均蒸散量显著增加,进而导致产水量减少,并在海拔 1 300 m 处产水深度达到最低值;随后在海拔 1 300 m 以上,林地比例继续增加,草地和耕地的面积几乎消失,平均产水深度随海拔增加呈升高趋势。

2.3 不同土地利用类型产水量

利用 ArcGIS 对各土地利用类型的产水能力进行统计(图 7)。

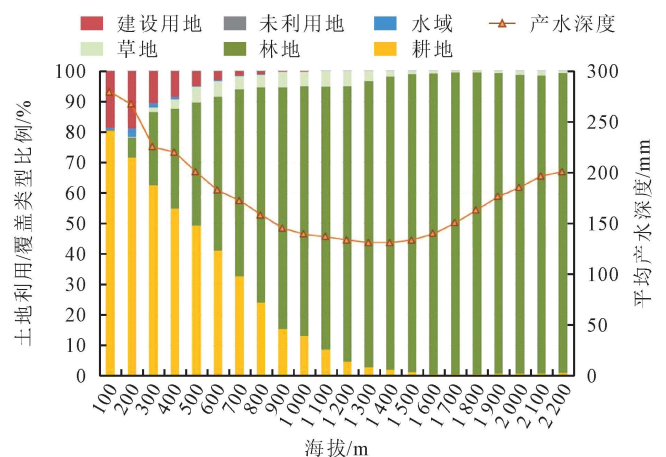


图6 沙颍河流域河南段土地利用及产水量的垂直梯度变化
Fig.6 Vertical gradient changes of land use and water yield in the southern section of Shaying River Basin

不同土地利用类型产水总量差异较大,与单位面积平均产水能力及分布面积有关。耕地和建设用地是沙颍河流域河南段的主要土地利用类型,分别占总

面积的 72.09%、20.15%，同时单位面积产水量较高，因此是研究区产水的主要贡献者，分别占产水总量的 77%和 18%，未利用地、草地、林地、水域面积较少，产水总量仅占 5%。

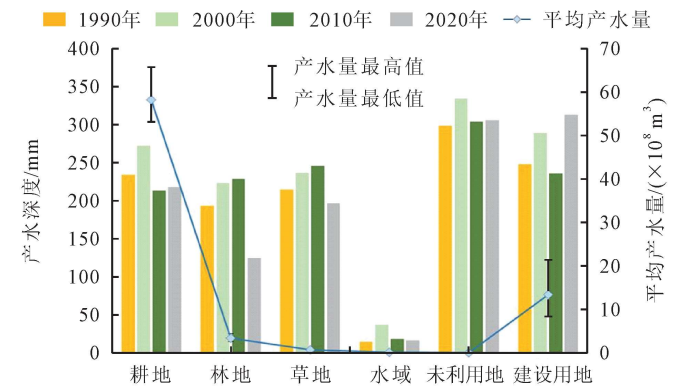


图7 1990-2020年不同土地利用类型的产水深度变化及产水总量
Fig.7 Changes in water yield depth and total water yield of different land use types from 1990 to 2020

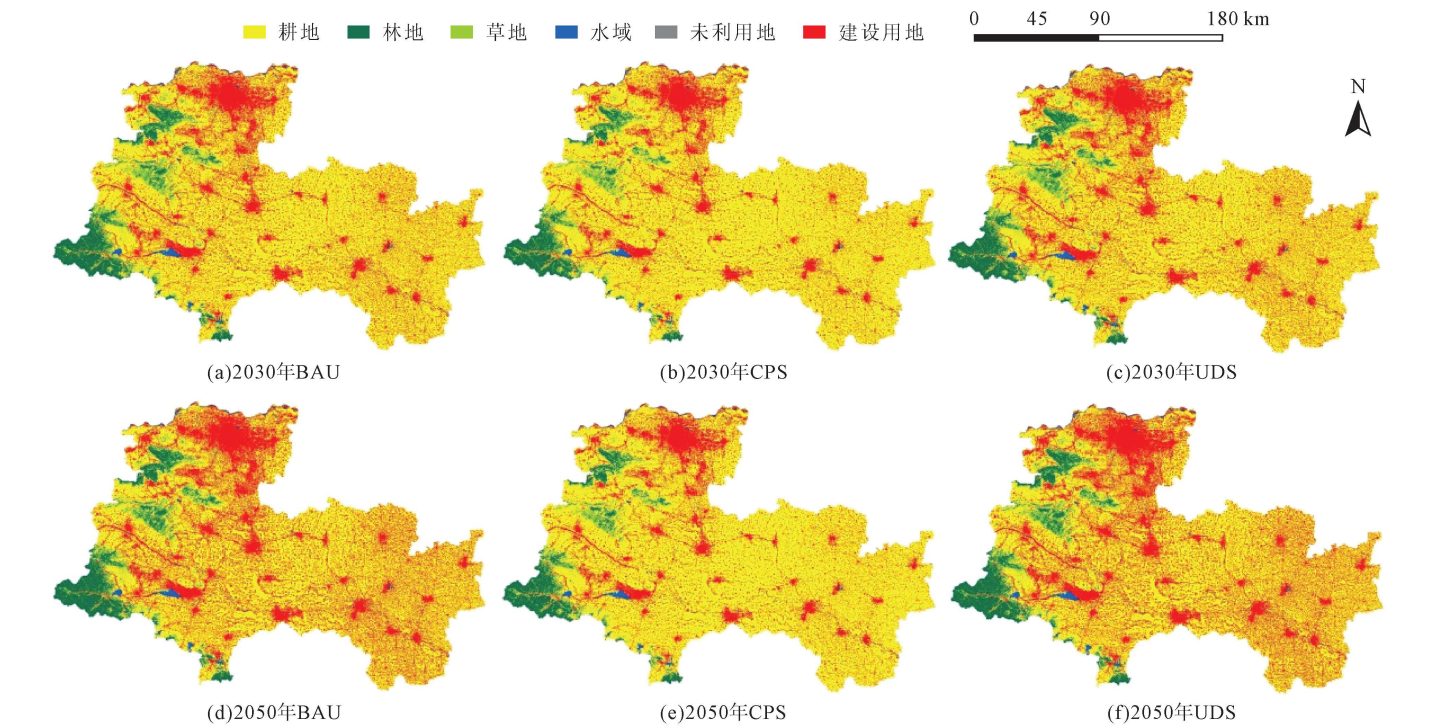
研究区 1990–2020 年不同土地利用类型产水深度变化与产水总量变化趋势相似，除林地和草地

外，多表现为 1990–2000 年大幅增加、2000–2010 年急剧减少，2010–2020 年增加的趋势。各土地利用类型的产水量在 2000 年和 1990 年都普遍较高，在 2010 年和 2020 年则多处于相对偏低态势。1990–2020 年间不同土地利用类型产水能力由强到弱依次是未利用地 (310.37 mm)、建设用地 (271.32 mm)、耕地 (234.07 mm)、草地 (223.07 mm)、林地 (192.08 mm) 和水域 (21.36 mm)，与土地类型的蒸散能力、土壤含水量、枯枝落叶持水量以及冠层截留量差异有关^[9]。

2.4 土地利用变化模拟及产水量响应

2.4.1 土地利用变化情景模拟

利用 PLUS 模型得到沙颍河流域河南段 2030 年、2050 年在自然发展情景、耕地保护情景、城镇发展情景 3 种情景下土地利用空间分布 (图 8)。与 2020 年相比，3 种情景下沙颍河流域河南段用地结构呈现不同程度的变化趋势，但建设用地扩张明显 (表 1)。



注：BAU.自然发展情景；CPS.耕地保护情景；UDS.城镇发展情景。下同。

图8 2030-2050年土地利用/覆被假设情景
Fig.8 Land use/cover scenarios from 2030 to 2050

表 1 2020 年至 2030、2050 年不同情景下地类的面积变化							
Table 1 Area changes of land types under different scenarios from 2020 to 2030 and 2050							(km ²)
年份	情景	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
2020		25 300.56	2 092.61	321.36	303.75	0.44	7 068.93
2030	自然发展情景	-1 206.61	60.34	-32.47	6.03	-0.07	1 172.78
	耕地保护情景	251.97	-265.38	-51.95	-32.55	-0.08	98.02
	城镇发展情景	-1 465.86	58.34	-33.61	0.88	-0.03	1 440.28
2050	自然发展情景	-3 464.73	188.22	-95.32	19.07	-0.08	3 352.84
	耕地保护情景	305.09	-259.07	-120.25	-36.08	-0.11	110.42
	城镇发展情景	-3 695.77	184.85	-101.82	15.28	-0.07	3 597.53

2030年自然发展情景下耕地、草地、未利用地面积为分别减少了1 206.61、32.47、0.07 km²,减幅分别为4.77%、10.10%、15.91%,建设用地、林地、水域面积分别增加1 172.78、60.34、6.03 km²,增幅分别为16.59%、2.88%、1.99%。耕地保护情景下,林地、草地、水域分别减少了265.38、51.95、32.55 km²,减幅分别为12.68%、16.16%、10.72%;相比自然发展情景,耕地面积增加了251.97 km²、增加率为6.05%,耕地得到有效保护;建设用地面积增加速度大幅减缓,增加了98.02 km²,未利用地变化与自然发展情景类似。与其他情景相比,城镇发展情景下,建设用地增加、耕地减少的趋势更为显著,建设用地面积增加1 440.28 km²,增幅为20.38%,耕地面积减少1 465.86 km²,减幅为5.79%。

2050年自然发展情景下耕地、草地、未利用地面积为分别减少了3 464.73、95.32、0.08 km²,减幅分别

为13.69%、29.66%、18.18%,建设用地、林地、水域面积分别增加3 352.84、188.22、19.07 km²,增幅分别为47.43%、8.99%、6.28%。耕地保护情景下,林地、草地、水域分别减少了259.07、120.25、36.08 km²,减幅分别为12.38%、37.42%、11.88%;耕地面积增加305.09 km²、增加率为1.21%,建设用地面积增加速度减缓,增幅为1.56%。与其他情景相比,城镇发展情景下,建设用地扩张最快,2050年较2020年增长了50.89%;耕地面积减少趋势更为显著,耕地面积减少3 695.77 km²,减幅为14.61%。

2.4.2 产水量变化响应模拟

基于图9模拟结果可知,未来沙颍河流域河南段产水空间分布格局将与现状保持一致,高值区主要分布在东部平原的周口市东部,低值区分布在西部山区的平顶山市、中部的漯河市和许昌市。

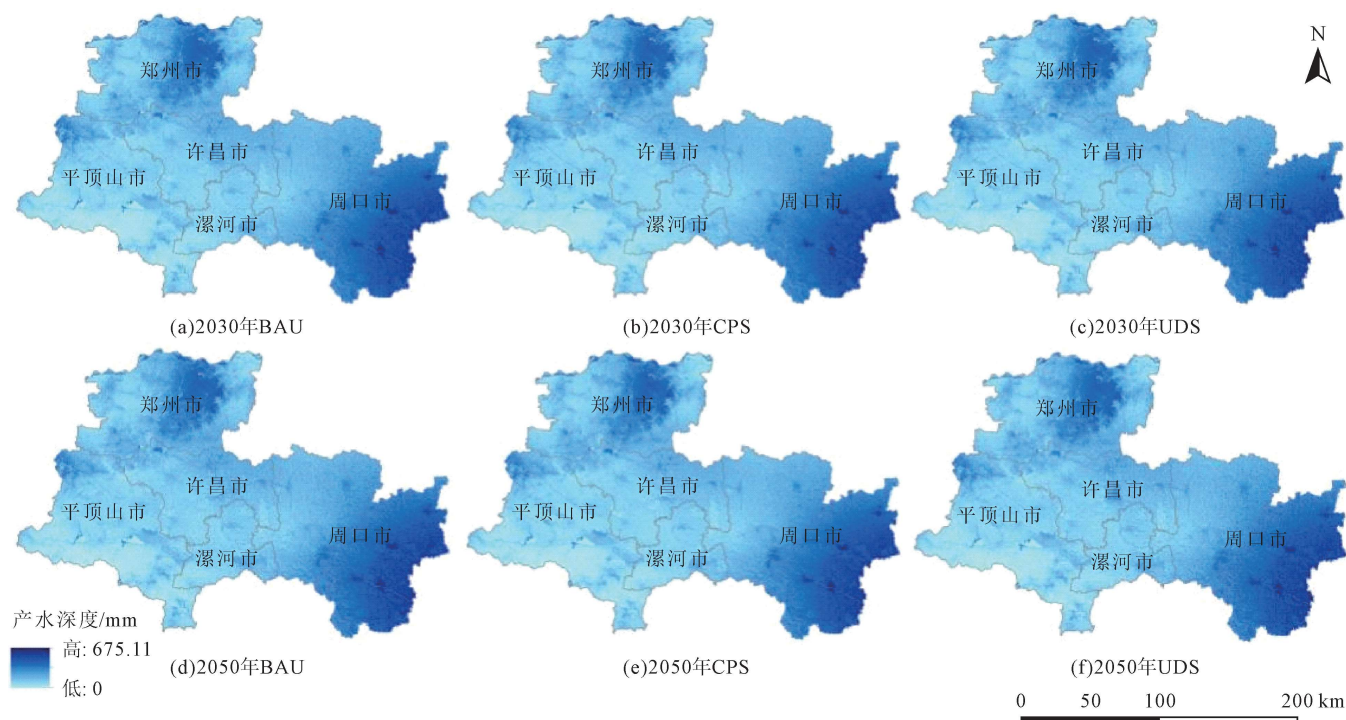


图9 2030年、2050年沙颍河流域河南段产水量空间分布
Fig.9 Spatial distribution of water yield in the Henan section of Shaying River Basin in 2030 and 2050

如表2、表3所示,自然发展情景下,2030年沙颍河流域河南段产水深度预测值为208.12 mm、产水量预测值为 79.52×10^8 m³,分别比2020年增加了2.92 mm和 1.10×10^8 m³,耕地产水量减少 1.50×10^8 m³、建设用地增加 3.19×10^8 m³;2050年产水深度预测值为214.11 mm、产水量预测值为 81.77×10^8 m³,分别比2020年增加了8.91 mm和 3.35×10^8 m³,耕地减少 6.28×10^8 m³、建设用地增加 10.14×10^8 m³。

耕地保护情景下,2030年沙颍河流域河南段产水深度预计为205.54 mm、产水量预计为 78.55×10^8 m³,分别比2020年增加了0.34 mm和 0.13×10^8 m³,耕地产

水量增加 1.74×10^8 m³、建设用地减少 0.62×10^8 m³;2050年产水深度预计为205.59 mm、产水量预计为 78.57×10^8 m³,较2020年增加了0.40 mm和 0.15×10^8 m³,耕地增加 1.48×10^8 m³、建设用地减少 0.17×10^8 m³。

城镇发展情景下,2030年沙颍河流域河南段产水深度预计为208.89 mm、产水量预计为 79.81×10^8 m³,分别比2020年增加了3.69 mm和 1.39×10^8 m³,耕地产水量减少 2.03×10^8 m³、建设用地增加 4.02×10^8 m³;2050年产水深度预计为214.83 mm、产水量预计为 82.04×10^8 m³,较2020年增加了9.63 mm和 3.61×10^8 m³,耕地产水量减少 6.79×10^8 m³、建设用地增加 10.94×10^8 m³。

表 2 2030、2050 年沙颍河流域河南段产水深度及变化
Table 2 Water yield depth and changes in the Henan section of Shaying River Basin in 2030 and 2050

年份	情景	平均产水深度/mm	产水深度变化量/mm	产水总量/($\times 10^8$ m ³)	产水总量变化/($\times 10^8$ m ³)
2030	自然发展情景	208.12	2.92	79.52	1.10
	耕地保护情景	205.54	0.34	78.55	0.13
	城镇发展情景	208.89	3.69	79.81	1.39
2050	自然发展情景	214.11	8.91	81.77	3.35
	耕地保护情景	205.59	0.40	78.57	0.15
	城镇发展情景	214.83	9.63	82.04	3.61

表 3 2030 年、2050 年土地利用类型产水量
Table 3 Water yield by land use type in 2030 and 2050 ($\times 10^8$ m³)

年份	情景	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
2020		53.21	2.52	0.61	0.05	1.32×10^{-3}	21.39
2030	自然发展情景	51.71	2.64	0.48	0.12	8.36×10^{-4}	24.58
	耕地保护情景	54.95	2.24	0.45	0.14	7.17×10^{-4}	20.77
	城镇发展情景	51.18	2.64	0.47	0.12	8.83×10^{-4}	25.41
2050	自然发展情景	46.93	2.80	0.37	0.13	8.03×10^{-4}	31.53
	耕地保护情景	54.69	2.23	0.33	0.10	6.89×10^{-4}	21.22
	城镇发展情景	46.42	2.80	0.36	0.13	7.94×10^{-4}	32.33

3 讨论

沙颍河流域河南段 1990–2020 年的年均产水深度呈先上升后下降的趋势,2000 年产水深度最大、为 260.94 mm,2020 年产水深度最低,仅为 205.19 mm。产水高值区主要分布在研究区东部,受气候、地形、土地利用和人类活动等多种因素的影响。在垂直方向上,产水深度随海拔的增加先降低后增加,与不同海拔下的土地覆被有关。1990–2020 年研究区土地利用类型产水能力由强到弱依次是未利用地、建设用地、耕地、草地、林地、水域,与各地类的蒸散能力、土壤含水量、持水能力及冠层截留量差异有关^[20,21]。沙颍河流域河流蒸发量较大,故水域的产水能力最低,与韩念龙等的研究结果一致^[22];林地植被蒸散能力强,且截留效应好,产水量相对较低^[19–23];耕地和草地的根系较浅、蒸散能力相对较弱,故产水能力高于林地;建设用地大多为不透水面,且截水、蒸散能力均较低,因此产水量较高^[24–26]。

未来 3 种发展情景下,耕地和建设用地的面积变化趋势不同。耕地保护情景抑制了建设用地的扩张,产水量最低;城镇发展情景下建设用地增加显著,促进了产水服务,但不利于生态环境保护和水资源持续利用。因此,基于研究结果提出以下建议:首先,研究区应实施有效的水资源调控和分配机制,加强跨区域管理与水源涵养地保护;其次,需控制建设用地规模,避免过度开发造成水资源耗竭和生态破坏,推动节水型社会建设,并通过生态修复提高产水能力;最后,应加强水资源管理的科技支撑,建立水资源监测与预警系统,推动节水灌溉技术和水资源综合利用

技术的应用。

本研究有助于研究区水资源保护与管理,但仍存在以下局限。一方面,InVEST 模型的产水量模块未全面考虑复杂地形因素的影响^[27],因此模拟结果存在不确定性^[28];另一方面,3 种发展情景可能无法完全预测未来的土地利用变化情况,未来研究应综合考虑更多发展可能。

4 结论

本文利用 InVEST 模型和 PLUS 模型,对沙颍河流域河南段 1990–2050 年的土地利用变化及产水服务功能进行了模拟分析。

(1)沙颍河流域河南段 1990–2020 年的产水量呈先增加后减少再增加的波动变化,总体呈减少趋势,平均产水深度变化范围为 205.19~260.94 mm,平均产水总量变化范围为 $73.81 \times 10^8 \sim 91.06 \times 10^8$ m³。2000 年产水量最高,2010 年产水量最低。产水量空间分布呈东高西低特征,高值区位于东部周口市,低值区则主要集中在西部和西北部。

(2)各土地利用类型的产水能力由强到弱依次为未利用地、建设用地、耕地、草地、林地、水域。其中耕地是沙颍河流域河南段产水服务的主要来源,占总产水量的 77%;其次是建设用地,占总产水量的 18%。

(3)3 种情景下沙颍河流域河南段产水总量由高到低依次为城镇发展情景、自然发展情景和耕地保护情景;相比 2020 年产水量,2030 年城镇发展情景、自然发展情景和耕地保护情景产水量分别增加 1.39×10^8 m³、 1.10×10^8 m³、 0.13×10^8 m³;2050 年分别增加 3.61×10^8 m³、 3.35×10^8 m³、 0.15×10^8 m³。

[参考文献]

- [1] 窦攀烽,左舒翟,任引,等. 气候和土地利用/覆被变化对宁波地区生态系统产水服务的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(7):2398-2409.
Dou Panfeng, Zuo Shuzhai, Ren Yin, et al. The impacts of climate and land use/land cover changes on water yield service in Ningbo region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(7):2398-2409.
- [2] Lang Y Q, Song W, Zhang Y. Responses of the water-yield ecosystem service to climate and land use change in Sancha River Basin, China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2017, 101:102-111.
- [3] Zheng H, Li Y F, Robinson B E, et al. Using ecosystem service trade-offs to inform water conservation policies and management practices[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2016, 14(10):527-532.
- [4] 许丁雪,吴芳,何立环,等. 土地利用变化对生态系统服务的影响:以张家口-承德地区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7493-7501.
Xu Dingxue, Wu Fang, He Lihuan, et al. Impact of land use change on ecosystem services: a case study of Zhangjiakou-Chengde Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7493-7501.
- [5] 王茜,李宛莹. 基于 InVEST 模型的秦岭产水量时空变化对土地利用变化的响应[J]. 河南科技, 2021, 40(33):119-122.
Wang Qian, Li Wanying. Spatio-temporal variation of water yield and its response to land use change in Qinling based on InVEST model[J]. Henan Science and Technology, 2021, 40(33):119-122.
- [6] 赖明,陈仁升,刘玖芬,等. 雅鲁藏布江下游产水量时空演变及对气候和土地利用变化的响应[J]. 草业科学, 2022, 39(12):2516-2526.
Lai Ming, Chen Rensheng, Liu Jiufen, et al. Temporal and spatial evolution of water yield in the lower reaches of the Yarlung Zangbo River and its response to climate and land use change[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(12): 2516 - 2526.
- [7] 吕乐婷,任甜甜,李赛赛,等. 基于 InVEST 模型的大连市产水量时空变化分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 144-150.
Lyu Leting, Ren Tiantian, Li Saisai, et al. Analysis on spatio-temporal variation of water supply in Dalian City based on InVEST model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4):144-150.
- [8] 黄奎. SWAT 模型研究进展[J]. 珠江水运, 2019(19):34-35.
- [9] 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.
- [10] 李芳,张金龙,杨环. 基于 InVEST 模型的黑河流域上游 1990-2018 年产水量模拟[J]. 高原气象, 2022, 41(3):698-707.
Li Fang, Zhang Jinlong, Yang Huan. Simulation of annual water yield in the upper Heihe River Basin from 1990 to 2018 based on in VEST[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(3):698-707.
- [11] Niu P T, Zhang E C, Feng Y, et al. Spatial-temporal pattern analysis of land use and water yield in water source region of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project based on google earth engine[J]. Water, 2022, 14(16):2535.
- [12] Xu J W, Liu S L, Zhao S, et al. Spatiotemporal dynamics of water yield service and its response to urbanisation in the Beiyun River Basin, Beijing[J]. Sustainability, 2019, 11(16): 4361.
- [13] 蔡梦卿,黄璐,严力蛟. 基于 InVEST 模型的杭州市典型年份年产水量时空变化特征及其影响因素[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1):127-135.
Cai Mengqing, Huang Lu, Yan Lijiao. Temporal and spatial variation characteristics of annual water yield and its influencing factors in Hangzhou based on InVEST model[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2022, 39(1):127-135.
- [14] 郭佳晖,刘晓煌,张文博,等. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的云贵高原产水量时空变化特征分析[J]. 现代地质, 2024, 38(3):624-635.
Guo Jiahui, Liu Xiaohuang, Zhang Wenbo, et al. Analysis of spatiotemporal variation characteristics of water yield in Yunnan-Guizhou Plateau based on InVEST model and PLUS model[J]. Geoscience, 2024, 38(3):624-635.
- [15] 杨子豪,陈德超,郎峥,等. 土地利用变化对生态系统碳储量的影响研究:以苏州市为例[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(2):206-214.
Yang Zihao, Chen Dechao, Lang Zheng, et al. Impact of land use change on carbon storage of ecosystem: a case study of Suzhou City[J]. Environmental Science and Technology, 2024, 47(2):206-214.
- [16] Fan L Y, Cai T Y, Wen Q, et al. Scenario simulation of land use change and carbon storage response in Henan Province, China: 1990-2050[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110660.
- [17] 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.
Zhou Wenzuo. Study on Soil Effective Water Content of Main Soil Types in China Based on GIS[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003.
- [18] 刘娇,郎学东,苏建荣,等. 基于 InVEST 模型的金沙江流域干热河谷区水源涵养功能评估[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 8099-8111.
Liu Jiao, Lang Xuedong, Su Jianrong, et al. Evaluation of water conservation function in the dry-hot valley area of Jinsha River Basin based on InVEST model[J]. Acta Ecolog-

- ica Sinica, 2021,41(20):8099–8111.
- [19] 杨洁,谢保鹏,张德罡. 基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. 应用生态学报, 2020,31(8):2731–2739.
- Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River Basin based on InVEST model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(8):2731–2739.
- [20] 方露露,许德华,王伦澈,等. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究[J]. 地理研究, 2021,40(3):821–838.
- Fang Lulu, Xu Dehua, Wang Lunche, et al. Study on ecosystem service changes and trade-offs in the Yangtze River Basins[J]. Geographical Research, 2021,40(3):821–838.
- [21] 吕乐婷,李青,杨勇. 辽宁省 2001–2020 年水源涵养量变化及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2022,42(1):290–296.
- Lyu Leting, Li Qing, Yang Yong. Change and influencing factors of water conservation in Liaoning Province during 2001–2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(1):290–296.
- [22] Liu Y C, Jing Y D, Han S M. Multi-scenario simulation of land use/land cover change and water yield evaluation coupled with the GMOP-PLUS-InVEST model: a case study of the Nansi Lake Basin in China[J]. Ecological Indicators, 2023,155:110926.
- [23] 韩念龙,张亦清,张伟璇. 海南岛土地利用及产水量时空变化模拟[J]. 水资源保护, 2022,38(2):119–127.
- Han Nianlong, Zhang Yiqing, Zhang Weixuan. Simulation of temporal and spatial changes of land use and water yield in Hainan Island[J]. Water Resources Protection, 2022,38(2):119–127.
- [24] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等. 黄土残塬沟壑区 3 种林地枯落物和土壤水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2018,32(2):357–363.
- Hou Guirong, Bi Huaxing, Wei Xi, et al. Water conservation function of litters and soil in three kinds of woodlands in Gully Region of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(2):357–363.
- [25] 戴尔阜,王亚慧. 横断山区产水服务空间异质性及归因分析[J]. 地理学报, 2020,75(3):607–619.
- Dai Erfu, Wang Yahui. Spatial heterogeneity and driving mechanisms of water yield service in the Hengduan Mountain region[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(3): 607–619.
- [26] Guo H W, Sun X Y, Lian L S, et al. Response of water yield function of ecosystem to land use change in Nansi Lake Basin based on CLUE-S model and InVEST model[J]. The Journal of Applied Ecology, 2016,27(9):2899–2906.
- [27] Lian X H, Qi Y, Wang H W, et al. Assessing changes of water yield in Qinghai Lake watershed of China[J]. Water, 2019,12(1):11.
- [28] 魏培洁,吴明辉,贾映兰,等. 基于 InVEST 模型的疏勒河上游产水量时空变化特征分析[J]. 生态学报, 2022,42(15):6418–6429.
- Wei Peijie, Wu Minghui, Jia Yinglan, et al. Spatiotemporal variation of water yield in the upstream regions of Shule River Basin using the InVEST Model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(15):6418–6429.