

DOI: 10.20103/j.stxb.202404190878

陶洁怡, 章锦河, 郭丽佳, 王静玮, 薛华菊. 三江源国家公园水源涵养服务时空演变特征及其驱动因素. 生态学报, 2025, 45(3): 1226-1238.

Tao J Y, Zhang J H, Guo L J, Wang J W, Xue H J. Spatiotemporal change and driving factors of water conservation in Sanjiangyuan National Park. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1226-1238.

三江源国家公园水源涵养服务时空演变特征及其驱动因素

陶洁怡^{1,2}, 章锦河^{1,2,3,*}, 郭丽佳^{1,2}, 王静玮^{1,2}, 薛华菊^{3,4}

1 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

2 黄山国家公园生态系统教育部野外科学观测研究站, 黄山 245899

3 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016

4 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810016

摘要:三江源国家公园是我国重要的生态屏障区, 研究其水源涵养服务变化对区域生态保护、绿色发展与生态系统健康诊断等具有重要意义。基于参数地方化修正的 InVEST 模型, 分析三江源国家公园 2000—2022 年水源涵养服务的时空变化特征, 并利用逐像元相关和残差趋势方法辨识对其产生影响的驱动因素。结果表明: (1) 2000—2022 年三江源国家公园水源涵养量显著上升, 变化速率为 1.01 亿 m³/a, 年平均水源涵养量为 91.66 亿 m³。三江源国家公园体制的建立有助于水源涵养服务的提升, 试点建立后 (2016—2022 年) 水源涵养量增长速率高于试点建立前 (2000—2016 年)。地方化的 Z 参数可用于相似自然条件下的水源涵养研究。(2) 水源涵养量空间上表现为东南高西北低的分布格局, 高值区位于东南部澜沧江源园区, 低值集中于国家公园北部, 草原是区域水源涵养量的主要贡献地类。水源涵养极重要区和高度重要区占比小, 多为各河流发源地。(3) 三江源国家公园水源涵养服务与降水呈正相关、与蒸散发呈负相关, 降水发挥着主导作用。2000—2022 年间, 气候要素对水源涵养服务的影响有所下降。(4) 气候变化是驱动三江源国家公园水源涵养能力提升的重要因素, 自 2016 年国家公园试点建立后, 单一气候的积极影响区域占比从 98.42% 下降至 82.44%。气候人类共同作用和单一人类活动的积极影响逐渐显现, 说明国家公园的建设与生态保护对水源涵养起到积极作用, 但仍存在气候变化与人类活动叠加引起的水源涵养能力下降现象。

关键词:三江源国家公园; 水源涵养; InVEST 模型; 气候变化; 人类活动

Spatiotemporal change and driving factors of water conservation in Sanjiangyuan National Park

TAO Jieyi^{1,2}, ZHANG Jinhe^{1,2,3,*}, GUO Lijia^{1,2}, WANG Jingwei^{1,2}, XUE Hua ju^{3,4}

1 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 Huangshan National Park Ecosystem Observation and Research Station, Ministry of Education, Huangshan 245899, China

3 Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810016, China

4 School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810016, China

Abstract: Studying the changes in water conservation service (WC) in Sanjiangyuan National Park, an important ecological barrier area in China, is of great significance for regional ecological protection, green development, and ecosystem health diagnosis. This paper analyzes the spatial and temporal characteristics of WC in Sanjiangyuan National Park from 2000 to 2022 based on the InVEST model with parameter localization correction, and identifies the driving factors affecting them using image-by-image metric correlation and residual trend methods. The results show that: (1) From 2000

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42271251)

收稿日期: 2024-04-19; 网络出版日期: 2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjinhe@nju.edu.cn

to 2022, the water conservation service (WC) volume in Sanjiangyuan National Park significantly increased, averaging 9.166 billion m^3 annually, with a rate of change of 101 million m^3/a . The establishment of the Sanjiangyuan National Park system contributed to the improvement of the WC, and the WC was improved after the establishment of the pilot project (2016—2022), the growth rate of water source nutrient quantity is higher than that before the establishment of the pilot project (2000—2016). The localized Z parameter can be used to study the WC under similar natural conditions. (2) The spatial distribution of water yield and WC capacity in Sanjiangyuan National Park was basically consistent, showing a distribution pattern of high in the southeast and low in the northwest, with the high-value area located in the Lancangjiang River Source Park and the low-value area mainly concentrated in the northern part of the national park. The WC capacity of different land use types varied widely, with grassland being the main contributor to regional WC, and the WC capacity of different land use types has improved since the establishment of the national park pilot in 2016. The western and northern parts of the study area were mainly generally important and more important WC areas, accounting for the largest proportion of the total area, and extremely important and highly important WC areas accounted for a small proportion, mostly for the headwaters of various rivers. (3) WC in Sanjiangyuan National Park was positively correlated with precipitation and negatively correlated with evapotranspiration, with precipitation playing a dominant role, and changes in the bias coefficients excluding precipitation were significantly stronger than the bias coefficients excluding evapotranspiration. The influence of climate factors on WC declined during the period of 2000—2022, and since the establishment of the pilot national park in 2016, the promotion effect of precipitation on WC and the inhibition effect of evapotranspiration on WC have weakened. (4) Climate change was an important factor driving the enhancement of WC in Sanjiangyuan National Park. Comparing the two stages before and after the proposal of the national park, the two types of climate promotion (98.42%) and anthropogenic suppression (1.58%) were manifested in 2000—2016, and the percentage of area of different driving types in 2016—2022, in descending order, were as follows: climate promotion (82.44%) > co-inhibition (14.57%) > co-promotion (1.85%) > climate suppression (0.66%) > anthropogenic promotion (0.46%) > anthropogenic suppression (0.03%). Following the establishment of the pilot national parks, the synergistic impacts of climate-human co-promotion and single human activities gradually appeared, and this part was also the area where human activities promoted the rapid growth of WC, indicating that the construction of national parks, ecological protection projects, and forbidden animal husbandry management played a positive role in WC.

Key Words: Sanjiangyuan National Park; water conservation; InVEST model; climate change; human activities

世界自然保护联盟(IUCN)在国家公园的定义中,指出“国家公园是大面积自然或近自然区域”,用以保护大尺度生态过程以及这一区域的生态系统特征,强调了国家公园的生态安全保护功能^[1]。我国在各类自然保护地实践探索的基础上,2013年明确提出“建立国家公园体制”,并于2016年成立第一个国家公园体制试点——三江源国家公园。三江源国家公园地处三江源核心区域,该地区是中国乃至东南亚的重要生态屏障,养育着黄河、长江和澜沧江三条大江大河,素有“中华水塔”之美誉。近年来,气候变化和草甸持续退化对区域水源涵养产生了较大影响,园区明显表现出对气候变化响应、人类活动干扰敏感等脆弱性特征,其“生态源”地位有所削弱^[2]。在此背景下,三江源国家公园体制试点的建立对区域水源涵养能力提升、生态安全维护具有重大意义。

水源涵养是维持生态系统良好运行的命脉,对区域生态系统平衡与可持续发展至关重要^[3]。已有研究表明,水源涵养与区域自然地理条件和人类活动等因素密切相关^[4],科学评估长时间序列下水源涵养服务的变化格局及影响因素是学术界研究的重要领域。近年来,绘制、量化和评估水源涵养服务的相关方法和工具大量增加,以国家公园作为案例地的研究不断丰富,SWAT^[5]、SCS^[6]、RFWCFAM^[7]、InVEST^[8]等数学模型的构建已成为主流方法。其中,InVEST模型中的产水模块对自然生态系统中水文关系进行简化,被应用于祁连

山^[9]、香格里拉^[10]、钱江源^[11]等诸多国家公园,三江源国家公园由于其独特的生态系统和特殊的自然地理位置,其水源涵养功能更是引起广泛关注^[12-14]。InVEST 模型中输入参数是否合理对于水源涵养评估结果可靠性具有重要影响^[15],当前相关研究除 Z 参数外,其余数据的来源和运算方法均较为成熟, Z 参数算法不尽相同。尤其在三江源这类降雨时空分布不均的地区,实现 Z 参数地方化尤为重要^[16]。

此外,众多学者通过采用地理探测器^[17]、相关分析^[18]、多元统计分析^[19]等方法,有效实现了水源涵养变化驱动因素的空间可视化和归因量化。然而,当前相关研究往往从国家公园区域整体或三个园区开展分析^[20-22],尚未从子流域角度进行考虑,并且少有探讨三江源国家公园体制试点建设前后的区域水源涵养差异和影响因子变化。随着试点投入的资金和建设时间的不断增加,迫切需要开展水源涵养的生态成效评估及其主控因子分析,结合子流域差异加强水源涵养区生态建设,这对于加强后续顶层设计起着关键性作用。

因此,本研究通过地方化参数的 InVEST 模型,定量评估 2000—2022 年长时间序列下三江源国家公园及其子流域的水源涵养服务时空演变,对比研究国家公园体制试点建设前后的水源涵养能力变化及其驱动因素响应特征。以期为三江源国家公园的水资源管理和后续生态安全保护提供重要参考。

1 研究区概况

三江源国家公园(89°24'6"—99°6'46"E,32°26'4"—36°16'49"N)是 2016 年启动的首个国家公园体制试点,位于青海省西南部,总面积为 19.07 万 km²,长江、黄河、澜沧江源头区域全部纳入国家公园范围,实现源头生态系统的完整保护(图 1)。国家公园地处青藏高原气候区北端尾闾区,气候表现为冷热两季、雨热同期,年均温为-5.6—7.8℃,年均降水量为 262.2—772.8mm,年均蒸发量 730—1700mm。地处地球“第三极”青藏高原腹地,以山原和高山峡谷地貌为主。该地区高寒草甸和高寒草原是生态主体资源,在维护三江源水源涵养中具有基础性地位。以 2022 年三江源国家公园土地利用为例,主要包括 79.17%的草地、3.66%的水体、1.42%的冰雪、0.01%的森林以及 15.74%的裸地。

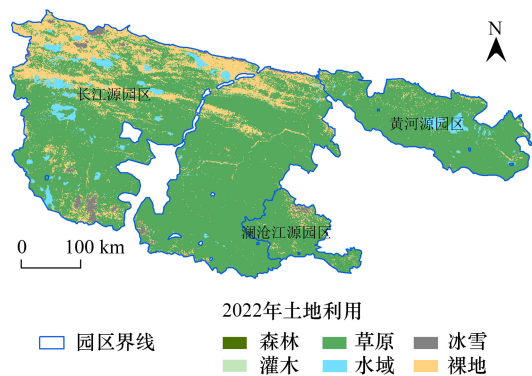


图 1 研究区概况

Fig.1 Location of Sanjiangyuan National Park

2 研究方法与数据来源

2.1 三江源国家公园水源涵养评估

2.1.1 产水能力

InVEST 模型产水量模块基于 Budyko 水热耦合平衡假设,利用各栅格的降水量减去实际蒸发量得到产水量,具体公式如下:

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

式中, $Y(x)$ 为年产水能力(mm); $AET(x)$ 、 $P(x)$ 分别为像元 x 的年实际蒸散量和年降水量。 $\frac{AET(x)}{P(x)}$ 表示 Budyko 曲线的近似值,根据傅抱璞^[23]和 Zhang 等^[24]提出的 Budyko 曲线的表达式计算得到:

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^{\omega(x)}\right]^{\frac{1}{\omega(x)}} \quad (2)$$

式中, $PET(x)$ 为像元 x 潜在的蒸散量, $\omega(x)$ 是表征集水区自然气候和土壤属性的非物理经验拟合参数。 $\omega(x)$ 可以根据 Donohue 等^[25]提出的方法获得,其计算公式为:

$$\omega(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (3)$$

式中, Z 为 Zhang 系数, 反映区域降水模式及水文特征, $AWC(x)$ 为土壤有效含水量 (mm), 由土壤质地和土壤深度决定, 计算如下:

$$AWC(x) = \min(\text{Restlayerdepth}, \text{rootdepth}) \times PAWC \quad (4)$$

式中, Restlayerdepth 为最大根系埋藏深度, rootdepth 表示土壤深度, PAWC 表示植物利用水分含量, 是田间持水量和永久萎蔫系数的差值。本研究 PAWC 计算遵循 Zhou 等^[26]开发的一种利用中国土壤物理和化学性质的 PAWC 估算方法。其公式为:

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

式中, clay(%)、sand(%)、silt(%) 和 OM(%) 分别表示土壤砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量和有机质含量。

2.1.2 水源涵养能力

计算得到产水能力的基础上, 结合研究区地形指数、地表流速系数和土壤饱和导水率计算栅格尺度水源涵养能力^[27]。计算方法如下:

$$WC_i = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_s}{300}\right) \times Y_i \quad (6)$$

$$TI = \lg \frac{D_{\text{area}}}{\text{Soil}_{\text{dep}} \times P_{\text{slope}}} \quad (7)$$

$$K_s = 60.96 \times 10^{(-0.6 + 0.0126S - 0.0064C)} \quad (8)$$

式中, WC_i 为栅格单元 i 的水源涵养能力 (mm); Y_i 为产水能力 (mm); TI 、 K_s 、 D_{area} 、 Soil_{dep} 、 P_{slope} 分别表示地形指数、土壤饱和导水率、土层深度 (mm)、百分比坡度, S (%) 和 C (%) 代表砂粒和黏粒含量。

2.2 Z 参数选取

Z 参数是一个气候季节性因子, 它捕捉了当地的降水模式和水文地质特征, 取值范围为 1—30。本研究基于 2000—2022 年的三江源国家公园的实际观测数据对 Z 值进行校准, 每一次模拟结果均与实际径流量数据进行对比验证。最终得到校准的 Z 范围为 1.93—7.49, 平均值为 3.51。结果表明, 当 Z 为 3.51 时, 模拟产水量最接近观测径流量, 模型模拟效果最好。

为进一步验证 Z 参数选取的合理性, 本文利用全局可用的 ω 方法进行佐证。 ω 反映了流域特征对降水分配给实际蒸散发和径流比例的影响, 取值范围为 1.25—5。本研究采用 Xu 等^[28]提出的模型, 计算得到 ω 约为 3.54, $Z=4.17$, 结果与实测模拟的 Z 值接近。张媛媛等^[29]对 1980—2005 年三江源区的水源涵养服务校验得出, 三江源地区的 Z 值为 3.326 时模型拟合最优。综上考虑, 本研究中三江源国家公园 Z 参数取 3.51 较为合理。

2.3 影响因素分析

InVEST 模型对水源涵养的测量是基于水量平衡法获得的, 主要受到气候和下垫面影响。水源涵养能力与区域植被覆盖度、土地利用变化、气候条件等密切相关, 包括气象要素中的降水量和蒸散量变化^[20], 人类活动引起的土地利用类型、植被覆盖等的改变, 最终影响到生态系统的性质、过程和组成部分并作用于流域的水源涵养能力^[22]。

2.3.1 逐像元相关分析

采用逐像元的 Pearson 相关和偏相关来计算水源涵养分别与气温与降水的相关性。该方法既可以识别驱动因子在时间序列上的变化, 也可明晰驱动因子的空间关系和变化特征^[30]。Pearson 相关计算公式如下:

$$r_{12} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \times \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (9)$$

式中, r 为 X 与 Y 之间的相关系数; n 为计算年份; X 与 Y 分别代表不同年份的水源涵养能力和气候因子。

偏相关是不考虑其他环境因子的影响下,对两个因子的相关性进行分析^[31],其计算公式为:

$$r_{12 \cdot 3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1-r_{13}^2)(1-r_{23}^2)}}$$

(10)

式中, $r_{12 \cdot 3}$ 表示在保持环境变量 3 不变的情况下变量 1 和变量 2 的相关系数。

2.3.2 残差趋势分析

残差趋势分析方法是分离驱动因子影响的常用方法,可以将气候变化和人类活动影响有效区分开来^[32]。本研究采用多元回归残差分析方法:首先构建以水源涵养为因变量,以气候因子为自变量的二元线性回归模型,而后将实测值与回归结果做差,回归结果作为气候变化影响,差值结果作为人类活动影响^[33]。计算公式为:

$$WC_{cc} = a \times AET + b \times PRE + c$$

(11)

$$WC_{HA} = WC_{obs} - WC_{cc}$$

(12)

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times WC_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n WC_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2}$$

(13)

式中, WC_{cc} 为回归值,代表气候变化影响, a 、 b 、 c 为回归系数, WC_{obs} 、 WC_{HA} 分别代表实测值与人类活动影响, AET 与 PRE 分别表示实际蒸发量和降水量。 $slope$ 为 WC 和时间变量拟合的一元线性回归方程的趋势; n 为年数; i 为时间变量。

此外,根据二者计算的趋势,可将区域分为受气候变化和人类活动影响的 6 种类型(表 1)。

表 1 水源涵养变化驱动因素判定标准

Table 1 Criteria for determining driving factors of water conservation change

趋势(实测值) Slope(WC_{obs})	驱动因素 Driving factor	划分标准 Delineation criteria	
>0	CC&HA	Slope(WC_{cc})>0	Slope(WC_{HA})>0
	CC	Slope(WC_{cc})>0	Slope(WC_{HA})<0
	HA	Slope(WC_{cc})<0	Slope(WC_{HA})>0
<0	CC&HA	Slope(WC_{cc})<0	Slope(WC_{HA})<0
	CC	Slope(WC_{cc})<0	Slope(WC_{HA})>0
	HA	Slope(WC_{cc})>0	Slope(WC_{HA})<0

CC:气候变化影响 Climate change;HA:人类活动影响 Human activity;CC&HA:气候变化和人类活动共同影响 Climate change & Human activity;
Slope(WC_{cc}):趋势(气候变化影响) Slope (Water conservation Climate change); Slope(WC_{cc}):趋势(人类活动影响) Slope (Water conservation Human activity)

2.4 数据来源与处理

InVEST 产水量模型需要的核心参数包括气候数据、土地利用/覆被类型数据、土壤深度、土壤数据、水文数据等,相关数据源如表 2 所示。所有数据以 1km 的空间分辨率进行重采样,并利用 WGS_1984_UTM_Zone_50N 坐标系进行投影。InVEST 模型的生物物理系数表见表 3,其中各土地利用类型的作物蒸散系数,根据 FAO56 指南估计得到^[34]。

3 结果分析

3.1 产水量及水源涵养量年际变化

研究期间水源涵养量与产水量变化趋势总体一致,都呈现增加态势(图 2)。具体而言,三江源国家公园多年平均产水量为 233.46 亿 m^3 ,整体上呈显著增加趋势,增加速率为 2.47 亿 m^3/a 。水源涵养量呈现波动上

升趋势,多年平均水源涵养量为 91.66 亿 m³,增加速率为 1.01 亿 m³/a。2022 年水源涵养量较 2000 年增加了 39.85%,水源涵养量增加 28.27 亿 m³。

表 2 数据来源及处理

Table 2 Data sources and processing

数据名称 Data name	数据来源 Data source	年份 Year	数据类型及分辨率 Data type and spatial resolution
流域边界 Watershed boundary	中国科学院资源与环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)	—	矢量
降水数据 Precipitation data	中国科学院资源与环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)	2000—2022	栅格,1km×1km
实际蒸散发数据 Actual evaporation data	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/)	2000—2022	栅格,1km×1km
土壤数据 Soil data	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)	2010	栅格,1km×1km
土地利用/覆被类型数据 Land use data	中国逐年土地覆盖数据集 (https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021)	2000—2022	栅格,30m×30m
数字高程模型 Elevation data	中国科学院地理空间数据云平台 (http://www.gscloud.cn)	—	栅格,1km×1km
年径流量数据 Annual runoff data	青海省水利信息网 (http://slt.qinghai.gov.cn)	2000—2022	统计数据

表 3 InVEST 产水量模型的生物物理表

Table 3 Biophysical table used for the InVEST water yield model

土地利用类型 Land use type	作物蒸散系数 Crop evapotranspiration coefficient	根系限制层深度/mm Root_depth
草地 Grassland	0.65	2500
水体 Water	0.9	1
冰雪 Ice/Snow	0	100
森林 Forest	1	3000
裸地 Barren	0.5	100

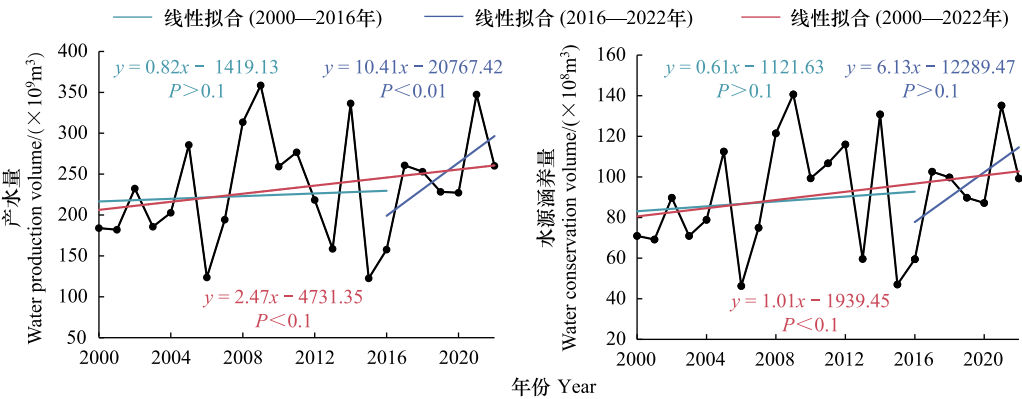


图 2 三江源国家公园产水量与水源涵养量的年际变化

Fig.2 Interannual variations of water yield and water conservation volume in Sanjiangyuan National Park

建立国家公园有助于提升产水量与水源涵养量。以 2016 年三江源国家公园体制试点启动为节点,将研究期分为国家公园体制试点启动前(2000—2016 年)和正式提出后(2016—2022 年)两个阶段。三江源国家公园的产水量和水源涵养量的变化率在两个时段内增长趋势差异较大,2016—2022 年变化速率(产水量和水

源涵养量变化速率分别为 10.41 亿 m^3/a 、6.13 亿 m^3/a) 显著高于 2000—2016 年(产水量和水源涵养量变化速率分别为 0.82 亿 m^3/a 、0.61 亿 m^3/a)。

3.2 产水量及水源涵养量空间变化特征

三江源国家公园产水量和水源涵养量的空间分布基本一致,呈现东南高西北低的分布特征。由图 3 可知,2000—2022 年三江源国家公园的产水量年际变化较大,空间分布特征基本一致,表现为由西北向东南递增。高产水区分布在临近高原亚寒带湿润区的澜沧江源园区,降水量最为丰沛,降雨后易形成地表径流,从而导致高产水量。中等产水量区位于长江源园区及黄河源园区南部,这些地区处于由高寒亚寒带干旱区至高原亚寒带湿润区的过渡区,产水量呈现增长态势。低产水区位于国家公园北部地区,降水量最低。研究区水源涵养量空间分布在空间尺度上也表现为东南高西北低的格局。澜沧江源园区降水量居三园区之首,用地类型以灌丛、草原草甸等镶嵌分布为主,降水充足且植被覆盖度高,绿水资源丰富,为高水源涵养分布区;低值区域主要集中于国家公园北部,降水偏低,荒漠裸地面积大,植被稀疏。

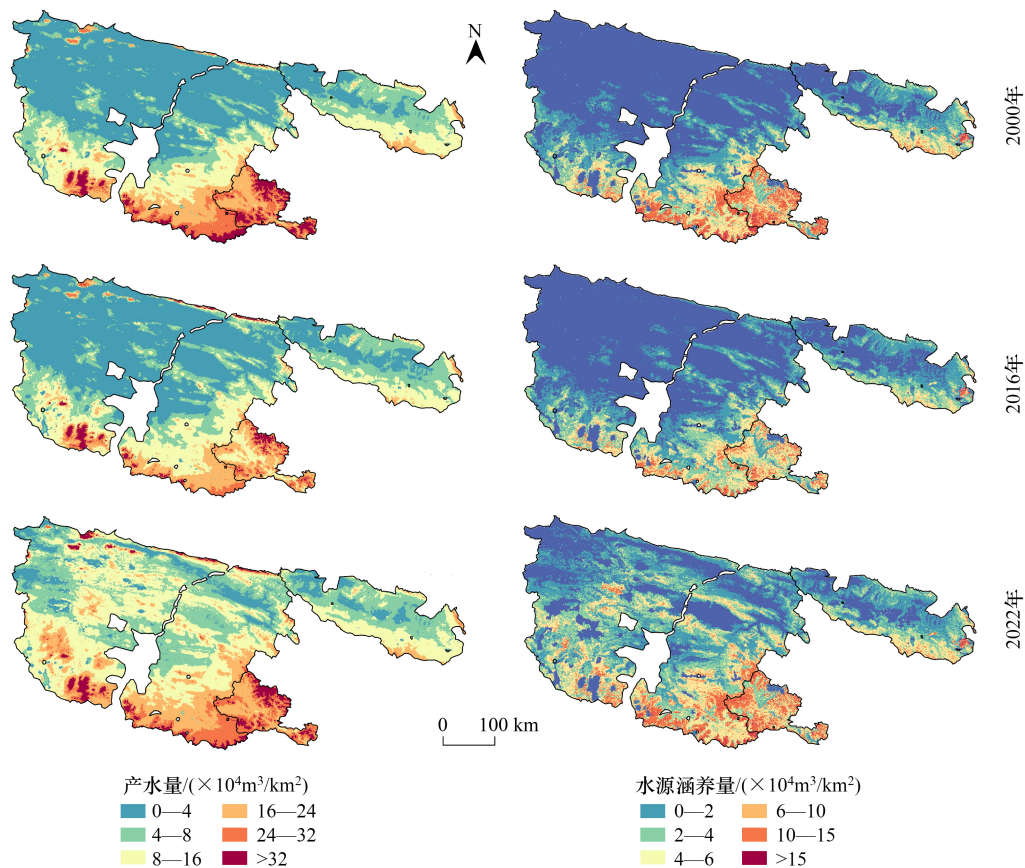


图 3 三江源国家公园 2000—2022 年产水量和水源涵养量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of water yield and water conservation volume in Sanjiangyuan National Park from 2000 to 2022

本研究进一步针对不同的土地利用状况分析水源涵养服务的空间差异。从水源涵养总量上看,3 个时段不同土地利用类型的水源涵养总量排序为草原>裸地>森林>灌木(表 4)。水源涵养总量受土地利用方式面积的影响显著,草原的水源涵养总量达到研究区涵养总量的 90% 以上,是三江源国家公园水源涵养量的主要贡献地类。

通过计算 2000—2016 年、2016—2022 年和 2000—2022 年研究区 4 种主要土地利用模式的平均水源涵养量(图 4)。2000—2022 年三江源国家公园土地利用结构总体变化不大,主要由森林、灌木、草原和裸地组成,其在三个时段内的平均水源涵养量排序为:森林>灌木>草原>裸地(表 4)。尽管森林蒸散发作用强,但容易

截留降水,保护了土壤结构,同时枯枝落叶层也加强了对水分的吸收。裸地由于植被缺少,更多地形成蓝水资源,降水不易被吸收。相比于 2000—2016 年,2016—2022 年不同用地类型的平均水源涵养能力均最高,表明三江源国家公园的成立促进生态保护投入的显著增加,有效提升了区域植被覆盖率,水源涵养能力得到增强。

表 4 三江源国家公园不同土地利用方式的水源涵养量

年份 Year	各土地利用类型的总水源涵养量 Total amount of water conservation of each land use type				总水源涵养量/(10 ⁸ m ³) Total amount of water conservation
	森林/(10 ⁵ m ³) Woodland	灌木/(10 ⁵ m ³) Shrubbery	草原/(10 ⁸ m ³) Grassland	裸地/(10 ⁸ m ³) Unused land	
2000—2016	18.88	0.56	73.65	3.89	78.23
2016—2022	21.76	0.76	78.26	4.88	83.52
2000—2022	19.92	0.63	75.01	4.09	79.77

3.3 水源涵养服务重要性分区

为识别三江源国家公园水源涵养服务重要区域的空间分布特征,本研究参考《生态保护红线划定指南》的分类方法,并利用 ArcGIS 中的自然断点法对 2000—2022 年的平均水源涵养能力进行分类^[35—36],最终确定 5 个重要性等级:一般重要区(I 级:0—23.29mm)、较重要区(II 级:23.29—53.75mm)、中等重要区(III 级:53.75—91.37mm)、高度重要区(IV 级:91.37—141.53mm)和极重要区(V 级:>141.53mm)。水源涵养重要性等级的面积占比和空间分布如图 5 所示。其中,一般重要区和较重要区占比分别为 37.29%和 32.47%,主要分布在国家公园西部和北部,包括长江源园区和黄河源园区大部分区域。极重要区面积为 4799.76km²,占全区比例为 2.27%。利用 ArcSWAT 水文分析,将三江源国家公园划分为 26 个子流域,并将每个子流域视为独立单元,分析其区域差异。各子流域水源涵养重要性等级占比存在较大差异,高度重要区和极重要区主要位于子流域 20、24、26 和 21,这些地区是众多河流的发源地,作为重要的水源涵养区,为工农业生产、居民生活提供用水。

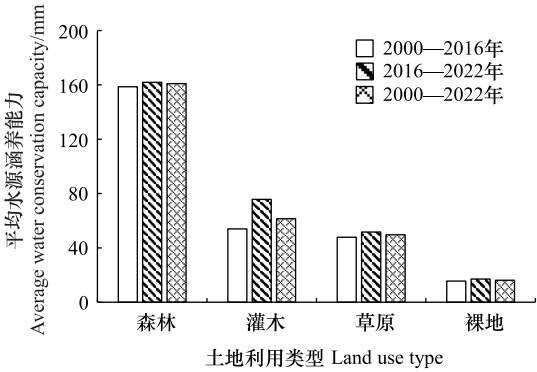


图 4 三江源国家公园不同土地利用类型的平均水源涵养能力
Fig.4 The average water conservation of different land use patterns in Sanjiangyuan National Park

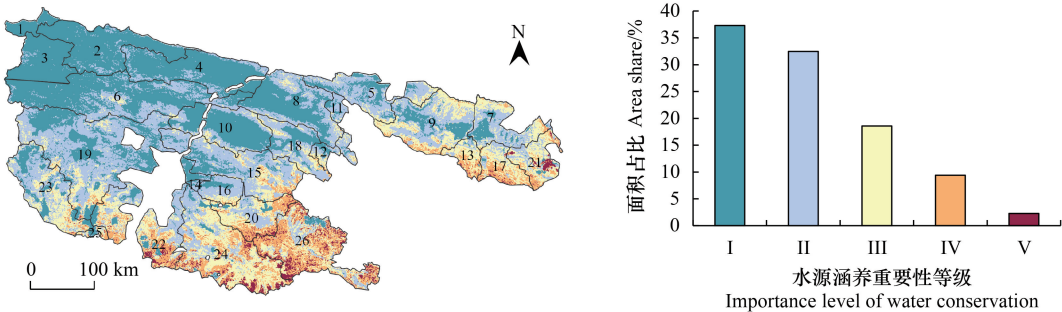


图 5 三江源国家公园水源涵养等级空间分布图
Fig.5 Spatial distribution of water conservation grade of the Sanjiangyuan National Park
I:水源涵养一般重要区;II:水源涵养较重要区;III:水源涵养中等重要区;IV:水源涵养高度重要区

3.4 水源涵养对主要驱动因素的响应

3.4.1 水源涵养对气候因子的响应

2000—2022 年间,气候要素对水源涵养的影响呈下降趋势,降水在水源涵养的时空变化中发挥着正相关的主导作用。表 5 统计了水源涵养与驱动因子之间的简单相关系数和净相关系数的空间均值。就降水量与水源涵养能力之间而言,2000—2016 年两者的简单相关系数均值为 0.913,剔除蒸散发的一阶偏相关结果显示,两者的正相关关系进一步增强。2016—2022 年简单相关系数均值和一阶偏相关系数均出现下降,说明国家公园试点建立以来,降水对水源涵养的促进作用有所减弱。蒸散发量与水源涵养能力呈现负相关,2000—2016 年两者简单相关系数均值为-0.453,剔除降水的一阶偏相关结果以后相关系数均值显著减小至-0.529。2016—2022 年,蒸散发对水源涵养的负相关关系明显减弱,意味着国家公园试点建立以来,蒸散发对水源涵养的抑制作用得到缓解。研究期间,剔除降水的偏相关结果与剔除蒸发的偏相关结果相比,相关系数变化显著增强,表明水源涵养能力的变化是由降水主导的。

表 5 三江源国家公园水源涵养与驱动因子的空间相关系数均值统计

Table 5 Mean values of spatial correlation coefficients of drivers of water conservation in Sanjiangyuan National Park

年份 Year	剔除因子 Delineation criteria	相关系数(与降水) Correlation coefficient (with precipitation)	相关系数(与蒸散发) Correlation coefficient (with evapotranspiration)
2000—2016	—	0.913	-0.453
	降水	—	-0.529
	蒸散发	0.928	—
2016—2022	—	0.794	-0.028
	降水	—	-0.087
	蒸散发	0.797	—
2000—2022	—	0.919	-0.374
	降水	—	-0.485
	蒸散发	0.932	—

相关系数检验结果 $P<0.05$

水源涵养与气候因子的空间偏相关关系存在显著的空间差异(图 6)。对于水源涵养与降水的偏相关关

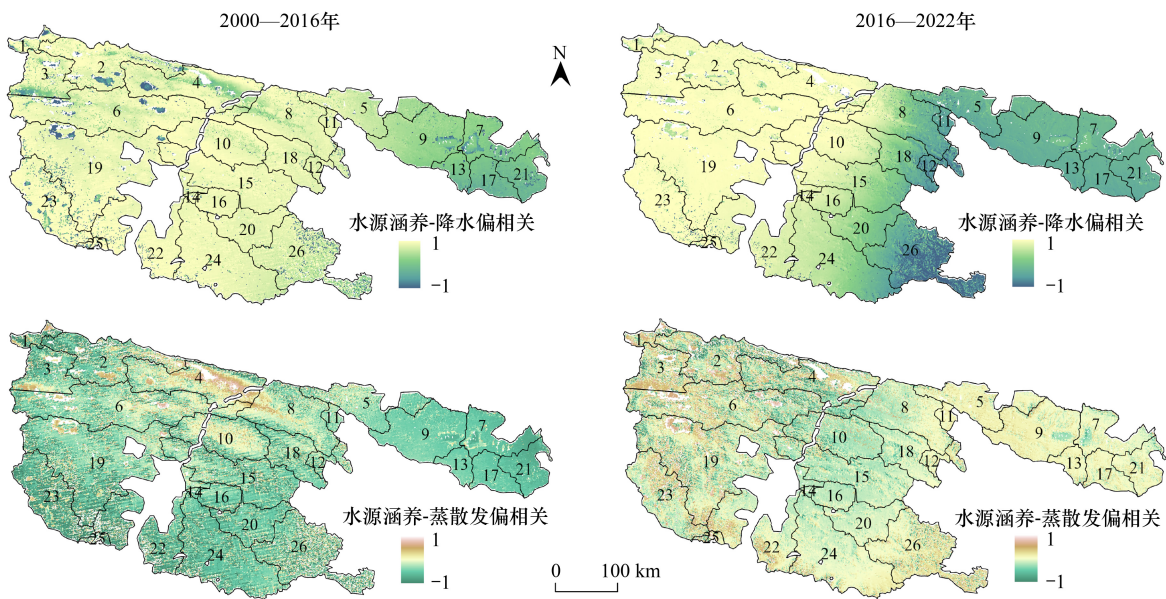


图 6 三江源国家公园水源涵养能力与气候因子相关关系的空间分布

Fig.6 Correlation between water conservation capacity and climate factors in Sanjiangyuan National Park

系,2000—2016 年国家公园西部呈现正相关高值,相关系数在 0.9 以上的区域占研究区的 77.99%,黄河源园区(如子流域 7、13、17、21)的正相关关系相对长江源园区和黄河源园区较弱。国家公园试点建立以来,相关系数较低的区域范围逐渐向西扩展,相关系数在 0.9 以上的区域占比下降至 50.32%。对于水源涵养与蒸散发的偏相关关系,2016—2022 年相比于 2000—2016 年而言负相关强度显著减弱,相关系数小于-0.4 的区域比例大幅度下降,由 61.37%减小为 0.45%。呈现正相关关系的区域由 5.44%增至 8.61%,并从集中分布(子流域 4)转变为分散布局。总体而言,水源涵养与降水的正相关关系呈现西高东低的分布特征,与蒸散发的负相关关系表现为南高北低,且在北部出现小范围正相关区域。

3.4.2 水源涵养变化的驱动因素

利用残差分析得到 2000—2016 年、2016—2022 年的回归趋势分布图和残差变化趋势分布图,其中将多元回归结果作为气候变化的影响,残差趋势结果代表人类活动影响。在此基础上,根据表 1 的判定标准分别得到国家公园体制试点建立前后的驱动因素空间分布图(图 7)。

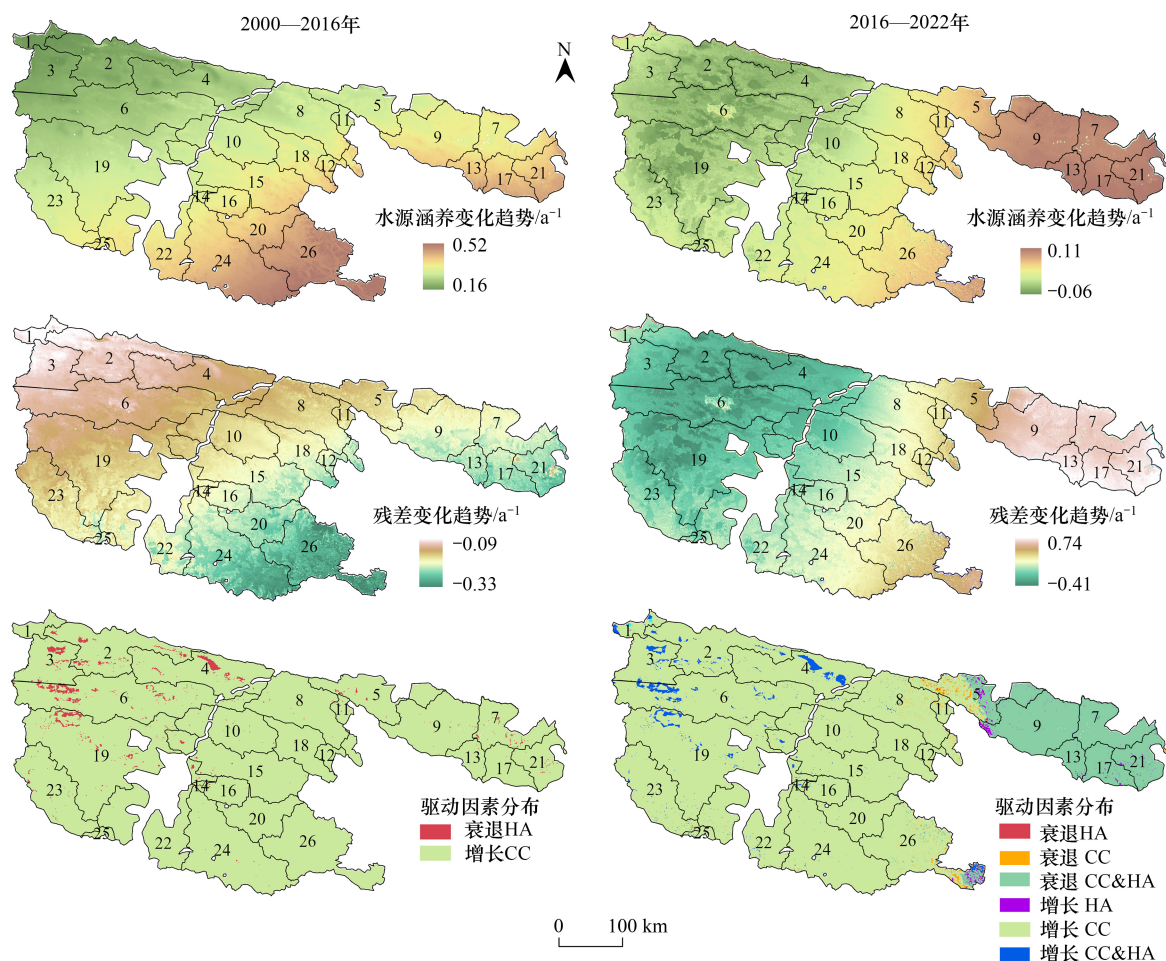


图 7 三江源国家公园水源涵养能力与驱动因素的残差分析结果

Fig.7 Results of residual analysis of water conservation capacity and driving factors of Sanjiangyuan National Park

衰退 HA:人类活动引起的水源涵养能力减弱;衰退 CC:气候变化引起的水源涵养能力减弱;衰退 CC&HA:气候变化和人类活动引起的水源涵养能力减弱;增长 HA:人类活动引起的水源涵养能力增强;增长 CC:气候变化引起的水源涵养能力增强;增长 CC&HA:气候变化和人类活动引起的水源涵养能力增强

结果显示:2000—2016 年气候变化对全区的水源涵养能力起着积极作用,受气象条件影响下,水源涵养增长最快的区域位于国家公园东南部(如子流域 20、24 和 26)以及东部(子流域 13、17 和 21)。2016 年以来,

气候条件对区域水源涵养的影响有所减弱,增长较快的地区主要分布在黄河源园区。2000—2016 年期间,人类活动对水源涵养能力的消极作用呈现出自西北向东南增强的趋势,三江源国家公园试点建立以后,人类活动开始呈积极作用,尤其是国家公园东部地区(如黄河源园区、澜沧江源园区(子流域 26)以及长江源园区的子流域 5、11 等),以上区域也是水源涵养增长最快地区。

从水源涵养变化驱动因子的空间分布来看,2000—2016 年大部分地区为气候增长型,面积占比高达 98.42%,单一人类活动的水源涵养衰退区域分散布局于长江源园区东部(如子流域 3、4、6)与黄河源园区(如子流域 7、21),占全区面积 1.58%,土地利用类型以裸地为主。2016—2022 年间,单一气候增长型区域占比有所下降,为全区的 82.44%,包括长江源和澜沧江源园区大部分区域。原单一人类活动影响的衰退型区域逐渐转变为由人类气候共同作用下的水源涵养增长区域,碎片状分布在长江源园区西部和澜沧江源园区尾部,面积占比为 1.85%。与此同时,黄河源园区西端(子流域 5、11)及澜沧江源园区尾间(子流域 26)出现受单一人类活动作用下的水源涵养增长区(占比为 0.46%),表明国家公园试点建立以来人类活动影响范围扩大,并朝着正向贡献发展。人类气候共同作用、单一气候影响、单一人类活动影响造成水源涵养服务减弱的区域面积占比分别为 14.57%、0.66%、0.03%,可知水源涵养能力降低区域中受气候人类共同作用的范围最广,主要集中在黄河源园区,由单一气候或人类活动导致的水源涵养降低只散布在子流域 5 和 26 等极个别区域。

4 讨论

InVEST 模型的产水量模块基于水热平衡原理,简化了产水量的评估步骤^[37]。与传统产水量估算方法相比,其突破对单一生态系统的常规计算,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^[38]。本研究表明,年平均产水量和水源涵养量的增加速率分别为 2.47 亿 m^3/a 和 1.01 亿 m^3/a (图 2),结果与吕乐婷等^[12]对三江源国家公园的研究结果相似。研究区东南高西北低的分布格局与周雪彤等^[39]、张法伟等^[13]研究结论基本一致,表明其空间分布结果的准确性。

气候变化是水源涵养服务变化的重要驱动力之一,尤其涉及降水和蒸散发。残差趋势分析结果显示,2000—2022 年间,单一气候变化引起的水源涵养服务增长在研究区内占比最大,表明水源涵养能力的变化与气候密切相关。在全球气候变暖的背景下,位于高寒区的三江源国家公园暖湿化趋势显著,近年来平均温度和降水量均呈增长趋势^[40],气温的升高会导致区域蒸散发量加剧,从而抑制三江源国家公园水源涵养服务的提升。本研究相关分析表明,降水是影响水源涵养时空变化的最重要驱动因素,暖湿气候促进流域水循环的加速,对水源涵养服务提升产生一定正向作用^[41],剔除降水的一阶偏相关结果的明显变化也印证了这一点,这一结果与高向龙等^[14]研究结果相一致。

三江源国家公园受气候变化及过度放牧等人类活动的共同影响,2000—2016 年期间,1.58%的区域水源涵养能力受人类活动作用出现减弱趋势,草地退化、土壤沙化等一系列问题的产生及加剧对三江源国家公园水源涵养产生消极作用。三江源地区自 2000 年设立自然保护区,并于 2005 年开始实施生态保护与建设工程,邵全琴等^[42]指出由于生态保护工程缺乏长期效应,环境治理速度跟不上生态恶化的速度,人类活动的积极效应会有所下降,诸多问题仍难以得到解决。随着从自然保护区到国家公园试点的设立,三江源国家公园生态保护更加受到重视,生态保护投入有效促进了水源涵养能力的提升^[43]。本研究也表明科学的人类活动有助于实现三江源国家公园生态系统的健康稳定,如 2016 年以来原先单一人类活动作用的水源涵养服务衰退区域转变为由人类气候共同作用的水源涵养增长区域,黄河源园区和澜沧江源园区尾间则出现受人类活动影响的水源涵养增长区。得益于国家公园试点的建立,生态移民和减畜、鼠害防治、沙化草原治理等^[44]多项措施使草地退化趋势得以有效遏制,林草植被增加^[45]。草原作为该地区的典型植被类型,在三江源国家公园的生态恢复过程中起到重要作用。尽管生态保护工程在一定程度上促进了水源涵养服务趋势,部分地区由于未能平衡放牧等造成的水源涵养能力退化等问题,出现效应反弹现象,人类活动可能有所加剧。在三江源国家公园这一气候主导的生态脆弱区,未来应进一步完善生态保护体系,识别不同子流域水源涵养的差异特点

和关键驱动因子,合理规划和权衡子流域的功能定位,对于三江源国家公园水源涵养服务的维护意义重大。

以上结果与本文结论基本一致,亦可作为模型计算结果准确性的作证。因此,本研究中修正的局部化参数可以推广到气候水文和地质背景相似但缺乏相关实测资料的其他流域。研究中采用的 InVEST 模型产水模块反映的是水资源的纵向功能,不足之处在于尚未考虑区域径流传输、地下水输送等横向功能,未来可以结合水源的横纵向变化探究其水源涵养效应及驱动机制。此外,由于数据获取限制等原因,冰川融水和冻土退化作为影响三江源国家公园水源涵养能力的一大重要因素,目前还没有得到考虑,下一步将继续深入相关研究。

5 结论

(1)2000—2022 年三江源国家公园产水量和水源涵养量年际变化呈波动上升趋势,水源涵养量变化速率为 $1.01 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$,年平均水源涵养量为 91.66 亿 m^3 。2016—2022 年水源涵养量增长速率高于 2000—2016 年的增长速率,国家公园建立有利于水源涵养量的提升。本研究选用的 Z 参数可用于相似气候条件下的流域产水研究,InVEST 模型参数的局部化有助于三江源国家公园生态本底的识别,实现区域水资源的科学调控和管理。

(2)三江源国家公园产水量和水源涵养量空间上分布基本一致,表现为东南高西北低的分布格局,高值区位于澜沧江源园区,低值区主要集中于国家公园北部。不同土地利用类型的水源涵养能力差异显著,草原是区域水源涵养量的主要贡献地类,2016 年国家公园试点建立以来,不同用地类型的水源涵养能力均有提升。研究区西部和北部地区主要为水源涵养一般重要区和较重要区,占全区面积比例最大,极重要区和高度重要区占比小,多为各河流发源地。

(3)三江源国家公园水源涵养服务与降水呈正相关、与蒸散发呈负相关,其中降水发挥主导作用,剔除降水后的偏相关系数变化显著强于剔除蒸散发的偏相关系数。2000—2022 年间,气候要素对水源涵养服务的影响有所下降,2016 年国家公园试点建立以来,降水对水源涵养的促进作用、蒸散发对水源涵养的抑制作用均出现减弱。

(4)气候变化通过影响植被生长进而作用于生态系统功能,是驱动三江源国家公园水源涵养能力提升的关键因素。对比国家公园体制提出前后的两个阶段,2000—2016 年表现为气候促进(98.42%)和人为抑制(1.58%)两类,2016—2022 年不同驱动类型面积占比从高到低依次为:气候促进(82.44%)>共同抑制(14.57%)>共同促进(1.85%)>气候抑制(0.66%)>人为促进(0.46%)>人为抑制(0.03%)。国家公园试点建立后,气候人类共同作用和单一人类活动的积极影响逐渐显现,两种影响的范围共同分布于黄河源园区西部和澜沧江源园区尾间,这部分也是人类活动促进水源涵养服务快速增长的地区,说明国家公园的建设、生态保护工程、禁牧管理等对水源涵养起到积极作用。气候和人类同时驱动造成的水源涵养降低区域分布在黄河源园区和澜沧江源园区尾部,表明人类的开垦、放牧等活动对这些区域草原植被造成了一定破坏。

参考文献(References):

- [1] 马小宾,章锦河,马天驰,陶洁怡,王培家,郭丽佳,杨良健. 国家公园生态系统健康测度模型构建及黄山实证研究. 生态学报, 2024, 44(13): 5746-5760.
- [2] 付梦娣,田俊量,朱彦鹏,田瑜,赵志平,李俊生. 三江源国家公园功能分区与目标管理. 生物多样性, 2017, 25(1): 71-79.
- [3] Belete M, Deng J S, Wang K, Zhou M M, Zhu E Y, Shifaw E, Bayissa Y. Evaluation of satellite rainfall products for modeling water yield over the source region of Blue Nile Basin. Science of the Total Environment, 2020, 708: 134834.
- [4] 刘亦晟,侯鹏,王平,朱健. 生态系统水源涵养服务功能定量评估方法研究进展. 应用生态学报, 2024, 35(1): 275-288.
- [5] 林峰,陈兴伟,姚文艺,方艺辉,邓海军,吴杰峰,林炳青. 基于 SWAT 模型的森林分布不连续流域水源涵养量多时间尺度分析. 地理学报, 2020, 75(5): 1065-1078.
- [6] 聂忆黄. 基于地表能量平衡与 SCS 模型的祁连山水源涵养能力研究. 地学前缘, 2010, 17(3): 269-275.
- [7] 余恩旭,张明芳,徐亚莉,孙鹏森,蒙作主. 区域森林水源涵养功能评价模型的开发与应用. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(1): 119-127.

- [8] 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.
- [9] 万志纲, 丁文广, 蒲晓婷, 吴岩松, 王亦悦, 祁连山国家公园产水量时空变化及驱动因素分析. 水土保持学报, 2023, 37(6): 161-169.
- [10] 杨子江, 陈晓宇, 张志明, 张雪. 香格里拉国家公园普达措片区景观多功能测度及权衡协同关系研究. 国家公园(中英文), 2024, 2(4): 226-234.
- [11] 段宝玲, 冯强, 原燕燕, 李鹏晖. 钱江源国家公园体制试点区生态系统服务权衡与协同分析. 旅游科学, 2021, 35(5): 11-31.
- [12] 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.
- [13] 张法伟, 李红琴, 罗方林, 王春雨, 王军邦, 马文婧, 杨永胜, 李英年. 基于增强回归树模型的三江源国家公园表层土壤储水及水源涵养功能的评估. 生态学报, 2022, 41(12): 2471-2478.
- [14] 高向龙, 冯起, 李宗省, 邓晓红, 薛健, 张百婷. 三江源水源涵养价值时空格局及关键影响因素研究. 生态学报, 2024(16): 1-13.
- [15] 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.
- [16] 王保盛, 陈华香, 董政, 祝薇, 邱全毅, 唐立娜. 2030 年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响. 生态学报, 2020, 40(2): 484-498.
- [17] 吕明轩, 张红, 贺桂珍, 张霄羽, 刘勇. 黄河流域水源涵养服务功能动态演变及驱动因素探究. 生态学报, 2024(7): 2761-2771.
- [18] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖燚, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [19] 陈德权, 兰泽英, 张郁, 吴辉. 广州市水源涵养生态系统服务功能评价与影响因素研究. 地理空间信息, 2024, 22(2): 34-38.
- [20] 公丽, 梁康, 刘昌明. 黄河水源涵养区水碳变量的时空变化特征及其影响因素. 地理科学进展, 2023, 42(9): 1677-1690.
- [21] 陈春阳, 戴君虎, 王焕炯, 刘亚辰. 基于土地利用数据集的三江源地区生态系统服务价值变化. 地理科学进展, 2012, 31(7): 970-977.
- [22] 曹莹, 曾彪, 张富广, 姜榕, 沈艳琦. 黄河上游水源涵养区植被恢复合理目标及恢复策略. 生态学报, 2024(18): 1-15.
- [23] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算. 大气科学, 1981, (1): 23-31.
- [24] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, Chiew F H S, Western A W, Briggs P R. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. Water Resources Research, 2004, 40(2): W02502.
- [25] Donohue R J, Roderick M L, McVicar T R. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. Journal of Hydrology, 2012, 436: 35-50.
- [26] Zhou W Z, Liu G H, Pan J J, Feng X F. Distribution of available soil water capacity in China. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(1): 3-12.
- [27] 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.
- [28] Xu X L, Liu W, Scanlon B R, Zhang L, Pan M. Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework. Geophysical Research Letters, 2013, 40(23): 6123-6129.
- [29] 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.
- [30] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 焦磊, 王浩, 延军平, 吕一河, 傅伯杰. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. 地理学报, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [31] Jiang L L, Guli J, Jiapaer, Bao A M, Guo H, Ndayisaba F. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. Science of the Total Environment, 2017, 599: 967-980.
- [32] 梁植, 孙若辰, 段青云. 黄河水源涵养区植被 NDVI 时空变化特征及其驱动因子. 地理科学进展, 2023, 42(9): 1717-1732.
- [33] 许积层, 穆晓东, 马字伟, 胡小飞. 气候变化和人类活动对生态质量影响的定量解析研究: 以海南岛为例. 环境工程, 2024, 42(2): 199-210.
- [34] Pereira L S, Allen R G, Smith M, Raes D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. Agricultural Water Management, 2015, 147: 4-20.
- [35] 柏松, 景连东, 李晖, 冯文兰. 基于水源涵养功能的生态红线划定方法研究. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1665-1670.
- [36] Wang Y F, Ye A Z, Peng D Z, Miao C Y, Di Z H, Gong W. Spatiotemporal variations in water conservation function of the Tibetan Plateau under climate change based on InVEST model. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 41: 101064.
- [37] 胡文敏, 杨睿瀚, 贾冠宇, 殷梓强, 李毅, 沈守云, 李果. 长江流域产水功能对土地利用变化的响应及其驱动因素. 生态学报, 2022, 42(17): 7011-7027.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 王玉琦, 鲍艳, 南素兰. 青藏高原未来气候变化的热动力成因分析. 高原气象, 2019, 38(1): 29-41.
- [41] 陈龙飞, 张万昌, 高会然. 三江源地区 1980—2019 年积雪时空动态特征及其对气候变化的响应. 冰川冻土, 2022, 44(1): 133-146.
- [42] 邵全琴, 刘纪远, 黄麟, 樊江文, 徐新良, 王军邦. 2005—2009 年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估. 地理研究, 2013, 32(9): 1645-1656.
- [43] 曹巍, 刘璐璐, 吴丹, 黄麟. 三江源国家公园生态功能时空分异特征及其重要性辨识. 生态学报, 2019, 39(4): 1361-1374.
- [44] 邵全琴, 刘树超, 宁佳, 刘国波, 杨帆, 张雄一, 牛丽楠, 黄海波, 樊江文, 刘纪远. 2000—2019 年中国重大生态工程生态效益遥感评估. 地理学报, 2022, 77(9): 2133-2153.
- [45] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. 生态学报, 2011, 31(19): 5495-5504.