

DOI: 10.20103/j.stxb.202303260580

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.

Gao X L, Feng Q, Li Z X, Deng X H, Xue J, Zhang B T. Spatio-temporal pattern and key influencing factors of water conservation value in the Three-River Source region. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 7074-7086.

三江源水源涵养价值时空格局及影响因素

高向龙^{1,2}, 冯 起¹, 李宗省^{1,*}, 邓晓红³, 薛 健^{1,2}, 张百婷^{1,2}

1 中国科学院西北生态资源环境研究院, 高寒山区同位素生态水文与国家公园观测站/内陆河流域生态水文重点实验室/甘肃省祁连山生态环境研究中心, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 兰州大学县域经济发展研究院, 兰州 730000

摘要: 水源涵养作为三江源最重要的生态系统服务功能, 是推动三江源生态环境保护和高质量发展的战略支撑。基于 InVEST 模型中的产水模块, 结合影子工程法, 分析三江源水源涵养价值的时空变化, 并利用耦合度模型探究三江源水源涵养价值与其影响要素间的耦合关系。结果表明: (1) 1981—2020 年三江源的水源涵养价值呈整体上升趋势, 平均值为 1562.07 亿元, 呈东南多西北少的空间分布特征, 各区域的单元水源涵养价值表现为: 澜沧江源>黄河源>长江源。(2) 降水量与水源涵养价值在各时段内均存在正相关性, 2010 年前, 降水量与水源涵养价值的相关性显著, 2010 年后, 相关性不显著, 水源涵养价值对降水的响应降低。(3) 林地和草地的单位水源涵养价值高于区域平均值, 耕地、建设用地和未利用地的水源涵养单位水源涵养价值较低。林草地面积增加, 未利用地面积减少, 是三江源水源涵养价值上升的重要因素。(4) 三江源人均水源涵养价值呈波动变化趋势, 多年均值为 25.02 万元/人; 三江源区域经济高速发展, GDP 增速显著高于水源涵养价值增速, 水源涵养价值与 GDP 的比值由 15.48 下降至 2.89, 水源涵养价值乘数显著下降, 水源涵养稀缺性上升。(5) 水源涵养价值与各要素间的耦合度由濒临失调转为初级耦合状态, 相互作用逐渐变强。随着未来气候变化的不确定性增加, 尤其是气温升高, 会成为限制三江源水源涵养价值的主要因素; 推动未利用地转化为生态地类, 将促进区域生态环境质量稳固提升。此外, 三江源区应以保护自然资源和生态环境为主, 改变过去以畜牧业为主的生产方式, 拓展多产业共同发展。

关键词: 三江源; 水源涵养价值; InVEST 模型; 驱动因素; 耦合度

Spatio-temporal pattern and key influencing factors of water conservation value in the Three-River Source region

GAO Xianglong^{1,2}, FENG Qi¹, LI Zongxing^{1,*}, DENG Xiaohong³, XUE Jian^{1,2}, ZHANG Baiting^{1,2}

1 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Observation and Research Station of Eco-Hydrology and National Park by Stable Isotope Tracing in Alpine region/Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands/Gansu Qilian Mountains Ecology Research Center, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 School of Economics Lanzhou University, Lanzhou University Institute of County Economic Development (Institute of Rural Revitalization Strategy), Lanzhou 730000, China

Abstract: As the most important ecosystem service function of the Three-River Source region, water conservation is the strategic support for promoting the ecological environment protection and high-quality development of this area. Based on the water production module in the InVEST model, combined with the shadow engineering method, we analyzed the temporal

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42077187); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目专题 (2019QZKK0405); 中国科学院青年交叉团队项目 (JCTD-2022-18)

收稿日期: 2023-03-26; **网络出版日期:** 2024-06-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizxhhs@163.com

and spatial changes of the water conservation value of the Three-River Source region. We also used the coupling degree model to explore the coupling relationship between the regional conservation value and its influencing factors. The results showed that: (1) The water conservation value of the Three River region showed an overall upward trend from 1981 to 2020, with an average value of 156.207 billion yuan. The spatial distribution characteristics were more in the southeast and less in the northwest. The unit water conservation value of each region was as follows: source of Lancang River>source of Yellow River>source of Yangtze River. (2) There was a positive correlation between precipitation and water conservation value in each period. Before 2010, the correlation between precipitation and water conservation value was significant. After 2010, the correlation was not significant. The response of water conservation value to precipitation decreased. (3) The unit water conservation value of forest land and grassland was higher than the regional average, and the unit water conservation value of cultivated land, construction land and unused land was lower. The increase in the area of forest and grassland and the decrease in the area of unused land were important factors for the increase in the water conservation value of the Three-River Source region. (4) The per capita water conservation value of the Three-River Source region fluctuated, with an average value of 250200 yuan per person for this period; the regional economy of the Three-River Source region was developing rapidly, and the GDP growth rate was significantly higher than the growth rate of the water source conservation value. The ratio of the water source conservation value to GDP dropped from 15.48 to 2.89, the value multiplier of water conservation decreased significantly, and the scarcity of water conservation increased. (5) The coupling degree between the value of water conservation and various elements changed from being on the verge of imbalance to the primary coupling state, and the interaction gradually became stronger. As the uncertainty of future climate change increase, especially the rising temperature, it would become the main factor limiting the water conservation value of this region; promoting the transformation of unused land into ecological land would promote the steady improvement of the regional ecological environment quality. In addition, the Three-River Source region should focus on protecting natural resources and the ecological environment, changing the past production mode dominated by animal husbandry, and expanding the common development of multiple industries.

Key Words: the Three-River Source region; water conservation value; InVEST model; driving factors; coupling degree

水是自然生态系统与社会生态系统中重要的载体,不仅参与了生物与环境之间的物质循环和能量交换^[1],也参与了陆地与海洋之间的水文循环、大气循环和全球生物化学循环^[2-4],还参与了社会间商品贸易的流动过程^[5]。近年来,我国的水资源短缺、水环境恶化、水资源时空分布不均、水土资源不匹配等问题已经成为制约社会可持续发展的重要因素^[6]。水源涵养作为生态系统服务功能的重要内容,直接关系到生态文明建设、水安全保障、水旱灾害防治等涉及国计民生的重大问题^[7],对维持生态系统健康和人类社会可持续发展至关重要^[8]。水源涵养价值作为生态系统服务价值的重要组成部分,可用于构建自然生态系统与生态效益之间的评估体系,识别由水源涵养功能降低所导致的水土流失、洪涝灾害和生物多样性退化等生态环境问题,并揭示水源涵养服务传递的关键区位,是定量评估生态保护成效的有效途径。

近年来,由于人类对水源涵养功能的关注度逐渐提高,水源涵养价值已成为生态系统服务功能价值评估的主要指标之一。据估算,三江源等优先保护区域提供了全国 80.4%的水源涵养价值^[9],而在青藏高原范围内,水源涵养价值占青藏高原生态资产的比例高达 16.5%^[10]。由于水源涵养具有复杂性与动态性^[11],因此准确评估三江源区域长序列时空尺度的水源涵养价值并识别影响其变化的关键因素仍是目前研究的难点与重点。随着 GIS、RS 和计算机技术的发展,InVEST 模型因其定量化、空间可视化程度较高,模型参数、特性参数要求较低等优势被广泛应用于水源涵养评估研究^[8]。例如,国内外学者以将其应用于评估森林^[12]、流域^[13-15]、城市群^[16]和国家^[17-18]等尺度的水源涵养功能及其价值。在驱动因素方面,水源涵养价值变化受自然要素和人类活动的共同影响。吕明轩等^[19]运用地理探测器分析,认为在黄河流域降水量和土地类型与水

源涵养量的交互作用最为显著。在三江源区域,水源涵养变化与降水、相对湿度显著正相关,与温度、蒸散及净辐射负相关^[20]。随着人口经济的快速增长,资源需求进一步增大,生态环境受到一定的冲击,同时政府也开展了一系列的生态保护工程,这些变化影响了中国的水源涵养状况,据此,欧阳志云等^[21]认为水源涵养功能与人类活动关系密切,在中国其与 GDP 密度和人口密度呈显著负相关。然而,大多对水源涵养变化影响因素的研究以定性研究为主,较少考虑水源涵养与其驱动因素的变化趋势及耦合协调关系。

三江源是筑牢青藏高原生态安全屏障的关键区域,是推动中国西部环境保护和高质量发展的战略支持。作为我国重要的水源涵养区,三江源区域分别为长江流域、黄河流域、澜沧江流域供给水资源 1.59×10^{10} 、 3.26×10^{10} 、 $0.73 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[22]。在三江源地区,水源涵养总量呈现出从西北到东南逐渐增高的趋势^[23]。从时间变化来看,三江源区的产水量及水源涵养量呈不显著增加趋势,水源涵养总量经历了骤降-好转-略微降低的变化过程^[24],而在未来气候变化情景下,区域水源涵养量总体呈上升趋势,部分黄河源区水源涵养量呈下降趋势^[25]。20 世纪 70 年代中后期至今,三江源地区草地退化一直在持续发生^[26],高寒草甸的退化使三江源区水源涵养量减少 $1.81 \times 10^9 \text{ t}$ ^[27]。另一方面,随着三江源国家公园的正式设立,三江源生态环境保护已初见成效^[28]。

基于此,本文以三江源为研究区域,利用 InVEST 模型,结合影子工程法评估 1980—2020 年三江源水源涵养价值变化,并探究了水源涵养价值与降水、土地类型、人口和 GDP 的耦合协同关系,以期揭示三江源区域水源涵养价值的时空变化特征,阐明水源涵养服务供需匹配模式和耦合机制,为区域内生态系统保护、水资源优化配置和未来施政方向提供科学依据。

1 研究区概况

三江源地区($31^{\circ}39'—36^{\circ}12' \text{ N}$, $89^{\circ}45'—102^{\circ}23' \text{ E}$)位于青藏高原腹地的青海省南部,总面积约 31 万 km^2 ,是长江、黄河、澜沧江三大河流的源头地区(图 1),素有“中国水塔”之称。地貌类型以山地为主,山脉绵延、地势高耸、地形复杂,平均海拔在 4000m 以上^[29]。区域内气候属于典型的高原大陆性气候,冷热交替,干湿分明^[30],年均气温为 -4.8°C ,多年平均降水量为 484.85mm^[31]。植被类型主要包括高寒草甸、高寒草原和高寒荒漠^[32]。长江总水量的 25%、黄河总水量的 49%和澜沧江总水量的 15%都来自于三江源地区,其多年平均径流量达 499 亿 m^3 ,区域内湖泊众多,面积大于 1 km^2 的有 167 个,雪山冰川总面积 833.4 km^2 ,河湖和湿地总面积 29842.8 km^2 ,是世界上水资源最为丰富的地区之一。

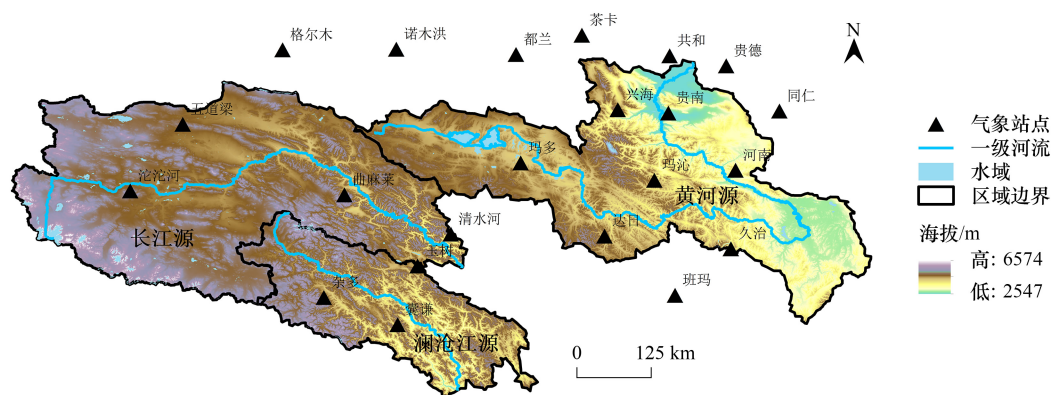


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

2 数据与方法

研究数据主要来源于各大数据中心与数据库,数据经公式及软件处理后,利用生态系统服务评估模型

(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST)的产水模块计算获得研究区域的产水量;利用水源涵养模型与影子工程法计算获得研究区域的水源涵养价值;在此基础上,通过耦合度模型探究水源涵养价值与和影响因素之间的关系。

2.1 数据来源与处理

InVEST 模型中的数据来源及处理见表 1;人口密度数据来源于 LandScan 全球人口数据集(<https://landscan.ornl.gov/>),GDP 数据来源于研究年份各省统计年鉴。其中,栅格数据的分辨率经重采样后均统一为 1km。

表 1 数据来源与处理说明

Table 1 Data source and description

数据类型 Type of data	数据来源 Data sources	数据处理 Data processing
流域边界 Watershed	青藏高原二次科考系列丛书	投影转换
遥感影像 Remote sensing data	地理空间数据云	影像筛选、拼接、流域数据剪裁等
降水 Precipitation	国家气象科学数据中心	空间插值处理,流域数据剪裁等
潜在蒸散 Potential evaporation	国家气象科学数据中心	利用 Penman-Monteith 公式核算
土地利用类型 Land use type	中国科学院资源环境科学数据中心	投影转换,流域数据剪裁等
土壤质地 Soil texture	中国科学院资源环境科学数据中心	栅格计算器计算
根系深度 Root depth	世界土壤数据库(HWSD)	字段提取,流域数据剪裁等
土壤饱和导水率 Soil saturated water conductivity	世界土壤数据库(HWSD)	利用 SPAW 软件计算
流速系数 Velocity coefficient	USDA-NRCS 国家工程手册	

2.2 研究方法

2.2.1 InVEST 模型

通过 InVEST 模型,利用降水、潜在蒸散发、结合土壤数据等参数计算获得区域产水量:

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

式中, Y_{xj} 为 j 类土地利用类型下栅格 x 的产水量(mm); AET_{xj} 为 j 类土地利用类型下栅格 x 的实际蒸散量(mm); P_x 为栅格 x 的降水量(mm)。

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

式中, R_{xj} 为干燥指数,是蒸散量与降水量的比值; ω_x 为用于修正植被可利用水量与降水量比值的无量纲参数,可反映气候与土壤属性,计算公式为:

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

式中, Z 为 Zhang 系数,是表征降水特征的常数,研究表明,当 Zhang 系数为 3.33 时,三江源区模拟产水量的相对误差最小,模拟效果最好^[33]。 $PAWC_x$ 为植被可利用含水量,可根据土壤质地数据计算:

$$PAWC_x = 54.509 - 0.132 \times m_{san} - 0.003 \times (m_{san})^2 - 0.055 \times m_{sil} - 0.006 \times (m_{sil})^2 - 0.738 \times m_{cla} - 0.007 \times (m_{cla})^2 - 2.668 \times m_c + 0.501 \times (m_c)^2 \quad (4)$$

式中, m_{san} 、 m_{sil} 、 m_{cla} 和 m_c 分别为砂粒、粉粒、黏粒和有机质的百分比含量(%)。

2.2.2 水源涵养价值计算

水源涵养的物质质量可利用流速系数、地形指数和土壤饱和导水率对 InVEST 模型计算出的产水进行修正获得:

$$WR_j = \min\left(1, \frac{249}{V_j}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI_j}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_j}{300}\right) \times Y_j \quad (5)$$

$$TI_j = \frac{1}{SD_j \times PS_j} \quad (6)$$

式中, WR_j 为栅格 j 的水源涵养量 (mm); V_j 为流速系数; K_j 为栅格 j 的饱和导水率 (mm/d), 利用 SPAW 软件, 输入土壤类型百分比和有机质、电导率、碎石体积计算获得; TI_j 为栅格 j 的地形指数, 其中, SD_j 为土壤深度 (mm), PS_j 为百分比坡度。

影子工程法被广泛应用于测算生态系统的水源涵养价值^[34-36], 其原理是将生态系统视为天然水库, 假定存在一个与生态系统水源涵养能力相同的人工水库, 通过修建与水源涵养量等量库容的水库成本来反映水源涵养的经济价值, 计算公式为:

$$E = \sum \text{Cell}_{w_j} \times \text{Cell}_{l_j} \times \frac{WY_j}{1000} \times a \quad (7)$$

式中, E 为水源涵养价值 (元), Cell_{w_j} 为栅格 j 的像元宽度 (m), Cell_{l_j} 为栅格 j 的像元长度 (m), WY_j 为栅格 j 的水源涵养量 (mm), a 为单位水库的造价成本 (元/m³)。由于不同年份单位库容造价成本存在较大变化, 如 2005 年单位库容造价成本为 6.11 元/m³, 2018 年为 8.39 元/m³, 增幅 37.32%^[16], 为保证数据的可比性, 本文不考虑货币通胀, 采用 2020 年单位库容造价成本。根据固定资产价格指数核算, 2020 年的单位库容造价成本为 8.4 元/m³。

2.3 耦合度模型与计算方法

由于三江源持续开发建设, 未利用地逐年减少, 土地类型的数值指标采用“总面积减未利用地面积”来表示。根据熵的定义, 确定各项指标的离散度, 并消除量纲不同以及数量级的影响, 对样本值进行归一化处理, 计算样本值 x_{ij} 的无量纲常数 x'_{ij} :

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (8)$$

各要素耦合度计算方法如下:

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}}, \quad i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}), \quad j = 1, \dots, m \quad (10)$$

$$d_j = 1 - e_j, \quad j = 1, \dots, m \quad (11)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}, \quad j = 1, \dots, m \quad (12)$$

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_j x'_{ij}, \quad i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m \quad (13)$$

式中, P_{ij} 为第 j 项指标下第 i 个样本值占该指标的比重; e_j 为第 j 项指标熵值; d_j 为第 j 项指标信息熵冗余度 (差异); w_j 为第 j 项指标的权重; S_j 为样本值的耦合度。

水源涵养价值、降水量、土地利用、人均水源涵养价值和水源涵养价值乘数的权重分别为 w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 和 w_5 。水源涵养价值、自然要素和社会要素的综合耦合度评价函数 (以下简称“综合耦合度评价函数”) 为:

$$f(x_i) = w_1 x'_{i1} + w_2 x'_{i2} + w_3 x'_{i3} + w_4 x'_{i4} + w_5 x'_{i5} \quad (14)$$

水源涵养价值和自然要素的耦合度评价函数 (以下简称“自然耦合度评价函数”) 为:

$$g(x_i) = w'_1 x'_{i1} + w'_2 x'_{i2} + w'_3 x'_{i3} \quad (15)$$

式中, w'_1 、 w'_2 和 w'_3 分别为 $\frac{w_1}{w_1 + w_2 + w_3}$ 、 $\frac{w_2}{w_1 + w_2 + w_3}$ 和 $\frac{w_3}{w_1 + w_2 + w_3}$ 。

水源涵养价值和社会要素的耦合度评价函数(以下简称“社会耦合度评价函数”)为:

$$h(x_i) = w''_1 x'_{i1} + w'_4 x'_{i4} + w'_5 x'_{i5} \quad (16)$$

式中, w''_1 、 w'_4 和 w'_5 分别为 $\frac{w_1}{w_1 + w_4 + w_5}$ 、 $\frac{w_4}{w_1 + w_4 + w_5}$ 和 $\frac{w_5}{w_1 + w_4 + w_5}$ 。

为探究水源涵养价值与各指标之间的关系,本文将降水量和土地类型归为自然要素,将人均水源涵养价值和水源涵养价值乘数归为社会要素,其中,价值乘数是资产价值与其他某种指标之间的比率^[37]。通过水源涵养价值与区域 GDP 的比率构建三江源水源涵养价值乘数,以反映区域水源涵养价值的稀缺性,并以 2020 年为基准年,根据中国 CPI(消费者物价指数)增长率,消除 2000—2019 年通货膨胀对区域 GDP 的影响。最后,采用均匀分布函数法对耦合度等级进行划分^[38](表 2)。

表 2 耦合度等级划分

Table 2 Coupling degree classification

耦合度 Coupling degree	0—0.09	0.10—0.19	0.20—0.29	0.30—0.39	0.40—0.49
耦合等级 Level	极度失调	严重失调	中度失调	轻度失调	濒临失调
耦合度 Coupling degree	0.50—0.59	0.60—0.69	0.70—0.79	0.80—0.89	0.90—1.00
耦合等级 Level	勉强耦合	初级耦合	中级耦合	良好耦合	优质耦合

3 结果与分析

3.1 水源涵养价值的时空变化

1981—2020 年三江源区域水源涵养价值的平均值为 1562.07 亿元,最高为 2018 年 2492.71 亿元,最低值为 2015 年 577.78 亿元,年均水源涵养价值呈小幅上升趋势,变化速率为 14.55 亿元/年。以 2005 年为界,1981—2004 年,水源涵养价值以低于多年平均值为主体,该时段水源涵养价值的平均值为 1404.01 亿元,特别是 1990 年以后,仅 1999 年的水源涵养价值 1608.2 亿元略高于多年平均值 46.13 亿元。2005—2020 年水源涵养功能明显好转,水源涵养价值上升,该时段水源涵养价值的平均值为 1799.17 亿元,是多年平均值的 1.15 倍,自 2016 年 3 月三江源国家公园体制试点成立后,区域内水源涵养价值显著上升,其中,2017—2020 年为近 40 年来水源涵养价值最高的 4 个年份,分别高于多年平均值 53.01%、59.58%、55.74%和 38.51%(图 2)。

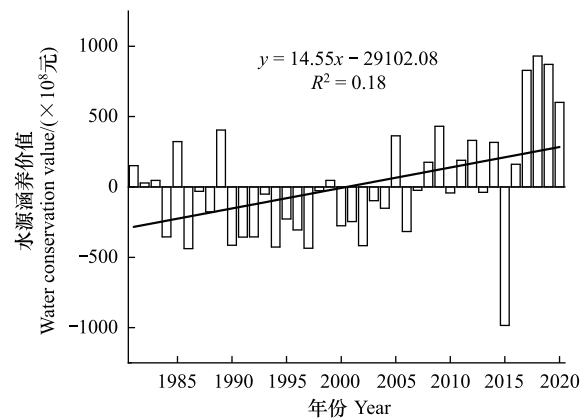


图 2 1981—2020 年水源涵养价值距平图

Fig.2 Anomaly map of water conservation value from 1981 to 2020

三江源区多年平均单元水源涵养价值为 49.74 万元/ km^2 ,1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年和 2010—2020 年四个时段的平均单元水源涵养价值分别为 48.25 万元/ km^2 、42.05 万元/ km^2 、48.70 万元/ km^2 和 59.95 万元/ km^2 ,单元水源涵养价值经历了先降低后逐渐增高的趋势,整体呈东南向西北逐渐递减的趋势。从区域来看,多年平均单元水源涵养价值依次为:澜沧江源(73.37 万元/ km^2)>黄河源(57.34 万元/ km^2)>长江源(33.22 万元/ km^2),其中,长江源的水源涵养价值呈南多北少的分布格局;黄河源水源涵养价值较高的区域集中于南侧,尤其是东南侧的水源涵养价值较为密集,整体呈东南多西北少;澜沧江源的水源涵养价值空间分布较为均匀,呈四周略高于中间的分布格局。在不同的时段内,黄河源的水源涵养价值总量最高,多年平均

值为 706.92 亿元,占三江源区域水源涵养价值总量的 42.97%—47.16%。黄河源与长江源的单元水源涵养价值变化趋势同三江源保持一致,经历了先降低后逐渐升高的趋势,而澜沧江源的单元水源涵养价值是长江源单元水源涵养价值量的 2—2.73 倍,黄河源的 1.16—1.44 倍,三江源区域的 1.39—1.65 倍,1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年和 2010—2020 年澜沧江源的平均单元水源涵养价值分别为 67.41 万元/km²、69.4 万元/km²、73.59 万元/km²和 83.09 万元/km²,保持连续上升(图 3)。

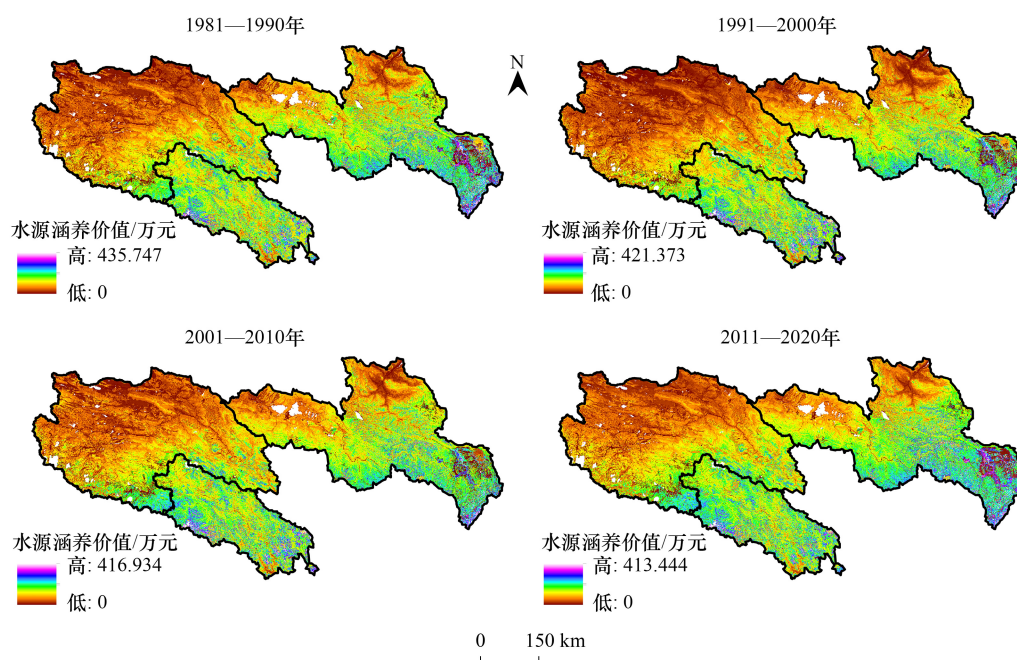


图 3 不同时期水源涵养价值的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of water conservation value in different periods

3.2 水源涵养价值对降水变化的响应

1981—2020 年,三江源区域降水量的平均值为 534.95mm,1989 年降水量最高,为 630.02mm,2015 年降水量最低,为 329.7mm。采用 Kendall 相关分析方法,结果表明,水源涵养价值与降水量在各时段内均存在正相关性,尤其是水源涵养价值较低的年份受降水量的影响更为明显。在 1981—2010 年,水源涵养价值与降水量的相关性显著($P < 0.01$),降水是影响水源涵养价值的关键因素之一;2011—2020 年水源涵养价值与降水量的相关性不显著($P > 0.05$),特别是 2016—2020 年为三江源区域的平水年,但该时段的水源涵养价值显著高于多年平均值,水源涵养价值与降水量出现不协同的变化趋势,表明三江源区域的水源涵养价值受降水要素的影响有所减小(图 4)。

3.3 水源涵养价值对土地利用类型变化的响应

由于研究区土地利用类型数据的不连续性,选用 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年的土地利用数据分别作为模拟 1981—1985 年、1986—1995 年、1996—2005 年、2006—2015 年和 2016—2020 年水源涵养价值的要素。研究区的土地利用类型以草地为主,占区域面积的 72.98%—76.35%,1981—2020 年草地面积增长 10277km²,耕地、林地、水域、建设用地和未利用地面积占比分别为 0.37%—0.59%、5.19%—6.33%、2.41%—2.63%、0.02%—0.06% 和 14.06—18.96%,增长面积分别为 664km²、3519km²、627km²、117km² 和 -15162km²。除未利用地外,各土地利用类型面积均呈不同程度增长,特别是 2000—2010 年,三江源区域林地和草地面积增长明显,表明区域生态呈向好发展趋势。InVEST 水源涵养模型反映了土壤含水量、冠层截流量和枯落物持水量,不包含水域的径流量,因此,本文仅分析水域的面积变化,水域的水源涵养价值及单位水源涵养价值为系统误差。2005 年前,研究区不同土地类型的水源涵养价值表现为:草地>未利用地>林地>耕

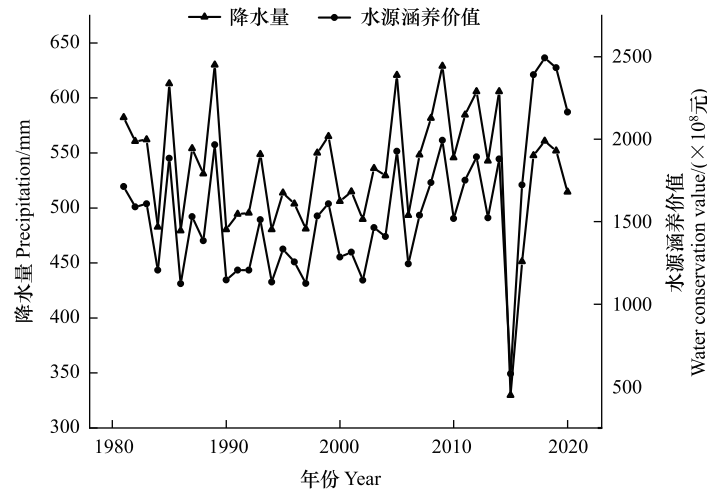


图 4 1981—2020 年水源涵养价值与降水量年际变化及其相关性

Fig.4 Interannual variation and correlation between water conservation value and precipitation from 1981 to 2020

地>建设用地,2005 年后依次为:草地>林地>未利用地>耕地>建设用地。各土地利用类型中,仅林地和草地的单位水源涵养价值高于区域平均值,这是由于林地与草地中的冠层、枯落物能有效截留水分,因此涵养水源的能力较强,而耕地根系较浅,建设用地受人类活动影响强烈,未利用地包括沙地、盐碱地、苔原和裸土地等缺少能有效截留水分的自然植被,因此耕地、建设用地和未利用地的水源涵养单位水源涵养价值较低。研究区域草地面积广阔,单位水源涵养价值较高,其水源涵养价值总量最高;未利用地为研究区面积第二的土地利用类型,2000—2010 年未利用地的急剧减少和林草地面积的显著增加,使得该时间段林地水源涵养价值超越未利用地,这也是研究区水源涵养价值上升的主要原因。耕地和建设用地的水源涵养价值虽有所上升,但由于面积占比较小,因此对区域水源涵养价值的影响较小(表 3)。

表 3 各年份(代)土地利用类型及水源涵养价值

Table 3 Land use type and water conservation value in each year or generation

属性 Attribute	年份 Year	耕地 Cultivated	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction	未利用地 Unused
面积 Area/km ²	1980 年	1163	16294	229584	7638	79	59344
	1990 年	1264	16320	229459	7684	78	59394
	2000 年	1354	16301	229300	7577	91	59575
	2010 年	1853	19900	239815	8242	135	44254
	2020 年	1827	19813	239861	8265	196	44182
水源涵养价值 Water conservation value/ (×10 ⁸ 元)	1981—1985 年	2.44	139.69	1285.67	0.17	0.24	171.86
	1986—1995 年	2.31	133.02	1083.28	0.73	0.19	135.36
	1996—2005 年	2.43	134.39	1125.86	0.23	0.20	144.17
	2006—2015 年	3.80	192.33	1298.60	0.31	0.42	70.45
	2016—2020 年	6.31	278.43	1841.41	2.64	0.58	111.29
单位水源涵养价值 Unit water conservation value/ (×10 ⁴ 元/km ²)	1981—1985 年	20.94	85.73	56.00	0.22	29.88	28.96
	1986—1995 年	18.25	81.51	47.21	0.95	23.95	22.79
	1996—2005 年	17.98	82.44	49.10	0.30	21.64	24.20
	2006—2015 年	20.50	96.65	54.15	0.38	30.81	15.92
	2016—2020 年	34.52	140.53	76.77	3.20	29.76	25.19

3.4 水源涵养价值对人口与 GDP 的响应

3.4.1 人口变化的时空模态

2000—2020 年,三江源区域的人口密度由 1.63 人/km²增长至 2.44 人/km²,人口总量由 52.68 万人增加

至 78.9 万人,年均增速 1.94%,其中,长江源、黄河源和澜沧江源的人口密度分别由 0.45 人/km²、2.57 人/km²和 2.42 人/km²增长至 0.74 人/km²、3.5 人/km²和 4.25 人/km²、人口总量分别由 6.29 万人、32.74 万人和 13.65 万人增加至 10.34 万人、44.58 万人和 23.98 万人,年均增速分别为 2.4%、1.48%和 2.72%。2012 年为三江源区域人口增速的转折点,2000—2012 年,区域人口增速较快,年均增速为 2.96%,2012—2020 年,区域人口增速放缓,年均增速仅为 0.21%(图 5)。从空间分布来看,长江源区域整体地广人稀,北部人口稀少,人口较为密集的区域(>5 人/km²)仅集中在东南地区的一小部分。三江源区人口密集区主要集中在黄河源和澜沧江源。黄河源人口呈东多西少的分布格局,人口较为密集的区域分布在东南、东北和中部部分区域;澜沧江源区域北部人口较少,中部和南部人口较为密集且分布相对均匀(图 6)。

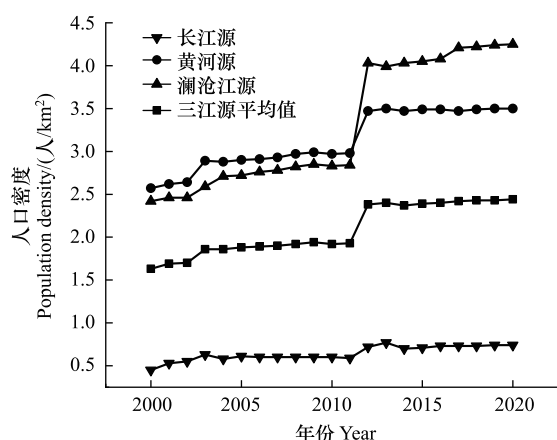


图 5 2000—2020 年三江源各区域人口密度变化

Fig.5 The change of population density in the Three-River Source Region from 2000 to 2020

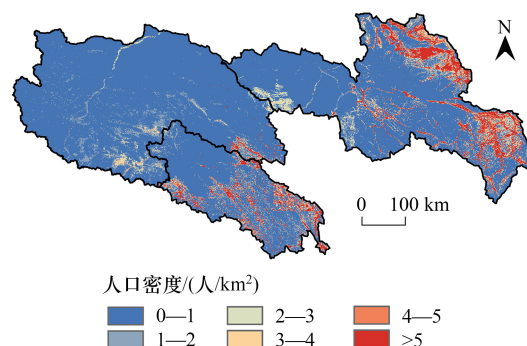


图 6 2000—2020 年三江源区域人口的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of population in the Three-River Source Region from 2000 to 2020

3.4.2 三江源区 GDP 的时空变化

根据国家及地方统计年鉴,对三江源区域境内的 26 个县级行政单位的 GDP 进行了多年汇总。由于西藏自治区缺少部分年份县级行政单位 GDP 数据,本文以统计年份县域 GDP 占市域 GDP 的平均比例乘数据缺少年份的市域 GDP 进行县域 GDP 缺失年份的数据估算。26 个县级行政单位包括青海省的达日县、甘德县、久治县、玛多县、玛沁县、贵南县、同德县、兴海县、格尔木市、河南蒙古族自治县、泽库县、称多县、囊谦县、曲麻莱县、玉树市、杂多县和治多县 17 个县级行政单位,西藏自治区的丁青县、江达县、卡诺区、类乌齐县和巴青县 5 个县级行政单位,四川省的阿坝县、红原县和若尔盖县 3 个县级行政单位,以及甘肃省的玛曲县。

三江源 GDP 由 2000 年 52.49 亿元增长至 2020 年 748.45 亿元,增加 14.26 倍,年均增长 33.14 亿元,年均增速为 13.49%。由拟合方程可知,2011 年为三江源区域 GDP 增速的转折点,2000—2011 年,区域 GDP 年均增速为 19.25%,GDP 高速增长,且呈持续增长态势;2011—2020 年,区域 GDP 年均增速为 5.6%,GDP 增速放缓,波动上升(图 7)。从空间分布来看,位于长江源区域的格尔木市 GDP 最高,2000 年 GDP 为 16.74 亿元,2020 年 GDP 为 305.93 亿元,位于黄河源区域的玛多县 GDP 最低,2000 年 GDP 为 0.23 亿元,2020 年为

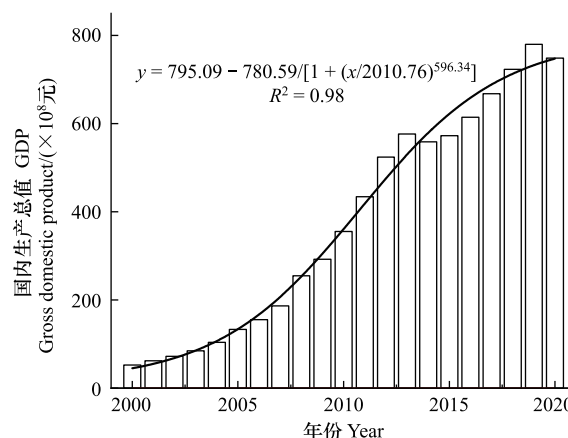


图 7 2000—2020 年三江源区域 GDP 变化

Fig.7 The change of GDP in the Three-River Source Region from 2000 to 2020

3.82 亿元,在 2000 年和 2020 年 GDP 最高区域分别是最低区域的 72.78 倍和 80.09 倍,区域 GDP 差异巨大。2000 年,GDP 占比较高的县域主要集中在源区东部的黄河源区域,2020 年,源区南部各县域 GDP 占比上升,表明源区南部的澜沧江区域经济发展较快,成为区域经济新的增长极(图 8)。

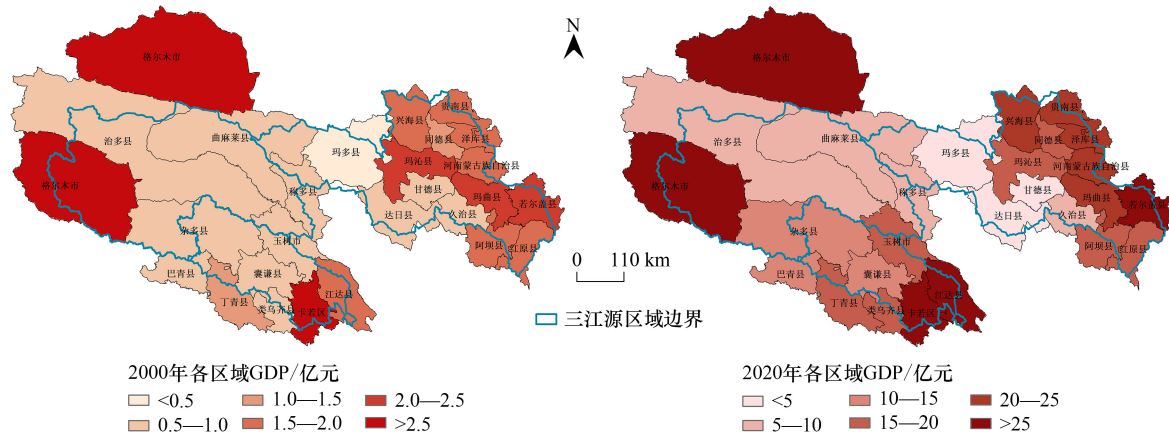


图 8 三江源区各县(区、市)GDP

Fig.8 GDP of counties in the Three-River Source Region

3.4.3 水源涵养价值对人口与 GDP 变化的响应

水源涵养价值作为生态系统服务价值的重要组成部分,与人类福祉密切相关。我国人均生态系统服务价值为 2.84 万元/人^[39],2000—2020 年,三江源平均水源涵养价值为 25.02 万元/人,仅人均水源涵养价值 1 项即为我国人均生态系统服务价值的 8.81 倍。三江源多年人均水源涵养价值最低值为 2015 年 7.48 万元/人,最高值为 2009 年 31.78 万元/人,近 21 年人均水源涵养价值波动变化,大致分为 4 个阶段:2000—2006 年间,人均水源涵养价值较低,除 2005 年外,均低于多年平均值;2007—2011 年间,除 2010 年人均水源涵养价值为 24.43 万元/人,略低于多年平均值外,其余年份均高于多年平均值;2012—2016 年人均水源涵养价值均低于多年平均值,为人均水源涵养价值最低时段,其中,2013 年和 2015 年为最低的两个年份;2017—2020 年,人均水源涵养价值显著增加,均高于 27.42 万元/人(图 9)。三江源多年水源涵养价值乘数的平均值为 5.79,最高值为 2000 年,水源涵养价值是区域 GDP 的 15.48 倍,最低值为 2015 年,水源涵养价值是区域 GDP 的 0.91 倍,2020 年为 2.89 倍。2000—2020 年三江源水源涵养价值乘数以每年 8.32% 的变化率下降,水源涵养价值的增长速率显著低于 GDP 的增长速率,水源涵养价值的稀缺性上升(图 9)。

4 水源涵养价值与自然要素和社会要素耦合协调度分析

2000—2020 年,综合耦合度评价函数 $f(x_i)$ 整体呈上升趋势,由 2000 年 0.49 上升至 2020 年 0.64,耦合类型由濒临失调变为初级耦合,表明三江源水源涵养价值与降水、土地利用等自然要素以及人均水源涵养价值、水源涵养价值乘数等社会要素的相互作用逐渐变强。自然耦合度评价函数 $g(x_i)$ 显著上升,由 2000 年 0.16 上升至 2020 年 0.91,耦合类型由严重失调变为优质耦合,说明近年来降水和土地利用与水源涵养价值的相互作用极高,自然要素已成为限制区域水源涵养价值的主要因素。社会耦合度评价函数 $h(x_i)$ 显著降低,由 2000 年 0.8 降低至 2020 年 0.36,耦合类型由良好耦合变为轻度失调,2000—2020 年区域经济和人口增长较快,社会经济发展与水源涵养价值的增长相互颉颃,尤其是经济的粗狂式发展,消耗了一定的能源与资源,导致水源涵养价值的稀缺性上升,因此,水源涵养价值与社会因素的耦合性出现失调趋势(图 10)。

5 讨论

本文利用 InVEST 模型并结合影子工程法计算了 1981—2020 年三江源的水源涵养价值,研究结果表明三

江源的水源涵养价值呈小幅上升趋势,并呈东南多西北少的空间分布特征,该结果与周雪彤等^[40]研究结论基本一致。降水与水源涵养价值表现出自西北向东南递增的相同趋势,位于东南处的澜沧江源,年均降水量为 575.48mm,分别是黄河源和长江源的 1.26 倍和 1.55 倍^[24],此外,澜沧江源的土地类型以高寒森林、灌丛、草原草甸分布为主,植被对降水的截留能力较高,因此,澜沧江源为单元水源涵养价值最高的区域。从驱动因素来看,2001 年以后,三江源水源涵养价值与社会要素和自然要素由濒临失调转为初级耦合状态,表明水源涵养价值与各要素的相互作用逐渐增强。由于三江源国家公园的成立,区域生态环境得到有效保护,降水量充盈稳定^[41],增强了区域产水量,植被覆盖率显著增加^[42],增强了截留水分的能力,这可能是 2016 年以后三江源水源涵养价值增高的主要原因,并使得降水量和土地利用类型等自然要素与水源涵养价值的相互作用变强,成为促进水源涵养价值增长的主要驱动力;同时,随着中国人口及 GDP 增速变缓,社会经济发展受到了一定限制,对资源和能源的消耗量减缓,预计未来,社会要素与水源涵养价值的耦合度的下降趋势将有所减缓,或在轻度失调的现状附近上下波动。

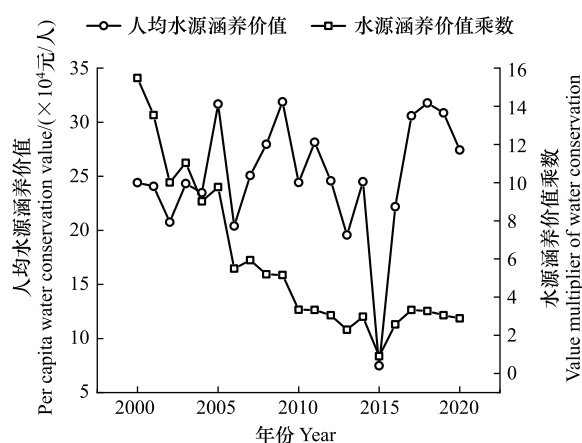


图 9 2000—2020 年三江源人均水源涵养价值与水源涵养价值乘数变化

Fig.9 The change of per capita water conservation value and value multiplier of water conservation in the Three-River Source Region from 2000 to 2020

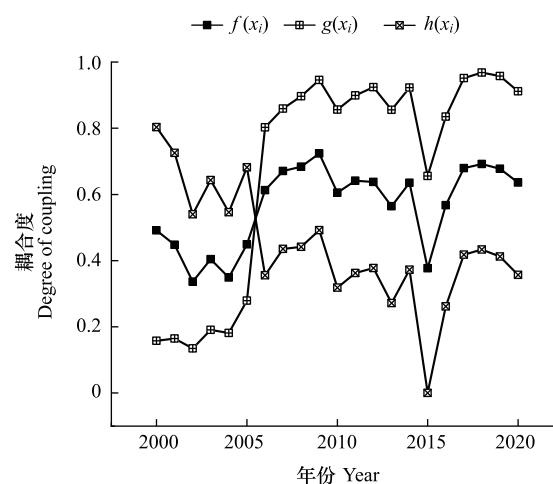


图 10 三江源水源涵养价值与自然要素和社会要素耦合度

Fig.10 Coupling degree of water conservation value and natural elements and social elements in the Three-River Source Region

近 60 年来,三江源地区平均温度和降水量均呈增加趋势^[43],以暖湿化气候为主。在全球气候变暖背景下,三江源等高寒区变暖趋势更为显著,利用驱动区域气候模式系统 PRECIS 模拟三江源 2071—2100 年气候变化,结果表明区域气温将上升 3℃ 以上,降水量将呈减少趋势,气候向暖干化方向发展^[44];利用 CMIP5 模式模拟青藏高原 2006—2100 气候变化,结果则表明,三江源区域未来整体变暖变湿^[45]。可见,三江源未来气候变化呈现出极大的不确定性,但不同模式对气温的升高趋势均有一致反映。无论未来气候向暖湿化发展还是暖干化发展,气温升高会加剧区域蒸发量,从而遏制区域水源涵养价值的增长。随着未来变暖趋势的持续,气温升高会成为三江源水源涵养价值的主要限制因素。

三江源单元水源涵养价值较低的未利用地面积的减少及单元水源涵养价值较高的林草地面积增加是水源涵养价值上升的重要因素。一方面,未利用地的转换对生态环境的恢复起着关键作用,如祁连山草地面积的增加主要来自未利用地的转换,这种变化改善了区域生境质量^[46]。另一方面,林草地退化会引起土壤理化性状的改变,进而影响土壤持水性,20 世纪 70 年代中后期至 2004 年,三江源草地退化现象持续发生^[47],仅草甸退化就显著减少 25.97% 的水源涵养量^[27]。土地退化会限制区域水源涵养功能的正常发挥,进而影响区域生态安全,应引起高度重视。从自然保护区到国家公园,国家对三江源生态环境保护的程度越来越大,生态保护投入显著促进三江源地区生态环境质量提升^[48],平均气候状况下,生态工程实施后三江源水源涵养价值

增加了 23.98%^[49]。未来应推动以国家公园为核心的生态治理体系建设,加强三江源同周边区域的一体化保护和联动治理,推动未利用地转化为生态地类,促进区域生态环境质量稳固提升。

人口和 GDP 对水源涵养价值的影响主要体现在土地利用的变化,社会经济的发展会引起单元水源涵养价值较低的耕地和建设用地面积增加。随着市场经济的发展,牧民大范围放牧,使草地承载力过大,承受力较弱的土地开始退化^[50]。从空间分布来看,人口承载力超载的区域主要集中于三江源东部^[51],虽然东部区域水热条件好,产草量高^[52],但东部区域草地面积有限,人口密度较高,仅靠畜牧业生产,无法满足实际人口需求。在三江源国家公园建设和区域社会经济高质量发展的背景下,三江源区应以保护自然资源和生态环境为主,改变过去以畜牧业为主的生产方式,拓展多产业共同发展,在限制中谋发展,在稳定中谋经济。

作为“中华水塔”,三江源的水源涵养对区域生态环境和可持续发展至关重要。本文现阶段仅初步探究了三江源水源涵养价值的时空分布,讨论了降水量、土地利用、人口和 GDP 等主要驱动力因素。为探求区域高质量发展模式,应对未来气候变化,今后的研究应更加关注水源涵养对水资源供给和气候调节等自然资源和生态系统服务功能所贡献的价值,以及水源涵养功能对气温和产业结构等自然社会要素的响应。

6 结论

基于 InVEST 模型和影子工程法,分析了 1981—2020 年三江源水源涵养价值的时空模态,利用耦合度模型探究了不同要素对水源涵养价值的影响,主要结论如下:

(1) 1981—2020 年三江源的平均水源涵养价值为 1562.07 亿元,并以 14.55 亿元/a 的变化率呈上升趋势,水源涵养价值呈东南多西北少的分布特征,各区域的单元水源涵养价值表现为:澜沧江源>黄河源>长江源。

(2) 降水和土地利用是影响水源涵养价值的主要因素,其中,降水量与水源涵养价值在各时段内均存在正相关性。2005 年前,不同土地类型的水源涵养价值表现为:草地>未利用地>林地>耕地>建设用地,2005 年后依次为:草地>林地>未利用地>耕地>建设用地。林草地面积增加,未利用地面积减少,是三江源水源涵养价值上升的重要因素。

(3) 2000—2020 年,三江源人均水源涵养价值呈波动变化趋势,多年均值为 25.02 万元/人,近 20 年三江源区 GDP 高速发展,GDP 增速显著高于水源涵养价值增速,水源涵养价值与 GDP 的比值由 15.48 下降至 2.89,水源涵养价值乘数显著下降,水源涵养稀缺性上升。

(4) 各要素间的耦合度由濒临失调转为初级耦合状态,各要素的相互作用逐渐变强,且近年来降水和土地利用等自然要素成为限制区域水源涵养价值的主要因素。从自然要素的角度来看,随着未来气候变化的不确定性增加,尤其是气温升高,会成为限制三江源水源涵养价值的主要因素,推动未利用地转化为生态地类,将促进区域生态环境质量稳固提升;从自然要素的角度来看,三江源区应以保护自然资源和生态环境为主,改变过去以畜牧业为主的生产方式,拓展多产业共同发展。

参考文献 (References):

- [1] 刘昌明,王中根,杨胜天,桑燕芳,刘小莽,李军. 地表物质能量交换过程中的水循环综合模拟系统(HIMS)研究进展. 地理学报, 2014, 69(5): 579-587.
- [2] 宋献方,李发东,于静洁,唐常源,杨聪,刘相超,佐仓保夫,近藤昭彦. 基于氢氧同位素与水化学的潮白河流域地下水水循环特征. 地理研究, 2007, 26(1): 11-21.
- [3] Liu B J, Tan X Z, Gan T Y, Chen X H, Lin K R, Lu M Q, Liu Z Y. Global atmospheric moisture transport associated with precipitation extremes: mechanisms and climate change impacts. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2020, 7(2): e1412.
- [4] Fasullo J T. Robust land-ocean contrasts in energy and water cycle feedbacks. Journal of Climate, 2010, 23(17): 4677-4693.
- [5] 刘宝勤,封志明,姚治君. 虚拟水研究的理论、方法及其主要进展. 资源科学, 2006, 28(1): 120-127.
- [6] 刘佳骏,董锁成,李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究. 自然资源学报, 2011, 26(2): 258-269.
- [7] 高红凯,刘俊国,高光耀,夏军. 水源涵养功能概念的生态和水文视角辨析. 地理学报, 2023, 78(1): 139-148.
- [8] 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.
- [9] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. Science, 2016, 352

- (6292): 1455-1459.
- [10] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [11] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [12] 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.
- [13] 陈骏宇, 刘钢, 白杨. 基于 InVEST 模型的太湖流域水源涵养服务价值评估. 水利经济, 2016, 34(2): 25-29, 84.
- [14] 刘菊, 傅斌, 张成虎, 胡治鹏, 王玉宽. 基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 577-585.
- [15] Daneshi A, Brouwer R, Najafinejad A, Panahi M, Zarandian A, Maghsood F F. Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST. Journal of Hydrology, 2021, 593: 125621.
- [16] 杜贺秋, 于铎, 张蓬涛, 张路路. 京津冀地区水源涵养价值流动分析及生态补偿额度. 生态学报, 2022, 42(23): 9871-9885.
- [17] 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.
- [18] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, Jones L, Ziv G, Clarke D, Oliver T H, Bullock J M. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. The Science of the Total Environment, 2016, 569/570: 1418-1426.
- [19] 吕明轩, 张红, 贺桂珍, 张霄羽, 刘勇. 黄河流域水源涵养服务功能动态演变及驱动因素探究. 生态学报, 2024, 44(7): 1-11.
- [20] 胡克梅. 基于多源数据的重点生态功能区水源涵养服务研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
- [21] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖燚, 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.
- [22] 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.
- [23] 张法伟, 李红琴, 罗方林, 王春雨, 王军邦, 马文婧, 杨永胜, 李英年. 基于增强回归树模型的三江源国家公园表层土壤储水及水源涵养功能的评估. 生态学报, 2022, 41(12): 2471-2478.
- [24] 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.
- [25] Xue J, Li Z X, Feng Q, Gui J, Zhang B J. Spatiotemporal variations of water conservation and its influencing factors in ecological barrier region, Qinghai-Tibet Plateau. Journal of Hydrology-Regional Studies, 2022, 42.
- [26] 刘纪远, 徐新良, 邵全琴. 近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征. 地理学报, 2008, 63(4): 364-376.
- [27] 徐翠, 张林波, 杜加强, 郭杨, 吴志丰, 徐延达, 李芬, 王凤玉. 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响. 生态学报, 2013, 33(8): 2388-2399.
- [28] 付梦娣, 刘伟玮, 李博炎, 任月恒, 李爽, 白雪, 李俊生, 朱彦鹏. 国家公园生态环境保护成效评估指标体系构建与应用. 生态学杂志, 2021, 40(12): 4109-4118.
- [29] 曹晓云, 肖建设, 郝晓华, 史飞飞, 刘致远, 李素云. 2001—2020 年三江源地区积雪日数变化及地形分异. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1370-1380.
- [30] 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.
- [31] 曾晓明, 杨莹, 巩勿然, 杨东东, 李皓菁. 三江源地区藏野驴、藏原羚栖息地适宜性评价及动态趋势. 四川动物, 2023, 42(4): 371-380.
- [32] 曹巍, 刘璐璐, 吴丹, 黄麟. 三江源国家公园生态功能时空分异特征及其重要性辨识. 生态学报, 2019, 39(4): 1361-1374.
- [33] 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.
- [34] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, 19(5): 19-25.
- [35] 李晶, 任志远. 秦巴山区植被涵养水源价值测评研究. 水土保持学报, 2003, 17(4): 132-134, 138.
- [36] 李晶, 任志远. 陕北黄土高原生态系统涵养水源价值的时空变化. 生态学杂志, 2008, 27(2): 240-244.
- [37] 杨洁. 环保企业价值市场法评估中的价值乘数修正与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [38] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例. 热带地理, 1999, 19(2): 76-82.
- [39] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [40] 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.
- [41] 张青, 陈丹, 唐忠涛, 白延晖, 祁栋林. 1961—2020 年三江源地区候降水变化特征分析. 青海草业, 2022, 31(1): 46-52.
- [42] 谢绮丽, 杨鑫, 郝利娜. 2001—2020 年三江源区植被覆盖时空变化特征及其影响因素. 水土保持通报, 2022, 42(5): 202-212.
- [43] 许学莲, 李积芳, 李金凤, 文生祥, 李春晖. 三江源地区气温和降水变化对气候生产潜力的影响. 青海草业, 2022, 31(4): 45-49.
- [44] 许吟隆, 张颖娴, 林万涛, 徐宾, 肖子牛. “三江源”地区未来气候变化的模拟分析. 气候与环境研究, 2007, 12(5): 667-675.
- [45] 王玉琦, 鲍艳, 南素兰. 青藏高原未来气候变化的热动力成因分析. 高原气象, 2019, 38(1): 29-41.
- [46] 薛晓玉, 王晓云, 段含明, 杨露, 颜耀文. 基于土地利用变化的祁连山地区生境质量时空演变分析. 水土保持通报, 2020, 40(2): 278-284, 325.
- [47] 吴丹, 曹巍, 邵全琴, 赵志平. 三江源地区草地退化对土壤含水量的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(3): 182-186.
- [48] 王清韵, 周丁扬, 安萍莉, 姜广辉. 自然保护区政策对区域生态环境质量的影响——以三江源地区为例. 应用生态学报, 2023, 34(5): 1349-1359.
- [49] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 曹巍. 三江源地区林草生态系统水源涵养服务评估. 水土保持通报, 2016, 36(3): 206-210.
- [50] 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.
- [51] 王穗子, 樊江文, 张雅娴, 官惠玲, 张海燕. 基于草地畜牧业生产的三江源地区承载力多情景模拟分析. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1893-1902.
- [52] Zhang L X, Fan J W, Zhou D C, Zhang H Y. Ecological protection and restoration program reduced grazing pressure in the Three-River Headwaters region, China. Rangeland Ecology & Management, 2017, 70(5): 540-548.