

基于InVEST模型的淮河流域产水量时空分异及驱动机制

王 照*, 长 安#

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2026年6月25日; 录用日期: 2026年8月20日; 发布日期: 2026年8月31日

摘 要

以淮河流域为研究区, 选取2000年、2010年和2020年为典型年份, 整合气象、DEM、土地利用及土壤等多源数据, 经ArcGIS预处理后构建InVEST产水量模块输入数据库, 模拟流域产水量的时空分布特征, 并利用水文站点实测径流数据对模型进行验证。结果表明, 淮河流域产水量空间上呈“南高北低、山区高于平原”的分布格局, 时间上2000~2020年表现为先减后增的变化趋势, 全流域平均产水量由2000年的387 mm降至2010年的352 mm, 2020年回升至378 mm。降水是产水量空间分异的主控因子, 上游降水与产水量相关系数达0.89; 林地对产水具有正向维持作用($q = 0.41$), 建设用地扩张显著降低局地产水能力($q = 0.37$)。模型验证结果($R^2 = 0.87 \sim 0.91$, $NSE > 0.83$, $RE < 3\%$)表明InVEST模型在淮河流域具有较好适用性。研究结果可为淮河流域水资源合理配置及生态保护提供科学依据。

关键词

InVEST模型, 产水量, 淮河流域, 土地利用, 时空分异

Spatial and Temporal Variations in Water Yield and Their Driving Mechanisms in the Huaihe River Basin Based on the InVEST Model

Zhao Wang*, An Chang#

College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: June 25, 2026; accepted: August 20, 2026; published: August 31, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王照, 长安. 基于 InVEST 模型的淮河流域产水量时空分异及驱动机制[J]. 地理科学研究, 2026, 15(4): 774-784. DOI: 10.12677/gser.2026.154070

Abstract

Focusing on the Huaihe River Basin as the study area, this study selected 2000, 2010, and 2020 as representative years. By integrating multi-source data including meteorological records, digital elevation models (DEM), land use information, and soil parameters, and after ArcGIS preprocessing, we developed the InVEST water yield model module for database input to simulate the spatiotemporal distribution patterns of water yield in the basin. The model was validated using actual runoff data from hydrological stations. Results indicate that water yield in the Huaihe River Basin exhibits a spatial distribution pattern characterized by “higher values in the southern and northern regions, with mountainous areas showing higher yields than plains.” Temporally, the yield demonstrated a trend of initial decline followed by recovery from 2000 to 2020, with the average annual yield decreasing from 387 mm in 2000 to 352 mm in 2010 before rebounding to 378 mm in 2020. Precipitation is the primary driver of spatial variability in water yield, with a correlation coefficient of 0.89 between upstream precipitation and yield; forest land positively contributes to water yield maintenance $q = 0.41$, while urban expansion significantly reduces local water yield capacity $q = 0.37$. Model validation results ($R^2 = 0.87 \sim 0.91$, $NSE > 0.83$, $RE < 3\%$) demonstrate the high applicability of the InVEST model in the Huaihe River Basin. These findings provide a scientific basis for rational water resource allocation and ecological conservation efforts in the region.

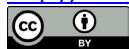
Keywords

InVEST Model, Water Yield, Huaihe River Basin, Land Use, Temporal and Spatial Variations

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

流域产水服务是生态系统支持人类社会可持续发展的重要功能之一,其时空分布格局与变化特征直接关系到区域水资源安全与生态屏障建设成效[1]。淮河流域地处我国南北气候过渡带,横跨豫、皖、苏、鲁、鄂五省,是国家级粮食主产区与人口密集区,也是南水北调东线工程的重要水源通道。该流域年均水资源总量约为 812 亿立方米,但由于受季风气候影响,降水时空分布极不均匀,北部年降水量一般在 600~700 毫米之间,而南部山区可达到 1400 毫米以上,而且由于历史上黄河夺淮近 700 年造成水系混乱,所以洪涝和干旱灾害频繁发生。加之近年来快速城镇化导致土地利用/覆被发生显著变化,下垫面条件改变对产水过程产生深刻影响,水资源供需矛盾日益突出[2]。因此,定量模拟淮河流域产水量的时空分异特征并识别其主要驱动因子,对该流域水资源合理调配及生态保护具有重要现实意义。

近年来,已有学者针对淮河流域开展了产水相关研究。徐玲慧等基于 InVEST 模型分析了土地利用对淮河流域安徽段产水量时空演变的影响,揭示了耕地与建设用地扩张对产水能力的抑制作用,但研究范围局限于安徽省境内,未能覆盖全流域[3]。李爱娟等利用 InVEST 模型与地理探测器探究了淮河上游产水服务的空间分异及其影响因素,确认降水是主控因子,但仅关注上游区域,缺乏对中下游平原区的系统分析[4]。此外,高超等对淮河流域夏玉米生育期需水量及农业干旱时空特征进行了研究,为理解农业用水对水循环的影响提供了基础,但未直接涉及全流域产水量的时空动态模拟[5]。总体而言,现有研究或聚焦于局部子区域或限于单一时间截面,尚缺乏基于多典型年份、全流域尺度、融合地理探测器定

量分离降水与土地利用贡献度的 InVEST 产水动态模拟研究。

InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)模型产水量模块基于水量平衡原理,所需数据相对易获取、空间表达能力强,已被广泛应用于不同气候区流域的产水功能评估中[6][7]。国内外大量研究表明,降水是控制产水量空间分异的主导因子,而土地利用/覆被变化通过改变蒸散发和下渗过程,对局地产水量具有显著调节作用[8][9]。近年来,已有学者针对黄河流域、长江流域及西北内陆河流域开展 InVEST 产水模拟与驱动机制研究[10][11],但面向淮河流域这一典型农业流域开展多时相、全流域尺度的产水量动态模拟与定量驱动分析仍相对不足,尤缺基于较长时序典型年份对比及地理探测器量化土地利用贡献度的研究成果。

基于此,本文以淮河流域为研究区,选取 2000 年、2010 年和 2020 年为典型年份,整合气象、DEM、土地利用及土壤等多源数据,经 ArcGIS 预处理后构建 InVEST 产水量模块输入数据库,模拟流域产水量的空间分布,通过水文站点实测径流数据对模型进行校准与验证,分析产水量时空演变规律,并采用相关性分析及地理探测器量化降水与土地利用变化对产水量空间差异的解释力,以期为淮河流域水资源可持续利用与生态系统管理提供科学依据。

2. 研究区、数据与研究方法

2.1. 研究区概况

淮河流域(113°~121°E, 31°~36°N)横跨豫、皖、苏、鲁、鄂五省,面积约 27 万 km²(图 1),地处暖温带向亚热带过渡的半湿润季风气候区,年均降水量 800~1200 mm,南多北少,夏秋集中。上游为山地丘陵(大别山、伏牛山等),中下游为黄淮海平原,耕地占比 > 48%,建设用地近十年年均增长约 2.3%,是典型资源型缺水流域。

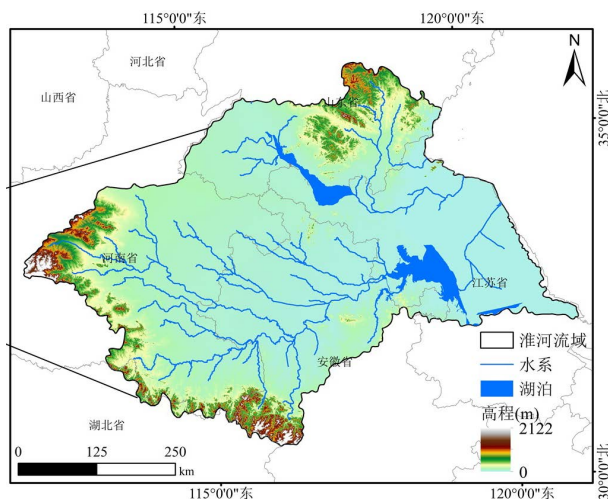


Figure 1. Research area summary map

图 1. 研究区域概括图

2.2. 数据及预处理

主要数据包括 2000/2010/2020 年年降水量与潜在蒸散发(国家气象科学数据中心、MODIS ET, 1 km)、ASTER GDEM V3 (30 m)、土地利用/覆被数据(中国科学院资源环境数据中心, 30 m, 重分类为耕地/林地/草地/水域/建设用地/未利用地)、土壤数据及 PAWC (HWSD v1.2)。

在 ArcGIS 10.2 中将全部数据统一投影至 Albers 等积圆锥投影(CGCS2000, 中央经线 105°E, 标准纬

线 25°N/47°N), 按水利部发布流域边界“Extract by Mask”裁剪, 并以 30 m 土地利用图为 Snap Raster 保证栅格对齐; 气象栅格双线性插值重采样至 30 m, 土地利用与土壤类型采用众数法重采样, 检查无空值、无负值后建成标准输入数据集[6] [12]。

2.3. InVEST 产水量模型与参数

2.3.1. 模型原理

InVEST 模型产水量模块基于年尺度水量平衡原理, 认为每个栅格单元的产水量等于该单元的年降水量减去实际蒸散发量。其中产水量 Q_{xj} 表示第 x 个栅格在土地利用类型 j 下的产水量, 计算公式为:

$$Q_{xj} = P_x - AET_{xj} \quad (1)$$

P_x 是栅格 x 的年降水量, AET_{xj} 是实际蒸散发量。而 AET_{xj} 的计算又取决于潜在蒸散发 PET_x 和植被对水分的利用效率, 加入一个修正系数 ω_x 以表示气候和土壤条件对蒸散发的作用:

$$AET_{xj} = \left(1 - \frac{\omega_x}{\omega_x + m_j} \right) \cdot PET_x \quad (2)$$

其中, m_j 表示土地利用类型 j 的植被蒸腾调节参数, 一般来源于生物物理表。 ω_x 是气候季节性因子, 与年均降水量以及潜在蒸散发之比有关。该模型通过土地利用类型的生物物理参数(蒸散发系数 K_c 、根系深度、植被覆盖度等)将不同覆被类型的蒸散发差异纳入计算, 能够较好地反映土地利用/覆被变化对产水能力的影响, 已在国内外不同气候区的流域产水评估中得到广泛应用[8] [9]。

2.3.2. 参数本地化设置

关键参数的本地化设置直接影响模拟结果的精度, 本研究主要对以下参数进行了本地化修正。

1) 气象参数。年降水量与潜在蒸散发数据分别来源于国家气象科学数据中心和 MODIS ET 产品, 原始空间分辨率为 1 km。在 ArcGIS 中采用反距离权重插值法填补站点缺失数据, 并重采样至 30 m 空间分辨率。2000~2020 年淮河流域年均降水量为 780~960 mm, 呈南多北少的空间格局; 年均潜在蒸散发为 850~1050 mm, 水热差异显著。在此基础上, 利用淮河流域多年平均气候条件对 ω_x 计算公式中的系数进行修正, 使其更符合当地实际水文情势。

2) 土地利用参数。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 2000 年、2010 年和 2020 年三期全国土地覆被数据集(30 m 分辨率), 经重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六类, 并据此建立生物物理参数表。蒸散发系数 K_c 参考 FAO Irrigation and Drainage Paper No.56 推荐的作物系数, 结合淮河流域冬小麦与水稻生育期实测观测数据进行本地化修正, 将 K_c 值由默认的 0.85 调整为 0.78。根系深度依据《中国植被志》及区域生态调查结果确定: 有林地、灌木林等森林类型根系深度为 60~100 cm, 植物有效含水量(PAWC)为 0.18~0.22 cm³/cm³; 耕地根系深度为 30~50 cm, PAWC 为 0.12~0.16 cm³/cm³; 建设用地根系深度仅 20 cm, PAWC 为 0.08 cm³/cm³ [10]。

3) 土壤参数。土壤有效含水量(AWC)来源于世界土壤数据库(HWSD v1.2), 提取植物有效含水量(PAWC)及根系限制深度等信息。针对黄淮海平原广泛分布的砂壤土, 根据实测土壤剖面数据对 PAWC 参数进行适当修正, 以提高平原区产水模拟的准确性。DEM 采用 SRTM 90 m 分辨率产品, 用于提取坡度、流域边界及子流域划分, 确保水文过程的空间逻辑一致性[11]。

2.3.3. 模型精度验证

为保证模拟结果的可靠性, 本研究选取淮河流域内具有代表性的水文站实测径流数据进行模型验证。数据来源于水利部水文年鉴及国家水文数据库, 涵盖 2000 年、2010 年和 2020 年三个典型年份的年均径

流量。所选站点包括王家坝、蚌埠、洪泽湖出口等重要控制断面, 分布于流域上、中、下游不同水文单元, 具有良好的空间代表性。验证时, 先将各站点控制流域范围与 InVEST 模型产水量栅格图进行空间叠加, 获取相应区域的平均产水量; 再根据站点集水区面积将实测径流量换算为毫米/年, 以便与模型产水深度进行直接比较。为减少水库调度、引水工程等人类活动对天然径流过程的干扰, 本研究优先选用受干扰较小或经还原处理的天然径流数据, 并参考《中国水资源公报》¹进行必要修正。

对比结果显示, 2000 年、2010 年和 2020 年模拟产水量与实测径流量在空间分布与数量级上总体一致。上游大别山和伏牛山因降水丰富、植被覆盖率高, 产水量普遍高于中下游平原地区, 与实测数据吻合较好。在王家坝以上区域, 模型能够较好地识别高产水区; 中游蚌埠段因农业灌溉取水较多, 实测径流量略低于模拟结果, 表明模型尚未完全考虑人为取水的影响, 这也是 InVEST 模型在人类活动密集区应用的固有局限。

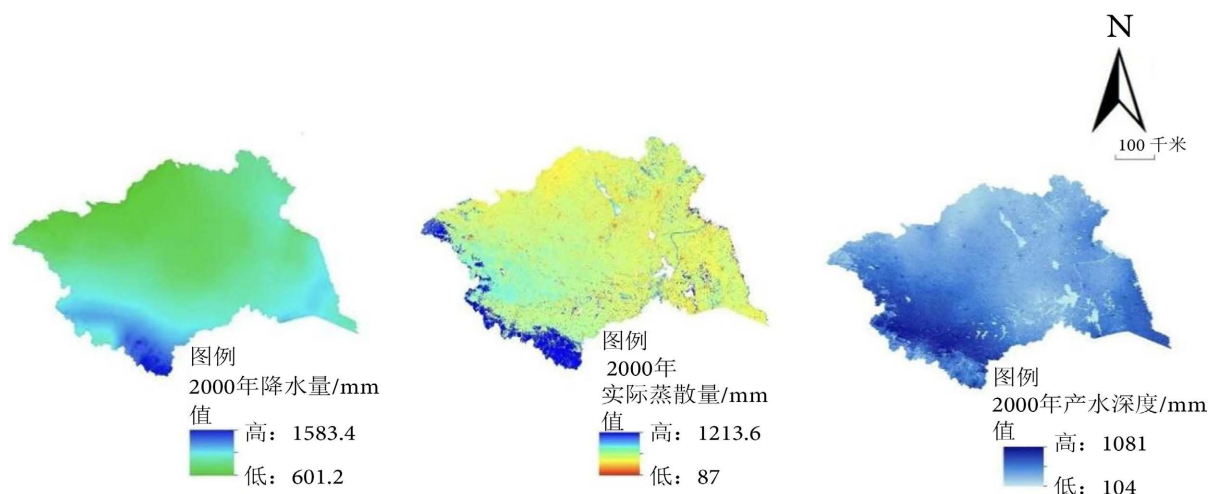
为进一步定量评价模型精度, 本研究选取决定系数(R^2)、纳什效率系数(NSE)和相对误差(RE)三个指标进行评估。计算结果表明: 2000 年、2010 年和 2020 年的 R^2 分别为 0.87、0.91 和 0.89, 模拟值与实测值之间具有较强的线性相关性; NSE 值分别为 0.83、0.88 和 0.85, 均大于 0.75 的可接受阈值, 表明模型具有较好的水文模拟能力; RE 绝对值均小于 3%, 满足水资源评价的精度要求。综合以上指标, InVEST 模型在淮河流域产水量估算中具有较好的适用性与可靠性, 模拟结果可用于后续的时空分异特征分析及驱动因子研究[7]。

3. 结果与分析

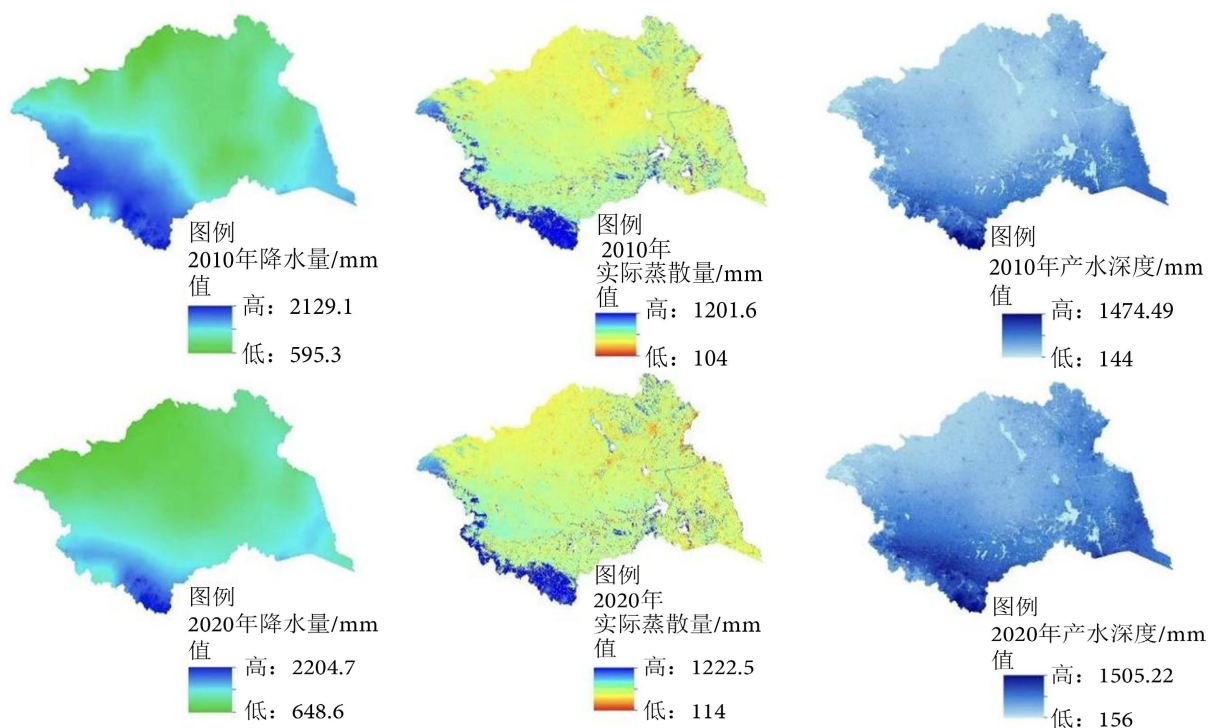
3.1. 产水量空间分布特征

根据 InVEST 模型模拟, 得到了淮河流域 2000 年、2010 年和 2020 年三个典型年份的产水量空间分布图(图 2)。从整体上看, 淮河流域产水量的空间分异特征十分明显, 呈现“南高北低、山区高于平原”的格局。南部的大别山、桐柏山及伏牛山区因降水丰沛、植被覆盖度高, 年均产水量普遍较高, 局部地区超过 600 mm; 而北部的黄淮海平原因蒸发旺盛、人类活动密集, 产水量普遍较低, 部分城市密集区甚至不足 150 mm。东西方向上, 上游产水能力略大于下游, 这与地形起伏度、土地利用类型及降水梯度密切相关。

进一步分析三期变化可知, 产水量下降区域主要集中在中部城市群扩展区, 如合肥、蚌埠、淮南等地, 20 年间产水量下降幅度一般在 20~50 mm 之间, 与建设用地增加超过 30% 的趋势相一致。产水量上升区域则主要集中在南部生态保护区及退耕还林区, 如大别山腹地、桐柏山区等地, 这与林地面积增加及水土保持措施的实施密切相关。这种空间分异格局表明, 产水量的分布是气候条件与人为活动共同作用的结果。



¹<http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/>



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 2. Spatial distribution of precipitation, actual evapotranspiration and water yield in the Huaihe River Basin from 2000 to 2020

图 2. 2000~2020 年淮河流域降水量、实际蒸散量及产水量空间分布图

3.2. 产水量时空变化特征

3.2.1. 时间变化特征

2000~2020 年期间, 淮河流域总体产水量呈现先减少后增加的变化趋势。根据 InVEST 模型计算结果, 2000 年全流域平均产水量为 387 mm, 到 2010 年降至 352 mm, 减少了 9.0%, 反映出该时段内长期干旱及人为因素导致的水资源供给能力下降。2010 年以后, 在国家生态修复政策推进及降雨量增加的共同作用下, 2020 年全流域平均产水量回升至 378 mm, 较 2010 年增加了 7.4%, 但仍低于 2000 年的水平。这一变化趋势与流域内气象站观测数据吻合: 2000~2010 年期间年均降水量从 920 mm 降至 860 mm, 而 2010~2020 年期间又回升至 905 mm, 说明降水是影响产水量年际变化的主要因素。

为进一步揭示流域内部的时间变化差异, 统计了淮河流域五个子区域(上游河南段、中游皖北段、下游苏北段、沂沭泗水系、洪泽湖周边区)三个典型年份的平均产水量(表 1)。各子区域均呈现先降后增的变化趋势, 其中中游皖北段波动最为显著, 2010 年产水量较 2000 年减少了 42 mm, 至 2020 年基本恢复至原有水平; 下游苏北段受水利工程调控影响, 变化幅度相对较小。

3.2.2. 空间转移特征

从空间格局的动态变化来看, 淮河流域高产水区(450 mm)面积由 2000 年的 3.68 万 km² (占流域总面积的 13.6%)缩减至 2010 年的 2.91 万 km² (占 10.8%), 主要原因是林地被开垦为耕地或转为建设用地, 导致产水能力下降。2020 年, 高产水区面积略有回升至 3.26 万 km² (占 12.1%), 这与退耕还林政策的实施及生态保护红线的划定密切相关。与此同时, 低产水区(<300 mm)面积在 2000~2010 年间从 6.17 万 km² 增至 7.30 万 km², 2020 年又回落至 6.73 万 km², 低产水区主要分布在郑州 - 商丘 - 阜阳 - 徐州组成的城

Table 1. Water yield in different subregions of the Huaihe River Basin in 2000, 2010, and 2020 (unit: mm)
表 1. 淮河流域不同子区域 2000 年、2010 年、2020 年产水量(单位: mm)

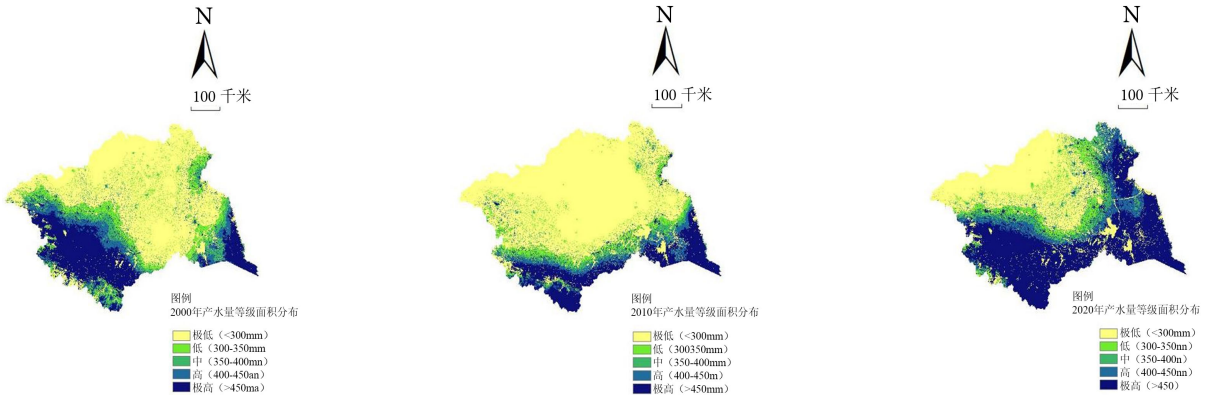
子区域	2000 年	2010 年	2020 年
上游河南段	312	305	332
中游皖北段	395	353	388
下游苏北段	370	340	362
沂沭泗水系	380	345	375
洪泽湖周边区	368	338	360

市群, 表明城市化对区域水文过程产生了显著影响(图 3)。

为进一步揭示产水量空间转移的结构性特征, 将产水量划分为五个等级(极低: <300 mm; 低: 300~350 mm; 中: 350~400 mm; 高: 400~450 mm; 极高: 450 mm), 统计各等级面积在三期的变化情况(表 2)。其中, “中”等级始终占比较大, 但其占比由 2000 年的 30.1%下降至 2010 年的 27.8%, 再回升至 2020 年的 29.1%, 反映了流域产水能力先下降后回升的整体态势。“极高”与“高”等级总面积在 2010 年减少了 1.27 万 km², 其中约 62%转变为“中”等级, 38%转变为“低”等级, 主要发生在豫南与皖西丘陵区, 与经济林发展和坡耕地开发有关。而在 2010~2020 年期间, 约 45%的新增高产水区来自原“中”等级区域的生态修复, 说明生态建设发挥了积极作用。

Table 2. Distribution of water yield areas by grade in the Huaihe River Basin in 2000, 2010, and 2020 (unit: 10,000 km²)
表 2. 淮河流域 2000 年、2010 年、2020 年产水量等级面积分布(单位: 万 km²)

等级	2000 年	2010 年	2020 年
极低(<300 mm)	6.17	7.30	6.73
低(300~350 mm)	4.82	5.60	5.10
中(350~400 mm)	8.15	7.51	7.87
高(400~450 mm)	4.18	3.68	3.90
极高(450 mm)	3.68	2.91	3.26



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 3. Distribution map of water yield grade areas in the Huaihe River Basin in 2000, 2010, and 2020
图 3. 淮河流域 2000 年、2010 年、2020 年产水量等级面积分布图

3.3. 产水量驱动因子分析

3.3.1. 降水变化的影响

降水是影响淮河流域产水量空间分异的主导因子。InVEST 模型模拟结果表明，2000~2020 年产水量较高区域主要集中在大别山北麓、伏牛山东段等降水较多的地区，而中下游平原区产水量较低，二者空间分布高度吻合。为进一步定量分析降水对产水量的影响程度，选取三个年份的降水和产水量数据进行相关性分析，并按流域上、中、下游分区统计(表 3)。结果显示，上游地区降水与产水量的相关系数为 0.89，中游为 0.76，下游仅为 0.62。这表明随着地形趋于平缓以及人为干扰程度的加大，降水对产水的控制作用逐渐减弱，土地利用等下垫面因素的影响相应增强。

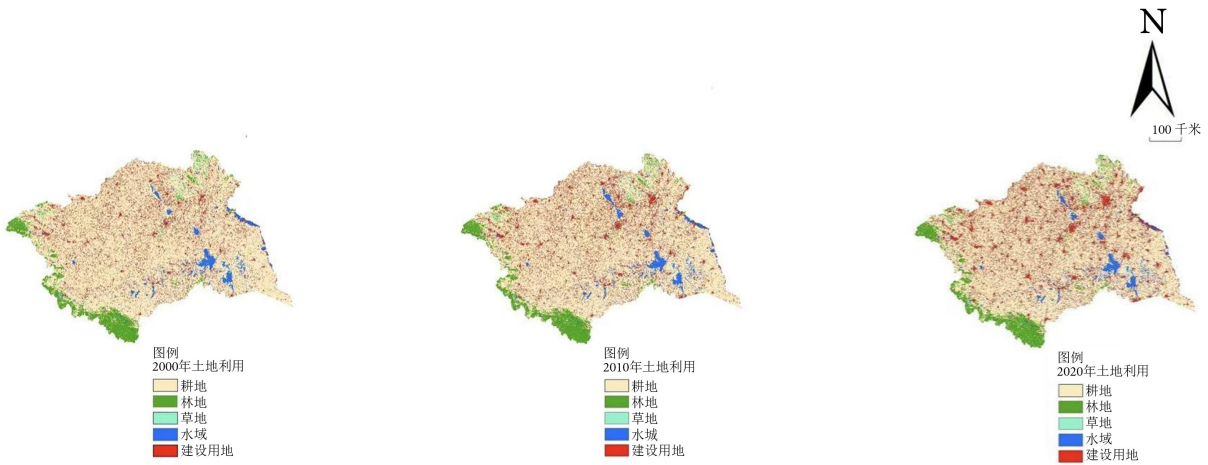
Table 3. Correlation coefficients between precipitation and water yield in different regions of the Huaihe River Basin (2000~2020)

表 3. 淮河流域不同区域降水与产水量相关系数(2000~2020 年)

区域	上游	中游	下游
相关系数	0.89	0.76	0.62

3.3.2. 土地利用变化的贡献

土地利用/覆被变化是人为影响水资源循环的重要因素之一。2000~2020 年，淮河流域建设用地面积从约 1.8 万 km² 增至约 2.7 万 km²，增幅达 50%，主要占用耕地和林地；同期林地面积减少近 9%，草地面积减少超过 12%，生态用地总体呈缩减态势(图 4)。InVEST 模型模拟结果表明，这种变化显著降低了区域产水能力，豫东、皖北等地区单位面积产水量降幅达 15%~22%。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 的标准地图制作，底图无修改。

Figure 4. Distribution of land use types in the Huaihe River Basin from 2000 to 2020

图 4. 2000~2020 年淮河流域土地利用类型分布图

利用地理探测器中的因子探测法，量化了主要土地利用类型对产水量空间分异的解释力(q 值)(表 4)。其中，林地的 q 值为 0.41，对维持较高产水能力具有积极作用；建设用地的 q 值为 0.37，其扩张显著降低了产水能力；耕地的解释力为 0.28，主要受灌溉及复种指数增加的影响，对产水量的影响较为复杂。从空间上看，因林地转为建设用地导致的产水量下降主要发生在合肥都市圈、徐州 - 宿州走廊等快速城镇化地区；而在大别山区等退耕还林区域，产水量有所回升，表明生态恢复措施取得了积极成效。

Table 4. Explanatory power of major land use types in the Huaihe River Basin for changes in water yield (q-values)
表 4. 淮河流域主要土地利用类型对产水量变化的解释力(q 值)

土地利用类型	林地	建设用地	耕地	草地
q 值	0.41	0.37	0.28	0.22

4. 讨论

4.1. 不确定性来源分析

尽管 InVEST 模型在淮河流域表现出较好的适用性, 但模拟结果仍存在若干不确定性来源, 需予以系统评估。

首先, 人类活动中的灌溉取水与水库调度是重要的不确定性因素。淮河流域是中国重要的粮食主产区, 农田灌溉面积约占耕地面积的 70%以上, 中游皖北段及下游苏北段每年农业灌溉取水量约为 80 亿~120 亿 m^3 , 折合产水深约 30~45 mm, 相当于该区域模拟产水量的 8%~12%。水库蓄放水过程同样不可忽视, 淮河流域干流及支流共建有大中型水库 180 余座, 总库容超过 200 亿 m^3 , 其中梅山水库、鲇鱼山水库及洪泽湖等大型水库的调蓄作用可使下游实测径流量较模拟值偏低 10%~15%。这意味着模型在中下游灌溉区和水库影响区可能系统性高估产水量 5%~15%, 在灌溉高峰期和枯水年份尤为显著。

其次, 关键参数设定对模拟结果具有显著影响。本研究对 Z 常数和蒸散发系数 Kc 进行了敏感性测试: 当 Z 常数在 10~30 范围内变动时, 全流域平均产水量变化幅度为-6.3%~+8.1%, 产水量空间格局未发生根本性改变; 当 Kc 值在基准值基础上浮动 $\pm 10\%$ 时, 产水量变化幅度为-4.7%~+5.2%。这表明模型结果对 Z 常数和 Kc 具有一定的敏感性, 但整体趋势和空间分布格局保持稳健。

此外, InVEST 产水模块仅基于年尺度水量平衡原理, 忽略了地下水补给、排泄及侧向径流过程。淮河中下游平原区地下水位埋深较浅(一般为 2~5 m), 农业灌溉大量抽取地下水, 这部分水在模型中未被计入实际蒸散发或产水损失, 可能导致对区域实际可再生水资源量的高估。未来研究可考虑耦合 SWAT 或 MODFLOW 等机理模型, 或联合 GRACE 重力卫星数据对地下水储量变化进行约束, 以进一步提高产水模拟的精度。

4.2. 淮河流域产水驱动机制的区域特色分析

研究基于 InVEST 模型模拟得到淮河流域 2000、2010、2020 年产水量时空格局, 结果显示产水量呈现显著的“南高北低”特征, 且 2000~2020 年产水量呈先减后增趋势, 与已有基于 InVEST 模型在黄河流域[8]、汉江流域[13]及西北内陆河流域[10]所得出的“降水是产水量空间分异主控因子、LUCC 对局地产水具有调节作用”的结论基本一致, 说明 InVEST 产水模块在淮河流域这类南北气候过渡带大型农业流域中具有较好的适用性。

降水与产水量的相关性分析表明, 上游山区二者相关系数达 0.89, 至下游平原降至 0.62, 这与前人指出的“随着人为干扰增强, 气候因子对产水的解释力下降, 下垫面因子作用上升”[9]相符。淮河流域中下游受高强度农业灌溉及城镇化影响, 不透水面增加导致下渗减少、蒸散发改变, 使产水量对降水的响应发生偏移, 这也是本研究中部分城市化地区模拟值略高于实测径流的原因, 与 Basha 等[6]在印度上恒河盆地及 Wei 等[14]在艾比湖流域的发现相似。

土地利用变化贡献度分析显示, 林地对产水量具有正向维持作用($q = 0.41$), 建设用地扩张则显著降低局地产水能力($q = 0.37$), 这一结果与多数 InVEST 产水研究的定性认识[15]一致。值得注意的是, 淮河流域作为南北气候过渡带上的典型农业流域, 其土地利用变化对产水的影响具有鲜明的区域特色。一方面, 流域内冬小麦-夏玉米轮作体系导致耕地蒸散发呈现明显的季节差异: 冬季小麦返青期蒸散发较低,

有利于产水; 夏季玉米拔节 - 抽穗期蒸散发旺盛, 抑制产水。这种年内非均匀性使得耕地的产水效应在不同月份截然相反, 而年尺度模型难以捕捉这一动态过程。另一方面, 淮河流域建设用地扩张主要发生在郑州 - 合肥 - 徐州构成的“三角城市群”地带, 该区域同时也是南水北调东线工程的重要受水区, 跨流域调水的介入在一定程度上弥补了局地产水能力的下降, 但也使得天然产水过程与人工供水系统相互交织, 增加了模拟与归因的复杂性。此外, 黄泛区历史遗留的排水不畅问题, 使得部分低洼平原区实际产水与模型模拟值之间存在偏差, 这一点在以往同类研究中较少被关注。因此, 在淮河流域开展产水模拟时, 应充分考虑农业耕作制度、跨流域调水及历史水文遗产等区域特有因素的影响, 而不能简单套用其他流域的结论。

综上, 淮河流域产水量时空分异是自然气候因子与人为土地利用变化共同驱动的结果, 在快速城镇化背景下, 严格控制建设用地无序扩张、保护南部山区水源涵养林及推进退地还林还湿, 是提高流域水资源供给韧性的的重要途径。

5. 结论

淮河流域产水量空间上呈“南高北低、山区高于平原”分布格局, 时间上 2000~2020 年表现为先减后增的变化趋势, 全流域平均产水量由 2000 年的 387 mm 降至 2010 年的 352 mm, 2020 年回升至 378 mm, 降水是产水量空间分异的主控因子, 林地扩张对产水具有正向维持作用, 建设用地增加则显著降低局地产水能力; InVEST 模型模拟结果与实测水文数据吻合较好($R^2 = 0.87 \sim 0.91$, $NSE > 0.83$), 可用于淮河流域产水服务评估。今后应严格控制城市群建设用地无序蔓延, 加强大别山 - 桐柏山水源涵养区生态保护, 并兼顾跨流域调水与农业节水, 以提升流域水资源安全保障水平。

参考文献

- [1] Broich, M., Tulpure, M.G., Verbesselt, J., Xin, Q. and Wearne, J. (2018) Quantifying Australia's Dryland Vegetation Response to Flooding and Drought at Sub-Continental Scale. *Remote Sensing of Environment*, **212**, 60-78. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.032>
- [2] 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, 157.
- [3] 徐玲慧, 章磊, 蔡俊, 等. 土地利用对淮河流域安徽段产水量时空演变影响[J]. 安庆师范大学学报(自然科学版), 2024, 30(2): 90-96.
- [4] 李爱娟, 徐光来, 杨强强, 等. 淮河上游产水服务空间分异及其影响因素探测[J]. 淮阴师范学院学报(自然科学版), 2023, 22(4): 321-327.
- [5] 高超, 李学文, 孙艳伟, 等. 淮河流域夏玉米生育阶段需水量及农业干旱时空特征[J]. 作物学报, 2019, 45(2): 297-309.
- [6] Basha, U., Pandey, M., Nayak, D., Shukla, S. and Shukla, A.K. (2024) Spatial-Temporal Assessment of Annual Water Yield and Impact of Land Use Changes on Upper Ganga Basin, India, Using Invest Model. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, **28**, Article ID: 04024003. <https://doi.org/10.1061/jhtrbp.hzeng-1245>
- [7] 刘美娟, 仲俊涛, 王蓓, 等. 基于 InVEST 模型的青海湖流域产水功能时空变化及驱动因素分析[J]. 地理科学, 2023, 43(3): 411-422.
- [8] 杨洁, 谢保鹏, 张德昱. 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.
- [9] Hua, D., Mo, X., Hu, S., et al. (2025) Evolutionary Mechanisms of Water Conservation Services in the Yarlung Zangbo River. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **58**, Article ID: 102197. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102197>
- [10] 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.
- [11] 韦绪卉, 汤弟伟. 武陵山区产水量时空变化及驱动因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2026, 35(1): 116-131.
- [12] 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.
- [13] 胡砚霞, 于兴修, 廖雯, 等. 汉江流域产水量时空格局及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(1): 73-82.
- [14] Wei, Q., Abudurehman, M., Halike, A., Yao, K., Yao, L., Tang, H., *et al.* (2022) Temporal and Spatial Variation Analysis of Habitat Quality on the Plus-Invest Model for Ebinur Lake Basin, China. *Ecological Indicators*, **145**, Article ID: 109632. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109632>
- [15] Shi, P., Zhou, D., Jiang, J., Huang, X., Zhang, J., Dong, Q., *et al.* (2025) Spatiotemporal Evolution Pattern of Water Yield Service of Ecosystems in the Shule River Basin, Northwest China, Integrating Future Climate and Land Use Changes. *Ecological Indicators*, **181**, Article ID: 114452. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114452>