

DOI: 10.20103/j.stxb.202212093547

周雪彤, 孙文义, 穆兴民, 宋小燕, 赵广举, 高鹏. 1990—2020 年三江源水源涵养能力时空变化及影响因素. 生态学报, 2023, 43(23): 9844–9855.

Zhou X T, Sun W Y, Mu X M, Song X Y, Zhao G J, Gao P. Spatiotemporal variation and influencing factors of water conservation capacity in Three-River Headwaters region from 1990 to 2020. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9844–9855.

1990—2020 年三江源水源涵养能力时空变化及影响因素

周雪彤¹, 孙文义^{1,2,*}, 穆兴民^{1,2}, 宋小燕³, 赵广举^{1,2}, 高 鹏^{1,2}

1 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

2 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

3 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100

摘要:三江源是我国重要的水源涵养功能区,也是我国乃至东南亚地区的生态屏障,具有重要的生态战略地位。揭示三江源水源涵养能力的空间分布、变化趋势及影响因素,对于推进生态保护与修复工程,提高区域水资源供给能力和维持生态系统健康稳定具有重要意义。基于 InVEST 模型,定量分析了三江源区水源涵养能力的时空变化及影响因素。结果表明:草地生态系统为三江源水源涵养功能主体,年平均水源涵养量为 120.04 亿 m³。1990—2020 年三江源水源涵养量呈显著上升趋势,变化速率为 1.80 亿 m³/a ($P < 0.05$),年平均水源涵养量为 163.84 亿 m³。生态治理前(1990—2005 年)水源涵养量增长速率高于生态治理后(2005—2020 年)。三江源区水源涵养能力空间分布上表现出东南高、西北低的特点,显著增长面积为 22.07 万 km²,占全区总面积的 60.79%。生态治理前,降水量增加、实际蒸散量增加和实际蒸散比降低等气候变化为驱动水源涵养能力增长的主要因素;生态治理后,林、草地面积增加等土地利用/覆被变化为驱动水源涵养能力增长的主要因素。

关键词:三江源;水源涵养能力;InVEST 模型;气候变化;土地利用/覆被变化

Spatiotemporal variation and influencing factors of water conservation capacity in Three-River Headwaters region from 1990 to 2020

ZHOU Xuotong¹, SUN Wenyi^{1,2,*}, MU Xingmin^{1,2}, SONG Xiaoyan³, ZHAO Guangju^{1,2}, GAO Peng^{1,2}

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

3 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Three-River Headwaters region is a critical water conservation area in China and an ecological barrier of Southeast Asia, which has an important ecological strategic position. It is important to reveal the spatial distribution, changing trends and influencing factors of water conservation capacity to promote ecological protection. It is also meaningful in improving the regional water supply capacity and maintaining the stability of the ecosystem. Based on the InVEST model, this paper estimated the spatial and temporal changes of water conservation capacity and analyzed the influencing factors. The results indicated that the grassland ecosystem accounted for most of the water conservation, with an average annual amount of water conservation of 12.00 billion m³. From 1990 to 2020, the water conservation in Three-River Headwaters region was significantly rising with an increasing rate of 0.18 billion m³/a ($P < 0.05$). The average amount of water conservation was 16.38 billion m³. From 1990 to 2005, the increasing rate of water conservation was higher than that from 2005 to 2020. The spatial distribution of the water conservation capacity was high in the southeast and low in the northwest. The significant growth area was 220700 km², accounting for 60.79% of the total area of the region. Before the implementation of ecological project (1990—2005), climate changes such as increased precipitation, increased actual

基金项目:以水定植与水土流失控制目标下的植被斑块格局调控机制项目(42177328)

收稿日期:2022-12-09; 网络出版日期:2023-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Sunwy@ms.iswc.ac.cn

evapotranspiration and decreased actual evapotranspiration ratio were the main factors driving the increase in water conservation capacity. After the implementation of ecological project (2005—2020), land use/cover changes such as increased forest and grassland areas were the main factors driving the increase in water conservation capacity.

Key Words: Three-River Headwaters region; water conservation capacity; InVEST model; climate change; land use/cover change

水源涵养是评估生态系统功能的重要内容之一^[1],是生态系统在特定时空条件下对水分的调蓄和保存能力,具有拦蓄洪水、削减洪峰、调节径流和净化水质等功能^[2]。水源涵养能力对区域气候、土壤、水文和植被状况产生直接影响^[3],在维持生态系统健康和稳定方面发挥着重要作用。水源涵养能力通常采用水源涵养量表征,反映了一段时间内生态系统在水文循环中存储降水的能力^[4]。探明水源涵养能力的变化规律及影响因素对提高区域水资源供给能力、保持生态系统稳定具有重要意义^[5]。

水源涵养能力的定量研究是生态系统水源涵养功能研究的重点和热点^[4]。水源涵养能力的定量评估传统方法主要有水量平衡法、土壤蓄水量法、林冠截留剩余法、综合蓄水能力法和年径流法等。根据研究区特点以及不同研究目的构建的模型逐步成为水源涵养能力评价的主流方法^[6],其中,InVEST 模型,即“生态系统服务功能与权衡交易综合评价模型”,是目前应用较为广泛的量化多种生态系统服务功能的评估模型^[7]。通过对模型参数的修正,InVEST 模型在中国不同地区生态系统服务功能评估方面有较好适应性^[8],目前已在国内三江源地区^[9]、黑河流域^[10]、黄土高原^[11]、大别山区^[12]、北京^[13-14]等地区成功应用,在估算水源涵养能力,模拟生态系统水源涵养功能变化方面起到重要作用。

气候变化和人类活动是影响水源涵养能力的重要因素^[15]。气候变化主要通过降水量和蒸散量的改变对区域水源涵养能力产生影响^[16-17],人类活动通过改变土地利用和覆被状况等地表特征直接影响着生态系统的水源涵养能力^[18]。龚诗涵等^[19]通过分析发现降水、温度、蒸散发与水源涵养能力存在显著正相关关系。邵全琴等^[20]对三江源生态保护和建设一期工程生态成效进行了评估,结果表明,生态保护工程区水源涵养能力恢复程度优于非工程区。宁亚洲等^[21]通过量化不同土地利用类型的水源涵养量,表明林地、草地水源涵养能力高于其它土地利用类型。情景模拟法可通过假设理想情景,模拟单因素或多因素变化的影响。王盛等^[22]假设降水不变而潜在蒸散发生定量改变和潜在蒸散不变而降水发生定量改变两种情景,对张承地区水源涵养功能进行评估,结果表明,降水对水源涵养服务的影响远大于潜在蒸散。张利利^[23]假设土地利用情况未发生变化,模拟石羊河流域产水深度变化并分别计算土地利用对产水量的影响量,结果表明,土地利用与气候变化对产水深度分别起反向抑制作用和正向促进作用。

三江源是长江、黄河和澜沧江的发源地,是国家重点水源涵养功能保护区^[24]。受全球变暖和过度放牧等人类活动的影响,三江源地区生态状况持续退化,水源涵养能力受到影响^[25]。2005 年国家启动三江源生态保护与建设工程以来,生态退化现象得到有效控制^[21],水源涵养能力有所恢复^[9]。三江源生态恢复过程中水源涵养能力的变化及其驱动因素研究尚不充分。因此,本研究基于 InVEST 模型,定量评估 1990—2020 年三江源生态系统水源涵养能力的时空变化,对比研究生态治理前后水源涵养能力变化及其对气候变化和人类活动的响应,对揭示三江源区水源涵养能力变化规律和驱动机制具有较好参考价值,为三江源地区生态保护与建设工作提供重要的参考依据。

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况

三江源区(89°45′—102°23′E、31°39′—36°12′N)为长江、黄河和澜沧江的源头汇水区^[9],总面积约 36.3 万 km²(图 1)。以山地地貌为主,海拔为 2554—6826 m。气候为典型高原大陆性气候,雨热同期,年均温 -5.4—7.5℃^[26],气温日较差大、年较差小;年均降水量 300—500 mm,由东南向西北递减,主要集中于 6—

8 月^[27]。三江源区径流资源丰富,雪山、冰川与湿地分布广泛,素有“中华水塔”之称,是重要的水源涵养地,也是我国和东南亚国家生态安全和可持续发展的重要生态屏障,在我国生态文明建设中占有重要地位。党的十八大以来,三江源水源涵养区着力推进一系列生态保护与建设工程,保证了生态系统质量和稳定性不断提升。

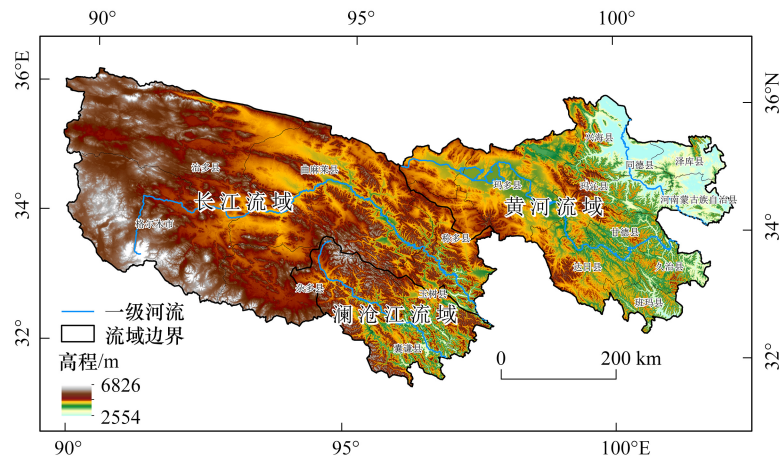


图 1 三江源区地理位置及流域水系分布

Fig.1 Location of Three-River Headwaters region and distribution of water systems in the basin

1.2 数据来源

降水量、潜在蒸散量、土地利用/覆被、高程、土壤属性和其它数据来源及相应处理如表 1 所示。

表 1 数据来源与处理

Table 1 Data resources and processing

数据 Data	来源及处理 Sources and processing	空间分辨率 Spatial resolution
降水量 Precipitation	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)	1 km
潜在蒸散量 Potential evapotranspiration	中国气象数据中心 (https://data.cma.cn); 基于 FAO 修正的 Penman-Monteith 公式计算,通过空间插值获得栅格数据	1 km
土地利用/覆被 Land use/cover	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.redc.cn); 基于土地利用类型,对三江源区生态系统进行对应分类 ^[28] ,对应关系如表 2 所示	1 km
数字高程模型 Digital Elevation Model	地理空间数据云平台 (http://www.gscloud.cn); 利用 Slope 工具计算百分比坡度	30 m
三江源边界及子流域边界 Boundaries of Three-River Headwaters region and its sub-basins	国家青藏高原科学数据中心 (http://data.tpdc.ac.cn)	
土壤属性(土壤厚度、土壤质地、有机质含量等) Soil properties (depth of soil, soil texture, organic matter content, etc.)	世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database-HWSD version 1.2); 利用土壤质地计算植物可利用水和土壤饱和导水率 ^[29]	1 km
其它(最大根系深度、植被蒸散系数、流速系数) Others (maximum root depth, K_c and vel)	参考文献研究成果 ^[30–31] 、联合国粮农组织作物参考值 ^[32] 和 InVEST 模型手册(表 2)	1 km

1.3 研究方法

1.3.1 产水量

InVEST 模型产水模块是基于水量平衡的估算方法,将每个栅格上的降水量与实际蒸散发量之差定义为该栅格的产水量,并求取子流域上每个栅格单元的产水量之和。计算方法如下:

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

(1)

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (2)$$

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

$$AWC_x = \min(\text{MaxsoilDepth}, \text{RootDepth}) \times \text{PWAC}_x \quad (4)$$

$$\text{PWAC} = 54.409 - 0.132\text{sand} - 0.003(\text{sand})^2 - 0.055\text{silt} - 0.006(\text{silt})^2 - 0.738\text{clay} + 0.007(\text{clay})^2 - 2.688\text{OM} + 0.501(\text{OM})^2 \quad (5)$$

$$R_{xj} = \frac{K_{xj} ET_{0x}}{P_x} \quad (6)$$

式中, Y_{xj} 表示 j 类土地类型栅格单元 x 的产水量, mm; AET_{xj} 表示 j 类土地类型栅格单元 x 的年实际蒸散发量, mm; P_x 表示栅格单元 x 的年降雨量, mm; R_{xj} 为潜在蒸散发与降水量的比值; ω_x 为表达气候-土壤属性关系的非物理参数; AWC_x 表示植物有效利用含水量, mm; MaxsoilDepth 为最大土壤深度; RootDepth 为根系深度; PWAC_x 为植被可利用水。sand 为土壤砂粒含量, %; silt 为土壤粉粒含量, %; clay 为土壤粘粒含量, %; OM 为土壤有机质含量, %。Z 即 Zhang 系数, Zhang 系数是表示研究区降水特征的常数, 又称“季节常数”, 能够代表区域降水分布及水文地质, 特征取值范围 1—30。 ET_{0x} 表示单元 x 的潜在蒸散发量, mm。 K_{xj} 表示某植被类型的蒸散系数。

1.3.2 水源涵养量

计算得到产水量的基础上, 结合研究区地形指数、地表流速系数和土壤饱和导水率计算栅格尺度的水源涵养量。计算方法如下:

$$\text{Rentention}_{xj} = \min\left(1, \frac{249}{\text{Vel}_{xj}}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{\text{sat}_x}}{300}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times \text{TI}_x}{3}\right) \times Y_{xj} \quad (7)$$

$$\text{TI}_x = \lg\left(\frac{\text{drainagearea}}{\text{soil}_{\text{depth}_x} \times \text{slope}_x}\right) \quad (8)$$

式中, Rentention_{xj} 为 j 类土地类型栅格单元 x 的水源涵养量, mm; Vel_{xj} 是 j 类土地类型栅格单元 x 的流速系数, 由模型参数表得到。 K_{sat_x} 为栅格单元 x 的土壤饱和导水率, mm/d; TI_x 为栅格单元 x 的地形指数; drainagearea 为集水区栅格数量; $\text{soil}_{\text{depth}_x}$ 为栅格单元 x 的土壤深度, mm; slope_x 为栅格单元 x 的百分比坡度。根据表 2 中土地类型与生态系统类型的对应关系, 可计算得到相应生态系统类型的水源涵养量。

1.3.3 Mann-Kendall 趋势分析

Mann-Kendall (MK) 检验是一种非参数检验方法, 在气象、水文研究中有广泛应用^[33]。本文借助 MATLAB R2018B 软件实现栅格尺度水源涵养能力变化的 Mann-Kendall 趋势分析。公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (9)$$

x_k, x_i 为连续的数据变量, n 为数据资料时间长度。

$$\text{sgn}(x_k - x_i) = \begin{cases} 1, & x_k - x_i > 0 \\ 0, & x_k - x_i = 0 \\ -1, & x_k - x_i < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

若 Z 大于 0,数据序列呈上升趋势; Z 小于 0,数据序列呈下降趋势。当 $|Z| \geq 1.96$ 时,表明趋势变化显著;当 $|Z| \geq 2.58$ 时,表明趋势变化极显著。

表 2 InVEST 模型各土地利用/覆被类型的生物物理参数
Table 2 Biophysical parameters for each land use/cover type in the InVEST model

生态系统名称 Name of ecosystem	地类名称 Name of land type	最大根系深度 Maximum root depth/mm	植被蒸散系数 K_e	流速系数 Vel
农田 Farmland	水田	2100	0.7	2012
	旱地	2000	0.65	900
森林 Forest	有林地	5000	1	200
	疏林地	3000	0.93	300
	其他林地	3000	0.9	400
灌丛 Shrubland	灌木林	4000	0.95	250
草地 Grassland	高覆盖度草地	2000	0.85	500
	中覆盖度草地	1700	0.65	400
	低覆盖度草地	1700	0.65	300
湿地 Wetland	河渠	1	1	2012
	湖泊	1	1	2012
	水库坑塘	1	1	2012
	永久性冰川雪地	1	0.5	2012
	滩地	1	1	2012
	沼泽地	300	1	900
城市 Urban	城镇用地	10	0.3	2012
	农村居民点	500	0.25	2012
	其他建设用地	500	0.2	2012
荒漠 Desert	沙地	300	0.2	200
	戈壁	300	0.2	200
	盐碱地	300	0.2	900
	裸土地	200	0.2	1200
	裸岩石质地	200	0.2	1500
	其他	200	0.2	250

1.3.4 驱动因素情景分析

在假定情景下,认为一种或多种变量保持不变,在模型中输入该种或多种变量的固定值及其它变量的实际值进行运算,核算出的结果即为该模拟情景的水源涵养量^[34]。InVEST 模型产水量模块参数中,土地利用/覆被参数代表相应年份土地利用/覆被状况,降水量和潜在蒸散量参数代表相应年份气候状况。为评估气候变化和土地利用/覆被变化单一因素对水源涵养量的影响,本研究设计了两种变化情景:一是分析气候变化对水源涵养的驱动效应,设定气候为驱动因素,土地利用/覆被不发生变化;二是分析土地利用/覆被变化对水源涵养的驱动效应,设定土地利用/覆被变化为驱动因素,气候因素不发生变化。情景一条件下,输入的土地利用/覆被参数为 1990 年初始值,输入的气候数据为相应年份的降水量、潜在蒸散量;情景二条件下,输入的土地利用/覆被参数为 1990—2020 年每 5 年的动态数据,降水量、潜在蒸散量设定为 1990 年初始值。基于以上两种情景,分别模拟产水量并计算水源涵养量。

2 结果与分析

2.1 三江源生态系统分布及其水源涵养量

三江源区生态系统主要类型为草地生态系统、灌丛生态系统、荒漠生态系统、湿地生态系统(图 2)。草地生态系统分布广泛,面积占约 26.07 万 km^2 ,占三江源总面积的 72.09%。灌丛生态系统面积约为 1.08 万 km^2 ,

主要分布在长江源西南部及东南部、黄河源东部及东南部、澜沧江南部地区。荒漠生态系统面积约为 6.04 万 km^2 , 主要分布在长江源西北部、黄河源西北部及中部地区。湿地生态系统面积约为 2.55 万 km^2 , 主要分布在长江源西北部及西南部、黄河源北部区域。

草地生态系统为三江源水源涵养功能的主体(图 3), 水源涵养量为 120.04 亿 m^3 , 占总量的 70.59%; 荒漠生态系统水源涵养量为 35.61 亿 m^3 , 占总量的 20.95%; 灌丛生态系统水源涵养量为 7.05 亿 m^3 , 占总量的 4.14%; 湿地生态系统水源涵养量为 5.03 亿 m^3 , 占总量的 2.96%。以单位面积的水源涵养量表征水源涵养能力, 森林、灌丛、草地生态系统水源涵养能力显著高于其它类型。三江源森林生态系统水源涵养能力最高, 为 70.05 mm; 灌丛生态系统次之, 为 64.98 mm; 草地生态系统水源涵养能力为 46.04 mm。

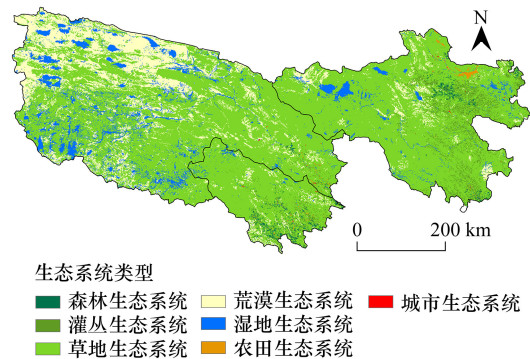


图 2 三江源 2020 年生态系统类型分布图

Fig.2 Distribution of ecosystem types in Three-River Headwaters region in 2020

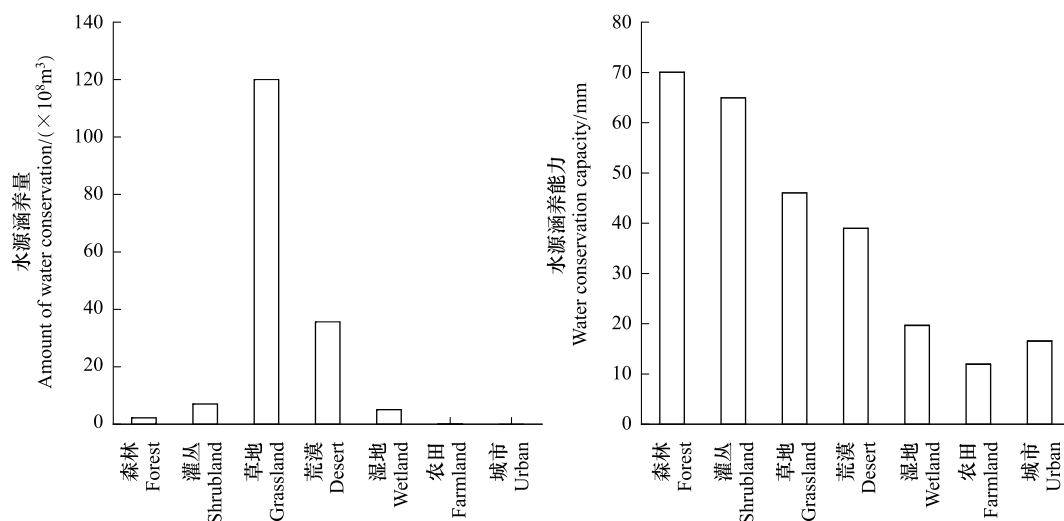


图 3 三江源不同生态系统 1990—2020 年平均水源涵养量及水源涵养能力

Fig.3 Average amount of water conservation and water conservation capacity of different ecosystem types in Three-River Headwaters region from 1990 to 2020

2.2 三江源水源涵养量的年际变化特征

1990—2020 年三江源区及长江源、黄河源、澜沧江源三个子流域水源涵养量均呈增长趋势(图 4)。三江源多年平均水源涵养量为 163.84 亿 m^3 ; 水源涵养量显著增加, 速率为 1.80 亿 m^3/a ($P < 0.05$), 从 1990 年的 119.49 亿 m^3 增加至 2020 年的 169.19 亿 m^3 。三个子流域中, 长江流域和黄河流域水源涵养量呈显著增长趋势, 变化速率分别为 0.86 亿 m^3/a ($P < 0.05$) 和 0.81 亿 m^3/a ($P < 0.05$); 澜沧江流域增长速率最小, 且趋势不显著, 为 0.13 亿 m^3/a 。

以 2005 年生态治理前后为节点, 将研究期分为生态工程实施前(1990—2005 年)、实施后(2005—2020 年)两个时段。三江源整体在两个时段内水源涵养量均呈增长趋势, 2005—2020 年变化速率(0.16 亿 m^3/a) 小于 1990—2005 年变化速率(3.34 亿 m^3/a)。三个子流域中, 黄河流域和澜沧江流域水源涵养量均呈增长趋势, 生态工程实施前水源涵养量变化速率大于生态工程实施后; 长江流域生态工程实施前水源涵养量增加速率为 1.82 亿 m^3/a ($P < 0.05$); 生态工程实施后水源涵养量呈下降趋势, 但变化不显著。

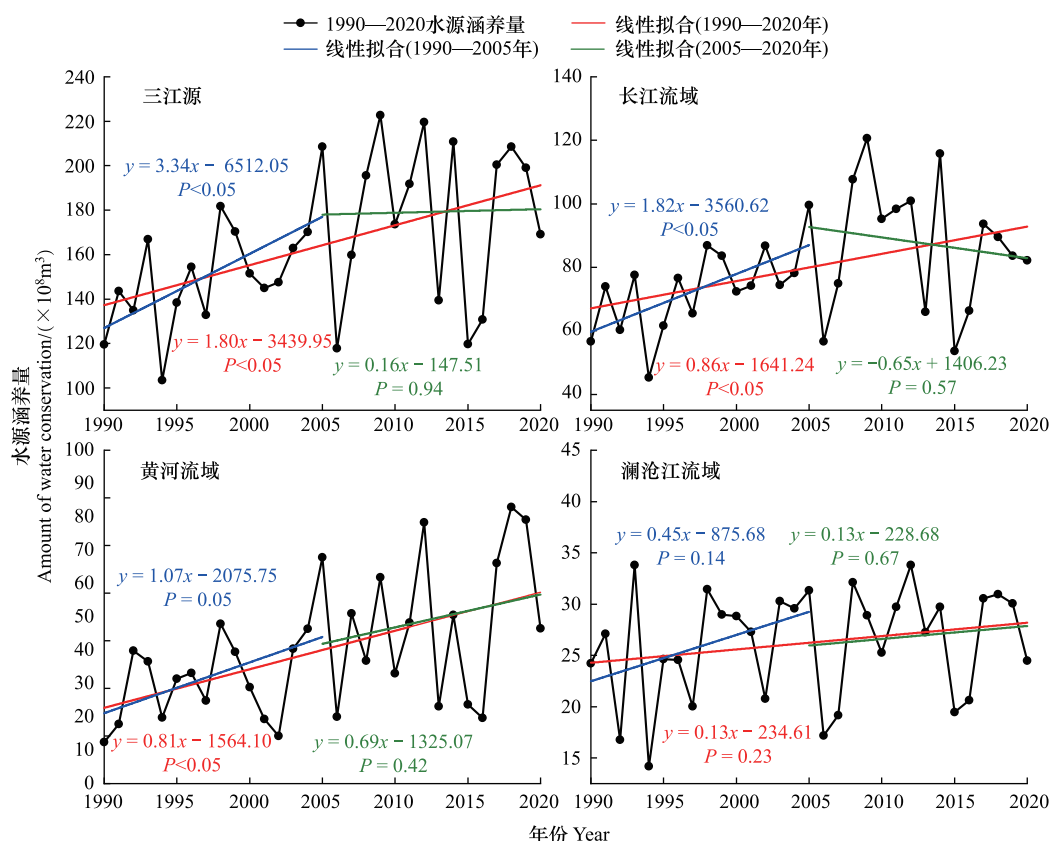


图4 三江源区及其子流域水源涵养量的年际变化

Fig.4 Interannual variation of water conservation in Three-River Headwaters region and its sub-basins

2.3 三江源水源涵养能力的空间分布及变化特征

三江源地区 1990—2020 年平均水源涵养能力表现出东南高、西北低的空间分布特点(图 5)。长江流域水源涵养能力整体较低,平均水源涵养能力为 39.52 mm,大部分区域低于 40 mm;黄河流域水源涵养能力空间差异显著,南部区域部分高于 100 mm,北部区域部分低于 20 mm,平均水源涵养能力为 49.15 mm;澜沧江流域水源涵养能力整体较高,大部分区域水源涵养能力大于 60 mm,平均水源涵养能力为 62.98 mm。

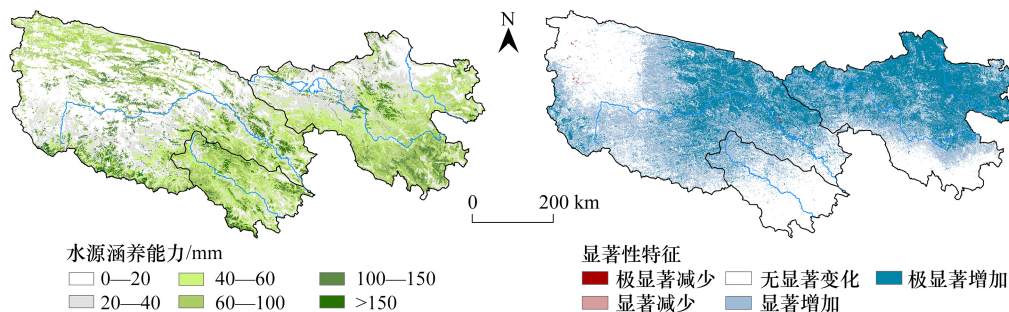


图5 三江源 1990—2020 年平均水源涵养能力空间分布图及显著性变化图

Fig.5 Average spatial distribution and significant change of the water conservation capacity in Three-River Headwaters region from 1990 to 2020

三江源地区 1990—2020 年水源涵养能力显著增长面积为 22.07 万 km², 占全区总面积的 60.79%。三个子流域中,黄河流域显著增长区域范围最广,占该流域面积的 77.82%;长江流域中东部区域水源涵养能力显著增长,占该流域面积的 58.64%;澜沧江流域 23.05% 的区域水源涵养能力显著增长。

2.4 气候变化和土地利用对水源涵养能力的影响

1990—2020 年三江源降水量、潜在蒸散量、实际蒸散量、实际蒸散比变化趋势如图 6 所示。降水量、潜在蒸散量和实际蒸散量呈显著增加趋势,变化速率分别为 2.67 mm/a ($P<0.05$)、 1.84 mm/a ($P<0.05$) 和 0.95 mm/a ($P<0.05$)。实际蒸散比(实际蒸散量占降水量的比率)呈显著下降趋势($P<0.05$)。

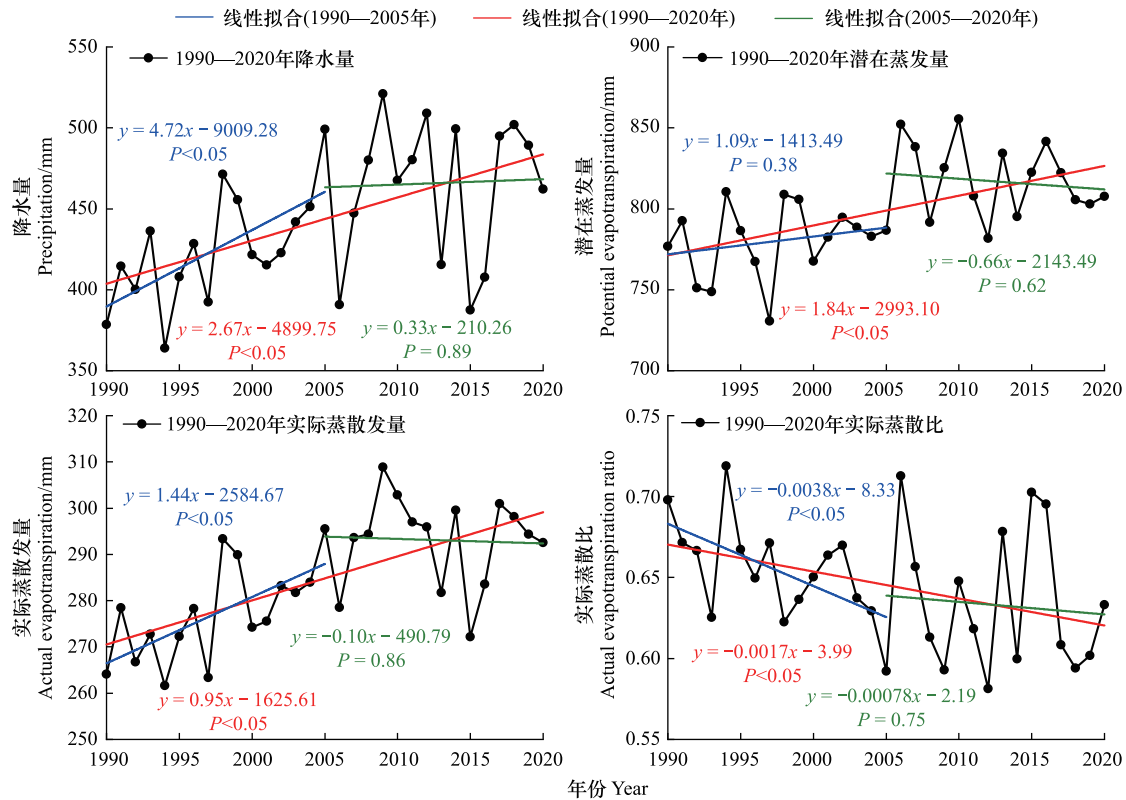


图 6 三江源气象要素变化趋势

Fig.6 Trends of meteorological elements in Three-River Headwaters region

Pearson 相关分析表明,降水、实际蒸散与水源涵养能力存在显著正相关关系,实际蒸散比与水源涵养能力存在显著负相关关系(表 3)。三江源降水、实际蒸散与水源涵养能力相关系数分别为 0.991 ($P<0.01$)、 0.876 ($P<0.01$)。实际蒸散比与水源涵养能力的负相关系数为 -0.953 ($P<0.01$),表明相同降雨条件下,实际蒸散量越大,水源涵养能力越低。

表 3 三江源水源涵养能力与气象要素相关关系

Table 3 Correlation between water conservation capacity and meteorological elements in Three-River Headwaters region

	降水	潜在蒸散	实际蒸散	实际蒸散比	水源涵养
降水 Precipitation	1	0.154	0.921 **	-0.953 **	0.991 **
潜在蒸散 Potential evapotranspiration		1	0.495 **	0.138	0.039
实际蒸散 Actual evapotranspiration			1	-0.764 **	0.867 **
实际蒸散比 Actual evapotranspiration ratio				1	-0.977 **
水源涵养 Water conservation					1

** 表示通过 $P=0.01$ 显著性水平检验

气候变化情景下,受降雨量增加影响,1990—2005 年三江源水源涵养能力整体明显增加(图 7)。其中,长江流域平均增加 21.08 mm ,西南部地区呈极显著增加趋势($P<0.01$);黄河流域平均增加 32.25 mm ,东北部地区呈显著增加趋势($P<0.05$);澜沧江流域平均增加 17.35 mm ,西北部地区呈显著增加趋势($P<0.05$)。

2005—2020 年三江源水源涵养能力整体降低,除三江源东部小部分区域水源涵养能力增加(0—20 mm)外,其它地区水源涵养能力普遍下降,在 $P=0.05$ 水平上变化趋势不显著。

土地利用/覆被变化情景下,生态治理前,1990—2005 年三江源水源涵养能力整体降低(图 7),但变化幅度较小,长江流域、黄河流域和澜沧江流域水源涵养能力分别变化 -0.03 mm、 -0.47 mm 和 -0.01 mm,在 $P=0.05$ 水平上变化趋势不显著。生态治理后,2005—2020 年三江源水源涵养能力整体增加,长江流域西北部及南部地区、黄河流域东部及南部地区、澜沧江大部分地区增长明显,水源涵养能力增加大于 30 mm;长江流域、黄河流域和澜沧江流域水源涵养能力平均增长 17.00 mm、19.60 mm 和 33.76 mm,呈显著变化趋势($P<0.05$)。

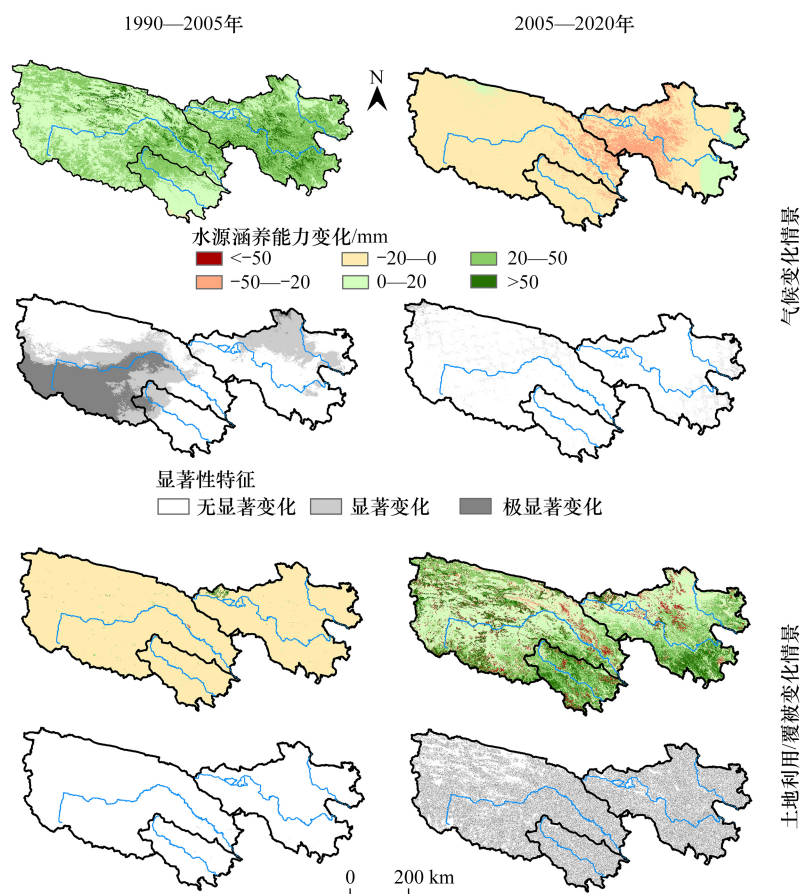


图 7 三江源区水源涵养能力变化情景模拟

Fig.7 Scenario Simulation of water conservation capacity changes in Three-River Headwaters region

3 讨论

水源涵养能力是生态系统维持健康稳定状况的重要指示器^[3]。三江源是国家重点水源涵养功能保护区^[24],探明该地区水源涵养能力变化趋势及其影响因素对提高区域水资源供给能力、保障生态系统健康和维持功能稳定具有重要意义^[5]。本研究表明,1990—2020 年三江源水源涵养能力呈上升趋势,其中黄河流域东部区域水源涵养能力增加显著,与吕乐婷等^[35]、潘韬等^[9]和张媛媛^[36]研究结果相似。三江源区 20 世纪九十年代以来降雨不断增多,温度持续上升^[37],气候趋向暖湿,对水源涵养能力提高具有一定正向作用。然而,本世纪以来,降水波动幅度大,强降雨增加,气温上升趋势显著高于降水,气候条件逐渐向暖干化发展,对植被生长有抑制作用,尤其导致高寒草甸退化^[38],抑制了水源涵养能力提高。三江源由北至南、由西至东植被覆盖度逐渐增加;长江流域未利用地广布,西部地区有湿地、冰川分布,东部地区有草地分布;黄河流域以草地为

主,东部分布有耕地和林地;澜沧江流域植被条件较好,林、草地覆盖广泛^[39]。国家于 2005 年启动三江源生态保护与建设工程以来,退耕还林、休牧育草等措施的实施使生态退化现象得到一定遏制^[40],林、草植被增加,水热条件较好的东部地区植被恢复情况有明显好转,西北部地区植被恢复较为缓慢^[41]。黄河流域东部草地覆盖度显著提高,部分草地向森林转化;长江流域东部至黄河流域西部草地面积显著增长;澜沧江流域变化较小^[42]。此外,在气候变化影响下,21 世纪以来长江流域湿地面积呈下降趋势,人类活动同时干扰湿地景观破碎化程度加剧,湿地水源涵养能力显著降低^[43],对长江流域水源涵养能力影响较大。气候变化与人类活动共同影响着三江源水源涵养能力的空间分布格局。

气候变化通过改变降水量和蒸散量来影响流域的水源涵养能力^[16-17],土地利用/覆被变化引起流域下垫面植被格局的变化,从而改变了区域水源涵养能力的空间格局。本研究表明,生态保护与修复工程实施前,假设土地利用/覆被状况不发生变化,气候变化对水源涵养能力变化呈正影响,假设气候状况不发生变化,土地利用/覆被变化对水源涵养能力变化呈负影响;生态保护与建设工程实施后,假设土地利用/覆被状况不发生变化,气候变化对水源涵养能力变化呈负影响,假设气候状况不发生改变,土地利用/覆被变化对水源涵养能力变化呈正影响。龚诗涵等^[19]全国水源涵养能力驱动因子的研究表明水源涵养能力与降水、蒸散、温度等气候因素呈显著正相关关系,这与本研究降水、实际蒸散与水源涵养能力存在显著正相关关系结论基本一致。生态治理前,三江源土地利用类型变化不显著^[24],水源涵养能力主要受到降水量增加、实际蒸散量增加和实际蒸散比减少等气候条件变化的影响,呈增长趋势。生态治理后,三江源林、草地面积显著增加^[42],人为干预下,气候变化对水源涵养能力的负影响得到抑制,由于森林和草地生态系统水源涵养能力显著高于其它类型生态系统,退耕还林和休牧育草等措施促进了水源涵养能力提高。

本文模型模拟的中间参量和模拟结果与现有研究进行了大量的对比验证,实际蒸散量结果与吕乐婷等^[35]、尹云鹤等^[44]的研究结果进行了比较;水源供给量的计算结果与潘韬等^[9]、乔飞等^[45]的研究进行了比较,并与 1990—2020 年青海省水资源公报相关数据相比较;水源涵养量的估算结果与张媛媛^[36]、刘敏超等^[46]的结果进行了对比,研究结果均具有较高的一致性。在模型参数合理条件下,本文基于情景模拟法,在生态治理前后两个时段分析了三江源气候与土地利用/覆被变化分别对水源涵养能力的影响。但三江源水源涵养能力的模拟研究还有待进一步提升,本研究未能充分考虑土地利用/覆被变化对三江源区土壤物理和生态水文过程的影响,模型中输入的土壤参数未考虑其时间变化特征。此外,受全球气候变暖影响,冰川融水和冻土退化作为三江源河流径流量的重要补给来源,是影响三江源区水源涵养能力的一个重要因素,这在 InVEST 模型中未能具体量化,在未来研究中,将继续深入。

4 结论

本文基于 InVEST 模型,对三江源区 1990—2020 年水源涵养能力的变化趋势、时空分布及其影响因素进行分析,取得如下结果:

(1) 草地生态系统为三江源水源涵养功能主体,多年平均水源涵养量为 120.04 亿 m^3 。

(2) 1990—2020 年三江源区水源涵养量年际变化呈显著上升趋势,1990—2005 年水源涵养量增长速率为 3.34 亿 m^3/a ,大于 2005—2020 年增长速率(0.16 亿 m^3/a)。

(3) 三江源区水源涵养能力空间分布上表现为东南高西北低的特征。1990—2020 年三江源水源涵养能力显著增长区域面积 22.07 万 km^2 。三个子流域中,黄河流域水源涵养能力增长面积最广。

(4) 对比生态治理前后两时期,1990—2005 年三江源降水量增长和实际蒸散比下降等气候变化对水源涵养能力增长起到主要正向促进作用;2005—2020 年三江源生态保护与修复工程实施后,林草植被覆盖面积增加,土地利用/覆被变化对水源涵养能力增长起到主要正向促进作用。

林草植被与湿地在生态系统水源涵养功能中起到重要作用,为扎实推进三江源地区生态保护与修复工程,应结合地区气候与土壤条件,科学规划退耕还林、休牧育草以及湿地保护工作,制定更合理的生态保护政策。

参考文献 (References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [2] 贾雨凡, 杨勤丽, 胡非池, 鞠琴, 王国庆. 变化环境下的水源涵养能力评估研究进展. *水利水电工程学报*, 2022(1): 37-47.
- [3] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. *生态学杂志*, 2009, 28(3): 529-534.
- [4] 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(6): 1041-1052.
- [5] 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.
- [6] 郭朝琼, 徐昔保, 舒强. 生态系统服务供需评估方法研究进展. *生态学杂志*, 2020, 39(6): 2086-2096.
- [7] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. *生态学杂志*, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [8] 唐尧, 祝炜平, 张慧, 宋瑜. InVEST 模型原理及其应用研究进展. *生态科学*, 2015, 34(3): 204-208.
- [9] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 刘玉洁. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 183-189.
- [10] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析. *生态学杂志*, 2016, 35(10): 2783-2792.
- [11] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 马涛, 王怀香, 刘康, 沈茜, 刘心浩. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. *地理研究*, 2016, 35(4): 664-676.
- [12] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 张嘉晖. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析. *生态学报*, 2020, 40(9): 2895-2906.
- [13] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 杨之歌. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. *林业科学*, 2012, 48(10): 1-5.
- [14] 陈妍, 乔飞, 江磊. 基于 InVEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究——以北京为例. *北京大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(3): 553-562.
- [15] Wei P J, Chen S Y, Wu M H, Deng Y F, Xu H J, Jia Y L, Liu F. Using the InVEST model to assess the impacts of climate and land use changes on water yield in the upstream regions of the Shule River Basin. *Water*, 2021, 13(9): 1250.
- [16] Song W, Deng X Z, Yuan Y W, Wang Z, Li Z H. Impacts of land-use change on valued ecosystem service in rapidly urbanized North China Plain. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 245-253.
- [17] Legesse D, Vallet-Coulomb C, Gasse F. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 2003, 275(1/2): 67-85.
- [18] Cuo L, Beyene T K, Voisin N, Su F G, Lettenmaier D P, Alberti M, Richey J E. Effects of mid-twenty-first century climate and land cover change on the hydrology of the Puget Sound Basin, Washington. *Hydrological Processes*, 2011, 25(11): 1729-1753.
- [19] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. *生态学报*, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [20] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 徐新良, 葛劲松, 吴丹, 李志强, 巩国丽, 聂学敏, 贺添, 王立亚, 邴龙飞, 李其江, 陈卓奇, 张更权, 张良侠, 杨永顺, 杨帆, 周万福, 刘璐璐, 祁永刚, 赵国松, 李愈哲. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. *地理学报*, 2016, 71(1): 3-20.
- [21] 宁亚洲, 张福平, 冯起, 魏永芬, 丁家宝, 张元. 秦岭水源涵养功能时空变化及其影响因素. *生态学杂志*, 2020, 39(9): 3080-3091.
- [22] 王盛, 李亚文, 李庆, 胡世雄, 王金凤, 李文静. 变化环境影响下张承地区水源涵养和土壤保持服务及其权衡与协同关系研究. *生态学报*, 2022, 42(13): 5391-5403.
- [23] 张利利. 基于 InVEST 模型的石羊河上游产水量变化及其对气候与土地利用变化的响应[D]. 兰州: 西北师范大学, 2017.
- [24] 陈春阳, 戴君虎, 王焕炯, 刘亚辰. 基于土地利用数据集的三江源地区生态系统服务价值变化. *地理科学进展*, 2012, 31(7): 970-977.
- [25] 徐翠. 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2013.
- [26] 白晓兰, 魏加华, 解宏伟. 三江源区干湿变化特征及其影响. *生态学报*, 2017, 37(24): 8397-8410.
- [27] 姚秀萍, 谢启玉, 黄逸飞. 中国三江源地区降水研究的进展与展望. *大气科学学报*, 2022, 45(5): 688-699.
- [28] 欧阳志云, 张路, 吴炳方, 李晓松, 徐卫华, 肖焱, 郑华. 基于遥感技术的全国生态系统分类体系. *生态学报*, 2015, 35(2): 219-226.
- [29] Dai Y J, Shangguang W, Duan Q Y, Liu B Y, Fu S H, Niu G Y. Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14(3): 869-887.
- [30] 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. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2731-2739.
- [31] 赵亚茹, 周俊菊, 雷莉, 向鹏, 黄美华, 冯炜, 朱国锋, 魏伟, 王静爱. 基于 InVEST 模型的石羊河上游产水量驱动因素识别. *生态学杂志*, 2019, 38(12): 3789-3799.

- [32] Droogers P, Allen R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 2002, 16(1): 33-45.
- [33] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann - Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3/4): 350-363.
- [34] 薛健, 李宗省, 冯起, 缪驰远, 邓晓红, 狄振华, 叶爱中, 龚伟, 张百娟, 桂娟, 高文德. 1980—2017 年祁连山水源涵养量时空变化特征. *冰川冻土*, 2022, 44(1): 1-13.
- [35] 吕乐婷, 任甜甜, 孙才志, 郑德凤, 王辉. 1980—2016 年三江源国家公园水源供给及水源涵养功能时空变化研究. *生态学报*, 2020, 40(3): 993-1003.
- [36] 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.
- [37] 李红梅, 颜亮东, 温婷婷, 冯晓莉. 三江源地区气候变化特征及其影响评估. *高原气象*, 2022, 41(2): 306-316.
- [38] Chu H B, Wei J H, Qiu J, Li Q, Wang G Q. Identification of the impact of climate change and human activities on rainfall-runoff relationship variation in the Three-River Headwaters region. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105516.
- [39] Chen J, Sun B M, Chen D, Wu X, Guo L Z, Wang G. Land use changes and their effects on the value of ecosystem services in the small Sanjiang plain in China. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 752846.
- [40] 王宏杰. 基于 InVEST 的三江源生境质量评价. *价值工程*, 2016, 35(12): 66-70.
- [41] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. *生态学报*, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [42] 许茜, 李奇, 陈懂懂, 罗彩云, 赵新全, 赵亮. 近 40 a 三江源地区土地利用变化动态分析及预测. *干旱区研究*, 2018, 35(3): 695-704.
- [43] 周李磊. 长江上游湿地生态系统服务评估及多情景模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [44] 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.
- [45] 乔飞, 富国, 徐香勤, 安立会, 雷坤, 赵健, 郝晨林. 三江源区水源涵养功能评估. *环境科学研究*, 2018, 31(6): 1010-1018.
- [46] 刘敏超, 李迪强, 温琰茂, 栾晓峰. 三江源地区生态系统水源涵养功能分析及其价值评估. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(3): 405-408.