黄河上游阿坝-甘南生态屏障区水源涵养功能时空格局及其驱动力

马 斌[1], 胡永宁[2,3], 李 飞[2,4], 王彦琦[2,3]

(1.甘肃民族师范学院 历史文化学院, 甘肃 合作 747000; 2.内蒙古包头黄河湿地生态系统定位观测研究站, 内蒙古 包头 014010; 3.内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 4.中国农业科学院 草原研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘 要: [目的]研究黄河上游阿坝-甘南生态屏障区水源涵养功能的时空变化规律及其驱动机制,为保障黄河流域水安全与实现可持续发展提供理论指导。[方法]基于InVEST模型和地理信息技术,运用1990—2024年长时序数据,定量评估该区域水源涵养功能的时空动态特征,同时利用地理探测器模型深度解析其空间分异的驱动机制。[结果]①时间维度上。研究区34 a的年均水源涵养量和水源涵养总量均呈明显的波动上升态势,表明研究区对黄河上游水量的补给作用及生态保障能力稳步提升; ②区域维度上。水源涵养量分布具有"南高北低"的特点,高值区多集中于研究区南部森林、草原草甸和湿地等地表景观区,低值区则多集中于北部的人类活动密集区。③驱动机制方面。降水量与土地利用/覆盖变化(LUCC)的交互作用对水源涵养空间分异的解释力最强;同时,时序单因子探测显示,LUCC的解释力呈持续增加的趋势,2024年超过了降水量。[结论]未来在黄河上游的生态治理中,应落实分区分类的差异化管控,严守南部高涵养区生态红线,严控北部城镇建设用地;同时推进基于"气候-地形-下垫面"多要素协同的国土空间规划,完善生态保护补偿机制,引导土地利用向高生态效益持续转型,从而长效稳固黄河上游生态屏障功能。

关键词: 水源涵养; 土地利用/覆被变化; 时空演变; 黄河上游阿坝-甘南生态屏障区

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0378-11 **中图分类号:** X171.4

文献参数: 马斌, 胡永宁, 李飞, 等.黄河上游阿坝-甘南生态屏障区水源涵养功能时空格局及其驱动力[J].水土保持通报,2026,46(5):378-388. Ma Bin, Hu Yongning, Li Fei, et al. Spatiotemporal patterns and driving forces of water conservation function in Aba-Gannan ecological barrier zone in upper reaches of Yellow River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):378-388.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.028 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.028**

Spatiotemporal patterns and driving forces of water conservation function in Aba-Gannan ecological barrier zone in upper reaches of Yellow River

Ma Bin[1], Hu Yongning[2,3], Li Fei[2,4], Wang Yanqi[2,3]

(1.*College of History and Culture, Gansu Minzu Normal University, Hezuo, Gansu* 747000, *China*; 2.*Inner Mongolia Baotou Yellow River Wetland Ecosystem Positioning Observation and Research Station, Baotou, Inner Mongolia* 014010, *China*; 3.*Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia* 010010, *China*; 4.*Institute of Grassland Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot, Inner Mongolia* 010010, *China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal variation patterns and driving mechanisms of water conservation function in the Aba-Gannan ecological barrier zone in the upper reaches of the Yellow River were investigated in order to provide theoretical guidance for ensuring water security in the Yellow River basin and achieving sustainable development. [Methods] Based on the InVEST model and geographic information technology, the spatiotemporal dynamic characteristics of water conservation function in the region were quantitatively evaluated

收稿日期:2026-03-12 **修回日期:**2026-04-15 **采用日期:**2026-04-15

资助项目:内蒙古自治区林业科学研究院开放课题"黄河流域湿地时空演变及其对水文过程的响应"(KF2025MS10); 甘肃省高校教师创新项目(2024B-183); 甘肃民族师范学院校长科研项目(2025ZRKX-07)

第一作者:马斌(1985—),男(回族),甘肃省临潭县人,硕士研究生,讲师,主要从事高寒地区生态保护与土地利用方面的研究。Email:0500094@gnun.edu.cn。

通信作者:李飞(1982—),男(汉族),甘肃省平凉市人,博士,教授,博士生导师,主要从事卫星与无人机遥感技术,人工智能算法与草地资源利用交叉研究。Email:lfgis@cau.edu.cn。

using the long time-series data from 1990 to 2024, and the driving mechanism of spatial differentiation was analyzed using the GeoDetector model. [Results] ① Temporally, the annual average water conservation and total water conservation in the study area over the 34 years both showed a significant "fluctuating upward" trend, indicating that the study area's role in replenishing water in the upper reaches of the Yellow River and its ecological security capacity steadily improved. ② Spatially, the water conservation distribution showed a pattern of "higher in the south and lower in the north." High-value zones were predominantly concentrated in surface landscape areas such as forests, grassland meadows, and wetlands in the southern part of the study area, whereas low-value zones were mainly clustered in the northern regions with intensive human activities. ③ Regarding driving mechanism, the interaction between precipitation and land use/cover change (LUCC) had the strongest explanatory power for the spatial differentiation of water conservation. Meanwhile, time-series single-factor detection revealed a continuous increase in the explanatory power of LUCC, which surpassed that of precipitation in 2024. [Conclusion] Future ecological governance in the upper reaches of the Yellow River should implement differentiated zoning management, strictly safeguarding the ecological redline in the high-conservation zones in the south while restricting the expansion of urban construction land in the north. Additionally, it is essential to advance spatial planning that synergizes multiple factors: "climate-topography-underlying surface", optimize the ecological compensation mechanism, and guide land use towards sustained high ecological benefits, thereby ensuring the long-term stability of the ecological barrier in the upper reaches of the Yellow River basin.

Keywords: water conservation; land use/cover change; spatiotemporal evolution; Aba-Gannan ecological barrier zone in upper reaches of Yellow River

水资源是维系区域生态安全与推动社会经济可持续发展的核心要素。水源涵养作为生态系统的重要服务功能之一,是生态系统通过植被截留、土壤下渗及蓄积大气降水,从而实现调控水循环的自然生态过程[1]。该功能不仅能在时空维度上合理分配水资源,缓解旱涝灾害,更是维护区域水安全的"天然海绵"[2]。然而,一个地区的水源涵养功能会在自然与人为双重驱动力的影响下发生动态演变。降水量、气温及蒸发量等自然因素,对水资源的输入环节以及消耗环节起到决定性的作用[3]。而地形、土壤及下垫面特征则通过影响截留和产流环节,改变了生态系统的持水与调水能力[4]。近年来,随着人类活动强度的增加,土地利用(如森林采伐、草地退化、城镇与农田扩张等)直接改变了地表覆被状况,进而对水文过程产生影响[5]。黄河上游阿坝-甘南段是黄河上游重要的生态屏障区,其水源涵养功能直接关系到黄河流域的水资源供给与生态安全。然而,近年来该区域也面临着草地退化、过度放牧等问题,水源涵养功能变化显著,但对其时空演变规律及驱动机制尚缺乏系统研究。探究该地区水源涵养功能的时空演变规律及其背后的自然与人文驱动机制,对于维系区域生态平衡以及促进可持续发展具有极为关键的意义。

围绕水源涵养功能,国内外学者在多时空尺度与评估方法上开展了大量研究。时空尺度上,主要包括大流域、大区域、城市群的研究。如张秀霞等[6]利用土地利用、土壤属性等多源数据,分析了2000—2023年整个黄河流域的水源涵养的年际变化、空间分异。包玉斌等[7]研究结果表明2000—2010年陕北黄土高原水源涵养量下降,中部下降最多。王诗媛等[8]利用InVEST模型计算分析2000—2020年黄河中游城市群水源涵养的时空特征,发现呈由南至北递减的格局。也有对子流域、小流域、单个城市的研究,如赵高磊等[9]发现黄河源区水源涵养量的分布特征是东多西少,南多北少;刘志春等[10]研究发现甘肃省甘南州多年平均水源涵养深度为25.77 mm,且呈现南部高,北部低的空间特征。吕铁冰等[11]利用PLUS-InVEST耦合模型模拟了承德市2028,2033和2038年土地利用变化及其水源涵养功能情况;研究思路方面,对水源涵养功能的研究经历了从定性到定量,从"点"到"面"的实践过程。早期研究多依托水文气象站实测资料、土壤资料和经验方程等[12]进行研究。近些年来,随着计算机技术及遥感、GIS技术的发展,InVEST模型[9-11,13]在水源涵养主题方面的应用越来越广泛。许多研究人员综合运用多源遥感数据、LUCC(土地利用/土地覆被变化)数据与气象、土壤数据等对水源涵养功能进行评估,并分析驱动力,极大地推进了水资源涵养定量研究的发展。

目前,学界围绕黄河流域的水源涵养开展了广泛研究[2,8-9],既有覆盖全黄河流域的整体研究,也有针对特定子流域或部分支流河段的区域性分析。然

而，目前鲜有研究将跨越川、甘两省且地理位置与生态系统高度关联的“黄河上游阿坝-甘南段”作为一个完整的生态地理单元进行系统性的水源涵养功能探讨。黄河上游阿坝-甘南段是“中华水塔”的重要组成部分，其水源涵养功能对维持黄河中下游地区水资源量的稳定与质的安全极其重要。因此，厘清该区域水源涵养功能的时空演变规律，定量识别关键驱动因子及其交互作用机制，对于揭示高寒生态区水源涵养功能的变化机理具有重要的价值。鉴于此，本研究以黄河上游阿坝-甘南段为研究区，综合长时序多源遥感与地理空间数据，借助InVEST模型定量评估1990—2024年该区域水源涵养功能的时空动态演变特征；并重点剖析LUCC变迁对水源涵养功能的驱动与响应机制。研究结果旨在为黄河上游生态屏障的保护修复、土地资源的优化配置以及区域水资源的可持续管理提供科学依据与决策支持。

1 研究区概况

本研究以四川省阿坝藏族羌族自治州与甘肃省甘南藏族自治州为研究区（以下分别简称为阿坝州与甘南州）。综合黄河流域的矢量数据与阿坝州、甘南州的行政边界数据，确定研究区范围。具体包括：甘南州的合作市、夏河县、卓尼县、临潭县、玛曲县、碌曲县的全部和阿坝州的红原县、阿坝县、若尔盖县的大部分地区。该区域地处青藏高原东南边缘，属于青藏高原与黄土高原的过渡地带，是黄河上游至关重要的水源涵养与补给区，对维护整个黄河流域的水安全与生态系统稳定具有极其重要的战略意义。阿坝州与甘南州是黄河上游重要产流区，黄河流经此地时，相继接纳了黑河、白河、洮河、大夏河等一系列支流，径流量显著增加。相关统计表明，该区域对黄河源区径流总量的贡献显著，是支撑“中华水塔”水源补给的关键“蓄水池”[14-15]。区内景观类型丰富且独具特色，既分布有若尔盖、尕海等高寒泥炭沼泽湿地，亦有连绵的广袤草甸，并在岷山、西倾山等山地发育有大面积原生森林。湿地、草原与森林生态系统交织构成了多样的生态矩阵，共同发挥着调蓄径流、固碳与生物多样性保护等功能。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源

本研究所需数据主要包括土地利用与覆被数据、气象数据、土壤属性数据及研究区范围矢量数据4部分。其中，土地利用数据分辨率为30 m，降水量、潜在蒸散及土壤属性数据的原始分辨率为1 km，采用双线性插值法进行重采样，将所有栅格数据空间分辨率统一为30 m，并选择相同的WGS1984UTM Zone 48N投影坐标系。重采样可能在一定程度上掩盖了数据的空间梯度。为此，本研究在结果分析中重点关注县域及流域尺度的宏观格局，以降低重采样引入的局部误差对结论的影响。研究区范围通过叠加黄河流域矢量数据与阿坝州、甘南州的行政区划矢量数据确定。①土地利用与覆被数据。土地利用数据采用武汉大学杨杰和黄昕教授团队发布的“中国逐年土地覆盖数据集（CLCD）”，该数据集基于Landsat影像构建，空间分辨率为30 m，时间跨度更新至2024年7月，该数据具备高精度与长时序一致性，能够准确刻画研究区1990—2024年的地表覆被动态演化特征。②气象数据。降水量、蒸散量均来源于国家青藏高原科学数据中心（TPDC）发布的中国逐月降水量数据和潜在蒸散数据。利用ArcGIS 10.8软件中的模型构建器进行迭代运算及批量处理，生成逐年降水量与潜在蒸散数据。③土壤及植被物理参数。土壤及植物可利用水分含量数据，通过处理世界土壤数据库（HWSD）中的砂粒、粉粒、黏粒含量等基础字段，采用土壤转换函数计算植物可利用水分储量。根系深度数据基于《Scientific Data》期刊发布的中国100 m分辨率基岩深度数据间接获取，用于界定土壤水分的有效储存深度[16]。具体情况详见表1。

2.2 研究方法

2.2.1 产水量计算

利用土地利用、年降水量、年潜在蒸散、植物可利用含水量、根系深度、研究区生物物理表、z参数等数据，分别取z值为4，5，6，7计算研究区产水量，计算出的结果和《甘肃省水资源公报》中的甘南州多年平均自产地表水资源量8.40×10^9 m^{3}的数据对比发现，z值取7最佳。采用InVEST模型中的产水量模块（annual water yield）来量化研究区1990—2024年逐年的产水量。将经过统一坐标系、统一分辨率的各类数据分别导入产水量计算模块，运行后生成研究区1990—2024年产水量分析的栅格数据。计算公式为

$$W(x)=\left[1-\frac{\mathrm{Eva}(x)}{p(x)}\right]\times p(x) \tag{1}$$

式中：$W(x)$为像元x的年产水量（mm）；Eva(x)为像元x的年实际蒸散量（mm）；$p(x)$为像元x的年实际降水量（mm）。

表 1　数据来源及说明

Table 1　Data sources and description

数据名称	格式	数据说明	数据作用	数据来源
土地利用/土地覆盖	栅格	30 m 分辨率的逐年土地覆盖数据	区分不同地表覆盖型,不同地类具有不同的蒸散发、下渗和产流特性	武汉大学发布土地覆盖数据
年降水量	栅格	基于 1990—2024 年 nc 格式的逐月降水量数据集合成得到	Invest模型计算产水量,需要长期平均的年降水量空间分布数据	国家青藏高原科学数据中心
年潜在蒸散	栅格	基于 1990—2024 年 nc 格式的逐月蒸散发数据集合成得到	代表地表实际蒸散发量,用于水量平衡计算	国家青藏高原科学数据中心
根系深度	栅格	Scientific Data 发布的中国 100 m 分辨率基岩深度数据	表征植物从土壤中吸收水分的垂直空间范围,影响土壤水分的可利用量和蒸散发量	Depth-to-Bedrock Map of China at a Spatial Resolution of 100 m
植物可利用水分含量	栅格	基于全球土壤数据库的质地、有机质含量等属性计算	表征土壤持水能力,是土壤质地、有机质含量等的综合反映,决定多少降水能被植被利用而非形成径流	全球土壤数据库(HWSDv2.0)
研究区范围	矢量	由黄河流域边界与甘南州、阿坝州行政边界叠加提取	定义模型运行的统一空间范围,所有栅格数据需依此进行裁剪与对齐	黄河流域边界、阿坝州行政边界
子区域边界	矢量	研究区内的县级行政区划边界	作为结果统计单元,用于分析水源涵养量的县域空间分布特征	县级行政边界数据

2.2.2　水源涵养量计算

水源涵养量是指生态系统通过森林冠层、枯落物层和土壤层对降水的截留、蓄存、调节,从而减少地表径流,增加土壤下渗和滞后产流的能力,其本质是生态系统对水文的调节功能。流速系数反映地表径流流速对水源涵养的影响,水流速度越小,水分有更多时间下渗到土壤中,涵养能力越强。地形指数反映地形对汇流和蓄水能力的影响。地形平坦、汇水面积大的区域,容易积水并促进下渗,涵养能力高。径流系数一般是基于土地利用类型赋予的经验系数,参考相关文献[7,17],结合研究区高寒草甸、沼泽湿地等实际情况,各土地利用类型的流速系数赋值如下:农田 900,森林 200,灌木 300,草原 500,水域 2012,冰雪 150,裸地 800,不透水面 2012。流速系数越大,表示地表越光滑、径流流速越快,水源涵养量越低。地形指数是基于 ArcGIS 10.8 软件栅格计算器工具,采用公式(2)计算得到[18]。土壤饱和导水率基于 HWSD 土壤数据库,提取各土壤类型的砂粒、黏粒、粉粒含量及有机质含量等参数,采用 SPAW 软件中的 Soil Water Characteristics 模块计算得到[19]。最后在流速系数、地形指数、土壤饱和导水率、产水量 4 个指标的基础上,参考相关文献[7],采用公式(3)及 ArcGIS 10.8 软件栅格计算器工具进行叠加分析,得到研究区 1990—2024 年的水源涵养量。计算公式为

$$D(x)=\lg\left(\frac{\mathrm{Ysg}}{\mathrm{Sd}(x)\times \mathrm{Sp}(x)}\right) \tag{2}$$

式中:$D(x)$为像元 x 的地形指数;Ysg为研究区的栅格数量;$\mathrm{Sd}(x)$,$\mathrm{Sp}(x)$分别表示像元 x 的土壤深度和坡度数据。

$$\mathrm{Wh}(x)=\min\left[1,\frac{249}{\mathrm{Vel}(x)}\right]\times\min\left[1,\frac{0.9\times D(x)}{3}\right]\times\min\left[1,\frac{\mathrm{Ks}(x)}{300}\right]\times W(x) \tag{3}$$

式中:$\mathrm{Wh}(x)$为像元 x 的水源涵养量;$\mathrm{Vel}(x)$为像元 x 的流速系数;$D(x)$为像元 x 的地形指数 $\mathrm{Ks}(x)$是像元 x 的土壤饱和导水率;$W(x)$为像元 x 的产水量;$\min\left[1,\frac{249}{\mathrm{Vel}(x)}\right]$为流速系数修正项;$\min\left[1,\frac{0.9\times D(x)}{3}\right]$为地形指数修正项;$\min\left[1,\frac{\mathrm{Ks}(x)}{300}\right]$为土壤饱和导水率修正项,3 项经修正后取值均为 0~1,最终与产水量相乘得到水源涵养量。本公式适用于地形起伏较大、土地利用变化显著的区域。

2.2.3　地理探测器

地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法[20]。基本原理是,如果研究区各子区域的方差之和小于区域总方差,则空间分异性显著,若两变量的空间分布趋于一致,则两者存在统计关联性。基于相关研究结果,采用地理探测器分析研究区水源涵养量时空分异的驱动因素。计算公式为

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{4}$$

式中：h为因变量或驱动因子的分层；N_h，N分别为第h层和全区的单元数；σ_h^2，σ^2分别为第h层或全区因变量的方差。q值域为[0，1]，q值越大则表示驱动因子对因变量的解释力越大。

3 研究结果与分析

3.1 产水量时空变化特征

产水量是表征流域生态水文过程动态特征的关键指标。本研究利用InVEST模型中的产水量模块（annual water yield）对1990—2024年研究区产水量变化进行定量化研究。在时间维度上，1990—2024年研究区平均产水量的年际变化较大，但整体上呈现了波动上升趋势。1990—2000年产水量趋于缓慢下降趋势，于2005年增加至阶段性高峰值188 mm，随后产水量呈现较大起伏，于2015年产水量大幅回落至整个研究期的低谷值84 mm，至2020年，产水量回升至历史最高值230 mm，2024年虽然回落至152 mm，但仍高于1990年的平均产水量。1990—2024年该地区产水量总体上呈波动上升趋势（表2）。这种年际波动显著且总体呈上升态势的演变特征表明研究期内该生态系统对黄河上游流域的产水与水资源补给功能在持续增强。

表2 研究区产水量、水源涵养量变化

Table 2 Changes in water yield and water conservation capacity in study area

年份	平均产水量/mm	平均水源涵养量/mm	水源涵养总量/10^8 m^3
1990年	131	32	14.32
1995年	138	33	14.99
2000年	113	27	12.08
2005年	188	45	20.53
2010年	140	33	15.05
2015年	84	23	11.33
2020年	230	55	25.07
2024年	152	37	16.39

在空间分布格局上，产水量呈现出显著的空间异质性（图1）。总体来看，产水量空间分布具有明显的“西南高，中北低”的特征。产水量高值区主要集中在研究区西南部，包括甘南州玛曲县、碌曲县及阿坝州若尔盖县、红原县。在整个研究期内，上述区域的产水量始终处于高值，该区域的覆盖范围总体呈波动扩大态势。产水量低值区主要分布在甘南州的合作市、夏河县、卓尼县、临潭县及阿坝州的阿坝县，这些区域的产水量长期处于较低水平，多数年份维持在0～100 mm，且低值区的空间覆盖范围变化较小。

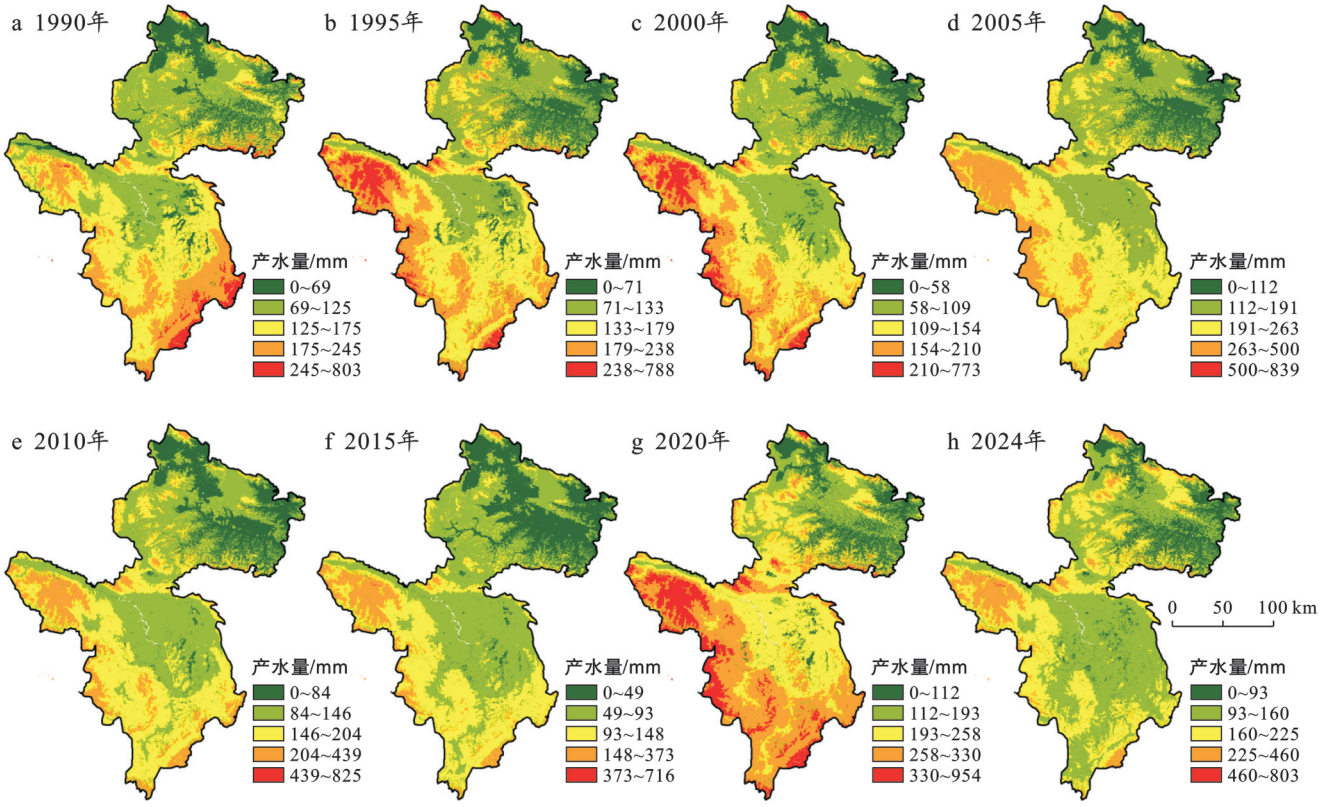


图1 研究区1990—2024年产水量变化

Fig.1 Changes in water yield in study area from 1990 to 2024

3.2　水源涵养量时空变化特征

基于产水量测算结果,利用 ArcGIS 10.8 软件与公式(3)量化评估研究区年平均水源涵养深度与水源涵养总量。计算出年均水源涵养量和水源涵养量总值(表 2)。1990—2024 年研究区年均水源涵养量和水源涵养量总值均呈现出显著的“波动上升”的趋势。从时间上来看,1990 年平均水源涵养量为 32 mm(总量 1.43×10^9 m^3),至 2000 年降至 27 mm(总量 1.21×10^9 m^3),随后迅速增加,2005 年达到阶段性峰值 45 mm(总量 2.05×10^9 m^3),经历 2010—2015 年的振荡回落后,于 2020 年跃升至整个研究期的最高值 55 mm(总量 2.51×10^9 m^3),2024 年虽降低至 37 mm,但仍高于 1990 年的值。这一演变趋势表明,区域水源涵养的总体规模与生态系统的调蓄能力在波动中呈持续扩张趋势(图 2)。

空间分布上,黄河上游阿坝-甘南段水源涵养量在空间上呈现显著的“南高北低”的特征(图 3)。水源涵养高值区主要集中在研究区南部的玛曲县、阿坝县与红原县。这些区域在整个研究期内均保持极高的涵养水平,是维系整个研究区涵养水源的核心功能区。相对而言,水源涵养低值区集中连片分布于北部的夏河县、合作市及临潭县等地。该区域涵养量长期偏低,是区域内水源涵养能力的薄弱区。此外,水源涵养量的年际动态变化呈现出明显的“南北分化”差异。南部核心区波动幅度剧烈,其高值区范围在不同年份间呈现出显著的扩张与收缩特征,而北部薄弱区则相对稳定、波动微弱。1990—2024 年黄河上游阿坝-甘南段平均水源涵养量和水源涵养总量整体上呈现“时间上波动上升,空间上南多北少”的演化规律。表明该区域的生态系统水文调节状态整体处于较优水平,对黄河上游的调蓄和补给水生态意义重大,生态服务功能在持续增加。

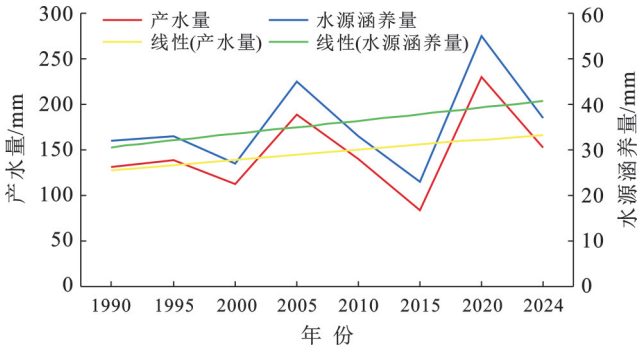


图 2　研究区产水量、水源涵养量变化趋势

Fig.2　Trends in water yield and water conservation capacity in study area

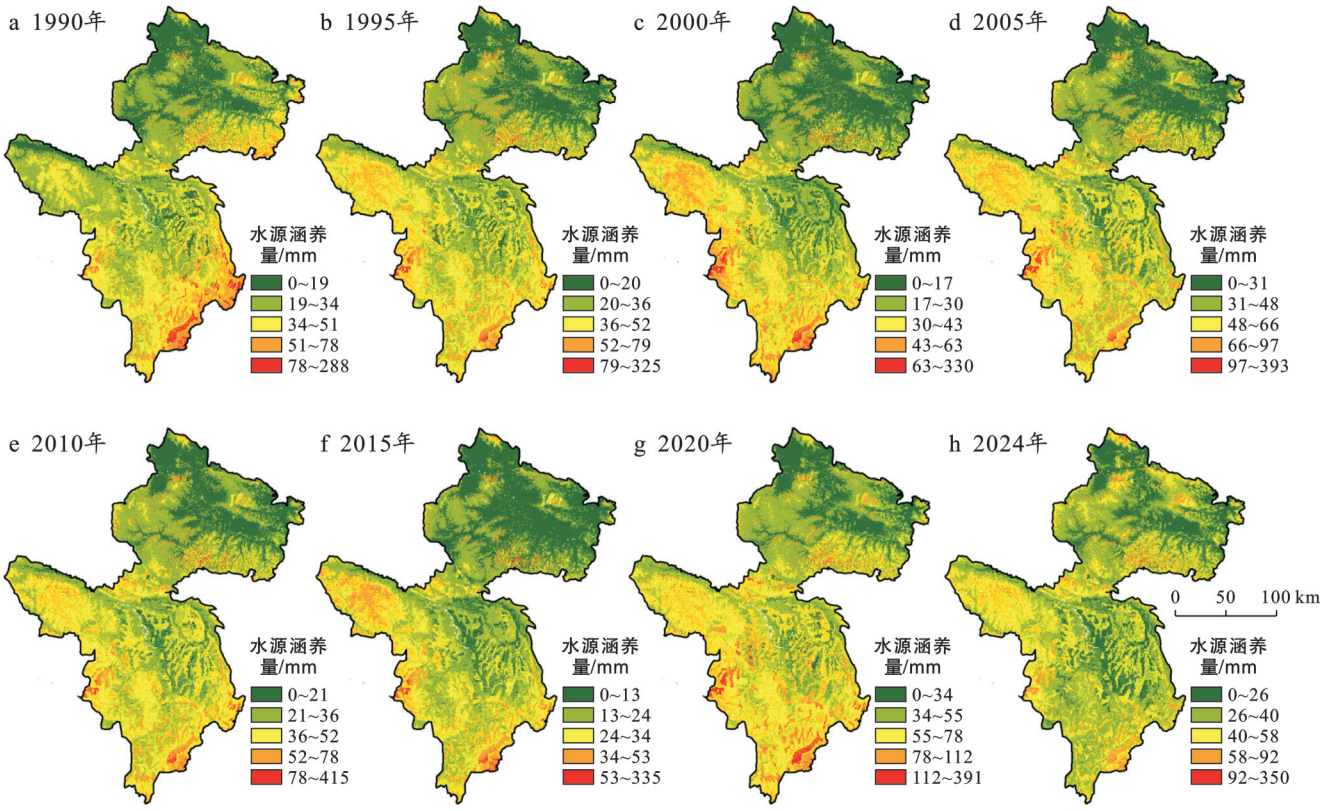


图 3　研究区 1990—2024 年水源涵养量变化

Fig.3　Changes in water conservation capacity in study area from 1990 to 2024

3.3 水源涵养驱动力分析

为深入揭示黄河上游阿坝-甘南段水源涵养功能空间格局的形成机制，本研究采用地理探测器模型，选择 2000，2005，2010，2015，2020 和 2024 年 6 个年份，定量探测 PRE（降水量）、ET（蒸散量）、LUC（土地利用）、NDVI，DEM，SLOP（坡度）6 个要素对水源涵养量的影响，并解析各因子对水源涵养量空间分异的独立解释力及交互解释力（图 4）。地理探测器要求自变量为分类变量，因此需将连续型自变量进行离散化处理。本研究基于同一类内方差最小，类间方差最大的原则，运用 ArcGIS 10.8 软件的空间分析工具和数据管理工具，采用自然断点分类法（natural breaks）对 6 个连续因子进行离散化处理，各因子统一为 9 级（$L=9$）。创建 1 000 m×1 000 m 的渔网工具，运用地理探测器解析水源涵养量空间分异的驱动因子。采用置换检验进行显著性检验，按 5 类规则判定交互类型，并通过多尺度对比验证了结论的可靠性。

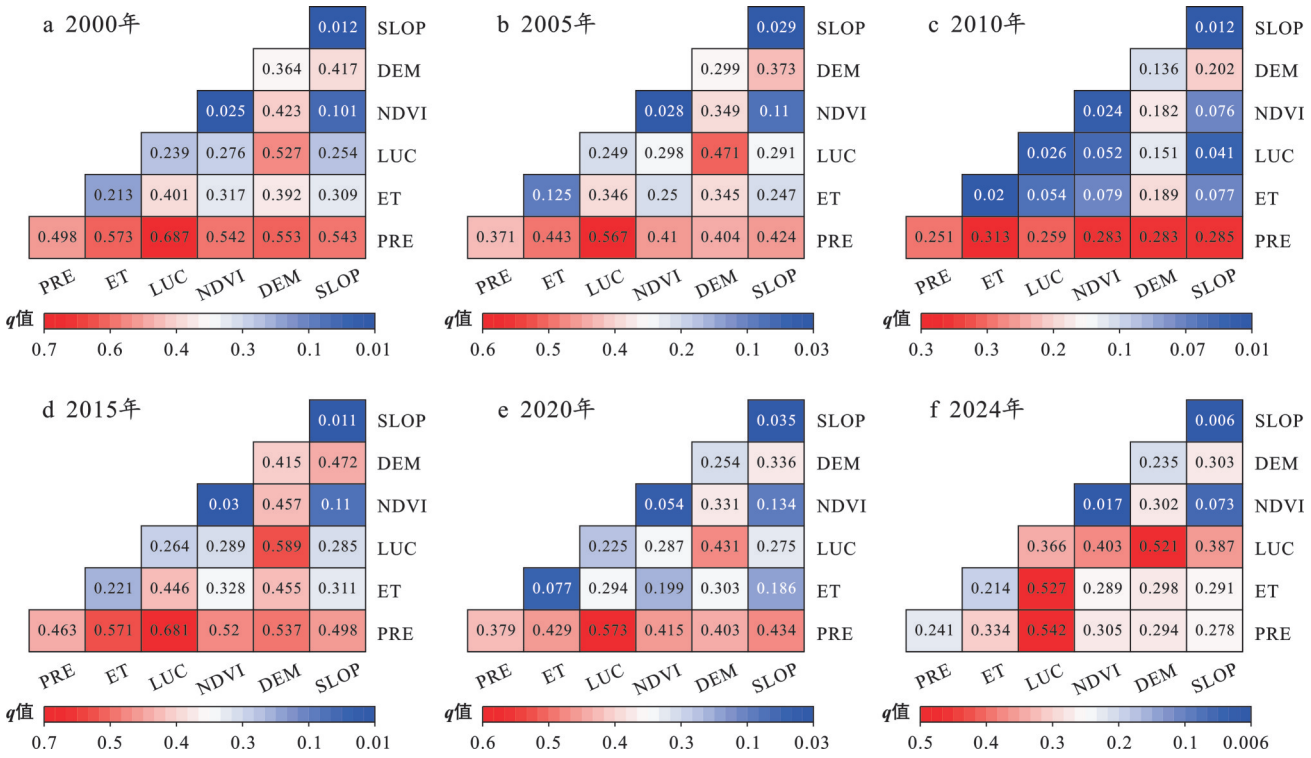


图 4 水源涵养量空间分异驱动因子交互探测 q 值矩阵

Fig.4 q-value matrix of interaction among driving factors of spatial differentiation of water conservation capacity

3.3.1 单因子探测

单因子探测结果显示，降水量始终是影响水源涵养量强弱的主导因子。2000 和 2015 年降水量的 q 值分别为 0.498 和 0.463，表现出对水源涵养量极强的解释力。土地利用变化的 q 值在多数年份仅次于降水量，是影响水源涵养量的第二关键因子，表明近几十年人类活动通过改变地表覆被对水源涵养功能的影响日益增强。海拔高度作为核心地形因子，在 2000—2015 年表现出较强的解释力，q 值在 0.299～0.415，体现了地形对水热条件再分配的基础性控制作用。蒸发量的解释力存在较大年际波动，其影响力在 2000 和 2015 年相对突出，但在 2010 和 2020 年则显著减弱，这可能与不同年份的气候干湿状况有关。NDVI 与坡度因子的解释力均较弱，说明 NDVI 及坡度的空间变化对本研究区水源涵养量大小影响有限。关键因子的影响力在时间序列上呈现阶段性变化。土地利用因子的解释力在 2000—2024 年整体呈上升趋势，尤其在 2020—2024 年其影响力与降水量相当甚至反超，这表明在气候变化背景下，人类活动主导的土地利用/覆被变化已逐渐成为驱动区域水源涵养功能空间重构的关键力量。

3.3.2 交互探测

交互探测结果揭示出任意两个驱动因子间的交互效应解释水源涵养量空间差异的程度均明显比单一因子单独作用的交互效应要大，说明研究区水源涵养功能的空间格局是多要素复杂非线性耦合的结果。交互探测 q 值（图 4）越大交互作用越强。其中，土地利用∩降水量是整个时间段中稳定最强、解释力最高的交互组合之一，2000 和 2015 年交互 q 值分别高达 0.687，0.681。这从机理上阐明在同等降水条件

下,不同下垫面(如高郁闭度林地、高覆盖度草甸与裸地、建设用地)相比,通过冠层截留、枯落物持水及土壤入渗等机制的差异,导致了截然不同的水源涵养效能。这一交互作用深刻揭示了LUCC调控区域水文循环的核心机制。DEM与降水量交互分析的q值也较高,表明复杂地形不仅通过迎风坡抬升改变了降水空间分布,还约束了人类土地利用方式的选择,二者叠加放大了不同地类的水文效应。

3.4　土地利用格局演变的水源涵养效应

鉴于LUCC是驱动水源涵养时空演变的关键人为因子,本研究基于地表覆被的水源涵养能力差异,将研究区土地利用重分类为高涵养林地、中涵养草地、水体与湿地、低涵养耕地及极低涵养地表5大功能类型(表3)。结合土地利用转移矩阵(表4)系统解析其演变规律。1990—2024年研究区土地利用演变呈现出显著的阶段性特征:①1990—2000年各类用地转换频繁,受气候变化和农业开垦影响,研究区水体与湿地面积发生锐减,由1 010.9 km^{2}迅速下降至584.7 km^2,大量湿地退化并转化为草地;同时,低涵养的耕地面积有所扩张,增加至770.5 km^2,区域整体生态系统结构与蓄水保水功能遭到一定的削弱。②2000—2010年得益于"退耕还林还草"等生态工程的实施,地类转换趋于平稳。低涵养耕地面积收缩,降至734.2 km^2,大量低效耕地向中涵养草地流转;高涵养林地稳步增长。建设用地、裸地等极低涵养地表面积由15.7 km^{2}锐减至9.1 km^2,降幅42%,大量低效用地向草地等生态功能用地流转。③2010—2024年在国家湿地保护及生态文明建设的推动下,高生态功能用地显著扩张,高涵养林地持续增长,水体与湿地面积从2010年的339.0 km^{2}激增至2024年的495.2 km^2,增幅46.1%,大量草地向水体与湿地演替。耕地面积加速缩减,降至649.3 km^2。研究区土地利用结构呈现出高涵养类型增加,中涵养类型优化,低涵养类型控制的显著向好格局,有效提升了地表冠层截留与土壤蓄水效能。桑基图(图5)也显示,1990—2024年研究区草地向湿地转化逐年增加,尤其在2000年后趋势明显;耕地向草地的转化规模大于草地向耕地的转化,表明退耕还草效果显著;极低涵养地表主要来源于草地和耕地的转入,反映局部地区存在生态退化风险;林地与湿地整体稳定。上述转化过程是水源涵养功能演变的核心驱动力。

表3　研究区土地利用与覆被变化分类

Table 3　Land use/cover change classification of study area

分类代码	名 称	包含类型	生态水文功能
1	高涵养林地	森林、灌木	乔木和灌木林地具有最高的冠层截留、枯落物持水和促进土壤下渗的能力,是水源涵养功能最强的自然生态系统
2	中涵养草地	草原	高寒草甸和草原是研究区面积最大的生态系统,具有较好的地表覆盖和土壤蓄水能力,是重要的水源涵养和径流调节载体
3	水体和湿地	水域、湿地	河流、湖泊是水资源的直接储存形式;沼泽、泥炭地具有巨大的持水、蓄水和净化功能。二者在水文循环中作用直接且关键,功能相近,故合并
4	低涵养耕地	农田	农业活动会改变土壤结构,其水源涵养能力通常显著低于林地、草地。作为主要的人类活动影响类型,需单独归类分析
5	极低涵养地表	建设用地、裸地、不透水面	这3类地表类型的水源涵养能力很弱,合并为极低涵养地表类型

4　讨　论

4.1　水源涵养功能时空演变的驱动机制分析

本研究表明,1990—2024年黄河上游阿坝-甘南段水源涵养量整体呈现波动上升趋势。这一结果与杨良健[21]、鞠琴等[22]人的研究相一致。气候方面,降水作为流域水分的主要来源,对于区域水资源的分配有重要意义。地理探测器单因子分析表明,降水量是决定研究区水源涵养空间分异的"第一自然驱动力"。近几十年来,受全球气候"暖湿化"趋势影响,黄河源及周边区域降水量总体呈增加态势[16]。这一自然水热条件的改善,为该区域植被的生长发育和水源涵养功能的提升提供了适宜的环境支撑。然而,相比于自然演变,人类活动在短时期内对地表下垫面的重塑作用更加突出。本研究表明,土地利用对水源涵养的解释力在2015—2024年迅速增强,成为主导水源涵养空间重构的最关键因素。阿坝-甘南段作为国家重要生态屏障区,自2000年以来先后实施了"退牧还草""天然林保护工程"以及"若尔盖湿地国家级自然保护区建设"等一系列重大生态工程[23-24]。这些政策驱动下的大规模"增绿"与"退牧"行动,直接促成了研究区1990—2000年的"剧烈退化

期”向2010年以后的“功能提升期”转变。林地持续扩张和湿地面积激增，显著提升了冠层截留量和土壤入渗率，表明人为正向干预是近年来区域水源涵养量提升的核心动力[25]。

表4 研究区1990—2024年土地利用转移矩阵

Table 4 Land use transition matrix of study area (1990—2024)

地类	1990—2000年转移面积/km²					2000—2010年转移面积/km²				
	林地	草地	水体和湿地	耕地	极低涵养地表	林地	草地	水体和湿地	耕地	极低涵养地表
林地	4 150.8	197.1	0.0	1.9	0.0	4 501.1	192.8	0.1	1.9	0.0
草地	539.4	38 906.6	105.5	135.4	10.8	306.9	39 265.4	90.7	82.8	2.7
水体和湿地	0.9	529.7	478.1	2.0	0.2	4.3	337.2	239.9	3.3	0.2
耕地	4.9	110.0	0.3	631.2	0.0	3.3	113.4	7.6	646.2	0.0
极低涵养地表	0.0	5.1	0.8	0.0	4.8	0.0	8.8	0.7	0.0	6.2

地类	2010—2024年转移面积/km²					各地类总面积/km²			
	林地	草地	水体和湿地	耕地	极低涵养地表	1990年	2000年	2010年	2024年
林地	4 451.7	362.1	0.0	1.8	0.0	4 349.8	4 696.0	4 815.5	4 861.2
草地	402.4	39 046.7	326.3	114.2	28.0	39 697.7	39 748.5	39 917.5	39 772.3
水体和湿地	1.2	167.2	167.1	0.4	3.1	1 010.9	584.7	339.0	495.2
耕地	5.9	193.5	1.5	532.9	0.4	746.4	770.5	734.2	649.3
极低涵养地表	0.0	2.9	0.3	0.0	6.0	10.7	15.7	9.1	37.5

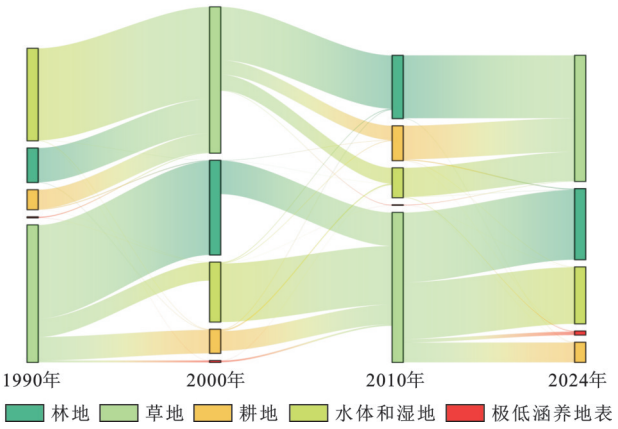


图5 研究区1990—2024年土地利用变化

Fig.5 Land use changes in study area from 1990 to 2024

4.2 土地利用格局转型的生态水文效应与空间差异

研究区水源涵养量在空间上呈现出稳固的“南高北低”格局，且交互探测揭示“土地利用和降水量”的交互解释力最强，这表明不同下垫面在同等气象条件下的截流产流差异。南部的高寒草甸、森林以及若尔盖泥炭沼泽湿地是高涵养核心区。该区域地势相对平缓，高郁闭度的森林与广袤的湿地系统不仅能有效削减降水动能，增加地表糙率，其深厚的枯落物层和高有机质土壤还具备极强的“海绵效应”[26]，从而有效阻滞了地表径流，将大气降水转化为土壤水和地下水。特别是湿地生态系统，其单位面积水源涵养价值极高，在近年来湿地保护政策下其面积的恢复，对整个黄河上游径流丰枯期的平抑作用具有不可替代的价值[27-28]。相对而言，北部的夏河县、合作市等区域表现为低值区。一方面，该区域降水本底条件略逊于南部；另一方面，这里是甘南州人口与城镇扩张相对密集的区域。随着城市化进程，部分自然地表转化为不透水面，截留和下渗能力大幅削弱，导致降水更多转化为地表径流快速流失[29]。同时，北部部分草地长期面临超载过牧的压力，草层变矮，土壤压实，直接导致区域持水能力的下降[30]。因此，正如交互探测结果所示，自然禀赋的差异与人类土地开发模式的空间重叠，共同塑造并固化了“南高北低”的水源涵养格局。

4.3 研究不足与未来展望

本研究基于InVEST模型与地理探测器，定量评估了阿坝-甘南段水源涵养功能的时空演变及驱动力，但仍存在一定的局限性。首先，InVEST模型的水源涵养模块主要基于水量平衡原理，是对水文过程的简化模拟。由于阿坝-甘南段地处青藏高原高寒地带，区域内分布有大面积的多年冻土和季节性冻土。冻融交替过程对土壤入渗、地下水补给以及土壤持水能力有着极其复杂的影响，而目前的InVEST模型尚未能充分捕捉这一高寒区特有的冰冻圈水文过程机制。其次，本研究的数据主要采用年际尺度，忽略了降水和植被生长的年内季节性波动如极端暴雨事件对产流的瞬时影响。同时，参数的设定虽然参考了相关文献和数据库，但在复杂山区可能仍存在局部偏差。

未来研究应考虑以下几个方向：①结合更高时

空分辨率的多源遥感数据和长时间序列的地面气象、水文站实测数据,对模型参数进行更精准的本地化校核;②引入具有明确物理机制的分布式水文模型,重点耦合高寒区冻土融化与地下水潜流过程,以更深入地刻画区域生态水文的微观机理;③在探明现状的基础上,结合多情景模拟,如CMIP6气候模式与不同的空间规划政策,预测未来几十年内气候波动与人类活动叠加下生态系统服务的响应轨迹,从而为黄河上游生态屏障的长效管理与适应性管控提供更具前瞻性的科学依据。

5　结　论

本研究利用InVEST模型与地理探测器,系统分析了1990—2024年黄河上游阿坝-甘南段水源涵养功能的时空演变及驱动机制,得出如下结论。研究期内,区域产水量与水源涵养量整体呈现明显的波动上升态势,表明该区域水源调蓄与补给能力稳步提升,生态屏障功能持续增强;空间上长期维持稳固且显著的"南高北低"分异格局,以若尔盖湿地及高寒草甸森林为主的南部区域为核心高值区且波动剧烈,而北部城镇及农牧交错带则表现为稳定的低值区;驱动力分析证实,降水量与LUCC分别是决定空间分异的第一自然与人为因子,且二者交互作用的解释力最强,随着LUCC解释力的逐年攀升,人类活动对区域水文过程的调控作用日益凸显;此外,研究期内土地利用结构向"高涵养类型增加,低涵养类型收缩"的正向转型,通过优化下垫面性质、促进降水下渗及削减地表径流,构成了驱动区域水源涵养量整体改善的核心物质基础。

参考文献(References)

[1] 李文华,张彪,谢高地.中国生态系统服务研究的回顾与展望[J].自然资源学报,2009,24(1):1-10.
Li Wenhua, Zhang Biao, Xie Gaodi. Research on ecosystem services in China: Progress and perspectives [J]. Journal of Natural Resources, 2009,24(1):1-10.

[2] 张晓宁.黄河源区高寒草地土壤水源涵养功能与植被的时空耦合关系研究[D].兰州:甘肃农业大学,2023.
Zhang Xiaoning. A study on the spatiotemporal coupling between soil water conservation function and vegetation in alpine grasslands of the Yellow River source area [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023.

[3] 张成凤,杨晓甜,刘酌希,等.气候变化和土地利用变化对水文过程影响研究进展[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(4):46-50.
Zhang Chengfeng, Yang Xiaotian, Liu Zhuoxi, et al. Research on the influence of climate change and land use change on hydrological process [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019,40(4):46-50.

[4] 张业彤,王海涛,柴禾蕾.城市下垫面对地表水文循环过程的影响分析:以长春市为例[J].国土与自然资源研究,2022(5):42-45.
Zhang Yetong, Wang Haitao, Chai Helei. Analysis of the influence of urban underlying surface on surface hydrological cycle process: Take Changchun as an example [J]. Territory & Natural Resources Study, 2022(5): 42-45.

[5] 张学真,梁俊峰,胡安焱.人类活动对黑河水文过程的影响分析[J].干旱区资源与环境,2007,21(10):98-103.
Zhang Xuezhen, Liang Junfeng, Hu Anyan. Analysis on Hei River's hydrology process influence occurred by people's activities [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007,21(10):98-103.

[6] 张秀霞,杜衡,李旺平,等.基于InVEST模型的黄河流域水源涵养时空演变及其影响因素[J].生态学报,2025,45(24):12324-12336.
Zhang Xiuxia, Du Heng, Li Wangping, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of water conservation in the Yellow River basin using the InVEST model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(24):12324-12336.

[7] 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.

[8] 王诗媛,向洋,魏唯一,等.黄河中游城市群水源涵养时空演变特征及影响机制分析[J].人民黄河,2025,47(6):110-116.
Wang Shiyuan, Xiang Yang, Wei Weiyi, et al. Analysis of the spatiotemporal evolution characteristics and impact mechanism of water conservation in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yellow River [J]. Yellow River, 2025,47(6):110-116.

[9] 赵高磊,田世民,陈融旭,等.黄河源区水源涵养与径流演化趋势[J].人民黄河,2025,47(12):35-41.
Zhao Gaolei, Tian Shimin, Chen Rongxu, et al. Water conservation and runoff evolution trend in the source region of the Yellow River [J]. Yellow River, 2025,47(12):35-41.

[10] 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.
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.

[11] 吕铁冰,苏伟,贾梓琦,等.基于PLUS-InVEST模型的河北省承德市水源涵养功能预测[J].水土保持通报,2026,46(1): 344-354.
Lyu Tiebing, Su Wei, Jia Ziqi, et al. Prediction of water conservation function in Chengde City of Hebei Province based on PLUS-InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(1):344-354.

[12] 傅伯杰,陈利顶,马克明.黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响:以延安市羊圈沟流域为例[J].地理学报,1999,54(3): 241-246.
Fu Bojie, Chen Liding, Ma Keming. The effect of land use change on the regional environment in the Yangjuangou catchment in the Loess Plateau of China [J]. Acta Geographica Sinica, 1999,54(3):241-246.

[13] Richard S, Rebecca Chaplin-Kramer, Spencer A W, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide [M]. Stanford: The Natural Capital Project, 2015.

[14] 水利部黄河水利委员会.黄河水资源公报[R].郑州:水利部黄河水利委员会,2022.
Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. Yellow River water resources bulletin [R]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, 2022.

[15] 姚檀栋,陈发虎,崔鹏,等.从青藏高原到第三极和泛第三极[J].中国科学院院刊,2017,32(9):924-931.
Yao Tandong, Chen Fahu, Cui Peng, et al. From Tibetan Plateau to third pole and pan-third pole [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017,32(9): 924-931.

[16] Yan Fapeng, Shangguan Wei, Zhang Jing, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters [J]. Scientific Data, 2020,7:2.

[17] 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.

[18] Sørensen R, Zinko U, Seibert J. On the calculation of the topographic wetness index: Evaluation of different methods based on field observations [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2006,10(1):101-112.

[19] Saxton K, Willey P. The SPAW Model for Agricultural Field and Pond Hydrologic Simulation [M]. Watershed Models. Boca Raton: CRC Press, 2005:400-435.

[20] 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.

[21] 杨良健,章锦河,薛华菊,等.三江源国家公园生态风险与生态系统健康对生态系统文化服务的影响[J].生态学报,2026,46(10):5119-5132.
Yang Liangjian, Zhang Jinhe, Xue Huaju, et al. The impact of ecological risk and ecosystem health on cultural ecosystem services in the Sanjiangyuan National Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2026,46(10):5119-5132.

[22] 鞠琴,卜媛媛,申同庆,等.黄河水源涵养区生态系统服务要素时空演变及权衡与协同分析[J].水资源保护,2025,41(2):38-46.
Ju Qin, Bu Yuanyuan, Shen Tongqing, et al. Spatiotemporal evolution and trade-off and synergy analysis of ecosystem service factors in the Yellow River water conservation area [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2):38-46.

[23] 雒慧霞,李杰,李广,等.甘南黄河水源补给区生态系统服务价值时空演变[J].环境科学与技术,2024,47(9): 210-224.
Luo Huixia, Li Jie, Li Guang, et al. Spatiotemporal evolution of ecosystem service value in the Yellow River water recharge area in Gannan [J]. Environmental Science & Technology, 2024,47(9):210-224.

[24] 邵全琴,樊江文,刘纪远,等.三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估[J].地理学报,2016,71(1):3-20.
Shao Quanqin, Fan Jiangwen, Liu Jiyuan, et al. Assessment on the effects of the first-stage ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan region [J]. Acta Geographica Sinica, 2016,71(1):3-20.

[25] Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, Xiao Yi, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital [J]. Science, 2016,352(6292):1455-1459.

[26] 龚诗涵,肖洋,郑华,等.中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J].生态学报,2017,37(7):2455-2462.
Gong Shihan, Xiao Yang, Zheng Hua, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(7):2455-2462.

[27] 蒋桂芹,毕黎明,贺逸清.若尔盖湿地水源涵养时空变化及影响因素[J].科学技术与工程,2021,21(29): 12688-12694.
Jiang Guiqin, Bi Liming, He Yiqing. Spatiotemporal variation of water conservation and its influencing factors in Zoigê wetland [J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(29):12688-12694.

(下转第404页)