

中国首批国家公园产水能力时空格局及驱动力差异

何生申^{1,2,3}, 郝媛媛^{1,2,3}, 孟哲^{1,2,3},
刘雪霞^{1,2,3}, 陈松清^{1,2,3}, 骆祥生^{1,2,3}, 花立民^{1,2,3}

(1.甘肃农业大学草业学院,甘肃兰州730070; 2.草业生态系统教育部重点实验室,甘肃兰州730070; 3.国家林业草原高寒草地鼠害防控工程技术研究中心,甘肃兰州730070)

摘要: [目的] 分析中国首批5个国家公园产水能力,探索各公园关键产水驱动力,为优化国家公园生态保护及水资源管理提供科学依据。[方法] 基于InVEST模型评估2000—2023年各国家公园的产水能力,结合变异系数(C_v)分析产水能力的稳定性,采用偏最小二乘路径模型(PLS-PM)定量探讨各公园关键驱动力的作用机制。[结果] ①2000—2023年,首批国家公园的产水深度普遍呈波动上升趋势(除海南热带雨林国家公园)。其中,武夷山国家公园的产水深度(1 609.13 mm)和增幅($k=9.34$)均最大;三江源国家公园的产水深度(133.89 mm)较小,且增幅($k=0.95$)最为平缓。②各公园产水能力的稳定性大小顺序为:三江源国家公园>海南热带雨林国家公园>大熊猫国家公园>武夷山国家公园>东北虎豹国家公园。③不同公园的关键产水驱动力差异明显,表现出不同的影响模式。降水量是影响产水能力的主要正向因素,且三江源(0.987 9)和海南热带雨林国家公园(0.832 8)显著高于其他公园;潜在蒸散发对产水深度的影响普遍为负相关,在大熊猫(-0.458 1)和武夷山国家公园(-0.348 5)中表现尤为显著;植被覆盖度和地形因子的影响程度则在不同国家公园中存在差异。[结论] 2000—2023年,中国首批5个国家公园产水能力时空格局变化明显且稳定性较高,其关键产水驱动力各有差异且空间异质性明显。

关键词: 国家公园; 产水量; 时空格局; 稳定性; PLS-PM

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0392-10

中图分类号: P344, Q948

文献参数: 何生申, 郝媛媛, 孟哲, 等. 中国首批国家公园产水能力时空格局及驱动力差异[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 392-401. He Shengshen, Hao Yuanyuan, Meng Zhe, et al. Spatiotemporal patterns of water-yield capacity and driving-force differences of first group of China's national parks [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 392-401. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.003; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.003.

Spatiotemporal patterns of water-yield capacity and driving-force differences of first group of China's national parks

He Shengshen^{1,2,3}, Hao Yuanyuan^{1,2,3}, Meng Zhe^{1,2,3},
Liu Xuexia^{1,2,3}, Chen Songqing^{1,2,3}, Luo Xiangsheng^{1,2,3}, Hua Limin^{1,2,3}

(1. Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Key Laboratory of Pratacultural Ecosystem of Ministry of Education, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. National Engineering Research Center for Rodent Control and Prevention of Alpine Grassland in Forestry Grassland, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: [Objective] The water-production capacities of the first group of first five national parks in China were analyzed, and the key driving forces of each park were explored, in order to provide a scientific basis for optimizing the ecological protection and water-resource management of national parks. [Methods] Based on the InVEST model, the water-yielding capacities of each national park from 2000 to 2023 were assessed. The stability of the

收稿日期: 2024-12-04

修回日期: 2025-03-17

采用日期: 2025-03-18

资助项目: 甘肃省教育厅高校科研创新平台重大培育项目“黄河上游甘南退化高寒草地水源涵养功能提升关键技术研发与集成示范”(2024CXPT-07); 草业生态系统教育部重点实验室“揭榜挂帅”项目“青藏高原草地鼠害环境友好型防控技术体系研发”(KLGE-2024-06)

第一作者: 何生申(2001—), 女(汉族), 甘肃省临夏市人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统服务评估。Email: 15120488650@163.com。

通信作者: 郝媛媛(1987—), 女(汉族), 甘肃省白银市人, 博士, 副教授, 主要从事草地生态遥感和生态恢复方面的研究。Email: haoyy@gsau.edu.cn。

water-yielding capacities was analyzed in combination with the coefficient of variation (C_v). The partial least squares path model (PLS-PM) was used to explore the functioning mechanism of the key driving force at each park quantitatively. [Results] ① From 2000 to 2023, the depths of the water-yields in the national parks generally demonstrated a fluctuating upward trend (excepted Hainan Tropical Rainforest National Park). Wuyishan National Park had the largest water-yield depth (1 609.13 mm) and the largest increase ($k=9.34$), while Sanjiangyuan National Park had the smallest water-yield depth (133.89 mm) and the most moderate increase ($k=0.95$). ② The stability of the water yield of each park was as follows: Sanjiangyuan National Park > Hainan Tropical Rainforest National Park > Giant Panda National Park > Wuyishan National Park > Northeastern Tiger and Leopard National Park. ③ The key driving forces of the water yields of the parks differed significantly, demonstrating varying patterns of influence. Precipitation was the primary positive factor affecting water yield, and was significantly higher in Sanjiangyuan National Park (0.987 9) and Hainan Tropical Rainforest National Park (0.832 8) than in the other parks. Potential evapotranspiration was generally negatively correlated with the depth of water yield and was seen to be particularly significant at Giant Panda National Park ($-0.458 1$) and Wuyishan National Park ($-0.348 5$). The impacts of vegetation cover and topography differed across the national parks. [Conclusion] From 2000 to 2023, the spatial and temporal patterns of water-yield capacities in the five first group national parks in China changed significantly and were relatively stable. The key driving forces of those patterns were shown to be different and spatially heterogeneous.

Keywords: national parks; water yield; temporal and spatial patterns; stability; PLS-PM

自然保护区肩负着维护生态平衡、保护生物多样性、提供生态系统服务以及传承自然与文化遗产等多种关键使命^[1]。在全球生态保护与可持续发展日益瞩目的背景下,国家公园作为重要的生态系统保护单元,扮演着不可或缺的角色^[2]。它们不仅是生物多样性的庇护所,更在水资源调节与保护方面发挥着关键作用^[3]。产水能力作为生态系统服务功能中不可或缺的指标,对于区域水资源的稳定供应、生态系统的良性运转以及人类社会的可持续发展具有举足轻重的意义^[4]。

2021年10月12日,中国首批5个国家公园——三江源国家公园、大熊猫国家公园、海南热带雨林国家公园、武夷山国家公园和东北虎豹国家公园的成功设立^[5],无疑是中国在自然保护领域取得的重大突破和里程碑式成就^[6]。这些国家公园中的代表性案例展示了多样化的生态环境和丰富的生物资源。然而,值得注意的是,由于各国家公园在地理位置、气候条件、地形地貌、土壤特性以及生态系统结构与功能等方面存在显著且复杂的差异,导致其产水能力在时间和空间的分布上表现出多样性和独特性。例如,从寒冷的高山气候到温暖的亚热带气候,不同国家公园形成了各自独特的生态环境,这些差异直接影响着水资源的产生和分布,进而影响区域内的水文循环和生态平衡。此外,土壤特性、植被类型及人类活动等因素同样对产水能力有重要影响^[7]。通过对这些国家公园的深入研究,可以更好地了解其生

态系统的动态变化,为科学管理与保护提供理论依据,从而确保生态环境的可持续发展。

近年来,随着生态系统服务功能的深入研究,InVEST等生态系统服务模型逐渐被应用于生态系统服务功能的量化评估。目前国内外已有较为成熟的通过InVEST模型进行产水能力的研究体系,但主要集中在局部区域的分析^[8-11],虽然部分学者已开始探讨国家公园的生态功能与水资源调节作用^[3,12-14],但目前尚缺乏系统性、多维度的对比研究。以往的研究多侧重于单个国家公园的案例分析,较少涉及对多个国家公园的对比研究,也未能系统揭示不同公园间产水能力驱动力的差异。

为探究不同国家公园产水能力的空间异质性及其驱动机制,本研究基于生态系统服务功能视角,采用InVEST模型对中国首批5个国家公园(三江源、大熊猫、海南热带雨林、武夷山和东北虎豹国家公园)2000—2023年的产水时空格局进行定量评估。引入变异系数表征产水稳定性特征,结合偏最小二乘路径模型(partial least squares path modeling, PLS-PM)系统解析关键驱动力的作用强度差异,构建基于国家公园尺度的产水能力多维度对比分析框架,进而了解各个国家公园在水资源产出方面的独特驱动力模式。该研究有助于制定更为科学的管理与保护策略,促进生态保护与资源利用的协调发展,以期政策制定者提供精准的地域性指导,帮助国家公园在保护与管理中采取针对性的措施,进一步优化水资源管理策略。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区包括中国首批 5 个国家公园(图 1),涵盖了多个具有重要生态和地理特征的区域。三江源国家公园(32°26'4"—36°16'49"N, 89°24'6"—99°6'46"E),位于青藏高原的东部,涵盖了长江、黄河和澜沧江的源头地区,跨越青海省和西藏自治区,包括三江源自然保护区、可可西里自然保护区以及黄河源区域,被誉为“中华水塔”,总面积 $19.07 \times 10^4 \text{ km}^2$,属于寒温带气候,年降水量较少。大熊猫国家公园(28°51'03"—34°10'07"N, 102°11'10"—108°30'52"E),位于四川省、甘肃省和陕西省交界的山区,总面积为 $27\ 134 \text{ km}^2$,是全球范围内大熊猫栖息地的核心区域,其生态系统包括高山、森林、草原和湿地等多种生态类型,具有丰富的生物多样性。该公园地处温带季风气候区,降水量适中,地形起伏较大,丰富的竹林和森林资源

为水源涵养提供了保障。海南热带雨林国家公园(18°33'16"—19°14'16"N, 108°44'32"—110°04'43"E),位于海南岛的中部和西部地区,属热带地区,总面积约 $4\ 400 \text{ km}^2$,是中国面积最大、生态保护最完整的热带雨林保护区。

该区域降水充沛,常年湿润。武夷山国家公园(27°31'20"—27°55'49"N, 117°24'13"—117°59'19"E),位于东南沿海福建省与江西省的交界处,保护面积 $1\ 280 \text{ km}^2$,是中国典型的山地生态系统,具有典型的亚热带季风气候,降水丰富且季节性明显,平缓的地形和丰富的降水共同促进了水资源的积累。东北虎豹国家公园(42°38'45"—44°18'36"N, 129°05'01"—131°18'52"E),位于吉林省和黑龙江省交界,总面积为 $14\ 926 \text{ km}^2$,属寒温带和温带过渡区,气候寒冷干燥,降水量较少,水源多来自融雪和降水,涵盖了大兴安岭、长白山及周围森林地区,保护区域包括虎豹栖息地、湿地以及森林等生态系统。

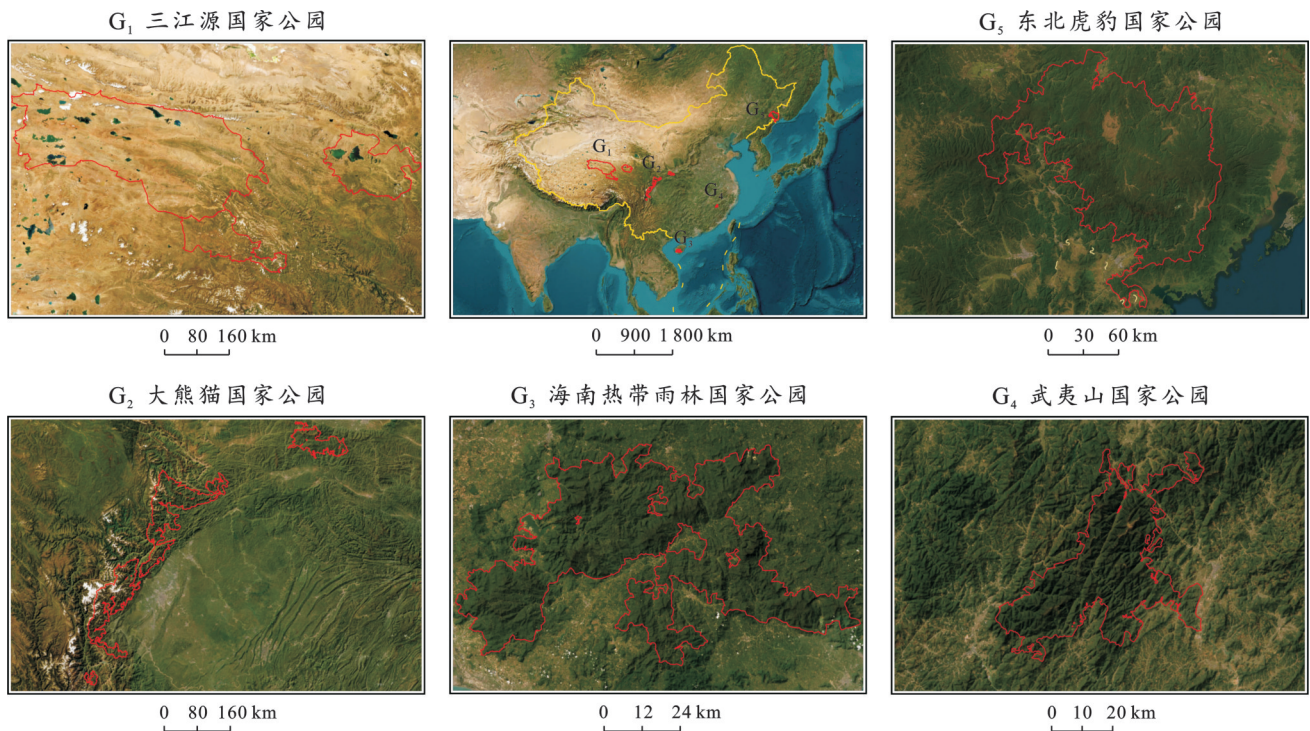


图 1 首批国家公园分布地理位置及其地貌

Fig. 1 Location and topography of first group national parks

1.2 数据来源

基于目前对产水量驱动力的研究及国家公园建设背景^[3,9,11,14-17],本研究选取降水量、潜在蒸散发、地形因子和植被覆盖度作为影响产水量的关键驱动力。本研究使用的数据包括降水量^[18](来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心 <http://www.geodata.cn>),空间分辨率 1 km;潜在蒸散量(国家青藏高原科学数据中心, <https://data.tpdc.ac.cn/home>),空间分辨率 1 km;土地利用/覆盖^[19](武

汉大学的 CLCD 数据),空间分辨率 30 m;土壤数据(包括土壤质地、土壤有机质含量和土壤容重,下载自国家青藏高原科学数据中心, <https://data.tpdc.ac.cn/home>),空间分辨率 900 m;根系深度(globalchange.bnu.edu.cn/research/cdtb.jsp),空间分辨率 1 km;数字高程模型(GEBCO, <https://www.gebco.net/>),空间分辨率 250 m。所有数据均重采样至 1 km。

1.3 研究方法

1.3.1 产水量

InVEST模型产水模块(annual water yield, Y_w)是基于水量平衡的估算方法^[20]。公式为

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

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

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

$$AWC_x = \min(D_{soil}, D_{root}) * PWAC_x \quad (4)$$

$$PWAC_x = 54.409 - 0.132SA - 0.003(SA)^2 - 0.055SI - 0.006(SI)^2 - 0.738 + \quad (5)$$

$$0.007(C)^2 - 2.688OM + 0.501(OM)^2$$

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

式中: Y_w 和 AET_{xj} 分别表示第 j 类土地类型栅格单元 x 的产水量和年实际蒸散发量; P_x 表示栅格单元 x 的年降雨量; 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,以上单位均为mm; D_{soil} 为最大土层深度; R_{xj} 为潜在蒸散发与降水量的比值; D_{root} 为根系深度(用基岩深度代替); $PWAC_x$ 为植被可利用含水率; SA 为土壤砂粒含量; SI 为土壤粉粒含量; C 为土壤黏粒含量; OM 为土壤有机质含量; Z 即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; K_{xj} 表示某植被类型的蒸散系数; ET_{0x} 表示栅格单元 x 的潜在蒸散发量。

1.3.2 稳定性分析

利用Natural Breaks (Jenks)将变异系数^[11]分为高稳定性[0,0.157)、较高稳定性[0.157,0.274)、中稳定性[0.274,0.360)、较低稳定性[0.360,0.955)和低稳定性[0.955,1.997]5类等级。

1.3.3 结构方程模型

结构方程模型(structural equation modeling, SEM)是一种用于分析变量之间复杂关系的统计方法,能够同时处理多个因变量和自变量之间的关系^[21]。该方法结合了因子分析和路径分析的优点,适用于检验理论模型和假设。PLS-PM模型一般称为结构方程建模的PLS方法,用于分析多变量之间的线性统计关系,可以有效地解决多变量复共线性问题。PLS-PM模型不要求变量遵循特定的分布假设,因此允许变量之间存在多重共线性或样本量较小的情况下仍然有效应用。这种方法可以克服变量数据的复杂分布和变量之间的相关性等问题^[22]。

PLS-PM模型的两个组成部分是测量和结构模型。测量模型使用权重和相关系数来描述被测变量地形因子、归一化植被指数、降水、潜在蒸散发和产水量之间的联系,模型中两两之间的联系用路径系数(PC)来描述。PLS-PM模型在R中的“plsmpm”包实现。

2 结果与分析

2.1 首批国家公园产水量的时空变化

2.1.1 产水深度时间动态变化

2000—2023年,中国首批5个国家公园的产水深度呈现出不同的变化趋势。除海南热带雨林国家公园外,其余公园的产水深度总体呈波动上升趋势(图2)。其中,三江源国家公园的平均产水深度最小(133.89 mm)且上升趋势最为平缓(斜率 $k=0.95$,斜率 k 是量化变量随时间变化趋势的主要指标,斜率越大,变化速率越快,表明每增加一年,平均增加的值),其产水量最大值(203.79 mm)和最小值(84.13 mm)分别出现在2009年和2015年。大熊猫国家公园和东北虎豹国家公园的上升趋势中等,斜率 k 分别为3.62和3.65,产水均值分别达到507.60 mm和351.74 mm。武夷山国家公园的平均产水深度最大(1 609.13 mm)且上升趋势最为显著($k=9.34$)。海南热带雨林国家公园产水量呈下降趋势($k=-0.25$),均值为1 055.57 mm。总体来看,5个国家公园的产水深度变化趋势各异,反映了不同地区生态环境的多样性及其水文特征在得到保护后的响应差异。

2.1.2 产水深度空间格局

在首批国家公园中,武夷山国家公园的平均产水深度最大(图3),而三江源国家公园的最小。三江源国家公园的产水深度范围为0~626.50 mm,整体上该区域的产水深度变化较小,南部部分地区的产水深度较大。大熊猫国家公园的产水深度在56.76~942.37 mm之间,产水深度变化较为剧烈,地形起伏明显,但整体来看高产水深度区域相对较少。海南热带雨林国家公园的产水深度范围为168.48~1 432.73 mm,产水深度变化较为明显,是一个水源丰富的高山地区,除西部少部分地区外,其余地区的产水深度均较大。武夷山国家公园的产水深度范围为675.12~1 908.49 mm,该区域同样显示出较大的深度变化,是一个水源丰富的高原地带,产水深度较大的区域主要集中在中部。东北虎豹国家公园的产水深度在35.49~787.43 mm之间,产水深度变化相对其他公园较小,并呈现出明显的西低东高的地势特征。总体来看,各国家公园的产水深度范围和空间分布特征受地形、气候和生态环境等因素的综合影响,展现了不同区域的水文背景具有显著差异。

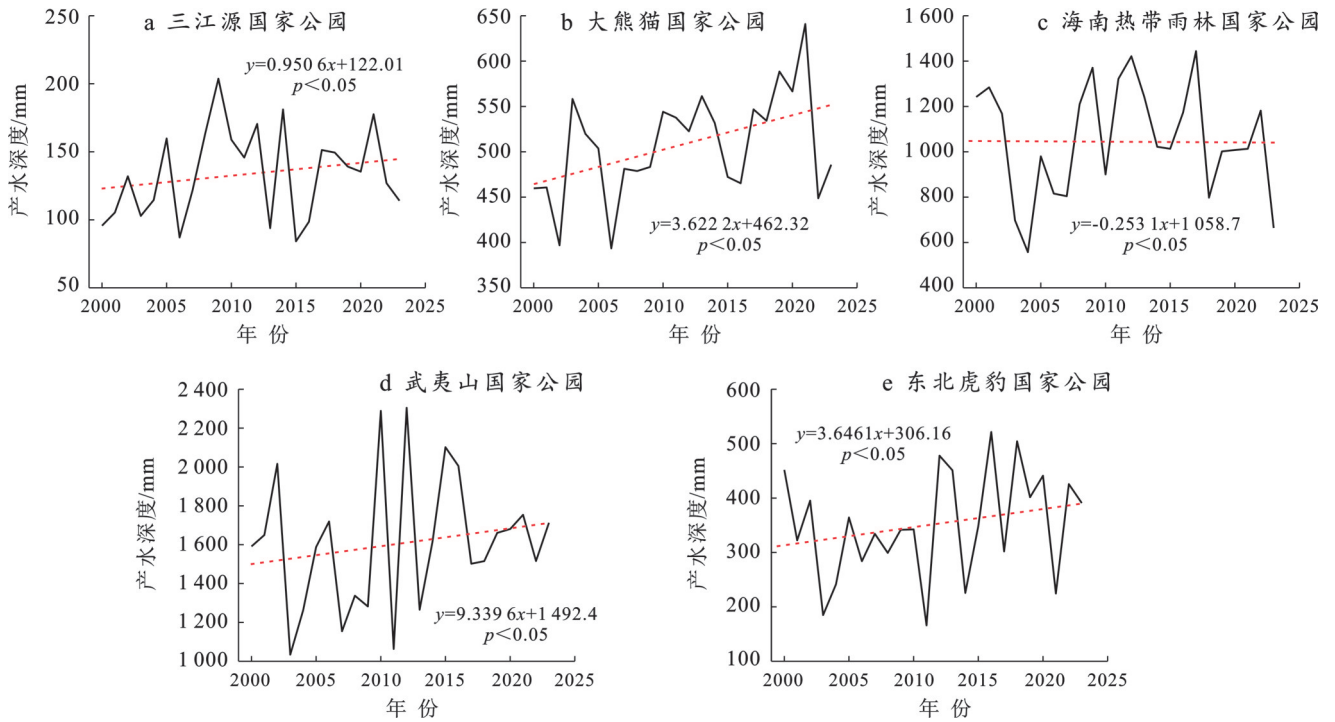


图 2 2000—2023 年首批国家公园平均产水深度的变化

Fig.2 Temporal variation of average water yield depth in first group of national parks from 2000 to 2023

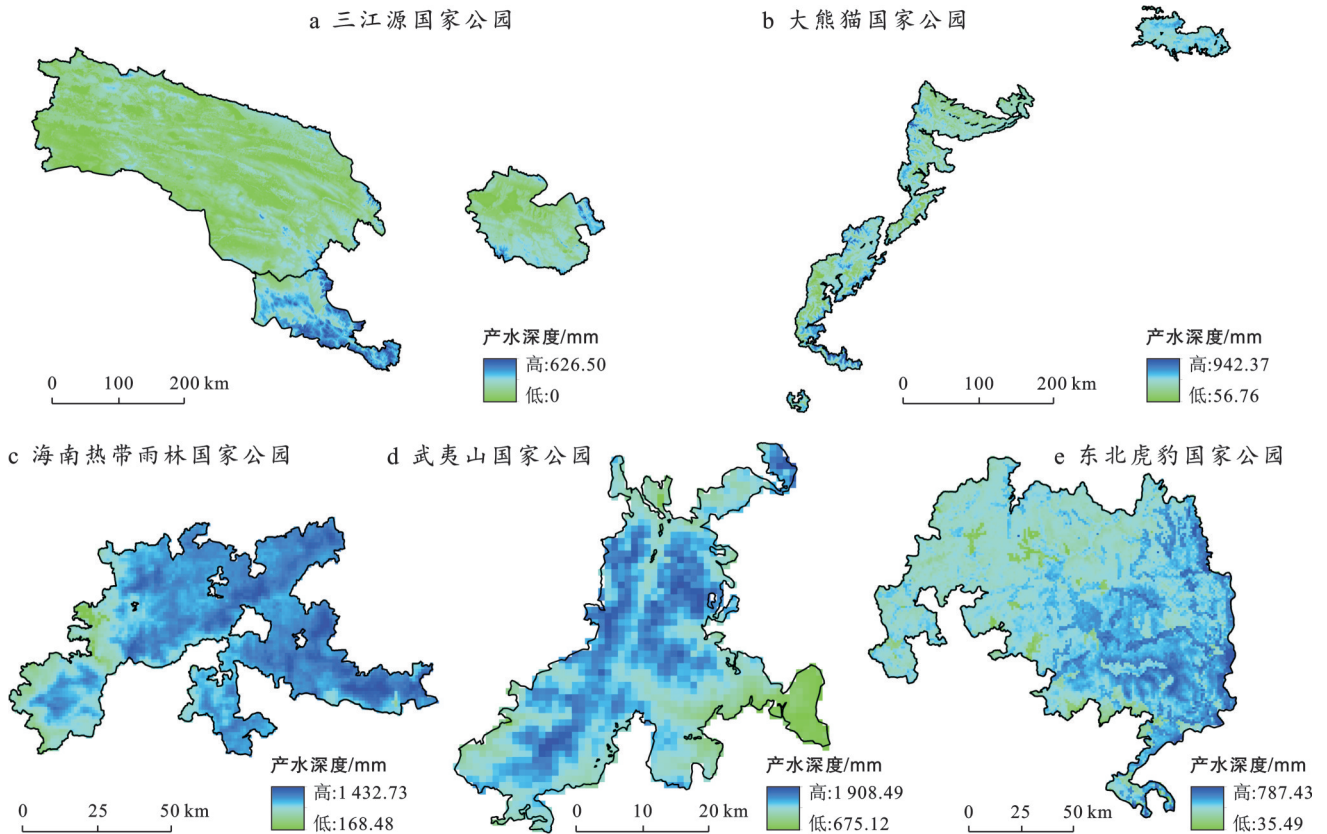


图 3 2000—2023 年首批国家公园平均产水深度空间格局

Fig.3 Spatial pattern of average water yield depth in first group of national parks from 2000 to 2023

2.2 产水深度稳定性

在各国家公园的产水深度稳定性分布方面(图 4—5),三江源国家公园的表现最为出色,空间分布上

呈东南高西北低,其中高稳定性区域占其总面积的 61.99%,较高稳定性区域占 31.83%,两者之和超过总面积的 90%,且明显高于其他国家公园。与三江

源国家公园相比,大熊猫国家公园呈中部地区高于西南与东北的分布特征,高稳定性区域占 34.09%,较高稳定性区域占 38.20%,中稳定性区域占 27.47%,而较低与低稳定性区域仅占 0.23%,虽低稳定性区域较少,但中稳定性区域相较三江源国家公园明显增多。海南热带雨林国家公园的分布呈西低东高,西部一小部分表现为低稳定性,占比 0.83%,高稳定性区域占 45.05%,较高稳定性区域占 40.61%,中稳定性区域占 11.44%,较低稳定性区域占 2.08%。整体而言,稳定性较大熊猫国家公园更好,但比三江源国家公园差。武夷山国家公园的产水稳定性分布较为分散,呈西高东低,高稳定性区域占 21.96%,较高稳

定性区域占 44.92%,中稳定性区域占 21.64%,较低稳定性区域占 11.17%,低稳定性区域占 0.31%,其较高稳定性与较低稳定性区域均明显大于其他国家公园。东北虎豹国家公园的产水深度呈现较为显著的低稳定性特征,只有西部一小部分地区呈高稳定性,仅占 3.46%,在首批国家公园中是高稳定性区域占比最少的,且是唯一高稳定性与较高稳定性区域小于 50% 的国家公园。此外,中稳定性区域占 53.23%,远大于其他国家公园。综上所述,首批国家公园的产水稳定性表现为:三江源国家公园>海南热带雨林国家公园>大熊猫国家公园>武夷山国家公园>东北虎豹国家公园。

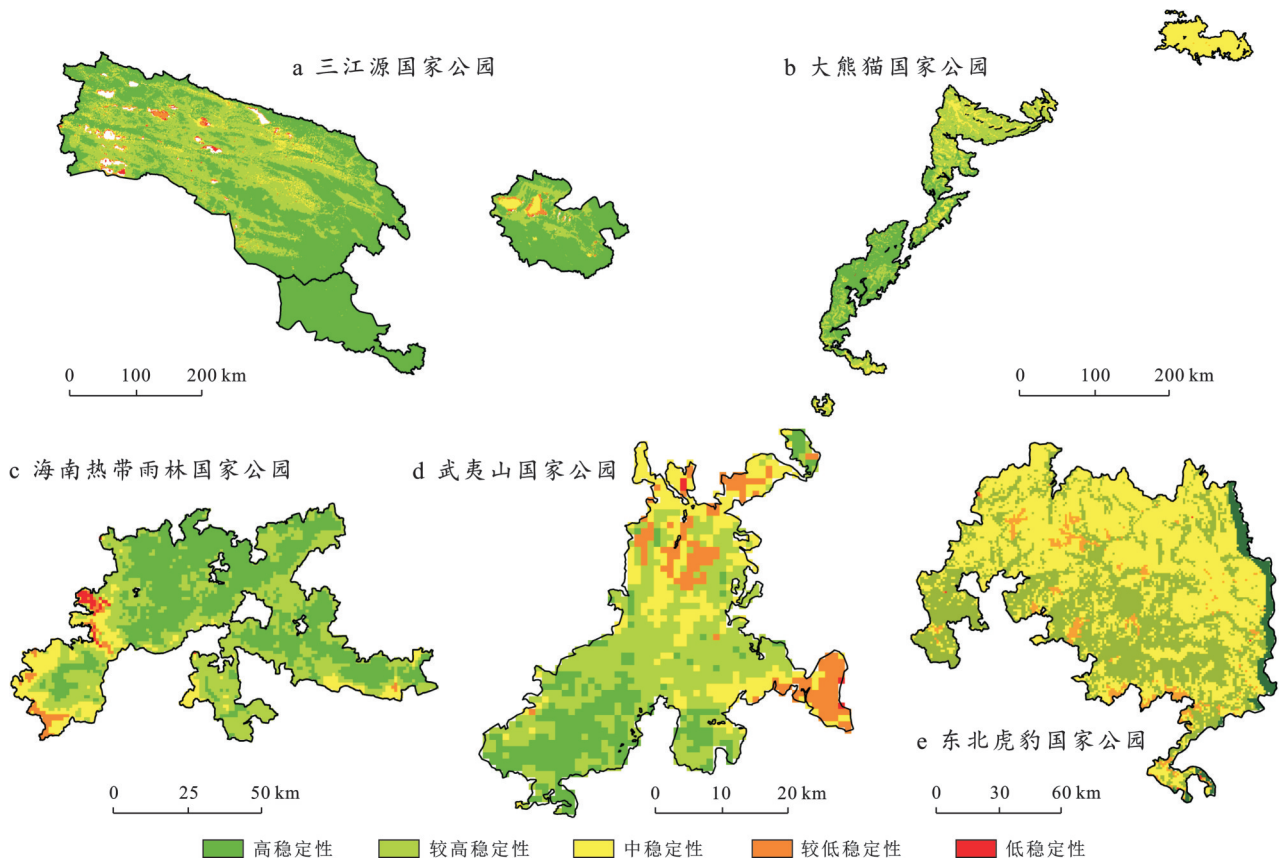


图 4 首批国家公园产水深度稳定性空间分布格局

Fig.4 Spatial distribution pattern of water-yielding depth stability in first group of national parks

2.3 关键驱动力差异

降水量是影响产水量的主要正向因素(图 6)。在所有国家公园中,降水量的增加显著提高了产水深度,尤其在三江源国家公园(0.987 9)和海南热带雨林国家公园(0.832 8)中,这一影响尤为突出,在武夷山国家公园其影响程度最小。潜在蒸散发(PET)只在海南热带雨林国家公园呈程度很小的正向影响(0.017 8),该因素普遍对产水深度产生负向影响,表明蒸散发的增加会减少产水量,且在大熊猫国家公园(-0.458 1)和武夷山国家公园(-0.348 5)中表面尤为

明显。植被覆盖因子(NDVI)和地形因子(TC)对产水量的影响相对较弱,且在不同公园中的表现存在差异。在三江源、大熊猫和东北虎豹国家公园中,NDVI对产水量有负向影响,其中对大熊猫国家公园的影响程度最大(-0.256 7),表明植被覆盖可能通过增加水分蒸发和消耗,进而降低水资源供给;而在海南热带雨林和武夷山国家公园中,NDVI则对产水量产生正向影响,海南热带雨林国家公园的影响程度(0.126 8)大于武夷山国家公园(0.073 4)。此外,在三江源、海南热带雨林和武夷山国家公园中,地形因子(TC)对产水

深度有正向影响,在三江源国家公园中,TC的正向影响程度最大(0.297 7),而在大熊猫国家公园和东北

虎豹国家公园中,TC对产水深度则有负向影响,且在大熊猫国家公园中最为显著(-0.383 6)。

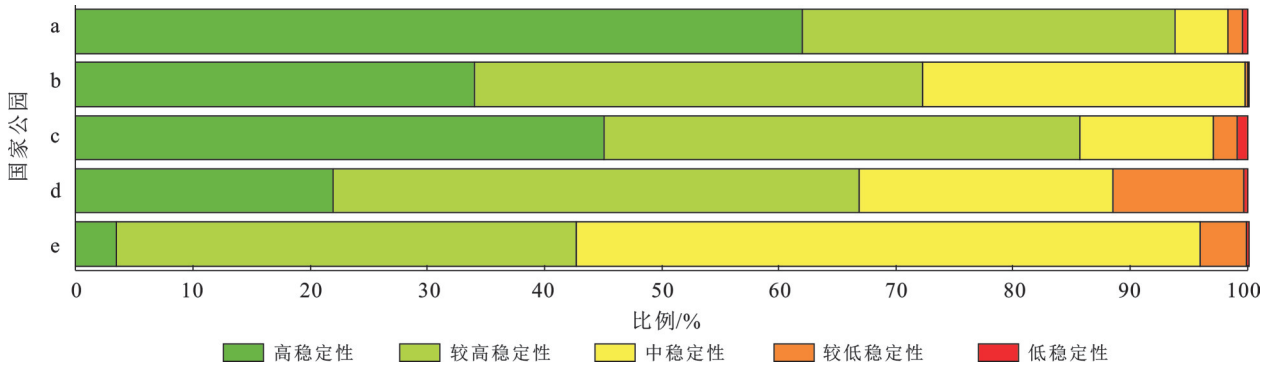
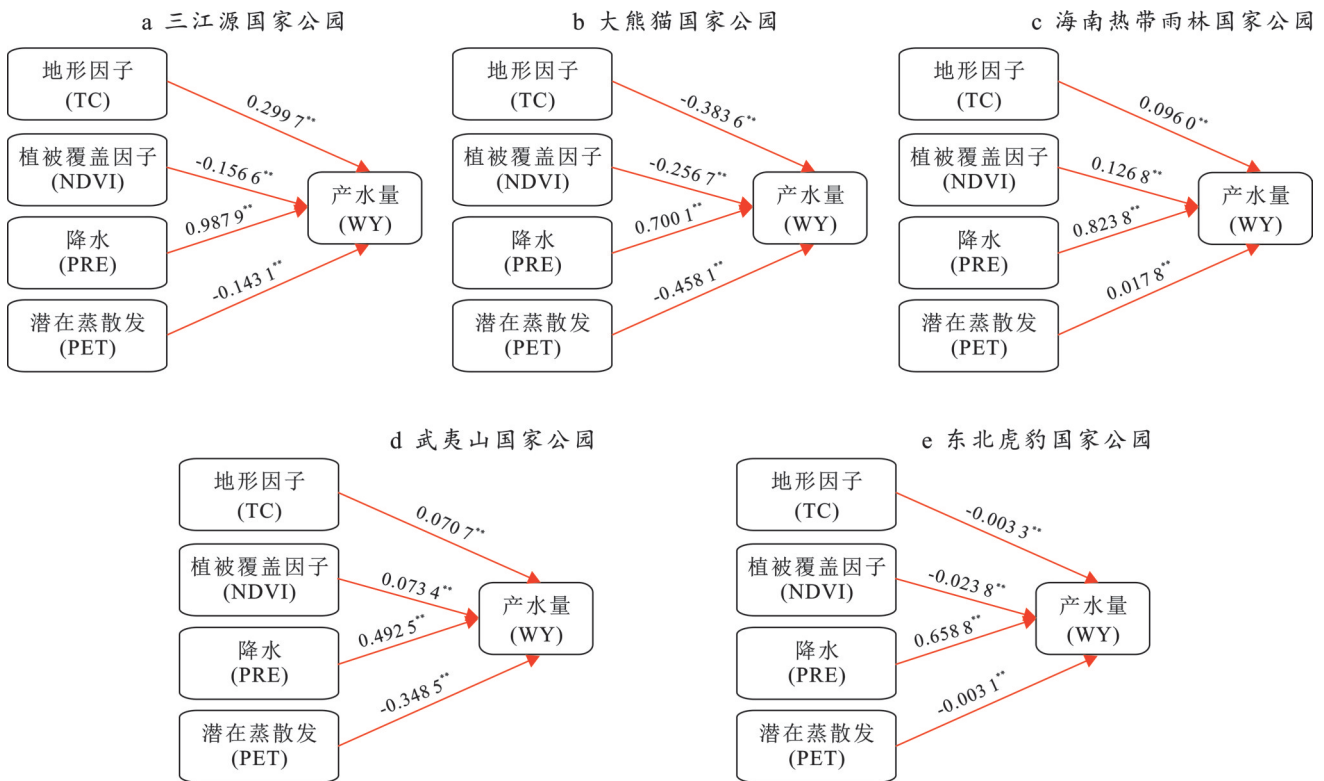


图5 首批国家公园产水深度不同稳定性等级面积概率分布
Fig.5 Probability distribution of different stability grade areas of water-yielding depth stability in first group national parks



注:图中“**”表示路径系数差异显著($p < 0.01$)。

图6 首批国家公园关键驱动力与产水能力的路径系数差异
Fig.6 Difference in path coefficients between key drivers and water yields in first group of national parks

3 讨论

3.1 首批国家公园产水量的时空格局

本研究对中国首批国家公园的产水深度进行了系统分析,结果显示不同公园之间的产水深度存在显著的背景差异。例如,三江源国家公园的产水深度范围为0~626.50 mm,整体变化较小,主要受地形和降水分布的影响,产水空间分布表现为东南高西北低,该结果与陶洁怡等^[3]、龙海潇等^[15]和吕乐婷

等^[23]关于该地区水文特征的研究一致,表明该区域的水文特征受到地形起伏和降水季节性分布的共同影响。海南热带雨林国家公园的产水深度范围为168.48~1 432.73 mm,与姚小兰^[13]的研究结果一致,该公园位于热带地区,降水量丰富且集中,提供了充沛的水源,尤其是高山区域的降水量在维持产水能力方面发挥着关键作用。此外,大熊猫国家公园的产水深度范围为56.76~972.37 mm,与徐亚莉等^[14]的研究结果相符。

3.2 关键驱动因子对首批国家公园产水能力的影响

降水量、潜在蒸散发、植被覆盖度和地形因子是影响产水量的关键驱动因子,且各个国家公园存在差异。

(1) 降水量。研究表明,降水量在各地区均是影响产水能力的最重要因素之一,这与陈武迪等^[10]、陶洁怡等^[3]研究结果一致。降水量的多少直接决定了一个地区可供水资源的总量^[24],尤其在三江源和海南热带雨林国家公园表现尤为突出。其中,三江源国家公园的降水量与产水深度的关系最为紧密(0.987 9),这与该地区较为丰富的降水和水资源积累机制密切相关,而地形、蒸散发以及冰雪融水等因素则在一定程度上调节了水量的分布与流动^[25]。海南热带雨林国家公园的降水量与产水深度的关系也较强(0.832 8),表明该地区丰富的降水为其水文系统提供了重要支持。相较而言,武夷山国家公园降水量对产水量的影响最小,可能是由于该地区的降水分布相对均匀,且地形较为平坦,水分的蒸发和流失较为均衡^[25],导致降水的影响相对减弱。

(2) 潜在蒸散发。蒸散发量较大的地区,水分蒸发和植物耗水较多,容易导致产水能力下降^[26]。潜在蒸散发对产水量的影响在各公园中的表现差异较大^[27]。海南热带雨林国家公园中,潜在蒸散发对产水量呈小幅正向影响(0.017 8),可能由于该地区温暖湿润的气候,蒸散发不会显著减少水分的积累。而在大熊猫和武夷山国家公园中,蒸散发对产水量的负向影响尤为显著(分别为-0.458 1和-0.348 5),表明在这些地区,产水量的减少是由于水分加速蒸发导致的。尤其在大熊猫国家公园,因山区植被覆盖较多,且植被生长旺盛,导致蒸散发量较高。这可能是导致产水能力相对较低的原因之一。

在高海拔地区,较高的蒸散发量使得降水未能有效地保留在土壤和水体中,从而影响水资源的供给^[27]。

(3) 地形因子。地形因子通过影响降水和水流的分布^[28],进而影响产水能力。地形因子对产水量的影响也表现出显著的区域差异。在三江源、海南热带雨林和武夷山国家公园中,地形因子对产水量呈正向影响,且在三江源国家公园的影响最大(0.297 7)。

在地形较为复杂的区域,如高原或山地,能够有效地促进水分的积累,尤其是在降水较为集中的地区^[29]。相反,在大熊猫国家公园和东北虎豹国家公园,地形因子对产水量产生负向影响,尤其是在大熊猫国家公园(-0.383 6)中,地形的起伏可能导致水

分的流失或滞留较少,从而减少了产水量。地形因子可能与水分分布、流动和储存密切相关,导致不同地区表现出不同的水文响应。

(4) 植被覆盖度。植被覆盖度的高低影响水分的蒸发量以及土壤的水分保持能力。植被的茂盛程度一定意义上与水分消耗成正比,但高植被覆盖也有助于增加土壤保墒和水源涵养^[30]。在海南热带雨林和武夷山国家公园,植被覆盖度对产水量呈正向影响,尤其在海南热带雨林国家公园(0.126 8)中较为显著。这可能源于其高森林覆盖率和丰富的降水,植被促进了水分积累而非消耗。相反,在三江源、大熊猫和东北虎豹国家公园,较高植被覆盖可能增加蒸散发,削弱水资源供给。其中,大熊猫国家公园植被覆盖度对产水量影响最显著(-0.256 7),其竹林密集,蒸散发旺盛,从而消耗大量水分^[30]。植被的水文功能受多种因素影响,并表现出区域性差异。

综合来看,降水量是所有国家公园中影响产水量的主要正向因素,但其影响程度各有差异,主要受地区气候和降水分布的影响。潜在蒸散发则普遍对产水量产生负向影响,尤其在植被覆盖较为密集的地区,蒸散发效应更加显著。地形因子对产水量的影响表现为正向或负向,具体效果受地形起伏、降水量和水文条件的共同作用。植被和地形因子的影响表现出较大的区域差异,受地形、植被类型和水文循环等多重因素的综合作用。

严格的保护措施和环境管理能有效保护水资源。三江源和大熊猫国家公园的保护措施较为严格,较少的开发和人类活动有助于保持水资源的自然流动和积累。海南热带雨林国家公园作为热带雨林保护区,管理较为严格,限制了大规模的开发活动,有助于水资源的保护。武夷山国家公园和东北虎豹国家公园在自然保护与人类活动之间存在一定的平衡,虽然人类活动相对较少,但仍会对局部水资源产生一定影响。气候变化(如季节性降水变化)也会影响不同国家公园的产水能力。例如,某些公园在旱季可能水资源较为紧张,而在雨季水资源则较为充沛。

4 结论

(1) 在2000—2023年期间,除海南热带雨林国家公园($k_{G3} = -0.25$)外,其他首批国家公园的产水深度普遍呈波动上升趋势($k_{G1} = 0.95$, $k_{G2} = 3.62$, $k_{G4} = 9.34$, $k_{G5} = 3.65$),其中,武夷山国家公园的产水深度增幅最大($k_{G4} = 9.34$),而三江源国家公园的增幅最小($k_{G1} = 0.95$)。在空间分布上,武夷山

国家公园的产水深度(1 609.13 mm)最高,三江源国家公园的产水深度(133.89 mm)最低。

(2)从稳定性角度分析,产水能力的稳定性由高到低依次为:三江源国家公园 > 海南热带雨林国家公园 > 大熊猫国家公园 > 武夷山国家公园 > 东北虎豹国家公园。

(3)在首批国家公园中,降水量被确定为影响产水量的主要正向因素,尤其在三江源(0.987 9)和海南热带雨林国家公园(0.832 8)中,这一影响尤为显著。潜在蒸散发普遍对产水深度产生负向影响,特别是在大熊猫国家公园(-0.458 1)和武夷山国家公园(-0.348 5)中表现突出。植被覆盖度和地形因子对产水量的影响存在地域差异,表明产水量的空间异质性是多种自然因子相互作用的结果,且这些因素在不同地区表现出不同的影响模式。

参考文献(References)

- [1] 欧阳志云,唐小平,杜傲,等.科学建设国家公园:进展、挑战与机遇[J].国家公园(中英文),2023(2):67-74.
Ouyang Zhiyun, Tang Xiaoping, Du Ao, et al. Building China's National Park systems scientifically: Challenges and opportunities [J]. National Park, 2023(2):67-74.
- [2] 张晶晶,徐基良.中国国家公园助力生物多样性保护路径研究进展[J].科技导报,2024,42(18):20-27.
Zhang Jingjing, Xu Jiliang. Research and prospects on the pathways of National Parks contributing to biodiversity conservation in China [J]. Science & Technology Review, 2024,42(18):20-27.
- [3] 陶洁怡,章锦河,郭丽佳,等.三江源国家公园水源涵养服务时空演变特征及其驱动因素[J].生态学报,2025,45(3):1226-1238.
Tao Jieyi, Zhang Jinhe, Guo Lijia, et al. Spatiotemporal change and driving factors of water conservation in Sanjiangyuan National Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(3):1226-1238.
- [4] 吕铖,吕素冰,焦天一,等.河南省黄河流域水资源-经济社会-生态环境协调发展评价及驱动因素分析[J].中国农村水利水电,2024(12):1-11.
Lü Cheng, Lü Subing, Jiao Tianyi, et al. Evaluation and driving factors of coordinated development of water resources, economy society and ecological environment in the Yellow River basin of Henan Province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(12):1-11.
- [5] 杨尧,朱永明.我国正式设立首批国家公园[J].生态经济,2021,37(12):9-12.
Yang Yao, Zhu Yongming. China formally established the first batch of National Parks [J]. Ecological Economy, 2021,37(12):9-12.
- [6] 何思源.中国国家公园治理中的社区角色及其巩固与发
展[J].自然资源学报,2024,39(10):2310-2334.
He Siyuan. The role of communities in the governance of China's National Parks and the consolidation and development of their role [J]. Journal of Natural Resources, 2024,39(10):2310-2334.
- [7] 常建波,朱博文,闫宝伟.黄河流域产水量时空变化及归因分析[J].环境科学与技术,2024,47(8):113-122.
Chang Jianbo, Zhu Bowen, Yan Baowei. Spatial and temporal variability of water yield in Yellow River valley and attribution analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2024,47(8):113-122.
- [8] 郭佳晖,刘晓煌,张文博,等.基于InVEST模型和PLUS模型的云贵高原产水量时空变化特征分析[J].现代地质,2024,38(3):624-635.
Guojia Hui, Liu Xiaohuang, Zhang Wenbo, et al. Spatio-temporal variations of water yields in the Yunnan-Guizhou Plateau based on InVEST and PLUS models [J]. Geoscience, 2024,38(3):624-635.
- [9] 戴尔阜,路荣荣.2000—2020年青藏高原产水服务时空分布格局及影响因素[J].西北师范大学学报(自然科学版),2024,60(4):1-11.
Dai Erfu, Lu Rongrong. Spatial distribution pattern and influencing factors of water yield services in Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020 [J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2024,60(4):1-11.
- [10] 陈武迪,刘晓煌,李洪宇,等.基于InVEST模型的新疆1990—2018年产水服务时空变化及驱动因素分析[J].现代地质,2024,38(3):636-647.
Chen Wudi, Liu Xiaohuang, Li Hongyu, et al. Spatio-temporal changes and driving factors of water yield service based on InVEST model in Xinjiang from 1990 to 2018 [J]. Geoscience, 2024,38(3):636-647.
- [11] 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 Maoyuan, Qi Shi, Guo Yanrui, et al. Driving mechanism of water yield in the ecological and water conservation zone of east Tibet and west Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(21):9520-9534.
- [12] 苏军德,赵晓阔,李国霞.基于InVEST-FLUS模型的祁连山国家公园碳储量演化分析及预测[J].环境工程,2024,42(7):190-199.
Su Junde, Zhao Xiaokuo, Li Guoxia. Analysis and prediction of carbon storage evolution in Qilian Mountain National Park based on InVEST-flus model [J]. Environmental Engineering, 2024,42(7):190-199.
- [13] 姚小兰.海南热带雨林国家公园高速公路穿越段的生态风险与对策研究[D].海南海口:海南大学,2023.

- Yao Xiaolan. Ecological risk and countermeasures of the expressway crossing section in the National Park of Hainan tropical rainforest [D]. Haikou, Hainan: Hainan University, 2023.
- [14] 徐亚莉,田苗,郑纪波,等.大熊猫国家公园(四川片区)森林的水源涵养功能[J].水土保持通报,2024,44(6):88-96.
Xu Yali, Tian Miao, Zheng Jibo, et al. Evaluation on forest water conservation function of Giant Panda National Park in Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(6):88-96.
- [15] 龙海潇,袁磊.三江源生态系统服务时空演化特征及其驱动因素分析[J/OL](2024-12-24).环境科学, <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202408118>.
Long Haixiao, Yuan Lei. Analysis of the characterization of spatio-temporal evolution of ecosystem services and their driving factors in the three-river headwaters region [J/OL] (2024-12-24). Environmental Science, <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202408118>.
- [16] 沈文婕,康宇杰,张晓凡,等.大熊猫国家公园四川片区植被时空变化及其地形分异[J].生态学报,2024,44(20):9081-9093.
Shen Wenjie, Kang Yujie, Zhang Xiaofan, et al. Spatio-temporal variation of vegetation and its topographic differentiation in the Sichuan area of Giant Panda National Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20):9081-9093.
- [17] 张丽娜,孙颖娜,胡金辉,等.寒区森林流域产水量时空变化规律研究:以永翠河流域为例[J].人民珠江, 2023,44(6):18-25.
Zhang Lina, Sun Yingna, Hu Jinhui, et al. Study on spatial and temporal variation laws of water yield in forest basin of cold region: Taking yongcui river basin as an example [J]. Pearl River, 2023,44(6):18-25.
- [18] Peng Shouzhong, Ding Yongxia, Liu Wenzhao, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. Earth System Science Data, 2019,11(4):1931-1946.
- [19] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.
- [20] Sun Junyu, Ni Chenrui, Wang Mengmeng. Analysis of water conservation trends and drivers in an alpine region: A case study of the Qilian Mountains [J]. Remote Sensing, 2023,15(18):4611.
- [21] Jakobowicz E, Derquenne C. A modified PLS path modeling algorithm handling reflective categorical variables and a new model building strategy [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2007, 51(8): 3666-3678.
- [22] 杨楠,宋孝玉,邓建伟,等.基于改进S-W模型的南小河沟流域蒸散发分配及控制机制[J].干旱区研究, 2024,41(11):1819-1830.
- Yang Nan, Song Xiaoyu, Deng Jianwei, et al. Research on the distribution and control mechanism of evapotranspiration in the Nanxiahegou watershed based on an improved S-W model [J]. Arid Zone Research, 2024,41(11):1819-1830.
- [23] 吕乐婷,任甜甜,孙才志,等.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[J].生态学报,2020, 40(3):993-1003.
Lü Leting, Ren Tiantian, Sun Caizhi, 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.
- [24] 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[J].大气科学学报,2022,45(5):688-699.
Yao Xiuping, Xie Qiyu, Huang Yifei. Advances and prospects on the study of precipitation in the three-river-source region in China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2022,45(5):688-699.
- [25] 刘蓓.青海不同地形下蒸发皿蒸发量变化及其影响因子分析[J].干旱区研究,2014,31(3):481-488.
Liu Bei. Change of pan evaporation and its affecting factors in Qinghai Province [J]. Arid Zone Research, 2014, 31(3):481-488.
- [26] Li Xuliang, Xu Xuefeng, Sonnenborg T O, et al. Effect of ecological restoration on evapotranspiration and water yield in the agro-pastoral ecotone in northern China during 2000—2018 [J]. Journal of Hydrology, 2024,638:131531.
- [27] Piouceau J, Panfili F, Bois G, et al. Actual evapotranspiration and crop coefficients for five species of three-year-old bamboo plants under a tropical climate [J]. Agricultural Water Management, 2014,137:15-22.
- [28] 钟水新.地形对降水的影响机理及预报方法研究进展[J].高原气象,2020,39(5):1122-1132.
Zhong Shuixin. Advances in the study of the influencing mechanism and forecast methods for orographic precipitation [J]. Plateau Meteorology, 2020,39(5):1122-1132.
- [29] Cui Jiangpeng, Lian Xu, Huntingford C, et al. Global water availability boosted by vegetation-driven changes in atmospheric moisture transport [J]. Nature Geoscience, 2022,15(12):982-988.
- [30] Li Xuejian, Du Huaqiang, Zhou Guomo, et al. Spatio-temporal patterns of remotely sensed phenology and their response to climate change and topography in subtropical bamboo forests during 2001—2017: A case study in Zhejiang Province, China [J]. GIScience & Remote Sensing, 2023,60(1):2163575.