

DOI: 10.20103/j.stxb.202310082163

王懋源, 齐实, 郭衍瑞, 张鹏, 赖金林, 张林, 马路霞, 刘少栋. 藏东-川西生态维护水源涵养区产水量驱动机制. 生态学报, 2024, 44(21): 9520-9534.
Wang M Y, Qi S, Guo Y R, Zhang P, Lai J J, Zhang L, Ma L X, Liu S D. Driving mechanism of water yield in the ecological and water conservation zone of east Tibet and west Sichuan province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9520-9534.

藏东-川西生态维护水源涵养区产水量驱动机制

王懋源¹, 齐实^{1,2,*}, 郭衍瑞¹, 张鹏¹, 赖金林¹, 张林¹, 马路霞¹, 刘少栋¹

¹ 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

² 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

摘要: 藏东-川西生态维护水源涵养区位于西南高山峡谷区北部, 是中国典型的生态脆弱区, 生态系统抗干扰能力差, 对气候变化的反应敏感。产水量是生态系统服务中的一项重要功能, 研究产水量空间分布特征及其影响因子对该地区水资源保护、涵养、开发和利用有重要意义。基于 2000—2020 年地表覆盖产品、气候、基岩深度、土壤和地形等数据, 运用 InVEST 模型 Annual Water Yield 模块模拟了藏东-川西地区产水量; 结合地理探测器 (GDM) 分析了造成产水量空间分异的各因子的解释能力; 对 $q > 0.1$ 的因子引入多尺度地理加权回归 (MGWR) 分析它们对研究区不同地理位置产水量的影响程度, 并运用 Theil-Sen 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验得到了产水量及其主导因素时空变化特征; 同时利用 Hurst 指数预测了未来短期内产水量上升或下降趋势和评估了研究时段内产水量在不同空间位置的波动水平。结果表明: 1) 降水量和产水量空间分布在研究区内呈现“东西高, 中部低”的分布格局, 岷江流域降水量为最大, 金沙江流域蒸散水平最高, 怒江流域产水量领先其余三个流域; 2) 除降水量和蒸散发外, 藏东-川西地区产水量主要影响因子有气候因子 (年均湿度和年均风速)、地形因子 (高程)、土壤类型、植被因子 (归一化植被指数和净初级生产力) 与社会因子 (地表覆盖类型和人类活动强度指数); 其中降水量、蒸散发、高程、归一化植被指数、净初级生产力和地表覆盖类型是产水量的主导影响因素。3) 降水、高程与人类活动强度指数对产水服务的影响有较强的正向作用, 而蒸散发、归一化植被指数和净初级生产力展现出较强的负向作用。4) 研究区南部区域产水量波动水平高。在未来短期内, 研究区 95.30% 的区域有下降趋势。5) 藏东-川西地区不应将盲目提升人工植被覆盖度作为提高产水量首要方案, 应注意对天然林的保护和预防石漠化。

关键词: InVEST 模型; 产水量; 空间分异; 地理探测器; 多尺度地理加权回归

Driving mechanism of water yield in the ecological and water conservation zone of east Tibet and west Sichuan province

WANG Maoyuan¹, QI Shi^{1,2,*}, GUO Yanrui¹, ZHANG Peng¹, LAI Jinlin¹, ZHANG Lin¹, MA Luxia¹, LIU Shaodong¹

¹ School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² Key Laboratory of Soil and Water Conservation State Forestry Bureau, Beijing 100083, China

Abstract: The east Tibet and west Sichuan ecological and water conservation zone, a notable ecological vulnerable area with low anti-disturbance capability and climate sensitivity, is located in the northern part of Southwest Alpine Canyon Region of China. It is important to study the spatio-temporal distribution characteristics and influencing factors of water yield for the water resources protection, conservation, development and utilization. We simulated the water yield by using the Annual Water Yield module of the InVEST model, mainly based on the data set of surface cover products, climate, bedrock depth, soil, and topography from 2000 to 2020, and analyzed the explanatory power of the factors contributing to the spatial variability of water yield by combining with GeoDetector (GDM), and for the factors with $q > 0.1$ were introduced into the multiscale geographically weighted regression (MGWR) to analyze their influence on water yield in different geographic

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF1302903)

收稿日期: 2023-10-08; 网络出版日期: 2024-08-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qishi@bjfu.edu.cn

locations of the region, and the spatio-temporal variation characteristics and dominant factors of water yield were obtained by using the Theil-Sen trend analysis and the Mann-Kendall significance test, and in the meantime, Hurst index was used to predict the upward or downward trend of water yield in the future for a short period of time and the fluctuation level of water yield during the study period at different spatial locations was assessed. The results showed that: 1) the spatial distribution of precipitation and water yield presented a distribution pattern of “higher in the east and west, lower in the middle”, the greatest amount of precipitation in the Minjiang River basin, the greatest amount of evapotranspiration in the Jinsha River basin, and the amount of water yield in the Nujiang River basin was more than other three basins. 2) except for precipitation and evapotranspiration, the main factors affecting water yield were climate factors (annual mean humidity and annual mean wind speed), topographic factors (DEM), soil type, vegetation factors (NDVI and NPP), and social factors (LULC and HAI), especially precipitation, evapotranspiration, DEM, NDVI, NPP and surface cover type were the dominant influencing factors on water yield. 3) There were strong synergies between precipitation, DEM and HAI, and strong trade-offs between evapotranspiration, NDVI and NPP to water yield services. 4) The water yield fluctuation level was higher in the southern part of the region and in the short-term future, the water yield showed a decreasing trend in the 95.30% of the study area. 5) Increasing the artificial vegetation coverage blindly should not be the primary solution to increase water yield in the region, and the priority was to pay attention to of natural forest protection and rocky desertification prevention.

Key Words: InVEST model; water yield; spatial differentiation; geographic detector; multiscale geographically weighted regression

生态系统服务是人类从自然中获得的所有收益,包括供给、调节、文化和支持服务^[1-2],产水服务(WY)是其中一项重要的服务功能,与人类生活息息相关,对区域可持续发展、水文状态平衡、土壤保持和生境质量等有至关重要的作用和影响。随着遥感技术的快速发展,通过 SWAT、MIKE SHE、PRMS 和 InVEST 等模型对地区产水量进行模拟量化的研究越来越多,由于站点实测数据的匮乏,生态系统服务和权衡的综合评估模型(InVEST)中产水量模块便因其简易的模拟过程和精度高等优点被广泛的运用^[3-4]。国内外学者运用 InVEST 模型产水模块对各地产水量进行量化并与实测值对比,验证其可靠性;Redhead J^[5]等用 InVEST 模型对英国 22 个不同流域的产水量进行建模,并用流量实测数据进行验证,模拟 $R^2=0.990$;刘美娟^[6]等在中国青海湖流域模拟 1997—2009 年的产水模数,并与实际产水模数进行精度验证,平均误差为 -4.27%;彭赤彬^[7]等也通过 InVEST 模型模拟沱江流域产水量,与五年水资源统计量实际值对比,误差均控制在 10%之内。综上,研究者们对 InVEST 模型产水量模块精度的探索证明了其可信度。

此外,产水量极易受到气候变化和人类活动的影响,为了分辨产水量变化主要是由气候因素造成,还是由人类活动驱动的社会因素改变造成,众多学者运用不同方法针对各自研究区提出了相应看法,朱志洪^[8]等研究发现在中国千岛湖流域产水量呈波动变化趋势,是多种因子综合作用的结果,气候因子驱动力大于社会因子;在雅鲁藏布江下游,赖明^[9]等发现降水量变化对产水量的贡献程度最大,而土地利用类型改变对产水量影响相对较小。同时,发现不同土地利用类型下的产水量空间分布存在异质性,如杨洁^[10]就通过分析黄河流域不同土地利用类型下产水量空间分布后,得到了冰川及雪地的平均产水深度最深,而草地对黄河流域产水量的贡献程度最大的结论;胡砚霞^[11]在对汉江流域的研究中发现,裸地和草地的平均产水深度最深;农田和森林地类对汉江流域产水量贡献力最大。

但在诸多研究中,对西南高山地区产水服务的探索是匮乏的,藏东-川西生态水源涵养区是中国典型的生态脆弱区和主要江河的水源地,政府在此实施了天然林资源保护、西南岩溶石漠化治理、青藏高原生态屏障区生态保护和修复与退耕还林还草等重大工程措施来保护其生态系统稳定^[12-13]。但近年来,显著的气候变化严重影响了该地水资源平衡,使产水量的动态变化越来越明显。同时,随着该地城市化水平和经济的快速发展,不论从生活还是工业生产中,人类对水资源的需求也愈发强烈^[14-15],因此,反演该地区产水量时空分异的

历史轨迹并评估其影响因素,是改善该地生态系统,保护水资源合理开发利用,确保藏东-川西地区可持续发展的重要一环。要识别藏东-川西地区产水量驱动因素并考虑多因素之间的交互作用,了解不同驱动因素对研究区产水量的贡献水平,可以通过地理探测器模型实现,不同于以往的情景分析法,地理探测器已被普遍运用于各生态系统服务影响因素的检测^[16-17],可以更准确的在空间尺度上分析各类因子对产水量的影响能力。但在以往的研究中,学者们大多忽略了产水量影响因素在不同地理位置上的驱动机制。鉴于此,本文在对产水量的研究中引入了多尺度地理加权回归,并将其与地理探测器相结合,进一步分析了气候、土壤、地形、植被和社会因子与藏东-川西产水量的关系^[18-19]。

综上所述,利用 InVEST 模型产水量模块模拟了藏东-川西地区 2000—2020 逐年的产水量,分析了其近 20 年间的时空分异特征。本研究得到了研究区产水量主要影响因素在不同地理上的驱动机制,并区分出了控制该地区产水量的主导影响因素,为藏东-川西地区水资源保护,开发和利用的分类施策提供了科学参考和依据。

1 研究区概况

如图 1,藏东-川西生态维护水源涵养区位于西藏和四川交界地带,地理位置在 27°—33°N,91°—104°E 之间,地形起伏程度较大高程介于 0—6882m 之间,地表覆盖类型主要为草地,地貌类型以高山和高原为主。该地区主要流域包括怒江、澜沧江、金沙江和岷江。气候空间变化明显,年均降水量为 456.77—1077.56mm,年均蒸散量为 100.69—1307.18mm。生态系统抗干扰能力差,对气候变化的反应敏感,环境较为脆弱,是生态保护重点区域。

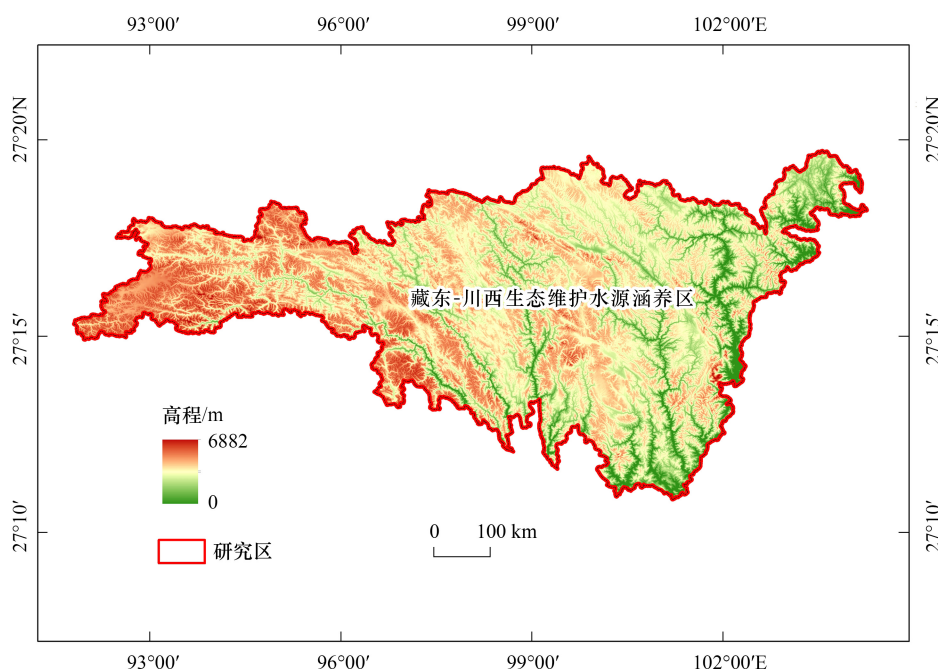


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographic location of the study area

2 数据与研究方法

2.1 数据来源及处理

本文所需数据集及其来源见表 1。

表 1 数据来源及处理
Table 1 Data Sources and processing

数据类型 Data type	数据名称 Data name	单位 Unit	时间跨度 Time span	空间尺度 Spatial scale	数据来源 Data source
自然数据 Natural data	降水量	0.1mm	2000—2020 年逐月	1km	http://www.geodata.cn
	温度	℃	2000—2020 年逐月	1km	http://www.geodata.cn
	蒸散发	0.1mm	2000—2020 年逐月	1km	http://www.geodata.cn
	归一化植被指数	—	2000—2020 年逐月	1km	http://www.geodata.cn
	净初级生产力	gCm ⁻² a ⁻¹	—	0.5km	https://lpdaac.usgs.gov/
	数字高程模型	m	—	1km	http://www.gscloud.cn
	坡度	°	—	1km	由 DEM 提取
	土壤数据	—	—	1km	https://data.tpdc.ac.cn
	基岩深度	m	—	0.1km	https://www.nature.com
社会数据 Social data	地表覆盖产品	—	2000—2020 年	0.03km	http://zenodo.org
	地区生产总值	元/km ²	2000—2020 年	1km	http://www.resdc.cn
	人类活动强度指数	—	2000—2020 年	1km	$HAI = \sum_{i=1}^n \frac{B_i R_i}{S}$ 式中: HAI 为人类活动强度指数; n 为地表覆盖类型数量; B_i 为第 i 种地表覆盖类型面积; R_i 为第 i 个地表覆盖类型的人类影响强度参数, S 为空间尺度面积

2.2 研究方法

2.2.1 InVEST 模型产水量模块

栅格尺度上, InVEST 模型是运用降水量减去实际蒸散量计算每个栅格单元的年均产水深度, 其计算公式如下:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \cdot P(x) \tag{1}$$

式中: $Y(x)$ 为栅格 x 的年均产水深度; $AET(x)$ 是栅格 x 的年均实际蒸散量; $P(x)$ 是栅格 x 的年均降水量。 $AET(x)/P(x)$ 是实际蒸散量与降水量的比值, 产水模块所需指标及指标来源见下表:

表 2 InVEST 模型产水模块指标
Table 2 InVEST model water yield module index

指标 Norm	数据获取和计算 Data acquisition and calculation
降水量 Precipitation	ArcGIS Cell Statistics
蒸散发 Evapotranspiration	ArcGIS Cell Statistics
限制根系生长层深度 Root Restricting Layer Depth	用基岩深度代替
植物可利用含水量 Plant Available Water Content	$PAWC = 54.509 - 0.132sand\% - 0.03(sand\%)^2 - 0.055silt\% - 0.006(silt\%)^2 - 0.738clay\% + 0.007(clay\%)^2 - 2.688OM\% + 0.501(OM\%)^2$ 式中: PAWC 为植物可利用含水量; sand、silt 和 clay 分别为土壤砂粒、粉粒和粘粒含量(%); OM 为土壤有机质含量
生物表 Biophysical Table	来源于前人研究和《InVEST 用户指南》
地表覆盖产品 Land Cover	
Z	季节性常数取值为 1—30, 本研究选择了研究区东部金沙江石鼓以上地区进行精度验证。经反复尝试并与《四川省水资源公报》中金沙江石鼓以上数据进行对比, 当 Z 取值为 1.55 时两者拟合效果最好

2.2.2 Theil-Sen 趋势分析和 Mann-Kendal 显著性检验

Theil-Sen 趋势分析法^[20]是一种非参数斜率估计方法, 不易受异常值影响, 对时序分析有较强的抗噪性,

能够直观有效的反映时间序列变化趋势,变化斜率 Slope 计算公式为:

$$\text{Slope} = \text{median}\left(\frac{WY_k - WY_i}{k-i}\right) \quad \forall k > i \quad (2)$$

式中, WY_k 和 WY_i 分别为样本时序数据集合; median 为中值函数; 当 Slope > 0 时, 反映该时段内 WY 呈上升趋势; 反之呈下降趋势。

Mann-Kendall 显著性检验^[21-22]可判断趋势是否具有显著性, 统计量 Z 计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(WY_k - WY_i) \quad (4)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

$$\text{sgn}(WY_k - WY_i) = \begin{cases} 1 & WY_k - WY_i > 0 \\ 0 & WY_k - WY_i = 0 \\ -1 & WY_k - WY_i < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, var 为计算方差函数; sgn 为符号函数; i, k 表示时间序列; n 为时序长度。当 $|Z| < Z_{(1-\alpha)/2}$ 时, 即趋势不显著; 当 $|Z| > Z_{(1-\alpha)/2}$ 时, 即趋势显著。变化斜率 Slope 在给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下显著时, 为显著变化; 在 $\alpha = 0.01$ 下显著时, 为极显著变化。

2.2.3 地理探测器

地理探测器是探测地理现象空间分异和其多个影响因素的统计学方法, 包括因子探测、交互因子探测、生态探测和风险区探测。该探测器可以探测不同影响因素对产水量空间分异的解释能力大小, 用 q 值统计, q 值介于 $[0, 1]$ 之间, q 值越大, 其解释能力越显著。

交互因子探测可以探测双因子交互作用对产水量空间分异的解释能力, 用 q 值统计。各因子交互作用主要表现 5 种差异性, 即当 $q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$ 交互作用非线性减弱, 当 $\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] > q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$ 时交互作用为单因子非线性减弱, $q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$ 交互作用为双因子增强, $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$ 交互作用为独立交互, $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$ 交互作用为非线性增强。

其计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (7)$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \text{SST} = N \sigma^2 \quad (8)$$

式中: N 为整个研究区域栅格数量, N_h 为在第 h 层的栅格数量, $h = 1, 2, 3 \dots$ 。 σ^2 为整个研究区 y 值的方差, σ_h^2 为第 h 层 y 值的方差。SSW 为整个研究区的方差和, SST 为各层内方差。

2.2.4 多尺度地理加权回归

在空间关系上, 不同于以往的地理加权回归模型 (GWR), 本研究引入多尺度地理加权回归模型, 用于探讨在栅格尺度上不同影响因子对产水量影响的正向和负向作用。

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^k \beta_{hwj}(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i \tag{9}$$

本研究选择了包括先决条件在内的可能对产水量有影响的 11 个因子,并依据属性将它们分为气候、土壤、地形、植被和社会五类,利用地理探测器和多尺度地理加权回归分析它们对藏东-川西地区产水服务的解释能力,具体情况见下表:

表 3 影响因子分类及统计方法
Table 3 Impact factor classification and statistical methods

因子分类 Factor classification	驱动因子 Driving factor	代号 Designator	统计方法 Statistical methods
气候因子 Climate factors	Pre		MGWR
	Eva		MGWR
	Rhu	X_1	GDM+MGWR
	Tem	X_2	GDM+MGWR
	Ws	X_3	GDM+MGWR
土壤因子 Soil factor	Sot	X_4	GDM
地形因子 Terrain factors	DEM	X_5	GDM+MGWR
	Slop	X_6	GDM+MGWR
植被因子 Vegetation factors	NDVI	X_7	GDM+MGWR
	NPP	X_8	GDM+MGWR
社会因子 Social factors	LULC	X_9	GDM
	HAI	X_{10}	GDM+MGWR
	GDP	X_{11}	GDM+MGWR

Pre:年均降雨量 Mean annual precipitation;Eva:年均蒸散发 Mean annual evapotranspiration;Rhu:年均湿度 Mean annual humidity;Tem:年均温度 Mean annual temperature;Ws:年均风速 Mean annual wind speed;Sot:土壤类型 Type of soil;DEM:数字高程模型 Digital Elevation Model;Slop:坡度;NDVI:归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index;NPP:净初级生产力 Net primary productivity;LULC:地表覆盖类型 The land-cover;HAI:人类活动强度指数 Human Active Index;GDP:地区生产总值 Gross regional product;GDM:地理探测器 Geographic detector;MGWR:多尺度地理加权回归 Multiscale geographically weighted regression

2.2.5 稳定性分析

利用变异系数可以得到研究区产水量波动变化程度,计算方法为研究时段产水量标准差比平均值,计算公式为:

$$Cv = \frac{SD_{wy}}{wy} \tag{10}$$

式中: SD_{wy} 为研究时段产水量标准差, $\overline{wy}$ 为产水量平均值。运用 ArcGIS 10.8 中自然断点分级方法将变异系数分为五类等级,即低波动(0—0.173),较低波动(0.173—0.241),中等波动(0.241—0.324),较高波动(0.324—0.461)和高波动(0.461—1.335)。

2.2.6 Hurst 指数分析

Hurst 指数可以预测产水量时间序列未来变化趋势,目前被广泛运用于气象、水文以及生态领域长时间序列变化趋势分析^[23—24],其计算方法过程参照赖金林^[25]等。结合斜率 Slope 以及 Hurst 指数值将 WY 时间序列未来变化趋势划分为四类:持续上升(Slope>0,H>0.5),未来下降趋势(Slope>0,H<0.5),持续下降(Slope<0,H>0.5)和未来上升趋势(Slope<0,H<0.5)

3 结果与分析

3.1 降水量、蒸散发和产水量空间分异

依据产水模块中水量平衡公式,本研究将降水量和蒸散发定义为产水量先决因子,二者与产水量空间分

布情况如图 2 所示,降水高值区集中在研究区东部岷江流域和金沙江流域东南部,研究区降水量介于 456.77—1077.56mm 之间,多年均值为 668.01mm。岷江、金沙江、澜沧江和怒江流域平均降水量分别为 748.25mm、663.34mm、597.09mm 和 651.22mm。蒸散发高值区分布在各流域高程较低的位置,低值区分布在研究区西部怒江流域内。研究区蒸散发介于 100.69—1307.18mm 之间,多年均值为 721.20mm。岷江、金沙江、澜沧江和怒江流域平均蒸散发分别为 764.58mm、772.69mm、718.79mm 和 606.20mm。

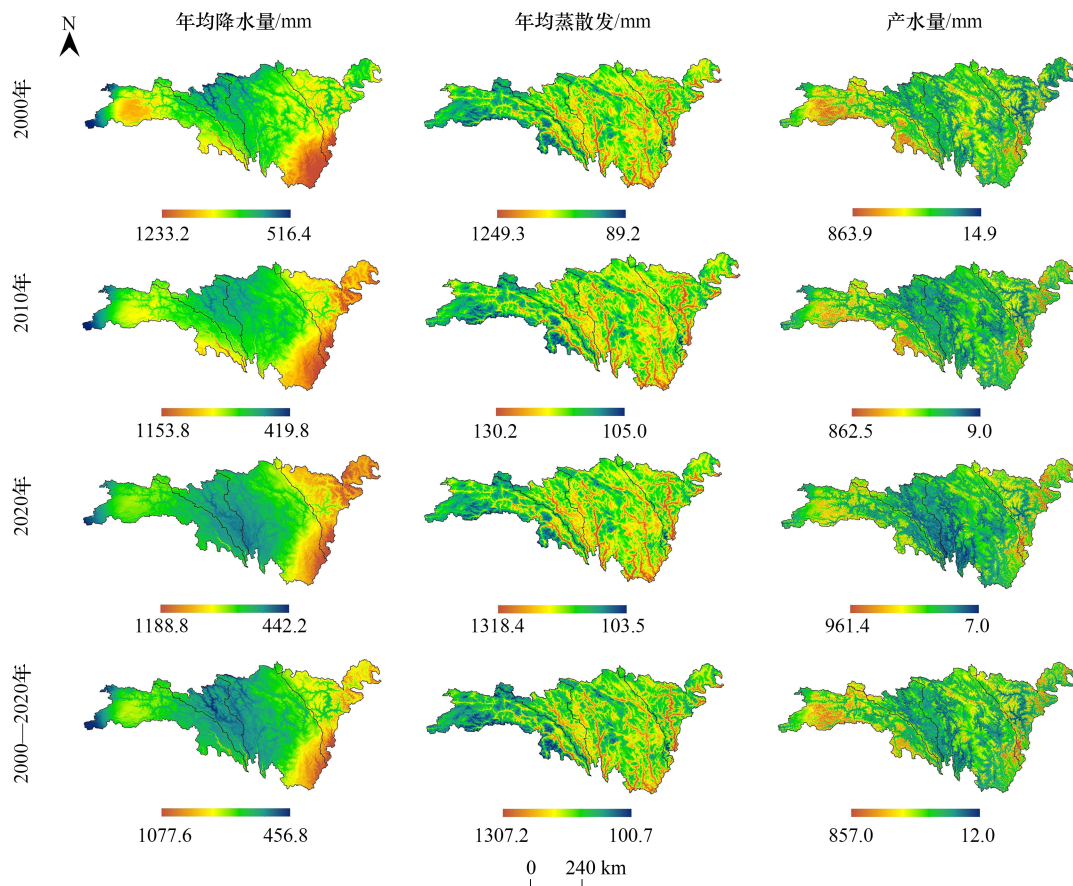


图 2 降水量、蒸散量和产水量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of precipitation, evapotranspiration and water yield

2000—2020 年藏东-川西生态水源涵养区产水量空间分布表现出一定的空间异质性,呈现“东西高,中部低”的空间分布格局。从产水模块原理来讲,在研究区东部,虽然蒸散水平较高,但充足的降水条件弥补了蒸散量,最终驱动产水量达到较高水平;而怒江流域产水高值区较集中,是因为该地区高程较高,蒸散水平极低,降水条件良好。整个研究区年均产水量介于 12.02—856.9mm 之间,均值为 292.11mm。岷江、金沙江、澜沧江和怒江流域平均产水深度分别为 320.69mm、260.27mm、241.20mm 和 356.85mm。

如图 3,在空间变化上,藏东-川西地区产水量整体表现出下降趋势 ($Slope < 0$),下降区域面积高达 74.06%,产水量增长区域集中分布在研究区东北部,面积占比仅为整体的 25.94%,为进一步明确研究区产水量变化趋势的空间分布情况,本研究将趋势分析和 MK 检验结果相叠加,结果如图所示,极显著增加和显著增加区域集中分布在研究区东北部岷江流域内,面积占比仅为 7.85%,极显著和显著下降区域面积占比为 23.32%,集中分布在研究区南部。降水量与产水量的空间变化特征基本一致,均为东北上升西南下降;蒸散发显示为东北下降趋势,西南上升趋势。

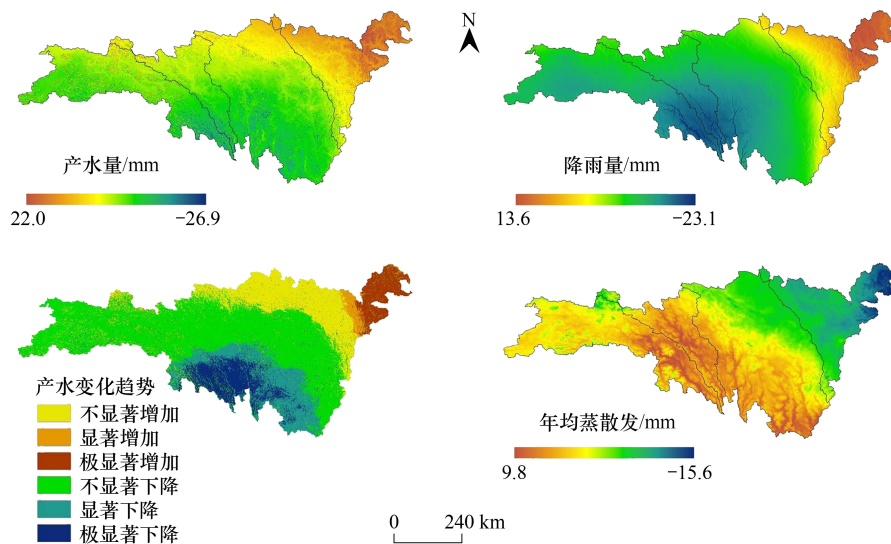


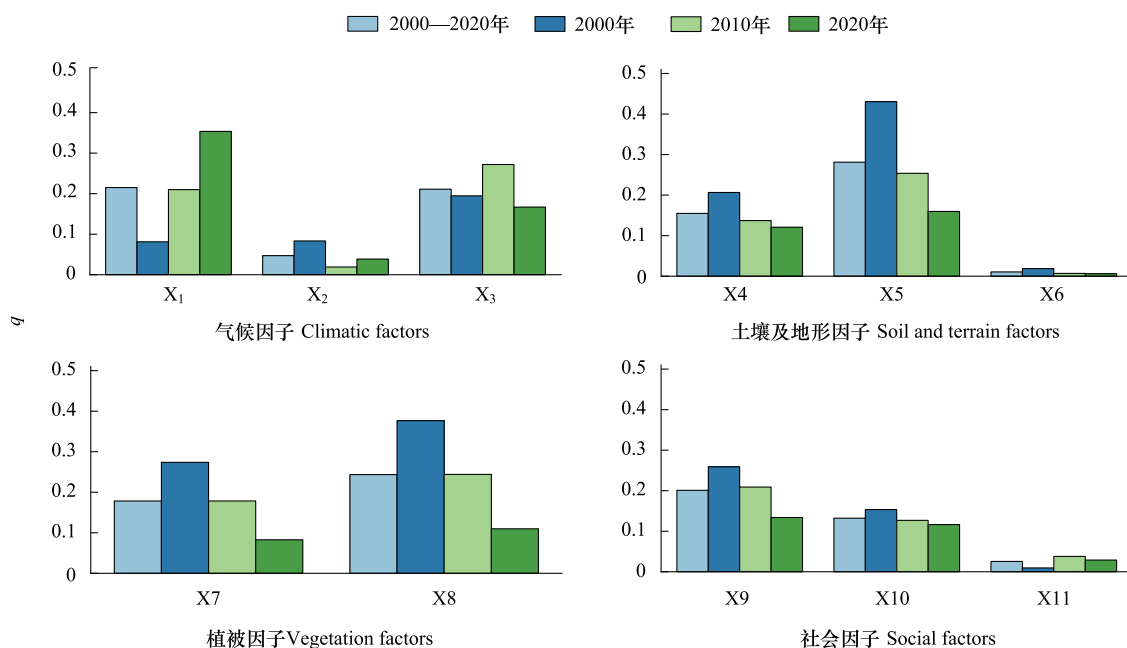
图3 2000—2020年降水量、蒸散量和产水量空间变化

Fig.3 Spatial variation in precipitation, evapotranspiration and water yield from 2000 to 2020

3.2 产水量影响因素分析

3.2.1 识别先决因子外的主要因素

GDM 单因子探测结果如图 4 所示,在气候因子中,年均湿度(0.215)和年均风速(0.211)均为影响研究区产水服务的主要因子,温度各年 q 值均小于 0.1,影响力较低;在地形因子中,高程(0.281)对产水服务影响能力最大,坡度(0.011)影响力可忽略不计;土壤因子中,土壤类型(0.15)对产水服务有一定的影响力。在植被因子中,NPP(0.244)影响力略大于 NDVI(0.178);在社会因子中,LULC(0.201)和 HAI(0.132)对产水服务的影响最为明显。但需要注意的是,在 q 值大于 0.1 的因子中,除年均湿度外,其余因子在 2020 年的影响力均

图4 单因子探测 q 值Fig.4 The q values of single factor detection

低于 2000 年,在 2020 年湿度的驱动水平超越风速成为藏东-川西地区对产水服务影响最大的因子。

GDM 交互探测结果如图 5 所示,对于产水服务来说,除其先决条件之外,年均湿度和高程交互作用影响力最大,二者交互 q 值高达 0.555,除此之外,湿度 $\cap$ NPP(0.519)、湿度 $\cap$ NDVI(0.462)和湿度 $\cap$ LULC(0.423)的交互作用也是研究区产水服务重要的驱动因素。双因子交互作用影响力相对单因子均表现出增强或线性增强,自然因素(气候因子、土壤因子、地形因子和植被因子)和人类活动的交互作用进一步影响着产水服务,自然因素通过改变自然环境状态直接干预产水量变化,而人类活动驱动地表覆盖和土壤类型转变,在不同位置展现出相异的渗透性间接且快速的影响产水量。

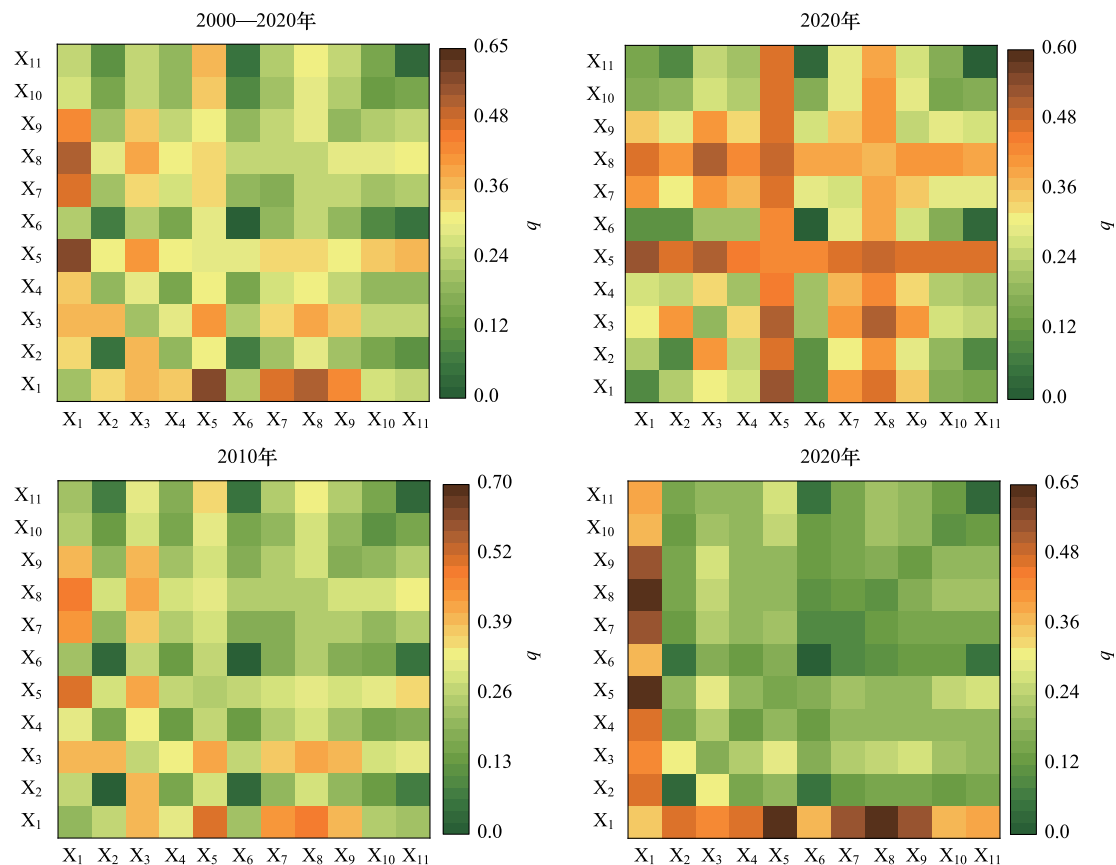


图 5 交互探测 q 值

Fig.5 The q values of interaction factor detection

3.2.2 产水量与主要因素的空间关系

为了解产水量与其先决条件和各主要影响因素与($q>0.1$)产水量之间的空间关系,本研究对藏东-川西生态水源涵养区产水量与两者进行地理加权回归模型拟合,两者残差均介于-2.5—2.5 之间,各驱动因素回归系数均在 $P<0.05$ 情况下显著,表明了拟合结果的可信度。如表 4 所示, MGWR 模型拟合效果相比 GWR 模型,前者能更好的反映产水量与其主要因素之间的空间关系。

表 4 MGWR 和 GWR 统计系数
Table 4 Statistic coefficients for MGWR and GWR

模型 Model	2000 年统计系数 Statistical coefficients for 2000	2010 年统计系数 Statistical coefficients for 2010	2020 年统计系数 Statistical coefficients for 2020	平均统计系数 Average statistical coefficient
MGWR	0.869	0.863	0.9	0.877
GWR	0.615	0.604	0.656	0.625

MGWR 拟合结果如图 6 所示:降水、蒸散发、湿度、风速、高程、NDVI、NPP 和 HAI 的平均回归系数(RC)分别为 0.611、-0.268、-0.031、0.041、0.171、-0.208、-0.303 和 0.093,模型拟合结果与 GDM 相似。不同的是,GDM 结果显示湿度和风速有较高影响力,在 MGWR 中这种影响力几乎可以忽略。降水、高程和 HAI 对产水

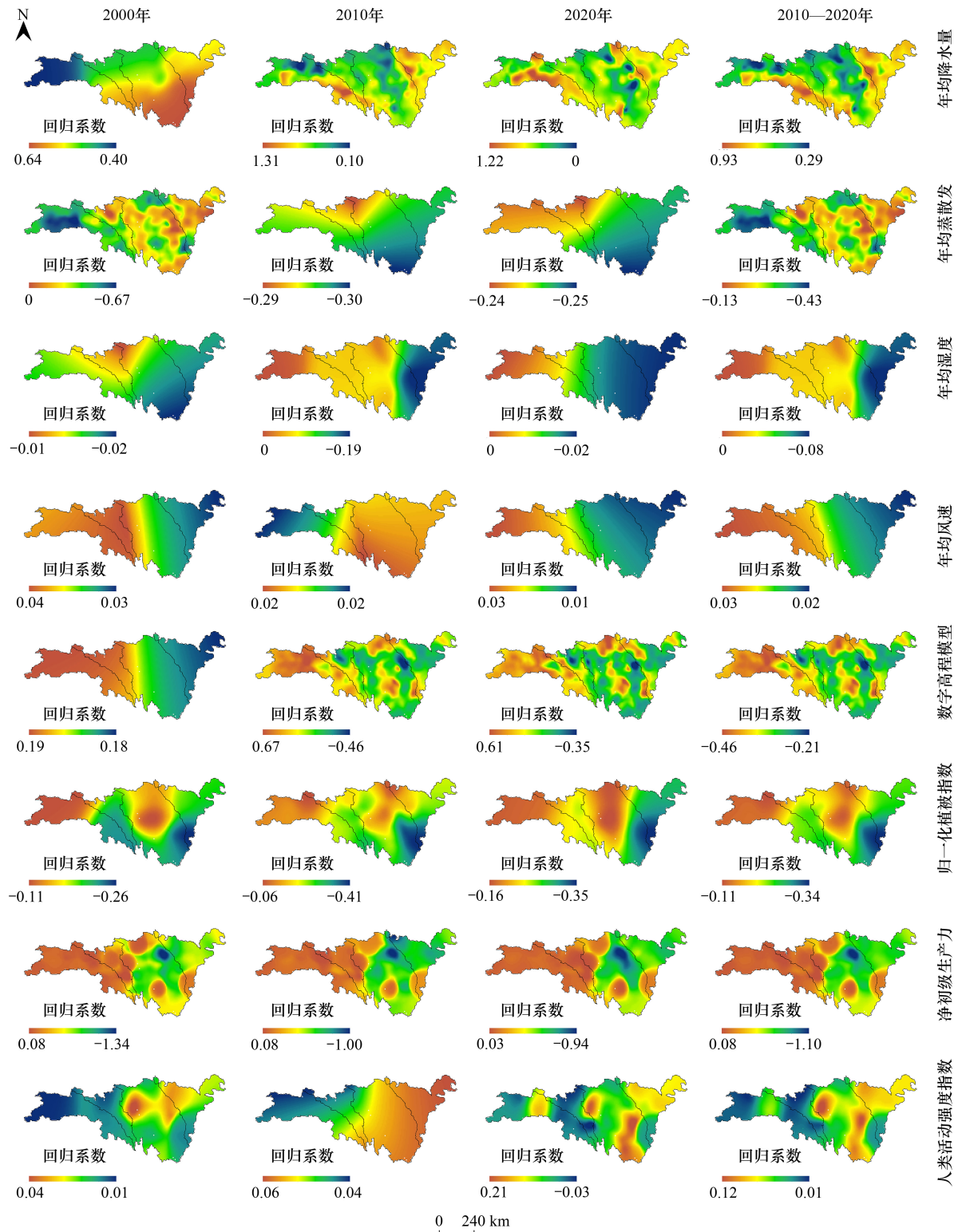


图 6 主要驱动要素回归系数分布

Fig.6 Distribution of regression coefficients of main driving factors

服务的影响表现为较强的正向作用,而蒸散发、NDVI 和 NPP 展现出较强的负向作用。2000、2010 和 2020 年主要驱动因素与产水服务空间关系的统计结果如图所示,在藏东-川西地区,驱动因素影响水平表现出强烈的空间异质性,降水对产水服务的影响在全域展现出极高的正向效应,尤其在研究区东部岷江流域大片区域和西南边界明显;蒸散发在研究区西部海拔较高地区对产水服务影响的负向作用较大;湿度和风速与产水量的拟合效果较差,影响可以忽略不计;高程的正向作用在西部怒江流域和金沙江流域北部更为显著,在澜沧江北部和金沙江流域东部存在负向作用;NDVI、NPP 对产水服务的影响作用相似,在西部高山植被覆盖度较低地区,这种影响几乎可以忽略,但在东部岷江流域,两者对产水服务的负向效应存在。需要注意的是,不同于 NPP,NDVI 在金沙江流域中部依然存在大片与产水服务关系不敏感区域,且在澜沧江流域,NDVI 的负向作用要高于 NPP;人类活动强度与产水服务正向效应主要出现在岷江流域和金沙江流域。

总的来看,本研究把先决因子和在 GDM 探测与 MGWR 拟合结果中表现程度最佳的因子定义为产水量主导影响因子,因年均湿度、风速和 HAI 在 MGWR 模型拟合结果中表现不佳,所以本文将三者剔除主导影响因子行列。鉴于 LULC 无法运用 MGWR 衡量影响力水平,但其作为产水模块参数,且 GDM 结果显示 $q>0.2$,所以本研究将其纳入主导因素中。最终将降水、蒸散发、高程、NDVI、NPP 和 LULC 定义为影响藏东-川西地区产水量的主导影响因子。

3.3 产水量稳定性与主导影响因素关系

近 20 年藏东-川西地区产水量变异系数等级划分空间分布如图 7 所示, C_v 值介于 0—1.33 之间,均值为 0.22。从整体来看,研究区产水量稳定性较好,波动水平由低到高面积占比分别为 32.40%、36.32%、20.71%、8.46%和 2.11%。本研究发现,较高波动和高波动地区在南部澜沧江流域和金沙江流域内分布相对集中,其余地区分布较为分散。此外,如图 8,本文统计了除 LULC 外,产水量主导驱动因素由低值到高值不同分区下各波动等级面积占比。其中,随着高程的增长,产水量低波动面积占比存在上升趋势,较低波动变化等级以上面积占比相应下降,进而说明整体波动水平降低;降雨、NDVI 和 NPP 三种主导驱动因素高值区相对低值区来说,产水量稳定性较好;蒸散发能力强的地区,产水量稳定性较差。综上所述,在降水量较低、蒸散量较高、高程较低、NPP 较低、NDVI 较低的区域,产水量波动水平较高,稳定性较差,在未来生态修复工程项目应向这些区域倾斜。

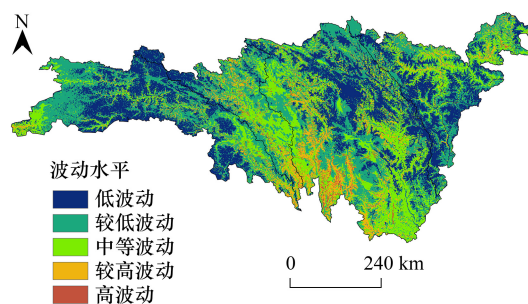


图 7 C_v 等级空间分布

Fig.7 Spatial distribution of C_v grade

3.4 未来短期内产水量变化趋势预测

本研究运用 Hurst 指数对未来短期内藏东-川西地区产水量进行预测,其空间分布结果如图 9 所示, H 介于 0.13—0.80 之间,但未来短期内有上升趋势 ($H>0.5$) 的区域面积占比仅为 4.11%。如图 b 所示,通过 ArcGIS 10.8 将趋势分析结果与 Hurst 指数进行叠加分析后发现,研究区东北处岷江流域部分地区有持续上升趋势,面积占比仅有 2.92%,但未来下降和持续下降趋势地区面积占比高达 95.30%,几乎囊括了整个研究区。在空间上,产水量未来短期内表现出的大片下降趋势与降水量的下降和蒸散水平的上升密不可分。

4 讨论

4.1 主导驱动因子对产水服务的影响

GDM 和 MGWR 结果均认为,自然因素对产水服务的影响水平高于社会因素,以降水、蒸散发和高程为代表的自然因素影响藏东-川西地区产水服务的空间分布和结构组成,本研究发现降水、蒸散发与产水服务在空间上的分布和变化几乎保持一致。就产水服务空间分布而言,其高值区集中分布在西部怒江流域的高海拔

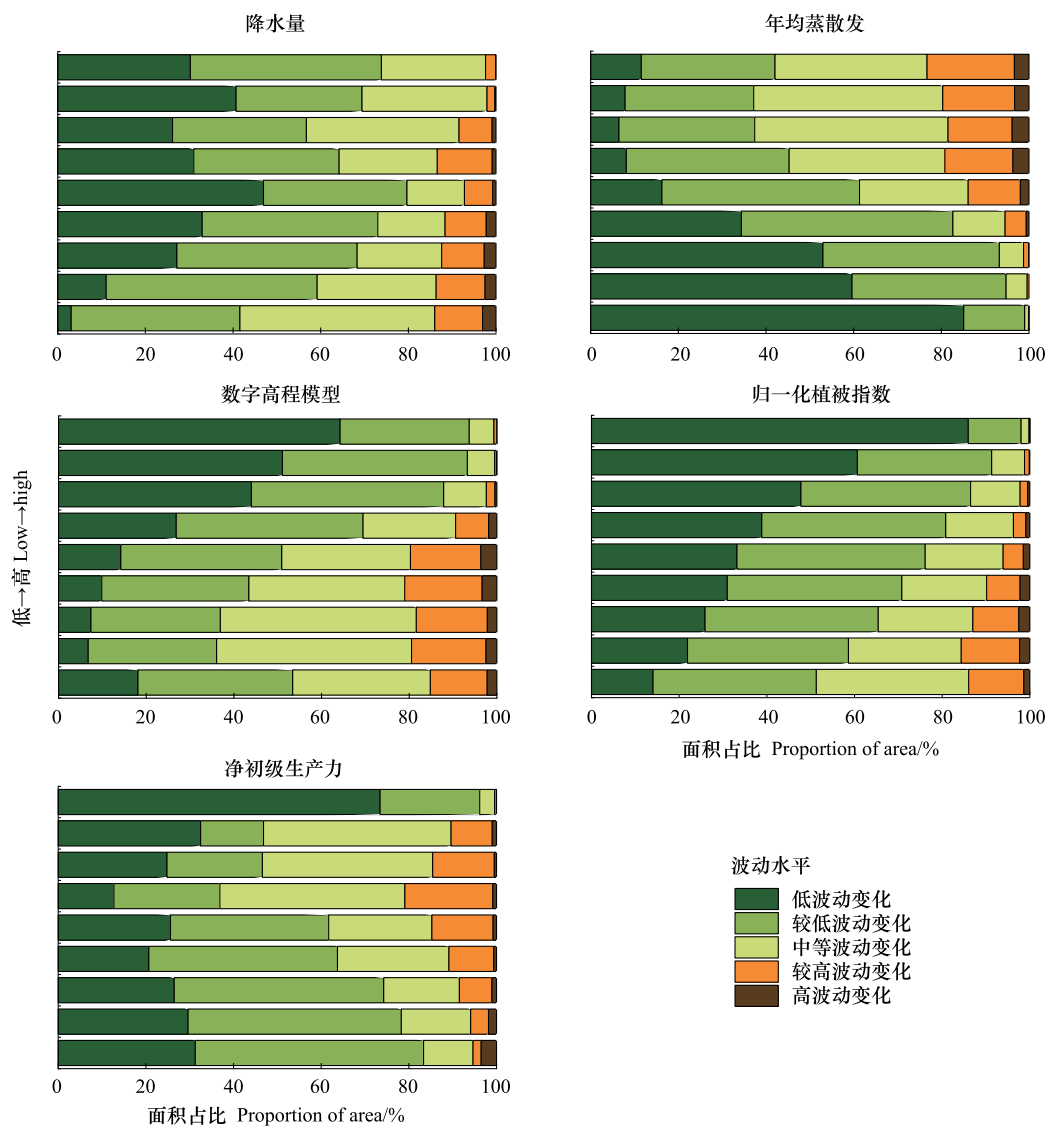
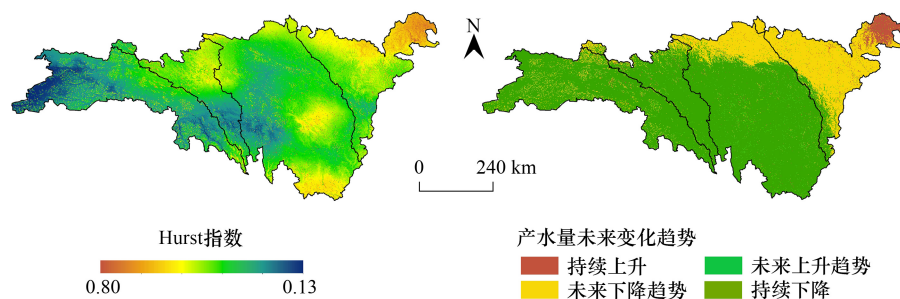
图8 产水量 C_v 等级在主导因素变化下面积占比Fig.8 The area proportion of water yield C_v grade under the change of dominant factors

图9 Hurst 指数空间分布及产水量未来变化趋势

Fig.9 Spatial distribution of the Hurst Index and future trends in water yield

地区,主要是因为高海拔和复杂地形对区域内潮湿气流的抬升有积极作用^[26-27],使得该地区降水量极为丰富,GDM 探测结果显示的湿度∩高程为影响力最高一双交互因子也佐证了这一点,且高海拔地区抑制表面蒸散发,导致该地区产水量较高。但应注意的是高山区温度较低,使得降水表现为大面积的冰川和积雪,最终造

成西部高山区水资源利用价值较低^[28-30]。从产水量空间变化角度来看,近 20 年和未来短期内产水服务在东部岷江流域几乎全区展现出上升状态,该地降水量和蒸散发分别表现出的显著上升和下降是岷江流域产水服务价值增长的重要原因,但本研究注意到这种上升姿态也仅仅在岷江流域发生。除此之外,包括怒江、澜沧江和金沙江流域在内的大片区域产水量和降水均有下降趋势,尤其在研究区南部最为明显。在厄尔尼诺现象频发的背景下,大气结构被破坏,环流异常,印度洋季风无法登陆,海陆之间的相互作用导致大片研究区降水量显著下降,此外,全球气候变暖使得空气饱和度下降^[31],蒸发散水平加强,最终导致了藏东-川西大片地区产水量降低。

此外,为分析 NDVI、NPP 和 LULC 在不同流域对产水量的影响,统计了 20 年间不同地表覆盖类型之间的相互转换,统计结果见表 5。耕地向林灌草的转换主要得益于中国退耕还林还草工程措施,林灌草面积的增加会贡献巨大的生态效益,为研究区产水服务价值增长提供帮助,但 MGWR 模型对植被因子和产水量的拟合结果也说明:大面积的人工林灌草覆盖也会使区域生态用水增加而导致产水量下降,这种影响主要表现在金沙江流域和岷江流域,NDVI 和 NPP 对产水量影响存在较强的负向作用。同时注意到,西南地区地表覆盖类型变化最为明显的是裸地扩张,面积增长了近 50%,主要分布在怒江流域内,长期的酸性淋洗使得该地裸地扩张较为严重,进而造成生态系统水源涵养和调节径流等功能下降^[32],短期来看,剧烈扩张的裸地会使产水量上升,但从大气圈水循环角度看,裸地蒸散发水平较低,无植被调节地表水,降水几乎全部转换为径流流失,最终会导致这些地区产水量下降^[33]。

政府在西南地区实行的退耕还林还草、天然林保护和石漠化综合治理等一系列生态工程项目,使植被覆盖密度明显提高,生态环境得到保护。但需要注意的是,不同自然环境的承载力有异质性,植被的大面积增加使得地表蒸散发水平提高,直接引起局部区域的水资源消耗能力抬升,降水量也随大气水分循环加剧而提升^[34],此时,如果营造植被的蒸散速率高于自然降水对区域的补偿速率,就会破坏生态系统水平衡,导致产水量下降^[35]。在岷江流域和金沙江流域局部地区,林灌草覆盖面积对产水服务的负向作用较为明显,鉴于此,两地应首要考虑保护原有自然生态环境,以天然林保护工程为主,逐步恢复以原始针叶林、灌丛、草地和高山草甸为主的天然植被。在怒江和澜沧江流域,NDVI 和 NPP 对产水量的影响力较低,从长远来看,政府应保证人与自然协调发展,通过在怒江和澜沧江流域扩大人工植被覆盖面积,可改善当地生态环境,进一步增加产水服务价值。在裸地有扩张趋势的重点地区,应首要考虑实施石漠化综合治理生态修复工程,加强绿色生态文化宣传,以改善人类活动造成的植被破坏和水土流失等状况。

表 5 2000—2020 年地表覆盖转移矩阵

Table 5 Land cover transfer matrix from 2000 to 2020

	耕地 Cropland	林地 Woodland	灌木林 Shrub	草地 Grassland	水域 Water	冰川雪 Snow/ice	裸地 Barren	不透水面 Impervious	总计 Total
耕地 Cropland	1339	626	734	2650	35	1	44	13	5441
林地 Woodland	801	38213	8020	22764	74	27	2457	6	72361
灌木林 Shrub	482	5558	14598	17049	43	28	1850	3	39611
草地 Grassland	1272	14179	14126	117720	249	1186	20392	19	169142
水域 Water	63	119	101	671	180	7	54	0	1195
冰川雪 Snow/ice	0	27	45	570	2	1009	1051	1	2706
裸地 Barren	20	1003	806	8805	25	1093	17053	0	28804
不透水面 Impervious	36	14	17	101	2	0	3	19	193
总计 Total	4012	59739	38447	170330	611	3351	42904	60	319454

4.2 研究局限和期望

藏东-川西地区地形起伏程度较大,生态系统复杂多样,基于 InVEST 模型在大尺度下模拟的生态系统服务功能,其精度很难得到验证。在高海拔地区,融雪和冻土冰川融化这部分水对产水量的补充是不可忽略的,

但本文没有将这部分水考虑在内,是因为在栅格尺度上准确的量化这部分水是极为困难的。在未来的研究中,模拟高分辨率融雪情况,进一步探讨其对区域产水量的补充是至关重要的,此外,InVEST 模型在高寒地区模拟融雪过程的研究也较为迫切。正因如此,本研究在量化产水服务的过程中,多次对比前人研究和政府文件,并反复修改模型参数,例如,最终将基岩数据作为土壤深度的替代数据用于模拟产水量,这是大胆的一次尝试,本文将模拟结果与《四川省水资源公报》中金沙江石鼓以上数据进行对比,最终认为结果是可信的。虽然存在许多困难,但本文研究仍可较好判别藏东-川西地区产水量时空分异情况、各因素影响能力大小和在不同地理位置的影响状态,并为研究区水资源的维护利用和政策制定提供了较理想的科学指引。

5 结论

本研究评估了中国西南地区产水量,并利用 GDM 和 MGWR 模型明确了其影响因素在不同地区对产水量的影响差异。主要研究结果如下:西南地区产水深度以怒江流域为最高,其次为岷江流域。降水、蒸散发、高程、NDVI、NPP 和 LULC 是影响西南地区产水量的主导因子,其中降水和高程对产水量的影响表现为正向作用,蒸散发、NDVI 和净初级生产力表现为负向作用。双因子的交互作用均表现为增强或线性增强,影响力水平最高的交互因子为降水 $\cap$ 高程。2000—2020 年藏东-川西地区产水量与降水、蒸散发空间变化趋势基本一致,更说明降水和蒸散发是控制西南地区产水变化最重要的因素。西南地区地表覆盖类型变化最明显的是裸地的扩张。通过分析研究区产水量外部影响因素,建议不要将盲目提升人工植被覆盖度作为藏东-川西地区改善产水量首要方案,应更注意对天然林的保护和对石漠化扩张的预防。

参考文献 (References):

- [1] 傅伯杰,周国逸,白永飞,宋长春,刘纪远,张惠远,吕一河,郑华,谢高地.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全.地球科学进展,2009,24(6):571-576.
- [2] 张林,齐实,周飘,伍冰晨,张岱,张岩.北京山区针阔混交林土壤有机碳含量的影响因素研究.生态环境学报,2023,32(3):450-458.
- [3] 蒋九华,齐实,胡俊,逯进生,李月,靳孟理.基于 InVEST 模型的北京山区森林生态系统碳储量评估分析.地球与环境,2019,47(3):326-335.
- [4] Leh M D, Matlock M D, Cummings E C, Nalley L L. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2013, 165: 6-18.
- [5] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, Jones L, Ziv G, Clarke D, Oliver T H, Bullock J M. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. Science of the Total Environment, 2016, 569/570: 1418-1426.
- [6] 刘美娟,仲俊涛,王蓓,米文宝.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.地理科学,2023,43(3):411-422.
- [7] 彭赤彬,钱湛,姜恒,李峰.沅江流域产水服务功能的时空变化及驱动力分析.人民长江,2023,54(6):95-102,125.
- [8] 朱志洪,周本智,王懿祥,祁军,李爱博,黄润霞.近 30 年千岛湖流域产水量时空变化及其影响因子分析.南京林业大学学报:自然科学版,2023,47(3):111-119.
- [9] 赖明,陈仁升,刘玖芬,刘淑亮,吴浩然,柳晓丹.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.草业科学,2022,39(12):2516-2526.
- [10] 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.应用生态学报,2020,31(8):2731-2739.
- [11] 胡砚霞,于兴修,廖雯,刘璇璇.汉江流域产水量时空格局及影响因素研究.长江流域资源与环境,2022,31(1):73-82.
- [12] 王晓峰,尧文洁,冯晓明,贾子续,张欣蓉,马嘉豪,周继涛,涂又,孙泽冲.青藏高原生态系统服务供需变化及其驱动因素.生态学报,2023,43(17):6968-6982.
- [13] 聂泽旭,齐实,马曦瑶,李月,伍冰晨.华蓥市山区典型林分水源涵养功能评价.水土保持学报,2020,34(2):276-282.
- [14] Fang L L, Wang L C, Chen W X, Sun J, Cao Q, Wang S Q, Wang L Z. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service in the Yangtze and Yellow River Basins. Journal of Cleaner Production, 2021, 314: 127995.
- [15] Li Y R, Chen P, Niu Y, Liang Y S, Wei T X. Dynamics and attributions of ecosystem water yields in China from 2001 to 2020. Ecological Indicators, 2022, 143: 109373.
- [16] 王耕,冯妍.辽宁太子河流域生态系统服务权衡/协同关系时空变化与情景预测.生态学报,2024,44(01):96-106.

- [17] 辛会超,王贺封,张安兵,庞吉玉,刘粉粉.2000—2020 年漳河上游生态环境质量动态监测及驱动因素分析.水土保持通报,2023,43(1): 92-103.
- [18] 黄孟勤,李阳兵,李明珍,陈爽,曾晨岑,张冰,夏春华.三峡库区人类活动强度与景观格局的耦合响应.生态学报,2022,42(10):3959-3973.
- [19] 陈田田,王钰茜,曾兴兰,王强.西南地区生态系统服务关系特征及其与植被覆盖的约束效应.生态学报,2023,43(6):2253-2270.
- [20] 冉璇,李渊,郭宇龙,位贺杰.基于 InVEST 模型的钱江源国家公园生态系统服务评估及权衡协同关系研究.长江流域资源与环境,2023,32(9):1932-1948.
- [21] 徐梓津,张雪松,陈明曼.山地岩溶区生态系统服务时空演变特征分析——以贵州省为例.生态环境学报,2023,32(7):1196-1206.
- [22] 石金鑫,梁小英,李辉茜,魏峥.陕北黄土高原景观格局对生态系统服务权衡关系的影响.生态学报,2023,43(21):8958-8972.
- [23] 张铭丹,李运刚,瑞丽江-大盈江流域生态系统服务权衡与协同关系研究.水土保持研究,2023,30(06):415-422.
- [24] 赖金林,齐实,廖瑞恩,崔冉冉,李鹏,唐颖.2000—2019 年西南高山峡谷区植被变化对气候变化和人类活动的响应.农业工程学报,2023,39(14):155-163.
- [25] 赖金林,齐实,崔冉冉,廖瑞恩,唐颖,李鹏.西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析.环境科学,2022,42(10):1-24.
- [26] 钱彩云,巩杰,张金茜,柳冬青,马学成.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系.地理学报,2018,73(5):868-879.
- [27] 荔童,梁小英,张杰,耿雨,耿甜伟,石金鑫.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.生态学报,2023,43(16):6758-6771.
- [28] 张元,张福平,丁家宝,宁亚洲,曾攀儒.降水和土地利用对黑河上游生态系统服务权衡与协同关系的影响.山东农业科学,2021,53(6):69-76.
- [29] 周雪彤,孙文义,穆兴民,宋小燕,赵广举,高鹏.1990—2020 年三江源水源涵养能力时空变化及影响因素.生态学报,2023,43(23):9844-9855.
- [30] Xia H, Yuan S F, Prishchepov A V. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their social-ecological drivers: Implications for spatial planning and management. Resources, Conservation & Recycling, 2023, 189.
- [31] Yuan W P, Zheng Y, Piao S L, Ciais P, Lombardozzi D, Wang Y P, Ryu Y, Chen G X, Dong W J, Hu Z M, Jain A K, Jiang C Y, Kato E, Li S H, Lienert S, Liu S G, Nabel J E M S, Qin Z C, Quine T, Sitch S, Smith W K, Wang F, Wu C Y, Xiao Z Q, Yang S. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. Science Advances, 2019, 5(8): eaax1396.
- [32] 薛曾辉,高驭洋,卢枰达,周静,王可琳,张斌,马玉,刘梦云.基于土地利用和地形的生态系统服务空间分布及权衡-协同-独立关系——以安塞区为例.水土保持研究,2024,31(02):240-251.
- [33] 刘永婷,杨钊,徐光来,刘斌,章翮,池建宇.基于 MGWR 模型的皖江城市带生境质量对城镇化的响应研究.地理科学,2023,43(02):280-290.
- [34] Zhang X Q, Zheng Z W, Sun S F, Wen Y H, Chen H Y. Study on the driving factors of ecosystem service value under the dual influence of natural environment and human activities. Journal of Cleaner Production, 2023, 420: 138408.
- [35] Huang W Y, Wang P, He L, Liu B Y. Improvement of water yield and net primary productivity ecosystem services in the Loess Plateau of China since the “Grain for Green” project. Ecological Indicators, 2023, 154: 110707.