

# 中国南北方过渡带水源涵养服务时空演变特征及其影响因素

——以豫南地区为例

祁玉馨,董孝斌,肖晓民,闫逸晨,叶巧茹

(北京师范大学地理科学学部自然资源学院,北京100875)

**摘要:** [目的] 探讨豫南地区水源涵养服务的时空演变特征及其影响因素,为中国南北方过渡带水资源管理提供决策参考。[方法] 基于 InVEST 模型对 2000—2020 年豫南地区的产水服务和水源涵养服务进行了定量评估,结合空间自相关分析水源涵养的空间聚集情况,借助最优参数地理探测器探究水源涵养服务的主要影响因子,结合地理加权回归模型在局部空间上揭示了不同因子对水源涵养服务的影响程度及方向。[结果] ①2000—2020 年豫南地区产水量和水源涵养量均呈现显著下降趋势,产水量由  $3.56 \times 10^{10} \text{ m}^3$  下降至  $2.65 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,水源涵养量由  $1.87 \times 10^9 \text{ m}^3$  下降至  $1.23 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。②豫南地区水源涵养服务在空间分布上存在明显的聚集情况,以“高一高”聚类和“低—低”聚类为主。③气候因素是水源涵养服务空间异质性形成的主要影响因素,社会经济因素对其影响较小。④在局部空间上,降水量,NDVI 和 GDP 对豫南地区水源涵养服务呈现正向作用,而实际蒸发和人口密度呈现负向作用。[结论] 应注重优化豫南地区的土地利用结构,关注南水北调中段工程,对水资源进行合理分配,保障其水生态安全和水环境健康,促进区域水资源的可持续发展。

**关键词:** 水源涵养服务; 产水量; 豫南地区; 地理探测器; 地理加权回归

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0337-11

中图分类号: X171.1

**文献参数:** 祁玉馨,董孝斌,肖晓民,等.中国南北方过渡带水源涵养服务时空演变特征及其影响因素[J].水土保持通报,2025,45(2):337-347. Qi Yuxin, Dong Xiaobin, Xiao Xiaomin, et al. Spatiotemporal evolution of water conservation services in north-south transition zone of China and its influencing factors [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 337-347. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.034; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.02.034.

## Spatiotemporal evolution of water conservation services in north-south transition zone of China and its influencing factors

—A case study in Southern Henan Province

Qi Yuxin, Dong Xiaobin, Xiao Xiaomin, Yan Yichen, Ye Qiaoru

(School of Natural Resources, Faculty of

Geographic Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** [Objective] The spatiotemporal evolution of water conservation services and its influencing factors in Southern Henan Province was explored, in order to provide decision-making references for water resources management in the north-south transition zone of China. [Methods] The water yield and water conservation services in South Henan Province from 2000 to 2020 were quantitatively assessed based on the InVEST model. The spatial aggregation of water conservation services was analyzed with spatial autocorrelation. The main influencing factors of water conservation services were explored with the help of optimal parameters-based geographical detector. And the degree and direction of the influences of different factors on water

收稿日期: 2024-09-12

修回日期: 2024-12-09

采用日期: 2024-12-09

资助项目: 国家自然科学基金项目“面向高质量发展的生态系统健康与人类福祉关系及实现机制研究: 以新疆玛纳斯河流域为例”(42171275); 第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK0608)

第一作者: 祁玉馨(1999—), 女(汉族), 山东省海阳市人, 博士研究生, 研究方向为生态系统服务与碳中和。Email: yxqi@mail.bnu.edu.cn.

通信作者: 董孝斌(1973—), 男(汉族), 河北省张家口市人, 博士, 教授, 主要从事碳中和、产业生态学、生态系统服务与人类福祉等方面的研究。Email: xbdong@bnu.edu.cn.

conservation services in localized space were revealed by combining with the geographically weighted regression model. [Results] ① From 2000 to 2020, water production and conservation services in Southern Henan Province showed a significant downward trend, with the water yield falling from  $3.56 \times 10^{10} \text{ m}^3$  to  $2.65 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , and water conservation declining from  $1.87 \times 10^9 \text{ m}^3$  to  $1.23 \times 10^9 \text{ m}^3$ . ② There is clear aggregation in the spatial distribution of water conservation services in Southern Henan Province, with “high-high” and “low-low” aggregations dominating. ③ Climatic factors are the main elements influencing the formation of spatial heterogeneity in water conservation services; socioeconomic factors have less influence. ④ Locally, precipitation, NDVI, and GDP had positive effects on water conservation services in Southern Henan Province, whereas actual evapotranspiration and population density displayed negative effects. [Conclusion] Attention should be paid to optimizing the land use structure of Southern Henan Province, focusing on the central route of the south-north water transfer project, reasonably allocating water resources to ensure ecological security and environmental health, and promoting the sustainable growth of regional water resources.

**Keywords:** water conservation services; water yield; Southern Henan Province; geographical detector; geographically weighted regression

生态系统为人类活动提供了基本保障<sup>[1]</sup>,作为重要的生态系统服务之一,水源涵养服务是指生态系统截留、吸收和储存降水的功能,其不仅能够维护城市和流域的生态健康,也能够提供多样化的生态产品<sup>[2-3]</sup>。随着全球气候变化和城市化的快速发展,城市下垫面发生改变,水资源短缺、水环境恶化、水资源空间分布不均衡等现象愈加严重,产水、蓄洪和水质净化等功能均发生了深刻变化。生态过程受到严重影响,生态环境持续恶化,脆弱性和敏感性不断增加。水源涵养服务关乎生态文明建设和水旱灾害防御等国计民生,因此,如何维持并提升水源涵养服务成为区域生态管理和可持续发展的核心挑战。

水源涵养服务的研究最初起源于森林水文学的相关讨论<sup>[4]</sup>,主要反映在降水再分配过程中树木、灌木、凋落物和土壤的复杂作用,水源涵养量的变化直接影响区域气候变化和植被的生长<sup>[5-6]</sup>。目前,水源涵养服务的科学研究主要集中于水源涵养服务量化评估<sup>[7]</sup>、空间分布特征<sup>[8]</sup>和影响因素<sup>[9]</sup>等方面。水源涵养服务的量化评估是实现水资源有效管理的基础,由于水源涵养服务存在空间分布异质性,研究其时空演变特征能够反映其动态性及未来发展趋势,探究其影响因素有利于水资源的管理。水源涵养服务的评价方法主要包括储水量法、水文过程法、多指标法和多模型集成法四大类<sup>[10]</sup>。其中,由于具有适用性广、操作简单等优点,基于水文过程研究的水量平衡法成为目前评估水源涵养服务应用最广泛的方法<sup>[11]</sup>。量化水源涵养服务的工具包括 InVEST 模型<sup>[8]</sup>, SWAT 模型<sup>[12]</sup>和 SCS 模型<sup>[13]</sup>等,其中, InVEST 模型产水模块以水量平衡原理为基础,通过评估产水量进而量化研究区域的产水服务,具有数据易获得、操作简便等特点。基于产水量结合地形指数和流速系数等数据可计算水源涵养量,已成为目前水源涵养服

务评估的主要方法。水源涵养服务的影响因素研究主要采取相关性分析<sup>[14]</sup>、最小二乘法回归模型 (OLS)<sup>[15]</sup>、地理探测器<sup>[16]</sup>和地理加权回归模型等<sup>[17]</sup>方法,其中地理探测器可以识别水源涵养服务的主要影响因子以及双因子对水源涵养服务的交互作用。地理加权回归模型可以从地理空间的视角探究不同影响因子对水源涵养服务的驱动作用,量化局部空间上的影响程度,有利于水源涵养服务的分区管理。目前,从地理空间的角度探究水源涵养服务影响因素空间异质性的相关研究较少,因此,利用地理探测器识别水源涵养服务的主要影响因子,结合地理加权回归模型探究局部空间影响因子的影响程度,有利于进一步研究水源涵养服务驱动机制,并为地区的水资源管理提供科学依据。

豫南地区位于中国南北方的过渡地带,地形复杂,物种资源丰富,展现出多样的生态特征,同时极端气候事件频发,水资源利用面临过度开采、不合理分配和空间分布不均的困境,对当地居民的福祉产生了深远的影响。近年来,豫南地区大力推进了一系列水利工程建设,涵盖防洪减灾、水资源优化配置和水生态修复等内容。南水北调工程是世界上最大的水利工程之一<sup>[18]</sup>,南阳市是南水北调中线工程核心水源地和渠首所在地;驻马店市南水北调中线工程被列入省重点水利工程项目和市重点民生项目;信阳市推出“四水共治”及城市供水工程,致力于完善城市水网,加强水生态修复与水环境治理。然而,豫南地区依然面临地下水水质差、水灾频发等挑战,严重影响了农业和居民生活。由于目前针对南北方过渡带水源涵养服务的研究较少,本研究选择豫南地区为研究对象,分析水源涵养服务的时空演变特征及其影响因素,识别关键水源涵养区域,以保障南北方过渡带的水源安

全及生态功能。综上所述,本研究基于 InVEST 模型,结合地形指数等数据量化 2000—2020 年豫南地区水源涵养服务,分析其时空演变特征,借地理探测器和地理加权回归模型探究其影响因素及其空间分异特征,并划分水源涵养功能重要性空间分区,以期为南北方过渡带水资源的可持续发展提供科学参考。

## 1 研究区概况

豫南地区位于河南省南部,下辖南阳市、驻马店市、信阳市 3 个地级市和邓州市、固始县、新蔡县 3 个河南省直辖县(市),总面积约  $5.80 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,位于中国南北方过渡地带,在中原经济区建设中处于重要地位,是河南省重要的农业生产基地。其生物资源丰富,地形复杂多样,整体呈西高东低态势。2022 年,南阳市年均气温为  $16.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年降水量为  $544.7 \text{ mm}$ ,驻马店市年均气温为  $16.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年降水量为  $802.3 \text{ mm}$ ,

信阳市年均气温为  $17.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年降水量为  $1112.8 \text{ mm}$ 。豫南自然灾害频繁,面临着一系列生态问题,水土流失较为严重,水资源相对短缺,对农业生计构成了严重威胁。同时,过度的水资源开采和不合理的水资源分配也导致了水生态系统的破坏和水质下降,对当地自然生态环境以及人类的生存和发展带来了深远的影响。在全球气候变化的大背景下研究豫南地区的水源涵养服务演变特征及驱动因素,对当地的水资源合理利用具有重要意义。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究数据

本研究基于土地利用类型、降水量、气温、潜在蒸散发、数字高程模型(DEM)、归一化植被指数(NDVI)、土壤属性、人口密度、地区生产总值(GDP)等基础数据进行研究,主要数据来源如下(表 1)。

表 1 研究数据来源  
Table 1 Data sources of study

数据类型	数据形式	数据来源	分辨率
土地利用类型	栅格	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )	30 m
降水量	栅格	国家地球系统科学数据中心( <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a> )	1 km
气温	栅格	国家地球系统科学数据中心( <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a> )	1 km
潜在蒸散发量	栅格	国家地球系统科学数据中心( <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a> )	1 km
实际蒸散发量	栅格	InVEST 模型输出	30 m
数字高程模型(DEM)	栅格	地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )	30 m
归一化植被指数(NDVI)	栅格	美国地质勘探局的 MOD13Q1 产品( <a href="https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13_q1_v061/">https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13_q1_v061/</a> )	250 m
土壤属性	栅格	中国科学院南京土壤研究所( <a href="https://soildata.issas.ac.cn/">https://soildata.issas.ac.cn/</a> )	1 km
人口密度	栅格	WorldPop Hub( <a href="https://hub.worldpop.org/">https://hub.worldpop.org/</a> )	1 km
地区生产总值(GDP)	栅格	中国科学院资源与环境科学数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	1 km

### 2.2 研究方法

2.2.1 产水量 InVEST 模型产水(water yield)模块将产水量定义为各个栅格单元的降水量减掉实际蒸散发量。产水量的计算公式为:

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

式中: $Y_{xj}$  为栅格  $x$  中土地覆被类型  $j$  的年产水量(mm);  $A_{xj}$  为栅格  $x$  中土地覆被类型  $j$  的实际蒸散量(mm);  $P_x$  为栅格  $x$  的降水量(mm);  $A_{xj}/P_x$  为实际蒸散量与降水量的比值,具体计算公式为:

$$\frac{A_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + 1/R_{xj}} \quad (2)$$

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

$$R_{xj} = \frac{k_{ij} \times ET_0}{P_x} \quad (4)$$

式中: $R_{xj}$  为土地覆被类型  $j$  上栅格单元  $x$  的 Budyko 干燥指数;  $\omega_x$  为植被年可利用水量与预期降水量的比值;  $Z$  为 Zhang 系数;  $k_{ij}$  是植物蒸散系数;  $P_{AWC}$  代表植物可利用含水量,采用周文佐等提出的 AWC 模型计算,具体计算公式<sup>[19]</sup>为:

$$P_{AWC} = 54.509 - 0.132P_{\text{sand}} - 0.003P_{\text{sand}}^2 - 0.055P_{\text{silt}} - 0.006P_{\text{silt}}^2 - 0.738P_{\text{clay}} + 0.007P_{\text{clay}}^2 - 2.688P_{\text{OM}} + 0.501P_{\text{OM}}^2 \quad (5)$$

式中: $P_{\text{sand}}$  为土壤砂粒含量(%);  $P_{\text{silt}}$  为土壤粉粒含量(%);  $P_{\text{clay}}$  为土壤黏粒含量(%);  $P_{\text{OM}}$  为土壤有机质含量(%).

模型输入变量包括:降水量、潜在蒸散发、土层深度、植物可利用水量、土地利用、流域、流速系数、植物蒸散系数和  $Z$  参数,植物可利用水量根据土壤质地的砂粒含量、粉砂粒含量、黏粒含量和土壤有机质含量

计算得出,植物蒸散系数参考文献[20—21],结合研究区进行校正。

Zhang 系数能够反映当地降水格局和水文地质特征,其值在 1~30 之间变化<sup>[22]</sup>。本研究产水模块 Zhang 系数通过《河南省水资源公报》进行设定,2000,2010,2020 年 Zhang 系数赋值为 5,4,28 时,输出结果与水资源公报公布的水资源总量最为接近,相对误差控制在 10% 以内。

2.2.2 水源涵养量 基于 InVEST 模型计算产水量后,结合地形指数、流速系数和土壤饱和导水率计算水源涵养量<sup>[23]</sup>,具体计算公式为:

$$W_R = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times I_T}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{\text{sat}}}{300}\right) \times Y_x \quad (6)$$

式中: $W_R$  为水源涵养量(mm);  $K_{\text{sat}}$  为土壤饱和导水率(cm/d),根据式(7)计算;  $V$  为流速系数;  $I_T$  为地形指数,无量纲,根据式(8)计算;  $Y_x$  为产水量。

$$K_{\text{sat}} = 60.96 \times 10^{(-0.6 + 0.012 \ 6P_{\text{sand}} - 0.006 \ 4P_{\text{clay}})} \quad (7)$$

$$I_T = \lg\left(\frac{D}{S \times P_{\text{slope}}}\right) \quad (8)$$

式中: $P_{\text{sand}}$  为土壤砂粒含量(%);  $P_{\text{clay}}$  为土壤黏粒含量(%);  $D$  为集水区栅格数量,无量纲;  $S$  为土层深度(mm);  $P_{\text{slope}}$  为百分比坡度。

2.2.3 空间自相关 空间自相关可以用来表示事物或现象之间在空间上的依赖关系,本研究利用 Geoda 软件计算豫南地区水源涵养服务的全局与局部空间自相关,从而揭示其空间聚集情况。

全局空间自相关计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

局部空间自相关计算公式为:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S_x^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (10)$$

式中: $I$  为全局空间自相关指数;  $I_i$  为局部空间自相关指数;  $n$  区域个数;  $x_i$  和  $x_j$  分别为样本  $i, j$  的指数值;  $\bar{x}$  为样本指数平均值;  $w_{ij}$  为空间关系权重矩阵;  $S_x^2$  为观测单元  $x_j$  的方差。

2.2.4 地理探测器 地理探测器是一种探究地理空间分异程度及主要驱动因子的工具<sup>[24]</sup>,本研究基于 R 语言“GD”包运行参数最优地理探测器,从而揭示豫南地区水源涵养服务的主要驱动因子。因子探测的计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (11)$$

式中: $h=1 \cdots L$ ;  $L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分层(strata),即分类或分区;  $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的单元数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别是层  $h$  和全区的  $Y$  值的方差。

豫南地区水源涵养服务空间异质性的形成是自然和社会经济等多重影响因素相互作用下的复杂结果,结合前人研究经验<sup>[15-16, 25]</sup>,基于数据可获得性,本研究从气候、地形地貌、植被和社会经济 4 方面选取 9 个驱动因子进行地理探测(表 2)。

表 2 豫南地区水源涵养服务空间分异的影响因子  
Table 2 Influencing factors of spatial differentiation of water conservation services in Southern Henan Province

影响因素	影响因子	编号
气候	降水量	$X_1$
	气温	$X_2$
	潜在蒸散发量	$X_3$
	实际蒸散发量	$X_4$
地形地貌	DEM	$X_5$
	坡度	$X_6$
植被	NDVI	$X_7$
社会经济	人口密度	$X_8$
	GDP	$X_9$

2.2.5 地理加权回归 地理探测器是能够反映各驱动因子对水源涵养服务的整体解释度,但无法确定地理空间局部的影响程度。地理回归加权(GWR)通过添加空间位置参数生成局部系数,更好地考虑了空间异质性。其计算公式为:

$$y_k = \beta_0(u_k, v_k) + \sum_{i=1}^n \beta_i(u_k, v_k) x_{ki} + c_k \quad (13)$$

式中: $y_k$  为水源涵养值;  $x_{ki}$  为景观指数;  $n$  为参与分析的空间单元总数;  $c_k$  为随机误差项;  $(u_k, v_k)$  样本  $k$  的空间位置;  $\beta_0(u_k, v_k)$  是位置  $k$  处的截距;  $\beta_i(u_k, v_k)$  是样本  $k$  的第  $i$  个自变量的系数。

### 3 结果与分析

#### 3.1 产水量时空演变特征

2000—2020 年豫南地区产水深度空间分布格局见图 1。从时间上看,豫南地区产水总量和产水深度呈现逐年下降的趋势,2000,2010,2020 年产水总量分别为  $3.56 \times 10^{10}$ ,  $2.78 \times 10^{10}$ ,  $2.65 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$ ,产水深度平均值分别为 587.33, 460.22 和 437.55 mm,20 a 间产水量减少幅度为 25.5%。从空间上看,产水深度呈

现“北低南高、西低东高”的格局,2000 年产水高值区域主要分布于邓州市、南阳市和驻马店市南部及信阳北部。2010,2020 年的产水高值区域主要集中在信阳

市和固始县。2000—2010 年产水高值区存在明显的南移趋势,2010—2020 年豫南北部产水能力明显减退。

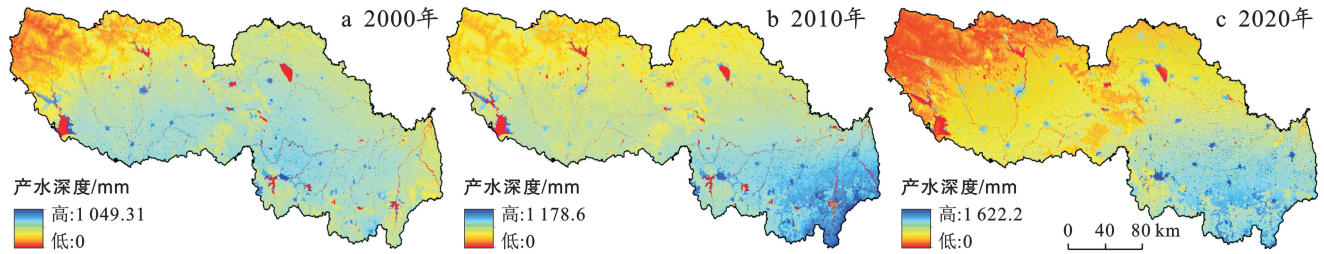


图 1 豫南地区 2000—2020 年产水量空间分布

Fig.1 Spatial distribution of water yield in South Henan Province from 2000 to 2020

### 3.2 水源涵养服务时空演变特征

2000—2020 年豫南地区水源涵养服务空间分布格局见图 2。从时间上看,豫南地区水源涵养总量和水源涵养深度呈现逐年下降的趋势,2000,2010,2020 年水源涵养总量分别为  $1.87 \times 10^9$ ,  $1.55 \times 10^9$ ,  $1.23 \times 10^9$   $m^3$ ,水源涵养深度平均值分别为 30.99,25.68 和

20.35 mm,2000—2020 年间豫南地区水源涵养减少幅度为 34.33%。从空间上看,南阳市北侧和信阳市南侧具有较高的水源涵养量,南阳市南部和驻马店市北部的的水源涵养量则较低。虽然水源涵养服务局部有所增加,但是整体以减少为主,其中,豫南地区西北部减少得尤为明显。

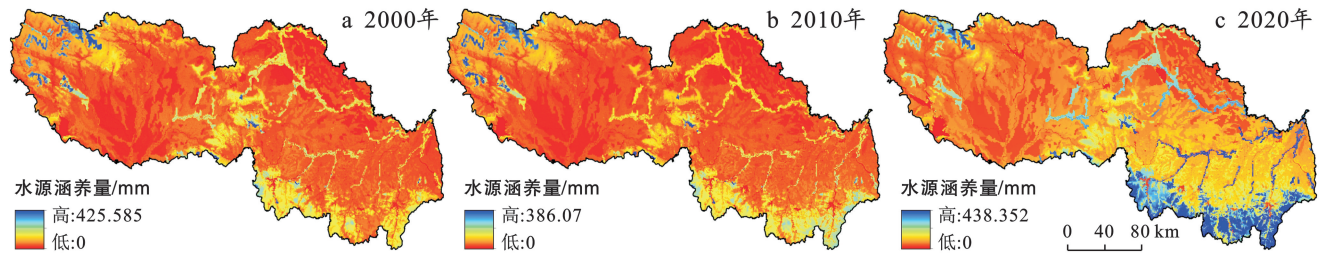


图 2 豫南地区 2000—2020 年水源涵养服务空间分布

Fig.2 Spatial distribution of water conservation services in South Henan Province from 2000 to 2020

### 3.3 水源涵养服务空间自相关分布

2000,2010,2020 年,豫南地区水源涵养服务的全局空间自相关指数分别为 0.743,0.780,0.815 ( $p = 0.001$ ),表明其具有明显的空间聚集特征。局部空间自相关则清晰地展示出豫南地区水源涵养服务空间分异特征(图 3)。

豫南地区水源涵养服务主要表现出“高一高”聚集和“低—低”聚集类型,其中,2000,2010 年“高一高”聚集类型主要集中在豫南地区的西北侧和南侧,而 2020 年豫南地区南部的“高一高”聚集类型面积则呈现显著扩张的趋势。“低—低”聚集类型主要位于豫南地区的中部,且具有向西北延展的趋势。

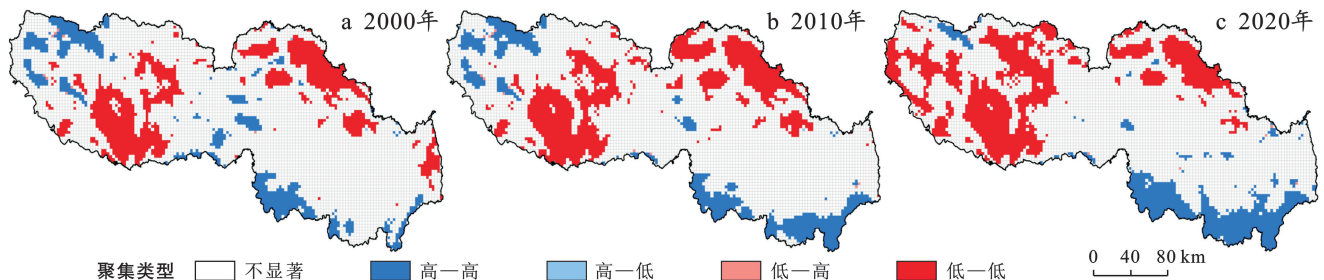


图 3 豫南地区 2000—2020 年水源涵养服务空间分异特征

Fig.3 Spatial differentiation of water conservation services in South Henan Province from 2000 to 2020

### 3.4 水源涵养服务空间异质性影响因素分析

3.4.1 主要影响因子识别 基于 R 语言“GD”包运行参数最优地理探测器,识别豫南地区水源涵养服务的主要影响因子(图 4)。2000—2020 年潜在蒸散发量对水源涵养服务的影响程度最高,解释力平均值为 0.254 2,其次为实际蒸散发量,解释力平均值为 0.248 7。GDP 对水源涵养服务的影响程度最低,平均解释力仅有 0.069 1。2000—2020 年各影响因子对水源涵养服务的解释力平均值排序如下:潜在蒸散发量(0.254 2) > 实际蒸散发量(0.248 7) > 降水量(0.205 7) > 坡度(0.203 7) > 人口密度(0.181 5) > DEM(0.177 0) > 气温(0.140 6) > NDVI(0.078 6) > GDP(0.069 1)。

3.4.2 影响因子的交互作用 地理探测器交互探测结果见图 5。相较于单因子,双因子的共同作用对豫南地区水源涵养服务的影响程度更为显著。2000 和 2010 年,潜在蒸散发量和实际蒸散发量的交互作用

对水源涵养服务的影响效应最强,降水量和 GDP 的交互作用影响力最弱。2020 年降水量和其他因子的交互作用对水源涵养服务的影响效应最强,均在 0.40 以上,气温和 NDVI 的交互作用影响力最弱,仅有 0.08。

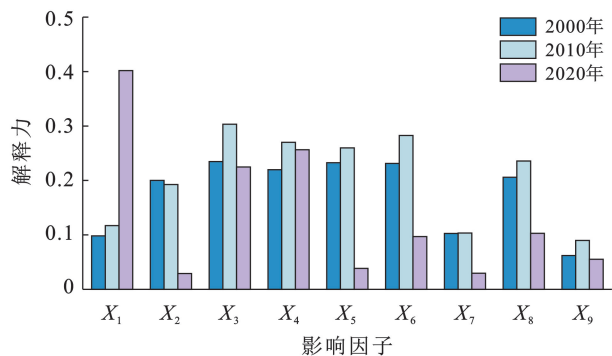


图 4 豫南地区水源涵养服务的因子探测结果

Fig.4 Factor detection results of water conservation services in South Henan Province from 2000 to 2020

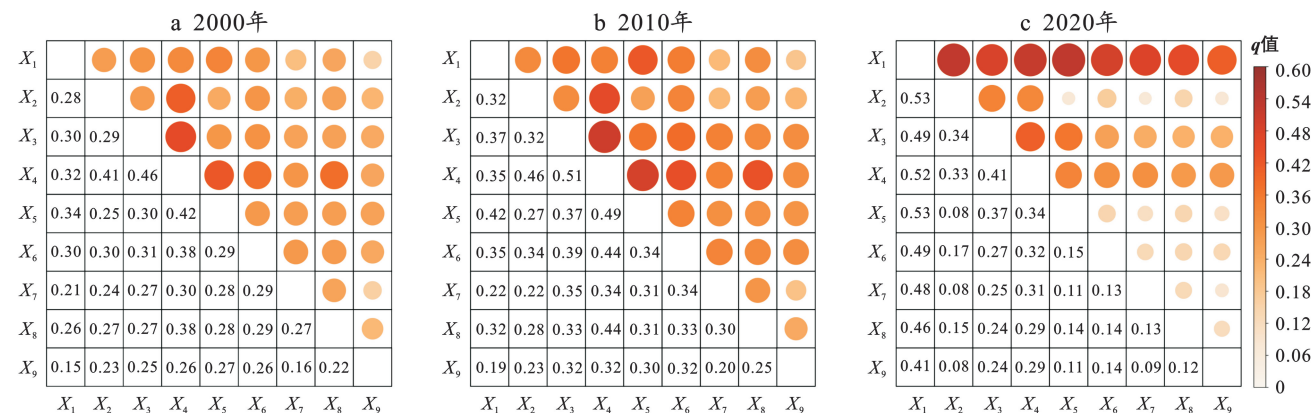


图 5 豫南地区水源涵养服务的交互探测结果

Fig.5 Interaction detection results of water conservation services in South Henan Province from 2000 to 2020

3.4.3 影响因子的空间分异 基于普通最小二乘法(OLS)进行多重共线性检验,剔除方差膨胀因子(VIF)大于 5 的影响因子,最终确定降水量、实际蒸散发、NDVI、人口密度和 GDP 共 5 个影响因子进行地理加权回归分析,结果见图 6。不同影响因子与水源涵养服务的回归系数呈现显著的空间分异,其中,降水量、NDVI 和 GDP 对豫南地区的水源涵养服务的空间影响整体上呈现正向作用,降水量和 NDVI 在西北部和南部的正向影响最为显著。实际蒸散发和人口密度则主要呈现负向作用,实际蒸散发对水源涵养服务的负向影响由西北向东南逐渐减弱,东南部呈现正向影响。人口密度的显著负向影响具有向东南部扩散的趋势。总体而言,各个影响因子并不呈现单一的正向或负向作用,在不同影响因子的复杂作用下形成了豫南地区水源涵养服务的空间分布格局。

## 4 讨论

### 4.1 豫南地区产水量及水源涵养服务的时空变化特征

本研究借助 InVEST 模型从地理空间视角量化了豫南地区产水量和水源涵养量,研究结果表明,2000—2020 年豫南地区产水量呈现先降低后增加的趋势,空间上呈现“北低南高、西低东高”的分布格局。基于产水量的空间分布特征可以明显看出,未利用地和建设用地的产水深度最高,耕地产水深度大于草地和林地,而水体的产水深度最低,这与前人研究结果较为一致<sup>[26-27]</sup>。究其原因,主要在于建设用地的植被覆盖度最低,地形最为平坦,人类干扰活动最强烈,对水资源的拦截能力和蒸散发量最低。根据产水量原理,在降水量相等的情况下,由于其蒸散发能力较弱,因此产水量最高。需要注意的是,建设用地的产水量中,有很

大一部分是径流量<sup>[28]</sup>,当产水量减掉径流量后,剩余水资源量为水源涵养量<sup>[29]</sup>,因此,虽然建设用地产水量较高,但其水源涵养量却不多。耕地的产水量高于林地,原因在于,耕地受人类干扰较强,相较于林地,其植被

覆盖度较低,地形起伏度较小,水资源蒸散发量较少,因此产水较多。林地由于具有最丰富的植被覆盖,地势起伏较大,对降水的拦截能力最强,对应的蒸散发量较多,所以产水量最少<sup>[28]</sup>,但水源涵养能力最强。

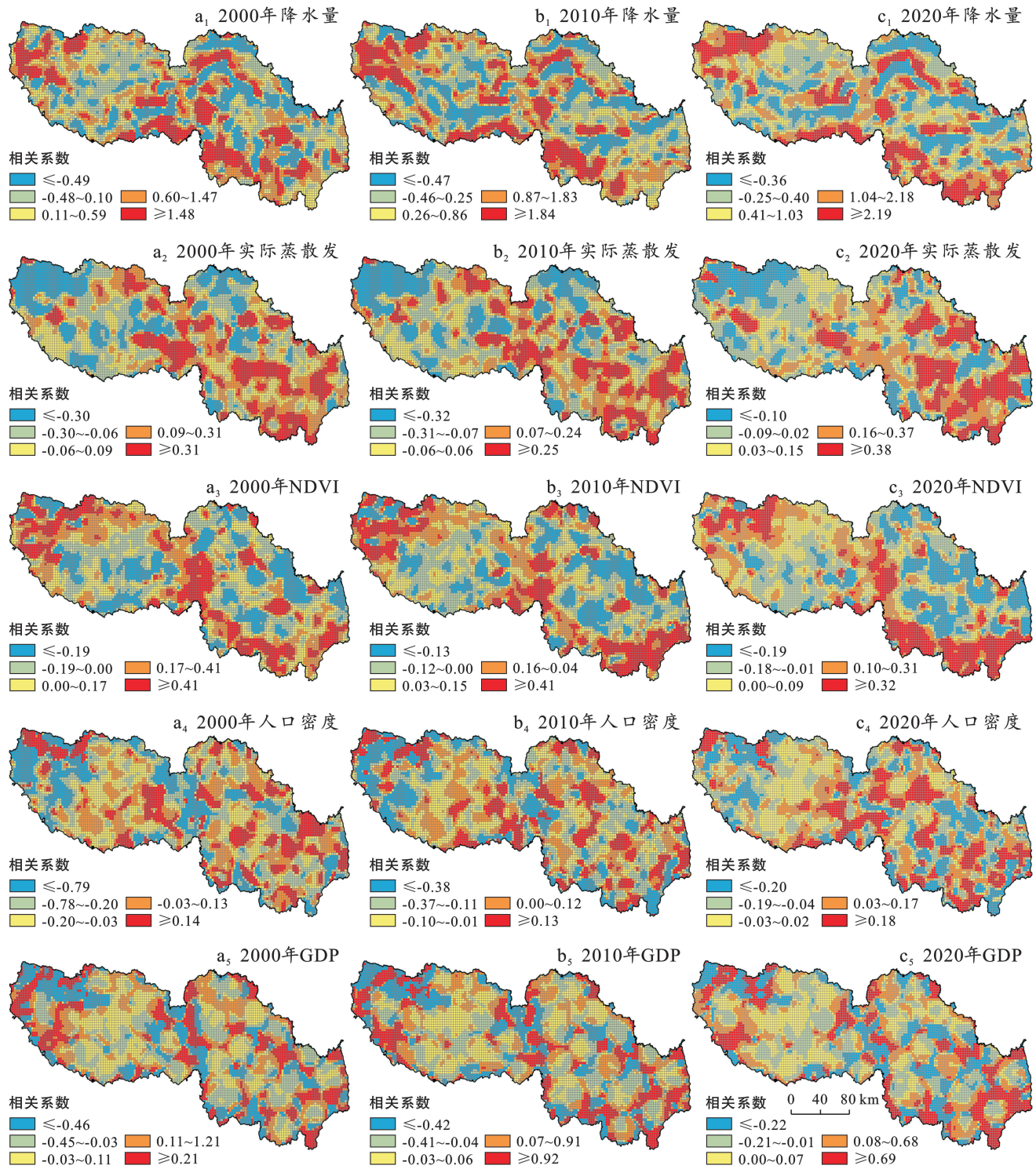


图 6 豫南地区水源涵养服务影响因子与水源涵养服务相关系数的空间分布格局

Fig.6 Spatial distribution pattern of correlation coefficients between affecting factors and water conservation services in South Henan Province

豫南地区产水高值区域有向南移的趋势,2000年主要集中在南阳市和驻马店市南部及信阳北部,而

2010和2020年则明显向南部移动,集中在豫南地区最南部的信阳市和固始县。这与豫南地区降水分布

格局的改变密切相关,2000 年降水量高值区集中于豫南中部偏下地区,而 2010,2020 年降水则主要集中在南部,丰富的降水为豫南南部增加了大量的产水。豫南地区的水源涵养服务空间分布“高一高”聚集类型具有明显的扩张趋势,与此同时,“低—低”聚集类型也存在中部向西北延展的趋势,表明高低极值分布面积在扩张,空间异质性不断增强,水资源分布不均衡现象愈加严重,这无疑增加了当地水生态管理的难度。

#### 4.2 豫南地区水源涵养服务的主要与潜在驱动因素

根据经验对地理探测的解释变量进行分类,分类结果主观性较强<sup>[30-31]</sup>,本研究改进了这一点,利用 R 语言“GD”包运行参数最优地理探测,解释变量的分类更加具有科学性。

整体来看,气候因素对豫南地区水源涵养服务的影响最强,潜在蒸散发量、实际蒸散发量和降水量对水源涵养服务的解释程度高于其他影响因子。其次为坡度和人口密度,GDP 的解释力最弱,与前人研究结果类似<sup>[17,32]</sup>。原因可能在于,根据水量平衡原理,水源涵养量直接受降水量和实际蒸散发量影响<sup>[33]</sup>,而人类活动可能会对城市下垫面产生干扰,影响土地利用结构,进而导致雨水拦截、径流调节等生态功能的改变,从而影响水源涵养服务的空间分布。

运用地理加权回归计算局部空间解释变量对水源涵养服务的影响系数,能够量化在不同区域自变量对水源涵养服务的影响程度及方向。相较于地理探测器,地理加权回归具有空间化影响系数的优势。降水量,GDP 和 NDVI 对豫南地区水源涵养服务主要产生积极影响,主要原因可能在于,根据水量平衡公式,随着降水量的增加,产水量有所增加,区域水源涵养的能力也有所上升。NDVI 增加,对降水的拦截作用增强,储蓄水资源的能力有所提升,水源涵养量相对应增加。随着社会经济的发展,人类保护水资源的意识也随之逐渐增强,可能会提升区域水源涵养能力。实际蒸散发和人口密度对豫南地区水源涵养服务的影响主要呈现负面作用,原因可能在于,实际蒸散发越大,储存水含量越低,而人口密度越多,建设用地的扩张能力越强,地表径流量越高,从而降低了区域的水源涵养功能。

#### 4.3 豫南地区水源涵养功能重要性空间分区

本研究利用 ArcMap 10.8 采取分位数分类法对 2020 年豫南地区水源涵养服务进行重要性等级划分,并进行空间分区<sup>[15,23]</sup>(图 7)。其中,水源涵养较重要区面积占比最多,为 25.87%,其次为一般重要区(20.08%),中等重要区(18.15%)和高度重要区(18.44%)面积比例相近,极重要区比例最低,仅为

17.45%。从空间分布上看,一般重要区主要集中于豫南地区西部和北部,主要位于信阳市内和驻马店市北部。此区域以耕地为主要土地利用类型,植被覆盖度较低,降水较少,水源涵养能力较弱。但是由于丹江口水库分布在南阳市淅川县,为南水北调中线工程的核心水源地,因此应将其作为水源保护区重点管理。高度重要区和极重要区主要集中在豫南地区东南部,主要分布在信阳市和固始县,被划为豫南地区水源涵养服务的重要生态区,其降水丰富,植被覆盖度高,以林地为主要土地利用类型,对降水的拦截能力最强,因此水源涵养能力较强。水源涵养服务的重要性分级是区域水资源管理和综合保护的基础,为实现豫南地区水资源的可持续发展,水源涵养服务重要生态区需被纳入政策管理的优先保护区域。

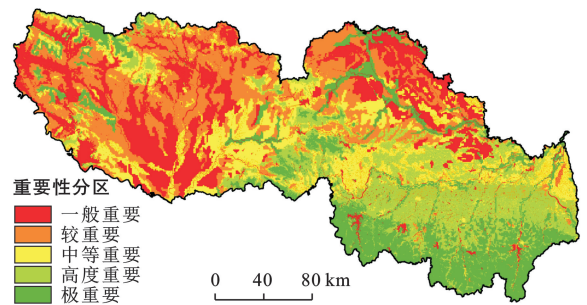


图 7 水源涵养功能重要性分级空间分布

Fig.7 Spatial distribution of importance level of water conservation capacity

#### 4.4 政策建议

南北方过渡带具有独特的气候、土壤和生物多样性,对国家生态安全意义重大。随着全球气候变暖的趋势,未来人类对控制水资源功能的退化将面对更多挑战性。然而,土地利用作为人类可控制的行为,有助于减轻水资源功能的衰退。根据本研究结果可知,不同土地利用类型的产水量具有显著差异,城市生态系统的产水量远大于自然生态系统的产水量,这是快速城市化进程所改变的不透水下垫面所导致的<sup>[27]</sup>。城市生态系统产水量虽然很高,但大部分都通过地表径流损失掉了,因此其水源涵养能力却很低。豫南地区水资源量年际间差距较大,这种不确定性为水资源规划带来了一定难度。在进行土地利用优化时,应注重引导土地利用转移的类型和方向,城镇化的快速推进有利于产水量的增加,但也可能带来严重的雨洪灾害。林地产水量较少,但其水源涵养能力较强,在城镇外围维持高植被覆盖的林地,有利于拦截大量的径流,避免造成洪涝灾害,同时也有利于储蓄雨水、调节气候,减少旱灾的发生。

目前,河南省水资源利用效率在空间上存在差距,

水资源调配网络也有待完善。在水源涵养服务重要分区方面,可将一般重要区划分为主要受水区,采取重点补水政策,结合居民需水量,计算补水基数。同时大力推进水污染治理,改善水环境,对高用水、高污染企业进行严格管控<sup>[34]</sup>。将水源涵养服务高度重要区和极重要区划分为水源涵养服务重要生态区,在重点和优先保护该区域水资源的同时,也要注重防止洪涝灾害的发生。

本研究结果可以为调用水提供依据,计算当地需水量,结合产水量和水源涵养量,估算具体调用水量。在南水北调工程中,应注重水资源与经济社会和谐发展,可以通过构建南水北调工程运行效果模型的方式,对水资源状况进行定时定量动态监测和水量分配,精准把控当地水资源分配情况。

#### 4.5 不足与局限性

本研究基于 InVEST 模型、最优地理探测器和地理加权回归模型探讨了豫南地区水源涵养服务的时空变化特征及驱动因素,并提出水资源管理建议。但本研究也存在不足之处,InVEST 模型未将复杂的地形地貌考虑在产水模块中,结果具有不确定性。且人类社会活动也可能对产水量和水源涵养量产生影响,但在研究方法中并未将相关参数考虑在内。同时,南水北调工程如何影响豫南地区水资源量也是值得深入探究的内容,但在本研究中并未体现。在未来的研究中会进一步考虑更加全面的参数,深入探讨不同政策对豫南地区水资源的影响。

## 5 结论

作为典型南北方过渡带,豫南地区是南水北调中线工程的水源区,对中国水生态文明城市的建设和水资源的可持续发展具有重大战略意义。本研究基于 InVEST 模型,结合气候、地形等数据,对 2000—2020 年豫南地区的水源涵养服务进行定量评估,借助地理探测器和地理加权回归模型探究了水源涵养服务空间分异的主要驱动因子及影响程度,取得以下主要结论。

(1) 2000—2020 年,豫南地区水源涵养量均呈现持续下降的趋势,南阳市北侧和信阳市南侧具有较高的水源涵养量,南阳市南部和驻马店市北部的水源涵养量则较低。

(2) 气候因素对豫南地区水源涵养服务空间分异的形成影响程度最高,潜在蒸散发量的解释力达到 0.254 2,实际蒸散发量的解释力为 0.248 7,社会经济因素的影响则较小,GDP 的解释力仅为 0.069 1。

(3) 在豫南地区的大部分区域,降水量、NDVI 和 GDP 与水源涵养服务呈正相关,实际蒸散发和人口

密度则呈负相关。在进行水资源空间管理时,应注重结合多重影响因素的共同作用制定相关政策。

#### 参考文献 (References)

- [1] Guan Dongjie, Chen Shi, Zhang Yuxiang, et al. Influencing factors and the establishment of a basin ecological compensation mechanism from the perspective of water conservation: A case study of the upper Yangtze River in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 456: 142332.
- [2] Lin Bingqing, Chen Xingwei, Yao Huaxia, et al. Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 58: 55-63.
- [3] Xu Fei, Zhao Lingling, Jia Yangwen, et al. Evaluation of water conservation function of Beijiing River basin in Nanling Mountains, China, based on WEP-L model [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108383.
- [4] Zhou Luyao, Cui Wanglai, Yang Fan. Spatiotemporal variations and driving forces analysis of ecosystem water conservation in coastal areas of China [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 162: 112019.
- [5] Zhang Biao, Li Wenhua, Xie Gaodi, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1416-1426.
- [6] Vose J M, Sun Ge, Ford C R, et al. Forest ecohydrological research in the 21st century: What are the critical needs? [J]. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 146-158.
- [7] 王耕, 韩冬雪. 基于 InVEST 模型的大凌河上游汇水区水源涵养功能评估[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(3): 206-211. Wang Geng, Han Dongxue. Evaluation of water conservation function in Daling River catchment based on InVEST model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(3): 206-211.
- [8] 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. Liu Youyan, Liu Xingyuan, Zhang Bo, et al. Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the Loess Plateau based on InVEST model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(17): 6161-6170.
- [9] Xue Jian, Li Zongxing, Feng Qi, et al. Spatiotemporal variations of water conservation and its influencing factors in ecological barrier region, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 42: 101164.
- [10] 刘亦晟, 侯鹏, 王平, 等. 生态系统水源涵养服务功能定量评估方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(1): 275-288.

- Liu Yisheng, Hou Peng, Wang Ping, et al. Research advance on quantitative assessment methods of ecosystem water conservation service functions [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(1): 275-288.
- [11] Xu Jie, Xiao Yu, Xie Gaodi. Analysis on the spatio-temporal patterns of water conservation services in Beijing [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, 10(4): 362.
- [12] 王辉源, 宋进喜, 吴琼. 基于 SWAT 模型的秦岭北麓灞河流域水源涵养功能综合评价[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(6): 307-315.
- Wang Huiyuan, Song Jinxi, Wu Qiong. Comprehensive evaluation of water source conservation function in the Bahe River basin at the northern foot of Qinling Mountains based on SWAT model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6): 307-315.
- [13] 崔景轩, 李秀芬, 郑海峰, 等. 典型气候条件下东北地区生态系统水源涵养功能特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(9): 3026-3038.
- Cui Jingxuan, Li Xiufen, Zheng Haifeng, et al. Spatial analysis of water conservation function in Northeast China under different climatic conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3026-3038.
- [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.
- [15] 张成虎, 刘菊, 胡宝清, 等. 广西西江流域水源涵养服务空间格局及其影响因素[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(5): 1104-1113.
- Zhang Chenghu, Liu Ju, Hu Baoqing, et al. Spatial pattern and its influencing factors of water conservation services in Xijiang River basin, Guangxi [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2022, 39(5): 1104-1113.
- [16] 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.
- Lü 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.
- [17] 乔亚军, 张慧, 韩晓盈, 等. 基于地理空间角度的黑龙江省水源涵养功能变化的驱动因素分析[J]. *生态学报*, 2023, 43(7): 2711-2721.
- Qiao Yajun, Zhang Hui, Han Xiaoying, et al. Exploring drivers of water conservation function variation in Heilongjiang Province from a geospatial perspective [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7): 2711-2721.
- [18] Feng Shan, Li Lingxia, Duan Zhigang, et al. Assessing the impacts of south-to-north water transfer project with decision support systems [J]. *Decision Support Systems*, 2007, 42(4): 1989-2003.
- [19] Zhou Wenzuo, Liu Gaohuan, Pan Jianjun, et al. Distribution of available soil water capacity in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(1): 3-12.
- [20] Yang Shiliang, Bai Yang, Alatalo J M, et al. Spatio-temporal changes in water-related ecosystem services provision and trade-offs with food production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286: 125316.
- [21] 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.
- [22] 刘越, 李雨珊, 单姝瑶, 等. 甘肃祁连山国家级自然保护区水源涵养量的时空变化[J]. *草业科学*, 2021, 38(8): 1420-1431.
- Liu Yue, Li Yushan, Shan Shuyao. Spatiotemporal variability in the water conservation amount in Gansu Qilian Mountain national nature reserve [J]. *Practical Science*, 2021, 38(8): 1420-1431.
- [23] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 664-676.
- Bao Yubin, Li Ting, Liu Hui, et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in northern Shaanxi Province by InVEST model [J]. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 664-676.
- [24] 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.
- [25] 孙琪, 徐长春, 任正良, 等. 塔里木河流域产水量时空分布及驱动因素分析[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(8): 114-122.
- Sun Qi, Xu Changchun, Ren Zhengliang, et al. Spatio-temporal variation in water yield and their underlying mechanisms in Tarim River basin [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(8): 114-122.
- [26] 丁家宝, 张福平, 张元, 等. 气候与土地利用变化背景下青海湖流域产水量时空变化[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(1): 47-56.
- Ding Jiabao, Zhang Fuping, Zhang Yuan, et al. Tem-

- poral and spatial variations in water yield of the Qinghai Lake water system under climate and land use changes [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2022, 58(1):47-56.
- [27] 杜佳衡, 王锦. 基于 InVEST 模型的大理州永平县水生生态系统服务功能时空变化分析 [J]. *西部林业科学*, 2021, 50(6):91-102.
- Du Jiaheng, Wang Jin. Analysis of spatio-temporal changes of water ecosystem service function in Yongping County, Dali prefecture based on InVEST model [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2021, 50(6):91-102.
- [28] 王阳, 魏建兵, 程雨露, 等. 浑河上游新宾县土地利用演变对水源涵养能力影响评价 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4):169-176.
- Wang Yang, Wei Jianbing, Cheng Yulu, et al. Evaluation of the impact of land use evolution on water conservation capacity in Xinbin County, upper reaches of Hunhe River [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4):169-176.
- [29] Bai Yang, Ochuodho T O, Yang Jian. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 102:51-64.
- [30] 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.
- [31] 郑续, 魏乐民, 郭建军, 等. 基于地理探测器的干旱区内陆河流域产水量驱动力分析: 以疏勒河流域为例 [J]. *干旱区地理*, 2020, 43(6):1477-1485.
- Zheng Xu, Wei Lemin, Guo Jianjun, et al. Driving force analysis of water yield in inland river basins of arid areas based on geo-detectors: A case of the Shule River [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(6):1477-1485.
- [32] Wang Yunfei, Ye Aizhong, Peng Dingzhi, 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.
- [33] 吕乐婷, 任甜甜, 孙才志, 等. 1980—2016 年三江源国家公园水源供给及水源涵养功能时空变化研究 [J]. *生态学报*, 2020, 40(3):993-1003.
- Lü Leting, Ren Tiantian, Sun Caizhi, et al. Spatial and temporal changes of water supply and water conservation function in Sanjiangyuan National Park from 1980 to 2016 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3):993-1003.
- [34] 阚大学, 吕连菊. 水生态文明城市建设试点政策对绿色水资源利用效率的影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(3):498-509.
- Kan Daxue, Lv Lianju. Impact of water ecological civilization city construction pilot policy on green water resource utilization efficiency [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(3):498-509.

(上接第 231 页)

- [28] 姬兴杰, 刘美, 吴稀稀, 等. 1961—2019 年黄河流域降雨侵蚀力时空变化特征分析 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(14):136-145.
- Ji Xingjie, Liu Mei, Wu Xixi, et al. Spatiotemporal variation characteristics of rainfall erosivity in the Yellow River basin from 1961 to 2019 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(14):136-145.
- [29] 宁婷, 桑满杰, 郭新亚, 等. 山西省 2000—2016 年降雨侵蚀力时空分布特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(1):1-7.
- Ning Ting, Sang Manjie, Guo Xinya, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rainfall erosivity during 2000—2016 in Shanxi Province [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(1):1-7.
- [30] 李双双, 孔锋, 韩鹭, 等. 陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素 [J]. *地理研究*, 2020, 39(1):140-151.
- Li Shuangshuang, Kong Feng, Han Lu, et al. Spatiotemporal variability of extreme precipitation and influencing factors on the Loess Plateau in Northern Shaanxi Province [J]. *Geographical Research*, 2020, 39(1):140-151.
- [31] 黎珩, 朱冰冰, 边焯, 等. 1970—2020 年黄土高原水蚀风蚀交错区极端降水时空变化研究及驱动因素分析 [J]. *干旱区地理*, 2024, 47(4):539-548.
- Li Heng, Zhu Bingbing, Bian He, et al. Temporal and spatial changes in extreme precipitation and its driving factors in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau from 1970 to 2020 [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(4):539-548.
- [32] 高健翎, 张建国, 朱莉莉, 等. 黄土丘陵沟壑区水土保持关键措施变化特征 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(3):114-118.
- Gao Jianling, Zhang Jianguo, Zhu Lili, et al. Change characteristics of key measures of soil and water conservation in hill-gully region of Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(3):114-118.