

2005—2020年甘肃省甘南州水源涵养功能 时空变化及其驱动因素

刘志春, 曹文侠, 王正文, 王世林, 王俊杰, 陈新栋

(甘肃农业大学 草业学院/草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: [目的] 甘肃省甘南州是长江黄河上游重要的水源涵养补给区,也是国家重要的生态安全屏障。研究甘南州水源涵养功能空间分布格局、变化趋势及驱动因素,旨在为区域水资源管理和促进生态系统健康发展提供参考和依据。[方法] 基于 InVEST 模型定量分析 2005—2020 年甘南州水源涵养功能时空变化特征并结合地理探测器模型对其驱动因素展开分析。[结果] ①甘南州多年平均水源涵养深度和涵养总量分别为 25.77 mm、 $9.45 \times 10^8 \text{ m}^3$,空间上整体呈现出南部高北部低,草地和林地水源涵养功能占据主导地位,其水源涵养量分别占水源涵养总量的 65.92% 和 29.43%。②2005—2020 年水源涵养整体呈增长趋势,平均增长幅度为 1.10 mm/a。对于行政区划来说,水源涵养量高值主要分布在玛曲南部、迭部南部和舟曲;对于地形因子来说,其高值主要集中在海拔 3000~4000 m 区间和 $8^\circ \sim 25^\circ$ 坡度区间。③结合地理探测分析,降水量是影响研究区水源涵养时间变化的主要因素,降水量和土地利用是影响研究区水源涵养空间分布的主导因素。[结论] 甘南州水源涵养功能存在明显的时间演变规律和空间分布格局,自然因素(主要是降水量)和人类活动(主要是土地利用)的双重影响是水源涵养功能时空变化的主要因素。

关键词: 甘肃省甘南州; 水源涵养; InVEST 模型; 时空变化; 地理探测器

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)03-0231-10

中图分类号: S154.3

文献参数: 刘志春, 曹文侠, 王正文, 等. 2005—2020 年甘肃省甘南州水源涵养功能时空变化及其驱动因素 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 231-240. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.03.024; Liu Zhichun, Cao Wenxia, Wang Zhengwen, et al. Spatiotemporal variation of water conservation function and its driving factors in Gannan Prefecture of Gansu Province during 2005—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 231-240.

Spatiotemporal Variation of Water Conservation Function and Its Driving Factors in Gannan Prefecture of Gansu Province During 2005—2020

Liu Zhichun, Cao Wenxia, Wang Zhengwen, Wang Shilin, Wang Junjie, Chen Xindong

(College of Pratacultural Science/Key Laboratory of Grassland Ecosystem of Ministry of Education, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: [Objective] Gannan Prefecture, Gansu Province, is an important water source conservation and supply area in the upper reaches of the Yangtze River and Yellow River, and it is also a crucial ecological security barrier of China. The spatial distribution pattern, temporal trend, and driving factors of water source conservation in Gannan Prefecture were studied to provide references and bases for regional water resource management and for promoting the development of healthy ecosystems. [Methods] The spatiotemporal characteristics of water source conservation in Gannan Prefecture from 2005 to 2020 were quantitatively analyzed based on the InVEST model, and an analysis of its driving factors was conducted using the geographic detector model. [Results] ① The average annual water source conservation depth and total conservation volume in Gannan Prefecture were 25.77 mm and $9.45 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. The overall spatial pattern showed higher values in the southern part and lower values in the northern part of the study

收稿日期: 2023-11-07

修回日期: 2023-12-28

资助项目: 国家自然科学基金联合基金项目“青藏高原高寒草甸冷季补饲放牧牦牛的生态系统效应与机理”(U21A20242)

第一作者: 刘志春(1994—), 男(汉族), 甘肃省靖远县人, 硕士研究生, 研究方向为草地生态。Email: 1441715618@qq.com。

通信作者: 曹文侠(1970—), 男(汉族), 甘肃省会宁县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事草地生态与管理等方面的研究。Email: caowx@gsau.edu.cn。

area. Grassland and forestland dominated the water source conservation function, accounting for 65.92% and 29.43%, respectively, of the total water conservation capacity. ② Over the 16-year study period, water source conservation showed an overall increasing trend, with an average growth rate of 1.10 mm/yr. In terms of administrative divisions, areas with high water source conservation values were mainly located in the southern part of Maqu, the southern part of Diebu, and Zhouqu. In terms of topographic factors, high values were mainly concentrated in the elevation range of 3 000—4 000 m and in the slope range of 8°—25°. ③ The geographic detector analysis found that precipitation was the main factor affecting the temporal variation of water source conservation in the study area, while precipitation and land use were the dominant factors influencing the spatial distribution of water source conservation. [Conclusion] Water source conservation in Gannan Prefecture exhibited obvious temporal evolution laws and spatial distribution patterns. The dual influence of natural factors (mainly precipitation) and human activities (mainly land use) was the main driving force affecting spatiotemporal changes in water source conservation.

Keywords: Gannan Prefecture of Gansu Province; water conservation; InVEST model; spatiotemporal changes; geographic detector

水源涵养功能指生态系统在一定时空范围和条件下将水分保持在系统内的过程和能力,是陆地生态系统主要的服务功能之一^[1]。在调节径流、增加降水、抑制蒸发、增强土壤下渗和补充地下水等方面发挥着重要作用^[2]。受气候、地形、土壤性质和土地利用变化等因素的综合影响,区域水源涵养量具有很强的空间分异性和动态复杂性^[3]。因此,科学准确地评估区域水源涵养功能一直是国内外的研究热点。

目前,关于水源涵养估算的方法较多,基于概念模型的水源涵养定量评估方法主要有年径流量法、林冠截留剩余量法、综合蓄水能力法、水量平衡法^[4]等。以上这些方法虽然已经得到广泛应用,但在实际计算时由于受监测站点、观测设备等条件限制,尤其在进行了大区域估算时会产生较大误差。随着人们对水源涵养的深入理解和探讨,以水文循环过程为理论基础,借助遥感(RS)、地理信息系统(GIS)等技术在生态及水文研究领域的广泛应用,如水土评价工具(SWAT)^[5]、生态系统服务和权衡的综合评估模型(InVEST)^[6-7]等为代表的综合评估模型应用而生并被广泛应用。其中,InVEST模型具有模拟准确度高、参数调整灵活、数据易获取、评价结果可空间化表达等优势,已被国内外诸多学者广泛认可并应用,主要围绕研究区产水量、水源涵养量及其时空变化特征等展开研究。如在英国^[8]、美国^[9]、埃塞俄比亚^[10]以及黄河流域^[11]、黄土高原^[12]等多地进行了应用,并取得了良好的模拟效果。在驱动因素研究方面,马靖宣等^[13]将降水量、气温与NDVI作为驱动因素分析其对水源涵养功能时空特征的影响,结果表明,张承地区20 a间水源涵养功能时空特征主要受到降水量与植被型土地利用的控制。Nahib I.等^[14]通过对西塔鲁姆河流域水源涵养影响因子分析研究,指出蒸散

是仅次于降水量对水源涵养量影响最大的因子。涂安国等^[15]应用地理探测器模型得到土地利用类型和降水量为江西东江源区水源涵养空间分布差异的主导因素。地理探测器模型不仅可以反映各因子的驱动解释力,还可以探测因子交互作用的影响。

甘肃省甘南藏族自治州(简称甘南州)是长江、黄河上游重要的水源涵养区和补给区,也是维护地区生态安全的重要屏障,被整体纳入国家生态主体功能区,具有十分重要的生态地位。由于其特殊的地理位置及丰富的植被资源,致使水源涵养成为甘南州最重要的生态系统调节功能之一,但目前针对甘南州水源涵养功能及时空变化特征的研究却少之又少。因此,本研究以甘南州土地利用、降水量、蒸散发等数据为基础,通过InVEST模型产水量模块和地理探测器方法,定量估算甘南州水源涵养功能并进行分析时空变化特征,明确水源涵养变化的关键影响因素,旨在弥补甘南州水源涵养空间制图研究的不足,为科学合理制订地区生态建设与水源涵养保护决策提供参考依据。

1 研究区概况

甘南州地处青藏高原与黄土高原过渡及甘、青、川三省结合部(100°46′—104°44′E, 33°06′—36°10′N),全域东西长360.7 km,南北宽270.9 km,总面积 4.5×10^4 km²。海拔高度1 100~4 900 m,平均在3 000 m以上。地势整体西北高、东南低,呈倾斜状,下辖1市7县(见图1)。气候多为大陆性季节性气候,寒冷潮湿,年平均气温3℃左右,不同地域之间的温度差较大,年平均降水量在400~800 mm之间,主要集中在夏季^[16]。全州水资源丰富,拥有“三江一河”,即黄河、大夏河、洮河和白龙江,分属黄河水系和长江水系两大水系源区,另外还有120多条支干河流,41条重

点河流。其中黄河干流 2 条、洮河 22 条、大夏河 9 条、白龙江 8 条^[17]。全州植被覆盖度在 60% 以上,以草地和林地为主,其中草地面积约 $7.72 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占甘南州总面积的 67.64%;可利用草地面积约 $2.57 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占草地总面积的 95.86%^[18]。

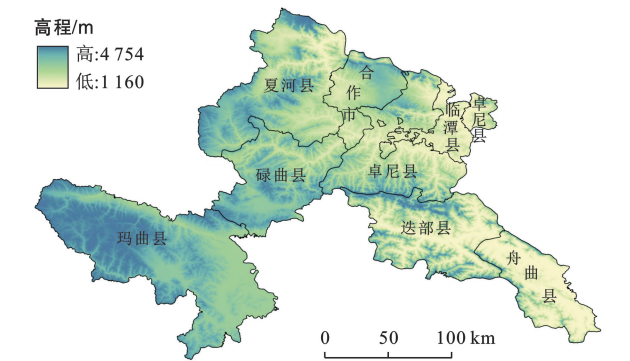


图 1 甘肃省甘南州地形图

Fig.1 Geographic location and elevation distribution of Gannan Prefecture in Gansu Province

2 数据与研究方法

2.1 数据来源及预处理

InVEST 模型产水量模块的输入主要数据包括:土地利用/覆盖类型、年均降水量、年潜在蒸散量、植被可利用含水量、土层深度、生物物理参数表等。进行模型调试、验证水文数据。所需数据及其说明如下。

(1) 土地利用/覆盖类型数据来源于中国年度土地覆盖数据集(<http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809>)。

(2) 年降水量数据来源于国家地球系统科学中心发布的《1901—2022 年中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集》,选取研究区降雨量数据栅格,基于 ArcGIS 10.8 栅格计算器将每一年逐月降水量进行提取,叠加月值数据并处理合成为年值数据,后使用重采样工具将其分辨率提升至 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。

(3) 年潜在蒸散量数据来源于国家地球系统科学中心发布的《1901—2022 年中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集》,选取研究区年潜在蒸散发数据栅格,基于 ArcGIS 10.8 栅格计算器工具将每一年逐月潜在蒸散发进行提取叠加月值数据并处理合成为年值数据,后使用重采样工具将其分辨率提升至 $30 \times 30 \text{ m}$ 。

(4) 土层深度数据来源于国家青藏高原科学数据中心发布的《面向陆面模拟的中国土壤数据集》,基于 ArcGIS 10.8 裁剪、投影最后重采样为 $30 \times 30 \text{ m}$ 分辨率,该数据库还包含土壤砂粒含量、土壤粉粒含量、土壤黏粒含量、土壤有机质含量用于计算植被可利用含水量。

(5) 植被可利用含水量通过式(6)计算得到。

(6) 生物物理参数表是反映每个土地利用/覆被类型或景观类型的相关属性,参考文献[19]和 InVEST模型手册确定(见表 1),包括土地利用类型、地类代码、蒸散系数、植被最大根深、土地利用类型系数 5 个参数。

表 1 InVEST 产水量模型的生物物理参数
Table 1 Biophysical parameters of InVEST water yield model

土地利用类型代码	土地利用类型名称	土地利用类型系数	植被最大根深/mm	蒸散系数 K_c
1	耕地	1	300	0.65
2	林地	1	7 000	1.00
3	灌木	1	5 000	0.80
4	草地	1	1 800	0.75
5	水域	0	0	1.00
6	雪地	1	0	0.00
7	未利用地	0	10	0.40
8	建设用地	0	1	0.30
9	湿地	0	1 000	0.90

2.2 研究方法

2.2.1 产水量计算 InVEST 模型的产水模块(water yield)是一种基于水量平衡原理,即某个栅格单元的降水量减去实际蒸散发的水量^[20]。并且地表水与地下水的相互渗透作用不予考虑。单位面积产水量越多,产水服务越强,其中实际蒸散是根据 Zhang L.等^[21]基于 Budyko 水热耦合平衡假设提出的算法计算得出。计算公式为:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{p_x}\right) \times p_x \tag{1}$$

式中: Y_{xj} 为土地利用类型 j 上栅格单元 x 的产水量(mm); AET_{xj} 为土地利用类型 j 上栅格单元 x 中的实际年均蒸散发量(mm); P_x 为栅格单元 x 的年均降水量(mm)。

$$\frac{AET_x}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_x}{1 + \omega_x R_{xj} + 1/R_x} \tag{2}$$

式中: ω_x 为改进的一个经验参数,代表栅格 x 处植被有效可利用水量与年均降水量的比值; R_{xj} 为土地利用类型 j 上栅格 x 的 Budyko 干燥指数。

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

式中: Z 称为 Zhang 系数,是一个经验常数,反映区域降水季节性特征,取值为 1 到 10 之间,本研究通过反复验证模拟研究区 2005—2020 年产水量,得出最佳 Z 值为 7.2; AWC_x 为植被可利用含水量。

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

式中： k_{xj} 为土地利用类型 j 在栅格单元 x 上的植被蒸散系数； ET_0 为栅格单元 x 上的潜在蒸散发。

$$AWC_x = \min(\max\text{SoilDepth}_x, \text{RootDepth}_x) \times PAWC_x \tag{5}$$

式中： $\max\text{SoilDepth}_x$ 为土壤最大深度(mm)； RootDepth_x 为植物根系深度(mm)； $PAWC_x$ 为土壤中的植被可利用含水率，基于土壤质地和土壤有机质的非线性拟合模型估算，在 InVEST 模型中植被有效含水量的取值范围为 0~1。

$$PAWC_x = 54.509 - 0.132\text{sand} - 0.003(\text{sand})^2 - 0.055\text{silt} - 0.006(\text{silt})^2 - 0.738\text{clay} + 0.007(\text{clay})^2 - 2.688\text{OM} + 0.501(\text{OM})^2 \tag{6}$$

式中： sand 、 silt 、 clay 、 OM 分别为土壤砂粒含量(%)、土壤粉粒含量(%)、土壤黏粒含量(%)、土壤有机质含量(%)。

2.2.2 水源涵养量计算 InVEST 模型主要考虑是土壤层水源涵养量^[22]。所以要基于产水量的计算结果，结合地形指数、土壤饱和导水率、流速系数修正后得到水源涵养量^[23]，具体计算公式为：

$$\text{Retention} = \min\left(1, \frac{249}{\text{velocity}}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times \text{TI}}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{\text{sat}}}{300}\right) \times Y_{xj} \tag{7}$$

$$\text{TI} = \lg\left(\frac{\text{Drainage_area}}{\text{Soil_depth} \times \text{Percent_slope}}\right) \tag{8}$$

式中： Retention 为水源涵养量(mm)； velocity 为流速系数； K_{sat} 为土壤饱和导水率(cm/d)； TI 为地形指数； Drainage_area 为集水区栅格数据； Soil_depth 为土层深度(mm)； Percent_slope 为百分比坡度。

2.3 驱动因素分析

由于地形和土层深度等因素随时间变化较小，因此本文主要研究选取气候变化要素降雨量和综合气候要素潜在蒸散对于水源涵养时间变化的影响。使用地理探测器中因子探测和交互作用探测两个模块来分析水源涵养空间变化的主要驱动因素，通过因子探测得到自变量对因变量的解释力 q 值，结果取值区间为[0,1]， q 值越大表示其解释力越强，反之则越弱；通过交互作用探测得到两个单一自变量交互作用后的解释力^[24]。计算式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \tag{9}$$

式中： h 为影响因子的分层状况， h 取值 1,2... L ； N_h 和 σ_h^2 表示为第 h 层的样本数和方差； N 和 σ^2 是总样本量和方差。

本文将水源涵养量作为因变量，结合数据可获取

性，选取年降水量(x_1)，潜在蒸散发(x_2)，高程(x_3)，坡度(x_4)，NDVI(x_5)，土地利用(x_6)，土层深度(x_7)作为自变量，并将各影响因子空间分布进行网格化统计和离散化处理。

2.4 模型验证

本研究根据 2005—2020 年《甘肃省水资源公报》中甘南州水资源统计量，对模型产水量的模拟结果进行反复验证。当 Z 值取 7.2 时(见表 2)，所模拟的产水量相对误差均小于 16%，表明 InVEST 模型产水量模拟效果良好，可用于后续水源涵养量的计算。

表 2 InVEST 模型产水量结果精度检验

Table 2 Accuracy test of water yield results of InVEST model

年份	模拟产水深度/mm	实际产水深度/mm	相对误差/%
2005	281.26	301.60	7.23
2010	225.02	191.00	15.12
2015	150.51	165.20	9.76
2020	422.51	388.40	8.07

3 结果与分析

3.1 水源涵养功能空间分布特征

作为水源涵养功能的量化指标，水源涵养深度能够很好表征单位面积上水源涵养量的大小，进而反映不同地区水源涵养功能的强弱^[25]。根据产水量结果、地形指数等参数计算得到研究区 2005—2020 年平均水源涵养深度为 25.77 mm，水源涵养总量为 $9.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。不同时间水源涵养深度的空间分布存在明显差异，整体呈现南部高北部低的特点(图 2)，这与降水量的空间分布格局基本一致，水源涵养量高值主要分布在玛曲南部、迭部南部和舟曲，低值主要集中分布在甘南州北部。由于各县级行政区面积、植被分布等差异较大，其水源涵养深度和水源涵养总量同样具有一定的差异，迭部县平均水源涵养深度 31.00 mm 为全州最高；但水源涵养量最大为玛曲县，达 $2.77 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占全州水源涵养总量的 29.31%(见图 3)。

3.2 水源涵养功能时间变化趋势

由图 4 可见，16 a 来甘南州水源涵养功能在波动变化中提高，将数据按照间隔 4 a 为一段进行分析，水源涵养功能呈现出先减小后增加的变化趋势。其中，2005 年平均水源涵养深度和涵养总量分别为 27.65 mm， $10.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；2010 年平均水源涵养深度和涵养总量分别为 22.16 mm， $8.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；2015 年平均水源涵养深度和涵养总量分别为 14.58 mm， $5.35 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；2020 年平均水源涵养深度和涵养总量

分别为 44.18 mm, $16.20 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。近 16 a 来,年平均水源涵养深度变化幅度较大,结果显示波动幅度为 -19.86% , -24.21% , 203.02% 。2016—2017 年期间水源涵养深度增加幅度最大,由 18.50 mm 增长到 28.91 mm,增幅为 56.27% ;2014—2015 年水源涵养

深度减少幅度最大,由 26.41 mm 减少到 14.58 mm,降幅为 44.79% 。产水量的变化与分布直接影响着区域的水源涵养量,且与产水量的变化趋势一致。2020 年相较 2005 年,不同区域的水源涵养深度均有不同程度的提高,平均增长幅度为 1.10 mm/a 。

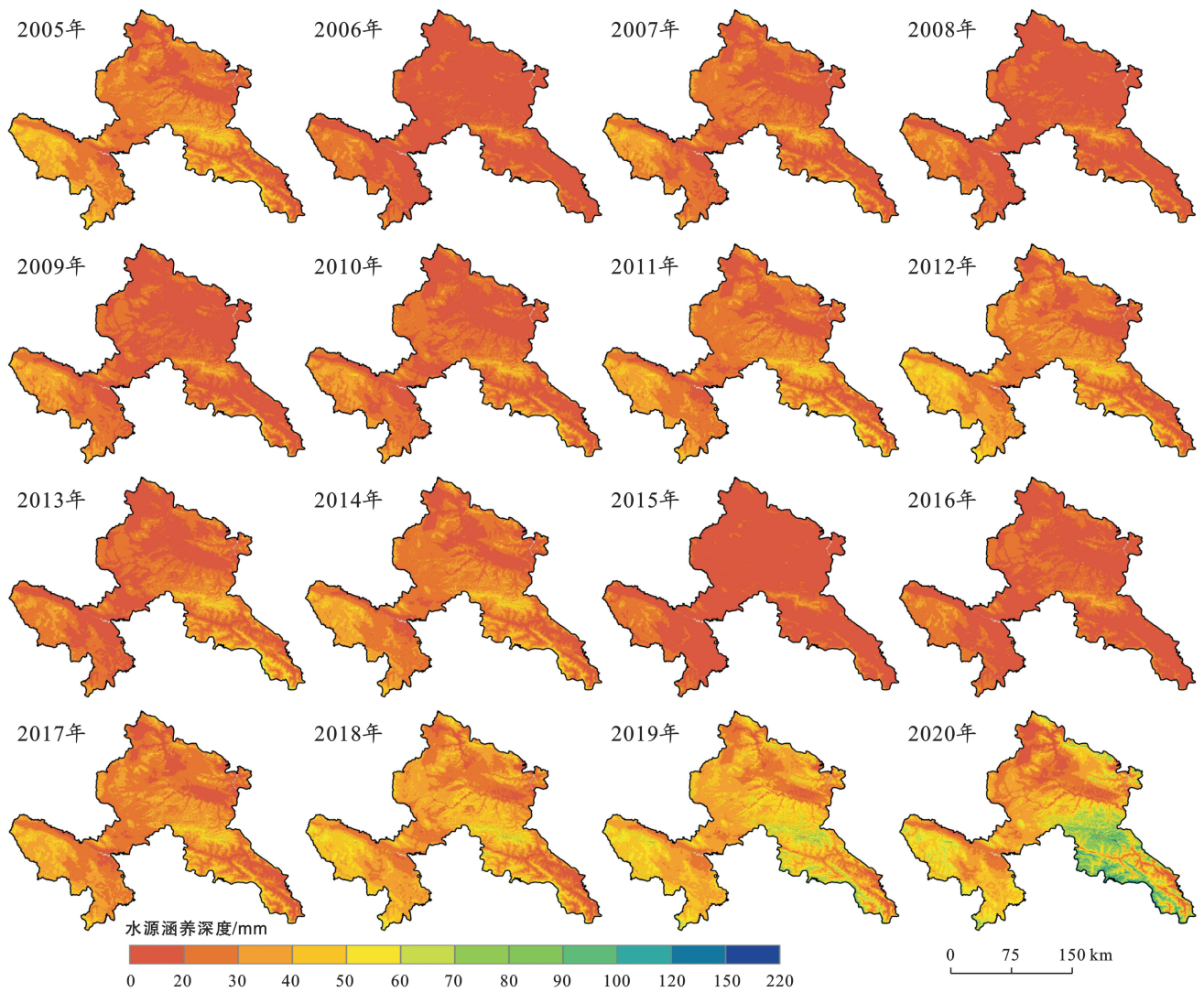


图 2 2005—2020 年甘肃省甘南州水源涵养深度空间分布

Fig.2 Spatial distribution of water conservation depth in Gannan Prefecture of Gansu Province from 2005 to 2020

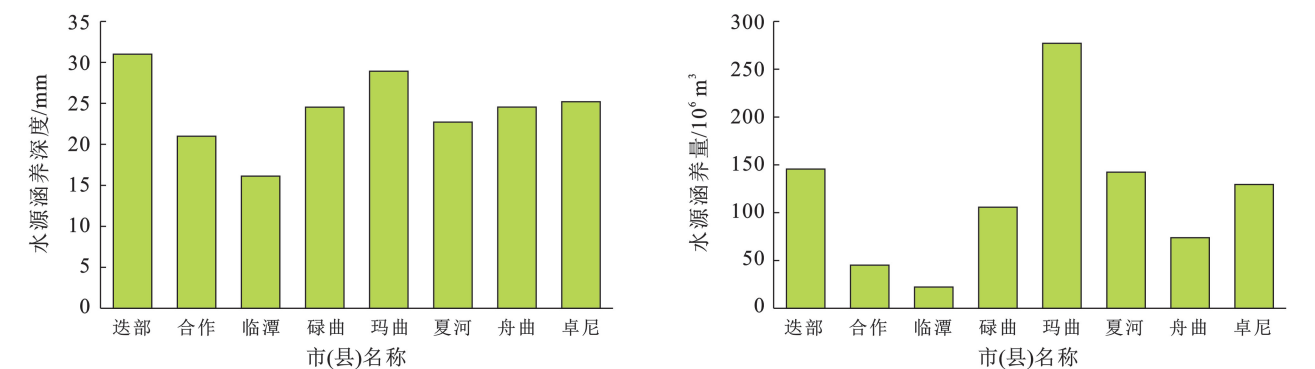


图 3 2005—2020 年甘肃省甘南州各市县水源涵养深度和水源涵养量

Fig.3 Water conservation depth and water conservation capacity of cities/counties in Gannan Prefecture, Gansu Province from 2005 to 2020

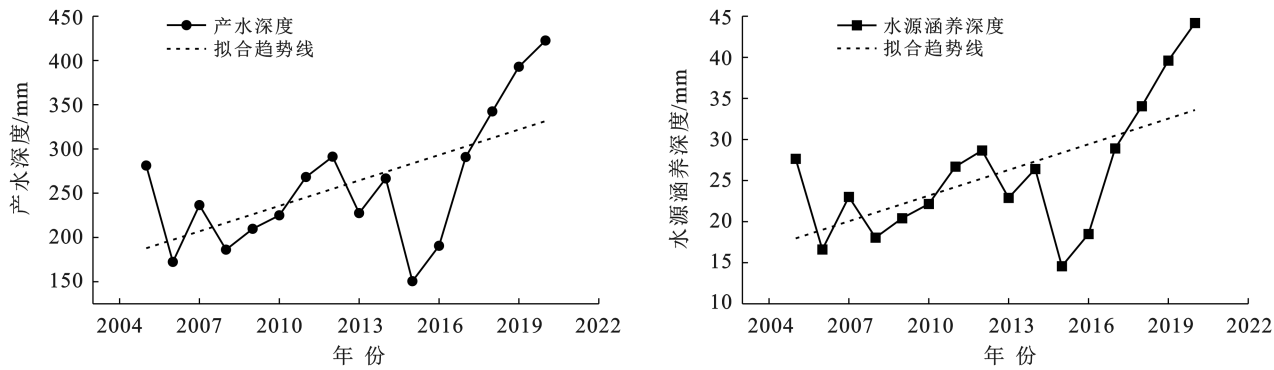


图 4 甘肃省甘南州多年平均产水深度和水源涵养深度变化

Fig.4 Variations in multi-year average water yield depth and water conservation depth in Gannan Prefecture, Gansu Province

3.3 不同土地利用水源涵养功能

从水源涵养深度来看,多年来在生态系统中呈现:灌木林>林地>草地>雪地>未利用地>湿地>建设用地>耕地>水域(表 3),表明单位面积灌木林的水源涵养功能最强,水域水源涵养功能最弱。耕地的水源涵养能力低于建设用地,是因为耕地根系浅,截留能力较弱,并且作物的生长也会消耗一定的水分^[26],受到降水量影响湿地在 2010,2015 年水源涵

养能力几乎为零。16 a 来,主要生态系统草地和林地水源涵养深度最高值分别为 37.75 和 66.67 mm,均出现在 2020 年,直接原因是 2020 年降水量最大。由于受不同土地利用类型面积差异较大的影响,水源涵养总量在不同土地利用类型之间也存在较大差异,草地和林地的水源涵养量显著大于其他土地利用类型的水源涵养量,对水源涵养总量贡献率分别为 65.92%和 29.43%。

表 3 2005—2020 年甘肃省甘南州不同土地利用类型的水源涵养功能

土地利用类型		水源涵养深度/mm				水源涵养量/($\times 10^6\text{ m}^3$)			
		2005	2010	2015	2020	2005	2010	2015	2020
耕地		6.56	5.78	4.25	8.80	7.50	6.87	4.15	8.75
林地		31.96	25.70	15.04	66.67	260.79	236.06	126.11	569.35
灌木林		41.07	32.92	22.10	59.85	42.90	40.95	21.68	52.47
草地		26.76	21.32	14.58	37.75	697.88	615.08	380.24	977.82
水域		2.14	0.67	0.19	2.69	0.11	0.04	0.01	0.16
雪地		27.66	25.38	22.02	42.27	0.03	0.06	0.04	0.08
未利用地		20.01	17.38	13.94	31.27	0.37	0.24	0.31	1.75
建设用地		7.50	6.68	4.54	9.75	0.04	0.04	0.03	0.07
湿地		13.95	0.08	0.00	38.27	0.30	0.00	0.00	3.27

3.4 不同海拔、坡度水源涵养功能分布格局

为进一步探究主要地形因子的水源涵养功能分布情况,将海拔、坡度与水源涵养进行叠加分析,得到不同海拔、坡度多年平均水源涵功能分布情况(图 5)。对于海拔而言,水源涵养深度随海拔上升而逐步增加,水源涵养量大致以海拔 4 000 m 为界呈现先增后减的趋势。其中,海拔 3 000 m 以下区段水涵养量增长较快;3 000~4 000 m 区段增长较为平缓,4 000 m 以上区段快速下降。整体来看水源涵养量主要集中在 3 000~4 000 m 区段,占水源涵养总量的

73.72%,其主要原因是该区段面积占总面积的 72.02%且草地等丰富的植被资源主要分布在该区段^[27]。对于不同坡度而言,平均水源涵养深度以 35°为界呈先增后减的趋势。其中,25°以下坡段逐步增加,25°~35°坡段增长放缓,35°以上坡段开始下降。水源涵养量随坡度增加出现先减少后增加再减少的变化趋势,水源涵养量主要集中在 8°~25°坡度区间,主要原因是该区间面积占总面积的 52.94%且这种变化趋势与林地、草地占比随坡度增大先增加后减少基本一致。

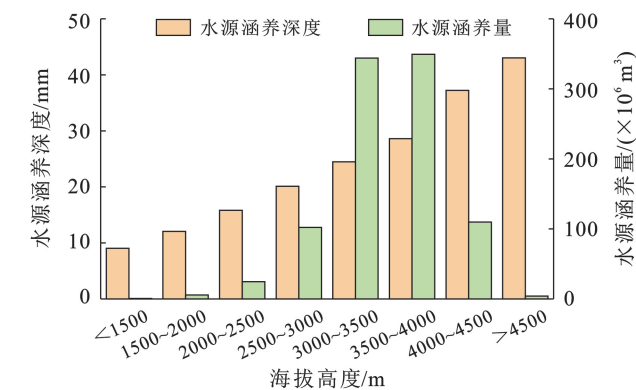


图5 2005—2020年甘肃省甘南州不同地形上年平均水源涵深度和水源涵养量

Fig.5 Average annual water conservation depth and water conservation capacity of different terrains in Gannan Prefecture of Gansu Province from 2005 to 2020

3.5 时空变化驱动因素分析

由于土地利用类型和地形因子随时间变化较小,因此影响水源涵养量的时间变化因子主要有降雨量和潜在蒸散发。由图6—7可知,降水量对水源涵养功能变化的影响呈显著正相关,而潜在蒸散发对水源涵养功能变化的影响呈负相关,结合相关系数可知,降雨量是影响生态系统水源涵养功能时间变化的主要影响因素。应用地理探测器因子探测分析得到各影响因素对水源涵养空间分布影响的解释力 q 值(见表4)。结果表明各影响因素对水源涵养解释力大小依次为降水量、土地利用、土层深度、潜在蒸散发、坡度、归一化植被指数(NDVI)、高程。其中降水量的解释力最大,说明降水量是研究区内影响水源涵养空间分布的主导因素。

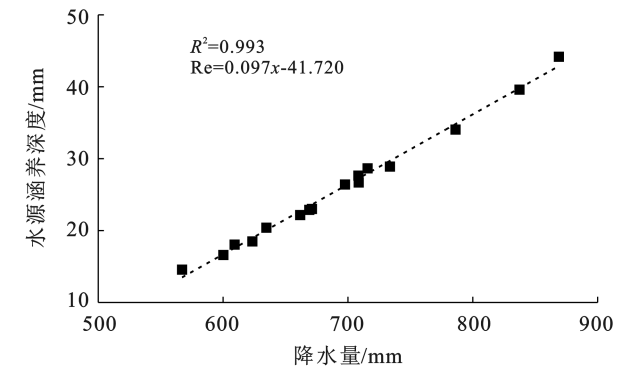
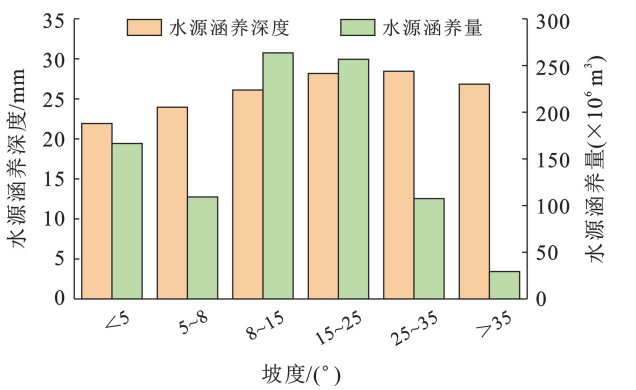


图6 甘肃省甘南州降水量和水源涵养深度的关系

Fig.6 Relationship between precipitation and water conservation depth in Gannan Prefecture of Gansu Province

在交互作用方面,任意两个因子交互作用后对水源涵养空间分布的解释力均超过单因子的解释力,说明因子交互后对水源涵养空间分布具有促进作用。其中,降水量与土地利用因子的交互作用解释能力最强,对水源涵养空间分布的解释力是土地利用单因子



的2.18倍,说明两者的交互作用是影响水源涵养空间分布的最主要因素;降水量与海拔因子交互作用解释力差异最大,交互作用是海拔单因子作用的14.38倍,说明在海拔相同地区,由于降水量的不同,会导致水源涵养产生较大差异,这也是导致甘南州在南北水源涵养空间分布差异较大的主要原因。

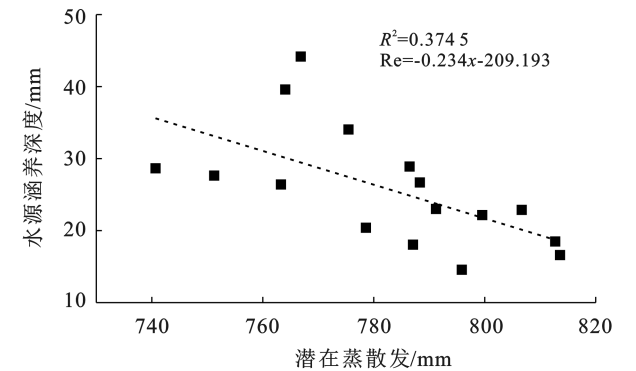


图7 甘肃省甘南州潜在蒸散发和水源涵养深度的关系

Fig.7 Relationship between potential evapotranspiration and water conservation depth in Gannan Prefecture of Gansu Province

4 讨论

本文基于InVEST模型得到模拟产水量与《甘肃省水资源公报》的实测年地表径流量进行对比验证,显示模拟结果相对误差在16%以内,16a来研究区产水量整体呈增加的变化趋势以及由南向北低递减的空间分布格局与刘陈立^[19]研究结果相似,基于此本文进一步估算分析2005—2020年甘南州水源涵养功能时空变化趋势及驱动因素。结果表明,16a来甘南州水源涵养功能在波动变化中提高。同时相关研究^[28]表明甘南州近年来植被覆盖度与年均降水量总体都呈上升趋势,各市县积极开展林业等生态工程建设,结果也显示水源涵养功能整体呈增长趋势。在时间尺度上,选取气候变化要素降水量和综合气候

要素潜在蒸散发对于水源涵养变化的影响,通过对水源涵养功能变化所呈现的相关性及结合相关系数可得知,降水量是影响水源涵养时间变化的主要因素。在空间尺度上,水源涵养量与降水量的分布十分相似,通过进一步对不同海拔、坡度水源涵养分析,得到水源涵养量高值主要集中在较高海拔及坡度地区,其主要原因是研究区较高海拔和坡度区间面积分布较大,且海拔较高的地区降水量大、蒸散发小,致使水源涵养能力较强,这与李霞等^[29]在柴达木盆地和柳冬青等^[30]在白龙江流域得到的研究结果一致。应用地理探测器分析得到各影响因素中对水源涵养解释

力最大的为降水量,其次为土地利用。在因子交互作用中也得到降水量与土地利用因子的交互作用解释能力最强,是土地利用单因子解释力的 2.18 倍,并且降水量与海拔因子交互作用解释力差异最大,高出海拔单因子解释力 13.38 倍,这与韩念龙等^[31]在海南岛进行地理探测的研究结果基本吻合。这说明水源涵养空间变化主要受降水量和土地利用的影响,这一结论在李怡颖等^[32]的研究中也得到了证明。其主要原因是降水量是涵养水源的直接来源,而土地利用则需要通过改变下垫面的结构、类型进而影响水源涵养过程。

表 4 2005—2020 年甘肃省甘南州水源涵养功能时空变化各驱动因子及交互探测结果
Table 4 Driving factors and interactive detection results of spatio-temporal changes of water conservation function in Gannan Prefecture of Gansu Province from 2005 to 2020

项目	q 值						
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
x_1	0.66 *						
x_2	0.70 **	0.18					
x_3	0.72 **	0.29 *	0.05				
x_4	0.70 **	0.35 *	0.31 *	0.16 **			
x_5	0.71 **	0.36 *	0.08	0.08 *	0.11		
x_6	0.87 ***	0.69 **	0.63 **	0.43 ***	0.42 **	0.40 **	
x_7	0.73 **	0.51 **	0.39 *	0.43 ***	0.40	0.62 **	0.31

注:① x_1 为降水量, x_2 为潜在蒸散发, x_3 为高程, x_4 为坡度, x_5 为归一化植被指数, x_6 为土地利用, x_7 为土层深度;置信区间:② * * * 表示显著性水平为 99%,* * 表示显著性水平为 95%,* 表示显著性水平为 90%。

通过空间制图明晰甘南州水源涵养功能空间分布及多年变化特征,为生态系统水源涵养重点区域提供划定依据,如:舟曲县、迭部县南部、玛曲县南部降雨充沛且植被覆盖度高的山林区水源涵养量相对较高,这些区域可考虑作为生态系统水源涵养重点功能区不断纵深推进,提升水源涵养区建设质量,以维持较高生态系统水源涵养功能稳定性。而草地作为甘南州最主要的土地利用类型,对水源涵养总量贡献率达 65.92%,水源涵养功能地位突出,是甘南州持续生态治理改善措施首选的土地利用类型,其次是林地,应继续实施天然林保护和退耕还林还草工程,积极开展人工造林和加强育林护林工作。尤其是在分布植被覆盖度较低、草地退化严重和人类活动较强的北部地区。

InVEST 模型基于水量平衡原理,简化了产水量及水源涵养量的估算过程,能够基本反映区域水源涵养功能时空分布格局。但本研究中输入到 InVEST 模型产水模块的潜在蒸散量、土层深度等数据来源于国家地球系统科学中心、世界土壤数据库,缺少实测数据支撑,在一定程度上会影响模型的模拟精度。此外模型自身局限性和数据精度等因素也会影响计算结果的准确性。如:估算结果是以年为单位的水源涵

养均值,没有考虑极端情况和水源涵养在季尺度、月尺度或者天尺度的变化;仅侧重于自然因素对水源涵养功能的影响,忽略了放牧等人为因素或政策影响等社会经济因素的影响。未来还需加强这方面研究。

5 结论

本研究基于 InVEST 模型,结合土地利用、降水等数据得到 2005—2020 年甘南州水源涵养模拟结果,并分析时空变化特征及主要影响因素,得出以下结论:

- (1) 研究区多年平均水源涵养深度和涵养总量分别为 25.77 mm、 $9.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。各地类中,草地和林地水源涵养量占据主导地位,多年平均水源涵养量占水源涵养总量的 65.92%和 29.43%。
- (2) 2005—2020 年水源涵养整体呈增加趋势,平均增长幅度为 1.10 mm/a。对于行政区划来说,水源涵养量高值主要分布在玛曲南部、迭部南部和舟曲;对于地形因子来说,其高值主要集中在海拔 3 000~4 000 m 区间和 8°~25°坡度区间。
- (3) 降水量是影响水源涵养量时间变化的主要因素;降水量和土地利用是影响水源涵养空间变化的

主导因素。说明是气候作用和人类活动共同主导了甘南州水源涵养时空分布格局。

参考文献(References)

- [1] 赵士洞,张永民.生态系统与人类福祉:千年生态系统评估的成就、贡献和展望[J].地球科学进展,2006,21(9):895-902.
Zhao Shidong, Zhang Yongmin. Ecosystems and human well-being: The achievements, contributions and prospects of the millennium ecosystem assessment [J]. *Advances in Earth Science*, 2006,21(9):895-902.
- [2] 刘征,赵旭阳.河北省水源涵养生态功能保护区划分研究[J].水土保持通报,2008,28(2):180-183.
Liu Zheng, Zhao Xuyang. Classification of protected ecological function area for water conservation in Hebei Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008,28(2):180-183.
- [3] 黄蓉,张建梅,林依雪,等.新安江上游流域径流变化特征与归因分析[J].自然资源学报,2019,34(8):1771-1781.
Huang Rong, Zhang Jianmei, Lin Yixue, et al. Variation of streamflow and its drivers in Xin'an River basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019,34(8):1771-1781.
- [4] 涂安国,莫明浩,李英,等.2000—2014年江西东江源区水源涵养量时空变化[J].山地学报,2022,40(5):694-703.
Tu Anguo, Mo Minghao, Li Ying, LI Qing, et al. Spatio-temporal variation of water conservation in the source area of the Dongjiang River in Jiangxi Province from 2000 to 2014 [J]. *Mountain Research*, 2022,40(5):694-703.
- [5] Abouabdillah A, White M, Arnold J G, et al. Evaluation of soil and water conservation measures in a semi-arid river basin in Tunisia using SWAT [J]. *Soil Use and Management*, 2014,30(4):539-549.
- [6] Li Mingyue, Liang Dong, Xia Jun, et al. Evaluation of water conservation function of Danjiang River basin in Qinling Mountains, China based on InVEST model [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286: 112212.
- [7] Benra F, De Frutos A, Gaglio M, et al. Mapping water ecosystem services: Evaluating InVEST model predictions in data scarce regions [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021,138:104982.
- [8] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale [J]. *The Science of the Total Environment*, 2016,569/570:1418-1426.
- [9] Hamel P, Guswa A J. Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: Case study of the Cape Fear Basin, North Carolina [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015,19(2):839-853.
- [10] Aneseyee A B, Soromessa T, Elias E, et al. Evaluation of water provision ecosystem services associated with land use/cover and climate variability in the Winike watershed, Omo Gibe basin of Ethiopia [J]. *Environmental Management*, 2022,69(2):367-383.
- [11] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J].应用生态学报,2020,31(8):2731-2739.
Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River basin based on InVEST model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020,31(8):2731-2739.
- [12] 刘宥延,刘兴元,张博,等.基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J].生态学报,2020,40(17):6161-6170.
Liu Youyan, Liu Xingyuan, Zhang Bo, et al. Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the loess plateau based on InVEST model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(17):6161-6170.
- [13] 马靖宣,金晓媚,张绪财,等.基于 InVEST 模型的张承地区水源涵养功能时空变化特征[J].水文地质工程地质,2023,50(3):54-64.
Ma Jingxuan, Jin Xiaomei, Zhang Xucai, et al. Spatio-temporal change characteristics of water conservation function in the Zhang-Cheng district based on the InVEST model [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023,50(3):54-64.
- [14] Nahib I, Ambarwulan W, Rahadiati A, et al. Assessment of the impacts of climate and LULC changes on the water yield in the Citarum River basin, West Java Province, Indonesia [J]. *Sustainability*, 2021,13(7):3919.
- [15] 涂安国,莫明浩,李英,等.2000—2014年江西东江源区水源涵养量时空变化[J].山地学报,2022,40(5):694-703.
Tu Anguo, Mo Minghao, Li Ying, et al. Spatio-temporal variation of water conservation in the source area of the Dongjiang River in Jiangxi Province of China from 2000 to 2014 [J]. *Mountain Research*, 2022,40(5):694-703.
- [16] 李鑫鹏,王朝平,邹松兵,等.基于层次分析法的黄河上游水源涵养区生态系统恢复力评价:以甘南州、临夏州为例[J].中国沙漠,2022,42(6):85-93.
Li Xinpeng, Wang Chaoping, Zou Songbing, et al. Evaluation on ecological resilience in water conservation area in the upper Yellow River based on AHP: A case study of the Gannan and Linxia Region [J]. *Journal of Desert Research*, 2022,42(6):85-93.
- [17] 赵梅.甘南州主要河流地表径流演变趋势研究[J].地下

- 水, 2018, 40(4): 208-212.
- Zhao Mei. Study on evolution trend of surface runoff of main rivers in Gannan Prefecture [J]. *Ground Water*, 2018, 40(4): 208-212.
- [18] 刘洁, 孟宝平, 葛静, 等. 基于 CASA 模型和 MODIS 数据的甘南草地 NPP 时空动态变化研究[J]. *草业学报*, 2019, 28(6): 19-32.
- Liu Jie, Meng Baoping, Ge Jing, et al. Spatio-temporal dynamic changes of grassland NPP in Gannan prefecture, as determined by the CASA model [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(6): 19-32.
- [19] 刘陈立. 基于生态系统健康—风险—服务的甘南高寒牧区生态安全评价[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2022.
- Liu Chenli. Integrating ecosystem health, ecological risk and ecosystem services to assess ecological security in Gannan alpine pastoral region, China [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2022.
- [20] 张灿强, 李文华, 张彪, 等. 基于 InVEST 模型的西苕溪流域产水量分析(英文)[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(1): 50-54.
- Zhang Canqiang, Li Wenhua, Zhang Biao, et al. Water yield of Xitiaoxi River basin based on InVEST modeling [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(1): 50-54.
- [21] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [22] Su Changhong, Fu Bojie. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 101: 119-128.
- [23] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 664-676.
- Bao Yubin, Li Ting, Liu Hui, et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in Northern Shaanxi Province by InVEST model [J]. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 664-676.
- [24] 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.
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [25] 王云飞, 叶爱中, 乔飞, 等. 水源涵养内涵及估算方法综述[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(6): 1041-1071.
- Wang Yunfei, Ye Aizhong, Qiao Fei, et al. Review on connotation and estimation method of water conservation [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(6): 1041-1071.
- [26] 康紫薇. 基于 InVEST 模型的玛纳斯河流域生态系统服务功能研究[D]. 新疆 石河子: 石河子大学, 2022.
- Kang Ziwei. Research on ecosystem service function of Manas River basin based on InVEST model [D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2022.
- [27] 张娅娅. 甘南高寒草甸植物群落物种多度分布格局的海拔效应[D]. 甘肃 兰州: 西北师范大学, 2021.
- Zhang Yaya. Altitude effect of species abundance distribution pattern of plant community in alpine meadow of Gannan, China [D]. Lanzhou, Gansu: Northwest Normal University, 2021.
- [28] 杨旻, 翟俊, 金点点, 等. 黄河上游甘南地区生态保护协同管控成效评估[J]. *环境影响评价*, 2021, 43(3): 1-6.
- Yang Min, Zhai Jun, Jin Diandian, et al. Evaluation on the effectiveness of ecological protection and coordinated management in Gannan Region of the upper reaches of the Yellow River [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2021, 43(3): 1-6.
- [29] 李霞, 崔霞, 何晓菲, 等. 柴达木盆地水源涵养功能时空特征分析[J]. *草业科学*, 2022, 39(4): 660-671.
- Li Xia, Cui Xia, He Xiaofei, et al. Analyses of spatial and temporal characteristics of water conservation function in Qaidam Basin [J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(4): 660-671.
- [30] 柳冬青, 曹二佳, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域水源涵养服务时空格局及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(7): 1728-1743.
- Liu Dongqing, Cao Erjia, Zhang Jinxi, et al. Spatio-temporal pattern of water conservation and its influencing factors in Bailongjiang Watershed of Gansu [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(7): 1728-1743.
- [31] 韩念龙, 刘子荣, 贾培宏, 等. 1996—2020 年海南岛水源涵养量时空变化及地理探测[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 193-201.
- Han Nianlong, Liu Zirong, Jia Peihong, et al. Spatio-temporal changes and geographic detection of water conservation on Hainan Island from 1996 to 2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 193-201.
- [32] 李怡颖, 范继辉, 廖莹. 基于 InVEST 模型的张家口市水源涵养功能时空差异分析[J]. *草业科学*, 2020, 37(7): 1313-1324.
- Li Yiyang, Fan Jihui, Liao Ying. Analysis of spatial and temporal differences in water conservation function in Zhangjiakou based on the InVEST model [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(7): 1313-1324.