

中国流域陆地水储量变化驱动模式的空间分异规律

邓诗宇^{1,2}, 张明芳¹, 侯怡萍¹

(1. 电子科技大学资源与环境学院, 成都 611731; 2. 瑞士联邦森林雪与景观研究所, 苏黎世 8903)

摘要: [目的] 针对我国流域陆地水储量变化的驱动模式分类不明和空间分异规律认识不清的问题, 本研究旨在定量识别多因素对陆地水储量变化的贡献, 揭示陆地水储量变化的驱动模式及其空间格局, 为全球变化背景下流域水资源的可持续利用与管理提供科学支撑。[方法] 采用 Mann-Kendall 趋势分析、偏相关分析和随机森林模型, 结合重力恢复与气候试验 (GRACE) 卫星数据、气象站点、流域特征数据和人类活动数据, 量化气候、人类活动和流域特征对我国 214 个三级流域陆地水储量变化的相对贡献, 并采用 K-means 聚类分析法进一步揭示流域陆地水储量变化驱动模式及其空间分异规律。[结果] 1) 我国气候相对贡献率 (Con_c) 高值区主要分布于东南沿海、东北及青藏高原等气候极端地区, 如东南诸河流域 Con_c 为 64.82%, 是全国平均 Con_c 的 1.5 倍。流域特征贡献率 (Con_w) 高值区集中在森林覆盖率高、地形复杂的地区 (如西南诸河等 Con_w 为 30.27%, 为全国平均 Con_w 的 2.6 倍)。人类活动相对贡献率 (Con_h) 较高的地区主要集中在西北诸河、海河和黄河流域等干旱-半干旱区及人口稠密的长江中下游流域, 上述四大流域 Con_h 平均值 (55.84%) 较全国平均 Con_h 值高 20%。2) 中国流域陆地水储量变化驱动模式可分为气候主导、人类活动主导、流域特征主导、气候-人类活动协同和气候-流域特征协同 5 类。松花江流域、辽河流域及青藏高原流域为气候主导模式; 西北诸河流域、华北的海河流域、珠江流域中上游和长江流域下游则为人类活动主导模式。淮河下游和西南诸河流域为气候-流域特征协同驱动模式, 长江流域中游、黄河流域中上游和西北诸河南部流域则为气候-人类活动协同驱动模式。[结论] 我国未来水安全保障规划应该基于流域陆地水储量变化驱动模式的空间分异规律分区施策。在气候主导区提升生态系统的水文调节能力和水利基础设施的韧性, 增强气候变化适应性; 在人类活动主导区实施节水与生态保护协同管理; 在气候-流域特征协同驱动区加强国土生态空间优化和流域生态修复, 促进林水资源的协调性和气候韧性; 气候-人类活动协同驱动区强化水资源的适应性管理, 协调好生态用水和经济社会用水。本研究可为我国构建全球变化下流域水资源协同治理体系、保障国家水安全提供科学支撑。

关键词: 陆地水储量; 气候变化; 人类活动; 流域特征; 驱动模式; 空间分异

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0301-13

Spatial Differentiation Patterns of Driving Modes of Terrestrial Water Storage Variations in China's River Basins

Deng Shiyu^{1,2}, Zhang Mingfang¹, Hou Yiping¹

(1. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Birmensdorf, Zurich 8903, Switzerland)

Abstract: [Objective] To address the unclear classification of driving modes and the insufficient understanding of spatial differentiation patterns of terrestrial water storage (TWS) variations in China's river basins, this study aims to quantitatively identify the contributions of multiple factors to TWS variations, reveal the driving modes and their spatial distributions, and provide scientific support for sustainable utilization and management of water

收稿日期: 2026-03-02

修回日期: 2026-04-02

录用日期: 2026-04-10

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-07-20

资助项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目 (U24A20355); 国家建设高水平大学公派研究生项目 (202506070033)

第一作者: 邓诗宇 (1997—), 女, 博士研究生, 主要从事森林与气候变化对水文过程的影响研究。E-mail: shiyudeng@std.uestc.edu.cn

通信作者: 张明芳 (1982—), 女, 博士, 教授, 主要从事土地利用/覆被变化及气候变化对水资源的影响、流域生态系统保护与管理研究。

E-mail: mingfangzhang@uestc.edu.cn

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

resources in river basins under global change. [Methods] This study employed the Mann-Kendall trend analysis, partial correlation analysis, and random forest models, combined with multi-source datasets including Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite data, meteorological station observations, basin characteristics, and human activity data. The relative contributions of climate, human activities, and basin characteristics to TWS variations in 214 third-order basins in China were quantified. K-means clustering analysis was further applied to reveal the driving modes of TWS variations and their spatial differentiation patterns. [Results] 1) Regions with high relative contribution of climate (Con_c) were mainly distributed in climate-extreme areas, including the southeastern coast, northeastern China, and the Qinghai-Xizang Plateau. Specifically, Con_c in the southeastern river basins was 64.82%, which was 1.5 times the national average. Regions with high contribution of basin characteristics (Con_w) were concentrated in areas with high forest coverage and complex terrain (e.g., Con_w in the southwestern rivers was 30.27%, which was 2.6 times the national average). Regions with high relative contribution of human activities (Con_h) were mainly distributed in arid and semi-arid regions, including the northwestern river basins, the Haihe River basin, and the Yellow River basin, as well as in densely populated regions such as the middle and lower reaches of the Yangtze River. The average Con_h in these four regions was 55.84%, which was 20% higher than the national average. 2) The driving modes of TWS variations in China's river basins were classified into five types: climate-dominated, human activity-dominated, basin characteristic-dominated, climate-human activity co-driven, and climate-basin characteristic co-driven. The Songhua River basin, Liaohe River basin, and Qinghai-Xizang Plateau river basins were climate-dominated. The northwestern river basins, the Haihe River basin in North China, the middle and upper reaches of the Pearl River basin, and the lower reaches of the Yangtze River basin were human activity-dominated. The lower Huaihe River basin and the southwestern river basins were climate-basin characteristic co-driven. The middle Yangtze River basin, the middle and upper Yellow River basin, and the southern part of the northwestern river basins were climate-human activity co-driven. [Conclusion] Future water security planning in China should implement region-specific strategies based on the spatial differentiation pattern of driving modes of TWS variations. In climate-dominated regions, efforts should focus on enhancing hydrological regulation capacity of ecosystems and the resilience of water infrastructure to strengthen climate change adaptability. In human activity-dominated regions, coordinated management of water conservation and ecological protection should be implemented. In climate-basin characteristic co-driven regions, ecological spatial optimization and basin ecological restoration should be strengthened to promote the coordination of forest and water resources and climate resilience. In climate-human co-driven regions, adaptive water resource management should be strengthened to coordinate ecological water use and socioeconomic water use. This study provides scientific support for the construction of a coordinated governance system for basin water resources and for ensuring national water security under global change.

Keywords: terrestrial water storage; climate change; human activities; basin characteristics; driving patterns; spatial heterogeneity

Received: 2026-03-02

Revised: 2026-04-02

Accepted: 2026-04-10

Online(www.cnki.net): 2026-07-20

陆地水储量(terrestrial water storage, TWS)由地表水、土壤水、地下水、冰川、河流、湖泊及生物水质等共同组成,是水资源可利用性与水热平衡调控的核心组分^[1]。然而,在全球变化背景下,气候变异(干旱、热浪及厄尔尼诺-南方涛动等)、流域下垫面异质性、植被变化(毁林/造林)^[2]及地下水超采、灌溉扩张等人类活动,显著影响TWS的时空格局^[3],引发陆地水储量异常波动,进而威胁用水安全与水循环稳

定。我国人均水资源严重不足且空间分布不均。在自然和人为因素的多重驱动下,我国水资源响应逐渐呈现“干湿极化”趋势,加剧TWS时空分异的复杂性^[4],给水资源管理和人民生计带来重大挑战。因此,厘清我国TWS对多重驱动力的响应的空间分异规律,建立基于机理认知的水资源适应性分区管理框架,将有助于我国干旱区生态修复、湿润区水土资源优化配置及国家水安全保障。

2002年GRACE(gravity recovery and climate experiment)重力卫星的发射极大推动我国陆地水储量距平值(terrestrial water storage anomaly, TWSA)的时空动态及其驱动机制研究^[5]。已有研究^[6]表明,受降水驱动,中国TWSA整体呈东南高、西北低的空间分布;人类活动与下垫面特征的耦合效应会进一步放大区域差异。黄河流域^[7]、长江流域^[8]、华北平原^[9]及青藏高原^[10]等典型单元的研究表明,降水、温度、植被及人类活动等因素综合影响TWSA演变。目前,有研究^[4]仍以栅格单元为基础,利用GRACE数据定性解析我国陆地水储量动态。但是国内外水资源管理通常是以流域为单元开展。流域作为独立且完整的水文响应单元,其边界与水量平衡过程天然契合,可有效避免栅格尺度信号割裂与混合^[4]。气候胁迫、地形地貌、植被覆盖及人类活动的综合效应在流域尺度上得以完整表达,是解析TWSA驱动机制的理想单元。因此,亟须开展全国尺度以流域为单元的TWSA变化及驱动机制研究,为我国水资源分区管理和决策优化提供直接的科学依据。

准确实施我国水资源分区管理的重要难点在于我国TWS的变化驱动模式呈现高度空间异质性。各区域TWS影响因素聚类探讨对于评估水资源保护和社会发展之间的权衡至关重要。现有研究^[8]已逐步量化气候与人类活动对TWSA的关键调控作用。例如,Mo等^[11]基于GRACE卫星数据探讨中国TWSA的时序特征发现,2003—2013年气候变化对我国陆地水储量变异贡献46.0%;Zhang等^[12]揭示降水分异对长江流域TWSA的贡献率高达(69.0±1.2)%;张昌伟等^[13]研究表明,我国南方7省TWSA 60.0%以上的变化可由气候解释,三峡水库附近则受人类活动和气候的共同影响。虽然已有研究关注部分区域陆地水储量时空变异及归因,但多立足局部地区或基于线性统计方法开展分析,对于多驱动因子非线性耦合作用的系统刻画仍显不足。同时,全国尺度以流域为单元的TWS变化的驱动模式分类及其空间分异规律研究仍相对有限,难以支撑区域差异化的水资源管理决策。为此,亟须在定量归因基础上引入聚类分析,将各流域划分为若干驱动机制同质区,从而将归因结果转化为可直接映射管理需求的空类别。通过构建基于TWS驱动模式的适应性管理框架,开展集水资源变化归因-分区-修复于一体的国土水生态空间格局优化策略研究,实现从“全国平均”到“分区精准”的范式跃迁,为“山水林田湖草沙”一体化保护与修复提供科学参考。

针对当前我国流域水资源治理与调控在分区边界、调控策略与协同机制等方面亟待优化的需求,本研究基于GRACE卫星2004—2014年陆地水储量距平(TWSA)数据,以我国214个三级流域为基础研究单元,综合运用Mann-Kendall趋势分析、偏相关分析和随机森林回归算法(random forest regression)、水文敏感度分析与相对贡献率量化方法,系统揭示我国TWSA时空演变规律,定量识别气候变异、流域特征和人类活动对TWSA的相对贡献率及其空间分异特征;进一步采用K-means聚类算法确定中国TWSA变化的驱动模式的空间格局;基于TWSA变化驱动模式的空间分异机制,提出适应性水资源分区管理策略,解决流域水资源管理边界界定、调控策略适配及多主体协同难题。本研究在归因框架、分区施策及应用导向方面实现系统性拓展,具体创新贡献为:1)由栅格或局地研究拓展至全国214个三级流域尺度,克服栅格信号割裂问题;2)耦合随机森林回归、水文敏感度分析与相对贡献率分解方法,实现TWSA对驱动因子的非线性响应的综合定量评估;3)基于驱动因子相对贡献率开展聚类分析,与已有工作中基于TWSA时空趋势、单一指标或现象数据的聚类不同,本研究在分类标准和聚类变量选择上进行了针对性优化,实现由“现象分区”向“机制分区”的转变,为分区管理提供可直接映射调控需求的科学依据;4)构建面向管理决策的分区框架,增强研究成果的实践支撑能力。本研究将丰富我国全球变化背景下区域水循环响应机制认识,为实现我国未来水资源精准管控目标提供科学决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中国(3°51′~53°33′N, 73°33′~135°05′E)地域辽阔,年平均淡水资源总量2.8万亿m³。全国主要水系包括长江、黄河、珠江、淮河、海河和松花江等(图1)。本研究基于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据平台提供的流域划分标准(<https://www.resdc.cn/>),将全国划分为10个一级流域和214个三级流域,流域面积为24.89~(7.92×10⁵)km²(图1)。我国降水空间分异显著,呈现东南多、西北少的梯度格局,多年平均降水量为74.68~2 000.36 mm。东南沿海地区(如海南)年降水量超过2 000 mm,而西北内陆(如塔克拉玛干沙漠)年降水量不足100 mm。年平均气温为-11.39~23.00℃。我国植被类型多样,涵盖从低纬度常绿阔叶林到高海拔高山草原草甸的完整垂直带谱,包括常绿阔叶林、亚高山针叶林、寒温带针叶林及高山灌丛草甸等多种类型,形成复杂的生态系统格局。



注：基于自然资源部地图技术审查中心标准地图(审图号为GS20232763号)绘制,底图边界无修改。下同。

图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

1.2 数据来源与预处理

本研究涉及的数据包括GRACE卫星观测数据、气候、流域特征、植被、土地利用和人类活动等数据(表 1)。GRACE 卫星由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和德国宇航中心(DLR)联合研制,用于监测地球系统内的质量变化^[5]。采用德克萨斯大学空间研究中心(CSR)提供的 Level-2 Release-05(RL05)

逐月 GRACE 数据产品,反演并计算 TWSA。该数据产品经重采样至空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,研究时段为 2004—2014 年,涵盖 GRACE 卫星在轨状态稳定、数据质量可靠的完整运行周期,确保数据时间序列的一致性。数据预处理基于 GRACE Matlab 工具箱(GRAMAT)及 CSR 标准处理流程完成^[14],关键步骤包括:1)利用卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)获取的 C20 系数修正极地轨道误差,同时采用 Swenson 等的方法补全缺失的一阶项,以准确表征地心运动引起的质量变化^[15];2)应用去相关性滤波(CHENP4M6)和 300 km 高斯平滑消除条带噪声及高阶项误差;3)基于 Wahr 等^[16]方法生成 0.25° TWSA 栅格数据。为平衡降噪与信号保留,采用 GRAMAT 进行信号泄漏校正,通过流域约束矩阵和迭代优化算法减少信号漏出/漏入干扰,并结合缩放法优化流域形状描述^[14];4)为消除冰川均衡调整(glacial isostatic adjustment, GIA)对重力场的长期趋势影响,利用工具箱集成的 ICE-5G 模型提供的 GIA 改正数据,对 TWSA 进行线性趋势扣除处理^[14],获得更真实反映陆地水储量变化的信号。该预处理体系已在小流域 TWSA 估算中得到验证^[3],为研究提供可靠数据基础。

表 1 数据来源与特征

Table 1 Data sources and features

数据类型	数据来源	时间分辨率	空间分辨率
陆地水储量	GRACE 重力卫星(UTCSR: http://www.csr.utexas.edu/datasets/)	月	$0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$
气候	国家气象科学数据中心(http://www.nmic.cn/)	月	$0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$
	1910—2020 年中国 1 km 逐月最高/最低温度数据集(http://www.geodata.cn)	月	$1\text{ km}\times 1\text{ km}$
植被	GLASS LAI(http://www.glass.umd.edu/Download.html)	8 d	$0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$
	GIMMS NDVI 3g(http://poles.tpc.ac.cn)	15 d	$1/12^{\circ}\times 1/12^{\circ}$
土地利用	MODIS MCD12Q1(https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/ https://zenodo.org/records/5136330)	年	$500\text{ m}\times 500\text{ m}$
人类活动	国家统计局(http://www.stats.gov.cn/)	年	省级
	Worldpop(https://www.worldpop.org/)	年	$1\text{ km}\times 1\text{ km}$

本研究采用多源数据系统分析 TWSA 的驱动因素。气候数据包括降水、实际蒸散发(ET)和温度(最高/最低/平均气温)。其中有效降水(PE)通过降水量与 ET 差值计算获得。流域下垫面数据涵盖植被参数、湖泊水库、冰川积雪、农田及不透水面数据,其中植被参数包括叶面积指数(LAI)、归一化植被指数(NDVI)、植被覆盖率(VFC)和流域特征指数(m)^[17]。本研究所有数据均统一至流域尺度进行分析,具体数据来源和数据特征见表 1。数据处理采用 ArcMap(10.2)完成,研究时段为 2004—2014 年。

1.3 研究方法

1.3.1 陆地水储量驱动因子指标 本研究系统构建多维 TWSA 驱动因子体系,包括气候因子、流域特征和人类活动三大类共 21 项指标(表 2)^[3]。气候因子涵盖降水(P)、有效降水(PE)、实际蒸散发(ET)、潜在蒸散发(PET)和年平均气温(T)5 项关键指标,表征水循环的能量和物质平衡过程。流域特征因子涵盖 m 、LAI、NDVI、VFC、水体覆盖率(C_w)及冰川积雪覆盖率(C_s)6 项指标,系统反映流域下垫面的水文调节功能。人类活动因子则从水资源利用、土地利用及社会经济维度选取 10 项指标,包括工业(IND)、农业(AGR)、生活用

水量(DW)及用水总量(WT)、灌溉面积(IRR)、农田面积占比(C_f)、不透水面积占比(C_u)、人口密度(HD)、国内生产总值(GDP)及人均国内生产总值(GDP_{per}),全面量化人类活动对水资源的直接与间接影响。

表 2 陆地水储量变化驱动因子
Table 2 Driving factors of terrestrial water storage variations

驱动因子	类型	缩写	单位
气候	降水量	P	mm
	有效降水量	PE	mm
	实际蒸散发	ET	mm
	潜在蒸散发	PET	mm
	年平均气温	T	°C
流域特征	流域特征指数	m	
	叶面积指数	LAI	m^2/m^2
	归一化植被指数	NDVI	
	植被覆盖率	VFC	%
	水体覆盖率	C_w	%
	冰川积雪覆盖率	C_s	%
人类活动	工业活动	IND	mm
	农业活动	AGR	mm
	生活用水	DW	mm
	用水总量	WT	mm
	灌溉面积	IRR	10^3 hm^2
	农田面积占比	C_f	%
	不透水面积占比	C_u	%
	人口密度	HD	人/ km^2
	国内生产总值	GDP	¥
	人均国内生产总值	GDP_{per}	¥

1.3.2 陆地水储量驱动因子相对贡献的量化方法
本研究首先采用 Mann-Kendall 趋势检验法,识别 2004—2014 年中国 214 个流域 TWSA 的时空变化趋势,并结合偏相关分析法解析 TWSA 与气候、流域特征及人类活动因子间的内在关系^[12];再利用 R 语言采用随机森林回归算法定量评估各驱动因子对陆地水储量年际变化($\Delta TWSA$)的相对贡献率。为确保模型输入变量的独立性与归因结果的可解释性,研究对驱动因子进行系统筛选。首先,采用偏相关分析检验各驱动因子与 TWSA 的相关性,剔除不显著变量($p>0.05$);其次,对初步入选因子进行方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)检验,剔除 $VIF>5$ 的高共线性变量;最后,针对筛选因子进行排列组合确定模型输入方案,最终根据精度评价指标确定所选模型。具体建模步骤为:1)基于偏相关显著性结果,从气候、流域特征及人类活动 3 类指标中各选取 1 个显著相关且 $VIF<5$ 的代表因子作为模型输入,输出变

量为 $\Delta TWSA$,计算方法见公式(1)和公式(2)。其中, m 作为流域特征因子的关键指标,计算方法见公式(3)。该方法将每类复杂驱动因素视为一个综合效应,通过主导因子作为信号载体,有效降低模型复杂度并提升归因结果的可解释性^[18]。2)通过分层随机抽样按 8:2 的比例将数据集划分为训练集和测试集,并设置决策树数量($n_{tree}=500$)、节点分裂变量数($mtry=1$)和随机种子数(random seed=1 000)以实现误差收敛确保模型效能。3)采用多维精度评价指标进行模型精度检测,包括决定系数(R^2)、Nash-Sutcliffe 效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency, NSE)、相对误差(relative error, RE)和均方根误差与观测数据的标准差比值(root mean square error-observations standard deviation ratio, RSR)^[19]。4)基于特征重要性量化各驱动因子的相对贡献率及其非线性响应特征^[20]。

$$\Delta D = D_t - D_{t-1} \tag{1}$$
$$\Delta TWSA = TWSA_t - TWSA_{t-1} \tag{2}$$

$$ET = P \left\{ 1 + \left(\frac{P}{PET} \right)^{-1} - \left[1 + \left(\frac{P}{PET} \right)^{-m} \right]^{\frac{1}{m}} \right\} \tag{3}$$

式中: ΔD 为 TWSA 驱动因子的年际差值,包括气候(C)、流域特征(W)及人类活动(H); $\Delta TWSA$ 为流域 TWSA 的年际差值, $TWSA_t$ 和 $TWSA_{t-1}$ 为 t 年和 $t-1$ 年的流域陆地水储量距平值。ET、 P 和 PET 分别为实际蒸散发量、降水和潜在蒸散发量; m 为反映流域特征(如植被类型、土壤性质及坡度)的关键参数。为量化陆地水储量对外界干扰因子变化的响应,本研究首先采用敏感性分析法定量评估 TWSA 对外界干扰因子的响应特性。本研究中,假定驱动因子变化 1%,由该因子引起的 TWSA 的变化可基于公式(4)~公式(7)量化。以气候为驱动因子为例,其余因子以此类推:

$$\Delta TWSA_c = [(C_t \times 1\% + C_t) - (C_{t-1} \times 1\% + C_{t-1})] + \Delta W + \Delta H \tag{4}$$
$$\Delta TWSA_c = (C_t \times 1\% + C_t - C_{t-1} \times 1\% - C_{t-1}) + \Delta W + \Delta H \tag{5}$$
$$\Delta TWSA_c = (\Delta C \times 1\% + \Delta C) + \Delta W + \Delta H \tag{6}$$
$$\Delta TWSA_{c_{1\%}} = \Delta TWSA_c - \Delta TWSA \tag{7}$$

式中: $\Delta TWSA_c$ 为气候变化 1%($C_t \times 1\%$)后引起的 TWSA 变化总量,mm; ΔC 、 ΔW 和 ΔH 分别为气候、流域特征及人类活动因子的年际差值,mm; $\Delta TWSA_{c_{1\%}}$ 为气候变化 1%引起的 TWSA 净变化量,mm。通过量化 TWSA 对驱动因子单位变化的响应量后,定义并计算水文敏感度系数。本研究中敏感度系数定义为 TWSA 净变化量与影响因子变化率的

比值,计算方法参见公式(8)和公式(9)^[21]。

$$\Delta TWSA_{d_i}(t)\% = 100 \times \frac{\Delta TWSA_{d_i}(t)}{\overline{TWSA}_i} \quad (8)$$

$$S_{d_i} = \left| \frac{\Delta TWSA_{d_i}(t)\%}{\Delta d_i} \right| \quad (9)$$

式中: $\Delta TWSA_{d_i}(t)$ 为驱动因子(d)变化1%引起的TWSA净变化量,mm; $\overline{TWSA}_i$ 为*i*流域多年平均TWSA; $\Delta TWSA_{d_i}(t)\%$ 为*i*流域TWSA对驱动因子变化的响应强度,%; Δd_i 为驱动因子变化率,%; S_{d_i} 为驱动因子的水文敏感度。事实上,水文敏感系数仅表征TWSA对驱动因子单位变化率的响应潜力,而各驱动因子在研究期内的实际变化幅度并不一致。某一驱动因子对TWSA变化的相对贡献,取决于流域系统的敏感特性与该驱动因子自身演变趋势的耦合效应。因此,本研究将驱动因子水文敏感度与其多年相对变化相乘,得到由该驱动因素引起TWSA的变化率,即该要素对TWSA的相对贡献,见公式(10)~公式(12)^[22]。

$$Con_{d_i} = |S_{d_i} \times RC_{d_i}| \quad (10)$$

$$RC_{d_i} = \frac{n \times Trend_{d_i}}{|ax_i|} \times 100\% \quad (11)$$

$$100\% = Con_c + Con_w + Con_h \quad (12)$$

式中: Con_{d_i} 为驱动因子 d_i 对TWSA相对贡献率; RC_{d_i} 为 d_i 的多年相对变化率,基于2004—2014年 d_i 的平均值 ax_i 和逐年变化率 $Trend_{d_i}$ 计算获得。其中,逐年变化率 $Trend_{d_i}$ 可由线性回归法计算得到,回归系数表征驱动因子的变化趋势(正值表示上升趋势,负值表示下降趋势),其绝对值反映变化速率。气候、流域特征及人类活动对TWSA变异的相对贡献率经归一化处理后分别为 Con_c 、 Con_w 和 Con_h 。

1.3.3 聚类分析 K-means算法通过最小化各点与其最近的聚类平均值(中心点)之间的距离平方和,将*N*个数据点分成*k*个聚类。点与其最近的聚类平均值(中心点)之间的距离平方和最小^[23],计算参见公式(13)和公式(14)。本研究采用K-means聚类算法对流域尺度TWS对气候因子、流域特征及人类活动驱动因子的敏感度进行空间聚类分析,实现中国不同流域TWSA变化的主导驱动类型分区。首先,对各驱动因子的相对贡献率进行Z-score标准化。为科学确定最优聚类数并确保结果的稳健性,本研究在 $k \in [3, 7]$ 的范围内对各方案进行15次随机初始化的独立聚类。通过评估MSE随*k*值增加的下降速率,并定量评估聚类中心位置变异程度及空间格局的连贯性,最终确定最优聚类数。该方案在最小化样本点与类中心

欧氏距离平方和的同时,所得分区与我国宏观气候-水文格局高度契合,具有明确的物理内涵。

$$MSE = \sum_{i=1}^k \sum_{P \in X_i} \|P - m_i\|^2 \quad (13)$$

$$m_i = \frac{1}{N_i} \sum_{P \in X_i} P \quad (14)$$

式中:MSE为均方误差;*k*为流域驱动类型总数(聚类类别数); X_i 为第*i*类驱动类型的流域样本集合;*P*为单个流域样本,包含气候因子、流域特征及人类活动对TWSA变异的相对贡献率; m_i 为第*i*类驱动类型的特征中心向量,反映该类流域的典型驱动模式; N_i 为归属于第*i*类的流域样本数量。

2 结果与分析

2.1 陆地水储量时空变化特征及其影响因素

2004—2014年,中国214个流域多年平均TWSA空间变异较强(−215.13~111.31 mm),高值区主要分布在东北地区、长江流域和柴达木盆地,其中松花江、辽河和长江流域的TWSA多年平均值分别为57.89、29.77、31.54 mm;而低值区集中在西北诸河(−24.32 mm)、黄河流域(−12.23 mm)、海河流域(−51.24 mm)、西南诸河流域(−83.02 mm)和部分沿海地区(图2a)。全国TWSA总体呈显著下降趋势($p < 0.05$),但存在空间差异。其中,长江流域、珠江流域、东南诸河流域和松花江流域的TWSA呈显著上升趋势($p < 0.05$),以长江流域的TWSA上升最为显著。而黄河流域、海河流域、淮河流域、西南诸河流域和西北诸河流域则呈现显著下降趋势($p < 0.05$),以黄河流域的TWSA下降趋势最为剧烈。辽河流域TWSA较为稳定,无显著变化趋势(图2b)。各驱动因子与TWSA的偏相关分析表明(图3),我国陆地水储量年际波动与降水量、有效降水、NDVI、*m*和*C_w*变化呈显著正相关($p < 0.05$),与年平均气温、农业用水、生活用水、用水总量、*C_f*、*C_u*、GDP和GDP_{per}变化呈显著负相关($p < 0.05$)。十大流域尺度上,TWSA驱动机制呈现显著的分区特征(表3)($p < 0.05$)。气候因子(降水及蒸散过程)是TWSA变化的基础控制因素,北方及西北干旱-半干旱地区对气候波动响应较为敏感,而南方湿润区则在气候驱动基础上叠加植被变化的调节作用;同时,人类活动在中东部及干旱半干旱流域中表现出显著影响($p < 0.05$),尤其是工农业用水、土地利用变化及社会经济发展。多重因素耦合作用下,形成“气候主控-下垫面调节-人类活动强化”的综合驱动格局,共同塑造我国陆地水储量的空间分异特征(表3)。

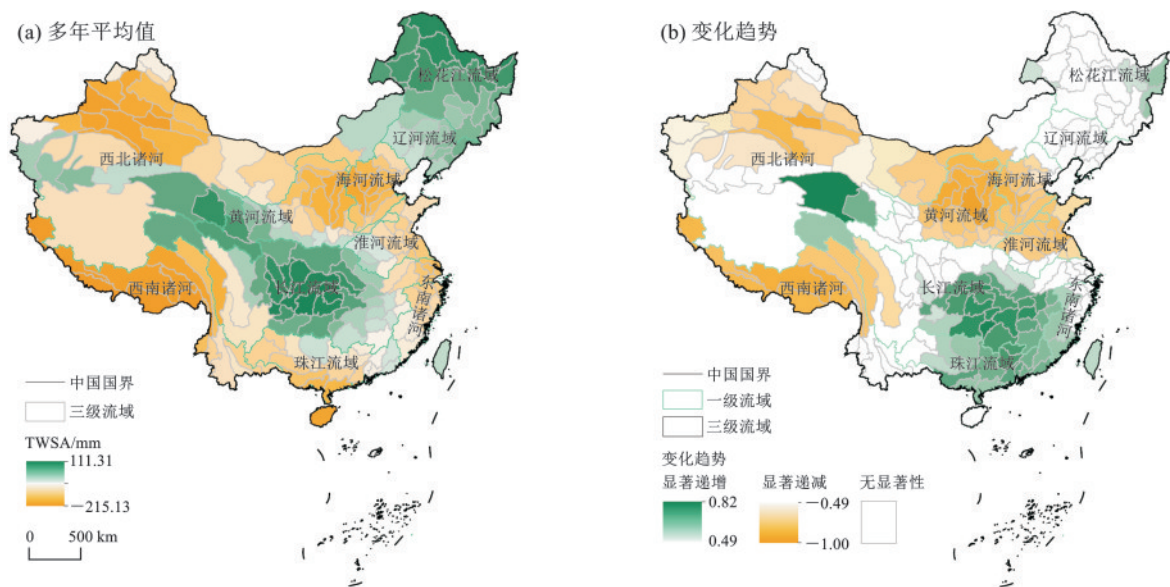


图 2 2004—2014 年中国 TWSA 多年平均值空间分布格局及变化趋势

Fig. 2 Spatial distribution patterns and variation trends of multi-year mean terrestrial water storage anomaly (TWSA) in China from 2004 to 2014

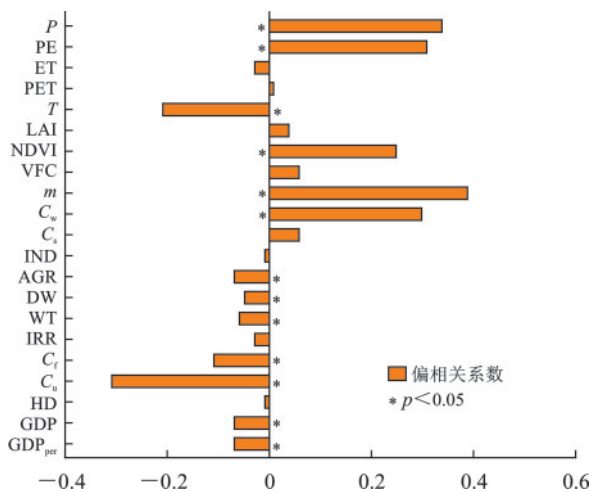


图 3 2004—2014 年中国 TWSA 与驱动因子偏相关分析

Fig.3 Partial correlation analysis between terrestrial water storage anomaly (TWSA) and driving factors in China from 2004 to 2014

2.2 陆地水储量变化定量模型

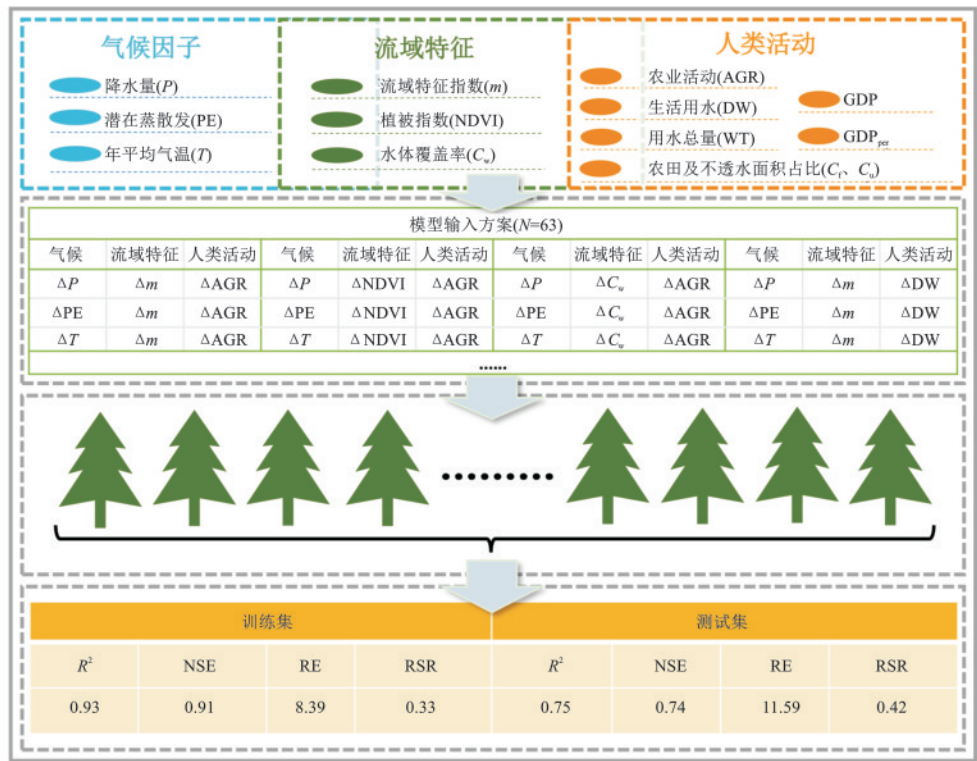
基于随机森林法构建的全国 214 个流域 TWSA 年际波动(Δ TWSA)的预测模型,其输入因子综合考虑气候、流域特征及人类活动等关键驱动因素(模型构建方法见 1.3.2)。为确保后续归因分析的准确性,VIF 测试结果显示所有因子间的 VIF 为 1.1~2.5,表明模型不存在严重的共线性干扰。由图 4 可知,全国尺度模型的训练集和测试集精度较高,其中训练集的 R^2 和 NSE 分别达到 0.93 和 0.91,相对误差(RE)为 8.39%,均方根误差与标准差比值(RSR)低至 0.33;测试集的 R^2 和 NSE 分别为 0.75 和 0.74,RE 为 11.59%,RSR 为 0.42。结果表明,所构建的模型具有较高的精度和可靠性,能够有效预测我国十大流域的陆地水储量年际变化,可用于后续水文敏感性分析及驱动因子相对贡献的定量评估。

表 3 基于偏相关分析的中国十大流域 TWSA 显著驱动因子

Table 3 Significant driving factors of terrestrial water storage anomaly (TWSA) in China's ten major river basins based on partial correlation analysis

一级流域	气候因子	流域特征	人类活动
松花江流域	P PE, T	m , LAI, NDVI, C_w	DW, GDP, GDP _{per} , C_f , C_u
辽河流域	P , PE	m , NDVI, C_w	IRR, C_f , C_u
海河流域	P , ET, PE, T	m , C_w	IND, AGR, DW, WT, IRR, GDP, C_u
黄河流域	P , ET, PE, T	m , LAI, NDVI, VFC, C_w	IND, AGR, DW, WT, GDP _{per} , C_f , C_u
淮河流域	P , PE, T	m , C_w	AGR, DW, WT, C_f , C_u
长江流域	P , ET, PE, T	m , LAI, NDVI, VFC, C_w , C_s	IND, AGR, DW, WT, GDP, GDP _{per} , C_f
东南诸河	P , PE, T	m , NDVI, C_w	IND, AGR, WT, C_u
珠江流域	P , PE, T	m , NDVI, C_w , C_s	AGR, WT, IRR, GDP, C_f , C_u
西南诸河	P , ET, PE, PET, T	m , NDVI, C_w , C_s	AGR, DW, WT, IRR, HD, GDP
西北诸河	P , ET, PE, T	m , LAI, NDVI	AGR, WT, IRR, HD, GDP _{per} , C_f , C_u

注:表中所列驱动因子均通过 $p < 0.05$ 的显著性检验。



注: R^2 为模型决定系数; NSE 为 Nash-Sutcliffe 效率系数; RE 为模型相对误差, %; RSR 为均方根误差与标准差比值。

图 4 模型精度检验结果

Fig.4 Model accuracy assessment results

2.3 驱动因子对陆地水储量变化的相对贡献及其空间格局

我国 TWSA 的驱动因子相对贡献率具有显著的空间变异性(图 5)。气候相对贡献率(Con_c)高值区主要分布在我国东南沿海、东北地区及青藏高原等地带。如东南诸河流域 Con_c 高达 64.82%, 约为全国 Con_c 均值的 1.5 倍; 而西北诸河流域和海河流域的 Con_c 分别较全国 Con_c 降低 17.4% 和 36.0%(图 5a 和表 4)。流域特征相对贡献率(Con_w)高值区主要集中在西南诸河流域(30.27%)与辽河流域

(19.28%), 分别为全国 Con_w 平均值的 2.6、1.7 倍; 而长江流域(5.59%)与东南诸河(1.88%)的低值特征暗示其流域下垫面特征对陆地水储量的影响较弱(图 5b 和表 4)。就人类活动相对贡献率(Con_h)而言, Con_h 较高的地区主要集中在西北诸河(58.46%)、海河(56.97%)和黄河(55.86%)流域等干旱-半干旱区及人口稠密的长江流域(中下游)(52.05%)和珠江流域(51.50%); 而辽河流域和西南诸河流域的人类活动对陆地水储量变化的相对贡献较低(图 5c 和表 4)。

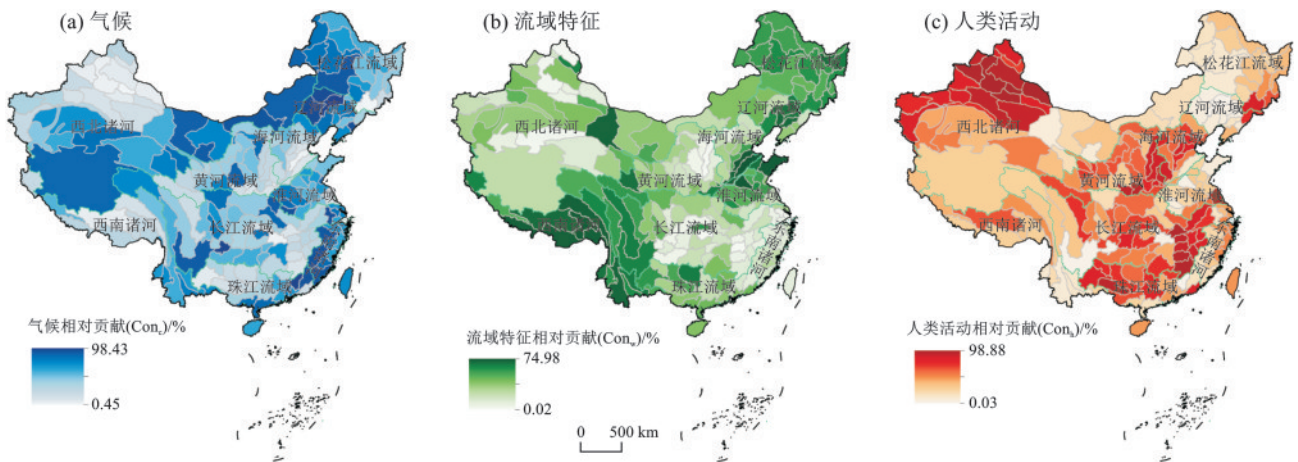


图 5 中国气候、流域特征及人类活动对 TWSA 相对贡献的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of relative contributions of climate, basin characteristics, and human activities to terrestrial water storage anomaly (TWSA) in China

表 4 中国及十大流域气候、流域特征及人类活动对 TWSA 的相对贡献

Table 4 Relative contributions of climate, basin characteristics, and human activities to terrestrial water storage anomaly (TWSA) across China and its ten major river basins %

研究区域	气候相对贡献(Con _c)		流域特征相对贡献(Con _w)		人类活动相对贡献(Con _h)	
	平均值	中位数	平均值	中位数	平均值	中位数
中国	42.06	44.03	11.46	6.00	46.48	45.01
松花江流域	48.33	50.22	19.55	18.21	32.12	31.45
辽河流域	64.33	61.62	19.28	17.36	16.39	9.01
海河流域	26.94	26.94	16.08	4.82	56.97	59.13
黄河流域	34.68	37.55	9.46	4.79	55.86	56.88
淮河流域	50.57	48.65	18.01	16.77	31.42	27.91
长江流域	42.37	41.80	5.59	2.28	52.05	52.16
东南诸河	64.82	62.56	1.88	1.63	33.31	36.17
珠江流域	41.04	32.27	7.46	6.29	51.50	56.43
西南诸河	37.22	46.52	30.27	28.39	32.51	28.76
西北诸河	34.73	28.80	6.80	4.79	58.46	66.80

2.4 陆地水储量变化驱动模式的空间分异规律

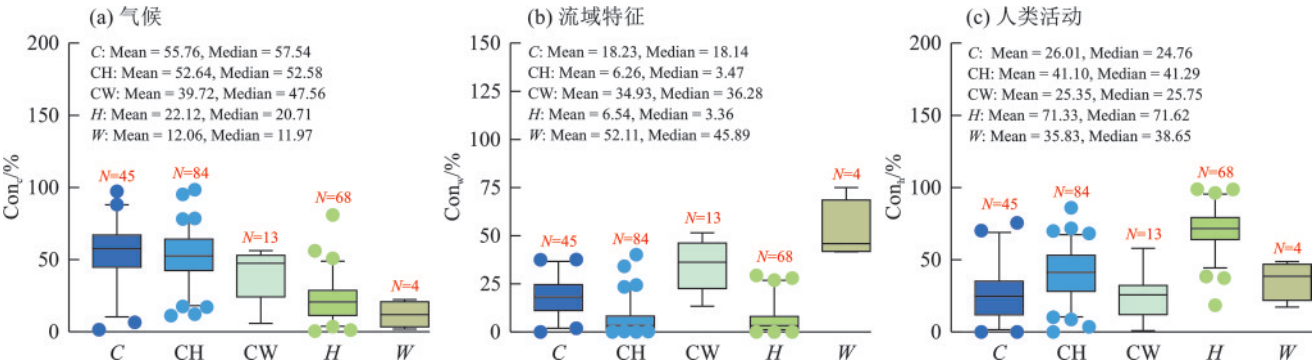
通过对我国 214 个流域 TWSA 各驱动因子的相对贡献聚类分析,可将流域划分为气候(C)、流域特征(W)、人类活动(H)单一主导模式和气候-人类活动(CH)、气候-流域特征(CW)协同驱动模式(图 6)。从空间分布看,我国东北的松花江流域、辽河流域及青藏高原 TWSA 为气候变异主导模式;而新疆北部的西北诸河流域、南方的珠江流域中上游、长江流域下游和海河流域大部分区域则为人类活动主导模式。淮河下游和西南诸河流域为气候-流域特征协同驱动模式;而长江流域中游、黄河流域中上游及西北诸河南部流域则为气候-人类活动协同驱动模式(图 6)。其中,C、CH、CW 流域的气候对 TWSA 的相对贡献率均值分别为 55.76%、52.64% 和 39.72%,W 和 CW 流域的流域特征对 TWSA 的相对贡献率分别为 52.11% 和 34.93%,H 和 CH 流域的人类活动对 TWSA 的相对贡献率分别为 71.33% 和 41.10%(图 7)。



注: C、W、H、CH、CW 分别为气候、流域特征、人类活动、气候和人类活动、气候和流域特征类型。

图 6 基于聚类的 TWSA 变化驱动模式空间格局

Fig.6 Spatial patterns of terrestrial water storage anomaly (TWSA) driving modes based on clustering analysis



注: 箱线图的箱体横线、边缘和须线分别代表样本的中位数、四分位数(25%~75%)及 5%~95% 百分位数; 散点代表全样本分布; N 为流域数量。

图 7 不同驱动模式下的气候、流域特征及人类活动对 TWSA 的相对贡献

Fig.7 Relative contributions of climate, basin characteristics, and human activities to terrestrial water storage anomaly (TWSA) under different driving modes

我国流域各驱动因子对 TWSA 的作用方向存在显著的空间变异性(图 8)。TWSA 盈余区域内($N=111$), 90% 的流域 TWSA($N=100$)受气候因子的正向驱动, 主要位于松花江、辽河及东南诸河流域, 仅少数区域($N=11$, 集中于华北平原与长江中下游过渡带)受气候负向影响; 流域特征在 63% 的盈余流域($N=70$)表现为正向作用(如松花江流域), 而长江中游及珠江流域部分区域($N=41$)则起负向作用; 人类活动在 60% 的盈余流域(如珠江流域和东南诸河流域)贡献为正, 其余地区的人类活动则导致 TWSA 降低(如松花江流域及柴达木盆地)。TWSA 亏损区域($N=103$), 87% 的流域(如黄河流域、西北诸河等)气候变异对 TWSA 产生负向影响, 仅 13 个流域(如西南诸河及海河流域)气候影响为正; 流域特征在 41% 的流域(如西南诸河和长江流域)发挥正向增益作用, 但西北地区及黄河流域(占亏损区 59%)起负向作用; 人类活动则主导 73% 亏损区的 TWSA 减少(集中在西北诸河及黄淮海地区), 仅部分西南诸河及辽河流域($N=28$)实现正向增益(图 8)。

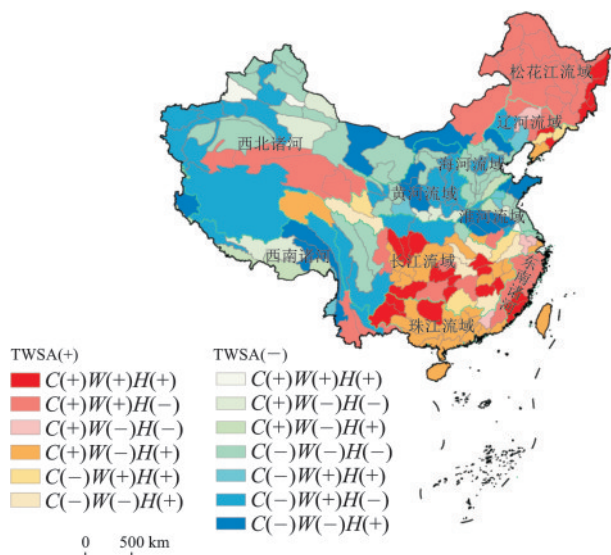


图 8 TWSA 驱动因子贡献方向的空间格局

Fig.8 Spatial patterns of contribution directions of terrestrial water storage anomaly (TWSA) driving factors

3 讨论

3.1 陆地水储量变化驱动模式的空间分异规律及成因

本研究系统地揭示了 2004—2014 年中国陆地水储量变化的驱动模式及其区域分异规律(图 5 和图 6)。我国流域陆地水储量变化驱动模式可分为气候主导、人类活动主导、流域特征主导、气候-人类活动协同和气候-流域特征协同 5 类。其中流域特征主导的流域极少, 本文重点讨论其余 4 类。

气候主导的流域(C 型, 气候贡献率为 55.76%)主要分布于东北松花江流域、辽河流域和青藏高原北部内陆河, 以及青藏高原东南部长江源区和上游部分流域(图 5)。东北属于典型的寒温带和中温带气候区, 水文过程主要受降水和温度控制; 季节性积雪和冻土的产生与消融形成独特的寒区水文过程, 延长水分滞留时间, 使得气候因子成为东北地区 TWSA 上升的主导因素(图 3、图 6 和表 4)。类似地, 青藏高原属于典型的高寒气候区, 其水文过程对气候变化异常敏感。在气候变暖背景下冰川退缩、冻土和永久性积雪消融及地表蒸散发过程加剧, 气候变化成为导致区域 TWSA 持续亏损的主控因素^[3]。

人类活动主导型流域(H 型, 人类活动贡献率为 71.33%)主要分布于新疆北部西北诸河流域、海河及长江下游和珠江中上游部分区域。西北诸河属于干旱缺水区域, 农业作为该区域主要的产业, 严重依赖地下水开采。因此, 高强度人类干预($Con_h > 55\%$)引发区域出现严重的水赤字(图 2)^[24], 成为 TWSA 下降的主导因素(图 3、图 6 和表 4)。海河流域和长江下游流域集中京津唐和长三角经济发达区, 区域工业化、城市化程度较高, 人类工业用水和生活用水逐年上升^[3], 水资源缺口巨大, 人类活动成为区域 TWSA 下降的主导因素^[25]。然而, 长江中下游和珠江部分流域人类活动对 TWSA 表现出正向作用(图 8), 反映多重过程叠加下的综合响应。一方面, 这些区域存在农田面积减少及农业用水下降的趋势^[26], 流域耗水压力减弱和人类活动扩张增速放缓促使 TWSA 向盈余方向发展; 另一方面, 水库等水利工程的建设增强了流域径流调蓄能力。上述过程的共同作用使得这些区域 TWSA 呈增加趋势。

淮河下游和西南诸河流域为气候-流域特征协同驱动模式(CW 型)。其中, 在淮河下游 TWSA 亏损区, 降水不足叠加不透水面积增加和植被覆盖度下降, 导致土壤入渗减少和植被水源涵养能力下降, 从而加剧 TWSA 亏损(图 2 和图 6)^[27]。西南诸河流域则表现出更为复杂的气候-流域特征耦合机制。该流域地处青藏高原南缘与横断山脉过渡带, 在气候变化下, 大部分流域季节性积雪和冰川融化的加剧, 导致区域 TWSA 持续下降^[3], 而气候变化促使植被尤其是高山草原草甸和灌丛生长耗水增加进一步降低 TWSA^[28]。然而, 流域东部是我国重要的林区, 森林植被生长恢复显著提升水源涵养能力, 对 TWSA 起到正向调节作用(图 2 和图 3)。此外, 流域特征在 TWSA 盈余区 63% 的流域表现为正向作用, 而在长江中游及珠江流域部分区域则起负向作用(图 8), 这与流域下垫面条件尤其是植被覆盖和土壤性质之间的复杂关系有关^[29]。一方面, 湿润区优越的水热条件下植被蒸腾

作用较强,尤其是生长季,将直接消耗土壤水分和浅层地下水导致TWSA亏损;另一方面,植被可通过改善入渗能力、增强土壤蓄水及调节径流过程,对水储量产生一定的正向调节作用。这种双重机制使得这些区域流域特征因子的作用方向在空间上更为复杂。

我国长江流域中游、黄河流域中上游和西北诸河南部地区属于气候-人类活动协同驱动模式(CH型)。一方面,我国长江流域中游和西北诸河流域南部受降水增加的影响;另一方面,人类活动(如工农业用水增加、水库蓄水及土地覆盖变化增加或减少径流)对流域TWSA产生正向或负向作用,TWSA总体呈显著上升($p < 0.05$)。黄河中上游流域不仅受气候变化的影响,导致TWSA下降,还受退耕还林还草等生态工程的影响,使土壤水分消耗增加,由1999年31.6%增至2013年59.6%^[30],工农业耗水增长^[7],大部分地区TWSA总体呈亏损态势。

3.2 全球变化下流域水资源分区治理策略

在全球水资源紧缺、气候变化和人类活动加剧的背景下,中国水资源安全保障压力尤为突出。现阶段我国水资源管理体系以水资源刚性约束制度为统领,依托多年平均水资源量、生态流量等指标,并结合工程调蓄能力与承载能力评价等技术支撑,服务于水量调度和总量控制。然而,这种以静态平衡为基础、具有单一化特征的管理体系^[31],对陆地水储量变化所反映的水文动态过程及其驱动机制的空间异质性关注不足,阻碍全球变化下水资源适应性分区精准管理。为此,本研究通过系统解析中国陆地水储量变化驱动模式的空间分异规律,提出“三级流域-主导类型区-治理策略”的水资源分区管理框架(图2、图5和图6),并构建分区施策、精准调控及协同治理的流域水资源管理新范式。

针对气候主导型区域,如青藏高原等生态屏障区,应重点保护冰川冻土、天然林与泥炭地等关键水储功能区,构建“天空地一体化”监测网络,强化“气候-生态-水文”多过程耦合研究;通过提升极端气候事件预警与灾害链追踪能力,增强水资源系统的韧性与气候适应性^[32]。针对人类活动主导型区域,应构建以“节水优先-生态保护-绿色发展”为核心的协同治理体系,落实“四水四定”管控模式^[33]。西北诸河北部农业区,应以水资源承载力为刚性约束,优化种植结构,推行节水优先模式;跨流域调水工程区应推行“水量-水质-生态”多目标协同调度模式,健全跨区域生态补偿体系;海河、珠江、长江流域等城市群应实行“开发强度-生态流量”双控管理,实现生态保护与水资源集约利用的协同发展。针对气候-流域特征协同驱动区域,应侧重水文过程完整性与生态系统韧性的

提升。以西南诸河高山和亚高山区域为典型,贯彻“近自然林”森林经营理念,通过定向培育低耗水、高保水功能的本土树种(如岷江柏、油松等)优化林分结构,增强植被与土壤调蓄功能。结合封山育林与定向补植等措施,促进形成生物多样性丰富且高韧性的森林生态系统^[34]。同步强化天然林与喀斯特关键带保护,遏制石漠化并提升岩溶含水层调蓄潜力,系统性提升流域水源涵养功能。针对气候-人类活动协同驱动区,如西北诸河南部、黄淮海及华北平原等生态脆弱区^[3],应构建“分区识别-协同调控-动态评估”的综合治理模式。西北干旱区重点建立“水-盐-生态”协同机制,通过节水灌溉和水盐平衡管理保障生态基流;黄河流域等干旱-半干旱区应遵循“宜林则林、宜灌则灌、宜草则草”的原则,利用近自然模式提升生态系统稳定性;华北平原等高强度开发区需推行“引水-调控-保育”策略,通过优化跨流域调水工程与严控地下水超采,缓解生态脆弱区水资源紧缺矛盾。

综上,未来我国应以流域为单元,将TWSA变化驱动模式的空间分异规律纳入国土空间规划与水资源配置,加强跨区域协同治理与动态监测评估机制,实现水资源可持续利用与生态系统良性循环。

3.3 研究的局限、不确定性和展望

本研究揭示了中国陆地水储量变化的驱动模式及其空间分异规律,但仍存在一定局限性和不确定性。研究时间尺度方面,本研究聚焦于2004—2014年观测序列,主要基于数据一致性与信号质量的综合考量。该时段处于第一代GRACE任务运行的核心期,观测噪声较低且数据连续性好;同时,多源指标在该阶段具有较好的尺度一致性,确保驱动因子与TWSA在时空尺度上匹配的可靠性。尽管该时段可能尚未完全涵盖诸如太平洋年代际振荡(PDO)等更长时间尺度的完整周期,但本研究更侧重于揭示该阶段陆地水储量对环境变化的响应机制与其敏感性的空间分异特征。鉴于流域水文调节机制与主导用水模式在一定时期内具有相对稳定性,本研究所识别的驱动响应关系在更长时间尺度上仍具有科学指导意义。归因机制与数据不确定性方面,本研究采用单因子分析框架虽能量化各类驱动因子对我国陆地水储量的独立影响,却难以全面刻画气候-流域特征-人类活动间的非线性耦合效应^[35]。不同数据与方法的不确定性可能影响研究结论的稳健性,包括GRACE数据空间滤波引起的信号泄露与平滑效应、统计指标在插值及尺度匹配过程中的误差传播,以及模型参数设定的敏感性等^[15]。因此,未来研究应结合GRACE-FO续接数据构建更长时序数据集,发展集成气候模式-人类活动-生态过程的多因子耦合分析框架。通

过延长研究时间尺度,以识别流域陆地水储量的非平稳性特征及其对多重驱动因子耦合作用的长期响应过程,全面地揭示陆地水储量变化机理,为区域水资源适应性管理提供更可靠的科学支撑。

4 结论

1) 陆地水储量变化的驱动因素贡献具有显著空间分异特征:气候相对贡献率高值区主要分布于东南沿海、东北及青藏高原等气候变化敏感区;流域特征贡献率高值区多在地形复杂的西南流域;人类活动贡献高值区则在干旱-半干旱区(如西北诸河、海河、黄河等)及人口稠密的长江下游流域。

2) 陆地水储量变化的驱动模式具有明确区域分异格局:松花江流域、辽河流域及青藏高原 TWSA 为气候变异主导模式;而新疆北部的西北诸河流域、华北的海河流域、南方的珠江流域中上游和长江流域下游则为人类活动主导模式;淮河下游和西南诸河流域为气候-流域特征协同驱动模式;而长江中游、黄河中上游及西北南部流域则为气候-人类活动协同驱动模式。

3) 基于陆地水储量变化驱动模式分异规律的水资源适应性管理分区策略:气候主导区应提升水资源系统气候韧性并强化冰川冻土等关键储水功能区保护,加强极端水文监测与弹性调度;人类活动主导区应以水资源刚性约束为统领,统筹推进水资源承载力评估,加强跨流域调水工程优化,系统提升区域水资源安全;双因素协同驱动区应推行生态修复与协同调控策略,遵循水资源承载能力实施差异化治理。未来我国水资源保护利用和生态修复应该基于流域陆地水储量变化驱动模式的空间分异规律分区施策,推动水资源管理从静态平衡向动态适应转变,为我国水资源可持续利用和生态文明建设提供科学路径。

参考文献:

- [1] Rodell M, Famiglietti J S, Wiese D N, et al. Emerging trends in global freshwater availability[J]. *Nature*, 2018, 557(7707):651-659.
- [2] Zhang Mingfang, Liu Ning, Harper R, et al. A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546:44-59.
- [3] Deng Shiyu, Zhang Mingfang, Hou Yiping, et al. Terrestrial water storage dynamics: Different roles of climate variability, vegetation change, and human activities across climate zones in China[J]. *Forests*, 2022, 13(10):e1541.
- [4] 孟莹,刘俊国,王子丰,等.气候变化和人类活动对中国陆地水储量变化的影响研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(4):47-57.
- Meng Ying, Liu Junguo, Wang Zifeng, et al. Climate

change and human impacts on terrestrial water storage anomalies in China[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2021, 42(4):47-57.

- [5] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the earth system[J]. *Science*, 2004, 305(5683):503-505.
- [6] 石振君,朱秀芳,唐谊娟.基于GRACE卫星数据的中国陆地水储量变化和影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(9):1397-1406.
- Shi Zhenjun, Zhu Xiufang, Tang Yijuan. Changes and influencing factors of terrestrial water storage in China based on GRACE satellite data[J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(9):1397-1406.
- [7] 张博,曹丹平,唐家奎.应用GRACE和气象数据监测黄河流域陆地水储量时空变化[J]. *遥感技术与应用*, 2024, 39(3):699-707.
- Zhang Bo, Cao Danping, Tang Jiakui. Application of GRACE and meteorological data to monitor terrestrial water storage in the Yellow River basin[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2024, 39(3):699-707.
- [8] 熊景华,郭生练,王俊,等.长江流域陆地水储量变化及归因研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(12):2241-2248.
- Xiong Jinghua, Guo Shenglian, Wang Jun, et al. Variation and attribution of terrestrial water storage in the Yangtze River basin[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(12):2241-2248.
- [9] 赵婷婷,章传银,王伟,等.基于GRACE/GRACE-FO反演华北平原2002—2021年水储量变化[J]. *测绘科学*, 2023, 48(8):18-26.
- Zhao Tingting, Zhang Chuanyin, Wang Wei, et al. Inversion of water reserves in North China Plain from 2002 to 2021 based on GRACE/GRACE-FO[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, 48(8):18-26.
- [10] 邓海军,何雯君,刘群,等.青藏高原陆地水储量对植被变化的响应特征分析[J]. *地理科学*, 2023, 43(6):952-960.
- Deng Haijun, He Wenjun, Liu Qun, et al. Response of terrestrial water storage to vegetation change on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(6):952-960.
- [11] Mo Xinyu, Wu Jianjun, Wang Qianfeng, et al. Variations in water storage in China over recent decades from GRACE observations and GLDAS[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16(2):469-482.
- [12] Zhang Yafeng, He Bin, Guo Lanlan, et al. The relative contributions of precipitation, evapotranspiration, and runoff to terrestrial water storage changes across 168 river basins[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579:e124194.
- [13] 张昌伟,常勇,罗跃.南方7省市陆地水储量动态变化主控因素研究[J]. *中国农村水利水电*, 2023(7):74-81.
- Zhang Changwei, Chang Yong, Luo Yue. Investigation

- of the main controlling factors of TWSA variation in seven provinces of South China [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(7): 74-81.
- [14] Feng Wei. GRAMAT: A comprehensive MATLAB toolbox for estimating global mass variations from GRACE satellite data [J]. *Earth Science Informatics*, 2019, 12(3): 389-404.
- [15] Swenson S, Chambers D, Wahr J. Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B8): e2007JB005338.
- [16] Wahr J, Molenaar M, Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103 (B12): 30205-30229.
- [17] Zhou Guoyi, Wei Xiaohua, Chen Xiuzhi, et al. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: e5918.
- [18] Kroll C N, Song P. Impact of multicollinearity on small sample hydrologic regression models: Impact of Multicollinearity on Hydrologic Regression Models [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(6): 3756-3769.
- [19] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [20] Li Ming, Zhang Yongqiang, Wallace J, et al. Estimating annual runoff in response to forest change: A statistical method based on random forest [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: e125168.
- [21] Zheng Hongxing, Zhang Lu, Zhu Ruirui, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River basin [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): e2007WR006665.
- [22] Yin Yunhe, Wu Shaohong, Chen Gang, et al. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 101(1): 19-28.
- [23] Ikotun A M, Ezugwu A E, Abualigah L, et al. K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data [J]. *Information Sciences*, 2023, 622: 178-210.
- [24] Zhang Qiang, Gu Xihui, Singh V P, et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River basin, China: Changes, causes and implications [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 139: 44-55.
- [25] 杨丹荔, 李益彬, 李雪梅, 等. 中国七大流域水资源供需平衡及其可持续性 [J]. *水土保持通报*, 2024, 44(6): 269-277.
- Yang Danli, Li Yibin, Li Xuemei, et al. Supply and demand balance of water resources and its sustainability in seven river basins of China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(6): 269-277.
- [26] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 [EB/OL]. [2026-03-28]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/>. Ministry of Water Resources of PRC. China water resources bulletin [EB/OL]. [2026-03-28]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/>.
- [27] 孙善磊, 王嘉志, 周舒佳, 等. 气候和流域特征变化对淮河流域地表水文过程的影响 [J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 3933-3946.
- Sun Shanlei, Wang Jiazhi, Zhou Shujia, et al. Impacts of climate and catchment property changes on land-surface hydrological processes in the Huai River basin, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 3933-3946.
- [28] 孙美荣, 孙鹏森. 西南高山亚高山区植被活动变化的气候驱动效应与可持续性 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 240-250.
- Sun Meirong, Sun Pengsen. Climate-driving effects and sustainability of vegetation activity change in alpine and subalpine areas of southwest China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3): 240-250.
- [29] Trautmann T, Koirala S, Carvalhais N, et al. The importance of vegetation in understanding terrestrial water storage variations [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26(4): 1089-1109.
- [30] 薛少博, 李鹏, 于坤霞, 等. 2002—2020年黄土高原土壤水变化及其相关性分析 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 221-226.
- Xue Shaobo, Li Peng, Yu Kunxia, et al. Soil water change and its correlation analysis in the Loess Plateau from 2002 to 2020 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5): 221-226.
- [31] 夏军, 石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望 [J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 292-301.
- Xia Jun, Shi Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 292-301.
- [32] Zhang Mingfang, Liu Shirong, Jones J, et al. Managing the forest-water nexus for climate change adaptation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2022, 525: e120545.
- [33] 王浩, 许新发, 成静清, 等. 水资源保护利用“四水四定”: 基本认知与关键技术体系 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 1-7.
- Wang Hao, Xu Xinfu, Cheng Jingqing, et al. "Basing four aspects on water resources" in water resources protection and utilization: Basic cognition and key technology system [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1): 1-7.
- [34] 刘兴良, 刘杉, 包维楷, 等. 西南地区森林生态安全屏障构建途径与对策 [J]. *陆地生态系统与保护学报*, 2022, 2(5): 84-94.
- Liu Xingliang, Liu Shan, Bao Weikai, et al. Constructing approaches and ecological countermeasures for ecological security barrier in southwest China [J]. *Terrestrial Ecosystem and Conservation*, 2022, 2(5): 84-94.
- [35] Ma Shuai, Zhou Sha, Yu Bofu, et al. Deforestation-induced runoff changes dominated by forest-climate feedbacks [J]. *Science Advances*, 2024, 10(33): e3964.