

甘肃省水源涵养功能时空变化及其影响因素

尚婷婷¹, 张亚群¹, 任衍淦²

(1.甘肃省生态环境科学设计研究院, 甘肃 兰州 730020; 2.兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: [目的] 探究甘肃省水源涵养服务功能的时空变化特征及其影响因素, 为区域水资源管理决策和水源涵养功能恢复提供参考和依据。[方法] 基于 InVEST 模型对甘肃省 2001—2023 年水源涵养量时空动态变化状况开展定量评估, 并运用地理探测器分析甘肃省水源涵养服务功能的影响因素。[结果] ①2001—2023 年甘肃省平均水源涵养量 9.24 mm, 不同时期水源涵养量波动较小, 与降水量和产水量变化趋势一致, 均呈现先上升后下降趋势。②2001—2023 年甘肃省不同土地利用类型平均水源涵养能力排序为: 耕地>草地>林地>城镇建设用地>未利用地>水域。③降水量是影响甘肃省水源涵养量变化的最主要因素。降水量与蒸散发量、降水量与土地利用类型, 降水量与高程间交互作用对甘肃省水源涵养服务功能空间分异影响最为显著。[结论] 甘肃省水源涵养量整体上呈现西北低东南高的分布格局, 水源涵养功能变化的主要影响因素是气候和人类活动。

关键词: 水源涵养功能; InVEST 模型; 地理探测器; 甘肃省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0237-11

中图分类号: X171, X143

文献参数: 尚婷婷, 张亚群, 任衍淦. 甘肃省水源涵养功能时空变化及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 237-247. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.025; Shang Tingting, Zhang Yaqun, Ren Yangan. Spatiotemporal variation and factors affecting water conservation function in Gansu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 237-247.

Spatiotemporal Variation and Factors Affecting Water Conservation Function in Gansu Province

Shang Tingting¹, Zhang Yaqun¹, Ren Yangan²

(1. Gansu Academy Eco-environment Science, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. College of Earth and Environment, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial variation characteristics and the factors affecting the water conservation function in Gansu Province were studied to provide a reference and basis for regional water resources management decision-making and water conservation function recovery. [Methods] The dynamic changes in water conservation on the temporal and spatial scale in Gansu Province from 2001 to 2023 were evaluated quantitatively using the InVEST model, and the influencing factors of the water conservation function were analyzed using the geographic detector. [Results] ① The average water conservation in Gansu Province from 2001 to 2023 was 9.24 mm, and the water conservation fluctuated little during different periods. The change in water conservation was consistent with the precipitation and water yield, showing an upward and then a downward trend. ② From 2001 to 2023, the average water conservation capacity of different land use types in Gansu Province was ranked as cultivated, grass, forest, urban construction, unused land, and water area. ③ Precipitation was the most important driver for the change of water conservation in Gansu Province, and the interactions between precipitation and evapotranspiration, land use type, and elevation had the most significant influence on the spatial difference of the water conservation service function in Gansu Province. [Conclusion] The overall distribution pattern of water conservation in the Gansu Province was lower in the northwest and higher in the southeast. The change in water conservation

function was mainly influenced by climate factors and human activities.

Keywords: water conservation function; InVEST model; geographic detector; Gansu Province

水源涵养服务功能作为生态系统服务功能重要的组成部分,对水资源的再生利用有决定性影响,其功能主要表现为拦蓄降水、调节径流、影响降水量、净化水质等方面,可改善区域水文状况、调节水分循环^[1-2]。随着技术的发展,定量化和空间可视化评估已成为生态系统水源涵养服务评价的最新趋势和水资源管理决策的重要需求^[3-4]。目前常用的量化、空间可视化的水源涵养评估模型有 SWAT 模型, Terrainlab 模型和 InVEST 模型等^[5-6]。其中, InVEST 模型因其模型参数、特性数据要求较低、同时延展性较好等优势,已被国内外学者应用于美国俄勒冈州西北部的图拉丁河流域^[4], 阿根廷南部丘布特河流域^[7], 岷江上游^[8], 白龙江流域^[3], 黄河流域^[9], 三江源区^[10] 以及辽宁省^[11] 和安徽省^[12] 等区域水源涵养服务的研究中,并取得了较好的应用成果。

甘肃省地处中国内陆, 分属长江、黄河、内陆河三大流域, 在承担全国主要江河源头水源补给、水源涵养、防风固沙和生物多样性保护等重要生态功能方面发挥着不可替代的作用^[13]。它是国家西部重要的生态安全屏障, 是气候和生态环境变化的敏感脆弱地区, 对国内水文循环系统维持具有重要影响意义。据统计, 甘肃省多年平均降水量远低于全国平均水平, 大部分地区的年降水量不足 400 mm, 仅为全国降水量的 43% 左右; 多年平均自产水资源量为 $2.71 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 人均水资源量是全国平均水平的 1/2。水资源在区域和时空分布上均存在显著的不均匀性, 70% 的国土面积为干旱半干旱地区, 这些地区年降水量较少, 水资源匮乏, 尤其是河西走廊地区。同时, 降水季节分配不均, 主要集中在 7—9 月, 这使得水资源在时间上难以均衡利用。其次, 由于甘肃省地质构造复杂, 部

分地区土壤疏松, 抗蚀能力弱, 容易在降雨和径流作用下发生侵蚀, 导致水源涵养功能下降。此外, 受工农业生产、矿山开采、城镇化等人类活动的影响, 水资源过度开发, 部分河流水生态环境呈现恶化趋势, 这不仅降低了水质, 还影响了水源的可持续利用和水源涵养功能的发挥。目前还未有学者对甘肃省的水源涵养功能的开展整体区域性研究, 大部分学者研究对象重点集中于单个流域、涵养林、天然林的水源涵养功能的研究^[8,14-17], 缺乏系统性的研究。

因此, 本研究以 2001—2023 年气象、土壤、土地利用等为数据源, 将研究期划分为 5 个时期: 第 1 时期为 2001—2005 年, 第 2 时期为 2006—2010 年, 第 3 时期为 2011—2015 年, 第 4 时期为 2016—2020 年, 第 5 个时期为 2021—2023 年, 利用 InVEST 模型量化甘肃省水源涵养服务能力, 并运用地理探测器对水源涵养服务功能变化进行影响因素探究, 以期掌握甘肃省水源涵养功能时空特征, 可为区域水资源管理决策和水源涵养功能恢复提供重要参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘肃省地处黄河上游, 位于黄土高原、青藏高原和内蒙古高原三大高原的交汇地带, 地形狭长, 地貌复杂多样, 地势自西南向东北倾斜^[13] (图 1)。省内气候类型多样, 从南向北包括亚热带季风气候、温带季风气候、温带大陆性干旱气候和高原山地气候四大类型^[18]。年平均气温范围在 0~15℃, 大部分地区气候干燥, 年平均降水量在 40~750 mm 之间。全省的土地利用结构在空间上存在明显的区域差异, 东部以农用地为主导, 西部以林地为主导, 荒漠化和沙化土地为主。

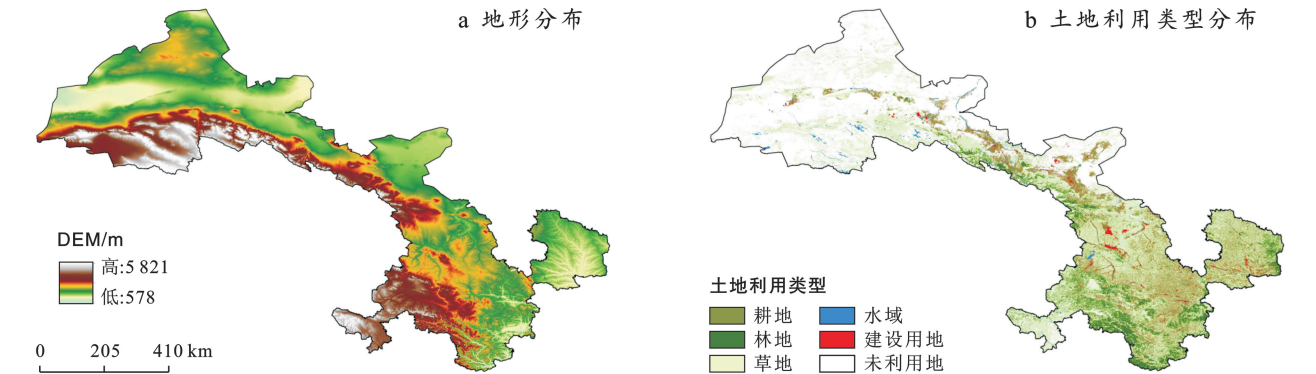


图 1 甘肃省地形及土地利用类型分布

Fig.1 Distribution of topography and land use types in Gansu Province

1.2 产水量计算

InVEST 模型是由斯坦福大学环境研究所、世界自然保护基金会等联合开发的生态系统服务评估与权衡模型,模型产水模块 Water Yield 基于 Budyko 水热耦合平衡假设,模型以年为时间尺度,估算每个栅格单元上的降水量减去实际蒸散发量即水源供给量,首先确定每个栅格单元的年均产水量 Y_x ,公式为:

$$Y_x = (1 - \frac{AET_x}{P_x}) \times P_x \quad (1)$$

式中: AET_x 表示栅格单元 x 的实际蒸散发(mm); P_x 栅格单元 x 的年降水量(mm)。

其中, $\frac{AET_x}{P_x}$ 采用以下公式计算:

$$\frac{AET_x}{P_x} = 1 + \frac{PET_x}{P_x} - \left[1 + \left(\frac{PET_x}{P_x} \right)^{\omega_x} \right]^{\frac{1}{\omega_x}} \quad (2)$$

式中: PET_x 表示每个栅格单元 x 的年潜在蒸散量(mm); ω_x 表示自然气候—土壤性质的非物理参数。由以下公式计算:

$$\omega_x = \frac{AWC_x}{P_x} \times Z \quad (3)$$

式中: Z 为经验常数^[19],也叫季节性因子,代表区域降水分布及其他水文地质特征,对于冬季降水为主的地区, Z 值接近 10,而对于降水均匀分布的湿润地区和夏季降水为主的地区, Z 值接近 1。 AWC_x 为土壤有效含水量,主要由土层深度和理化性质决定^[11]。

1.3 水源涵养量的计算

水源涵养量的计算是 InVEST 模型在模拟出甘肃省年产水量的基础上考虑地形因素、地表径流(流速系数大小)、土壤性质(土壤饱和导水率)等因素^[20]影响,计算径流在栅格上停留时间得出,具体计算公式为:

$$WR = \min(1, \frac{249}{V}) \times \min(1, \frac{0.9 \times TI}{3}) \times \min(1, \frac{K}{300}) \times Y_x \quad (4)$$

式中:WR 为研究区域水源涵养量(mm);TI 为地形指数; V 为流速系数; K 为土壤饱和导水率(cm/d); Y_x 为模型计算的产水量(mm)。

1.4 地理探测器

地理探测器是用来探测空间分异性及揭示其背后驱动力的统计学方法^[21]。本研究主要采用地理探测器中的因子探测、交互作用模块来共同分析甘肃省水源涵养量变化的主要影响因素。其中因子探测模块可以探测单一影响因素对因变量的解释力,交互作用模块探究两两影响因素交互后对因变量产生

的影响^[21-22]。解释力的强弱通过 q 值来判断^[23-25],公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中: q 的取值越大,表明该自变量对因变量的解释力越强,范围 $0 \sim 1$; $h = 1, 2, 3 \dots L$ 为变量分层; N_h , N , σ_h^2 , σ^2 分别为 h 的单元数、总单元数,层 h 方差和总方差。

本研究以 2001—2023 年 5 个时期的甘肃省水源涵养量为因变量,选取降水量、蒸散发量、土地利用类型、高程、人类足迹 5 个影响因素作为自变量运用地理探测器进行影响因素探究。

1.5 数据的获取与处理

本研究所需参数有降水量、高程、蒸散发量、土地利用类型、人类足迹数据和生物物理属性表等。其中,年降水量、高程数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。年潜在蒸散发量数据来源于黄土高原科学数据中心(<http://loess.geodata.cn>)。土地利用现状遥感监测数据来源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。数据主要分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 个类型。植物可利用水量是利用世界土壤数据库根据周文佐^[26]提出的经验估算模型计算所得。土壤最大根系埋藏深度选取 1 km 的中国土壤深度图^[27]。生物物理属性表主要参考 InVEST 模型推荐的参数获得。人类足迹数据来源于 UEMM 团队研究成果^[28],是考虑了人类压力不同方面的建筑环境、人口密度、夜间灯光、牧场等变量,遵循 Sanderson^[29]等人的方法来评价人类活动强度。

2 结果与分析

2.1 降水量和蒸散发量演变特征

甘肃省 2001—2023 年多年平均降水量为 316 mm。2004 年平均降水量最低,为 278.26 mm。2019 年平均降水量最高,为 382.81 mm。无明显规律,波动较大。2001—2023 年甘肃省 5 a 滑动平均降水量整体呈现上升趋势,2017 年前后明显偏高,达到 349.28 mm。由图 2 和图 3 可知,甘肃省降水量高值区主要集中在南部的甘南州、陇南市和天水市等,降水量在 591.04~841.09 mm 之间,降水低值区主要分布在西北部的酒泉市、嘉峪关市和武威市等,降水范围为 11.02~188.43 mm,降水量空间分布特征差异显著。

甘肃省 2001—2023 年多年平均潜在蒸散发量为

940.34 mm。由图 3 可知,甘肃省潜在蒸散发量较高地区主要集中在西北部的酒泉市和张掖市,潜在蒸散量在 1 062.48~1 398.24 mm 之间,蒸散量低值区主要分布在祁连山片区和甘南州等,范围为 153.69~503.02 mm,蒸散量空间分布特征也存在显著差异。

2.2 模型校验

利用 2001—2023 年甘肃省气象资料逐年平均栅格数据及 2005,2010,2015,2020 年和 2023 年的土地利用数据,利用 InVEST 模型计算 2001—2023 年甘肃省产水量,并采用 2001—2023 年《甘肃省水资源公报》中水资源总量数据对模型参数进行率定,通过不断调整 Z 参数使产水量模拟值更加接近实际值,2001—2023 年甘肃省 Z 参数取值范围为 1.5~8.9,

Z 参数平均值为 3.82,平均误差率为 1.06%,说明模拟结果较好。模型验证结果如图 4 所示。

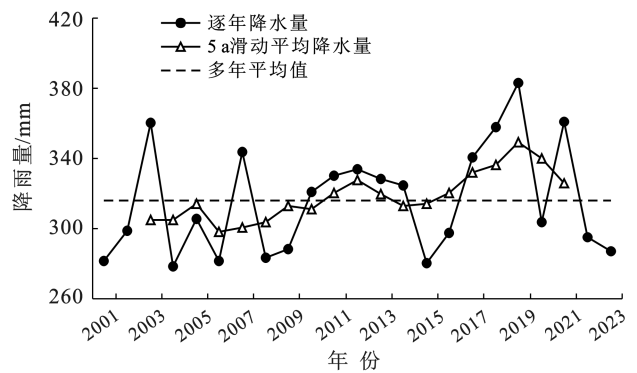


图 2 2001—2023 年甘肃省年降水量变化过程
Fig.2 Annual precipitation change process in Gansu Province from 2001 to 2023

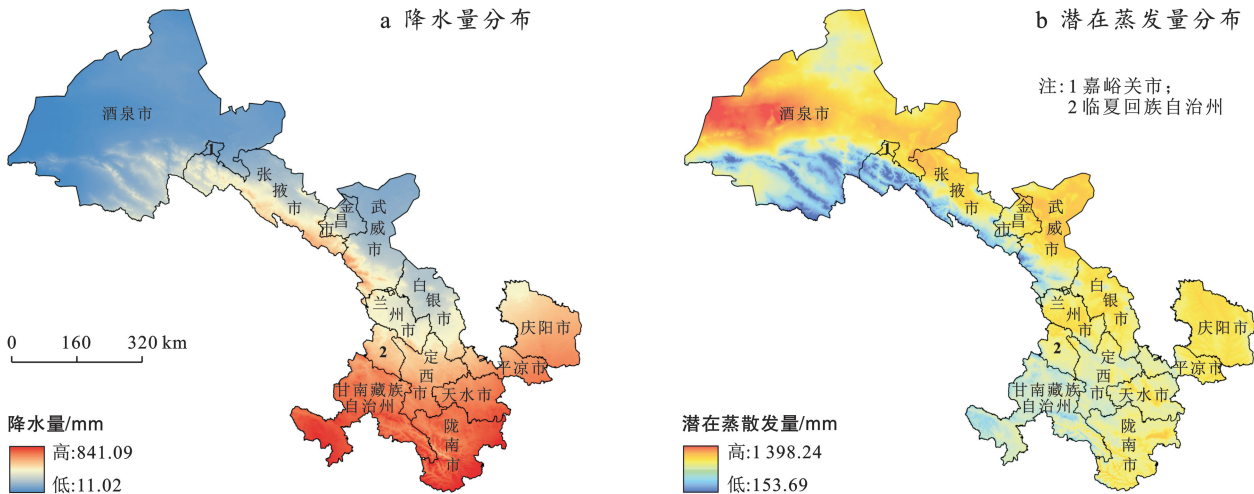


图 3 甘肃省平均年降水量和蒸散发量空间分布情况

Fig.3 Spatial distribution of average annual precipitation and evapotranspiration in Gansu Province

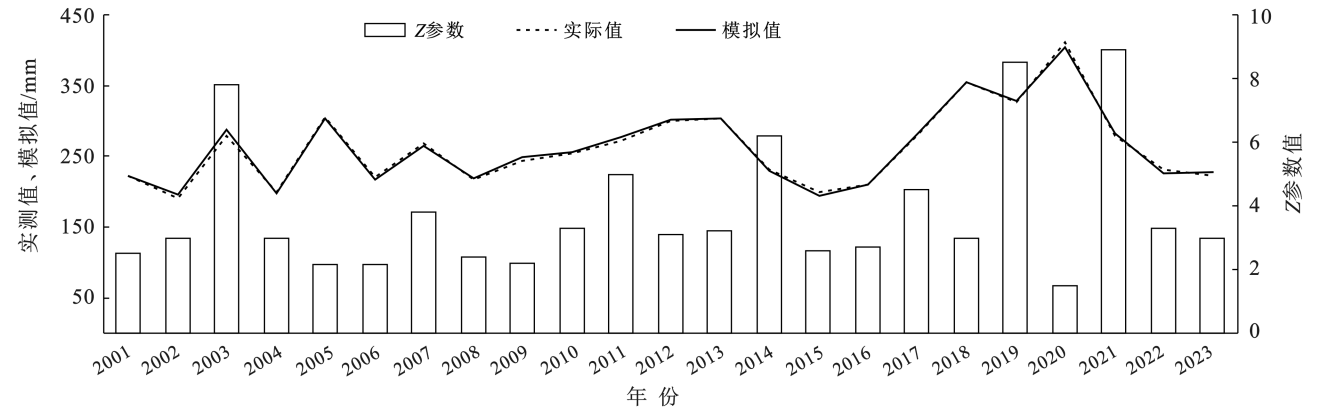


图 4 2001—2023 年甘肃省 InVEST 模型验证结果

Fig.4 Validation results of InVEST model of Gansu Province from 2001 to 2023

2.3 产水量时空变化

由图 5 可知,2001—2023 年甘肃省平均降雨量和产水量分别为 315.66 和 60.95 mm。从时间上来看,2001—2023 年降水量和产水量变化趋势一致,均

总体呈现先上升后下降趋势,也再次验证利用 InVEST模型计算产水量准确性较高。其中第 4 个时期平均降水量和产水量最高,分别达到 336.56 和 74.19 mm。

2001—2023 年甘肃省产水量空间分布详见图 6。从空间分布上来看,5 个时期甘肃省产水量空间分布特征基本一致,产水量整体呈现出南部高、北部低的空间变化格局。其中,产水量低值区主要集中在甘肃省祁连山内陆河片区(酒泉市、嘉峪关市、张掖市、金昌市和武威市)北部地区,其中河西走廊最西端酒泉市和武威市的北部地区产水量最低,而产水量高值区主要集中在甘南高原片区、南部秦巴山区和祁连山山区,以甘南州的产水量为最高,其次是陇南市、临夏州、天水市南部地区和祁连山高山冰雪水源补给区等,中部沿黄地区兰州市、白银市和陇中陇东片区定西市、天水市北部地区、庆阳市和平凉市产水相对较

少。2001—2023 年甘肃省产水量空间分布规律基本与降水量空间分布基本一致。

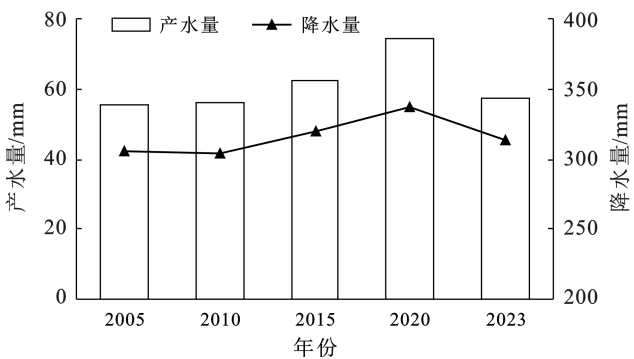


图 5 甘肃省降水量和产水量
Fig.5 Precipitation and water yield in Gansu Province

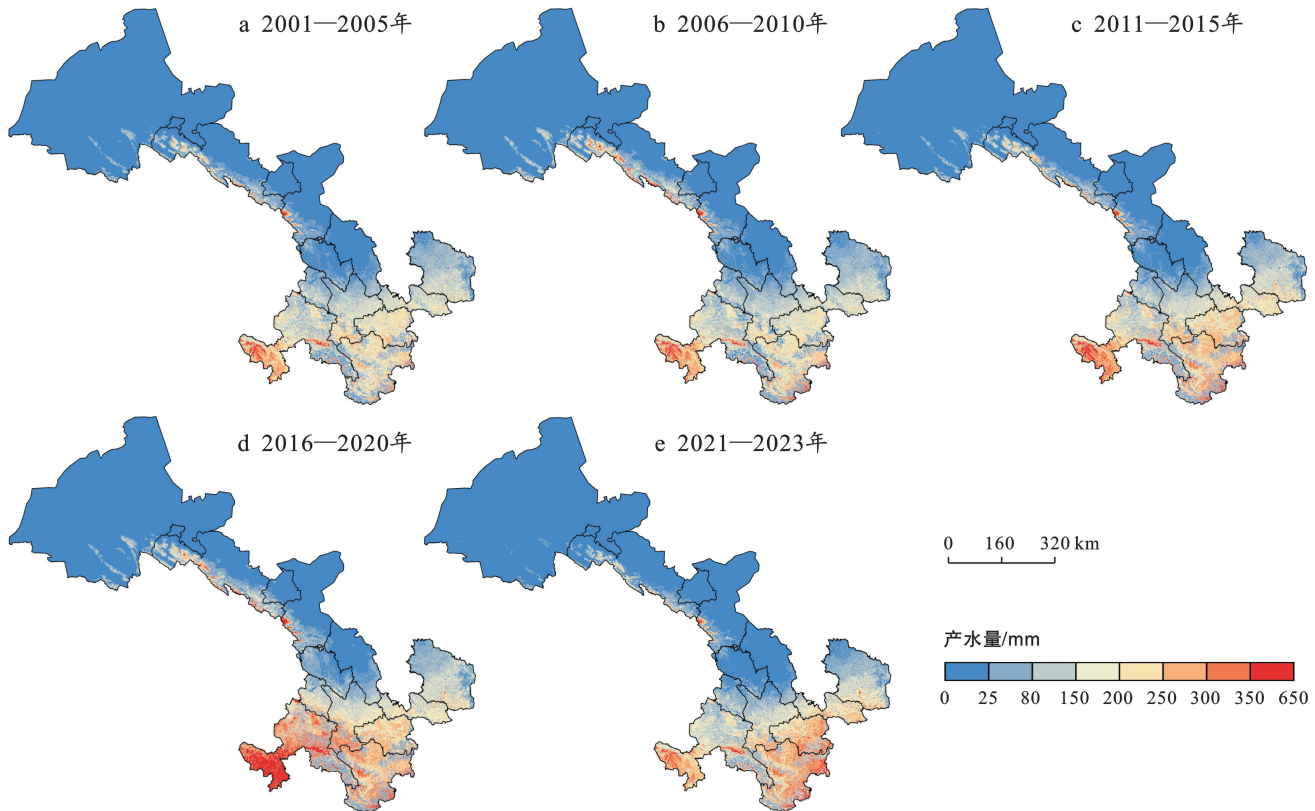


图 6 甘肃省产水量空间分布
Fig.6 Spatial distribution of water production in Gansu Province

2.4 水源涵养量时空变化

利用公式(4),在已有甘肃省年产水量的基础上考虑地形因素、地表径流(流速系数)、土壤性质(土壤饱和导水率)等因素估算 5 个时期甘肃省的水源涵养量,结果见图 7 和图 8。

由图 7 可知,甘肃省多年平均水源涵养量 9.24 mm,第 1 个时期甘肃省水源涵养量最低为 8.08 mm,第 4 个时期甘肃省水源涵养量最高达到 11.29 mm,相较第 1 个时期增加了 39.79%。2001—2023 年 5 个时

期甘肃省水源涵养量整体波动较小,波动幅度分别为 4.59%,12.25%,19.06%和 21.26%,呈现先上升后下降趋势,这与降水量和产水量变化趋势一致,其中水源涵养量和产水量之比均在 15%左右,无明显变化趋势。

由图 8 可知,2001—2023 年甘肃省水源涵养量空间分布趋势与降水、产水空间变化基本一致,水源涵养量低值区主要集中在甘肃省祁连山内陆河片区北部地区,而水源涵养量高值区主要集中在甘南高原

片区、南部秦巴山区以及祁连山高山冰雪水源补给区,整体呈现自西北向东南增加趋势。从时间上来看,2001—2023 年甘肃省水源涵养量总体呈现先上升后下降趋势,此外,降水量大,蒸散发量小的区域水源涵养量显著高于其他区域,不同区域水源涵养量存在明显差异。

2.5 不同土地利用类型的水源涵养量

通过分析 2005,2010,2015,2020,2023 年的土地利用类型数据(表 1)可知,甘肃省土地利用类型主要以未利用地、草地、耕地为主。23 a 来甘肃省的土地利用类型基本无明显变化。

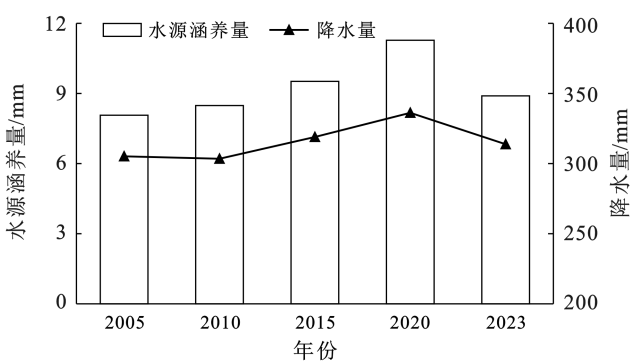


图 7 甘肃省降水量和水源涵养量

Fig.7 Precipitation and water conservation in Gansu Province

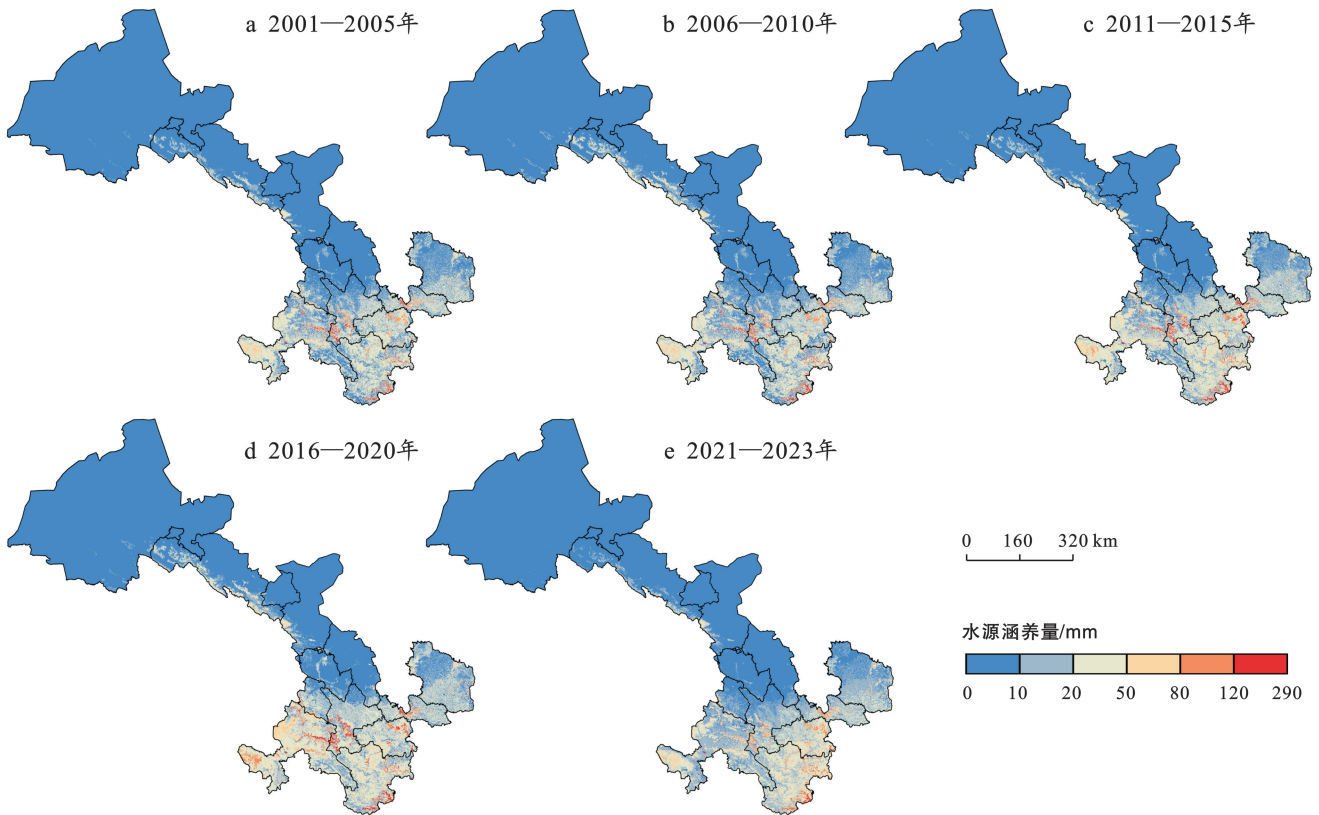


图 8 甘肃省水源涵养量空间分布

Fig.8 Spatial distribution of water conservation in Gansu Province

分别统计了甘肃省 5 种主要用地类型在研究期的平均水源涵养量,不同土地利用类型水源涵养能力依次为:耕地>草地>林地>城镇建设用地>未利用地>水域。耕地、草地和林地在一定程度上都能截留部分降水,草地其强度较耕地弱,林地较深的根系可以有效地拦截降水,但具有强大的蒸腾作用,同时消耗的水量也比耕地要大,故林地相较耕地和草地水源涵养能力弱^[30]。建设用地水源涵养能力较弱,主要是由于建设用地覆盖有沥青、水泥和混凝土,这些材料具有高度的不透水性,与自然环境中的土壤、植被等形成鲜明对比。它们无法像自然土壤那样吸收和储存雨水,也无法通过蒸发和蒸腾作用参与水循环。

2.6 水源涵养量的影响因素

本研究以降水量、蒸散发量、土地利用类型、高程和人类足迹数据(目前人类足迹数据仅收集到 2020 年,因此 2023 年未考虑人类足迹影响因素)为自变量,甘肃省水源涵养量为因变量,利用地理探测器进行因子探测。

由表 2 可知,5 个影响因素均通过显著性检验($p<0.05$),并存在显著性差异。对甘肃省水源涵养的解释力从大到小依次为降水量(0.404~0.508)、土地利用类型(0.157~0.199)、人类足迹(0.135~0.146)、蒸散发量(0.068~0.125)、高程(0.014~0.038)。5 个时期降水量 q 值均最高,表明降水量是影响甘肃省水源

涵养时空差异的主要因素,甘肃省深居西北内陆,甘肃省省内各地气候类型差别较大,大部分地区气候干燥,降水量的时空分布不均,东南地区相较多雨,所以水源涵养值高。其次是土地利用类型、人类足迹和蒸散发量,其中土地利用类型和蒸散发量对水源涵养量的解释力随着时间推移逐渐增大,是影响甘肃省水源涵养能力时空差异的重要因素。高程对水源涵养能力影响程度最弱。

表 1 2005—2023 年甘肃省不同土地利用类型的面积所占比例及水源涵养量
Table 1 Area proportion and water conservation capacity of different land use types in Gansu Province from 2005 to 2023

土地类型	面积比例/%					水源涵养量/mm				
	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2023 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2023 年
耕地	15.36	15.34	15.3	14.9	14.88	20.49	20.35	22.83	25.33	20.93
林地	8.85	8.87	8.86	8.96	8.94	9.32	8.85	12.1	15.54	12.24
草地	33.58	33.64	33.59	33.74	33.82	11.64	12.23	13.41	16.65	14.47
水域	0.71	0.71	0.73	0.86	0.84	0.26	0.64	0.33	0.70	0.10
建设用地	0.79	0.80	0.99	1.20	1.30	5.10	4.62	5.62	5.84	5.03
未利用地	40.71	40.64	40.53	40.34	40.22	0.60	0.80	0.70	0.84	0.49

表 2 2001—2023 年甘肃省影响因素对水源涵养能力的解释力
Table 2 Explanatory power of influencing factors of water conservation capacity in Gansu Province from 2001 to 2023

时 期	降水量	蒸散发量	土地利用	高 程	人类足迹
2001—2005 年	0.438	0.071	0.173	0.024	0.146
2006—2010 年	0.404	0.068	0.187	0.025	0.135
2011—2015 年	0.446	0.080	0.192	0.018	0.140
2016—2020 年	0.470	0.125	0.199	0.038	0.137
2021—2023 年	0.508	0.088	0.157	0.014	—

注:各个时期,地理探测器中每个影响因素的 p 值均小于 0.01,差异极显著。

进一步分析各影响因素的交互作用(表 3)可知,影响因素间的共同作用对水源涵养的解释力均大于单个影响因素。降水量与土地利用类型间的相互作用对水源涵养的解释力最强,其解释力约为土地利用类型单个影响因素的 2.97~4.03 倍;其次为降水量与高程间的交互作用,二者交互作用解释力差异最大,其解释力约为高程单影响因素的 14.05~41.50 倍。这说明相同的高程下,由于降雨量的不同,导致水源涵养量出现较大差异,这也是甘肃省西北东南两区域的水源涵养空间分布差异较大的主要原因。

表 3 2001—2023 年甘肃省影响因素对水源涵养能力的交互解释力
Table 3 Interactive explanatory power of influencing factors on water conservation capacity in Gansu Province from 2001 to 2023

时 期	影响因素	降水量	蒸散发量	土地利用	高 程	人类足迹
2001—2005 年	降水量	0.438				
	蒸散发量	0.552	0.071			
	土地利用	0.535	0.233	0.173		
	高 程	0.543	0.191	0.240	0.024	
	人类足迹	0.482	0.242	0.216	0.270	0.146
2006—2010 年	降水量	0.404				
	蒸散发量	0.504	0.068			
	土地利用	0.560	0.257	0.187		
	高 程	0.504	0.195	0.267	0.025	
	人类足迹	0.470	0.273	0.224	0.246	0.135
2011—2015 年	降水量	0.446				
	蒸散发量	0.524	0.080			
	土地利用	0.570	0.256	0.192		
	高 程	0.525	0.202	0.256	0.018	
	人类足迹	0.494	0.267	0.230	0.235	0.140
2016—2020 年	降水量	0.470				
	蒸散发量	0.530	0.125			
	土地利用	0.650	0.307	0.199		
	高 程	0.534	0.228	0.270	0.038	
	人类足迹	0.499	0.270	0.242	0.267	0.137
2021—2023 年	降水量	0.508				
	蒸散发量	0.571	0.088			
	土地利用	0.633	0.216	0.157		
	高 程	0.581	0.257	0.206	0.014	

由于降水量对甘肃省水源涵养空间分布的解释力最为明显,因此降水量与任一影响因素共同作用均大于其他两两影响因素间作用。降水量与土地利用类型间的交互作用为蒸散发量与土地利用类型间交互作用约为 2.12~2.93 倍,表明在同用地类型下,降水量对甘肃省水源涵养量的影响要显著强于蒸散发量。

3 讨论与结论

3.1 讨论

甘肃省水源涵养服务功能时空分异特征明显。从时间来看,2001—2023 年甘肃省水源涵养量整体呈先上升后下降趋势,与降水量和产水量变化一致,这与以往水源涵养量的相关研究结果基本一致。贾雨凡等^[31]研究 1975—2019 年伊洛河流域水源涵养量表明水源涵养量整体呈现先增后减的变化趋势,与产水量和降水量呈现高度一致。韩念龙等^[32]分析研究海南岛水源涵养时空变化时,表明海南岛水源涵养深度与降水量变化趋势具有较高一致性,可见降水量是影响海南岛水源涵养量变化的重要因素。从空间来看,甘肃省水源涵养功能空间分布不均,且存在显著空间差异性,且 5 个时期水源涵养服务空间分布差异较小,整体呈现自西北向东南增加趋势,水源涵养量低值区主要集中在甘肃省内陆河片区北部地区,而水源涵养量高值区主要集中在甘南高原片区、南部秦巴山区以及祁连山高山冰雪水源补给区。因此在制定甘肃省水源涵养功能提升政策时,应强化水源涵养高值区,而且可针对低值区采取相关措施重点恢复。

地理探测器结果显示,降水量是影响甘肃省水源涵养量变化的最主要因素,这与安徽省^[12]、黄河流域^[22]、海南岛^[32]、承德市^[33]等地区研究结论一致。同时,降水量与蒸散发量、降水量与土地利用类型以及降水量与高程间相互作用对甘肃省水源涵养服务能力影响最为显著。这表明 23 a 来甘肃省水源涵养功能变化主要是由气候因素和人类活动因素共同影响。甘肃省深居西北内陆,大部分地区气候干燥,各地年降水量大致从东南向西北递减,东南地区和祁连山段降水偏多,又因地势作用,水源涵养量高;西北地区降水明显减少,且蒸散量远远大于降水量,其水源涵养量最低。这再次说明水源涵养功能变化的主要驱动因素是气候因素^[34]。

除了气候因素外,人类活动因素对水源涵养能力的影响也较为显著。其中,土地利用类型的变化导致土壤条件、土壤侵蚀和下垫面等发生改变,从而影响降水的截留、聚集、渗入、地表径流等过程,进而影响水源涵养能力^[35]。在不同土地利用类型中,林地具

有根系深度大的特征,对降水的涵养能力较强,而其蒸散系数大于耕地和草地,消耗的水量相应较多。另外,甘肃省林地主要集中在陇南市、甘南州、庆阳市,受地形和气候影响,林地水源涵养能力较低。其中陇南市地处秦巴山区,山高坡陡谷狭,土薄石多,且气候多变,属于亚热带向暖温带过渡区,降水分布不均^[36],对林地的保水能力造成影响。甘南州位于青藏高原东部边缘,地势高亢,地形复杂,以高原为主^[37],使得降水难以长时间停留在地表,容易流失,并且受气候条件影响,林地中的植被根系相对较浅,难以深入土壤吸收和储存大量的水分。庆阳市地处黄土高原,地形复杂,土壤疏松,降雨集中且多暴雨,这导致水土流失严重,林地水源涵养能力受限。结合地理探测器因子探测结果显示,人类足迹对甘肃省水源涵养量的解释力范围为 0.135~0.146,表明人类活动活动的扩张和集聚与水源涵养服务功能的分布有着直接关联,郑诚蔚等^[16]在研究甘肃省河西地区水源涵养功能时表明除了气候因素,人类活动的影响对水源涵养服务功能起到了关键作用,且存在显著的空间自相关性,均表现出了区域集聚的特征。因此,当地政府应将水源涵养服务功能的提升与人类活动紧密结合,通过科学规划和管理,实现生态环境与人类活动、经济发展的和谐共生,确保水源涵养服务功能的稳定与可持续。

本研究不同于国外的学者 Hoyer R. 等^[4]和国内的学者杨洁等^[9]、吕明轩等^[23]在确定 InVEST 模型 Z 参数时,考虑了研究期 2001—2023 年的不同年际变化,依次采用《甘肃省水资源公报》中水资源总量数据对模型参数进行率定,确保每年的模拟产水量都尽可能接近实际产水量,增加模型的模拟精度;也不同于李莹莹等^[12]仅考虑土地利用类型与夜间灯光指数、贾雨凡等^[31]仅考虑了土地利用变化等人类活动因素,未对人口密度、建筑环境等社会因子加以考虑。因此本研究选取了综合反映人类压力不同方面的建筑环境、人口密度、夜间灯光、农田等 8 个变量的人类足迹作为影响因素,并利用地理探测器进行了因子探测和交互作用分析,能够全面地反映人类活动对水源涵养服务功能影响程度。

本研究分析量化了甘肃省水源涵养服务功能,得到了可信的结果,以期掌握水源涵养功能时空特征,为区域水资源管理决策和水源涵养功能恢复提供重要参考依据。但由于甘肃省地理位置特殊,东西跨度大,地理特征导致了气候、生态和环境的显著差异,还需结合大量的实测数据,在今后的研究中进一步加强验证,使其更好地反映甘肃省的实际情况。

3.2 结 论

本研究基于 InVEST 模型计算产水量并结合相关系数修正模拟甘肃省水源涵养量,同时采用地理探测器识别水源涵养空间分异的主要影响因素。

(1) 根据 InVEST 模型结果,2001—2023 年甘肃省平均降雨量、产水量和水源涵养量分别为 315.66, 60.95 和 9.24 mm。从时间上来看,2001—2023 年甘肃省水源涵养量波动较小,总体呈现先上升后下降趋势,与降水量和产水量变化趋势一致。从空间分布上来看,甘肃省水源涵养量空间分布趋势与降水、产水量空间变化基本一致,整体呈现自西北向东南增加趋势。

(2) 2001—2023 年甘肃省不同土地利用类型平均水源涵养能力依次为:耕地>草地>林地>城镇建设用地>未利用地>水域。

(3) 根据地理探测器结果显示,降水量是影响甘肃省水源涵养量变化的主要因素。降水量与蒸散发量、土地利用类型和高程间交互作用对甘肃省水源涵养服务功能影响最为明显。这表明 2001—2023 年甘肃省水源涵养功能变化主要是由气候因素和人类活动因素共同影响。

参考文献 (References)

[1] 吕一河,胡健,孙飞翔,等.水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务[J].生态学报,2015,35(15):5191-5196.
Lü Yihe, Hu Jian, Sun Feixiang, et al. Water retention and hydrological regulation: Harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(15):5191-5196.

[2] Wang Yuchun, Zhao Jun, Fu Jiewen, et al. Effects of the grain for green program on the water ecosystem services in an arid area of China: Using the Shiyang River basin as an example [J]. Ecological Indicators, 2019,104:659-668.

[3] 谢余初,巩杰,齐姗姗,等.基于 InVEST 模型的白龙江流域水源供给服务时空分异[J].自然资源学报,2017,32(8):1337-1347.
Xie Yuchu, Gong Jie, Qi Shanshan, et al. Spatio-temporal variation of water supply service in Bailong River watershed based on in VEST model [J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(8):1337-1347.

[4] Hoyer R, Chang H. Assessment of freshwater ecosystem services in the Tualatin and Yamhill basins under climate change and urbanization [J]. Applied Geography, 2014, 53:402-416.

[5] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple

ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009,7(1):4-11.

[6] 王尧,徐佩,傅斌,等.森林生态系统水源涵养功能评估模型研究进展[J].生态经济,2018,34(2):158-164,169.
Wang Yao, Xu Pei, Fu Bin, et al. Water conservation function assessment models of forest ecosystem: A review [J]. Ecological Economy, 2018,34(2):158-164,169.

[7] Pessacg N, Flaherty S, Brandizi L, et al. Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data [J]. Science of the Total Environment, 2015,537:225-234.

[8] 刘菊,傅斌,张成虎,等.基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估[J].长江流域资源与环境,2019,28(3):577-585.
Liu Ju, Fu Bin, Zhang Chenghu, et al. Assessment of ecosystem water retention and its value in the upper reaches of Minjiang River based on InVEST model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(3):577-585.

[9] 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.

[10] 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.
Zhang Yuanyuan. Sanjiangyuan area water conservation ecosystem services assessment analysis between 1980—2005 [D]. Beijing: Capital Normal University, 2012.

[11] 李青.基于 InVEST 模型辽宁省生态系统水源涵养服务功能研究[D].辽宁 大连:辽宁师范大学,2022.
Li Qing. Study on water conservation service function of ecosystem in Liaoning Province based on InVEST model [D]. Dalian, Liaoning: Liaoning Normal University, 2022.

[12] 李莹莹,马晓双,祁国华,等.基于参数本地化 InVEST 模型的安徽省水源涵养功能研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(2):313-325.
Li Yingying, Ma Xiaoshuang, Qi Guohua, et al. Studies on water retention function of Anhui Province based on InVEST model of parameter localization [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(2): 313-325.

[13] 张爱萍.甘肃省湿地资源及其特征[J].甘肃林业,2023(3):40-41.

- Zhang Aiping. Wetland resources and their characteristics in Gansu Province [J]. *Forestry of Gansu*, 2023(3): 40-41.
- [14] 赵阳,王飞,齐瑞,等.白龙江、洮河林区 5 种典型森林枯落物与土壤层水源涵养效应[J].*水土保持研究*,2021,28(3):118-125.
- Zhao Yang, Wang Fei, Qi Rui, et al. Water conservation effect of litter and soil layer of five typical forests in Bailongjiang and Taohe River forest of Gansu [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(3): 118-125.
- [15] 孙于卜,欧晓彬,陈轲林,等.黄土高原子午岭油松林枯落物的水源涵养功能评价[J].*水土保持通报*,2022,42(3):8-15.
- Sun Yubo, Ou Xiaobin, Chen Kelin, et al. Evaluation of water conservation function of litters of *Pinus tabulaeformis* forest in Ziowuling forest region of Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(3): 8-15.
- [16] 郑诚蔚,邓晓红,李宗省,等.甘肃省河西地区水源涵养功能与人类活动强度演变[J].*中国沙漠*,2024,44(1): 189-200.
- Zheng Chengwei, Deng Xiaohong, Li Zongxing, et al. Analysis of the spatial and temporal evolution of water resources conservation and human activity intensity in the Hexi Region of Gansu Province [J]. *Journal of Desert Research*, 2024,44(1):189-200.
- [17] 牛赞,刘贤德,李新,等.祁连山大野口流域森林空间结构及水源涵养功能[J].*中国沙漠*,2014,34(6):1685-1691.
- Niu Yun, Liu Xiande, Li Xin, et al. Forest spatial structure and function on water conservation in the Dayekou Basin of the Qilian Mountain [J]. *Journal of Desert Research*, 2014,34(6):1685-1691.
- [18] 王丽娜,丁文广,许丹阳.基于 DEM 的甘肃省地貌形态特征分类[J].*水土保持通报*,2019,39(1):258-263.
- Wang Lina, Ding Wenguang, Xu Danyang. DEM-based geomorphological features of Gansu Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019,39(1): 258-263.
- [19] 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.
- [20] 余新晓,周彬,吕锡芝,等.基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J].*林业科学*,2012,48(10): 1-5.
- Yu Xinxiao, Zhou Bin, Lü Xizhi, et al. Evaluation of water conservation function in mountain forest areas of Beijing based on InVEST model [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012,48(10):1-5.
- [21] 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.
- [22] 吕明轩,张红,贺桂珍,等.黄河流域水源涵养服务功能动态演变及驱动因素[J].*生态学报*,2024,44(7):2761-2771.
- Lü Mingxuan, Zhang Hong, He Guizhen, et al. Dynamic evolution and driving factors of water conservation service function in the Yellow River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(7):2761-2771.
- [23] Gao Jiangbo, Jiang Yuan, Anker Y. Contribution analysis on spatial tradeoff/synergy of Karst soil conservation and water retention for various geomorphological types: Geographical detector application [J]. *Ecological Indicators*, 2021,125:107470.
- [24] Wang Jinfeng, Zhang Tonglin, Fu Bojie. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. *Ecological Indicators*, 2016,67:250-256.
- [25] Wang Jinfeng, Li Xinhua, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010,24(1):107-127.
- [26] 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].江苏 南京:南京农业大学,2003.
- Zhou Wenzuo. A Study on available water capacity of main soil types in China based on geographic information system [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing Agricultural University, 2003.
- [27] Yan Fapeng, Shangguan Wei, Zhang Jing, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters [J]. *Scientific Data*, 2020,7(1):2.
- [28] Mu Haowei, Li Xuecao, Wen Yanan, et al. A global record of annual terrestrial human footprint dataset from 2000 to 2018 [J]. *Scientific Data*, 2022,9(1):176.
- [29] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, et al. The human footprint and the last of the wild [J]. *BioScience*, 2002,52(10):891.
- [30] 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.
- Zhao Yaru, Zhou Junju, Lei Li, et al. Identification of drivers for water yield in the upstream of Shiyang River based on InVEST model [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019,38(12):3789-3799.

[31]

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.
Jia Yufan, Wang Guoqing. Assessment of water conservation capacity of Yiluo River basin based on the InVEST model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(3):101-108.

[32]

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.

[33]

王治,薛忠财,王瑞丰,等.1990—2017 年承德市水源涵养功能时空变化格局与影响因素研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(9):1138-1146.
Wang Ye, Xue Zhongcai, Wang Ruifeng, et al. Spatial and temporal patterns of water retention and its influencing factors in Chengde City from 1990 to 2017 [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022,38(9):1138-1146.

[34]

张福平,李肖娟,冯起,等.基于 InVEST 模型的黑河流域上游水源涵养量[J].中国沙漠,2018,38(6):1321-1329.

[35]

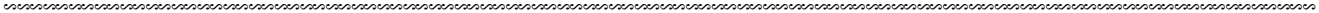
Zhang Fuping, Li Xiaojuan, Feng Qi, et al. Spatial and temporal variation of water conservation in the upper reaches of Heihe River basin based on InVEST model [J]. Journal of Desert Research, 2018,38(6):1321-1329.

[36]

党国锋,纪树志.基于 GIS 的秦巴山区土地生态敏感性评价:以陇南山区为例[J].中国农学通报,2017,33(7):118-127.
Dang Guofeng, Ji Shuzhi. Ecological sensitivity evaluation based on GIS in Qinba Mountainous area: A case study of Longnan mountainous area [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017,33(7):118-127.

[37]

章志龙,施蕾蕾,高君智,等.甘南草原生态治理的实践与探索[J].环境保护,2023,51(20):36-40.
Zhang Zhilong, Shi Leilei, Gao Junzhi, et al. Practice and exploration of grassland ecological management in Gannan [J]. Environmental Protection, 2023,51(20):36-40.



(上接第 221 页)

[31]

赵思文,胡希军,金晓玲,等.古航道视角下聚落地名文化景观时空特征及影响因素:以湖南沅水流域为例[J].地理研究,2024,43(1):214-235.
Zhao Siwen, Hu Xijun, Jin Xiaoling, et al. The spatio-temporal characteristics and influencing factors of settlement name cultural landscape from the perspective of ancient waterway: Take the Yuanshui River basin in Hunan as an example [J]. Geographical Research, 2024,43(1):214-235.

[32]

曾慧子,张超,赵鸣.湖南沅水流域水系影响下的传统聚落选址与形态特征研究[J].现代城市研究,2020,35(3):54-59.
Zeng Huizi, Zhang Chao, Zhao Ming. The research on site selection and morphological characteristics of traditional settlements under the influence of water of Yuanshui River in Hunan [J]. Modern Urban Research, 2020,35(3):54-59.

[33]

项清,于欢,阚媛珂,等.横断山区河流水系对乡村聚落分布的影响特征:以岷江上游为例[J].长江流域资源与环境,2023,32(7):1510-1520.
Xiang Qing, Yu Huan, Kan Aike, et al. Influence characteristics of river water system on rural settlement distribution in Hengduan Mountain area: A case study of the upper reaches of Minjiang River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(7):1510-1520.