

祁连山国家公园产水量时空变化及驱动因素分析

万志纲^{1,2}, 丁文广^{1,2}, 蒲晓婷^{1,2}, 吴岩松^{1,2}, 王亦悦^{1,2}

(1.兰州大学资源环境学院,兰州 730000;2.兰州大学西部环境教育部重点实验室,兰州 730000)

摘要: 为准确表征祁连山国家公园产水量时空差异性,探究产水量影响因素和驱动机制。基于降水量、参考作物蒸散量、土壤深度、根系深度和土地利用类型等参数,利用 InVEST 模型可视化祁连山国家公园 1990—2018 年产水量时空格局,使用地理探测器并结合情景模拟方法,评估和量化气候、土地利用、植被、地形等因子对祁连山国家公园产水量空间异质性和产水量变化的影响。结果表明:(1)1990—2018 年研究区产水量以 $0.56 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的速度显著增加,在空间上呈自西向东递增趋势;(2)耕地和林地产水深度最大,未利用土地和草地是研究区产水量的主要贡献者,且产水深度高值区位于 3 200~4 600 m 高海拔处;(3)降水量是产水量空间异质性的第一驱动因素,与实际蒸散量以及土地利用类型的交互作用占主导地位;(4)1990—2018 年,气候变化是产水量变化的主要驱动因子,对总产水量影响为正向作用,其次为土地利用变化,主要影响产水量变化的空间分布,对总产水量影响不大。研究成果可进一步为祁连山国家公园水资源管理和可持续发展提供基础理论依据。

关键词: 产水量; 空间异质性; 祁连山国家公园; 地理探测器

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)06-0161-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2023.06.021

Analysis of the Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Water Yield in Qilian Mountain National Park

WAN Zhigang^{1,2}, DING Wenguang^{1,2}, PU Xiaoting^{1,2}, WU Yansong^{1,2}, WANG Yiyue^{1,2}

(1.College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000;

2.Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract: To accurately characterize the spatial and temporal heterogeneity of water yield in Qilian Mountains National Park and explore the influencing factors and driving mechanisms affecting water yield. The InVEST model was used to visualise the spatial and temporal pattern of water yield in the Qilian Mountains National Park from 1990 to 2018 based on the parameters of precipitation, evapotranspiration of reference crops, soil depth, root depth, and land use type, using a geo-detector and combined with a scenario simulation methods to assess and quantify the effects of climate, land use, vegetation, terrain, and other factors on the spatial heterogeneity and changes in water yield in the Qilian Mountains National Park. The results showed that: (1) From 1990 to 2018, the water yield in the study area increased significantly with a trend of $0.56 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, with a spatial increasing trend from west to east. (2) Farmland and Forestland had the largest water yield depth, and Unused land and Grassland were the main contributors to water yield in the study area. The high-value water yield depth areas were located at high altitudes between 3 200 m to 4 600 m. (3) Precipitation was the first driver of spatial heterogeneity of water yield, and the interaction with actual evapotranspiration and land use type dominates. (4) From 1990 to 2018, climate change was the main driver of changes in water yield, with a positive effect on total water yield, followed by land use change, which mainly affects the spatial distribution of water yield change but had little effect on total water yield. The research results can further provide the basic theoretical for the water resources management and sustainable development of Qilian Mountain National Park.

收稿日期:2023-06-07

资助项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0507450);中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100102)

第一作者:万志纲(1996—),男,硕士研究生,主要从事国家公园与生态系统服务研究。E-mail:wanzhg21@lzu.edu.cn

通信作者:丁文广(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事国家公园、环境管理等方面的研究。E-mail:wgding@lzu.edu.cn

Keywords: water yield; spatial heterogeneity; Qilian Mountain National Park; geo-detecto

产水量可描述流域水资源可用性,是区域土地利用规划以及可持续发展决策的重要组成部分,特别是在干旱区,作为重要的生态系统服务功能,对农业、工业、水电、渔业和娱乐活动至关重要^[1]。产水量是众多生态系统服务中最具价值的服务之一。产水量对区域生态系统平衡与可持续发展有着重要意义,产水量与用水量的不平衡可能阻碍区域生态系统和经济的可持续发展。已有研究^[2]表明,产水量与区域自然地理环境条件和人类活动有紧密的关系,独特、复杂的自然地理环境因子的影响使得产水量在研究区内部空间差异较大,存在明显的异质性,也加大水资源科学管理难度。因此,研究产水量时空变化的驱动因素是非常必要的,可为研究区的水资源管理和可持续发展提供理论依据。

近年来,随着遥感(GIS)技术和水文模型的快速发展,使得产水量可视化描述、时空变化得到清晰的阐述。目前,通常采用 SWAT (soil and water assessment tool)、TOPMODEL (topography based hydrological model) 和 InVEST (integrated valuation of ecosystem services and trade-offs) 等模型来评估产水量。InVEST 模型作为近年来被广泛使用的优势模型,其模型中的产水量模块基于水平衡原理,考虑不同土地利用类型土壤渗透性的空间差异及地面粗糙度、地形等因素的影响,以栅格为单元定量评估不同景观类型的产水量^[3],适用于不同尺度产水量的评估,参数调整灵活,最终以可视化的空间形式表达。目前,国外学者把 InVEST 模型应用到很多国家和地区,如 Redhead 等^[4]、Sánchez-Canales 等^[5] 和 Shaw 等^[6] 分别对英国多条河流、西班牙地中海流域和美国加利福尼亚州的产水量进行评估,并取得很好的应用效果。国内学者应用 InVEST 模型研究东北地区^[7]、云南省^[8]、横断山区^[9]、伊洛河流域^[10] 和中国喀斯特山地地区^[11] 等区域的水源涵养量或产水量的时空变化。

祁连山国家公园是我国西北地区重要的生态安全屏障,也是河西走廊极为重要的水源产流地,水资源一直是制约该地区可持续发展和经济水平的重要因素之一。当前,InVEST 模型在祁连山地区也得到应用,魏培洁等^[12]、赵亚茹等^[13] 和李芳等^[14] 分别对祁连山地区的疏勒河上游、石羊河上游和黑河流域上游的产水量进行研究发现,产水量是气候、土地利用以及地形等因子综合作用的结果,但是在不同的流域中,产水量响应这些影响因子的方式是异质的,具有不同的特征。此外,哪种单一因子或复合因子是祁连山国家公园产水量的主控因子尚不明确。同时,随着全球气候变化,很多区域出现地表水资源短缺和水环境急剧恶

化等问题^[15],水资源供需矛盾日益突出。目前,针对祁连山地区的产水量时空变化进行分析,但关于祁连山国家公园产水量时空分布相关研究较少,此外尚无针对祁连山国家公园产水量影响机制方面的研究。

鉴于此,基于 InVEST 模型,评估 1990—2018 年祁连山国家公园的产水量,基于 ArcGIS 可视化祁连山国家公园产水量的时空格局特征,利用地理探测器结合情景模拟法量化产水量变化的驱动因素和产水量空间异质性的主导因素,旨在探索祁连山国家公园产水量时空变化特征,量化复合因子对产水量的贡献,揭示祁连山国家公园产水量时空变化的驱动机制。可为祁连山国家公园的水资源管理和可持续发展提供理论依据,将有利于祁连山国家公园以及河西走廊水资源可持续利用,对保障水资源安全和生态可持续发展具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

祁连山国家公园正式设立于 2017 年 9 月,横跨甘肃、青海两省,其南部为青藏高原,北部为河西走廊,海拔为 1 761~5 766 m(图 1),区域狭长,总面积为 $5.02 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中甘肃部分为 $3.44 \times 10^6 \text{ hm}^2$,青海部分为 $1.58 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。气候主要属于高原山地气候,年均气温低于 4°C ,年均降水量约为 400 mm,具有太阳辐射强,昼夜温差大等特点。研究区水资源丰富,是疏勒河、黑河、石羊河三大内陆河流的发源地。内有雪山、冰川、森林、灌丛、草原、草甸、沼泽、湿地等多种土地利用类型,也是我国重要的野生动物多样性保护区,自然环境多样^[16]。

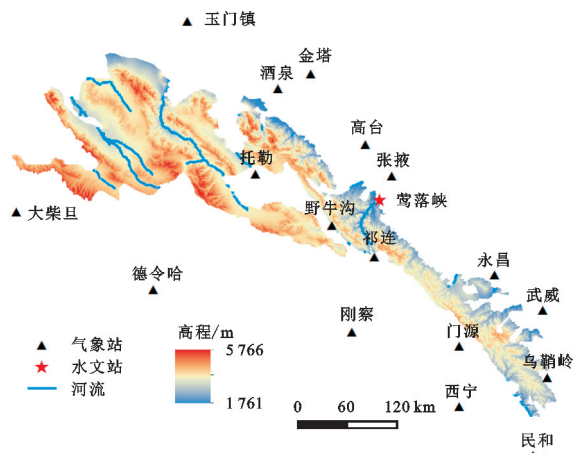


图 1 研究区概况

1.2 数据来源

数字高程模型(DEM)数据和 1990—2018 年 29 期土地利用类型数据来自中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn/data>),分辨率分别为 90,30

m,其中土地利用类型包含 6 种一级类和 26 种二级类。所需 1990—2018 年研究区 17 个逐日气象站点数据来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),气象站点数据主要包括逐日降水量、气温、日照时间、风速和相对湿度;土壤数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),分辨率为 1 000 m;归一化植被指数(NDVI)数据来自国家青藏高原数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>),分辨率为 30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 产水量 产水量是基于 InVEST 模型中产水量模块进行计算获取,通过降水量、参考作物蒸散量、土壤深度、根系深度和土地利用类型等参数计算获得 1990—2018 年的祁连山国家公园产水量。具体计算公式为:

$$Y_{xj} = (1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}) \times P_x \tag{1}$$

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \tag{2}$$

式中: Y_{xj} 为土地利用类型 j 上栅格单元 x 的年均平均产水量(mm); AET_{xj} 为土地利用类型 j 上栅格单元 x 的年实际蒸散量(mm); P_x 为栅格单元 x 上的年降水量(mm); R_{xj} 为 Bydyko 干燥指数(参考作物蒸散量与降水量的比); ω_x 为气候与土壤属性的非物理参数。

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} \tag{3}$$

$$R_{xj} = \frac{K_{xj} \times ET_0}{P_x} \tag{4}$$

式中: Z 为 Zhang 系数,其值为 1~10; AWC_x 为植物可利用含水量(mm); K_{xj} 为植物蒸散系数; ET_0 为参考作物蒸散量,计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_x - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \tag{5}$$

式中: ET_0 为参考作物蒸散量(mm/d); R_x 为地表净辐射[MJ/(m·d)]; G 为土壤热通量[MJ/(m²·d)]; T_{mean} 为日平均温度(°C); u_2 为 2 m 处日平均风速(m/s); γ 为干湿表常数(KPa/°C); e_s 为饱和水汽压(KPa); e_a 为实际水汽压(KPa)。

1.3.2 地理探测器 地理探测器由因子探测器、风险探测器、交互作用探测器和生态探测器组成,是探测因变量空间分异性的方法,如果自变量与因变量的空间分布具有相似性,则该自变量对因变量就具有重要的影响,空间相似性越大,影响程度也越大^[17]。以 10 年为间隔,从已计算出的 1990—2018 年的产水量中选取 1990 年、2000 年、2010 年和 2018 年的产水量为因变量,应用

因子探测器、风险探测器来探测产水量空间异质性的主导因素。选取降水量、气温、实际蒸散量、土地利用类型、NDVI、高程、坡度和坡向作为驱动因素。利用 ArcGIS10.7 软件创建渔网,生成 2 144 个样点,除去空值样点,对剩余的 2 102 个样点进行分析。

(1)因子探测器:探测产水量的空间异质性,明确各驱动因素对产水量空间异质性的解释程度,用 q 值表示:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \tag{6}$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \tag{7}$$

$$SST = N \sigma^2 \tag{8}$$

式中: L 为因变量或变量的分层; N 和 N_h 分别为区域或 h 层某种因子的栅格数量; σ^2 和 σ_h^2 分别为全域和 h 层产水量的方差; SSW 和 SST 分别为不同层内方差之和与全区总方差; q 值为驱动因素对产水量空间异质性的解释力, q 值为 0~1, q 值越大,表示驱动因素对产水量空间异质性解释力越强。

(2)交互作用探测。探测驱动因素两两共同交互作用对因变量空间异质性解释力的大小,交互作用类型见表 1。

表 1 交互作用类型

判断依据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \min[q(X1), (X2)]$	非线性减弱
$\min[q(X1), (X2)] < q(X1 \cap X2) < \max[q(X1), (X2)]$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \max[q(X1), (X2)]$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + (X2)$	独立关系
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + (X2)$	非线性增强

1.3.3 情景模拟法 假设在某种情景下,土地利用在过去的一段时间内维持稳定,该情景下计算出的产水量为模拟产水量,实际产水量与模拟产水量的差值就是土地利用变化对产水量的影响量,土地利用变化和气候变化双重影响下的产水变化量与土地利用变化影响量的差值即为气候变化对产水量的影响量^[13,18]。计算方法为:

$$W_L = W_O - W_S \tag{9}$$

$$W_C = W_T - W_L \tag{10}$$

式中: W_L 为土地利用变化对产水量的影响量(m³); W_S 为模拟产水量(m³); W_O 为实际产水量(m³); W_C 为气候变化影响对产水量的影响量(m³); W_T 为土地利用变化和气候变化双重影响下的产水变化量(m³)。

1.4 参数处理

InVEST 产水量模型所需的数据为 1990—2018 年降水量、参考作物蒸散量、土地利用类型以及植物可利用含水量、Zhang 系数、生物物理参数表、子流域

和土壤深度。数据处理及模型检验见表 2,所有数据均以 300 m 空间分辨率重新采样。

表 2 参数及本地化处理

参数	本地化处理
降水量	1990—2018 年祁连山国家公园及周边共 17 个气象站点日降水量数据,计算得到年降水量数据,用 ArcGIS 中反距离权重法进行空间插值处理,得到降水量空间栅格数据
参考作物蒸散量	基于 1990—2018 年祁连山国家公园及周边共 17 个气象站点日最高温、日最低温、日平均气温、日平均风速、日平均相对湿度和日照时数,采用校正的 Penman-Monteith 公式计算,然后再通过 ArcGIS 中反距离权重法进行空间插值处理
植物可利用含水量	利用土壤普查数据,土壤质地组成进行计算
Zhang 系数	通过调节季节参数 Z ,对流域产水量的输出结果进行校准。模拟得到莺落峡流域 29 年的平均产水量为 $4.64 \times 10^8 \text{ m}^3$,与实际多年平均产水量 $4.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ 最为吻合,模拟效果最好,模拟精度为 89.0%。确定 Z 系数为 2.45
生物物理参数表	生物物理表中土地利用类型的系数来源于文献 ^[12-14] 和 InVEST 模型推荐的参数获得
子流域	基于数字高程模型数据通过 ArcGIS 中的水文分析工具生成子流域
土壤深度	基于地理空间数据云下载的第二土壤调查数据库生成土壤深度

2 结果与分析

2.1 祁连山国家公园产水量时空演变

2.1.1 空间分布 由图 2 可知,祁连山国家公园多年平均产水量空间分布差异明显,总体上呈现出自西向东递增趋势。综合分析表明,气候因素和土地利用类型共同建立产水量分布模式。祁连山国家公园实际蒸散量主要受到气温、土地利用类型和降水量的影响,主要表现为林地实际蒸散量高,草地和未利用土地实际蒸散量低。产水量高值区位于以林地为主的天祝藏族自治县、门源回族自治县和山丹县,平均产水深度为 100~200 mm,尽管实际蒸散量相对较高,但是该地区降水量高,是祁连山国家公园多年平均降水量最丰沛的地区,降水量远大于实际蒸散量,导致产水量较高。产水量低值区位于以未利用地和草地为主的肃南裕固族自治县和肃北蒙古族自治县,平均产水深度为 0~50 mm,尽管实际蒸散量低,但是西部地区降水量少,甚至出现实际蒸散量大于降水量的情况,导致产水量少。从时空变化来看,1990—2000 年(图 3a)和 2000—2010 年(图 3b)祁连山国家公园的大部分地区产水量变化不明显,只有南裕固族自治县、祁连县和天祝藏族自治县的东部地区有明显的变化,且以增加为主。2010—2018 年(图 3c),只有西部地区的肃北蒙古族自治县和德令哈市的产水量变化不大,其余地区产水量的变化明显,且以增加为主。

2.1.2 时间变化 从时间分布来看(图 3d),1990—2018 年祁连山国家公园多年平均产水深度为 50.05 mm,多年平均产水量为 $2.61 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。1990—2018 年产水量呈显著增加趋势,增加趋势为 $0.56 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,产水量最高值为 $4.33 \times 10^9 \text{ m}^3$,出现在 2018 年,最小值为 $0.96 \times 10^9 \text{ m}^3$,出现于 1991 年,年际波动幅度较大。1990—2018 年研究区多年平均降水深度为 251.97 mm,多年平均降水量为 $1.26 \times 10^{10} \text{ m}^3$,从降水量年际波动趋势来看,降水量与产水量波动趋

势一致。利用皮尔逊相关性分析发现,降水量与产水量通过 0.01 的显著检验,相关性系数为 0.96,表明降水量年际变化是产水量年际变化的主要驱动因素,产水量的年际波动变化是降水量的年际变化所导致的。

2.2 产水量空间相关性

全局 Moran I 指数的结果显示,多年平均产水量的 Moran I 指数为 0.66,且通过 0.1% 的显著性水平检验。表明产水量存在显著的全局空间正相关性,反映出祁连山国家公园全域产水量有明显的集聚特征。应用局部 Moran I 指数进一步探究该研究区产水量空间集聚特征,局部 Moran I 指数的结果见图 4,表明祁连山国家公园多年平均产水量整体上以高一高、低一低和不显著的聚类为主。研究区东部为高一高集聚区,西部为低一低集聚区,反映出产水量具有明显的空间异质性。

2.3 产水量空间异质性驱动因素分析

单因子探测器结果表明,8 个因子对产水量的空间异质性的影响都通过 0.1% 显著性检验。年均降水量和年均气温对产水量空间异质性的解释力最高,分别为 70.1% 和 35.9%,对祁连山国家公园产水量空间异质性的影响最大;实际蒸散量、土地利用类型和 NDVI 对祁连山国家公园产水量空间异质性的解释力分别为 20.1%,12.9%,12.6%,解释力主要在 10%~30%,对祁连山国家公园产水量空间异质性有一定的影响;坡度、高程和坡向的解释力分别为 7.0%,2.5%和 0.4%,解释力<10%,对祁连山国家公园产水量空间异质性的影响较小。

交互探测结果(图 5)表明,任意 2 个因子共同交互作用对产水量空间分布格局的影响均高于单因子独自作用,都表现为双因子增强和非线性增强。在研究区中,降水量与实际蒸散量、降水量与土地利用类型、降水量与 NDVI 和降水量与高程的交互作用解释力较强,分别为 94.2%,91.6%,79.9%和 79.0%。前列交互组合中均包含降水量,进一步证实研究区产水量空间格局主要受控于降水量,与单因子探测结果相印证。值得注意的是,虽然土地利用和高程因子独

立解释力较弱,但二者与气候因子中降水量和年平均气温的交互作用后均表现出显著的增强作用,表明土地

地利用和高程因子通过与气候因子的相互作用后,在产水量空间格局中起重要作用。

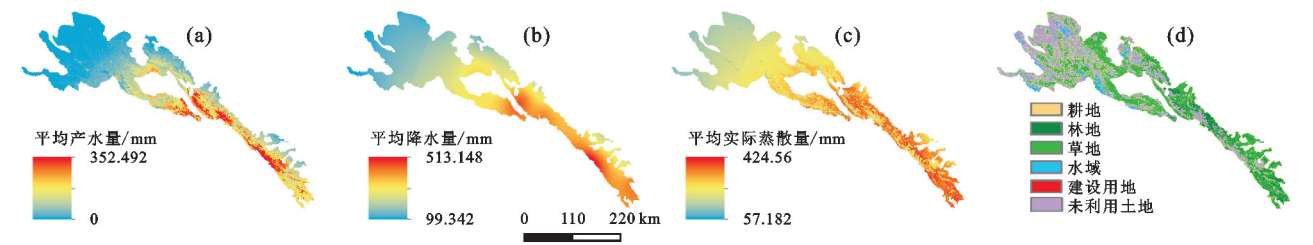


图 2 产水量、气象要素、土地利用类型的空间分布

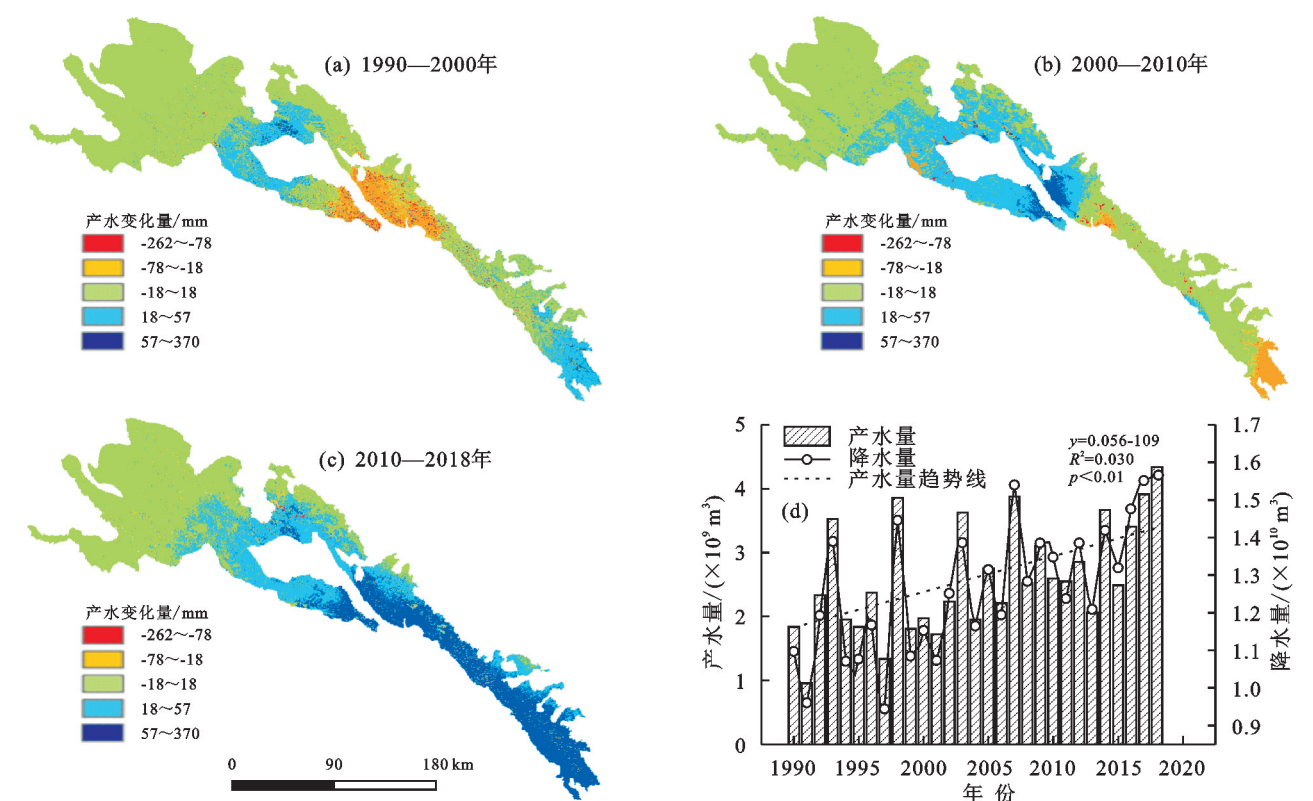


图 3 产水量变化的空间分布和产水量的年际变化

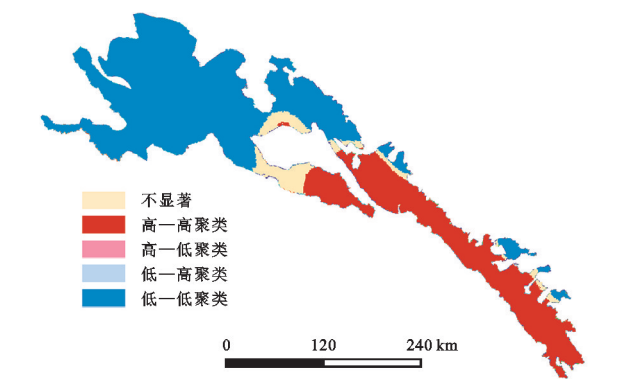


图 4 产水量局部自相关分析

各因子不仅通过交互作用增强对产水量空间异质性的解释力,而且其对产水量的影响还受控于环境梯度。当降水量增大时,在更低的实际蒸散量及 NDVI 下即可观察到 80 mm 及以上的产水量(图 6a、图 6b),且产水量高值区逐渐向 4 500 m 附近的海拔区聚拢(图 6c)。当海拔升高时,温度对产水量的抑制作用削弱(图 6d)。

为进一步剖析降水量和土地利用类型在海拔梯

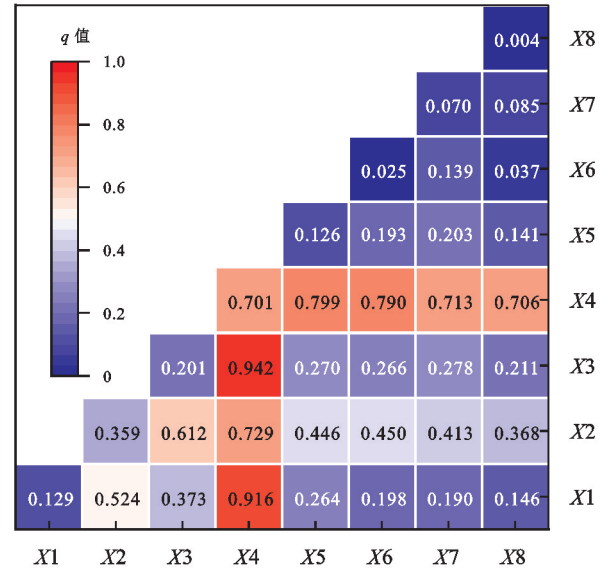
度上对产水量的影响,基于祁连山国家公园海拔间隔 200 m 对 1990—2018 年产水深度(单位面积的产水量)、降水深度(单位面积的降水量)和各土地利用类型面积占比进行平均值统计,观察其在海拔梯度上的变化(图 6e)。结果表明,随着海拔升高,产水深度与降水深度的变化趋势一致,都表现为“W”型变化趋势,且各土地利用类型面积占比也不断发生着变化,草地、林地和耕地面积占比先增后减,水域和未利用土地面积占比先减后增。可见,不同海拔产水深度的不同与降水深度和土地利用有关,且降水深度为主要驱动因素。值得注意的是,降水深度的变化速率大于产水深度的变化速率,主要是土地利用面积占比变化的原因。在 3 200~4 400 m 海拔处,降水深度大幅度下降,而产水深度却几乎保持平稳,但是林地和草地的面积占比却在不断下降,未利用土地的面积占比不断增加,且已有研究^[7]表明,不同土地利用类型的产水能力(产水能力是指在相同的气候条件下,不同土

地利用类型的产水深度)依次为未利用土地>耕地>草地>林地>水域。因此,各土地利用类型面积占比的变化缓冲降水深度变化对产水深度的部分影响。

2.4 产水量对不同土地利用类型的响应

由于建设用地占总面积的 0.02%,对产水量影响甚微,在此不予考虑。未利用土地和草地的多年平均产水量最大,分别为 10.84×10^8 、 $10.65 \times 10^8 \text{ m}^3$,其次是林地($4.44 \times 10^8 \text{ m}^3$)、耕地($0.11 \times 10^8 \text{ m}^3$)、水域($0.02 \times 10^8 \text{ m}^3$)。需要注意的是,由于不同土地利用类型的面积大小不同,并不能说明产水量越高的土地利用类型产水深度更大。产水深度最高的是耕地(84.81 mm)和林地(70.58 mm),其次是未利用地(49.60 mm)、草地(47.91 mm)和水域(0.58 mm),主要是各土地利用类型与其所处的气候条件综合作用的结果,且气候因素为主要影响因素。耕地和林地主要处于降水高值区,使耕地和林地的产水深度高。耕地与林地相比,林地的根系可以有效地截留降水,同时密集的冠层具有巨大的蒸腾作用,农田因为农业机械的使用进一步加剧土壤压实,往往产生更多径流;而未利用土地、草地和水域主要分布于降雨量低的西部地区,使未利用地、草地、水域产水深度较低。其中

未利用土地只能过滤小部分水,降水将直接渗入地面或形成径流,相比之下,草地截留部分降水,产水深度相对未利用地较低,而水域直接暴露环境中,蒸散量最大,产水深度最低^[19]。



注: X1、X2、X3、X4、X5、X6、X7、X8 分别为土地利用类型、年平均气温、年均实际蒸散量、年均降水量、NDVI、高程、坡度、坡向。下同。

图 5 各因子交互作用探测

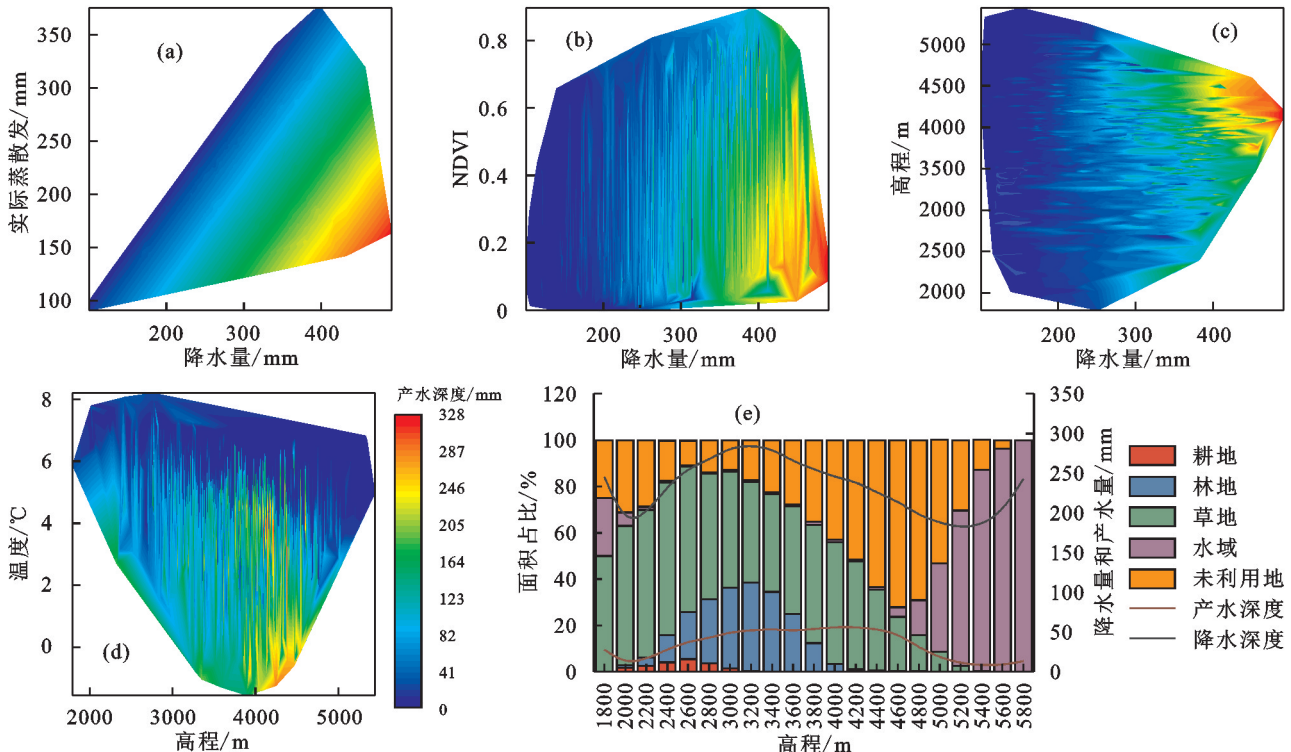


图 6 不同环境梯度下各驱动因素对产水量影响的变化

2.5 产水量变化的驱动因素分析

单因子探测结果(图 7a)表明,不同时间段的主导因子可能不同,1990—2000 年和 2010—2018 年时,降水量变化对产水量变化的空间分布解释力占主导地位,其次为实际蒸散量变化。2000—2010 年时段实际蒸散量变化对产水量变化的空间分的解释力占主导地位,其次为

降水量变化。在 2000 年以后,土地利用变化的解释力比 2000 年以前的解释力大幅度提升 2 倍以上,达到 17%,仅次于降水量变化和实际蒸散量变化的解释力,说明 2000 年以后的土地利用发生较大变化,对产水量变化的空间分布产生较大影响。交互探测结果(图 7b~图 7d)表明,降水量变化和实际蒸散量变化的交互作用的解释

力最大,为 87.0%~92.8%,其次是降水量变化和土地利用变化交互作用的解释力,为 44.4%~86.0%,可见降水量变化和实际蒸散量变化、降水量变化和土地利用变化的交互作用是产水量变化空间分布的主要驱动因素。虽然高程的解释力很低,但与其他因素的交互作用明显增强其他因子的解释力,尤其是温度、土地利用和实际蒸散量变化的解释力,表明高程对产水量变化的空间分布起到一定作用。

基于情景模拟法,探讨整个研究区总产水量对气候变化和土地利用变化的响应。假设在 1990—2000 年、2000—2010 年和 2010—2018 年祁连山国家公园土地利用不发生变化的背景下,设置 3 种情景。分别为 2000 年的气候和 1990 年的土地利用;2010 年的气候和 2000 年的土地利用;2018 年的气候和 2010 年的土地利用。模拟出 2000 年、2010 年和 2018 年的产水量。结果(表 3)表明,1990—2000 年实际产水量增加 $0.134 \times 10^9 \text{ m}^3$,其中土地利用变化导致产水量减少 $0.082 \times 10^9 \text{ m}^3$,对产水量变化的贡献度为 -63.4%,而气候变化使得产水量增加 $0.216 \times 10^9 \text{ m}^3$,对产水量的贡献度为 163.4%,可知该时段气候变化对产水量产生主导的正向作用,土地利用变化对产水量产生负向作用。2000—2010 年实际产水量增加 $0.617 \times 10^9 \text{ m}^3$,其中土地利用变化导致产水量减少 $0.003 \times 10^9 \text{ m}^3$,对产水量变化的贡献度为 -0.5%,而气候变化使得产水量增加 $0.62 \times 10^9 \text{ m}^3$,对产水量的贡献度为 100.5%,可知该时段土地利用变化对产水量产生负向作用。2010—2018 年时段实际产水量增加 $1.75 \times 10^9 \text{ m}^3$,其中土地利用变化导致产水量增加 $0.008 \times 10^9 \text{ m}^3$,对产水量变化的贡献度为 0.5%,而气候变化使得产水量增加 $1.737 \times 10^9 \text{ m}^3$,对产水量的贡献度为 99.54%,土地利用变化和气候变化都对产水量产生正向作用。值得注意的是,土地利用变化对不同时间段的产水量变化的贡献度差异较大。通过计算各时段土地利用变化对产水量的正向作用与负向作用来进一步分析造成此现象的原因。1990—2000 年土地利用变化对产水量的正向作用影响量为 $0.002 \times 10^9 \text{ m}^3$,负向作用影响量为 $0.084 \times 10^9 \text{ m}^3$,土地利用变化对产水量的正向影响远小于负向影响,几乎没有正向作用和负向作用的抵消,使土地利用变化对产水量的影响较大。2000—2010 年和 2010—2018 年土地利用变化对产水量的正向作用影响量分别为 0.064×10^9 , $0.075 \times 10^9 \text{ m}^3$,负向作用影响量为 0.067×10^9 , $0.066 \times 10^9 \text{ m}^3$,正向作用和负向作用相差不大,出现强烈的抵消作用,使土地利用变化对产水量的影响较小。

此外,情景模拟法中土地利用变化对总产水量的影响力(贡献度的绝对值)持续下降,与地理探测器的结果相反。是因为情景模拟法基于整个研究区总产

水量进行分析,土地利用变化对产水量的正向作用和负向作用出现相互抵消,地理探测器基于栅格数据进行分析,没有土地利用面积转化对产水量的正向作用和负向作用的相互抵消。综合上述分析,土地利用变化对产水量的相互抵消作用越来越强烈,导致土地利用变化对总产水量的影响量持续下降,但是正向作用和负向作用的绝对值之和却越来越大,即土地利用变化在空间上导致的产水量变化越来越大,土地利用变化对产水量空间变化的影响力持续上升。

3 讨论

利用 1990—2018 年气象数据,通过 InVEST 模型对祁连山国家公园的产水量进行准确评估。研究表明,近 30 年来,祁连山国家公园产水量显著上升,且与降水量波动趋势一致,说明降水量对产水量有明显的影响,与黑河流域上游^[14]及祁连山地区^[20]的研究一致。产水量空间分布呈自东向西逐渐递增,高一高聚集区集中在东部,低—低聚集区集中在西部,具有明显的空间异质性,可为祁连山国家公园生态系统产水量重点区域的决策与规划提供依据。东部的产水量“高一高”集聚区域,可作为生态系统产水量重点功能区加以规划保护,以维持生态系统产水服务功能稳定性,同时需要加强防洪涝工程建设,避免发生洪涝灾害。西部产水量“低—低”聚集区,降水量少,植被单一,生态系统脆弱,容易受人为因素的干扰,因此,应进一步减少人类在该区域的活动,重点保护生态系统稳定和生物多样性。

通过地理探测器量化产水量主导因子及多因子耦合的解释力发现产水量空间异质性受到降水量、实际蒸散量、温度、土地利用、NDVI、高程和坡度等因子不同程度的影响。其中降水量是祁连山国家公园产水量空间异质性的主要影响因子,解释力达到 70.1%。与国内学者在青海湖流域^[2]、中国典型流域^[7]等区域得出的结论类似。此外,本研究结果表明,降水量与实际蒸散量的交互作用以及降水量与土地利用的交互作用控制着整个祁连山国家公园的产水格局,与刘美娟等^[2]、郑续等^[21]的研究结果一致。虽然,降水量、实际蒸散量和土地利用类型是主要驱动因子,但不能否认其他因子对产水量空间异质性的影响。本研究发现,海拔体现气候因素和土地利用的综合差异性,间接地对产水量空间异质性产生影响,产水深度随海拔的升高呈现出“W”型变化趋势,表明在产水量的管理中,应综合考虑不同海拔、气候因素和土地利用三者之间的产水特征的差异。

降水量和实际蒸散量直接影响产水量的形成和变化^[21]。流域产水量受水文循环中地表实际蒸散

量、土壤水分状况和土地利用类型变化的影响^[22]。土地利用对产水量空间异质性的影响是复杂的,土地利用类型通过改变下垫面状况、土壤物理特性、地表粗糙度、地表反射率、局部水汽循环和地表径流等水文过程来影响区域实际蒸散量和降水量,特别是实际蒸散量,进而影响产水量^[23]。本研究通过地理探测器和情景模拟计算气候和土地利用变化对产水量的影响力表明,气候因子变化是祁连山国家公园近 30 年来产水量变化的主要驱动因素,对总产水量变化产

生正向作用,土地利用变化对产水量的变化也起到相当重要的作用。但需要注意的是,土地利用变化主要对产水量变化的空间分布影响较大,对总产水量的影响并不大,主要是由于土地利用变化对产水量的正向作用和负向作用的相互抵消所导致。与 Mo 等^[24]在东江流域研究结果一致,气候变化是产水量变化的主要因素,虽然人类活动显著影响土地利用的变化,但土地利用变化对总产水量影响不大,其更可能影响产水量变化的空间分布。

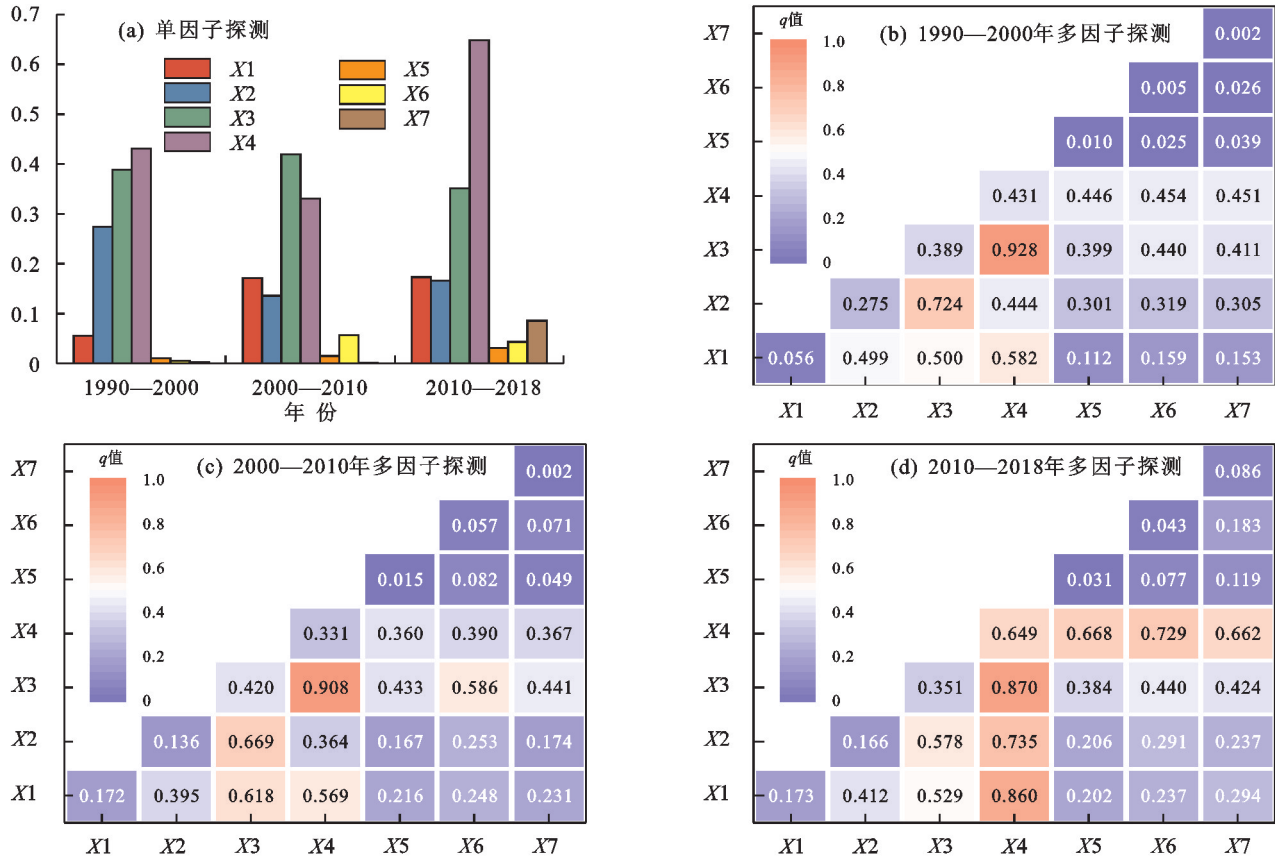


图 7 因子探测结果

表 3 气候与土地利用变化对产水量的影响

年份	$W_o/$ ($\times 10^9\text{ m}^3$)	$W_s/$ ($\times 10^9\text{ m}^3$)	$W_T/$ ($\times 10^9\text{ m}^3$)	$W_L/$ ($\times 10^9\text{ m}^3$)	$W_C/$ ($\times 10^9\text{ m}^3$)	$(W_L/W_T)/$ %	$(W_C/W_T)/$ %
1990—2000 年	1.973	2.055	0.134	-0.082	0.216	-63.4	163.4
2000—2010 年	2.590	2.593	0.617	-0.003	0.620	-0.5	100.5
2010—2018 年	4.335	4.327	1.745	0.008	1.737	0.5	99.5

祁连山国家公园产水量是多因子共同作用的结果,未来既要考虑气候对产水量的影响,又要合理利用土地资源,保障水资源安全,同时兼顾其他的生态系统服务。例如,在以干旱地区为主的祁连山国家公园,造林尤需注意气候条件和树种多样性,既要考虑树种对当地气候的适应性,又要把握好树种蒸散作用与降水量二者间的平衡,不适当的大规模植被恢复存在加剧干旱进而威胁土地可持续性的可能性^[25]。

虽然,本研究利用 InVEST 模型对祁连山国家公园产水量进行模拟,反映出产水量的时空格局。但

由于 InVEST 模型简化汇流过程,只输入自然数据,忽视社会因素,且模拟结果是年产水量,无法反映产水量变化的次年(例如,季节性、月度或每日)模式,使模拟出来的结果与实际存在一些偏差。本研究还从土壤数据库中获取根深和土壤数据输入到模型中,数据的空间分辨率较低,在一定程度上影响模型的模拟精度。此外,本研究只在全域的尺度上研究祁连山国家公园全域产水量的驱动因素,而没有在不同尺度上研究驱动因素的大小。未来的研究将在不同尺度开展产水量的归因研究,以揭示不同尺度产水量时空变

化的主导因素,使结果能更好地应用于决策中。

4 结论

(1)1990—2018 研究区产水量以 $0.56 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的速度显著增加,平均产水量为 $2.61 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ 。从空间分布来看,祁连山国家公园产水量空间分布呈现出自西向东递增的趋势,产水量和降水量的空间分布高度一致;

(2)降水量是影响祁连山国家公园产水量空间异质性的主导因子,其解释力为 70.1%。值得注意的是双因子交互增强了其影响力,其中降水量与实际蒸散量交互作用解释力达 94.2%,降水量与土地利用类型交互作用解释力达 91.6%。

(3)产水深度随着海拔的升高,表现为“W”型的变化趋势,产水深度高值区位于海拔 3 200~4 600 m 处。

(4)1990—2018 年气候变化是产水量变化的主要驱动因子,对总产水量的影响为正向作用。其次为土地利用变化,土地利用变化主要对产水量变化的空间分布影响较大,对总产水量的影响并不大,且多为负向作用。

参考文献:

- [1] Belete M, Deng J S, Wang K, et al. Evaluation of satellite rainfall products for modeling water yield over the source region of Blue Nile Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: e134834.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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, 569/570: 1418-1426.
- [5] Sánchez-Canales M, López Benito A, Passuello A, et al. Sensitivity analysis of ecosystem service valuation in a Mediterranean watershed [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 440: 140-153.
- [6] Shaw M R, Pendleton L, Cameron D R, et al. The impact of climate change on California's ecosystem services[J]. *Climatic Change*, 2011, 109(1): 465-484.
- [7] Guo Q, Yu C, Xu Z, et al. Impacts of climate and land-use changes on water yields: Similarities and differences among typical watersheds distributed throughout China[J]. *Journal of Hydrology-Regional Studies*, 2023, 45: e17.
- [8] 黄欣,彭双云,王哲,等.基于地理探测器的云南省生态系统产水服务的空间异质性及驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(10): 2813-2821.
- [9] 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.
- [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.
- [11] Lang Y Q, Song W, Deng X Z. Projected land use changes impacts on water yields in the karst mountain areas of China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2018, 104: 66-75.
- [12] 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.
- [13] 赵亚茹,周俊菊,雷莉,等.基于 InVEST 模型的石羊河上游产水量驱动因素识别[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(12): 3789-3799.
- [14] 李芳,张金龙,杨环.基于 InVEST 模型的黑河流域上游 1990—2018 年产水量模拟[J]. *高原气象*, 2022, 41(3): 698-707.
- [15] 赵晓涵,张方敏,卢琦,等.未来气候情景内蒙古蒸散和产水量的变化特征[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 151-159.
- [16] 王晓琪,赵雪雁.人类活动对国家公园生态系统服务的影响:以祁连山国家公园为例[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(4): 966-982.
- [17] 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.
- [18] 张利利.基于 InVEST 模型的石羊河上游产水量变化及其对气候与土地利用变化的响应[D].兰州:西北师范大学,2017.
- [19] Lang Y Q, Song W, Zhang Y. Responses of the water-yield ecosystem service to climate and land use change in Sancha River Basin, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2017, 101: 102-111.
- [20] 薛健,李宗省,冯起,等.1980—2017 年祁连山水源涵养量时空变化特征[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(1): 1-13.
- [21] 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.
- [22] Zhang X A, Chen X M, Zhang W S, et al. Impact of land use changes on the surface run off and nutrient load in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(4): e21.
- [23] 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.
- [24] Mo W B, Zhao Y L, Yang N, et al. Effects of climate and land use/land cover changes on water yield services in the Dongjiang Lake basin[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(7): e466.
- [25] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739-741.