

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.06.008

CSTR:32310.14.stbxb.2025.06.008

曹梦,信忠保.1990—2020年西南高山峡谷区水源涵养功能时空变化及其驱动因素[J].水土保持学报,2025,39(6):290-300,309.

CAO Meng, XIN Zhongbao. Spatiotemporal variations and driving factors of water conservation function in southwest alpine-gorge region, China from 1990 to 2020[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):290-300,309.

1990—2020年西南高山峡谷区水源涵养 功能时空变化及其驱动因素

曹梦^{1,2}, 信忠保^{1,2}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.北京林业大学山西吉县

森林生态系统国家野外科学观测研究站,北京 100083)

摘要: [目的] 科学评估西南高山峡谷区水源涵养功能的时空变化及其驱动因素,为区域水资源管理和生态保护提供科学依据。 [方法] 基于指标体系法和 InVEST 模型法,评估了 1990—2020 年西南高山峡谷区水源涵养能力时空变化及其驱动因素。 [结果] 1) 指标体系法和 InVEST 模型法评估水源涵养的空间分布格局基本一致,水源涵养指数与水源涵养量呈显著正相关($p < 0.001$),表明 2 种方法可以相互验证。 2) 1990—2020 年,西南高山峡谷区水源涵养量整体呈略微下降趋势,变化速率为 $-41.24 \text{ mm}/(30 \text{ a})$ ($p = 0.071$),水源涵养量的下降主要受降水减少和潜在蒸散发增加的影响。 3) 西南高山峡谷区水源涵养呈现“南高北低”的特征。降水丰沛、植被覆盖度高的藏东南地区水源涵养能力较强,而降水稀少、地形陡峭的四川北部山区水源涵养能力相对较弱。 [结论] 研究结果揭示了西南高山峡谷区水源涵养能力的时空变化规律及其驱动因素,可为工具选择、模型优化和区域生态系统管理提供科学支撑。

关键词: 西南高山峡谷区; 水源涵养; 指标体系; 熵权法; InVEST 模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0290-11

Spatiotemporal Variations and Driving Factors of Water Conservation Function in Southwest Alpine-Gorge Region, China from 1990 to 2020

CAO Meng^{1,2}, XIN Zhongbao^{1,2}

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. National Field Scientific Observation and Research Station of Forest Ecosystem in Jixian County,

Shanxi Province, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study aims to scientifically evaluate the spatiotemporal variations and driving factors of water conservation function in the Southwest Alpine-Gorge Region (SAGR) and provide a scientific basis for regional water resource management and ecological protection. [Methods] An index system method and the InVEST model were employed to evaluate the spatiotemporal variations and analyze the driving factors of water conservation capacity in the SAGR from 1990 to 2020. [Results] 1) The spatial distribution patterns of water conservation evaluated by the index system method and the InVEST model method were generally consistent, and a significant positive correlation was observed between the water conservation index and water conservation volume ($p < 0.001$), indicating that the two methods could validate each other. 2) From 1990 to 2020, the water conservation volume in the SAGR showed an overall slight decreasing trend, with a change rate of $-41.24 \text{ mm}/(30 \text{ a})$ ($p = 0.071$), mainly affected by decreased precipitation and increased potential evapotranspiration. 3) The water conservation in the SAGR showed a pattern of "higher in the south, lower in the north". The southeastern Xizang region, characterized by abundant precipitation and high vegetation coverage, had a relatively strong water

收稿日期: 2025-02-23

修回日期: 2025-03-20

录用日期: 2025-05-08

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-07-29

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1302903)

第一作者: 曹梦(1999—),女,硕士研究生,主要从事生态水文研究。E-mail: cm18734377024@163.com

通信作者: 信忠保(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持研究。E-mail: xinzhongbao@126.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

conservation capacity, while the northern mountainous areas of Sichuan, with scarce precipitation and steep terrain, exhibited a relatively weak water conservation capacity. [Conclusion] The findings reveal the spatiotemporal variation patterns and driving factors of water conservation capacity in the SAGR, providing scientific support for tool selection, model optimization, and regional ecosystem management.

Keywords: southwest alpine-gorge region; water conservation; index system; entropy weight method; InVEST Model

Received: 2025-02-23

Revised: 2025-03-20

Accepted: 2025-05-08

Online(www.cnki.net): 2025-07-29

水源涵养是生态系统服务功能的重要组成部分,在维持流域水资源平衡和保障区域生态安全方面发挥着关键作用^[1]。健康的生态系统与水源涵养能力密切相关,水源涵养能力的高低直接影响着生态系统的稳定性和可持续性^[2-4]。然而,气候变化和人类活动的加剧导致植被破坏、土壤退化等问题,严重削弱区域水源涵养能力,给生态系统带来巨大压力^[5]。因此,定量评估区域水源涵养能力的变化特征及其驱动机制,对于制定科学的生态恢复策略和实现水资源可持续管理具有重要意义^[6-7]。

为有效评估区域水源涵养能力并为管理决策提供科学依据,近年来,水源涵养功能评估方法逐步发展,主要包括生态水文模型法和指标体系法^[8-12]。随着遥感技术和GIS的快速发展,结合InVEST模型、SWAT模型等生态水文模型的方法已成为模拟复杂水文过程的重要手段。王云飞等^[2]通过InVEST模型评估1961—2017年青藏高原的水源涵养能力,总体呈现上升趋势;王辉源等^[13]采用SWAT模型对澜河流域近59 a的水源涵养量变化进行分析,总体呈现下降趋势,并进一步揭示近18 a水源涵养功能在空间分布上随着坡度的上升而增强。传统水文模型通常还需要对研究者进行专门培训^[9]。与此同时,许多研究者^[14-15]还使用不同指标方法对水源涵养功能进行评估。该类方法应用于大量试验用地的短时数据获取。刘学全等^[16]基于层次分析法(AHP)构建丹江口库区水源涵养评价指标体系发现,栎类阔叶林水源涵养能力最强;白杨等^[17]基于专家判断矩阵和AHP,构建了武汉城市圈水源涵养功能重要性评价指标体系发现,水源涵养能力在研究期内呈先增强后下降趋势;王作泉等^[18]基于野外试验、熵权法和综合指数法建立水源涵养指标体系并对林地水源涵养能力进行评估,结果表明,针阔叶混交林可以作为区域林分结构调整和营造新林的目标林分类型。指标体系法和InVEST模型仅为研究者提供水源涵养能力评估的基本信息,缺乏在决策环境中的进一步应用。这2种方法在算法、数据需求和适用性方面有很大不同,这些差异使决策者难以确定哪种工具适合自

己的评估工作。因此,在不同区域选择合适的工具已成为研究人员和管理者面临的一个重要问题。

西南高山峡谷区作为青藏高原与川西高原、滇北高原之间的过渡带,其独特的地理位置和复杂的地形地貌特征赋予该区域重要的生态屏障功能^[19]。该区地势起伏大,生态环境脆弱,既是长江上游重要的水源涵养区,也是维系区域水循环平衡和生态安全的核心地带。因此,系统评估西南高山峡谷区水源涵养功能的时空变化特征并分析其影响因素,不仅能为区域生态安全评估提供科学依据,也对国家生态安全屏障构建和生态恢复工程的推进具有重要意义。

鉴于此,本研究主要讨论InVEST模型计算的水源涵养量和指标体系法计算的水源涵养指数在西南高山峡谷区水源涵养的适用性。基于1990年、2000年、2010年、2020年4期,构建涵盖气象、地形、植被、土壤和社会经济因子的水源涵养评价指标体系,并计算1990—2020年水源涵养量,进行一致性对比分析,以系统评估区域水源涵养能力的时空演变格局及影响因素。研究结果不仅加深对西南高山峡谷区水源涵养过程的理解,也为研究区水资源管理和生态安全维护提供科学依据。

1 研究区概况

西南高山峡谷区位于四川、西藏、云南三省交界地带(24°58′08″~32°51′25″N, 91°23′48″~104°13′44″E),总面积约61.26万km²。该地区地形复杂多样,平均海拔在3000 m以上(图1)。研究区位于东亚和南亚季风的过渡区域,同时受青藏高原隆起的地质作用影响,从而塑造了独特且复杂的自然地理环境。研究区植被类型主要以针叶林、灌丛、草甸及高山植被为主,土壤类型主要以高山土、淋溶土为主。由于低纬度与高海拔的共同作用,研究区气候空间分布差异明显,年平均气温为(3.51±0.41)℃,年平均降水量为(804.43±62.28) mm。西南高山峡谷区土壤和植被类型丰富,但其生态系统易受气候变化和人为活动的干扰,环境极为脆弱,水源涵养能力受到影响,属于生态环境重点保护区域。

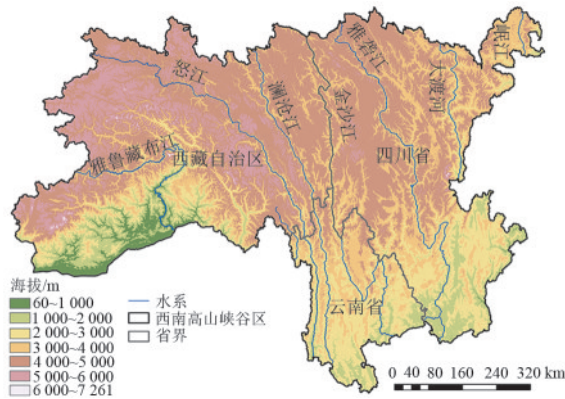


图 1 西南高山峡谷区位置

Fig. 1 Location of SAGR

2 数据来源与处理

本研究中主要数据资料包括 1990—2020 年的降水、潜在蒸散发、地形、土地利用、土壤体积质量、植被数据及社会经济因子等数据,详细信息见表 1。

表 1 数据资料

Table 1 Data information

数据	来源	分辨率
海拔	地理空间数据(https://www.gscloud.cn/)	栅格, 90 m
降水、气温、潜在蒸散发	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)	栅格, 1 km
生物物理参数表	InVEST Model Handbook、FAO	CSV
土地利用	IRSIP(http://irsip.whu.edu.cn/)	栅格, 30 m
植物有效含水量	世界土壤数据库(http://www.iiasa.ac.at)	栅格, 1 km
土壤深度、土壤体积质量	世界土壤数据库(http://www.iiasa.ac.at)	栅格, 1 km
地形指数	地理空间数据(https://www.gscloud.cn/) 世界土壤数据库(http://www.iiasa.ac.at)	栅格, 1 km
流速系数	国家工程手册(http://www.info.usda.gov/17758.wba.)	栅格, 1 km
土壤饱和导水率	世界土壤数据库(http://www.iiasa.ac.at)	栅格, 1 km
归一化植被指数	美国地质调查局(http://lpdaac.usgs.gov)	栅格, 30 m
土壤质地	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)	栅格, 1 km
人口密度	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)	栅格, 1 km
国内生产总值	1990 年数据来自国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/), 2000 年、2010 年和 2020 年来自中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)	栅格, 1 km

3.1.2 熵权法 熵权法是客观赋权法的一种,可有效克服人为因素的干扰。指标的信息熵值越小,表明其离散程度越大,提供的信息量越高,该指标的权重也越大。熵权法作为一种成熟的指标权重评价方法,在本研究中对评价结果具有客观性和适应性。

对各指标进行归一化处理,计算公式为:

$$P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

计算各评价指标的熵值,计算公式为:

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (4)$$

式中: E_j 为指标的信息熵,取值为 $[0, 1]$ 。

3 研究方法

3.1 指标体系法

3.1.1 数据标准化 由于所选各个评价指标量纲不同,需要将数据转化为无量纲值,即进行数据标准化。标准化需要考虑各个指标对水源涵养能力的影响是正相关还是负相关。

影响因子与水源涵养呈正相关,其标准化公式为:

$$X'_j = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

影响因子与水源涵养呈负相关,其标准化公式为:

$$X'_j = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为指标体系中第 i 年的第 j 个指标; X_{\max} 、 X_{\min} 分别为指标中的最大值和最小值; X'_j 为标准化后的值。

通过信息熵计算各指标权重,计算公式为:

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

根据各个指标所得权重数值综合得出水源涵养指数结果:

$$D = \sum_{j=1}^m W_j X'_j \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, m) \quad (6)$$

式中: W_j 为各个指标的权重; X'_j 为各个指标标准化后的值。

3.1.3 评价指标体系构建 合理的指标体系是进行西南高山峡谷区水源涵养能力评价的前提。基于前人^[14-15, 20]的研究,并结合西南高山峡谷区自身

环境特点。本文构建以5个要素层、12个指标层组成的水源涵养评价指标体系(表2)。要素层包括气象、地形、植被、土壤及社会经济因子等。气象因子由降水、潜在蒸散发和气温组成。地形因子包括海拔和坡度,植被因子包括土地利用和归一化植被指数,土壤因子

包括土壤体积质量、土壤质地和土壤有效含水量,植被和土壤因子对水源涵养能力截留、渗透和蓄积等过程具有重要的支撑作用。社会经济因子包括国内生产总值和人口密度,反映人类活动和社会经济发展的程度,在一定程度上影响着水资源的空间分布。

表2 西南高山峡谷区水源涵养能力评价指标体系

Table 2 Evaluation index system for water conservation capacity in SAGR

目标层U	要素层B	指标层C	指标属性	指标权重
水源涵养能力评估	气象因子B ₁ (0.285)	降水C ₁	正向(+)	0.106
		潜在蒸散发C ₂	逆向(-)	0.089
		气温C ₃	逆向(-)	0.090
	地形因子B ₂ (0.165)	海拔C ₄	逆向(-)	0.087
		坡度C ₅	逆向(-)	0.078
	植被因子B ₃ (0.163)	土地利用C ₆	正向(+)	0.079
		归一化植被指数C ₇	正向(+)	0.084
	土壤因子B ₄ (0.249)	土壤体积质量C ₈	逆向(-)	0.086
		土壤质地C ₉	正向(+)	0.082
		土壤有效持水量C ₁₀	正向(+)	0.081
	社会经济因子B ₅ (0.138)	人口密度C ₁₁	逆向(-)	0.069
		国内生产总值C ₁₂	逆向(-)	0.069

3.2 InVEST模型法

3.2.1 产水量模型 InVEST产水模型基于水量平衡原理,利用降水、蒸散发量、植物可利用含水量和土地利用及土壤深度等参数来模拟产水量,计算公式为:

$$Y_x = (1 - \frac{AET_x}{P_x}) \times P_x \quad (7)$$

式中:Y_x为x栅格单元的产水量,mm;AET_x为栅格单元x的年平均蒸散量,mm;P_x为栅格单元x的年平均降水量,mm。

$$\frac{AET_x}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (8)$$

式中:AET_x为j类土地利用类型x的年实际蒸散量,mm;P_x为每个栅格单元x上的年降水量,mm;R_{xj}为第j土地利用类型栅格x的Budyko干燥指数,无量纲;AWC_x/P_x表示植被有效含水量与年平均降水量的比值。

$$R_{xj} = \frac{K_c \times ET_{0r}}{P_x} \quad (9)$$

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} + 1.25 \quad (10)$$

$$AWC_x = \min(\text{soil_depth}, \text{root_depth}) \times PAWC \quad (11)$$

式中:AWC_x为栅格单元x上单位体积植物所含的水量,mm,由土层深度和理化性质决定;Z为经验参数,又称“季节常数”,取值1~30。Soil_depth为土层深度;root_depth为根系深度;PAWC为植物可利用水,基于土壤质地和土壤有机质建立的非线性拟合模型,取值

0~1,采用ZHOU等^[21]提出的计算方法。

$$PAWC = 54.509 \times Sand - 0.003 \times Sand^2 - 0.055 \times Silt - 0.006 \times Silt^2 - 0.738 \times Clay + 0.007 \times Clay^2 - 2.688 \times OM + 0.501 \times OM^2 \quad (12)$$

式中:Sand为土壤砂粒占比,%;Silt为土壤粉粒占比,%;Clay为土壤黏粒占比,%;OM为土壤有机质质量分数,%。

3.2.2 水源涵养量计算 根据InVEST模型所获得的产水量结果,结合研究区地表流速系数、地形指数及土壤饱和导水率进行修正得到水源涵养量,计算公式为:

$$Retention = \min(1, \frac{249}{Velocity}) \times \min(1, \frac{0.9 \times TI}{3}) \times \min(1, \frac{K_s}{300}) \times Y_x \quad (13)$$

式中:Velocity为流速系数;K_s为土壤饱和导水率,cm/d;Y_x为产水量;Retention为修正后水源涵养量,mm;TI为地形指数,由公式(14)计算得到。

$$TI = \log(\frac{Drainage_Area}{Soil_depth \times Percent_slope}) \quad (14)$$

式中:Drainage Area为集水区栅格数量;Soil_depth为植被根系深度,mm;Percent_slope为百分比坡度,%。

3.2.3 偏相关分析 本研究采用逐像元高阶偏相关性分析法,探讨4个影响因素与水源涵养之间的关系,并采用t检验法对偏相关系数进行假设检验(显

著性水平 $\alpha = 0.05$)。该方法可以同时分析因子时间序列变化及明晰其空间变化特征^[22]。一般地,假设有 $k(k > 2)$ 个变量 x_1, x_2, \dots, x_k , 任意 2 个变量 x_i 和 x_j 的 $g(g \leq k-2)$ 阶样本偏相关系数为:

$$R_{ij, l_1, l_2, \dots, l_g} = \frac{r_{ij, l_1, l_2, \dots, l_{g-1}} - r_{il_g, l_1, l_2, \dots, l_{g-1}} r_{jl_g, l_1, l_2, \dots, l_{g-1}}}{\sqrt{(1 - r_{il_g, l_1, l_2, \dots, l_{g-1}}^2)(1 - r_{jl_g, l_1, l_2, \dots, l_{g-1}}^2)}} \quad (15)$$

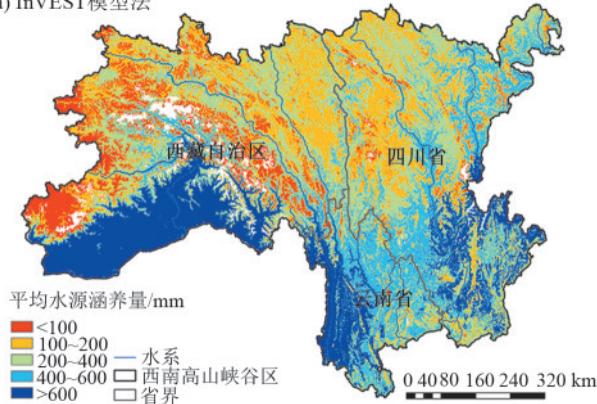
式中: $R_{ij, l_1, l_2, \dots, l_g}$ 为控制变量 l_1, l_2, \dots, l_g 后 i 和 j 的相关系数; $r_{ij, l_1, l_2, \dots, l_{g-1}}, r_{il_g, l_1, l_2, \dots, l_{g-1}}, r_{jl_g, l_1, l_2, \dots, l_{g-1}}$ 分别为变量 ij 和 $l_1, l_2, \dots, l_g; il_g$ 和 $l_1, l_2, \dots, l_g; jl_g$ 和 l_1, l_2, \dots, l_g 的相关系数。 $R_{ij, l_1, l_2, \dots, l_g}$ 为正(负), 表示 2 个变量之间呈正(负)偏相关且绝对值越大, 二者偏相关性越大。

4 结果与分析

4.1 西南高山峡谷区水源涵养空间分布

水源涵养量与水源涵养指数在空间分布上呈现

(a) InVEST模型法



(b) 指标体系法

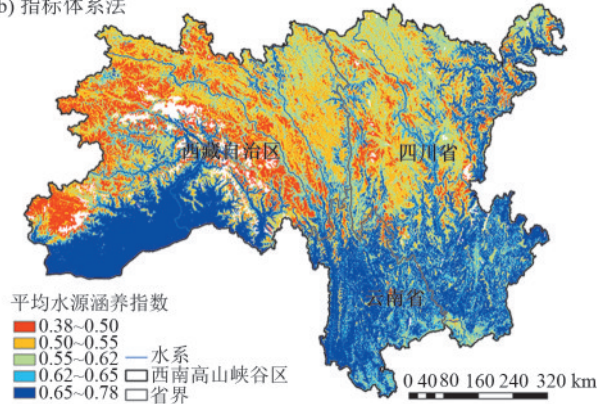


图 2 1990—2020 年西南高山峡谷区平均水源涵养空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of average water conservation in SAGR from 1990 to 2020

为了更好地描述 2 种方法的一致性,利用 ArcGIS 将指标体系评估结果数据划分为等面积的 45 份,按照分割后的结果分区统计 InVEST 模型评估结果,并进行对数处理。结果表明,在 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 4 期,水源涵养指数与水源涵养量均呈现显著的正相关(图 3, $p < 0.001$),且 R^2 超过 0.98。表明 2 种方法在空间分布特征上具有极高的一致性,能够相互验证其评估结果的科学性和可靠性。

4.2 西南高山峡谷区水源涵养时间变化

水源涵养量与水源涵养指数在时间变化上总体一致但略有差异(图 4)。通过 InVEST 模型对西南高山峡谷区 1990—2020 年的水源涵养量年际变化进行分析表明,该区域水源涵养量整体呈不显著下降趋势($p = 0.071$)。研究期间年平均水源涵养量为 (397.41 ± 37.97) mm,变化速率为 -1.37 mm/a(图 4)。1990—2004 年平均水源涵养量为 (414.65 ± 38.24) mm,而 2005—2020 年平均水源涵养量为 (381.24 ± 30.70) mm,相比前期减少 (33.41 ± 7.54) mm,

较高的一致性,二者均表现出由南向北递减的分布格局(图 2)。高值区主要分布在西藏南部、四川西南部及云南西北部的部分地区,尤其是在地势较为平缓的山地和河谷地带,水源涵养指数和水源涵养量均达到较高水平。中值区主要集中于西藏东部、四川西北部等海拔较高的地区,该区域尽管降水相对较少,但由于人类活动干扰较弱,水源涵养功能仍维持在较为稳定的水平。低值区则主要分布在西藏东北部及部分高山峡谷地带,该区域地势陡峭、起伏剧烈,部分地区终年被积雪或冰川覆盖,导致水分难以有效滞留。整体来看,水源涵养指数与水源涵养量的空间分布格局高度吻合,表明二者均能够较好地反映区域水源涵养的空间特征,并在一定程度上相互验证其评估结果的合理性和科学性。

降幅达到 8.06%。基于指标体系评估的水源涵养指数在 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年分别为 0.587、0.592、0.590 和 0.599,整体呈现相对稳定的上升趋势,2 种水源涵养评估方法的差异主要体现在 2020 年(图 4)。

为进一步探索 2 种评估方法时间变化在空间尺度上的差异,本研究比较 1990 年和 2020 年的水源涵养量在空间上的变化量(图 5)。本研究发现,基于 InVEST 模型评估,与 1990 年相比,2020 年有 24.21% 的区域水源涵养量增加,70.69% 区域水源涵养量减少。四川北部和南部地区的水源涵养量有所增加,西藏自治区东部区域、四川西南部和云南北部地区的水源涵养量下降较为显著(图 5a)。对于指标体系评估的水源涵养指数,66.92% 的区域增加,只有 33.07% 的区域减少(图 5b)。四川北部部分山区及南部人口聚集的区域水源涵养指数也有所提高,而西藏自治区东南部及云南北部大部分地区的指数下降较为明显。

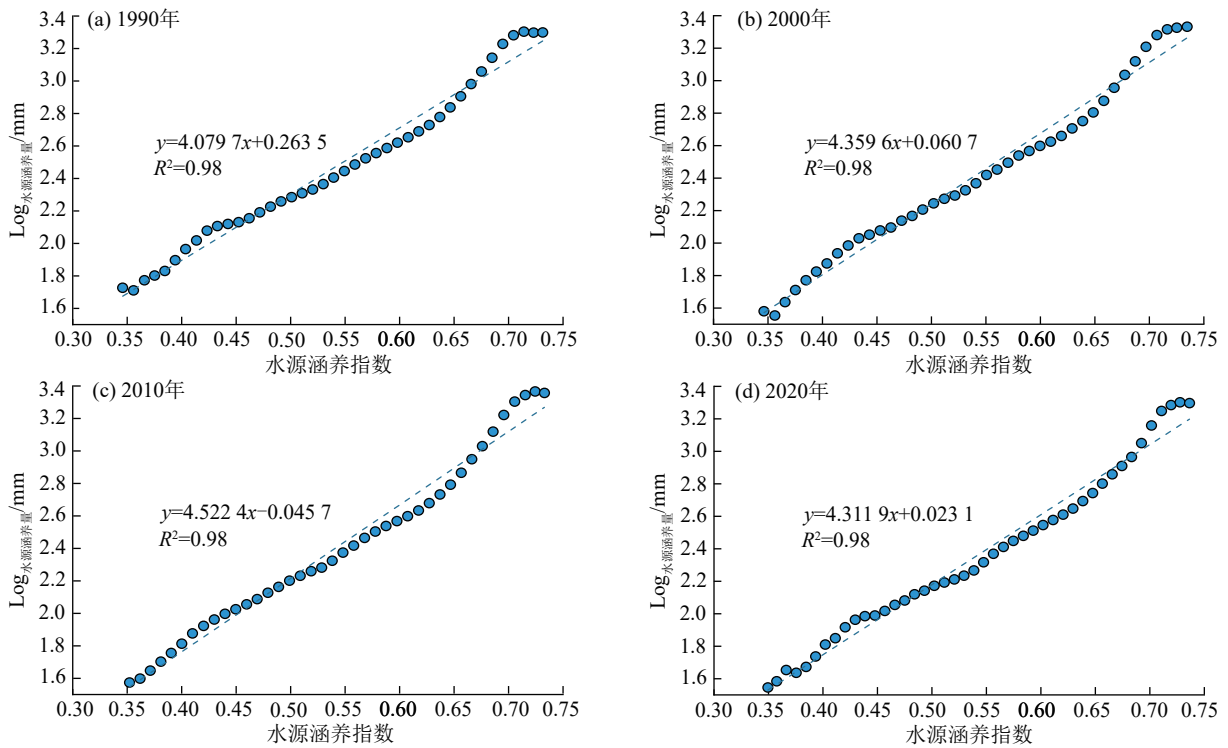


图 3 水源涵养功能评估方法一致性检验

Fig.3 Consistency test of water conservation function evaluation methods

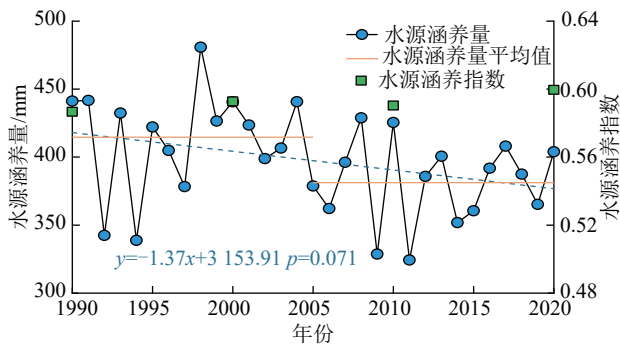


图 4 西南高山峡谷区 1990—2020 年水源涵养功能年际变化
Fig.4 Interannual variations in water conservation in SAGR from 1990 to 2020

4.3 西南高山峡谷区水源涵养影响因素分析

由图 6 可知,西南高山峡谷区 84.67% 的区域水源涵养量与降水呈极显著正相关,整个西南高山峡谷区均有分布;研究区水源涵养量与潜在蒸散发和气温呈负相关的区域分别占总面积的 92.56% 和 66.32%,其中,水源涵养量与潜在蒸散发呈显著负相关的区域占 66.52%,主要分布在西藏自治区东部、四川西南部及云南北部;气温与水源涵养量呈显著负相关的区域占 7.83%,分布区域较少。指标体系法中气象因子对水源涵养指数的权重占比最大,为 0.285(表 2),空间分布呈现自南向北逐渐降低的变化规律(图 7)。

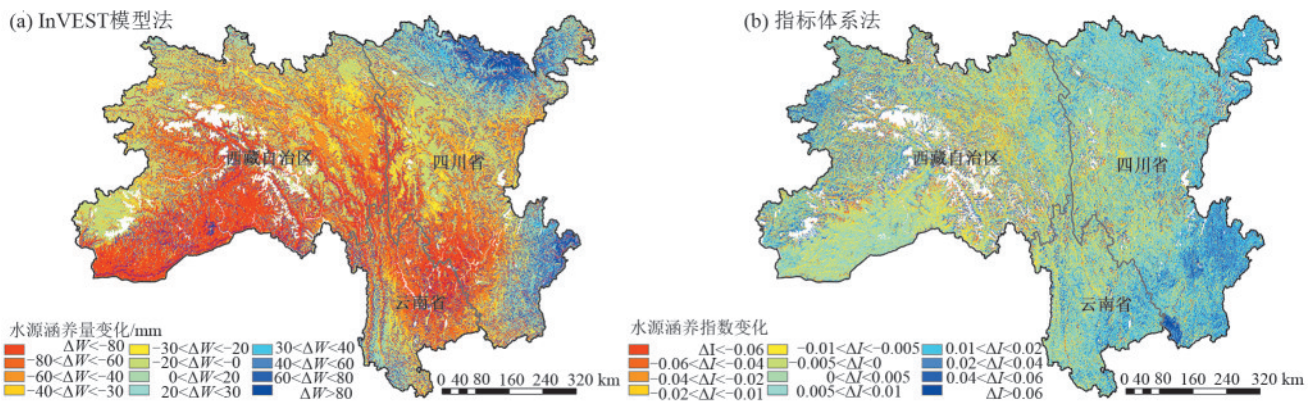


图 5 水源涵养变化量空间分布

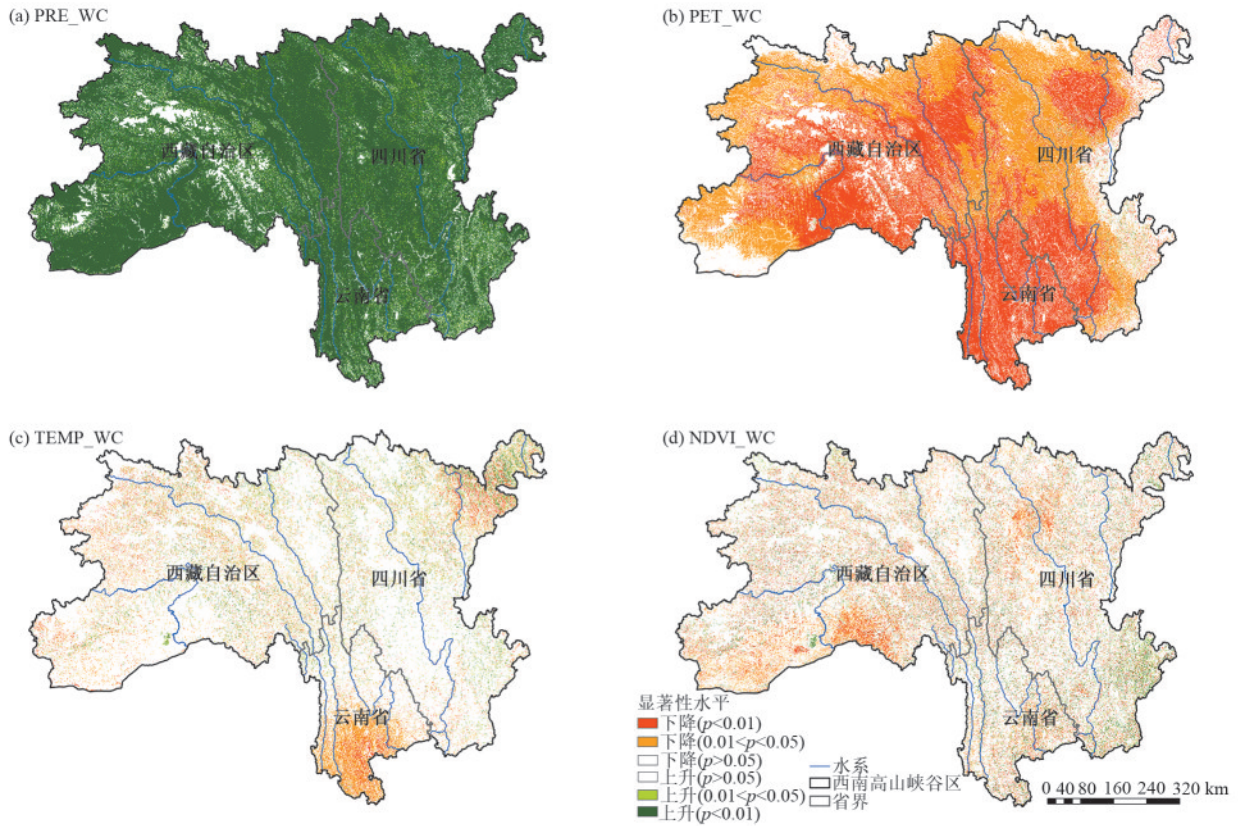
Fig.5 Spatial distribution of water conservation variations

西南高山峡谷区水源涵养量与 NDVI 呈显著负相关区域面积仅占总面积的 9.94%,呈正相关区域占 32.11%(图 6)。指标体系法中植被因子权重值为

0.163(表 2),植被因子权重值较高的区域处于西藏自治区东部、四川省部分山区及云南省部分森林覆盖区,土壤因子和地形因子权重值分别为 0.249、0.165,

地形因子在西藏自治区和四川省的部分高山区域,特别是海拔高、坡度大的地方,其权重值较高。而在低海拔和平坦区域的影响相对较小,云南省北部及四川省低海拔地区地形因子的权重值偏低(图7)。

占比最小的是社会经济因子,权重值为0.138,西藏自治区、四川省南部及云南省北部的社会经济因子权重值高,西藏自治区东北部及四川西北部权重值较低。



注:图中PRE、PET、TEMP、NDVI和WC分别为降水、潜在蒸散发、气温、NDVI和水源涵养量。

图6 西南高山峡谷区水源涵养量与影响因子偏相关关系分布

Fig.6 Distribution of partial correlation between water conservation and influencing factors in SAGR

5 讨论

5.1 水源涵养影响因素分析

水源涵养的变化是一个由多因素耦合驱动的复杂生态过程,其贡献程度因地理环境的差异而有所变化^[23-24]。其中,气象因子是决定水源涵养动态变化的主要因素,降雨、蒸散和气温等因素通过调节水文循环直接影响水源涵养趋势^[25]。本研究对西南高山峡谷区1990—2020年降水与水源涵养量进行相关性分析表明,二者之间存在显著的正相关,研究区内84.67%的区域水源涵养量受降水的正向驱动,进一步证实降水对水源涵养的积极作用。此外,基于指标体系法计算的权重分析结果表明,降水在水源涵养指数评估中占据最高权重,特别是在南部地区地势较为平缓,由于较优越的水文气候条件和良好植被覆盖状况,该区域具备较强的水分存储和涵养能力^[25-26],进一步强调降水在水源涵养过程中的重要性。潜在蒸散发和气温对1990—2020年西南高山峡谷区水源涵养产生不利影响,图6b、6c说明二者之间

呈显著负相关,研究区年潜在蒸散发量($p < 0.001$, $R^2 = 0.437$)和气温增加($p < 0.001$, $R^2 = 0.388$),降水量减少($p = 0.135$, $R^2 = 0.075$)(图8),高蒸散意味着更多水消耗和损失,在一定程度上显著降低水源涵养量($p = 0.071$)(图4)。综合指标体系法的气象因子权重值及空间分布来看,进一步强调降水与潜在蒸散发作为InVEST产水模型关键输入因子的作用^[2,8,27]。除上述动态因子外,植被因素在控制水平衡和关键水文变量方面也发挥着重要作用^[28-29],指标体系法的结果证实了此观点,植被因素的权重值为0.163(表2)。其中,1990—2020年NDVI的年际变化极显著增加($p < 0.001$, $R^2 = 0.784$),InVEST模型忽略考虑NDVI的巨大变化,可能导致水源涵养量被低估。自2000年以来,随着人类经济活动的逐步增强,水资源承受了巨大压力^[26]。然而,由于西南高山峡谷区超3/4的面积属于无人区,主要分布于藏西北等地,仅云南北部和四川南部人类活动较为集中^[25-27],这可能致使社会经济因子在5个要素层中贡献最小。

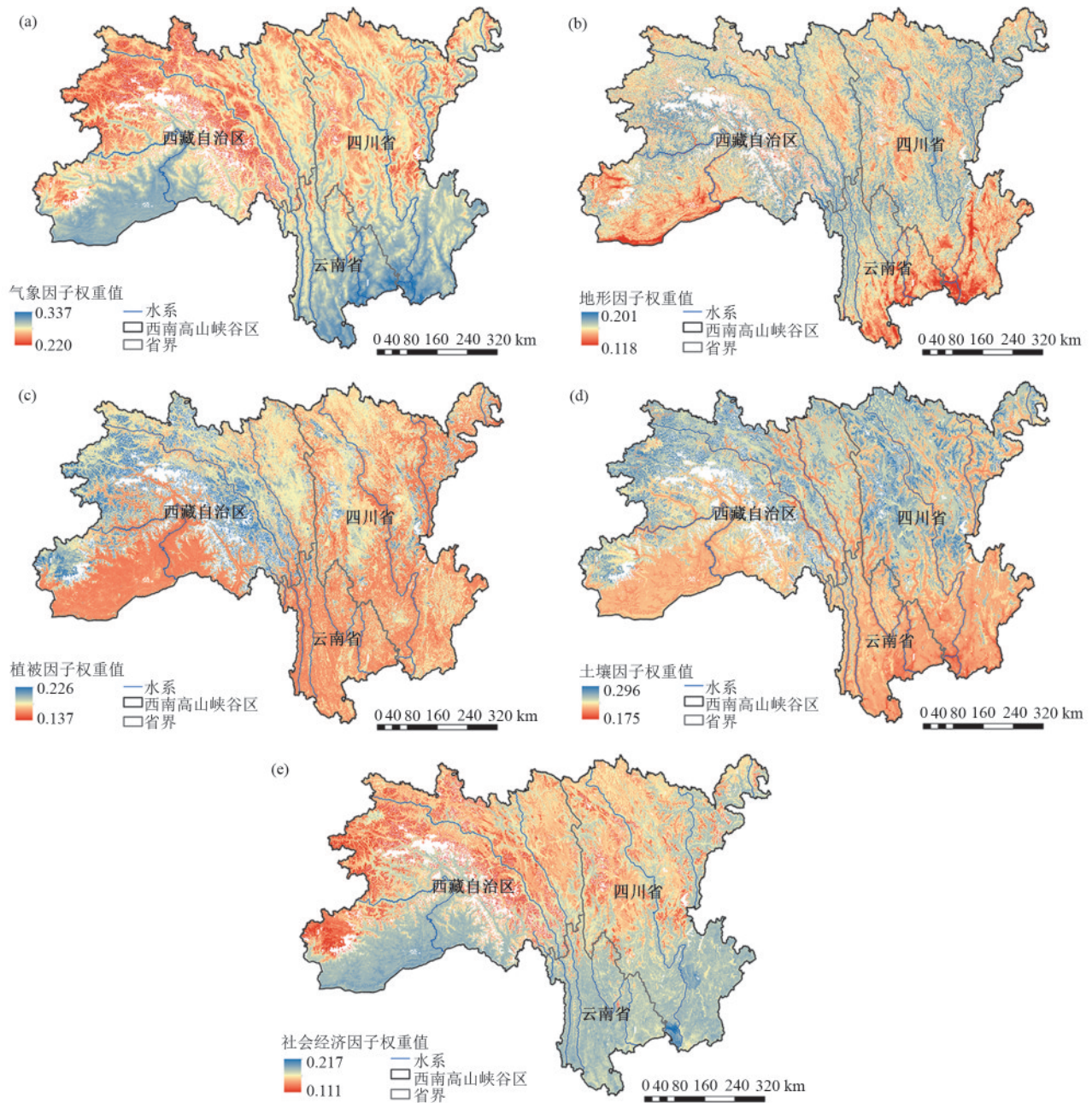


图 7 要素层权重空间分布

Fig.7 Spatial distribution of weights in factor layer

与上述时变影响因子不同,地形因子和土壤因子表现显著的空间变异性,但在时间上保持相对稳定。西南高山峡谷区位于西藏东北部及部分高山峡谷地带,陡峭的地势及高寒气候使得高海拔地区经历快速的地表水流失,导致水分难以有效滞留,水源涵养能力降低^[30],突出地形因子在高海拔区域对水源涵养的作用^[24]。相反,缓坡有利于水分的入渗和滞留,西藏东南部地区及云南北部地形对水源涵养的制约减少。土壤是陆地生态系统的支柱,其质地和特性也会影响水源涵养^[30]。一方面,土壤质地决定土壤层的水力特征,它控制着

渗透过程和地表径流的产生^[31-32];另一方面,土壤体积质量又受到土壤质地的影响。较小的粒径会导致更明显的结合水效应,从而阻碍水的渗透。西南高山峡谷藏东及四川北部高山地带壤土为主,保水能力较强。云南北部及四川南部等低海拔区,黏土的结合水效应导致的低渗透性减少互流和地下径流,从而减少水源涵养^[26],其地形因子的权重值空间分布也说明此观点。综合分析表明,水源涵养量的空间分布格局受多种自然环境因素及人类活动的共同影响,其中气象因子的影响更为显著。

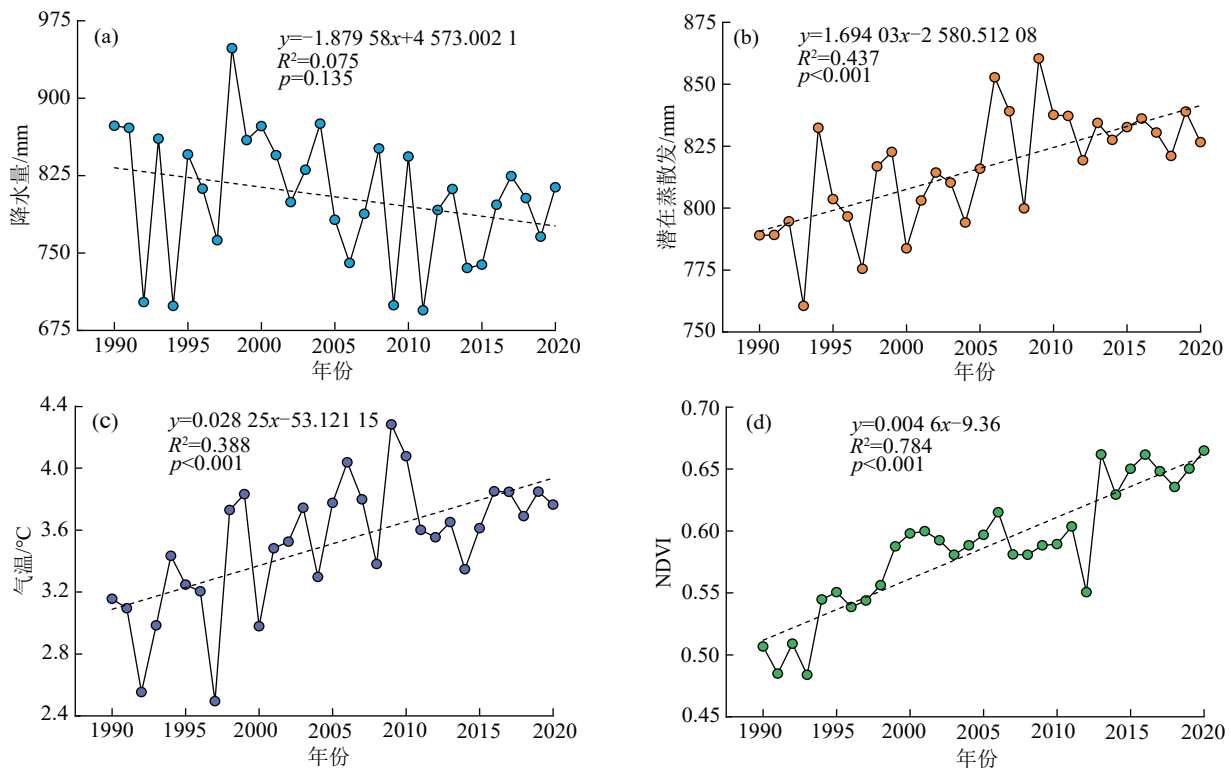


图 8 西南高山峡谷区影响因子年际变化

Fig.8 Interannual variations in influencing factors in SAGR

5.2 指标体系法与 InVEST 模型对比分析

水源涵养能力的科学评价首先依赖对水源涵养功能的准确评估^[23]。本研究评估西南高山峡谷区中的水源涵养状况,并确定在较长时间尺度下影响水源涵养的关键因素。通过梳理 InVEST 模型法和指标体系法的评估过程与结果,2种方法都为优化区域水资源管理和生态保护政策提供重要参考。尽管2种方法的原理有所不同,但从空间分布来看,二者在西南高山峡谷区均呈现“南高北低”的空间格局(图2)。1990年、2000年、2010年和2020年4个时期的水源涵养指数与水源涵养量均呈现显著的正相关($p < 0.001$),此方法基于地图代数原理的空间分割与拟合分析,将水源涵养指数与水源涵养量图层分割为等面积的45份并进行点对点拟合,进一步验证2种方法在空间分布上的高度一致性。一般来说,不同工具的水文模拟结果差异可能与关键水文要素的考虑方式、区域中复杂的地下条件及不同模式的算法有关^[28]。本研究发现,尽管 InVEST 模型能定量模拟水源涵养量,但其计算结果受限于输入因子,尤其受降水波动的敏感性较高^[2,8]。而指标体系法可以尽可能地选取影响因子,且能快速直观可视化每个影响因素的空间分布,其计算结果可用于表征不同区域水源涵养功能的相对强弱^[14]。这也可能是2020年水源涵养指数表现出差异的原因(图4),InVEST 模型中

的输入因子大多被指标体系的因子所覆盖,但 NDVI 的巨大变化未被 InVEST 考虑其中(图8d)。通常认为,传统的水文模型、生态模型和指标体系等评估水源涵养的方法都可以为自然资源管理人员或研究人员提供有价值的参考^[9,33-34]。事实上,这些工具同时满足研究者所有需求的可能性很小。InVEST 模型适用于精度需求较低及数据资源获得较为匮乏的研究区,可以在较大空间和时间尺度上为某些区域提供准确结果^[2,7-9];指标体系法虽需要大量基础数据,但可根据研究区地质地貌特点和气候条件来调节指标的选取,以快速评估从而为后续更为精确的研究提供理论基础。

因此,本文以案例研究方式首次比较 InVEST 模型法和指标体系法的水文结果,验证其应用于不同区域的可行性。对于广泛用于评估水源涵养功能服务的 InVEST 模型具有重要价值。尽管2种方法在空间拟合上高度一致,但二者的略微差异仍可为决策者在不同区域更好地应用工具而提供参考。虽然本研究尚未对水源涵养服务功能进行全面评估,但希望此项工作能够为未来的模型优化及其在水源涵养服务决策中的合理应用提供有益借鉴。

6 结论

1)基于指标体系法和 InVEST 模型评估,西南高

山峡谷区水源涵养功能空间分布格局基本一致,且二者评估结果在不同时期呈现极显著正相关($p < 0.001$, $R^2 = 0.98$),表明2种方法可以互相验证,为未来研究区水源涵养功能的多方法评估提供可靠的技术支撑。

2)1990—2020年西南高山峡谷区水源涵养量为 (397.41 ± 37.97) mm,年际变化呈现略微下降趋势,变化速率为 -41.24 mm/(30 a)($p = 0.071$)。降水的减少和蒸散发的增加是影响整个研究时段水源涵养量变化的主控因素,与指标体系法中气象因子贡献最大相一致。

3)西南高山峡谷区各时段水源涵养功能在空间分布格局呈现高度稳定,高值区集中分布于降雨高、植被覆盖度高的藏东南区域,而低值区则广泛覆盖降水稀少、地形陡峭的四川北部山区。整体表现为从北部向东南部逐渐递增趋势。

参考文献:

- [1] 刘效东,张卫强,冯英杰,等.森林生态系统水源涵养功能研究进展与展望[J].生态学杂志,2022,41(4):784-791.
LIU X D, ZHANG W Q, FENG Y J, et al. Research on water conservation function of forest ecosystem: Progress and prospect[J].Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(4):784-791.
- [2] WANG Y F, YE A Z, PENG D Z, et al. Spatiotemporal variations in water conservation function of the Tibetan Plateau under climate change based on InVEST model[J].Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 41:e101064.
- [3] YANG C, ZENG W, YANG X. Coupling coordination evaluation and sustainable development pattern of geo-ecological environment and urbanization in Chongqing municipality, China[J].Sustainable Cities and Society, 2020,61:e102271.
- [4] 杜加强,舒俭民,熊珊珊.黄河源区气候、植被变化与水源涵养功能评估研究[M].北京:科学出版社,2015.
DU J Q, SHU J M, XIONG S S. Evaluation of climate, vegetation change and water conservation function in the source region of the Yellow River[M].Beijing: Science Press, 2015.
- [5] LÜ L T, REN T T, SUN C Z, et al. Spatial and temporal changes of water supply and water conservation function in Sanjiangyuan National Park from 1980 to 2016[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3):993-1003.
- [6] YI C L, ZHAO X Y, FENG Y J, et al. Regional climax forest has a better water conservation function than pine plantation: A comparative study in humid subtropical China[J].Catena, 2024, 239:e107935.
- [7] 周怡宁,关颖慧,林一诚,等.基于InVEST模型的小滦河流域产水及水源涵养功能时空变化[J].中国水土保持科学(中英文),2024,22(5):72-82.
ZHOU Y N, GUAN Y H, LIN Y C, et al. Spatial and temporal variation of water yield and water retention function in Xiaoluan River basin based on InVEST model[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(5): 72-82.
- [8] 刘宥延,刘兴元,张博,等.基于InVEST模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J].生态学报, 2020,40(17):6161-6170.
LIU Y Y, LIU X Y, ZHANG B, et al. Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the Loess Plateau based on InVEST model[J].Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17):6161-6170.
- [9] LÜKE A N, HACK J. Comparing the applicability of commonly used hydrological ecosystem services models for integrated decision-support[J].Sustainability, 2018, 10(2):e346.
- [10] 李鑫鹏,王朝平,邹松兵,等.基于层次分析法的黄河上游水源涵养区生态系统恢复力评价:以甘南州、临夏州为例[J].中国沙漠,2022,42(6):85-93.
LI X P, WANG C P, ZOU S B, et al. Evaluation on ecological resilience in water conservation area in the upper Yellow River based on AHP: A case study of the Gannan and Linxia region[J].Journal of Desert Research, 2022, 42(6):85-93.
- [11] 庞振凌,常红军,李玉英,等.层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价[J].生态学报, 2008, 28(4): 1810-1819.
PANG Z L, CHANG H J, LI Y Y, et al. Analytical hierarchy process (AHP) evaluation of water quality in Danjiangkou reservoir-source of the middle line project to transfer water from south to north, China[J].Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4):1810-1819.
- [12] 程唱,蔡有柱,赵丽娟,等.祁连山林区基于水源涵养能力的人工林近自然度评价体系建立[J].生态学报, 2024, 44(7):2971-2980.
CHENG C, CAI Y Z, ZHAO L J, et al. Establishing near-naturalness evaluation system of artificial forest based on water conservation ability in the outer edge of Qilian Mountains in Qinghai Province[J].Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7):2971-2980.
- [13] 王辉源,宋进喜,吴琼.基于SWAT模型的秦岭北麓灞河流域水源涵养功能综合评价[J].水土保持研究, 2023, 30(6):307-315.
WANG H Y, SONG J X, WU Q. Comprehensive evaluation of water source conservation function in the Bahe River basin at the northern foot of Qinling Mountains

- based on SWAT model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6):307-315.
- [14] 张家熊, 柳笑, 汪成成, 等. 基于空间异质性的秦岭水源涵养能力评价指标体系构建[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6):290-297.
ZHANG J X, LIU X, WANG C C, et al. Construction of water conservation capacity evaluation index system based on spatial heterogeneity in Qinling Mountains[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6):290-297.
- [15] 郑学良, 陈丽华, 李洪洋, 等. 基于水源涵养功能的辽东防护林体系健康评价[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(2):102-110.
ZHENG X L, CHEN L H, LI H Y, et al. Health assessment of Liaodong shelterbelt system based on water conservation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(2):102-110.
- [16] 刘学全, 唐万鹏, 崔鸿侠. 丹江口库区主要植被类型水源涵养功能综合评价[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(1):59-63.
LIU X Q, TANG W P, CUI H X. A comprehensive evaluation of water conservation capacity of main vegetation types in Danjiangkou reservoir area[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2009, 33(1):59-63.
- [17] 白杨, 初东, 田良, 等. 武汉城市圈的水源涵养功能重要性评价研究[J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(2):233-241.
BAI Y, CHU D, TIAN L, et al. Assessing the importance of water conservation function in Wuhan City circle[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2014, 16(2):233-241.
- [18] 王作泉, 贺康宁. 祁连山东部地区不同林分水源涵养能力综合评估[J]. *生态学报*, 2024, 44(17):7662-7672.
WANG Z X, HE K N. Comprehensive assessment of water conservation capacity in different forest stands in the eastern Qilian Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(17):7662-7672.
- [19] JIANG S S, CHEN X, SMETTEM K, et al. Climate and land use influences on changing spatiotemporal patterns of mountain vegetation cover in southwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121:e107193.
- [20] 杨学文, 刘小慧, 叶萍萍, 等. 熵权法和 TOPSIS 模型协同下的黄河流域(甘肃段)水资源承载力时空变化分析[J]. *测绘通报*, 2024(10):18-24.
YANG X W, LIU X H, YE P P, et al. Spatio-temporal variation analysis of water resources carrying capacity in the Yellow River basin (Gansu section) in collaboration with entropy weight method and TOPSIS model[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2024(10):18-24.
- [21] ZHOU W Z, LIU G H, PAN J J, et al. Distribution of available soil water capacity in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(1):3-12.
- [22] 周顺武, 宋瑶, 李耀辉, 等. 西北地区东部夏季不同等级降水的空间分布特征及其在旱涝年分布的差异[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(6):1162-1171.
ZHOU S W, SONG Y, LI Y H, et al. Spatial distribution of summer graded precipitation and its difference in drought and flood years over the east of northwest China[J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(6):1162-1171.
- [23] 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 S H, XIAO Y, ZHENG H, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7):2455-2462.
- [24] XU M Z, XU G C, LIU S B, et al. Changes in water conservation and a new estimation for its future potential[J]. *Catena*, 2025, 250:e108761.
- [25] 刘燕平, 王根绪, 胡兆永, 等. 西南山区典型森林枯落物储量及持水能力[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(8):2113-2120.
LIU Y P, WANG G X, HU Z Y, et al. Litter storage and water-holding capacity of typical forests in mountainous area of southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(8):2113-2120.
- [26] 项巧, 范继辉, 杨紫滢. 1991—2020年西藏水源涵养时空演变特征[J]. *草业科学*, 2024, 41(11):2495-2507.
XIANG Q, FAN J H, YANG Z Y. Spatiotemporal evolution of water conservation from 1991 to 2020 in Xizang, China[J]. *Pratacultural Science*, 2024, 41(11):2495-2507.
- [27] 王懋源, 齐实, 郭衍瑞, 等. 藏东-川西生态维护水源涵养区产水量驱动机制[J]. *生态学报*, 2024, 44(21):9520-9534.
WANG M Y, QI S, GUO Y R, et al. Driving mechanism of water yield in the ecological and water conservation zone of east Xizang and west Sichuan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(21):9520-9534.
- [28] LU F, HU H F, SUN W J, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16):4039-4044.
- [29] YOU C M, WU F Z, YANG W Q, et al. The National Key Forestry Ecology Project has changed the zonal pattern of forest litter production in China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 399:37-46.