

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.02.029

CSTR: 32310.14.stbcbx.2025.02.029

王鹏, 马逸伦, 程静, 等. 宁夏水源涵养功能时空演变格局及其归因分析[J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 191-199.

WANG Peng, MA Yilun, CHENG Jing, et al. Spatial and temporal evolution pattern of water conservation function of Ningxia Province and its attribution analysis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 191-199.

宁夏水源涵养功能时空演变格局及其归因分析

王 鹏¹, 马逸伦¹, 程 静², 许明祥^{3,4}, 苏胜亮⁵, 蒲 勇⁵, 韩 蕾⁵, 杨 芳⁵

(1. 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021; 3. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 5. 宁夏生产力促进中心, 银川 750001)

摘 要: [目的] 科学评估黄河上游地区水源涵养能力, 为黄河流域生态保护和高质量发展提供科学依据。[方法] 以宁夏为案例区, 基于 InVEST 模型、Hurst 指数和地理探测器模型计算 1990—2020 年宁夏水源涵养功能的时空演变趋势, 识别其关键影响因素。[结果] 宁夏土地利用格局变化明显, 除未利用地外, 其余土地利用类型均呈不同程度的增加趋势; 1990—2020 年宁夏水源涵养量呈增加趋势, 增加幅度约为 0.009 mm/a, 空间上呈“北低南高”的分布格局, 且具有显著的空间集聚特征; 宁夏水源涵养功能变化不具有可持续性, 未来面临着较大的退化风险; 降水是影响宁夏水源涵养能力的主要因素, 其次是海拔和坡度, 而植被覆盖度和蒸散发的影响程度最低。[结论] 研究期间宁夏水源涵养功能及其可持续性有所恢复, 但仍需进一步强化水源涵养能力以应对未来的退化风险。研究结果可为黄河流域生态保护和高质量发展先行区建设提供科学依据。

关键词: 水源涵养; 时空演变格局; InVEST 模型; 地理探测器; 宁夏

中图分类号: TV211.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0191-09

Spatial and Temporal Evolution Pattern of Water Conservation Function of Ningxia Province and Its Attribution Analysis

WANG Peng¹, MA Yilun¹, CHENG Jing², XU Mingxiang^{3,4}, SU Shengliang⁵,

PU Yong⁵, HAN Lei⁵, YANG Fang⁵

(1. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Productivity Promotion Center of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China)

Abstract: [Objective] To assess the water conservation capacity of the upper Yellow River region, and to provide a scientific basis for the ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin. [Methods] Taking Ningxia Province as a case area, the spatial and temporal evolution trend of the water conservation capacity of Ningxia Province from 1990 to 2020 was calculated based on the InVEST model, the Hurst index and the geodetector model, and its key influencing factors were identified. [Results] The land use pattern of Ningxia Province changed significantly, except for the unused land, all other land use types showed different degrees of increasing trends. The water conservation volume of Ningxia showed an increasing trend from 1990 to 2020, with an increase of about 0.009 mm/a. The spatial distribution pattern of the water conservation capacity showed a trend of “low in the north and high in the south”, and had a significant spatial clustering characteristic. The change of water conservation function in

收稿日期: 2024-10-21

修回日期: 2024-11-12

录用日期: 2024-11-20

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-01-15

资助项目: 国家自然科学基金项目(42401367); 宁夏自然科学基金项目(2022AAC03717); “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFF1300802)

第一作者: 王鹏(1993—), 男, 博士, 讲师, 主要从事生态地理与区域可持续发展研究。E-mail: nxdxwp24@nxu.edu.cn

通信作者: 许明祥(1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤质量与生态系统服务研究。E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

Ningxia was not sustainable, and would face the risk of degradation in the future. Precipitation was the main factor affecting the water conservation capacity of Ningxia, followed by elevation and slope, while vegetation cover and evapotranspiration had the lowest degree of influence. [Conclusion] The water conservation function and its sustainability of Ningxia Province recovered during the study period, but further enhancement of water conservation capacity is still needed to cope with future risk of degradation. The results of the study can provide a scientific basis for the construction of a pioneer area for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin.

Keywords: water conservation; spatial and temporal evolution pattern; InVEST model; geographical detector; Ningxia

Received: 2024-10-21

Revised: 2024-11-12

Accepted: 2024-11-20

Online (www.cnki.net): 2025-01-15

水资源是维持自然生态系统和社会经济系统运行的重要载体,对全球生物化学循环、物质交换及经济贸易的流动过程至关重要^[1],也是联合国可持续发展目标(sustainable development goals, SDGs)中的第六个目标,旨在确保“水和卫生设施的可持续管理”,对粮食安全、居民生计和生态安全意义重大^[2]。自地球进入“人类世”新纪元以来,人类活动强度不断加剧,出现区域水资源短缺、水环境恶化、水资源时空分布不均、水土资源不匹配等问题,严重影响生态系统健康,制约社会经济可持续发展^[3-4]。水源涵养是指一定时空范围内生态系统持留水分的能力,具有拦蓄洪水、削减洪峰、调节径流和净化水质等功能^[5-6]。作为评估生态系统服务的核心内容,水源涵养对区域气候、土壤、水文和植被状况产生直接影响,在维持生态系统健康和稳定方面发挥着重要作用^[6]。因此,探明区域水源涵养服务的时空演变规律及其驱动因素对提高水资源供给能力、维持生态系统稳定及实现区域生态安全与高质量发展具有重要意义^[6-7]。

水源涵养受气候变化和人类活动的复合影响,具有复杂性和动态性特征,如何科学评估长时间序列时空尺度水源涵养功能,识别其关键影响因素仍是当下研究的难点与重点^[8-9]。早期水源涵养研究中主要以实地调查评价为主,该方法具有较高的准确性,但实地调查周期长、投入大,仅适用于小尺度研究,在流域、区域等大尺度上难以开展,加之长时段资料的欠缺,导致无法实现长时间序列的综合评估^[10]。随着遥感技术的发展,WEP-L模型、SWAT模型及InVEST模型等生态模型被广泛应用于水源涵养评价中,为实现大尺度、长时序的水源涵养评估提供技术支撑^[11-13]。其中,InVEST模型具有获取数据便利、需求参数少、分析能力精准和数据处理简单等优点^[14],成为水源涵养服务评价的重要手段之一,并被国内外学者广泛应用于区域、流域、河谷、省域及市县等不同空间尺度下森林、草地、农田等不同生

态系统水源涵养服务评估^[15-18],而其日臻完善的评价方法及较强的适用性为生态系统服务相关研究提供强有力的理论依据和技术支撑。

干旱半干旱地区作为对全球气候和人类活动变化响应最敏感的区域,区域水资源及其水源涵养服务极易受到外界环境干扰而产生多种不确定风险,影响区域生态环境和生产活动^[19],亟须开展干旱半干旱地区水源涵养评估,模拟其变化趋势,探测其关键影响因素,从而为区域水资源保护、生态环境建设及生态政策制定提供科学依据。宁夏地处干旱半干旱地区,受水资源限制,全区生态状况出现不同程度退化,水土流失严重,制约着区域生态经济可持续发展。自生态恢复工程实施以来,生态退化现象得到有效控制,水源涵养能力有所恢复。但在宁夏生态恢复过程中水源涵养能力的变化特征及其驱动因素尚不明晰。因此,本研究基于InVEST模型,定量评估1990—2020年宁夏水源涵养服务的时空演变格局,揭示其热点区域及未来发展趋势,探明影响水源涵养服务的关键因素,以期为宁夏水土资源高效利用及黄河流域生态保护和高质量发展先行区建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏回族自治区(35°14′~39°23′N, 104°17′~107°39′E)位于我国西北干旱半干旱地区,地处黄河上游地区,全境隶属黄河流域,是黄河流域生态保护和高质量发展建设的先行区,也是我国西北重要的生态屏障区。该区地势南高北低,由南到北依次为高原、山地、台地和平原(图1),该区属于温带大陆性干旱、半干旱气候,年平均气温6~10℃,年平均降水量220 mm,海拔1 000 m以上,日照时间3 200 h以上,区域平均干旱度为0.26。宁夏由北向南可分为北部川区、中部干旱带和南部山区3大区域,川区水热条件优渥,社会经济发展迅速,中部干旱带干旱缺水、

土壤瘠薄、生态环境脆弱,南部山区地形和气候要素变率大,水土流失严重,生态环境恶劣^[20]。地理环境的复杂性,导致宁夏水资源时空分布不均,存在空间异质性。科学评估宁夏水源涵养能力对于建设黄河流域生态保护与高质量发展先行区具有重要意义。

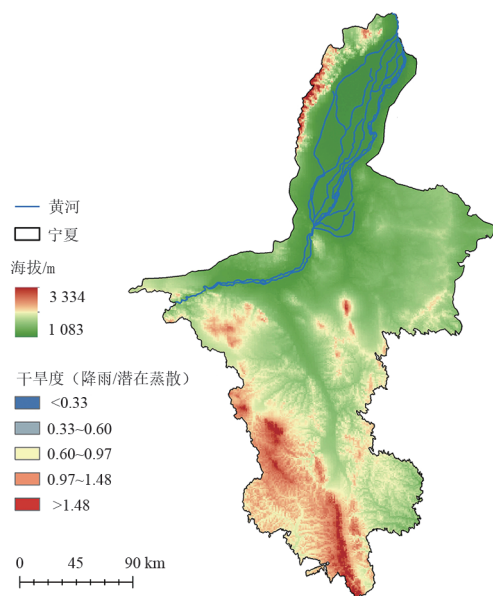


图1 研究区域

Fig. 1 Location map of the research area

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源 本文所使用的降水和潜在蒸散发数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<https://www.geodata.cn/main/>)。海拔数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>), 并通过 ArcGIS 软件中的空间分析工具计算得到坡度。土地覆被数据来源于 YANG 等^[21]提供的遥感分类产品; 归一化植被差异指数 SPOT NDVI 产品及矢量边界数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。土壤数据 HWSD (Harmonized World Soil Database v 1.2) 下载于联合国粮农组织 FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>。干旱度指数由降水除以潜在蒸散发计算得到, 指数在 <0.2 和 0.2~0.5 时分别为干旱和半干旱气候区域^[22]。为方便统计与计算, 将所有数据统一分辨率为 1 000 m。

1.2.2 水源涵养模型 水源涵养是指生态系统对降水进行截流、渗透、蓄积, 并通过蒸发实现对水流、水循环调控的过程^[2,4]。本研究基于 InVEST 模型产水量模块结合系数修正法进行水源涵养量的计算。首先, 基于 InVEST 模型中的产水量模型的水

量平衡原理及水热耦合假设, 由降水量减去蒸散量得出年产水量^[12], 再结合地形指数、土壤导水率和流速系数进行修正, 得到区域水源涵养量^[10,12]。计算公式为:

$$WR = \min\left(1, \frac{249}{\text{Velocity}}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times K_{\text{sat}}}{300}\right) \times WY$$

$$TI = \lg\left(\frac{\text{Drainage_Area}}{\text{Soil_Depth} \times \text{Percent_Slope}}\right) \quad (1)$$

$$WY = \left(1 - \frac{\text{AET}}{P}\right) \times P \quad (2)$$

式中: WR 为水源涵养量, mm/a; WY 为年产水量, mm/a; Velocity 为流速系数; TI 为地形指数; K_{sat} 为土壤饱和导水率, cm/d, 通过 Neuro-Teta 软件计算; Drainage_Area 为每个子流域中流量栅格的数量总和; Soil_Depth 为土层深度, mm; Percent_Slope 为百分比坡度, %; P 为降水量, mm/a; AET 为实际蒸散发, mm/a。

1.2.3 线性趋势 基于 InVEST 模型计算得到的水源涵养量, 采用线性回归模型计算宁夏 1990—2020 年栅格尺度上的线性趋势, 分析水源涵养服务的空间变化趋势。其中, 正值表示变量的增加, 负值表示变量的减少。计算公式为:

$$WR_i = \text{Trend} \times \text{Year}_i + \epsilon_i \quad (3)$$

式中: WR_i 为第 i 个年份的水源涵养量, mm/a; Trend 为所要计算的线性趋势值, mm/a; Year_i 为第 i 个年份; ϵ_i 为第 i 年的残差。

1.2.4 Hurst 指数 Hurst 可以定量描述时间序列的长程依赖性, 通常采用重标度极差法计算。当 Hurst 指数 > 0.5 时, 表明时间序列的未来趋势与过去趋势一致; Hurst 指数 < 0.5 时, 表明时间序列的未来趋势与过去趋势相反, 时间序列的过程具有反向持续性; 当 Hurst 指数 = 0.5 时, 表明时间序列的未来趋势与历史趋势没有关系; Hurst 指数越接近 1, 时间序列趋势的持续性越强; Hurst 指数越接近于 0, 时间序列趋势的反向持续性越强。Hurst 指数结合过去的时间序列趋势, 可以一定程度上反映未来的时间序列的趋势。计算公式参考文献[23]。

1.2.5 热点分析 热点分析可以识别具有显著性的高值(热点)和低值(冷点)的空间聚类, 直观反映研究区水源涵养是否存在高值或低值集聚^[14]。本研究基于热点分析, 通过分区统计不同县域尺度的水源涵养量, 分析宁夏水源涵养量的时空集聚特征。计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n WR_{ij} X_i - \bar{X} \sum_{j=2}^n X_j}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n WR_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n WR_{ij})^2}{n-1}}} \quad (4)$$

式中:正且高的 G^* 值为热点的空间高聚集度;负且低的 G^* 值为冷点的空间高聚集度; WR_{ij} 为空间权重矩阵分量,相邻为1,不相邻为0; n 为统计单元数; X_j 为第 j 个统计单元的水源涵养平均值。

1.2.6 地理探测器 地理探测器是检测空间分异特征的统计方法。其基本原理为:如果自变量和因变量的空间分布特征相似,则自变量对因变量有重要影响^[24]。GeoDetector模型包含4个模块:风险检测、单向因子检测、生态检测和交互检测。本研究中,通过单项因子检测模块分析影响水源涵养服务的主要因素,选择降水、潜在蒸散发、海拔、坡度、植被覆盖度和土地利用类型作为驱动因素。单向因子检测得到的 q 值反映驱动因

素对水源涵养的解释程度,越接近于1,解释力度越大,越接近于0,则解释力度越小^[9,19]。计算公式为:

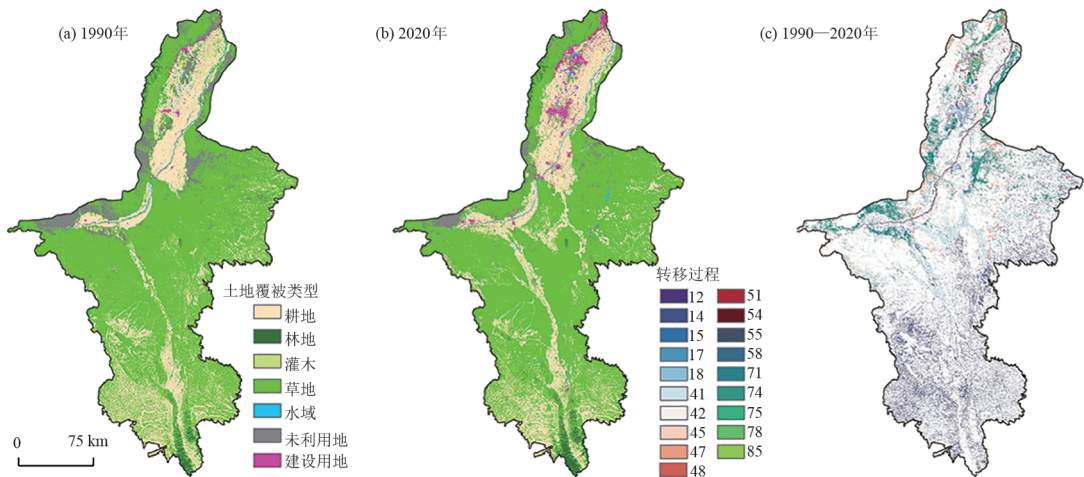
$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中: q 为驱动因素对变量的解释程度,为0~1, q 值越接近1,驱动因素对变量空间分布的影响越大; h 为分区数; L 为影响因素的样本数; N 和 N_h 分别为整个研究区域和 h 区域的统计单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为整个区域和 h 区域的方差。

2 结果与分析

2.1 宁夏土地利用时空变化分析

从宁夏土地利用类型空间分布格局(图2)来看,主要以草地和耕地为主,二者占全区总面积的90%以上,其次是未利用地和林地,二者约占全区总面积的4%~8%,而其余土地覆被类型占比较小,总体占比不足3%(表1)。



注:1、2、4、5、7、8分别表示耕地、林地、草地、水域、未利用地、建设用地;12代表耕地转为林地。

图2 1990—2020年宁夏土地覆被空间分布及其转移过程

Fig. 2 Spatial distribution and transfer process of land cover in Ningxia from 1990 to 2020

表1 1990—2020年宁夏土地利用类型面积变化

Table 1 Changes in land use type area in Ningxia from 1990 to 2020

土地利用类型	面积/km ²				占比/%			
	1990年	2000年	2010年	2020年	1990年	2000年	2010年	2020年
耕地	13 277.88	15 198.59	13 494.38	13 576.72	25.59	29.29	26.01	26.16
林地	566.09	637.99	675.88	836.79	1.09	1.23	1.30	1.61
灌木	2.84	1.38	1.04	7.98	0.01	0	0	0.02
草地	33 436.53	32 564.84	34 869.58	34 346.01	64.44	62.76	67.20	66.19
水域	270.83	233.00	337.81	364.81	0.52	0.45	0.65	0.70
未利用地	4 082.69	2 871.02	1 706.16	1 665.56	7.87	5.53	3.29	3.21
建设用地	254.51	384.54	806.53	1 093.50	0.49	0.74	1.55	2.11

从土地利用类型面积变化可以看出,1990—2020年耕地面积呈先增后减再增的“N”形波动变化趋势,但整体呈增加态势,增加量为298.84 km²,增加幅度2.25%;林地、灌木和建设用地面积呈逐年增

加趋势,其中,建设用地面积增加幅度最大,为329.66%,其次是灌木,增加幅度为180.95%,而林地面积仅增加270.71 km²,增加幅度为47.82%;草地和水域面积呈波动增加的变化趋势,均在2000年

达到最低值,2000—2010年是草地和水域面积快速增加期,二者的面积分别增加2 304.74、104.82 km²,增加幅度分别为7.08%和44.99%;而未利用地面积逐年下降,由1990年的4 082.69 km²下降至1 665.56 km²,下降2 417.13 km²,下降幅度为59.20%。

1990—2020年宁夏不同土地覆被类型的空间转移过程较为复杂,耕地与草地之间的转化最为剧烈,几乎遍布整个区域(图2)。在耕地转出面积中,草地占总转出面积的86.58%,其次是建设用地和水域,分别占耕地总转出面积的9.99%和2.24%,而转为其他土地覆被类型的面积较小,不足2%;草地共转出5 778.77 km²,主要转为耕地和未利用地,二者分别占草地总转出面积的76.19%和11.97%;未利用地转出面积为3 064.68 km²,且主要转化为草地和耕地,二者占总转出面积的93.76%,其次是转为建设用地和水域,面积占比分别为5.36%和0.88%。从转入面积来看,耕地转入量最大,共转入4 536.67 km²,主要来源于草地和未利用地的转入,占总转入面积的97.43%;而草地转入面积次之,共转入3 794.61 km²,且99.57%的面积来源于耕地,其余土地覆被类型转为草地的面积较小;建设用地面积共转入853.67 km²,其中耕地和草地转入量最大,分别为422.96、247.60 km²,其次是未利用地,约164.31 km²转为建设用地,而水域、林地和灌木转为建设用地面积不足3.00%。

2.2 宁夏水源涵养量时空演变分析

1990—2020年宁夏水源涵养量整体处于波动增

加的态势,每年约增加0.009 mm(图3)。其中,水源涵养量最高值出现在2003年,为1.114 mm,最低值出现在1997年,为0.053 mm。从宁夏水源涵养量变化趋势来看,1990—2005年是宁夏水源涵养量增速缓慢时期,而2005—2020年是水源涵养量快速增加期,斜率0.027,远高于研究期间的0.009。随着时间的增加,水源涵养量变化量和标准差均逐渐增大,表明研究区水源涵养量在数量及空间范围上均呈增加趋势。从空间分布格局(图4)来看,宁夏水源涵养服务空间分布具有显著的空间异质性特征,全区主要以低值区分布为主,高值区主要分布在南部地区、黄河沿线及中部的香山和罗山周边等地区。从水源涵养服务变化量来看,全区25.51%的区域呈不同的下降变化趋势,下降区域主要集中分布在北部和中部地区,全区70.84%的区域未发生显著改变,而仅有3.65%的区域呈增加趋势,增加区域主要集中在宁夏南部地区。

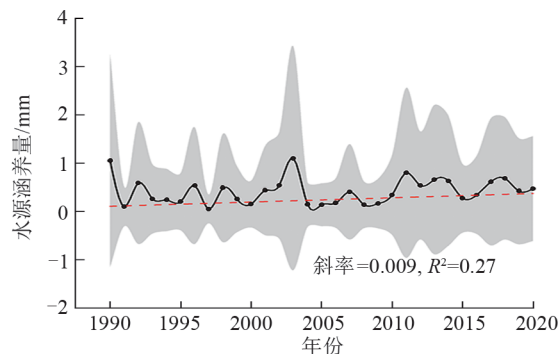


图3 1990—2020年宁夏水源涵养服务变化

Fig. 3 Changes in water conservation services in Ningxia from 1990 to 2020

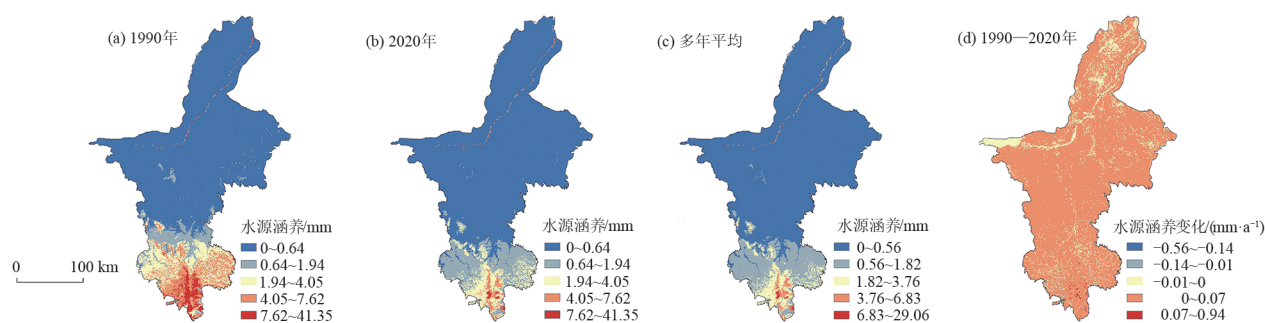


图4 1990—2020年宁夏水源涵养服务空间变化

Fig. 4 Spatial changes in water conservation services in Ningxia from 1990 to 2020

2.3 宁夏水源涵养空间冷/热点分析

为进一步研究宁夏水源涵养服务的时空分布集聚特征,本文基于县域尺度,采用热点分析工具进行分析。从图5可以看出,1990—2020年,宁夏水源涵养服务冷热点空间分布集聚特征明显。1990年极显著热点区域主要分布在南部地区的原州、彭阳、泾源和隆德等地区,西吉县为较显著热点区,而显著冷点区主要分布在西夏、金凤、永宁和青铜峡等地区,其余区域冷热点分布不显著。

2000年极显著热点区域主要分布在原州、泾源和隆德3县(区),彭阳为较显著热点区域,其余区域冷热点分布不显著。2010年极显著热点区域主要分布在原州、彭阳、泾源和隆德4县(区),西吉县为较显著热点区;2020年热点区域分布域与2010年一致,但出现显著冷点区域,主要分布在西夏、金凤和永宁3县(区)。整体来看,研究期间,宁夏水源涵养服务热点区域主要集中在南部地区,而北部沿黄经济带为冷点区域,其余地区冷热点分布不显著。

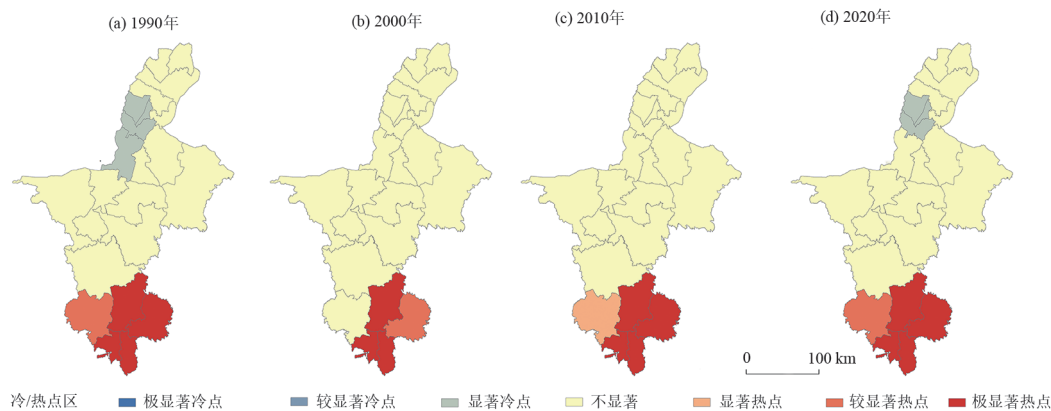


图5 1990—2020年宁夏水源涵养服务县域尺度冷/热点区

Fig. 5 County scale cold/hot spot areas for water conservation services in Ningxia from 1990 to 2020

2.4 宁夏水源涵养可持续性和未来趋势

基于Hurst指数计算1990—2020年宁夏水源涵养服务变化的可持续性,可知宁夏水源涵养服务变化的可持续性在空间上具有明显的聚集特征(图6)。其中,超过80%的区域面积呈不可持续性的空间分布特征,而无趋势性的区域主要在北部沿黄城市群的沙坡头、青铜峡、灵武及石嘴山市等地区,仅有不到15%的区域面积呈可持续性特征,且主要分布在宁夏中部及南部地区。结合1990—2020年的宁夏水源涵养服务的变化趋势特征,进一步揭示未来的水源涵养的变化趋势,可以看出,全区未来水源涵养功能出现不同程度的增减现象,其中水源涵养下降区域面积占比最大,约占全区总面积的71.94%,且集中分布在固原市、沙坡头区、中宁县及盐池县北部和石嘴山等地区,而水源涵养增加区域集中分布在中部的海原县、同心县、红寺堡区及灵武市等地区,增加区域面积约占全区总面积的23.06%,且增加幅度为0~0.085 mm/a。整体而言,宁夏水源涵养服务面临着极大的退化风险。

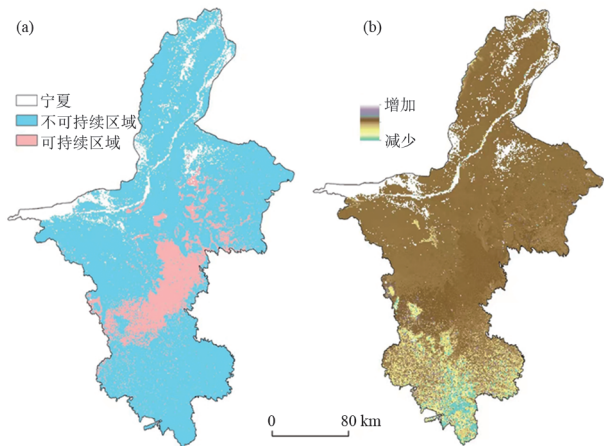


图6 1990—2020年宁夏水源涵养变化可持续性及其未来趋势
Fig. 6 Sustainability and future trends of water conservation changes in Ningxia from 1990 to 2020

2.5 宁夏水源涵养影响因素的地理探测

本研究选取降水、海拔、坡度、土地利用类型、植被覆盖度及蒸散发6类驱动因子,基于地理探测器对不同时期宁夏水源涵养服务的影响因素进行地理探测。从表2可以看出,不同驱动因子对黄河流域水源涵养变化的解释力均通过显著性检验($p<0.05$),但不同因子对宁夏水源涵养量的解释力存在显著差异。其中,降水是影响宁夏水源涵养服务的主要因子,其 q 值为0.59~0.67;其次是海拔和坡度,二者的 q 值分别为0.41~0.49和0.38~0.44,且研究期间影响强度有所增加;而植被覆盖度和蒸散发的影响程度最小,二者的多年平均值分别为0.296和0.299。

表2 1990—2020年各类因子对宁夏水源涵养服务空间分布的解释力

Table 2 The explanatory power of various factors on the spatial distribution of water conservation services in Ningxia from 1990 to 2020

年份	降水量	植被覆盖度	蒸散发	海拔	坡度	土地利用类型
1990	0.669	0.246	0.268	0.414	0.386	0.373
2000	0.594	0.289	0.289	0.467	0.393	0.395
2010	0.625	0.307	0.327	0.482	0.434	0.413
2020	0.641	0.342	0.312	0.459	0.412	0.407

从各因子之间的交互作用关系来看,各影响因子间的交互作用对宁夏水源涵养服务的解释力均强于任何单一因子的影响程度(图7)。其中,降水与蒸散发和坡度的交互作用对宁夏水源涵养服务影响最大,二者的决定力 q 值均 >0.65 ;其次是降水与海拔和土地利用类型的交互作用,二者的决定力 q 值分别为0.583和0.549,说明同一海拔梯度或同一土地利用类型下,由于降水量的不同,水源涵养服务的空间分布存在差异,主要表现为宁夏南北部水源涵养的巨大差异。而由于降水对水源涵养服务的显著影响,降水与其他因子相交后解释力均大于其余因子的交互作用程度。

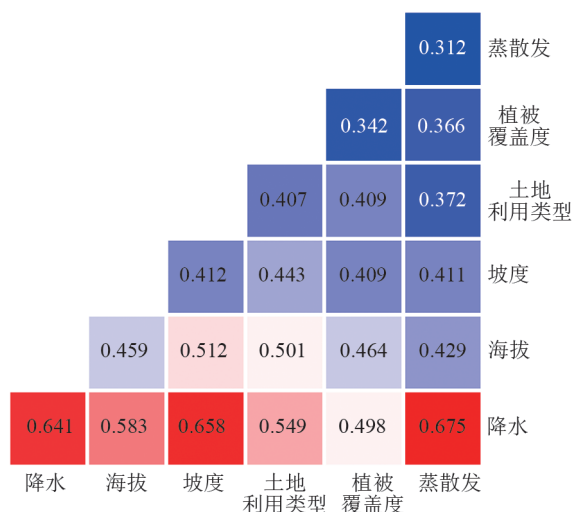


图7 宁夏2020年水源涵养服务影响因素交互解释力

Fig. 7 Interactive explanatory power of influencing factors on water conservation services in Ningxia in 2020

3 讨论

本研究结果表明,1990—2020年宁夏水源涵养服务功能具有显著的空间分异特征。从时间尺度上来看,研究期间宁夏水源涵养服务呈波动增加趋势,与WANG等^[25]和XU等^[26]研究结果基本一致,但与吕明轩等^[9]在黄河流域水源涵养相关研究中存在部分差异,主要是部分年份的水源涵养服务变化趋势不同,可能与所采用的数据源及研究尺度有关。从空间格局变化来看,宁夏水源涵养服务空间分布极不均衡,并呈明显的空间异质性特征,不同时期水源涵养服务空间分异格局的差异性较小,且具有一定的规律性,其中,高值区主要集中分布在南部山区的原州区、西吉县、隆德县、泾源县、彭阳县及海原县等地区,而低值区只分布在宁夏中部干旱带及北部沿黄城市群地区,与吕明轩等^[9]和杨洁等^[27]的研究结果相似。宁夏自实施生态保护与生态立区战略以来,全区生态环境持续好转,南部山区地表植被盖度不断增加,增加植被截留及土壤水分入渗,而气候的暖湿化发展,极大地促进区域水源涵养能力的快速提高和改善。因此,在今后的生态保护政策的制定与实施过程中,不仅要加快水源涵养低值区的重点修复,而且也要注重强化水源涵养高值区,以此实现全区水源涵养能力的整体提升。

气候变化通过改变降水和蒸散发影响区域水源涵养能力。本研究表明,降水是影响区域水源涵养时空变化的重要驱动因素,气候暖湿化加速水循环过程,对水源涵养提升产生一定正向作用,与现有相关研究^[6-7,9-10]的研究结论一致。海拔和坡度也是影响宁夏水源涵养时空变化的重要因素,是因为高海拔和复杂地形对区域内潮湿气流的抬升具有积极作用,从而影

响降水^[28-29],而高海拔地区可以有效降低蒸散,进而提高水源涵养量。土地利用类型对区域水源涵养能力具有较大影响,土地利用类型通过改变地表下垫面植被分布格局,进而影响地表拦蓄、调节径流及水质净化等功能,最终导致水源涵养能力的空间分异^[6,30]。宁夏南部山区以林草地分布为主,地表覆被及林冠层的截流作用,减缓降水对土壤的冲刷,有利于水分的存储,而枯落物层在一定程度上加强对水分的利用效率,增强水源涵养能力^[31]。北部沿黄城市群建设用地面积广布,不透水层影响水分的渗透性,导致水源涵养能力下降。因此,宁夏在生态建设时应将水源涵养功能的保护与生态用地建设紧密结合,严格落实生态政策,实施生态立区战略以维持水源涵养服务功能的稳定,构建黄河流域生态保护与高质量发展先行区。

本研究基于系数修正法计算水源涵养能力,考虑地形指数、土壤饱和导水率及流速系数,而非简单地采用产水量减去径流^[32],相较于传统产水量估算方法,该模型突破对单一生态系统的常规计算,降低模型评估带来的不确定性,能更好地表达不同生态本底条件下的空间异质性结果,从而实现不同土地利用类型下的水源涵养服务评价^[12]。但该模型仅反映水资源的纵向功能,未考虑径流、地下水传输等横向功能,特别是在模型输入的根系深度、植被蒸散系数等参数中均以现有研究成果为主,可能对模型精度产生一定的影响,未来仍需进一步强化参数的本地化研究;同时在影响因素中并未完全考虑社会经济及人类活动因素的影响,未来仍需进一步强化驱动因素的综合研究。

4 结论

1) 1990—2020年宁夏土地利用发生显著变化,林地和建设用地呈逐年增加态势,耕地、草地、灌木和水域面积呈波动增加趋势,未利用地呈快速下降趋势,而耕地、草地和未利用地之间转换较为频繁。

2) 1990—2020年宁夏水源涵养服务以0.009 mm/年的速率增加,空间分布具有显著的异质性特征,整体呈“北低南高”的分布格局,多年平均水源涵养能力在空间分布上具有依赖性和较强的空间相关性,具有明显的集聚分布特征。

3) 1990—2020年宁夏水源涵养服务不具有可持续性,未来宁夏71.94%区域水源涵养呈不同程度的下降趋势,但其整体可持续性有所增加,且集中分布在中部的海原县、同心县、红寺堡区及灵武市等地区。整体而言,宁夏水源涵养能力面临着极大的退化风险。

4) 降水量是影响宁夏水源涵养时空变化的主要

驱动因子,其次是海拔和坡度,且研究期间影响强度有所增加,而植被盖度和蒸散发的影响程度最小。

参考文献:

- [1] 刘昌明,王中根,杨胜天,等.地表物质能量交换过程中的水循环综合模拟系统(HIMS)研究进展[J].地理学报,2014,69(5):579-587.
LIU C M, WANG Z G, YANG S T, et al. Hydro-Informatic Modeling System: Aiming at water cycle in land surface material and energy exchange processes[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 579-587.
- [2] 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. Ecological and hydrological perspectives of the water retention concept[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(1): 139-148.
- [3] 高向龙,冯起,李宗省,等.三江源水源涵养价值时空格局及影响因素[J].生态学报,2024,44(16):7074-7086.
GAO X L, FENG Q, LI Z X, et al. Spatio-temporal pattern and key influencing factors of water conservation value in the Three-River Source region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 7074-7086.
- [4] 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. Review on connotation and estimation method of water conservation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2021, 19(6): 1041-1071.
- [5] 贾雨凡,杨勤丽,胡非池,等.变化环境下的水源涵养能力评估研究进展[J].水利水运工程学报,2022(1):37-47.
JIA Y F, YANG Q L, HU F C, et al. Prospect and progress of water conservation capacity evaluation in a changing environment[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(1): 37-47.
- [6] 周雪彤,孙文义,穆兴民,等.1990—2020年三江源水源涵养能力时空变化及影响因素[J].生态学报,2023,43(23):9844-9855.
ZHOU X T, SUN W Y, MU X M, et al. Spatiotemporal variation and influencing factors of water conservation capacity in Three-River Headwaters region from 1990 to 2020[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9844-9855.
- [7] 周冰玉,李志威,田世民,等.黄河源区水源涵养能力研究综述[J].水利水电科技进展,2022,42(4):87-93.
ZHOU B Y, LI Z W, TIAN S M, et al. A review on water conservation capacity in Yellow River source region[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 87-93.
- [8] 吕一河,胡健,孙飞翔,等.水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务[J].生态学报,2015,35(15):5191-5196.
LÜ Y H, HU J, SUN F X, et al. Water retention and hydrological regulation: Harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [9] 吕明轩,张红,贺桂珍,等.黄河流域水源涵养服务功能动态演变及驱动因素[J].生态学报,2024,44(7):2761-2771.
LÜ M X, ZHANG H, HE G Z, et al. Dynamic evolution and driving factors of water conservation service function in the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2761-2771.
- [10] 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 of Yiluo River basin based on the InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 101-108.
- [11] 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,2024,44(10):4342-4352.
WANG D D, JIA Y W, NIU C W, et al. Evaluation method of different functions of water conservation based on WEP-L model: Taking Weihe River conservation area as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4342-4352.
- [12] 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 Y B, LI T, LIU H, 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.
- [13] 王辉源,宋进喜,吴琼.未来气候及土地利用变化对水源涵养量的影响[J].水土保持学报,2023,37(5):226-234.
WANG H Y, SONG J X, WU Q. Influence of future climate and land use changes on water conservation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 226-234.
- [14] WANG P, XU M X. Evaluating the inter-annual surplus/deficit dynamic of water retention service in the Yellow River basin, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 145: e109695.
- [15] REDHEAD J W, STRATFORD C, SHARPS K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale[J]. Science of the Total Environment, 2016, 569: 1418-1426.
- [16] 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, LÜ S S, ZHAO Z L, et al. Impact of land use

- change on watershed water conservation and water quality purification service: A case study of Wujiang River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(20): 8375-8389.
- [17] 张晓宁, 李晓丹, 刘星雨, 等. 高寒草地植被与土壤水源涵养功能的时空耦合关系[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 243-251.
- ZHANG X N, LI X D, LIU X Y, et al. Spatial and temporal coupling relationship between alpine grassland vegetation and soil water conservation function[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 243-251.
- [18] LEH M D K, MATLOCK M D, CUMMINGS E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 165: 6-18.
- [19] 程静, 王鹏, 陈红翔, 等. 半干旱区生态风险时空演变及其影响因素的地理探测: 以宁夏盐池县为例[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(5): 1637-1648.
- CHENG J, WANG P, CHEN H X, et al. Geographical exploration of the spatial and temporal evolution of ecological risk and its influencing factors in semi-arid regions: A case of Yanchi County in Ningxia [J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(5): 1637-1648.
- [20] 苏胜亮. 宁夏回族自治区生态环境与经济发展耦合协调研究[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 367-374.
- SU S L. Research on the coordinated development of ecology and economic system of Ningxia Hui Autonomous Region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(2): 367-374.
- [21] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1985 to 2022 [J]. *Earth System Science Data*, 2023, 13(8): 3907-3925.
- [22] ZOMER R J, XU J C, TRABUCCO A. Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database [J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): e409.
- [23] 孙灏, 胡佳琪, 崔雅静, 等. 基于多源遥感数据的生态系统服务功能时空演变趋势分析[J]. *测绘通报*, 2021(4): 1-7.
- SUN H, HU J Q, CUI Y J, et al. Spatiotemporal evolution of ecosystem service functions based on multi-source remote sensing data [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(4): 1-7.
- [24] 王鹏, 王亚娟, 刘小鹏, 等. 基于景观结构的生态移民安置区生态风险评价: 以宁夏红寺堡区为例[J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 2672-2682.
- WANG P, WANG Y J, LIU X P, et al. Ecological risk assessment of an ecological migrant resettlement region based on landscape structure: A case study of Hongsibu in Ningxia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(8): 2672-2682.
- [25] WANG P, XU M X. Dynamics and interactions of water-related ecosystem services in the Yellow River basin, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, 33(8): 1681-1701.
- [26] XU S N, LIU Y F, WANG X, et al. Scale effect on spatial patterns of ecosystem services and associations among them in semi-arid area: A case study in Ningxia Hui Autonomous Region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 598: 297-306.
- [27] 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 J, XIE B P, ZHANG D G. 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.
- [28] 荔童, 梁小英, 张杰, 等. 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系及其驱动因子分析: 以陕北黄土高原为例[J]. *生态学报*, 2023, 43(16): 6758-6771.
- LI T, LIANG X Y, ZHANG J, et al. Ecosystem service trade-off and synergy relationship and its driving factor analysis based on Bayesian belief network: A case study of the Loess Plateau in northern Shaanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16): 6758-6771.
- [29] 王懋源, 齐实, 郭衍瑞, 等. 藏东-川西生态维护水源涵养区产水量驱动机制[J]. *生态学报*, 2024, 44(21): 9520-9534.
- WANG M Y, QI S, GUO Y R, et al. Driving mechanism of water yield in the ecological and water conservation zone of east Tibet and west Sichuan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(21): 9520-9534.
- [30] 左其亭, 王娇阳, 杨峰, 等. 水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(2): 13-19.
- ZUO Q T, WANG J Y, YANG F, et al. Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(2): 13-19.
- [31] 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 G R, BI H X, WEI X, 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.
- [32] BAI Y, OCHUODHO T O, YANG J. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 51-64.