

DOI: 10.20103/j.stxb.202406211439

薛宝林,周璇,王国强,阿膺兰,王运涛,刘焱序.雅鲁藏布江生态系统水源涵养功能变化及其驱动因素.生态学报,2025,45(7):3157-3168.

Xue B L, Zhou X, Wang G Q, A Y L, Wang Y T, Liu Y X. Changes in water retention function of the Yarlung Zangbo River ecosystem and identification of its leading influencing factors. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3157-3168.

雅鲁藏布江生态系统水源涵养功能变化及其驱动因素

薛宝林¹, 周璇¹, 王国强^{1,*}, 阿膺兰¹, 王运涛¹, 刘焱序²

¹ 北京师范大学地理科学学部 卫星应用创新研究中心, 北京 100875

² 北京师范大学地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

摘要:雅鲁藏布江流域内植被茂盛、种类丰富,蕴含着丰富的天然水能资源,是变化背景下的生态环境脆弱敏感的典型代表区之一。水源涵养功能是生态系统服务中的一项重要功能,研究水源涵养功能的空间分布特征和演变规律及其主要影响因素对该地区的水资源保护、开发、利用和综合治理具有重要的意义。以往的研究多集中于河道里的水资源演变规律,较少关注流域内不同生态系统类型下的水源涵养量以及不同水分收支变量对涵养功能的贡献。因此,为了准确量化流域内不同生态系统的水源涵养能力并分析其可能的驱动机制,研究验证了 VIC 模型在雅江流域的适用性并基于该模型量化了流域内水分收支变量的变化情况,基于水量平衡原理对过去 35 年间生态系统的水源涵养能力变化进行定量评估分析,按照不同生态系统类型对比了流域内的涵养水量,将模拟所得水分变量纳入驱动因素,结合地理探测器识别多个驱动要素的贡献程度。研究结果表明:(1)VIC 模型在雅鲁藏布江流域内适用性良好,得到流域内的水分收支变量在 35 年间有较为明显的变化。其中,降水量 7.01 mm/10a 的速率增长、植被蒸散发与地表径流深以 6.15 mm/10a 和 4.81 mm/10a 的速率增长,而地下径流、植被截留和土壤水分没有较明显的变化趋势。(2)在 1980—2015 年间,流域的水源涵养能力呈现逐年降低的变化趋势,变化速率为-0.20 亿 m³/a,其中上、中、下游分别涵养 71.75、81.01、82.42 亿 m³的水量,全流域平均可以涵养约 235.18 亿 m³的水量。(3)流域内覆被以林草为主,且林地和低等覆盖度的草地所表现的涵养水量最高,分别是 60.91、63.58 亿 m³。(4)降水增长和蒸散发需求的增加是影响该地区水源涵养量的主要因素,共同导致了雅鲁藏布江水源涵养量总体减小。以上生态系统水源涵养能力变化指征着生态敏感脆弱区植被水分支撑功能的降低,在区域生态恢复中应当引起重视。

关键词:雅鲁藏布江;水源涵养功能;水分收支;VIC 模型;地理探测器

Changes in water retention function of the Yarlung Zangbo River ecosystem and identification of its leading influencing factors

XUE Baolin¹, ZHOU Xuan¹, WANG Guoqiang^{1,*}, A Yinglan¹, WANG Yuntao¹, LIU Yanxu²

¹ Innovation Research Center of Satellite Application (IRCSA), Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

² State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The Yarlung Zangbo River Basin, a typical area characterized by ecological fragility and sensitivity to environmental changes, boasts diverse vegetation and plentiful water energy resources. Water retention is an important function of ecosystem services. It is important to study the spatial-temporal distribution characteristics and influencing factors of water retention for the water protection, development, utilization and comprehensive management of water resources in the region. However, previous studies have mostly focused on the runoff response within the river basin, neglecting the water retention capacity of various ecosystem types within it and the contribution of different water budget variables to retention function. To accurately quantify the water retention capacity of different ecosystems, this study verified the applicability of

基金项目:国家杰出青年科学基金(52125901)

收稿日期:2024-06-21; 网络出版日期:2025-01-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanggq@bnu.edu.cn

the VIC model in the Yarlung Zangbo River Basin and quantified changes in water budget variables. It quantitatively evaluated and analyzed the changes in the water retention capacity of the ecosystem over the past 35 years, compared the water retention capacity in the basin according to different ecosystem types, and included water variables in the driving factors combined with the geographic detector index to identify the contribution of factors. The results show that: (1) The study area's climate conditions exhibit trends of warming and increasing humidity. During the 35 years, precipitation increased at a rate of 7.01 mm/10a, and vegetation evapotranspiration and surface runoff depth increased at rates of 6.15 mm/10a and 4.81 mm/10a, respectively. However, there was no obvious trend in groundwater runoff, vegetation interception, and soil moisture. (2) From 1980 to 2015, the water retention capacity of the basin exhibited a yearly decreasing trend, changing at a rate of -0.02 billion m^3/a . The upper, middle and lower reaches conserved 7.175 billion, 8.101 billion and 8.242 billion m^3 of water, respectively, and the entire basin could conserve an average of about 23.518 billion m^3 of water. (3) The geographic detector results indicate that increases in precipitation and evapotranspiration are the primary factors influencing water retention fluctuations in the region, contributing to the overall decline in the Yarlung Zangbo River's water retention capacity. The above changes in the water retention capacity of the ecosystem indicate a decrease in the water support function of vegetation in ecologically sensitive and fragile areas, which should be taken seriously in regional ecological restoration.

Key Words: The Yarlung Zangbo River Basin; water retention function; water budget; VIC mode; geographic detector

生态系统的服务功能是指生态系统维持所提供的自然环境与效用,是人类生存与发展必不可少的环境条件^[1]。生态系统内的植被对水分传输的调蓄效用,是其供给和调节服务的重要内容^[2-3],被称为生态系统的水源涵养功能。其所蕴含的植被与水分传输之间的作用机理,是生态水文学研究领域长期关注的热点。当前,学界关于生态系统水源涵养功能的研究,已经由最初的森林对降水的拦截作用向多尺度、多方向、多功能扩展,包括灌丛、草地、湿地甚至湖、库、坑、塘等多种涵水介质的降水截持、蓄水固土、改善下垫面、保护多样性以及调节气候等多种服务^[4-6]。基于不同生态系统类型量化水源涵养功能并进行区域性的综合评估,是生态系统保护和水资源科学评价、配置等工作的重要内容,具有理论和实践方面的双重意义。

随着水源涵养概念的扩展,水源涵养功能的量化方法也随之增加,常用的如生态模型 InVEST^[7-8]、分布式水文模型 SWAT^[9-10]、陆面植被模型等。VIC 模型(Variable Infiltration Capacity Model,可变下渗能力模型)作为一个较为成熟的陆面模型,能同时进行陆-气间能量平衡和水量平衡的模拟。有研究表明,该模型对水量平衡中的水分收支变量有更精准的刻画,能依据水量平衡原理得到更为精准的水源涵养功能值^[11-12]。

现有研究对于水源涵养功能的贡献分离通常从气候、土壤、地形、土地利用类型等方面进行,较少的研究考虑到不同层次的水分收支对水源涵养功能的解释。有研究表明,在林地生态系统中,叶片对单次降水的截留以及地表枯枝落叶层对水分的存蓄对自然植被为主的区域贡献较大^[13],而在湿地生态系统中,地表径流的产生主导该地区水源涵养功能的高低^[14]。因此量化不同水分收支变量对水源涵养功能的解释能力,是一类亟待解决的前沿问题。作为一种广泛使用的多因子交互探测方法,地理探测器能够全面解释空间分异的多种驱动机制,常被用于分离驱动要素对生态系统功能的贡献中。

基于此,本研究首先验证了 VIC 模型的在径流上的适用性,并基于模拟结果得到了精度较高的水分收支变量变化情况;基于长时间序列的遥感监测数据集-土地利用数据,根据流域特点,将其按照空间异质性划分为上中下游,并针对每个流域不同的生态系统覆被情况,对其进行了水源涵养这一关键生态系统服务的定量评估;将不同的水分收支变量纳入驱动要素,选择了十类影响因子,结合地理探测器对其贡献程度进行了分离。本研究对保障生态脆弱敏感区的水源地区的生态环境和经济社会可持续发展具有重要意义。

1 研究区概况

雅鲁藏布江流域是我国重要的生态水资源富集地,广阔的地域优势使流域内的自然资源具有明显的空间

分异性,其内的水资源存在严重的分配不均的问题。雅鲁藏布江(Yarlung Zangbo River)发源于杰马央宗冰川,自西向东贯穿青藏高原南部。境内河流全长 2057 km,流域面积约占 24 万 km²,年径流总量为 1395.1 亿 m³,年平均流量为 4425 m³/s^[15]。流域在空间上呈现狭长的柳叶状,地势起伏大(145—7261 m),东高西低(图 1)。流域内气候分异明显,年降水深由上游向中下游增高(500—4000 mm)。本研究根据雅江干流上设置的 2 座水文观测站点(奴各沙站、奴下站)的地理位置对雅鲁藏布江流域进行划分,由西至东依次为雅鲁藏布江流域的上游、中游以及下游,子流域面积分别为 7.2 万、7.2 万、5.1 万 km²。

流域内覆被以自然植被为主,2000 年以后具有以林地为主的植被扩张趋势,同时受地形地势影响,植被的破碎化程度较高^[16-17]。流域内的上中下游分区内具有较明显的植被分异现象,具体表现为上、中游以草地为主,而下游以林地为主。如图 1 所示,雅江上游内以裸地与草地分散在流域内部为主,两者面积占比 90%以上;中游林地和不同覆被的草地分布较为平均,面积占比均约为 20%,同时检测到以占比约为 5%的耕地为主要方式的人类活动;下游自然植被类型以林地为主,主要分布在雅江流域出口,占比高达 50%。

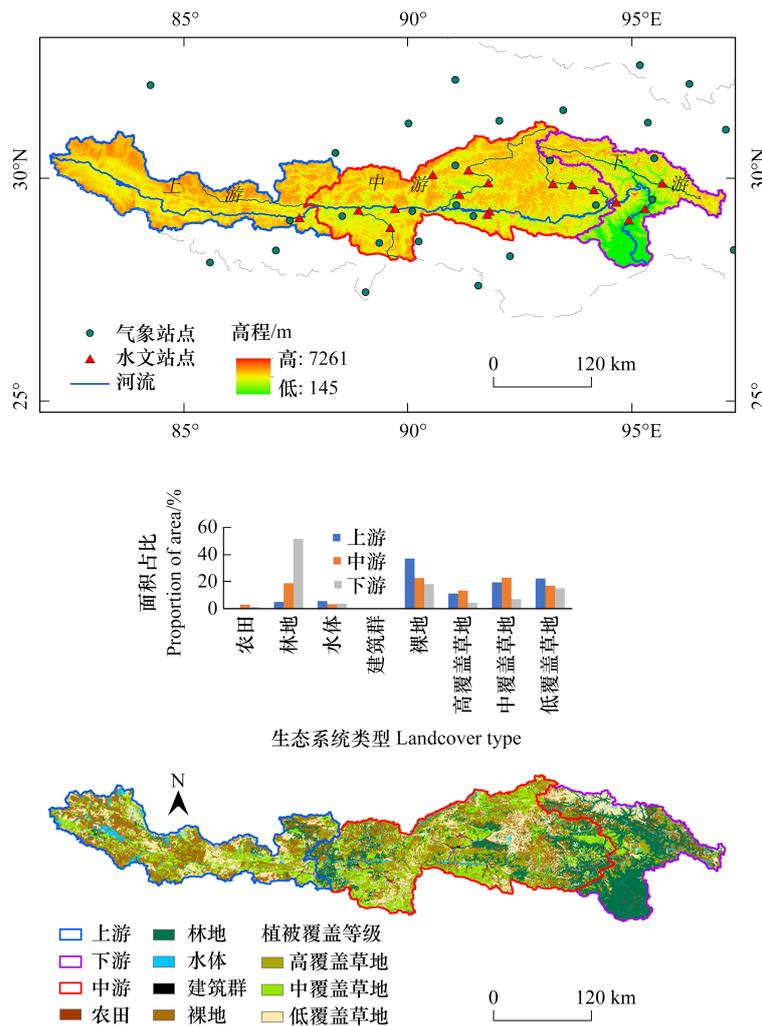


图 1 雅鲁藏布江流域概况

Fig.1 Location of the study area and spatial distribution of land use types of the study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

数字高程数据采用 NASA CGIAR- CSI 90m 高分辨率的 SRTM 数字高程数据,从而进行水系和流域的划

分与提取。模型的植被参数输入数据采用马里兰大学由 NOAA-AVHRR 数据制备而成的全球 1 km 的陆地覆盖分类数据,并参照全球陆面数据同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)的 S1 静态植被参数库制备而成。土壤输入数据采用中山大学的中国区土地和气候模拟的土壤粒径分布数据集及中国陆面模拟土壤数据集,空间分辨率约为 1 km。气象输入数据采用中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)中的逐日最高气温、最低气温、降水、风速数据,根据雅江地理位置,选取西藏自治区与青海省内包括改则站等共 30 个气象站点数据,将其参照 WorldClimate 中的数据采用薄板样条插值方法(tps)插值到整个流域,空间分辨率为 0.083°。径流观测数据来自水文年鉴中奴下站的月径流数据。土地利用分类数据采用中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)的 1980—2015 每五年一期共 8 期数据,数据采用二级分类系统,一级分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 大类,二级主要根据土地资源的自然属性,分为 23 个子类型。雅江流域林草丰茂、种类繁多,本研究基于雅江的天然植被覆盖情况,采用一级与二级地类相结合分类的方式,在其余一级地类保持不变的基础上,增加高、中、低覆盖度的三类草地分类。

2.2 水源涵养量化方法

VIC 模型(Variable Infiltration Capacity Model, 可变下渗能力模型)是应用较为广泛的大尺度陆面分布式水文模型之一,其网格化特性允许陆面网格存在独立的土壤、植被类型,考虑其同陆气间交互的水分收支和能量收支过程,同时嵌套气候模式和水资源模型以评价气候变化对水资源的影响,这导致 VIC 模型可以对水文变量进行较为精准的刻画^[18-21]。生态系统的水源涵养功能是区域生态系统直接参与水分循环的一部分,影响着各种水分分支变量分配的同时也对水分收支结果有所响应。因此,本研究在 VIC 模型的模拟基础上对不同生态系统的水源涵养功能进行量化分析。

基于陆面过程计算的水源涵养能力值通常按照水量平衡原理,定义为次降水过程中降水量和地表径流量、冠层截留量的差值^[22],如式(1)。次降水过程产生的地下径流量、地表径流量和植被蒸散发分别用于评估水源涵养的补枯、削洪、维持植被生态系统用水功能。根据生态系统实际面积,计算得到对应的水源涵养功能值^[23],如式(2):

$$WR_c = \sum_{i=1}^n (P_i - R_{Si} - E_c) \quad (1)$$

$$WR_r = WR_c \times A_i \quad (2)$$

其中, WR_c 为流域的水源涵养能力, mm; P_i 为流域次降水量, mm; R_{Si} 为次降水过程中产生的地表径流, mm; E_c 为次降水过程中植被冠层截留量, mm; WR_r 为 i 类生态系统的水源涵养量, 亿 m^3 ; A_i 为陆地生态系统对应面积, i 为生态系统类型。

为了详细说明上中下游的流域内水源涵养能力空间分布及其变化情况,根据划分的雅鲁藏布江流域的上中下游,将其按照填洼、累积流量、以及水系提取步骤进一步划分为不同的集水区,其中上游 8 个小流域,中游 18 个小流域,下游 8 个流域,共 34 个小流域,根据划分的小流域内的平均值代表该小流域内的水源涵养能力值。

基于 1980—2000 年奴下水文站实测月径流量 (m^3/s) 对模型的模拟精度进行验证。率定期为 1980—1990 年,验证期为 1991—2000 年,采用相关性系数 (R^2) 和 Nash 效率系数 (NSE) 对模型模拟效果进行评价,当 $R^2 \geq 0.6$, $NSE \geq 0.7$ 的时候,认为模型模拟精度较高,结果可信。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

其中, Q_o 和 Q_s 分别表示径流观测值与径流模拟值, m^3/s 。 $\overline{Q_o}$ 代表观测径流的平均值, x_i, y_i 分别代表某 i 时刻的观测值与模拟值。

2.3 水源涵养归因方法

地理探测器是一种用于检测空间异质性并解释其背后驱动因素的新型统计方法^[24-25]。本研究主要利用地理探测器中的因子探测器揭示雅江流域水源涵养功能的主要影响因素,并分析各因子之间对于水源涵养功能分布的相互作用。本研究主要选取 10 个指标探究水源涵养功能的影响因素^[26-27]。其中,地表高程、坡度表征地形地势,降水、气温表征气候变化,NDVI 表征植被覆盖,同时结合模型计算得到的水分变量(蒸散发、冠层截留、地表径流、地下径流、土壤含水量),共同组成影响该地区水源涵养能力的影响因子(X_i)。由于指标类型不同,为满足地理探测器的输入数据要求,同时为了避免量级差异对贡献率的影响,所有变量在计算前均经过了归一化处理。将因子输入地理探测器,得到不同分区中各因子对水源涵养能力(Y)的贡献。地理探测器用于量化不同指标对水源涵养能力的影响程度,通常以 q 值度量。计算公式为:

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

式中, $h=1, 2, 3, \dots$, 表示自变量的具体类型; L 表示自变量或因变量的层数,即分类或分区; N 分别表示第 h 层和整个区域的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为第 h 类标准差和整个区域的标准差。 q 的取值范围为 $[0, 1]$, q 值越大,表明影响因素对水源涵养能力变化的解释能力越强,反之则越弱。

3 结果分析

3.1 VIC 模型验证结果

采用 1980—1990 的雅鲁藏布江下游出口处站点——奴下站实测月尺度径流数据对搭建的 VIC 模型的适用性进行验证,率定、验证后得到系数结果如表 1。根据公式(3)和公式(4)的计算结果, R^2 和 NSE 分别为 0.92 和 0.91,均通过了精度检验,证明 VIC 模型在雅江对于水分变量的适用性较好。如图 2 所示,根据对比结果来看, VIC 模型对径流的模拟效果在枯水期与实测径流较为一致,而对较高的洪峰模拟结果有低估的情况。

表 1 VIC 模型系数表

Table 1 Parameters of the VIC model in Yarlung Zangbo River Basin

参数解释 Description of parameter	参数 Parameter	取值范围 Typical range	结果 Value
可变下渗曲线方程幂 Shape parameter of the VIC curve	B	0.001—5.5	5.5
非线性基流占基流最大流速的比例 Fraction of Dm where non-linear baseflow occurs/%	Ds	0.001—1.0	0.85
基流最大流速 Maximum baseflow that can occur from the lowest soil layer/(mm/day)	Dm	0.1—30	4
非线性基流发生时占饱和和土壤含水量的比例 Fraction of maximum baseflow that can occur from the lowest soil layer/%	Ws	0.1—1.0	0.7
第二层土壤厚度 Soil depth in meters of second soil layer/m	d2	0.1—3.0	0.105
第三层土壤厚度 Soil depth in meters of third soil layer/m	d3	0.1—3.0	3

可变下渗能力 Variable infiltration capacity

3.2 水源涵养功能量化

本研究共整理了雅江区域的降水量、植被蒸散发、地表径流量、地下径流量、土壤蓄水深和植被截留量共 6 个水分收支要素变化情况,结果如图 3 所示。研究结果表明,在 1980—2015 年间,其他水分收支和降水量

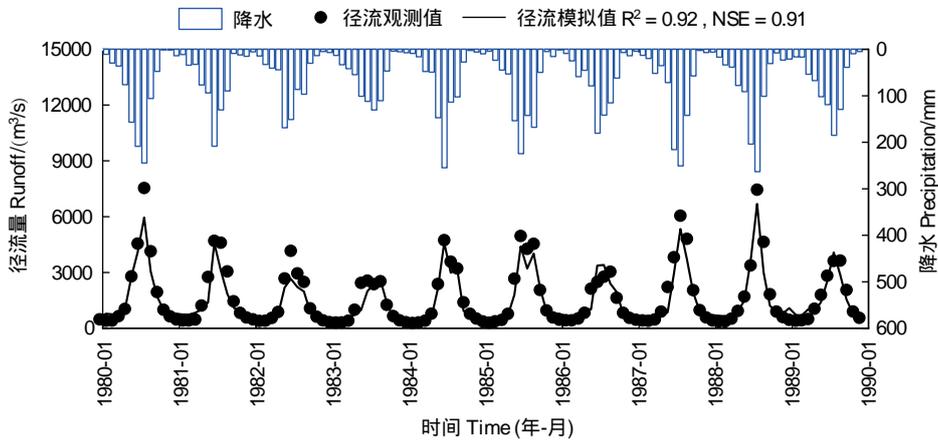


图 2 VIC 模型模拟结果验证

Fig.2 Runoff validation of VIC model in Yarlung Zangbo River Basin

VIC: 可变下渗能力

变化趋势较为一致,经过 Sen 斜率计算,水分收支量均呈缓慢的增长趋势,说明该地区的水分变量增多,同时受降水影响较大。在 35 年间,流域的平均降水量变化范围为 377—566 mm,降水量最小值发生在 1992 年,最高值发生在 1998 年,同时以 7.01 mm/10a 的变化速率增长,在全球增温的背景下,研究区域的气候条件呈现暖湿化的变化趋势。在水分收支变量中,植被蒸散发的增长趋势较为明显,变化范围为 387—545mm,变化趋势为 6.15 mm/10a,说明植被在流域暖湿化的影响下对水分的消耗也在增加,同时地表径流量也在以每 5 年 4.81 mm 的速率增加,而地下径流、植被截留和土壤水分没有较明显的变化趋势,说明降水的增加主要促进了蒸散发和地表径流的产生。

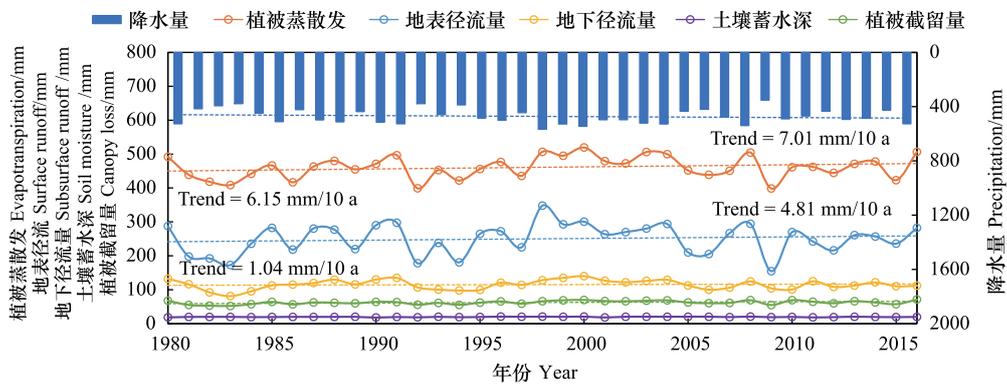


图 3 研究区生态水文要素量化结果

Fig.3 Eco-hydrologic components of the study area obtained by VIC model

Trend: 各水分收支要素变化速率

随着以上水文变量的变化,根据公式(1)计算得到每年的水源涵养能力如图 4 所示。在 1980—2015 年间,流域内的水源涵养能力呈现逐年降低的变化趋势,变化范围为 329—424 亿 m³变化速率为 -0.20 亿 m³/a。35 年间的波动最强烈的时期也发生在 2005—2010 年间,与该时期内大规模的植树造林工程导致的植被覆盖度增加有关。

流域内水源涵养能力空间分异性较明显,如图 5 所示。水源涵养能力差异性较大,变化范围为 35—220 mm。中游的分异性最大,差异可达 200 mm;其次是下游,差异可达 145 mm;上游变化范围最小,差异仅为 80 mm。造成这种情况的首要原因可能和降水的空间分布不均、由西向东降低有关。上游降水充沛且地势平缓,植被的涵养能力相对较强,而中下游降水减少,结合上文分析的植被分布情况,中游水源涵养能力较低的

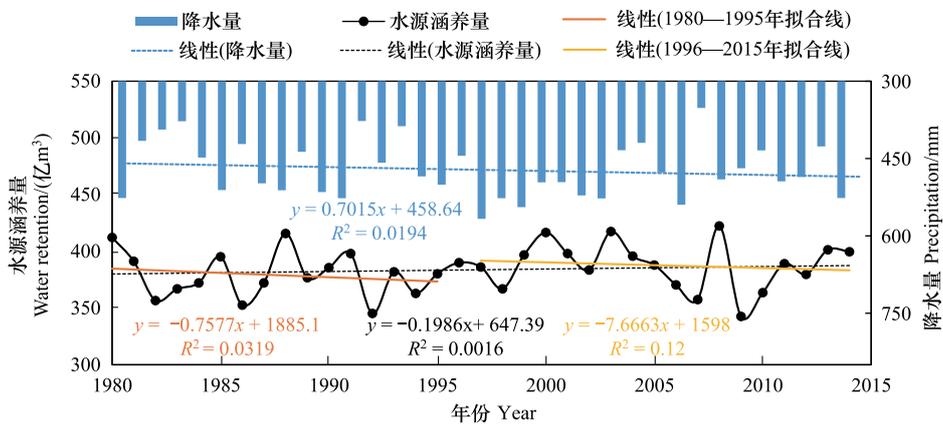


图 4 多年平均水源涵养能力量化结果

Fig.4 Water retention changing trend of the study area

区域分布有大量农田和裸地,而下游低涵养区则为林地集中区。农田和低覆盖度草地对降水的利用较单一,降水多用于产生地表径流,涵养的量较少,而林地虽能降低地表径流的产生,但由于其植被覆盖密集、生长需水旺盛,因此降水多损失于蒸散发,导致整体涵养值较低。而在降水相差不大的情况下,密度较低的林地和草地的混合区表现出更高的涵养能力,分布在中游的出口处,涵养能力高于 180 mm。

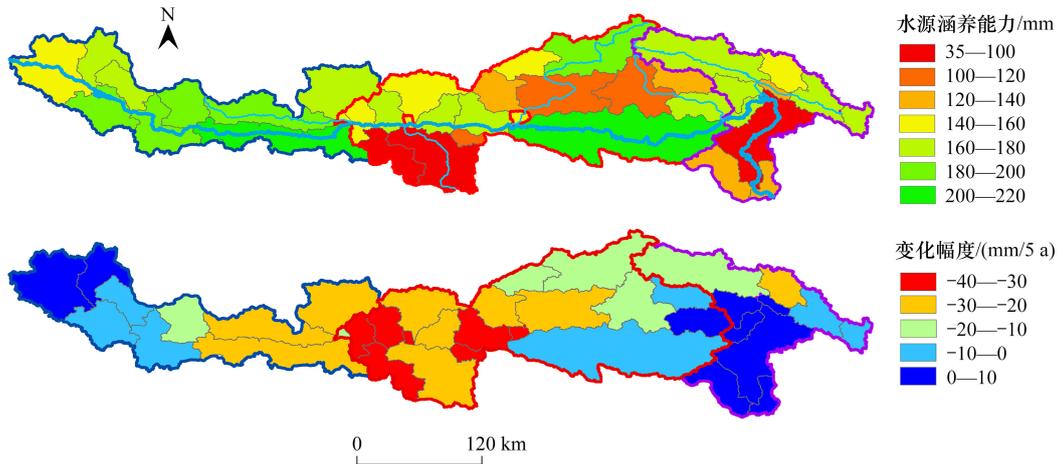


图 5 研究区多年平均水源涵养空间分布情况与 5 年平均变化幅度

Fig.5 Spatial distribution of annual water retention and its changing trend for each five years

由于单一年份的水源涵养能力变化不明显,以每 5 年的变化趋势分析其多年空间变化趋势。雅江流域水源涵养能力整体以退化为主(-40—10 mm/5a)。但在上游入口处和下游出口处出现微弱的增加趋势(0—10 mm/5a)。说明随着下游裸地的减少和植被种类的增加,对于增加植被涵养水源的能力有促进作用。而上游虽存在自然植被退化的现象,然而降水的增加有效弥补了涵养能力,使其随之增加。

3.3 典型生态系统水源涵养功能

为了进一步明晰流域内各生态系统水源涵养能力及具体水源涵养量,将其按照生态系统分别提取(表 2)。上、中、下游分别涵养 71.75、81.01、82.42 亿 m³ 的水量,全流域平均可以涵养约 329.25 亿 m³ 的水量,其中林地和低等覆盖度的草地所表现的涵养水量最高,分别是 60.91、63.58 亿 m³,与林地面积占比高导致的涵养量较高不同,低覆盖草地由于其涵养能力最高导致涵养量最高。值得说明的是,裸地在流域内的分布面积最广且较为破碎和分散,较高的涵养值和涵养量通常是受周边植被的影响较大,由于气候影响,裸地的蒸发

量较小,由此容易对“高值”产生误解,这里不做单独分析。

表 2 雅鲁藏布江流域上中下游不同生态系统涵养水源统计结果

Table 2 Statistics on water retention in different ecosystems in the upper, middle and lower reaches of the study area

土地利用类型 Landcover type	上游 Upstream			中游 Midstream		
	面积 $A_i/(万 km^2)$	涵养能力 WR_c/mm	涵养量 $WR/(亿 m^3)$	面积 $A_i/(万 km^2)$	涵养能力 WR_c/mm	涵养量 $WR/(亿 m^3)$
农田 Farmland	5	109.53	0.54	14	119.15	1.62
林地 Forest	35	167.37	5.78	129	149.70	19.38
高覆盖草地 High coverage grassland	88	174.62	15.29	78	149.96	11.65
中覆盖草地 Medium coverage grassland	138	170.37	23.53	144	170.11	24.54
低覆盖草地 Low coverage grassland	152	175.51	26.62	142	168.03	23.83
合计 Total	719	159.48	71.75	720	151.39	81.01
土地利用类型 Landcover type	下游 Downstream			全域 All		
	面积 $A_i/(万 km^2)$	涵养能力 WR_c/mm	涵养量 $WR/(亿 m^3)$	面积 $A_i/(万 km^2)$	涵养能力 WR_c/mm	涵养量 $WR/(亿 m^3)$
农田 Farmland	2	117.89	0.29	0.21	115.52	2.45
林地 Forest	296	120.81	35.75	4.60	145.96	60.91
高覆盖草地 High coverage grassland	296	104.61	30.96	4.61	143.06	57.89
中覆盖草地 Medium coverage grassland	16	142.36	2.28	2.98	160.95	50.35
低覆盖草地 Low coverage grassland	75	174.79	13.14	3.69	172.78	63.58
合计 Total	704	132.09	82.42	16.09	147.65	235.18

A_i : Area of *i*th ecosystem; WR_c : Water Retention capacity; WR : Water Retention

3.4 影响因子贡献率分离

根据选择的驱动要素,将单一影响因子对水源涵养能力的贡献进行分离,分离结果如表 3 所示。结果表明,在四类影响因子类型里,气候变化中的降水和水文变量对水源涵养功能的解释力最强,而地形地势变量解释力相对较弱。在十类影响因子中,降水和径流深是对水源涵养影响的主要贡献因子,解释力分别为 0.42 和 0.40。蒸散发与地下径流、土壤含水量占据水源涵养量的贡献相对较高且较为平均,解释力均为 0.38—0.39。作为植被变化的表征因子,NDVI 的 q 值为 0.34,在所有驱动因子中排名第 6。而坡度与地表高程的解释力因子分别仅为 0.16 和 0.27,说明在雅鲁藏布江流域地形地势对水源涵养功能的影响较低。

表 3 雅鲁藏布江流域水源涵养功能单一驱动因子重要性统计

Table 3 Statistics on water retention of different ecosystems of the Yarlung Zangbo River Basin and importance order of single driving factors

变量类型 Factor classification	代号 Designator	驱动因子 Driving factor	单位 Unit	q 值 q value	重要性排序 Importance order
地形地势 Terrian factors	X1	Slop	($^{\circ}$)	0.02	10
	X2	DEM	m	0.16	8
植被覆盖 Vegetation factors	X3	NDVI	-	0.34	6
气候变化 Climate factors	X4	Pre	mm	0.42	1
	X5	Tem	$^{\circ}C$	0.03	9
	X6	LULC	mm	0.40	2
水分收支 Water budget	X7	Eva	mm	0.38	3
	X8	Rs	mm	0.30	7
	X9	Rg	mm	0.38	4
	X10	SWC	%	0.38	5

Slop: 坡度; DEM: 数字高程模型 Digital elevation model; NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; Pre: 年均降雨量 Mean annual precipitation; Tem: 年均温度 Mean annual temperature; LULC: 地表覆盖类型 The land-cover; Eva: 年均蒸散发 Mean annual evapotranspiration; Rs: 地表径流深 Surface runoff depth; Rg: Groundwater runoff depth; SWC: 土壤水分含量 Soil water content.

在实际情况下,影响涵养功能空间异质性的各个因子并非独立作用,而是多个因子之间相互关联的作用。因此,在上述单因子贡献量化分析的基础上,采用地理探测器的交互因子贡献率计算方法,分离不同因子之间交互作用的贡献程度。结果表明,随着雅江的流向,水源涵养功能的驱动要素也由受单一因子交互影响发展为多因子交互影响。如图 6 所示,上游的涵养功能主要受蒸散发主导,在驱动因子包含蒸散发时,交互 q 值均大于 0.8,冠层截留与地下径流的交互作用也对水源涵养功能产生较大影响($q>0.6$);在中游这种现象仍旧存在,但各驱动要素之间贡献率相差减小;在下游,除地形地势的因子贡献率不大,其余因子均检测出较高的贡献程度($q>0.5$)。对于全流域而言,当降水和蒸散发和其他水分影响因子相互作用时,对生态系统水源涵养功能的解释力最大,在径流深和蒸散发的交互影响下, q 值最高可达 0.75,但与其他因子贡献程度相差不大。

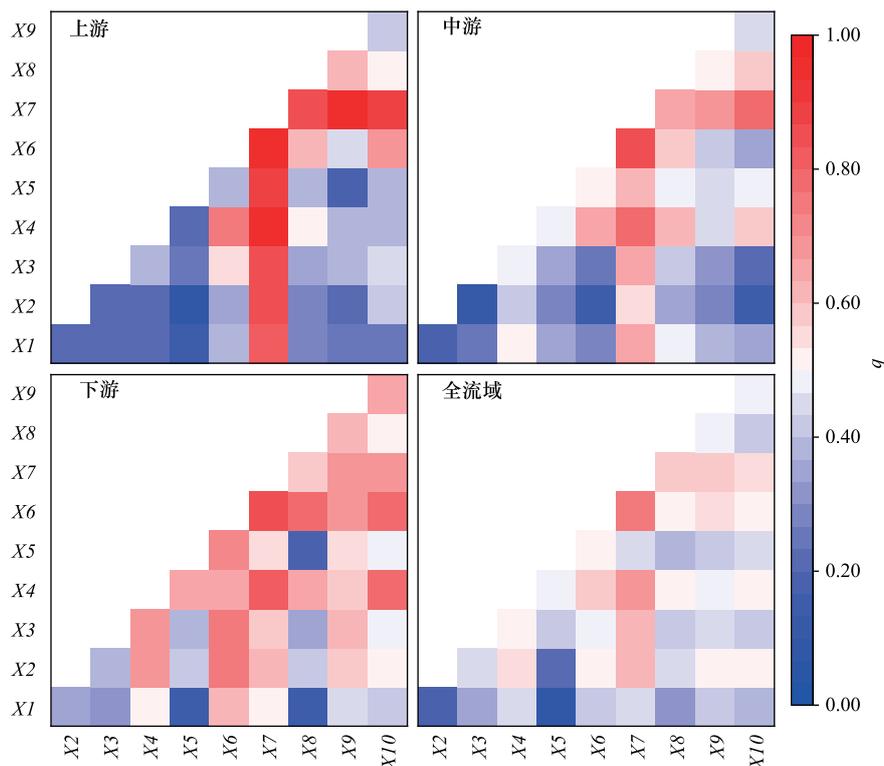


图 6 基于地理探测器的变量交互探测 q 值

Fig.6 Variable interaction detection q value based on geodetector

X1;Slop 坡度;X2:DEM 数字高程模型 Digital Elevation Model;X3;NDVI 归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index ;X4:Pre 年均降雨量 Mean annual precipitation ;X5:Tem 年均温度 Mean annual temperature ;X6: LULC 地表覆盖类型 The land-cover ;X7:Eva 年均蒸散发 Mean annual evapotranspiration ;X8:Rs 地表径流深 Surface runoff depth ;X9:Rg Groundwater runoff depth ;X10:SWC 土壤水分含量 Soil water content.

4 讨论

本研究在基于 VIC 模型精准刻画水分收支变量的基础上,基于水量平衡原理得到的雅江流域内水源涵养总量的多年平均值为 235.18 亿 m^3 ,与以往研究中三江源区内多年水源涵养总量为 242.1 亿 m^3 较为相似^[28]。同时,本研究根据实测径流数据校正 VIC 模型参数,量化得到雅鲁藏布江流域各部分水分收支变量,得到流域内水源涵养功能正在以 0.48 亿 m^3 的速度逐年衰减的结论。有研究对气候植被条件类似的研究区——黄河源区的水源涵养量对气候要素的响应进行了量化分析,认为降水和潜在蒸散发共同导致了黄河源区水源涵养量总体减小^[12],与本文的结论较为一致。另有研究采用降水贮存量法计算三江源生态系统水分涵养能力,发现黄河源区自 2005 年以来流域水源涵养量有所回升^[29-30],与本研究结论相反。值得注意的是,

不同陆面模型、分布式水文模型对流域水文过程的模拟结果之间存在差异甚至自相矛盾,这可能与不同的植被覆盖类型、流域复杂的地表和地下条件以及模型算法有关。本研究所采用的 VIC 模型是一个动态陆面过程模型,具有较强的物理基础,能够将大气边界条件、陆面过程、植被生理与物候动态过程以及土壤生物地球化学过程统一起来,该模型能同时进行陆-气间能量平衡和水量平衡的模拟,研究证实在青藏高原等生态系统脆弱区有较高的模拟精度,且对蒸散发的刻画更有优势^[31-34]。本研究进一步证实了,以 VIC 为代表的陆面过程模型,在模拟大流域的地表变化对生态水文过程的响应方面有较大的优势,能更好的降低流域水源涵养对自然或人类活动引起的植被变化响应的不确定性。

本研究的结果显示,林地和低覆盖度的草地是两个涵养功能最高的生态系统,具有较高的生态效益,高达最低者农田的 30 倍左右。过往研究表明,生态系统中覆被良好的森林、草地和湿地具有较强的涵养能力,而覆被稀疏者其涵养能力则较低^[35],与本文结论较为一致。这与 20 世纪末农业和畜牧业在该地区的发展对草地生态系统产生的负面影响,以及下游的林地大幅向草地转化有关,虽然中游存在一定的植树造林等生态保护工程的实施,在一定程度上有助于水源涵养量的提高,然而流域整体仍呈现衰减的趋势。上、中、下游内水源涵养能力平均值相差不大,但是分区内差异明显,且以中游的分异性最大、最高可达 143.8 亿 m^3 ;下游的差异可达 104.4 亿 m^3 ;上游变化范围最小,差异仅为 56.32 亿 m^3 。这种差异性与雅江的气候和植被资源具有明显的空间分异性密切相关。上游充沛的降水以及较为单一、密度较高的植被覆盖度导致其水源涵养能力空间差异性较小,而中游与下游降水较少且林草破碎化程度高、人类活动痕迹明显,导致了较大的差异^[38-39]。

本研究表明,造成雅江内水源涵养能力减小的主要原因与流域内的蒸散发需求增加密切相关。以往针对植被体系生态水源涵养功能的驱动要素的分离结果表明,降水和蒸散发是影响植被水源涵养能力的重要驱动因素,与本文的研究结果一致^[44-45]。同时本文认为,水源涵养的变化与降水存在相反的趋势。造成这样结果的一方面是由于雅江流域内林地分布较为破碎化,以及研究时段内覆被类型存在由森林向草地的转化情况,导致大量的地表裸露度增高,裸地的土壤和地貌条件使增加的降水入渗量更容易形成地下径流,从而增加河流径流,流失于植被对水源的有效涵养;另一方面,降水增加无法弥补该流域日益增加的植被蒸散发需求。两者的损耗效应叠加就会导致水源涵养量基本不变或者减少的趋势。这一变化指征着生态敏感脆弱区植被水分支撑功能的降低,在区域生态恢复与重建中应当引起重视。

本研究同时检测出地下径流量对生态系统水源涵养功能的重要性。地下径流是指水通过土壤和基岩层渗透到地下含水层的过程,这部分水分被储存在地下含水层中,形成地下水库。地下水库在枯水期释放水分,维持地表水体(如河流、湖泊和湿地)的流量,从而保证生态系统在枯水季仍有稳定的水源供应,值得在生态脆弱敏感区构建生态工程时重点考虑。同时,本研究检测出植被覆盖度对水源涵养的贡献率并不大,然而基于植被在降水再分配的过程中的作用不可忽视,因此在后续的研究中,应该增加选取植被的景观效应以及植被种类等影响要素,在以后以自然植被为主的生态敏感脆弱区的水源涵养研究中值得重点关注。

5 结论

(1) VIC 模型在雅鲁藏布江流域内适用性良好,模拟得到的水分收支变量精度较高。在 35 年间,该流域的降水量变化范围为 377—566 mm,同时以 7.01 mm/10a 的变化速率增长;植被蒸散发地表径流深的增长以为 6.15 mm/10a 和 4.81 mm/10a 的速率增加,而地下径流、植被截留和土壤水分没有较明显的变化趋势,说明降水的增加主要促进了蒸散发和地表径流的产生。

(2) 在 1980—2015 年间,流域的水源涵养能力呈现逐年降低的变化趋势,变化范围为 329—424 亿 m^3 ,变化速率为 -0.20 亿 m^3/a 。上、中、下游分别可涵养 71.75、81.01、82.42 亿 m^3 的水量,全流域平均可以涵养约 235.18 亿 m^3 的水量,其中林地和低等覆盖度的草地所表现的涵养水量最高,分别是 60.91、63.58 亿 m^3 。

(3) 降水和地表径流深的单一变化对水源涵养影响的产生主要作用,解释力分别为 0.42 和 0.40。降水和蒸散发的交互关系是影响该地区水源涵养量增减的主要因素,共同导致了雅鲁藏布江水源涵养量总体减小, q

值高达 0.75。上中下游驱动要素的贡献差异较明显。

参考文献(References):

- [1] Zhou L, Kaufmann R K, Tian Y, Myneni R B, Tucker C J. Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D1): e2002jd002510.
- [2] Beillouin D, Ben-Ari T, Malézieux E, Seufert V, Makowski D. Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global change biology*, 2021, 27(19): 4697-4710.
- [3] Dash S S, Sahoo B, Raghuvanshi N S. How reliable are the evapotranspiration estimates by Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and Variable Infiltration Capacity (VIC) models for catchment-scale drought assessment and irrigation planning? *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125838.
- [4] Zhou X, Li C, Wu L, Lv J, Xie X, Wei J, Zhang Y. Responses of soil water retention to climate and underlying condition changes in river source areas: A case study of the Hei River basin and Bai River basin, China. *Journal of Soil and Water Retention*, 2022, 77: 555-567.
- [5] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估. *林业科学*, 2011, 47(2): 145-153.
- [6] 王云飞, 叶爱中, 乔飞, 李宗省, 缪驰远, 狄振华, 龚伟. 水源涵养内涵及估算方法综述. *南水北调与水利科技: 中英文*, 2021, 19(6): 1041-1071.
- [7] Caro C, Marques J C, Cunha P P, Teixeira Z. Ecosystem services as a resilience descriptor in habitat risk assessment using the InVEST model. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106426.
- [8] Li M Y, Liang D, Xia J, Song J X, Cheng D D, Wu J T, Cao Y L, Sun H T, Li Q. Evaluation of water retention function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China based on InVEST model. *Journal of environmental management*, 2021, 286: 112212.
- [9] 王辉源, 宋进喜, 吴琼. 基于 SWAT 模型的秦岭北麓渭河流域水源涵养功能综合评价. *水土保持研究*, 2023, 30(6): 307-315.
- [10] 张乐开, 左其亭, 钟涛, 张羽, 吴青松. 基于 SWAT 的沁河流域水源涵养能力分析 & 预测. *南水北调与水利科技: 中英文*, 2023, 21(5): 862-872.
- [11] 尹云鹤, 吴绍洪, 李华友, 赵东升, 杨小明, 周景博. SRES 情景下青藏高原生态功能保护区水源涵养功能的变化研究. *资源科学*, 2013, 35(10): 2003-2010.
- [12] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 戴尔阜. 过去 30 年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响. *地理研究*, 2016, 35(1): 49-57.
- [13] 周璇. 甘南高原生态系统水源蓄调功能量化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [14] 王逸飞, 李常斌, 杨致远, 吕佳南, 谢旭红, 高祖桥, 申娜, 张旭阳, 李美静, 刘源文. 黑白河流域湿地水文蓄调功能量化及对比研究. *水利水电技术: 中英文*, 2024, 55(6): 44-57.
- [15] 杨志刚, 卓玛, 路红亚, 达瓦次仁, 马鹏飞, 周刊社. 1961—2010 年西藏雅鲁藏布江流域降水量变化特征及其对径流的影响分析. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 166-172.
- [16] Li L, Yang S, Wang Z Y, Zhu X D, Tang H Y. Evidence of warming and wetting climate over the Qinghai-Tibet Plateau. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2010, 42(4): 449-457.
- [17] Wang J, Rich P M, Price K P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(11): 2345-2364.
- [18] Shanguan W, Dai Y J, Liu B Y, Zhu A X, Duan Q Y, Wu L Z, Ji D Y, Ye A Z, Yuan H, Zhang Q, Chen D D, Chen M, Chu J T, Dou Y J, Guo J X, Li H Q, Li J J, Liang L, Liang X, Liu H P, Liu S Y, Miao C Y, Zhang Y Z. A China data set of soil properties for land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, 5(2): 212-224.
- [19] 郑旭东. 黄土高原区域骤旱时空特征及其形成机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- [20] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, Burges S J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D7): 14415-14428.
- [21] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F. One-dimensional statistical dynamic representation of subgrid spatial variability of precipitation in the two-layer variable infiltration capacity model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D16): 21403-21422.
- [22] 王佳琪, 邢艳秋, 常晓晴, 杨红. 东北天然林资源保护工程成效评估及热点区域识别. *生态学报*, 2024, 44(3): 1231-1241.
- [23] 鞠琴, 刘小妮, 刘娣, 申同庆, 谷黄河, 王国庆, 余钟波. 基于遥感和通量观测的实际蒸散发时空变化特征——以黄河流域水源涵养区为例. *水科学进展*, 2024, 35(2): 338-347.
- [24] 袁静芳, 周海丽, 张星烁, 刘晓曼. 京津风沙源治理区植被固碳能力估算及归因分析. *生态学报*, 2024, 44(15): 6731-6743.
- [25] 张晓伟, 王墨珂, 刘昊, 张亚丽, 王秀丽, 蔚霖. 河南省沿黄地市生态环境质量时空演变及驱动因子分析. *人民黄河*, 2024, 46(6): 78-84.
- [26] 苏辉东, 贾仰文, 刘欢, 李耀军, 杜军凯, 牛存稳, 甘永德, 曾庆慧. 基于 WEP-L 模型的寒区流域径流演变模拟及归因分析. *冰川冻土*, 2021, 43(5): 1523-1530.

- [27] 王东东,贾仰文,牛存稳,岁姚炳,燕翔. 基于 WEP-L 模型的水源涵养不同功能评估方法——以渭河涵养区为例. *生态学报*,2024,44(10): 4342-4352.
- [28] 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影响因素. *生态学报*,2024,44(16): 7074-7086.
- [29] 田世民,韩冰,梁帅,王弯弯,曹永涛. 黄河源区水源涵养有关问题探讨. *水利水运工程学报*,2022(1): 19-27.
- [30] 周冰玉,李志威,田世民,游宇驰. 黄河源区水源涵养能力研究综述. *水利水电科技进展*,2022,42(4): 87-93.
- [31] Liu Z F, Yao Z J, Wang R, Yu G A. Estimation of the Qinghai-Tibetan Plateau runoff and its contribution to large Asian rivers. *Science of the Total Environment*,2020,749: 141570.
- [32] Tian P P, Lu H W, Feng W, Guan Y L, Xue Y X. Large decrease in streamflow and sediment load of Qinghai-Tibetan Plateau driven by future climate change: A case study in Lhasa River Basin. *Catena*,2020,187: 104340.
- [33] Zhong R D, He Y H, Chen X H. Responses of the hydrological regime to variations in meteorological factors under climate change of the Tibetan plateau. *Atmospheric Research*,2018,214: 296-310.
- [34] Ferguson C R, Sheffield J, Wood E F, Gao H L. Quantifying uncertainty in a remote sensing-based estimate of evapotranspiration over continental USA. *International Journal of Remote Sensing*,2010,31(14): 3821-3865.
- [35] 张昌顺,范娜,刘春兰,谢高地. 1990—2018 年中国生态系统水源涵养功能时空格局与演变. *生态学报*,2023,43(13): 5536-5545.
- [36] Li F P, Xu Z X, Feng Y C, Liu M, Liu W F. Changes of land cover in the Yarlung Tsangpo River basin from 1985 to 2005. *Environmental earth sciences*,2013,68(1): 181-188.
- [37] 周喜. 雅鲁藏布江流域生态系统服务时空演变特征及其耦合关系研究[D]. 重庆: 重庆交通大学,2023.
- [38] Pei H W, Liu M Z, Shen Y J, Xu K, Zhang H J, Li Y L, Luo J M. Quantifying impacts of climate dynamics and land-use changes on water yield service in the agro-pastoral ecotone of northern China. *Science of the Total Environment*,2022,809: 151153.
- [39] Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, Wei X H, McNulty S G, Vose J M. Potential water yield reduction due to forestation across China. *Journal of Hydrology*,2006,328(3/4): 548-558.