

DOI: 10.5846/stxb202105011149

魏培洁, 吴明辉, 贾映兰, 高雅月, 徐浩杰, 刘章文, 陈生云. 基于 InVEST 模型的疏勒河上游产水量时空变化特征分析. 生态学报, 2022, 42(15): 6418-6429.

Wei P J, Wu M H, Jia Y L, Gao Y Y, Xu H J, Liu Z W, Chen S Y. Spatiotemporal variation of water yield in the upstream regions of the Shule River Basin using the InVEST Model. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6418-6429.

基于 InVEST 模型的疏勒河上游产水量时空变化特征分析

魏培洁^{1,2}, 吴明辉^{1,2}, 贾映兰^{1,2}, 高雅月³, 徐浩杰⁴, 刘章文⁵, 陈生云^{1,3,6,*}

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室 疏勒河源冰冻圈与生态环境综合监测研究站, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 祁连山国家公园国家长期科研基地, 西宁 810000

4 兰州大学草地农业科技学院草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730020

5 中国科学院西北生态环境资源研究院 黑河上游生态水文试验研究站, 兰州 730000

6 青海师范大学高原科学与可持续发展研究院 地理科学学院, 西宁 810008

摘要:开展山区流域产水量的定量评估研究,有利于区域水资源保护规划的制定、生态补偿机制的建立以及生态平衡的维系。然而,目前对我国西部高寒山区产水量的时空变化评估及其影响因素的研究依然较为缺乏。选取青藏高原东北缘祁连山西段疏勒河上游为研究区,基于 InVEST(Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tools)模型定量估算并分析了 2001—2019 年产水量的时空变化特征及影响因素。结果表明:(1)2001—2019 年,研究区年均气温和年实际蒸散量呈增加趋势($P < 0.05$),年降水量和 NDVI 则显著增加($P < 0.05$);(2)年均总产水量为 $13.66 \times 10^8 \text{ m}^3$,空间分布呈现山地高海拔区较高,河谷低海拔区较低的特征;(3)19 年来产水量以 $0.26 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的速率显著增加($P < 0.01$)。其中,高海拔区的产水量显著增加,约占整个研究区的 32.01%;然而,仅有 8.39%的低海拔区产水量显著下降($P < 0.05$)且集中分布在西北部;(4)产水量与降水量显著正相关,同气温、实际蒸散量、归一化植被指数(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)和根系深度显著负相关($P < 0.001$);(5)产水功能一般重要级别区占研究区面积的 47.26%,极重要和高度重要级别区占总面积的 28.25%。研究为祁连山国家公园水资源的动态评估、有效管理和可持续发展提供了科学参考。

关键词:疏勒河;InVEST 模型;产水量;时空变化;影响因素

Spatiotemporal variation of water yield in the upstream regions of the Shule River Basin using the InVEST Model

WEI Peijie^{1,2}, WU Minghui^{1,2}, JIA Yinglan^{1,2}, GAO Yayue³, XU Haojie⁴, LIU Zhangwen⁵, CHEN Shengyun^{1,3,6,*}

1 Cryosphere and Eco-Environment Research Station of Shule River Headwaters, State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Ecological Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Long-term National Scientific Research Base of the Qilian Mountain National Park, Xining 810000, China

4 State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

5 Qilian Alpine Ecology and Hydrology Research Station, Northwest Institute of Ecological Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

6 School of Geographical Sciences, Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

Abstract: Ecosystem service function refers to the natural environmental conditions and utilities that the ecosystem forms

基金项目:国家重点研发计划课题(2019YFC0507404);国家自然科学基金(41871064);青海省重点研发与转化计划项目(2020-SF-146)

收稿日期:2021-05-01; 网络出版日期:2022-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sychen@lzb.ac.cn

and maintains to promote human survival and development. Many ecosystem service functions are of great importance to human wellbeing, especially those related to water. Water yield is a key index characterizing the regulation function of ecosystem in watershed and plays a critical role in the sustainable development of these sectors, including agriculture, industry, fisheries, and domestic activities, as well as directly impacts the regional economy and society. Climate and land use changes are the main factors affecting the spatiotemporal variation of water yield. In the context of global climate change, the quantitative assessment of water yield makes significant sense on formulating the water resource protection planning, establishing the ecological compensation mechanism and maintaining the ecological balance in the watershed. However, little research has been conducted on the spatiotemporal variation of water yield and its influencing factors in the alpine region of western China. The Shule River Basin, located in the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau and the western part of the Qilian Mountain, is the “Lifeline” and “Natural Water Tower” of farmers and herdsmen in the Hexi Corridor region of Northwestern China. This study, using the upstream regions of the Shule River Basin as the study area, evaluated the spatiotemporal variation of water yield in 2001—2019 based on Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tools (InVEST) model and examined the relation between the water yield and influential environmental factors using correlation analysis. To evaluate the performance of the InVEST model, we analyzed the relationship between the simulated total water yield and measured total water yield. It showed that the InVEST model had a good performance in estimating water yield ($R^2 = 0.986$, $P < 0.05$) for alpine region. The results demonstrated that: (1) the mean annual temperature and annual actual evapotranspiration showed an increasing trend ($P > 0.05$), while annual precipitation and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) increased significantly ($P < 0.05$) in 2001—2019. (2) The mean annual total water yield was $13.66 \times 10^8 \text{ m}^3$, and the water yield was higher at the mountainous high-altitude regions and lower at the low-altitude regions of river valley. (3) The water yield significantly increased with a rate of $0.26 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ from 2001 to 2019 ($P < 0.05$), and the water yield significantly increased in the high-altitude regions (accounting for 32.01%), while the low altitude regions of the northwest significantly decreased and accounted for only 8.39% ($P < 0.05$). (4) There were significantly positive correlations between water yield and precipitation, and negative correlations between water yield and air temperature, actual evapotranspiration, NDVI and root depth ($P < 0.001$). (5) The water yield function of the generally important area which refers to poor water yield function had a proportion of 47.26%, whereas the very important region accounted for 28.25% of the total area. The results can provide scientific insights for dynamic assessment, effective management, and sustainable development of water resources in the Qilian Mountain National Park of China.

Key Words: Shule River Basin; InVEST model; water yield; spatiotemporal variation; influencing factors

生态系统服务是指人类从各种生态系统中获取的所有惠益,由生态系统的支撑功能、供给功能、文化功能和调节功能及其相互作用形成^[1-2]。生态系统功能是生态系统服务的基础和物质保障,其对人类生存和社会发展至关重要,特别是与水资源相关的功能^[3]。随着全球气候变化、地表水资源短缺和水环境问题加剧,空间定量化、可视化评估区域产水量已成为当前研究的热点议题之一^[4-8]。产水量是流域特别是干旱地区重要的调节功能,它对工业、农业、渔业、人类消费和娱乐活动至关重要^[9-10]。一方面,产水量是人类生存和区域经济可持续发展的重要物质基础;另一方面,产水量与区域自然地理条件和人类活动密切相关^[10]。因此,研究区域产水量变化的驱动因素变得十分必要,其可为区域水资源的有效管理和可持续发展提供科学依据^[10-11]。

自 1970 年以来,遥感技术和水文模型发展迅速,越来越多的学者尝试通过模型模拟方法来定量化、可视化和精细化地评估和分析区域产水量,如 MIKESHE (MIKE System Hydrological European) 模型、TOPMODEL 模型 (TOPgraphy based hydrological Model)、SWAT 模型 (Soil and Water Assessment Tool) 和 InVEST 模型等^[12-13]。InVEST 是一款由美国斯坦福大学、世界自然基金会、大自然保护协会和其他相关机构联合开发用于生态系统

服务功能评估的模型方法^[14]。InVEST 模型产水量模块基于水量平衡原理,充分考虑不同土地利用类型下土壤渗透性的空间差异及地形、地表粗糙程度等因素对径流影响,以栅格为单元定量估算不同土地利用类型的产水量^[12-13]。其模型由于参数调整灵活、评估结果空间表达性强,且能够实现时空间和多目标权衡^[15],被国外许多国家和地区广泛应用。如:Leh 等^[16]、Marquès 等^[17]和 Redhead 等^[18]利用 InVEST 模型分别对西非科特迪瓦、西班牙东北部弗兰科利河流域和英国多条河流的产水量进行了评估,并取得了很好的应用效果。此外,中国学者利用 InVEST 模型的产水量模块分别对北京山区^[19]和贵水流域^[20]、陕西省商洛市五大水系流域^[21]、三江并流区(云南、四川和西藏的交界处)^[22]以及高原湖泊^[23]等区域的产水量及其时空分布特征进行了科学评价,模型在各研究区均取得了很好的应用效果。同时,InVEST 模型已成功用于青藏高原地区。其中,潘涛等^[7]和吕乐婷等^[24]分别评估了三江源区 1981—2010、1980—2016 年产水量的时间变化特征与空间分布状况。王雅等^[25]和赵亚茹等^[10]分别对位于祁连山区中部的黑河流域、东部的石羊河流域的产水量空间分异特征进行了分析,这些研究对西北地区水资源规划和管理都具有重要意义。

目前,气候变化和土地利用变化是影响产水量的关键因素^[26]。其中,气候变化在宏观尺度上可以通过改变流域的降水量和蒸散量来影响产水量^[27-28],土地利用可通过改变流域下垫面间接影响产水量^[29-30]。一些研究已探究了气候变化和土地变化对流域产水量的影响。例如:Pessacg 等^[9]利用降水数据集评估了楚布特河流域的产水量,表明降水量与产水量之间存在正相关关系;Stone 等^[31]重点研究了气候变化对密苏里河流域产水量的影响,证实气候变化对产水量影响显著;Zhang 等^[32]和 Li 等^[33]通过分析土地利用变化对产水量影响,得出不同土地利用方式的改变对产水量的影响不同。目前,全球气候变化对中国水资源的影响日益加剧^[34]。青藏高原作为对全球环境变化特别是气候变化响应最敏感的地区之一,近年来受气候变暖影响,50 年来气温显著升高 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$,部分区域降水波动较大^[35],并且气候暖湿化促进了植被生长,NDVI 显著增加^[36]。然而,青藏高原地区气候变化和土地利用变化对产水量的相关研究仍然缺乏,尤其植被根系深度和 NDVI 对产水量的影响更是鲜有研究。

水在维持流域生态系统平衡和生态承载力可持续性方面扮演着极其重要的角色^[37]。干旱区水资源空间分布不均衡,降水多集中于上游山区,上游的出山口径流量基本代表着流域的总水资源^[38]。疏勒河流域地处青藏高原东北缘祁连山西段,是我国河西走廊内陆干旱区三大内陆河流域之一,也是河西农牧民群众的“生命线”和“天然水塔区”^[39]。然而,疏勒河流域产水量相关的研究报道甚少。开展上游产水量研究,对整个流域水资源的动态评估、生态平衡的维系以及气候调节具有十分重要的意义^[10,15]。鉴于此,基于 InVEST 模型产水量模块,本研究对疏勒河上游高寒山区产水量时空变化特征进行了分析,并进一步探讨其对环境要素变化的响应,旨在为流域水资源的有效管理和可持续发展提供科学参考。

1 研究区概况

疏勒河流域地处我国西北干旱区腹地,是河西走廊仅次于黑河的第二大内陆河^[40-41],其水源补给主要源于冰川和冻土融水以及山区降水^[37,42]。疏勒河上游($96^{\circ}37'12''\text{E}$ — $98^{\circ}59'24''\text{E}$, $38^{\circ}13'12''\text{N}$ — $39^{\circ}52'12''\text{N}$)是指以昌马堡水文站($96^{\circ}51'\text{E}$, $39^{\circ}49'\text{N}$)为出水控制点的上部区域,为疏勒河干流的形成区^[42],流域面积约为 10973.9 km^2 ,海拔 $2031\text{—}5763\text{ m}$ (图 1),多年平均径流量为 $13.81\times 10^8\text{ m}^3$ 。地形上主要由疏勒南山、托来南山和疏勒河谷地组成,山地地形陡峭,河谷地形相对低缓^[38]。气候类型为典型的大陆性气候,按陆地表层干湿指数区划属于半干旱区—干旱区边缘地带,呈现干寒气候条件下的草原—荒漠景观^[38-40]。土壤类型主要为高山寒漠土、高山草甸草原土、栗钙土、淡栗钙土和山地灰钙土^[40],土壤质地主要以壤土为主,砂土和粘土占比均较小。疏勒河上游是整个流域的水源涵养区和产流区,为中下游山前平原和绿洲地区赖以生存和发展提供了水源保障。

2 研究方法与数据处理

2.1 产水量模型

InVEST 产水量模块基于水量平衡原理,用各栅格单元的降水量减去实际蒸散后的水量,进而得到该栅格

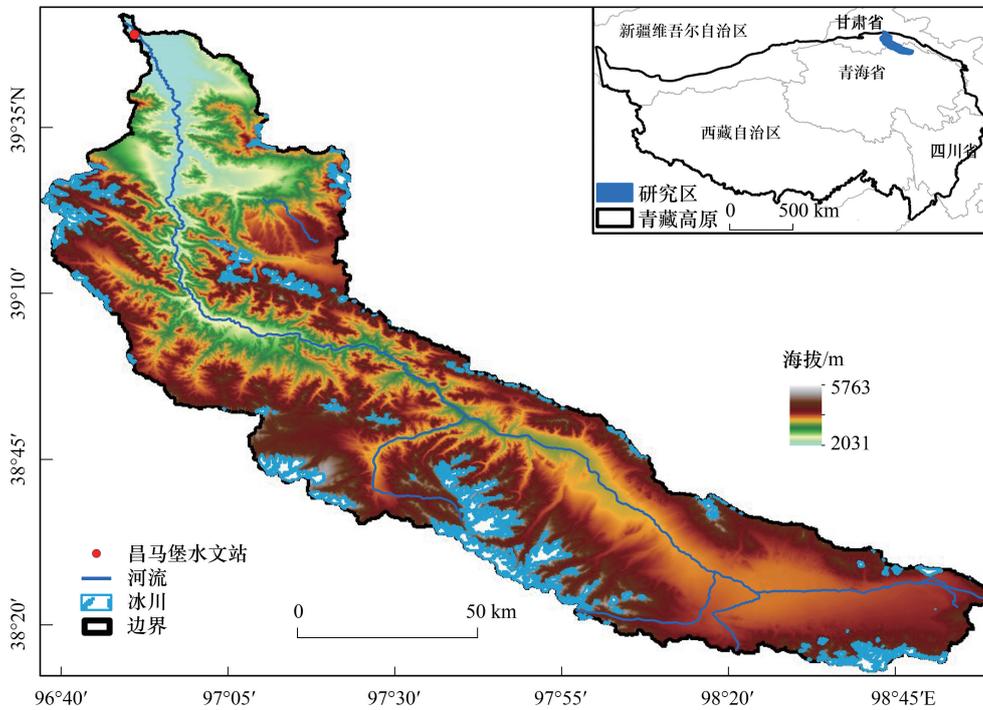


图 1 研究区位置和水文站点分布图

Fig.1 Location of study area and hydrological station

产水量。该模型假设每个栅格单元所有的产水量通过地下径流或地表径流的方式到达流域出水口^[14]。模型主要算法如下^[7-8,43]：

$$Y_{xj} = \left[1 - \frac{AET_{xj}}{P_x} \right] \times P_x \tag{1}$$

式中, Y_{xj} 为第 j 土地利用类型栅格 x 的产水量 (mm), AET_{xj} 为第 j 土地利用类型栅格 x 的年实际蒸散发量 (mm), P_x 为栅格 x 的多年平均降水量 (mm)。

基于 Budyko 的水热耦合平衡假设计算水量平衡的蒸散部分 $\frac{AET_{xj}}{P_x}$, 计算公式如下^[44]：

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

式中, R_{xj} 为第 j 土地利用类型栅格 x 的 Budyko 干燥指数, ω_x 表示植被有效含水量与年均降水量的比值：

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

$$R_{xj} = \frac{k_{xj} ET_{0x}}{P_x} \tag{4}$$

$$AWC_x = \text{Min}(D_s, D_r) \times PAWC_x \tag{5}$$

式中, AWC_x 为栅格 x 的植被有效含水量 (mm) (由有效土壤深度和土壤质地决定); Z 为季节参数 (即 Zhang 系数) 用于表征降水的季节性特征, k_{xj} 为第 j 土地利用类型栅格 x 的植被蒸散系数, ET_{0x} 表示栅格 x 的参考蒸散量 (mm); Min 为 minimum 的缩写, D_s 为土壤深度 (mm), D_r 为根系深度 (mm), $PAWC_x$ 为栅格单元 x 的植被可利用水分 (mm)。

2.2 参数来源及分析

2.2.1 模型参数

产水量模块所需输入参数有气象、土地利用、土壤深度、植被可利用水、生物物理参数表、流域以及 Zhang 系数。另外,相关分析涉及 NDVI。本研究所有数据的空间分辨率均重采样到 500 m,且坐标系均使用世界大地坐标系统(WGS1984)。

(1) 降水量和参考蒸散发

利用中国气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/user/toLogin.html>)收集周边气象站 2001—2019 年的降水量和气温数据。用 ANUSPLIN 模型进行空间插值,得到降水量和气温的空间栅格数据。本文选用 Modified—Hargreaves 法计算参考蒸散发,与其它方法相比,该方法只需最高气温、最低气温和太阳大气顶层辐射便可计算^[45]。公式如下:

$$ET_0 = C R_a (T_{\max} - T_{\min})^E \left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} + T \right) \quad (6)$$

式中, T_{\max} 和 T_{\min} 分别为月最高气温和月最低气温($^{\circ}\text{C}$), R_a 是月太阳大气顶层辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), C 、 E 和 T 是常数,其值参考胡庆芳等^[46]推荐青藏高原 C 、 E 和 T 值。

(2) 土地利用

土地利用数据源于美国宇航局地球科学数据系统(<https://search.earthdata.nasa.gov/search>)中的 MCD12Q1 数据产品。它是根据一年的 Terra 和 Aqua 观测所得的数据经过处理,描述土地覆盖的类型。MCD12Q1 采用了五种不同的土地覆盖分类方案,信息提取的主要技术是监督决策树分类。本文采用国际地圈—生物圈计划(IGBP)的分类方法。研究区土地利用类型主要包括草地、永久性湿地、农田、建设用地、农作物—自然植被交错带、永久性冰雪和裸地。

(3) 土壤数据和 PAWC

基于兰州市寒区旱区科学数据中心下载的第二次土壤调查数据库生成土壤深度和土壤质地栅格图。PAWC 是指土壤土层中为植物生长提供的水量所占比例,为 0—1 的小数。周文佐等^[47]提出了一种根据物理和化学性质计算 PAWC 的方法,具体算法如下:

$$\text{PAWC} = 54.509 - 0.132\text{Sand} - 0.003(\text{Sand})^2 - 0.055\text{Silt} - 0.006(\text{Silt})^2 - 0.738\text{Clay} + 0.007(\text{Clay})^2 - 2.668C + 0.501(C)^2 \quad (7)$$

式中,Sand 为土壤砂粒含量(%),Silt 为土壤粉粒含量(%),Clay 为土壤粘粒含量(%); C 为土壤有机质含量(%)。

(4) 流域和生物物理参数表

数字高程模型(DEM)由资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)提供的雷达地形测绘 SRTM (90 m)数据。基于数字高程模型数据通过 ArcGIS 10.4 中的水文分析工具生成的子流域。生物物理表主要用来反映土壤覆盖度和 LULC 的属性,包括 LULC 编码、植物蒸散系数(K_c)和根系深度等,生物物理表中每种 LULC 类型的系数来源于文献^[45,48]和《InVEST 用户指南》^[49]。

(5) Zhang 系数

Zhang 系数是反映当地降水格局和水文地质特征的气候季节因子,其值在 1—30 之间变化。根据昌马铺水文站多年平均径流量观测资料,采用水量平衡法对 Zhang 系数进行校验^[7],当 Zhang 系数为 3.33 时,InVEST 产水模块的模拟效果最好。

(6) NDVI 与植被根系深度

NDVI 可以准确反映地表植被覆盖状况,是各种植被指数中最常用的表征地表植被状况的指标^[36]。本研究中所涉及的 2001—2019 年 NDVI 数据源于资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。该数据集是基于 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据,在月数据的基础上采用最大值合成法生成年度 NDVI 数据集。植被根系深度栅格数据是 InVEST 模型基于生物物理参数表生成的。

2.2.2 时空变化趋势分析

本研究主要通过 OriginPro 9.1 中的线性拟合方法分析研究目标(气温、降水量和实际蒸散量、NDVI 和产水量)的时间变化趋势。利用 Matlab—R2015B 对研究目标的空间变化趋势进行线性回归分析,该方法广泛应用于时序数据动态检测,线性回归的斜率是量化动态变化趋势的最佳指标。具体算法如下^[50]:

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i M_i - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n M_i)}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (8)$$

式中, n 为研究年限(本研究 $n = 19$), i 为年份序号, M_i 为第 i 年的研究目标值, $\text{Slope} > 0$ 表示 19 年来研究目标变化趋势为正, $\text{Slope} < 0$ 则表示研究目标变化趋势为负。

利用线性回归的相关系数对研究目标动态趋势进行显著性检验,相关系数的计算公式如下:

$$r = \frac{\text{cov}(i, M_i)}{\sqrt{\text{var}(i) \text{var}(M_i)}} \quad (9)$$

式中, i 为研究期间的年份序号, M_i 为第 i 年的研究目标值, cov 为协方差函数, var 为方差函数。

2.2.3 产水功能重要性分级

合理分配、利用和保护水资源的前提是需对区域产水功能重要性进行分级。本研究基于 InVEST 模型对研究区产水量进行了定量评估,并依据《国家生态保护红线—生态功能红线划定技术指南(试行)》中涵养水源重要生态功能区的分级方法^[51],利用 ArcGIS 10.4 中的 Quantile(分位数)功能对 2001—2019 年的年均产水量进行分类。按产水量值将其重要性由低到高依次划分为 4 个重要性级别,即一般重要[0.00—98.38)、中等重要[98.38—227.33)、高度重要[227.33—344.76)和极重要[344.76—488.72)。

2.2.4 统计分析

利用 MODIS Reprojection Tools 与 ArcGIS 对所获取的栅格数据进行拼接、提取、裁剪等操作,以得到本研究所需的数据集。其次,将 2001—2019 年昌马堡水文站实测地表年径流量与模拟年总产水量进行线性拟合,并计算调整 R^2 、 P 以校验模型结果;拟合直线斜率与 1:1 直线斜率间的差异通过 SPSS 22.0 中的一般线性模型进行分析。另外,利用 R v4.0.4 对环境要素与产水量之间相关性进行 Pearson 相关矩阵分析。

3 结果与分析

3.1 模型校验

将模型预测结果与实测数据进行比较,通过不断调整参数,得到最适于研究区的预测模型则为模型校验^[14]。本研究利用昌马堡水文站地表径流量实测数据对 InVEST 模型产水量的预测结果进行了校验。结果显示(图 2):模型模拟的多年平均总产水量为 $13.66 \times 10^8 \text{ m}^3$,水文站实测多年平均总径流量为 $13.81 \times 10^8 \text{ m}^3$,其相对误差为 1.11%。同时,模型模拟的总产水量与实测地表总径流量之间存在较强的线性关系($R^2 = 0.986$ $P < 0.01$)。虽然,模拟总产水量相较实测地表总径流量略低估了 $0.37 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,但两者所拟直线斜率与 1 没有显著差异($P > 0.05$)。可见,InVEST 模型在本研究区适用性很好。

3.2 产水量时空分布及变化特征

2001—2019 年疏勒河上游产水量显著增加,增加速率为 $0.26 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (图 3)。2003 年总产水量最低($9.76 \times 10^8 \text{ m}^3$),2017 年总产水量最高($17.25 \times 10^8 \text{ m}^3$)。从空间分布格局来看,山地高海拔区产水量较高,河谷低海拔区产水量较低,尤其是东南部低海拔区与西北部东侧最低(图 4)。2001—2019 年,所有栅格的产水变化量空间趋势如图 4 所示。产水量显著增加区域约占整个研究区的 32.01%,主要分布在山地高海拔地区;仅有 8.39%的区域显著下降且集中分布在研究区的西北部。

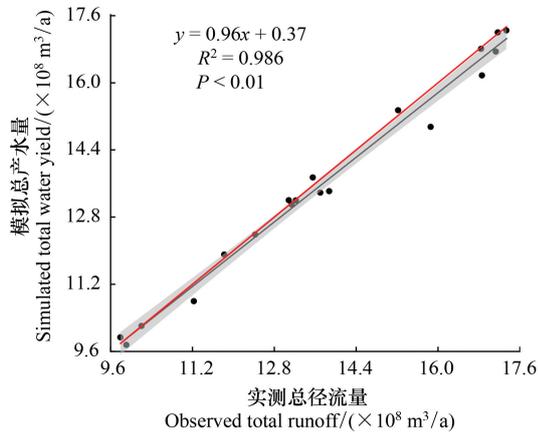


图2 InVEST 模拟总产水量与实测地表总径流量对比

Fig.2 InVEST modelled total water yield vs measured total surface runoff

红线代表斜率为0,截距为1的直线

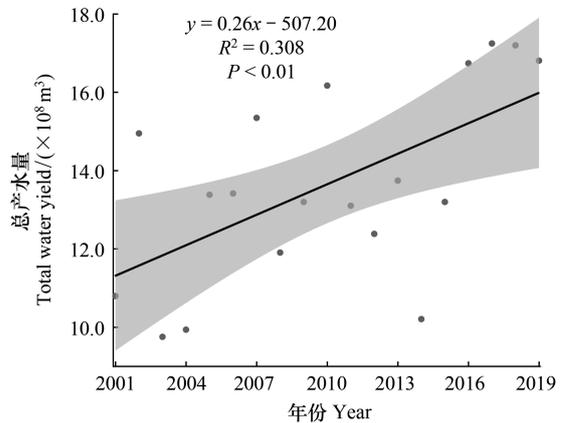


图3 2001—2019 年产水量时间变化

Fig.3 Temporal variation of water yield in 2001—2019

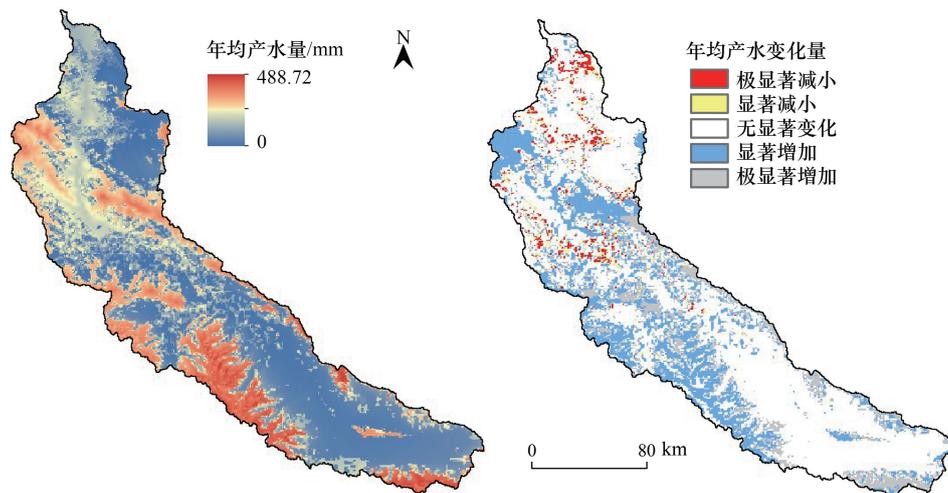


图4 产水量空间分布及变化

Fig.4 Spatial distribution and its variation of water yield

3.3 产水功能重要性分级

研究区产水功能重要性分级总体呈现出由河谷低海拔区向山地高海拔区递增的阶梯分布趋势(图5)。其中,一般重要区域所占面积最大,比例为47.26%,主要分布在东南部低海拔区与西北部东侧;中等重要区域所占比例为24.48%,主要分布在西北部;高度重要和极重要区域所占比例分别为14.51%和13.74%,集中分布于山地高海拔区。

3.4 影响流域产水量的因素分析

疏勒河上游的平均海拔高于3945 m,导致该地区气候寒冷干燥,年均气温为 -6.06°C ,年降水量325.96 mm。2001—2019年研究区年均气温、年降水量和年实际蒸散发的时间变化趋势如图6所示。年均气温与年降水量分别以 $0.02^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ($P>0.05$)和 $5.92\text{ mm}/\text{a}$ ($P<0.05$)的速率增加,研究区气候呈现暖湿化趋势。在此影响下,年实际蒸散量和NDVI分别以 $3.00\text{ mm}/\text{a}$ ($P>0.05$)和 $0.003/\text{a}$ ($P<0.05$)的速率递增。

研究区气温、降水量、实际蒸散量和NDVI的空间分布均具有明显的空间异质性。具体而言,气温的空间

变化范围为-16.92—5.33℃,自西北向东南逐渐下降且河谷低海拔区高于山地高海拔区,2001—2019 年研究区大部分区域(76.08%)的气温呈明显上升趋势,但未达到统计学显著水平($P>0.05$)。空间上,降水量在 127.42—527.13 mm 之间变化,总体呈西北低、东南高且河谷低海拔区低于山地高海拔区的分布格局(图 7),与气温的分布情况恰好相反。研究期间,降水量整体显著增加($P<0.05$)且东南局部地区(24.41%)极显著增加($P<0.01$)。实际蒸散量的空间变化范围为 0.00—357.54 mm,其高值区主要位于东南部低海拔区与西北部东侧;2001—2019 年实际蒸散量显著增加区域约为 33.39%($P<0.05$),主要分布河谷低海拔区,而显著下降区域约为 4.01%($P<0.05$),散落分布在整个研究区。NDVI 空间分布格局与实际蒸散量的分布情况一致,研究期间,NDVI 显著增加区域约为 56.92%($P<0.05$),分布在河谷低海拔局部地区,极显著下降区域约占 11.27%($P<0.05$),主要分布在山地高海拔区。此外,植被根系深度的空间分布与 NDVI 一致。

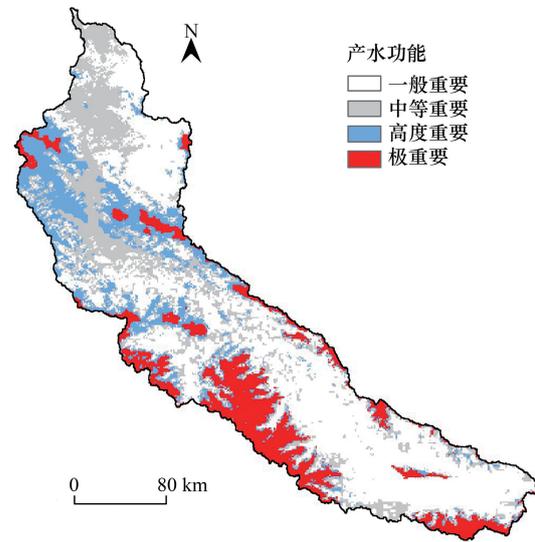


图 5 产水功能重要性空间分级

Fig.5 Importance spatial classification of water yield function

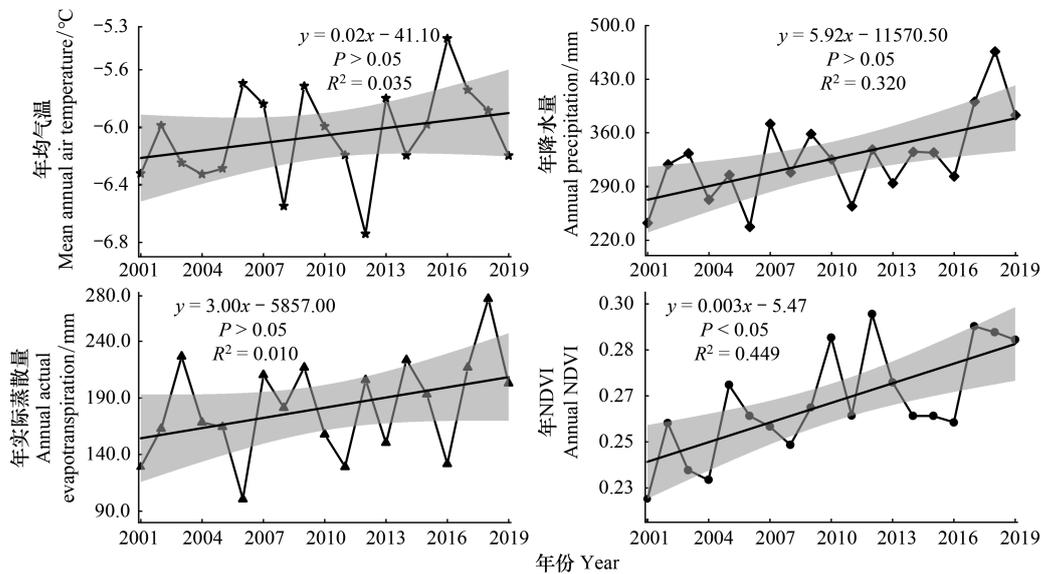


图 6 年均气温、年降水量、年实际蒸散量和年 NDVI 的时间变化

Fig.6 Temporal variations of the mean annual air temperature, annual precipitation, annual actual evapotranspiration and annual NDVI

Pearson 相关分析表明(图 8),产水量与降水量显著正相关,却与气温、实际蒸散量、NDVI 和根系深度显著负相关($P<0.001$)。不同环境因素之间的相关性表明,实际蒸散量与根系深度、NDVI 和气温显著正相关($P<0.001$)。气温升高或 NDVI、根系深度增加均可能会促进实际蒸散量增加,从而对产水量产生负向影响。

4 讨论

产水量是一项重要的生态功能指标,直接影响着社会经济和生态系统的可持续发展^[34]。本研究着重对

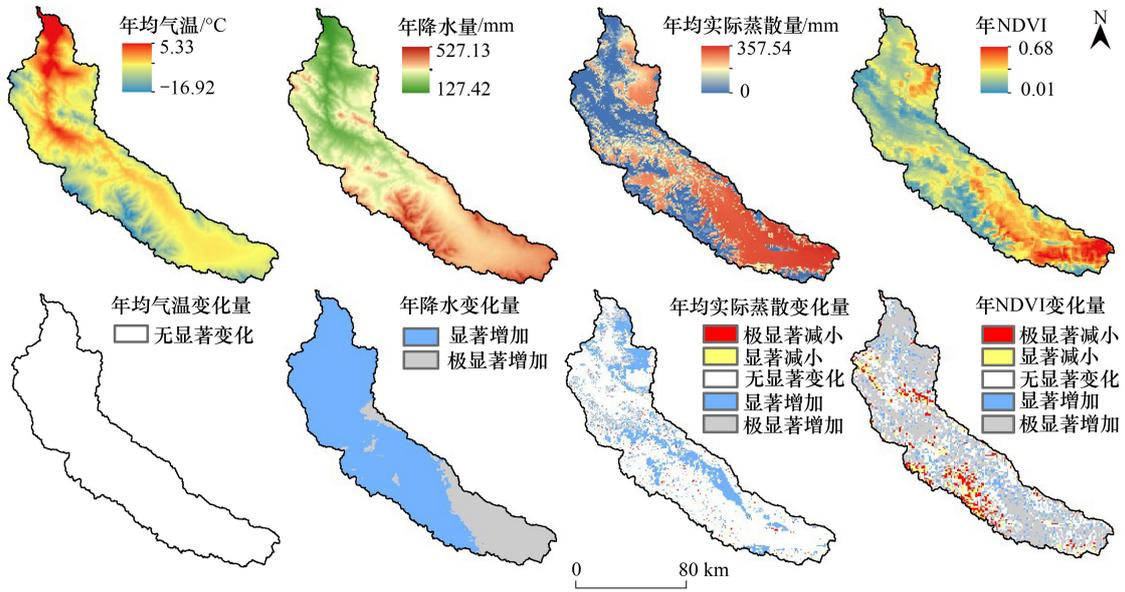


图7 环境要素空间分布及其变化

Fig.7 Spatial distributions and the variations of environmental elements

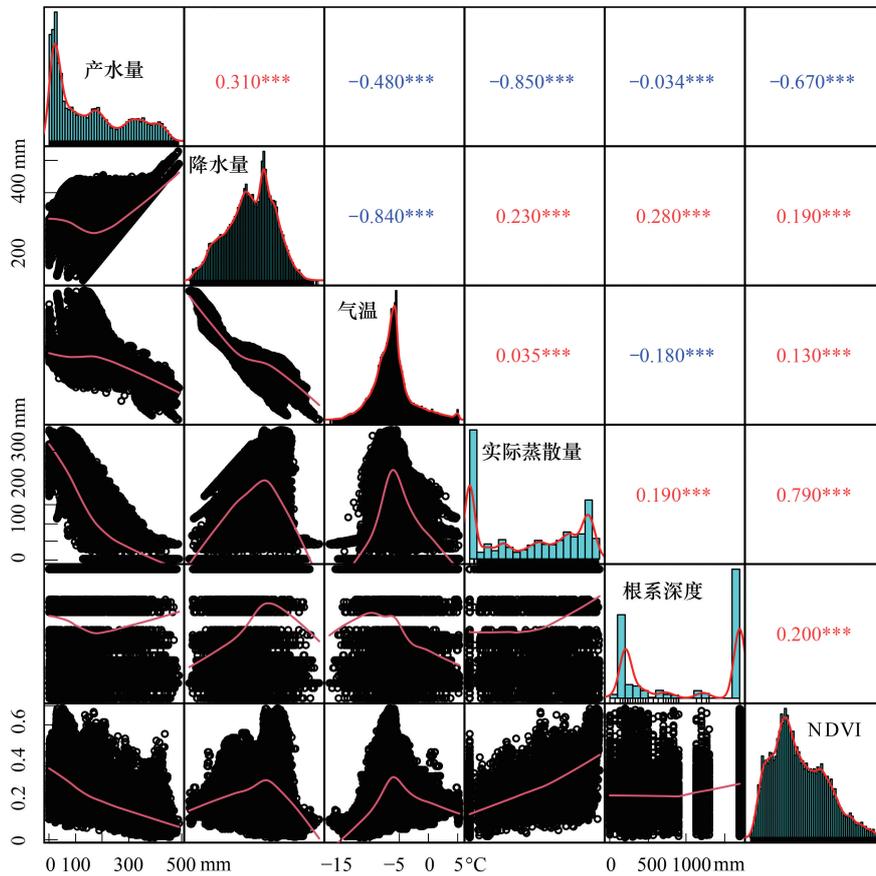


图8 产水量与影响因子的相关矩阵

Fig.8 Correlation matrix of water yield and driving factors

***, $P < 0.001$

疏勒河上游产水量的时空变化特征以及影响因素进行了探讨分析。结果表明,2001—2019 年疏勒河上游产水量显著上升,这同吕乐婷等^[24]对 1980—2016 年三江源区的研究结果类似,却同王雅等^[25]对 2000—2014 年祁连山黑河中游的研究结果相反。这可能与各研究区的气候条件以及研究的时间尺度不同有关。产水量是区域水循环过程中综合考虑收(降水量)支(实际蒸散量)平衡的产物^[10],因此,区域降水量和实际蒸散量以及两者之间平衡关系是影响产水量和产水能力的主导要素,这是许多产水量研究中的一致结论^[7,52—53]。潘韬等^[7]和吕乐婷等^[24]对三江源产水量的研究得出,降水和实际蒸散发是决定生态系统产水量的两个关键环节,其中降水量与产水量显著正相关,实际蒸散量与其显著负相关。刘军会等^[52]和刘娅等^[53]分别对青藏高原和京津冀地区的产水量进行了研究,结果表明降水量和实际蒸散量综合影响区域产水变化量。然而,气温、NDVI 和植被根系深度会通过影响实际蒸散量来间接影响产水量。其中,NDVI 和植被根系深度主要通过下垫面植被变化来影响实际蒸散量,进而影响产水量。Lu 等^[35]对青藏高原拉萨河流域产水量的研究发现,降水量和 NDVI 变化是影响区域产水量的关键要素,特别是通过植被变化来推动产水量变化。19 年来,疏勒河上游实际蒸散增加趋势(3.00 mm/a)低于降水增加趋势(5.92 mm/a),降水量对产水量的补给远超过实际蒸散对产水量的消耗,因此,疏勒河上游产水量整体呈显著增加趋势。

疏勒河上游发育大面积多年冻土,其中山地高海拔区的土层存在冻结面,这使得降水无法下渗而在冻结面汇流形成径流。与此同时,山地高海拔区的降水量高,气温和实际蒸散量低且土地利用类型主要为冰川和裸地。冰川属于水域,最易融化形成径流;裸地的植被覆盖度低且根系浅,截留能力弱,更多降水也直接形成径流^[24,54—55]。相比之下,河谷低海拔区由于冻土分布面积和深度受限,降水或冰水可以渗入土壤深层,径流形成的几率大大降低。另外,河谷低海拔区的主要土地利用类型为草地,其植被覆盖度和实际蒸散量都很高,并且植被根系深而密集,可以有效的截留降水,使得产水量偏低。2001—2019 年山地高海拔区产水量显著增加,主要是因为降水量补给显著增加而蒸散量无显著变化,致使生态产水以增加为主。与其相反,西北地区的裸地被草地和农田大面积取代,相比裸地,草地与农田的根系较深且植被生长消耗的水量也比较大,因此产水量显著下降。

疏勒河上游产水重要性分级与产水量空间分布格局基本一致,这与孙艳伟等^[14]和王玉纯等^[51]研究结论一致。具体而言,产水极重要和高度重要区降水量较多、蒸散量较小,并且多分布冰川和裸地,是疏勒河流域水资源集成区,而产水一般重要和中等重要地区为相对干旱的堆积平原和盆地,为水资源消耗区。为使研究区实现健康可持续发展,极重要和高度重要区需作为重点和优先保护的水资源地而纳入政策和管理决策之中^[56]。

本研究对疏勒河上游产水量的模拟结果较为理想,基本符合区域的实际情况。但因模型自身设定、参数算法以及数据精度等原因,使研究仍存在一些不确定性。首先,InVEST 模型简化了汇流过程,没有区分地表径流、土壤中径流和基流,并假定所有栅格的产水量都到达同一出水口^[14],并且产水量常与社会经济和人类活动密切相关,而模型的输入数据只有自然数据。特别是,疏勒河上游是一个典型的高寒山区,InVEST 模型未考虑冰川和冻土融水,这会增加水文模拟的不确定性。因此,InVEST 模型在这些方面都有待进一步改进。其次,降水量和参考蒸散量是精确模拟产水量的重要参数,而西北地区水文站点较少且气候变化具有复杂性,利用 ANUSPLIN 模型空间插值生成的降水数据以及通过 Modified—Hargreaves 法计算的参考蒸散发的准确性都会受到气象数据精度的影响^[57],从而影响模型的模拟精度。尽管存在这些不确定性,但研究结果仍可以有效反映产水量的时间变化和空间分布,揭示产水量与环境要素之间的关系,为疏勒河流域水资源的有效管理、合理利用和保护提供科学参考。

5 结论

基于 InVEST 模型,结合环境要素对疏勒河上游产水量的时空分布格局及影响因素进行分析,得出:

(1) 模型中的 Zhang 系数为 3.3 时,研究区产水量模拟效果最佳;研究区年均总产水量为 $13.66 \times 10^8 \text{ m}^3$,

2001—2019 年研究区产水量以 $0.26 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 速率显著增加。从空间分布来看,山地高海拔区产水量较高,河谷低海拔区产水量较低,尤其东南部低海拔区和西北部东侧最低。研究期间,产水量显著增加区约占总面积的 32.01%,主要分布在山地高海拔区;仅有 8.39% 的研究区显著下降且集中分布于西北部。

(2) 产水量与降水量显著正相关,而与气温、实际蒸散量、NDVI 和根系深度显著负相关;实际蒸散量与气温、NDVI 和植被根系深度显著正相关。

(3) 在对研究区产水量进行定量评估的基础上,进行了产水功能重要性空间分级。得出:一般重要区域所占面积最大,约占整个研究区的 47.26%,主要位于东南部低海拔区与西北部东侧;高度重要和极重要区域共占总面积的 28.25%,集中分布于山地高海拔区。

参考文献 (References):

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Washington: Island Press, 2005.
- [2] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. 生态学报, 2017, 37(2): 341-348.
- [3] Lian X H, Qi Y, Wang H W, Zhang J L, Yang R. Assessing changes of water yield in Qinghai lake watershed of China. Water, 2020, 12(1): 11.
- [4] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin P G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [5] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [6] 荆田芬, 余艳红. 基于 InVest 模型的高原湖泊生态系统服务功能评估体系构建. 生态经济, 2016, 32(5): 180-185.
- [7] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 刘玉洁. 基于 InVest 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化. 应用生态学报, 2013, 24(1): 183-189.
- [8] 张雪峰, 牛建明, 张庆, 董建军, 张靖. 内蒙古锡林河流域草地生态系统水源涵养功能空间格局. 干旱区研究, 2016, 33(4): 814-821.
- [9] Pessacq N, Flaherty S, Brandizi L, Solman S, Pascual M. Getting water right: a case study in water yield modelling based on precipitation data. Science of the Total Environment, 2015, 537: 225-234.
- [10] 赵亚茹, 周俊菊, 雷莉, 向鹏, 黄美华, 冯伟, 朱国锋, 魏伟, 王静爱. 基于 InVEST 模型的石羊河上游产水量驱动因素识别. 生态学杂志, 2019, 38(12): 3789-3799.
- [11] 吴健, 李英花, 黄利亚, 卢正茂, 于大炮, 周莉, 代力民. 东北地区产水量时空分布格局及其驱动因素. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3216-3223.
- [12] 吕乐婷, 任甜甜, 李赛赛, 韩月驰. 基于 InVEST 模型的大连市产水量时空变化分析. 水土保持通报, 2019, 39(4): 144-150, 157-157.
- [13] 谢余初, 巩杰, 齐姗姗, 吴婧, 胡宝清. 基于 InVEST 模型的白龙江流域水源供给服务时空分异. 自然资源学报, 2017, 32(8): 1337-1347.
- [14] 孙艳伟, 李加林, 马仁锋, 李伟芳. 于桥水库流域水源供给服务的空间分布格局. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 1-6.
- [15] 张福平, 李肖娟, 冯起, 王虎威, 魏水芬, 白皓. 基于 InVEST 模型的黑河流域上游水源涵养量. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1321-1329.
- [16] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, Nalley L L. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 165: 6-18.
- [17] Marquès M, Bangash R F, Kumar V, Sharp R, Schuhmacher M. The impact of climate change on water provision under a low flow regime: a case study of the ecosystems services in the Francoli river basin. Journal of Hazardous Materials, 2013, 263: 224-232.
- [18] 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.
- [19] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 杨之歌. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5.
- [20] Gao J, Li F, Gao H, Zhou C B, Zhang X L. The impact of land-use change on water-related ecosystem services: a study of the Guishui River Basin, Beijing, China. Journal of Cleaner Production, 2017, 163(S1): S148-S155.
- [21] 陈姗姗, 刘康, 包玉斌, 陈海. 商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素. 地理科学, 2016, 36(10): 1546-1554.
- [22] 林世伟, 武瑞东. “三江并流”区生态系统供水服务的空间分布特征. 西部林业科学, 2015, 44(3): 8-15.
- [23] 荆田芬. 基于 InVest 模型的高原湖泊生态系统服务功能评估研究——以抚仙湖流域为例[D]. 昆明: 云南师范大学, 2016.
- [24] 吕乐婷, 任甜甜, 孙才志, 郑德凤, 王辉. 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. 生态学报, 2020, 40(3): 993-1003.
- [25] 王雅, 蒙古军. 黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响. 干旱区研究, 2017, 34(1): 200-207.
- [26] Yu J, Yuan Y W, Nie Y, Ma E J, Li H J, Geng X L. The temporal and spatial evolution of water yield in Dali County. Sustainability, 2015, 7(5): 6069-6085.
- [27] Song W, Deng X Z, Yuan Y W, Wang Z, Li Z H. Impacts of land-use change on valued ecosystem service in rapidly urbanized North China Plain. Ecological Modelling, 2015, 318: 245-253.
- [28] Legesse D, Vallet-Coulomb C, Gasse F. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia. Journal of Hydrology, 2003, 275(1/2): 67-85.

- [29] Cuo L, Beyene T K, Voisin N, Su F G, Lettenmaier D P, Alberti M, Richey J E. Effects of mid-twenty-first century climate and land cover change on the hydrology of the Puget Sound basin, Washington. *Hydrological Processes*, 2011, 25(11): 1729-1753.
- [30] Wang C H, Hou Y L, Xue Y J. Water resources carrying capacity of wetlands in Beijing: analysis of policy optimization for urban wetland water resources management. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 1180-1191.
- [31] Stone M C, Hotchkiss R H, Hubbard C M, Fontaine T A, Mearns L O, Arnold J G. Impacts of climate change on Missouri River Basin water yield. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, 37(5): 1119-1129.
- [32] Zhang L, Cheng L, Chiew F, Fu B J. Understanding the impacts of climate and land use change on water yield. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 167-174.
- [33] Li Y, Piao S L, Li L Z X, Chen A P, Wang X H, Ciais P, Huang L, Lian X, Peng S S, Zeng Z Z, Wang K, Zhou L M. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaar4182.
- [34] 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. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2017, 101: 102-111.
- [35] Lu H T, Yan Y, Zhu J Y, Jin T T, Liu G H, Wu G, Stringer L C, Dallimer M. Spatiotemporal water yield variations and influencing factors in the Lhasa River Basin, Tibetan Plateau. *Water*, 2020, 12(5): 1498.
- [36] Peng J, Liu Z H, Liu Y H, Wu J S, Han Y N. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent. *Ecological Indicators*, 2012, 14(1): 28-39.
- [37] 岳东霞, 陈冠光, 朱敏翔, 郭晓娟, 周妍妍, 李凯, 王东, 郭建军, 曾建军. 近 20 年疏勒河流域生态承载力和生态需水研究. *生态学报*, 2019, 39(14): 5178-5187.
- [38] 谢霞, 杨国靖, 王增如, 王杰. 疏勒河上游山区不同海拔梯度的景观格局变化. *生态学杂志*, 2010, 29(7): 1420-1426.
- [39] 林恭华, 杨传华, 陈生云, 刘文杰, 陈桂琛, 张同作. 疏勒河上游冻土区大型土壤动物群落调查. *草业科学*, 2011, 28(10): 1864-1868.
- [40] 陈生云, 刘文杰, 叶柏生, 杨国靖, 宜树华, 王发刚, 秦翔, 任贾文, 秦大河. 疏勒河上游地区植被物种多样性和生物量及其与环境因子的关系. *草业学报*, 2011, 20(3): 70-83.
- [41] 丁宏伟, 魏余广, 李爱军, 何江海, 崔振卿. 疏勒河出山径流量变化特征及趋势分析. *干旱区研究*, 2001, 18(3): 48-53.
- [42] 李洪源, 赵求东, 吴锦奎, 丁永建, 秦甲, 韦虹, 曾帝. 疏勒河上游径流组分及其变化特征定量模拟. *冰川冻土*, 2019, 41(4): 907-917.
- [43] 张媛媛. 1980—2005 年三江源区水源涵养生态系统服务功能评估分析[D]. 北京: 首都师范大学, 2012.
- [44] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [45] Yang D, Liu W, Tang L Y, Chen L, Li X Z, Xu X L. Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: applicability of the InVEST model. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182: 133-143.
- [46] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 杨汉波. Hargreaves 公式的全局校正及适用性评价. *水科学进展*, 2011, 22(2): 160-167.
- [47] 周文佐. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
- [48] 程一凡. 基于 InVEST 模型的三江源国家公园水源涵养量变化与草地生态补偿研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2019.
- [49] Sharp R, Douglass J, Wolny S, Arkema K, Bernhardt J, Bierbower W, Chaumont N, Denu D, Fisher D, Glowinski K, Griffin R, Guannel G, Guerry A, Johnson J, Hamel P, Kennedy C, Kim C K, Lacayo M, Lonsdorf E, Mandle L, Rogers L, Toft J, Verutes G, Vogl A L, and Wood S. InVEST User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2020.
- [50] Liu S L, Sun Y X, Dong Y H, Zhao H D, Dong S K, Zhao S, Beazley R. The spatio-temporal patterns of the topsoil organic carbon density and its influencing factors based on different estimation models in the grassland of Qinghai-Tibet Plateau. *PLoS One*, 2019, 14(12): e0225952.
- [51] 王玉纯, 赵军, 付杰文, 魏伟. 石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异. *生态学报*, 2018, 38(13): 4637-4648.
- [52] 刘军会, 高吉喜, 聂亿黄. 青藏高原生态系统服务价值的遥感测算及其动态变化. *地理与地理信息科学*, 2009, 25(3): 81-84.
- [53] 刘娅, 朱文博, 韩雅, 李双成. 基于 SOFM 神经网络的京津冀地区水源涵养功能分区. *环境科学研究*, 2015, 28(3): 369-376.
- [54] Ruan H W, Zou S B, Yang D W, Wang Y H, Yin Z L, Lu Z X, Li F, Xu B R. Runoff simulation by SWAT model using high-resolution gridded precipitation in the upper Heihe River Basin, Northeastern Tibetan Plateau. *Water*, 2017, 9(11): 866.
- [55] 叶露培. 淇河流域水源供给服务功能空间异质性研究[D]. 开封: 河南大学, 2018.
- [56] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 马涛, 王怀香, 刘康, 沈茜, 刘心浩. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. *地理研究*, 2016, 35(4): 664-676.
- [57] Yin G D, Wang X, Zhang X, Fu Y S, Hao F H, Hu Q H. InVEST model-based estimation of water yield in North China and its sensitivities to climate variables. *Water*, 2020, 12(6): 1692.