DOI:10.20176/j.cnki.nxdz.20251213

# 气候-植被-水文耦合机制研究的进展和展望

何盈盈， 鲍阳灿， 李柏延*

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院,陕西 西安 710119)

**摘 要:**气候、植被和水文之间存在着错综复杂的相互作用,深入理解3者的耦合机制,是陆地表层复杂系统变化过程与机理研究的重要关键科学问题之一。使用文献计量、知识图谱和综合归纳等研究方法,对筛选出的10 298篇相关文献(1990—2024年)进行系统梳理,总结国内外在气候变化对植被、水文过程的影响,气候、植被和水文3者耦合关系方面的主要研究成果及进展、关键科学问题及未来研究方向,旨在为深入研究气候-植被-水文相互作用机理及区域可持续发展提供参考。结果表明,植被对气候变化的响应依赖区域水热条件,具有空间异质性和时滞特征,且极端气候事件及其复合型事件加剧了响应的非线性影响,并改变了植被自身的生态功能。气候变化通过调控降水量和蒸发量,显著影响水文循环,进而增大极端径流、干旱和洪涝等事件的发生频率,其中,“旱涝急转”尤为典型。植被与水文之间存在显著的双向耦合关系,共同调控流域水平衡与生态系统生产力。未来研究应构建高精度气候-植被-水文综合耦合模型,提升对极端事件下系统响应规律与韧性特征的认识;并纳入人类活动因素,推动人地系统协同管理,从而实现生态保护与水资源可持续利用协调发展。

**关键词:**气候;植被;水文;耦合模型;生态水文;耦合机制;极端气候

**分类号:**(中图)P46;P33 **文献标志码:**A

气候-植被-水文的相互作用是陆地表层过程研究的关键议题之一[1-2]。气候变化通过改变降水量、蒸散量及温度等关键气象要素,直接影响大气的水热条件及能量分布,进而调控植被生态系统与水文过程的时空格局[3]。植被动态不仅响应气候变化,也通过调节地表反照率、蒸散发及粗糙度等相关的生物地球物理过程,反馈于近地表气候[4]。水文过程则进一步响应并整合气候与植被的共同影响,通过土壤水分再分配、径流形成与地下水补给等机制,制约植被分布与生态系统功能,并最终反馈至区域气候稳定性[5]。因此,研究气候-植被-水文耦合机制,不仅有助于从认知上揭示复杂地表系统的多过程相互作用机理,还可提升对未来生态系统与水循环演变的预测能力,并为流域综合管理、生态修复与气候适应性政策制定提供实践依据[6]。

人类社会在很大程度上依赖稳定的气候、水循环和生态系统功能,进而维持农业生产、淡水供给及生态安全[7]。然而,随着经济发展与全球人口增加,气候、水循环及生态系统功能均面临潜在威胁[8-9]。据统计,全球二十年间平均气温已上升约1.1 ℃,水资源压力在2015—2021年从18.6%升至20%,森林面积自2010年以来每年减少约470万$hm^2$(https://www.unesco.org)。同时,随着气候变化的持续加剧,植被覆盖、水文过程与气候系统之间的相互作用关系变得日益复杂,人类的生产生活方式也随之发生变化[10-11]。气候变化不仅通过降水、气温和风速等直接影响水文循环,还通过改变植被覆盖度和生态系统功能等,间接影响水资源的时空分布[12-13]。例如,气温上升和降水模式变化,导致植被生长周期变化,进而影响蒸散发、土壤湿度和径流过

**收稿日期:**2025-07-20

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(42371101,U24A20178);中国博士后科学基金第5批特别资助(站前)项目(2023TQ0207);陕西省青年科技新星项目(2024ZC-KJXX-013);秦创原引用高层次创新创业人才项目(QCYRCXM-2023-066);陕西省博士后科研资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK202304024,1110011297,1112010355);陕西省教师教育改革与教师发展研究项目(SJS2025GS008)。

**作者简介:**何盈盈(2000—),女,硕士,主要从事陆气耦合研究,(电子信箱)h18209573946@163.com。

* **通信联系人:**李柏延(1988—),男,副教授,博士,硕士研究生导师,主要从事资源环境遥感与土地利用变化模拟研究,(电子信箱)liboyan@whu.edu.cn。

**引用格式:**何盈盈,鲍阳灿,李柏延.气候-植被-水文耦合机制研究的进展和展望[J].宁夏大学学报(自然科学版中英文),2026,47(1):67-78.

程[14-15]。与此同时,植被的空间和时间分布不断变化,影响着流域内水分的存储与分配[16]。因此,了解气候对植被与水文系统的影响与反馈机制,对于制定可持续发展政策至关重要。

气候-植被-水文的相互作用是一个复杂的多界面过程。以往研究大多侧重于气候-植被-水文系统内部的两两相互作用,而对气候-植被-水文耦合研究关注较少。这种割裂的研究方法,限制了对地球系统整体响应机制的深入理解。例如,有研究深入分析了全球植被对气候变化的响应规律;揭示了该领域的发展演变过程,当前热点及研究特点、模式与趋势[17-18]。一些研究则回顾了半干旱地区植被类型,在不同环境下对径流和沉积物产量的影响[19]。此外,也有研究阐述了气候变化下,地下水研究的现状和未来[20],或全面回顾气候变化与水质领域的研究进展,指出水体富营养化与气候变化关联紧密,这也是当前的研究热点[21]。尽管这些研究在各自领域取得了重要进展,但未能构建一个将气候、植被和水文视为动态耦合系统进行深入分析的框架。这些研究中的不足,凸显了未来需要加强气候、植被和水文3者之间相互作用的综合性研究,进而更全面地理解气候变化下,植被与水文相互作用的综合效应及影响。

因此,文中在总结已有研究基础上,首先,使用文献计量方法,总结气候-植被-水文相关研究在1990—2024年的发文量与发文期刊,明晰该领域的研究现状与发展趋势;接着,从气候变化对植被的影响、气候变化对水文过程的影响、植被与水文过程的相互作用3方面,探讨气候-植被-水文耦合研究的进展;最后,总结该研究领域的4个关键科学问题,并提出未来可能的研究方向。

## 1 气候-植被-水文耦合研究的文献计量分析

### 1.1 文献产出与学术影响

文献计量方法被认为是快速获取和研究出版信息的有效方法[22-24]。文中采用该方法,以Web of Science核心集数据库为基础,构建系统的知识图谱,全面梳理1990—2024年气候-植被-水文的相关研究。主要步骤包括:从相关数据库中收集数据,对数据进行清洗和精炼,使用各种文献计量方法处理数据,生成有意义的信息。其中,文献搜索方法按照标题进行索引,与其他搜索方法相比,该方法搜索结果的准确性、敏感性和特异性优势突出[25]。参考植被-水文-气候研究的相关文章,确定该领域最常用的关键词。按照搜索公式TS=((vegetation OR "vegetation cover" OR NPP OR ecosystem OR NDVI) AND ("climate change" OR precipitation OR rainfall OR temperature OR drought OR evapotranspiration) AND (hydrology OR runoff OR streamflow OR discharge OR "soil moisture") AND (coupling OR response OR feedback OR adaptation OR interaction)),再加入研究类型、研究方向和研究时间的限制,最终筛选出10 298篇符合要求的文献(图1)。

1990—2024年,气候-植被-水文研究经历了起步、增长及快速发展3个阶段[26-31],年发文量与学术影响力呈现明显的阶段性演变特征。起步阶段(1990—2005年)发文量较少,总发文量仅1 039篇,占发文总量的10%。2006—2015年发文量进入增长阶段,升至2 838篇,占发文总量的27%。2016年以来,该领域研究进入快速发展阶段,累计发文量达6 421篇,占发文总量的60%以上,尤其是2020年以后,年均发文量稳居800篇以上,并在2024年达到992篇,创历史新高。对核心期刊进行计量分析,发现*Journal of Hydrology*长期保持最高发文量,体现了其在水文及相关交叉研究领域中的核心地位;*Science of the Total Environment*发文量自2015年后增长显著,说明跨学科、综合环境问题的研究逐渐受到重视;*Water Resources Research*、*Hydrological Processes*也保持着较高的发文量。由科研机构合作网络图可知(图2(c)),中国科学院在发文量和学术影响力上居于核心地位,与国内外众多高校和研究机构保持紧密合作,已形成了广泛的科研协作网络。在美国,以亚利桑那州立大学、科罗拉多州立大学等为代表的高校,在水文与生态气候领域已形成稳定的合作群体;欧洲科研机构则以荷兰瓦赫宁根大学、德国亥姆霍兹联合会等为代表,在生态与气候耦合研究方面贡献突出。整体上,国际合作网络呈现多中心格局,其中,中国和美国在研究产出与学术影响力方面占据核心地位。

### 1.2 研究主题演变

根据索引文献的关键词以及拓展关键词,通过bibliometrix工具提取并进行共现分析,进而构建主题演变网络,以反映研究主题在不同阶段的发展脉络与延续强度。1990—2024年,气候-植被-水文耦合机制研究的主题,呈现出明显的阶段性演化特征,反映了研究重心从基础过程的认知,逐步过渡到多要素耦合与系统响应机制的深度探索。在早期(1990—2005年),主题较为分散,研究内容多以

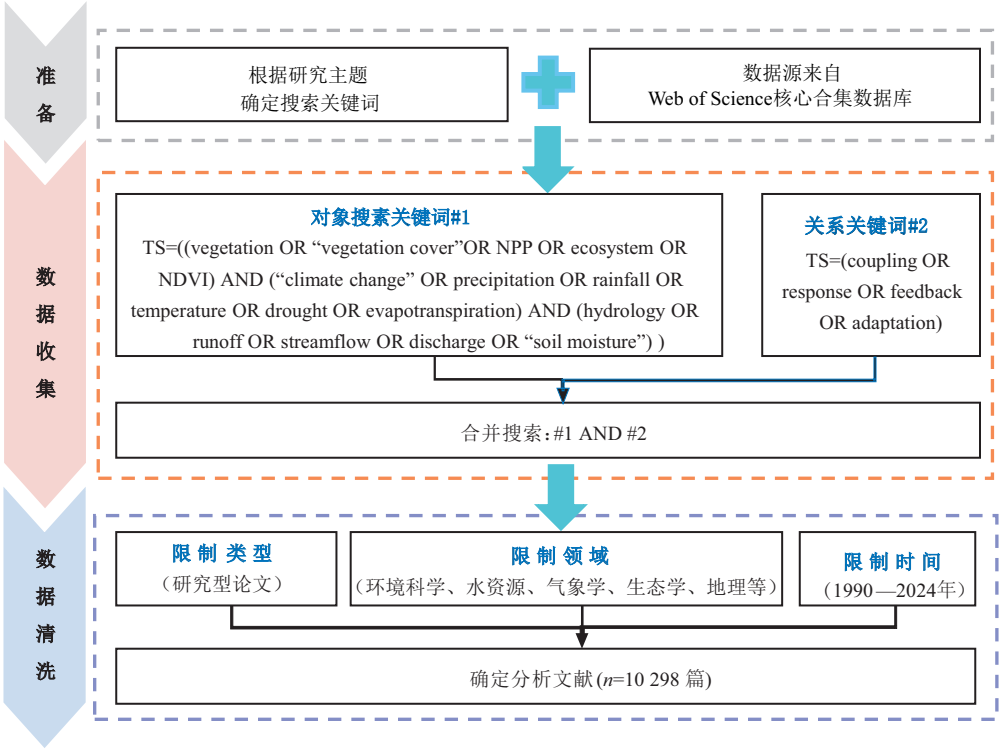
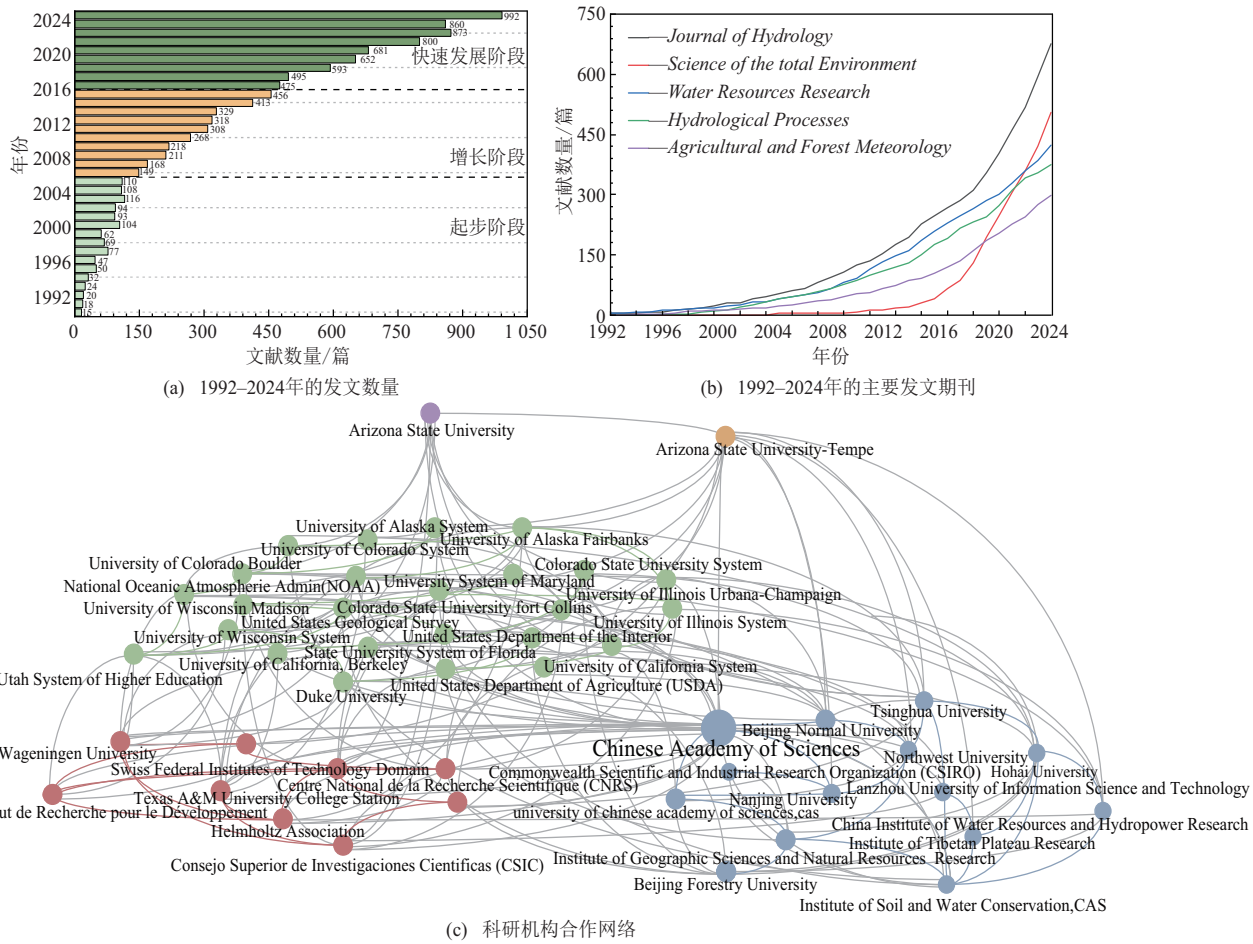



**图 1　数据处理技术流程**

**Fig. 1　Technical workflow of data processing**




(a)　1992–2024年的发文数量　　(b)　1992–2024年的主要发文期刊

(c)　科研机构合作网络

**图 2　发文数量、主要发文期刊及科研机构**

**Fig. 2　Publication output, key publishing journals and research institutions**

气候因子与水文过程的单变量关系为主,侧重气候变化与径流、温度等水文变量的基础性研究。中期(2006—2015年),研究主题逐渐集中,“气候变化”与“植被”成为核心关键词,同时出现新的关键词“水文过程”。这些变化标志着研究内容开始由单一变量拓展至多过程交互,尤其关注气候变化与植被覆盖度在水文循环中的耦合作用。近期(2016—2025年),研究内容进一步向系统层面推进,关键词“响应”的出现,突出了全球变化背景下对生态系统和水文过程适应性与反馈机制的探讨。与此同时,“径流”再度成为研究的显著主题,显示水文过程在气候-植被-水文耦合研究中的地位进一步提升,而气候变化方面的研究依旧保持主导地位,成为跨越各阶段的核心主线。

从主题词演变的联系强度看,“气候变化”在各阶段间保持最强的继承性,表现出高度连续性与核心地位;“植被”与“径流”之间的联系,在后期逐渐增强,体现出植被动态与水文循环之间的相互作用日益受到关注。相较之下,部分主题之间的联系较弱,仅在特定时期表现突出,说明这些主题的研究延续性有限。总体而言,主题词的演变路径揭示了,气候-植被-水文领域的研究,从早期的单一过程探索,逐步过渡到中期的相互作用分析,并最终聚焦于全球变化背景下复杂系统的综合响应与适应机制(图3)。

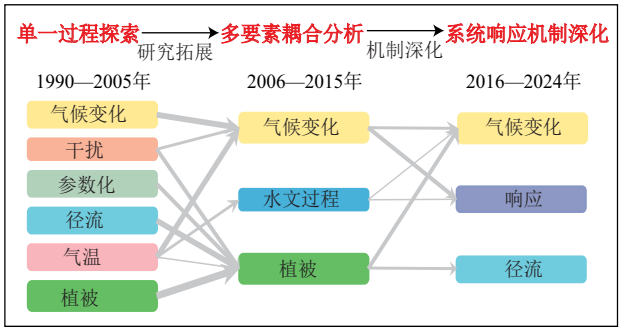



**图3 主题词的演变过程**
**Fig. 3 Evolution of keywords**

## 2 气候-植被-水文耦合研究进展

### 2.1 气候变化对植被的影响

植被活动对气候变化的响应过程,在很大程度上取决于特定区域的水热背景条件。适度的增温已被证实能够对植被活动产生积极作用。例如,2002年以后,中亚地区春季明显变暖,促进了该地的植被生长[32];在夜间0.9 ℃中等增温且土壤水分充足的情况下,地中海灌木植物的光合速率显著提高,生态系统净碳交换量在午间增加47%[33];在较湿润的高海拔(4 000 m)地区,增温显著提高了生态系统碳通量,使总初级生产力的增加量(2.30 mg/($m^2$·s))高于生态系统呼吸量(0.62 mg/($m^2$·s)),进而增加了净生态系统碳交换量[34]。

水分是植被光合作用和蒸腾作用等生理生化过程中的关键参与者,其改变能否引起植被活动变化,核心在于是否影响土壤中的含水量和植被的可利用水量。以黄土高原为例,降水量是决定天然植被类型分布和森林覆盖率的关键自然因素,其存在两个重要的临界点:250 mm的年降水量是荒漠与草原植被之间的分界线,而480 mm的年降水量则标志着从草原(森林草原)到森林(落叶阔叶林)的转变[35]。进一步的研究结果显示,内蒙古锡林郭勒盟草原生长季归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI),对降水的响应存在明显的滞后效应,滞后时间通常为50~60 d。尽管不同草原类型的滞后时间略有差异,但总体一致,尤其在6月和7月,草原植被对降水变化的响应最为敏感[36]。

然而,气候要素对植被活动过程的影响并非均一,而是体现出明显的空间异质性。例如,分析基于太阳诱导叶绿素荧光反演的春季物候参数和ERA5-Land数据集的多维气候因子,发现温度、降水和太阳辐射是影响植被生长季开始的主要因素,并且它们对植被变化的贡献表现出显著的纬度分异特征[37]。基于方差分析方法,进一步量化气候要素对植被变化贡献的三维(经度、纬度、海拔)分异特征,结果显示:降水量和潜在蒸发量在高海拔和高纬度地区对植被变化起主导作用,温度则主要影响低纬度和部分低海拔地区的植被,而相对湿度在中纬度和中海拔地区发挥关键作用。同时,水热条件和气候变化,对这种三维分异特征具有重要的调节作用,但不可量化的干扰因素(如灾害、人类活动和植被反馈)也会增加该特征的不确定性[38]。

近年来,极端天气事件频发,如热浪、干旱、洪涝、暴雪和风暴等,已成为气候变化的重要表现形式[39]。极端天气事件对植被的影响是多方面、多层次的,使植被发生从个体生理到生态系统结构和功能的深刻改变。干旱是影响最广泛、最持久的极端天气之一,在全球变暖背景下,中国干旱事件愈加频繁。研究结果显示,在全国尺度上,大部分区域的干旱强度与植被退化程度呈正相关,且这种影响具有累积效应,在干旱区和半干旱区尤为显著[40]。而云南在遭受大范围干旱的年份,该区域平均植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)显著

降低，表现为年均 NPP 与干旱覆盖面积比例呈负相关[41]。热浪通常与干旱伴生，两者影响是叠加和加剧的，这种影响导致北欧地区植被生产力普遍下降[42]，并直接或间接影响生态系统呼吸和 $CO_2$ 通量[43]。与干旱相反，过多的水也可能带来负面影响。研究结果显示，日益增多的极端降水事件，对亚热带植被碳循环产生巨大影响，尽管植被 NPP 与极端降水量指数、持续湿润期多呈正相关，但与持续干旱期呈负相关[44]。值得注意的是，极端降水并非总是负面影响。研究结果显示，黄土高原近 20 a 来极端降水与植被覆盖度（fractional vegetation cover，FVC）同步增加，对植被生态改善具有正向作用，但这种影响在短时间尺度上可能减弱[45]。这一现象说明，植被对极端降水的响应并非单一线性过程，而是受到区域条件、时间尺度及生态系统特性的共同影响；同时，也反映出植被生态系统在气候扰动下的复杂性与非线性特征。更需警惕的是，复合极端事件，即多种驱动因子或致灾因子的组合，对社会和生态系统的影响往往比单一事件更严重、更具破坏性[46]。例如，相较于单一干旱或高温事件，复合干热事件，显著加剧了植被对环境变化的脆弱性，导致黄土高原 6—8 月份植被损失率较高，尤其是在陕西北部、宁夏、甘肃东部和内蒙古等地区[47]。

### 2.2　气候变化对水文过程的影响

大气中温室气体浓度增加，改变了大气的辐射平衡，增加了地球表面和低层大气的热量吸收与再辐射[48]，而持续变暖不仅影响大气系统内的动力学和热力学过程，还影响海洋的环流模式[49]。大气和海洋变化共同影响降水，且降水是全球水循环和极端事件的主要驱动因素，其变化直接影响地表径流、地下水补给、蒸散发等关键水文过程[50]。例如，降水总量决定了流域水资源的供给能力，而其时空分布特征则调控洪水和干旱的发生频率与强度。蒸发量是地表水循环中仅次于降水的第二大通量，其变化是水文循环中连接大气与陆地系统的重要过程，不仅决定了降水后水分的归宿比例，还直接影响土壤湿度、地下水补给和地表径流[51-52]。而受降水和蒸发共同影响的河流径流，在气候变化下表现出复杂性[53]。近期的研究结果显示，尽管气候变化对区域径流变化影响显著，但由于不同区域气候变化的正负贡献相互抵消，气候变化在全球径流增加中的贡献率相对较小（19%～27%）[54]。然而，与总径流量相比，极端径流事件在过去几十年呈现出较显著的非平稳性动态变化，尤其在受到人类活动干预的流域中，该特征表现突出[55]。

极端气候事件的发生频率和强度，随着气候变化的加剧而显著增加。极端气候事件对水文过程的影响，已成为生态水文学研究的一个重要领域。极端水文事件研究主要涵盖极端降水、极端洪涝和极端干旱等不同类型[56-58]，其中，极端降水是引发洪涝与干旱事件的重要原因，而洪涝与干旱则是受下垫面与人类活动影响的综合性极端水文事件。极端降水对水文过程的影响尤为突出，强降水可迅速超出土壤的渗透能力，形成大量地表径流，进而增加洪水风险；同时，引发土壤侵蚀、水体污染等次生灾害[56]。研究结果显示，随着气温升高，极端降水可能诱发更剧烈的洪水和区域干旱，影响流域内的水量变化。例如，在高纬度地区，降水量增加、雪融水提前补给，使春季径流量峰值提前出现，夏季可能出现更为严重的水位下降现象[59-60]。极端气候事件，使传统的水文模型难以预测水资源的变化，且不同地区水资源对极端气候的响应机制差异较大。因此，对区域性的水文响应进行精细化建模和研究，成为当前的研究热点之一[61]。同时，目前有关气候变化对极端水文事件的影响研究，大多是对极端水文事件发生频率和强度及其时空变化的统计分析，还停留在定性研究的层面上[62]，需进一步加强定量化研究。

此外，在气候变化背景下，预计全球范围内干旱和洪水的发生频次将同时增多[63-64]。尽管直接证据有限，但这种模式可能与极端干湿条件间的快速转换有关，这一现象被称为旱涝急转（图 4）。例如，2019 年夏季 6 月至 7 月中旬，中国南方出现强降水，引发灾难性洪水，至少有 8 个省份遭受洪水、冰雹、滑坡及泥石流等次生灾害。随后，由于大气环流异常逆转，多地出现异常高温和降雨稀少天气，以及直至 8 月底的持续干旱，导致农业减产、生态退化及水资源紧缺，对区域社会经济和生态系统造成不利影响[65]。研究结果显示，过去几十年，在世界各地多个区域均检测到旱涝急转的发生频率显著增加，且这一现象主要发生在夏季，源于大气水汽失衡、大规模环流模式及区域环境因素的突然变化[66-67]。目前，旱涝急转研究主要聚焦 4 个方面：（1）事件识别与指标方法创新[68]。从传统的阈值和速率法，发展到融合多源气象、水文及遥感数据的综合指数与机器学习算法。（2）驱动机制机理分析[69]。主要聚焦大气环流的异常配置如何协同陆面过程的非线性反馈，进而引发或加剧这种剧烈的水文气候转换；（3）生态-农业影响研究[68]。量化旱涝急转对作物产量和植被生理生态功能的影响；（4）全球与区域变化趋势[70]。通过长序列观测数据和先进的气

候模型,对旱涝急转事件的历史演变趋势和未来情景进行预测,并结合自然变率与人类活动进行归因分析,以揭示其在全球和区域尺度的规律性变化。未来,应考虑短时程与季内尺度分析、多因子联动机制建模与预警预测能力提升等,从而应对气候剧烈变化带来的水文风险与社会挑战[71]。

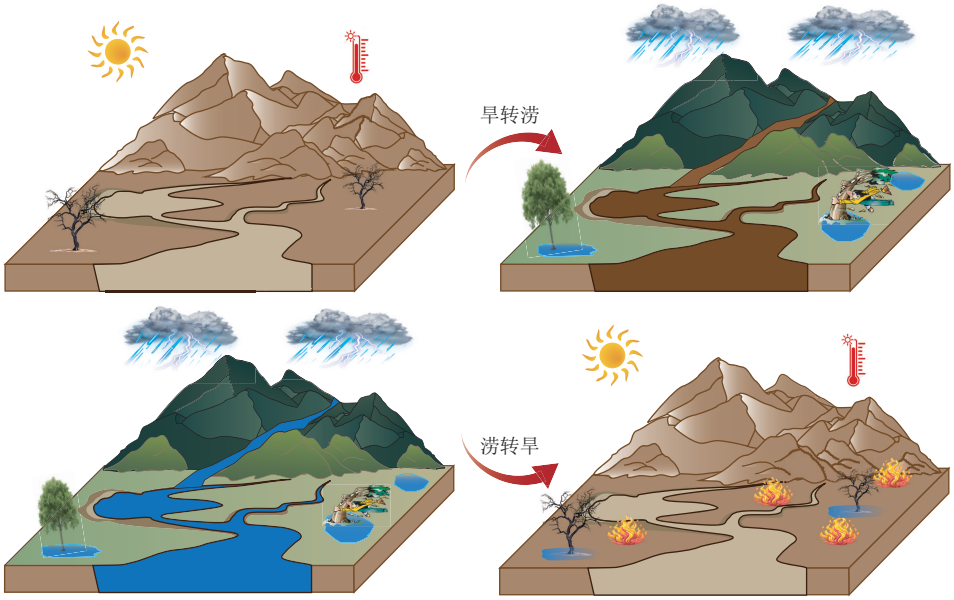



**图 4 旱涝急转示意图**

**Fig. 4 Schematic diagram of drought and flood transition**

### 2.3 植被与水文过程的相互作用

植被是流域水循环过程的重要环境因子之一,可改变降水的再分配和能量平衡,深刻影响流域水循环过程。首先,植被的冠层能够截留一部分降水,这部分降水或直接蒸发返回大气,或沿枝干汇集,使直接到达地表的水量减少,同时调节了降水入渗与地表径流的过程[72]。其次,茂密的植被和发达的根系,能够显著增加土壤的入渗能力,将更多的地表水转化为宝贵的土壤水和地下水,有效削减洪水洪峰,并发挥涵养水源的作用。根系对土壤渗透性的影响,与土壤孔隙大小和连通性有关[73],粗根系使土壤孔隙度增大30%,进而调控土壤中水力传导度和水流路径,显著影响流域水文过程[74]。杨大文等[75]认为,森林能够增加降雨入渗量,主要有两方面原因:一是植被增加了土壤的入渗能力;二是植被改变了地表特性(如地表糙率或地表贮水能力),增大了水分入渗到土壤中的机率。最后,植被通过蒸散发将土壤中的水分输送回大气,这是陆地生态系统水分输出的主要方式,其强度直接影响区域水平衡和气候状况。例如,黄淮海流域植被覆盖条件改善,对径流有削弱作用,使流域的NDVI平均增加10%、径流量平均减少8.3%[76]。此外,植被还通过改善土壤结构和增加降水截留,调节径流稳定性[77]。

另一方面,水文过程对植被的生存和活动同样具有决定性作用。充足的降水、适宜的土壤含水量和地下水位,是植被生长、发育和分布的基础,直接影响光合作用和物候周期。例如,以农牧交错区的准格尔旗地区为例,谷子、糜黍、玉米、薯类、大豆和油料等农作物的产量,与全年、生长季的降水量均呈不同程度正相关[78]。宋午椰等[79]基于地理探测器,对植被NPP进行驱动因子和机制分析,结果显示,年降水量与干燥度指数是影响黄土高原地区植被NPP的主导自然因素。干旱或涝渍等水分胁迫会严重抑制植被生长,甚至导致植被死亡[80]。长期的水文条件更是决定区域植被类型(如森林、草原、荒漠)及其空间格局的关键因素,并直接影响植被的净初级生产力[81]。

植被与水文过程之间的相互作用并非静态,而是一个动态反馈循环:植被变化影响局地水文特性,而水文变化反过来又塑造植被群落的动态演替。黄土高原大规模人工植被建设的案例显示,忽视区域水热本底特征,会打破土壤水分与植被之间的平衡,导致人工林死亡和生态系统不可持续[82]。然而,在相同自然环境下,天然植被因与环境因子建立了长期适应关系而正常生长和演替,体现出其空间自组织能力和对特定土壤水分状况的适应性[83]。在半干旱地区,裸地土壤易结皮,导致土壤的入渗性降低,易形成地表径流,而植被覆盖下土壤的渗透性增加,使其成为降水吸收区。这种裸地

与植被覆盖的镶嵌格局，有助于降低河流的挟沙能力[84]。此外，人类活动对草地水文-植被平衡亦有显著影响，例如，轻度放牧，因水分条件改善，促使草地草甸化；而重度放牧，则因土壤持水能力下降，草地趋于荒漠化[85]。因此，分析植被与水文过程之间复杂的相互作用，对于流域水资源管理、生态恢复工程评估以及应对气候变化挑战，具有重要意义。

## 3　气候-植被-水文耦合研究的关键科学问题

气候、植被和水文之间存在复杂的相互作用（图 5），而在全球气候变化背景下，水资源短缺、极端水文事件频发及生态系统退化，已成为全球面临的严峻挑战[86]。面向这些挑战和实践需求，亟需围绕以下关键科学问题开展深入研究。

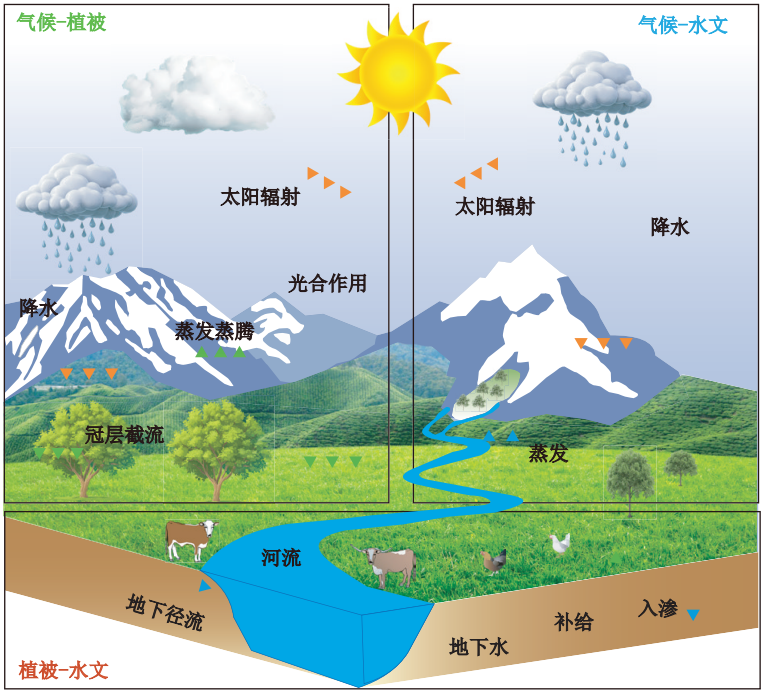



图 5　气候-植被-水文相互作用示意图

Fig. 5 Schematic diagram of climate-vegetation-hydrology interactions

### 3.1　气候-植被-水文多尺度耦合机制的量化与模拟

气候、植被和水文过程在不同空间（从微观尺度到宏观尺度，如从土壤孔隙水尺度延伸至流域、区域乃至全球尺度）和时间尺度（从小时到年际、年代际乃至百年尺度）上，存在复杂的相互作用。例如，植被的蒸腾过程，可能在小时尺度上响应太阳辐射和气温变化，而其影响则会在季节或年际尺度上积累，并反馈至土壤湿度、径流及区域气候系统。如何在多尺度下，有效量化气候、植被、水文之间的耦合机制，并将其整合到统一的模型框架，是当前该领域面临的重大挑战[87]。尤其在跨尺度分析中，如何准确揭示不同尺度下耦合机制的异同及其相互作用规律，仍是亟待突破的核心科学问题[88]。

### 3.2　极端气候事件下植被与水文的响应及反馈

随着全球持续变暖，极端干旱和洪涝事件的频率和强度均不断增加。极端事件如何影响植被的生理生态过程和水文循环，植被和水文过程如何反过来调节极端事件的发生和影响，均是迫切需要解决的问题[89]。更为复杂的是，极端气候事件与植被-水文过程之间的反馈机制，可能形成正反馈回路：干旱导致植被覆盖度降低，增加了地表裸露度，也增加了后续洪水发生的可能性；频繁洪涝可能破坏土壤-植被系统的调蓄功能，使区域生态系统逐步丧失对极端气候的缓冲能力[90]。因此，揭示气候-植被-水文系统在极端事件下的耦合机制与临界阈值尤为重要，这要求未来开发更精准的极端事件预警系统和风险评估模型。

### 3.3　人类活动对气候-植被-水文耦合系统的影响与调控

人类活动对气候-植被-水文耦合系统的影响日益显著。土地利用变化，不仅直接改变地表覆盖特征，还通过影响蒸散发、地下水补给等关键水文过程，改变区域水文循环和碳水交换[91]。例如，森林砍伐，会降低大气的水汽输送能力，降低蒸发和降水的稳定性，进而加剧局地干旱程度和水资源匮乏状况；而农业灌溉和水库建设，则通过调节水流

和水位,对水文过程产生复杂的影响[92]。如何将这些复杂的人类活动纳入气候-植被-水文耦合模型,提高模型的预测能力,进而准确评估人类活动对气候-植被-水文耦合系统的长短期影响;基于合理的水资源管理和生态恢复措施,提出适应与缓解策略,已成为当前研究热点。

### 3.4 旱涝急转事件中气候-植被-水文非线性反馈机制的量化与预测

旱涝急转的发生,并非简单的干旱与洪涝叠加,而是涉及一系列快速、剧烈且难以预测的非线性过程[93]。在骤发性干旱期间,植被迅速受到胁迫,导致植被的生理功能受损,甚至出现枯萎和死亡;植被的快速变化,显著影响地表蒸散发、土壤保水能力,进而反过来改变局部水文循环和能量平衡。随着强降水来临,受损的植被和干旱的土壤无法有效截留或吸收水分,导致迅速形成地表径流,加剧了洪涝灾害[94]。因此,如何量化这些快速变化、植被影响的非线性反馈机制,并将它们准确地融入现有的气候和水文模型,是该领域研究的关键。

## 4 展望

气候-植被-水文相互作用与耦合过程,不仅是解释陆地表层复杂系统的重要关键科学问题之一,还是一个极具复杂性的多学科交叉问题,需要采用先进的科学仪器和技术方法,加强气候学、水文学及生态学等多学科的交叉与融合研究。融合气候-植被-水文耦合模型、极端事件影响以及人类活动3个方面,总结未来的研究趋势和热点。

### 4.1 气候-植被-水文耦合模型集成

当前的气候、陆面过程和水文模型,在模拟气候、植被和水文单一组分或有限耦合方面,已取得显著进展。然而,现有模型往往将不同圈层间的复杂反馈机制简化处理,尤其是在植被对气候和水文的即时动态反馈、水文对植被的生长限制等方面,其表达仍显不足。未来应结合气候变化、植被变化和水文过程的多重影响,构建具有高时空分辨率的综合集成模型。同时,利用人工智能和机器学习等先进技术,从海量观测数据中分析和识别传统模型难以捕捉到的非线性关系和复杂系统行为,从而优化模型参数,提高多尺度、多圈层耦合过程的模拟精度和预测能力。

### 4.2 极端气候事件下耦合过程的动态响应与韧性评估

随着全球气候变暖,极端干旱、热浪及降雨等事件的发生频率和强度日益增加。这些极端事件对气候-植被-水文耦合系统构成严峻考验,其影响机制往往呈现快速、剧烈且非线性的特征。未来研究将聚焦3方面:(1)量化植被在极端气候胁迫下的生理生态响应机制,以及这些变化如何反作用于局地水文和气候;(2)深入理解极端事件(如旱涝急转)链中不同要素间的快速转换和级联效应,尤其是植被状况如何影响后续的洪水风险;(3)评估不同生态系统类型在极端气候事件下的耦合韧性与适应潜力,为预测极端事件对水资源和生态系统的影响,提供更可靠的科学依据,并指导适应性管理策略的制定。

### 4.3 人地耦合系统中的协同管理与可持续性研究

气候-植被-水文耦合系统,不仅受到自然过程驱动,更受到人类活动影响。未来应将人类社会经济系统作为耦合系统中的关键组成部分,并开展集成研究:(1)量化不同人类活动情景(如退耕还林、城市扩张、水库建设),对气候-植被-水文相互作用的直接和间接影响,特别是在区域水资源平衡和生态系统服务方面的长期效应;(2)构建人地耦合模型框架,评估在气候变化和人类活动双重压力下,流域或区域尺度的水资源可持续性和植被生长面临的挑战;(3)基于对耦合机制的深入理解,探索和设计气候变化、水资源和植被协同管理策略,从而实现经济发展、生态保护和水资源可持续利用的多赢目标。

## 参考文献:

[1] PIAO Shilong, LIU Qiang, CHEN Anping, et al. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges[J]. Global Change Biology, 2019, 25(6): 1922-1940.

[2] EBI K L. Key themes in the Working Group II contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change 5th assessment report[J]. Climatic Change, 2012, 114: 417-426.

[3] TIETJEN B, JELTSCH F, ZEHE E, et al. Effects of climate change on the coupled dynamics of water and vegetation in drylands[J]. Ecohydrology, 2010, 3(2): 226-237.

[4] SOHNGEN B. Climate change and forests[J]. Annual Review of Resource Economics, 2020, 12: 23-43.

[5] YU Miao, WANG Guiling, PAL J S. Effects of vegetation feedback on future climate change over West Africa[J]. Climate Dynamics, 2016, 46: 3669-3688.

[6] GAN Guojing, LIU Yuanbo, SUN Ge. Understanding interactions among climate, water, and vegetation with the Budyko framework[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 212: 103451. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.

103451.

[7] LI Zhongkai, LI Xiaoyan, ZHOU Sha, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65: 2083-2114.

[8] 刘羽, 王军, 李慧, 等. 环境地球科学学科发展与展望[J]. 科学通报, 2021, 66 (2): 201-209.

[9] ZHOU Guangsheng, ZHOU Li. Ecological meteorology: Origin, concept, and prospects[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(2): 210-218.

[10] OUGAHI J H, CUTLER M E J, COOK S J. Assessment of climate change effects on vegetation and river hydrology in a semi-arid river basin [J]. PLOS One, 2022, 17(8): e0271991. DOI: 10.1371/journal.pone.0271991.

[11] MONTANARI A, YOUNG G, SAVENIJE H H G, et al. "Panta Rhei-everything flows": Change in hydrology and society-the IAHS scientific decade 2013-2022[J]. Hydrological Sciences Journal, 2013,58 (6):1256-1275.

[12] SMITH P, HOUSE J I, BUSTAMANTE M, et al. Global change pressures on soils from land use and management [J]. Global Change Biology, 2016, 22 (3): 1008-1028.

[13] WU Donghai, ZHAO Xiang, LIANG Shunlin, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change [J]. Global Change Biology, 2015, 21 (9): 3520-3531.

[14] SU Buda, HUANG Jinglong, ZENG Xiaofan, et al. Impacts of climate change on streamflow in the upper Yangtze River Basin[J]. Climatic Change, 2017, 141 (3): 533-546.

[15] XIE Baoni, JIA Xiaoxu, QIN Zhanfei, et al. Vegetation dynamics and climate change on The Loess Plateau, China: 1982-2011[J]. Regional Environmental Change, 2016, 16(6): 1583-1594.

[16] CLAUSSEN M, BATHIANY S, BROVKIN V, et al. Simulated climate-vegetation interaction in semi-arid regions affected by plant diversity [J]. Nature Geoscience, 2013, 6(11): 954-958.

[17] AFUYE G A, KALUMBA A M, BUSAYO E T, et al. A bibliometric review of vegetation response to climate change[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(13): 18578-18590.

[18] LI Xinzhe, WEN Zhiqiang, CUI Lizhen, et al. Quantitatively mapping the research status and trends of vegetation responses to climate change with bibliometric analysis[J]. Journal of Soils and Sediments, 2023, 23 (8): 2963-2979.

[19] WU Gaolin , LIU Yifan, CUI Zeng, et al. Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: A meta-analysis [J]. Journal of Applied Ecology, 2020, 57 (5) : 875-885.

[20] XUE Yuan, NIU Zuirong, ZHANG Rui, et al. Current status and future research of groundwater under climate change: A bibliometric analysis [J]. Water, 2024, 16(23): 3438. DOI: 10.3390/w16233438.

[21] GAO Jin, ZHU Shiying, LI Dehao, et al. Bibliometric analysis of climate change and water quality [J]. Hydrobiologia, 2023, 850(16): 3441-3459.

[22] ARIA M, CUCCURULLO C. Bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis [J]. Journal of Informetrics, 2017, 11(4):959-975.

[23] EKUNDAYO T C, OKOH A I. A global bibliometric analysis of plesiomonas-related research (1990-2017) [J]. PLOS One, 2018, 13 (11) : e0207655. DOI: 10.1371/journal.pone.0207655.

[24] ZYOUD S H, WARING W S, AI-JABI S W, et al. Global cocaine intoxication research trends during 1975-2015: A bibliometric analysis of Web of Science publications[J]. Substance Abuse Treatment, Prevention, and Policy, 2017, 12 (1) : 6. DOI: 10.1186/s13011-017-0090-9.

[25] ZHANG Xiaolin, ZHANG Yan, WANG Yifan, et al. Research progress and hotspot analysis for reactive nitrogen flows in macroscopic systems based on a CiteSpace analysis [J]. Ecological Modelling, 2021, 443: 109456. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2021.109456.

[26] ZHANG Yueguan, SU Fengge, HAO Zhenchun, et al. Impact of projected climate change on the hydrology in the headwaters of the Yellow River Basin [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(20): 4379-4397.

[27] XU Changchun, CHEN Yaning, CHEN Yapeng, et al. Responses of surface runoff to climate change and human activities in the arid region of Central Asia: A case study in the Tarim River Basin, China[J]. Environmental Management, 2013, 51(4): 926-938.

[28] LEI Huimin, YANG Dawei, HUANG Maoyi. Impacts of climate change and vegetation dynamics on runoff in the mountainous region of the Haihe River basin in the past five decades [J]. Journal of HydrolOgy, 2014, 511: 786-799.

[29] SUN Ge, ALSTAD K, CHEN Jiquan, et al. A general predictive model for estimating monthly ecosystem evapotranspiration [J]. Ecohydrology, 2011, 4 (2): 245-255.

[30] LIU Qin, CHENG Peng, LYU M, et al. Impacts of climate change on runoff in the Heihe River Basin, China [J]. Atmosphere, 2024, 15 (5) : 516. DOI:

10.3390/atmos15050516.

[31] SHANG Xingxing, JIANG Xiaohui, JIA Ruining, et al. Land use and climate change effects on surface runoff variations in the upper Heihe River Basin[J]. Water, 2019, 11(2): 344. DOI: 10.3390/w11020344.

[32] REN Yanqun, LIU Jinping, LIU Suxiao, et al. Effects of climate change on vegetation growth in the Yellow River Basin from 2000 to 2019[J]. Remote Sensing, 2022, 14(3): 687. DOI: 10.3390/rs14030687.

[33] LIBERATI D, GUIDOLOTTI G, DE DATO G, et al. Enhancement of ecosystem carbon uptake in a dry shrubland under moderate warming: The role of nitrogen-driven changes in plant morphology [J]. Global Change Biology, 2021, 27(21): 5629-5642.

[34] 王安阔,王娓,曾辉. 青藏高原高寒草甸不同海拔梯度上增温和优势植物物种去除对生态系统碳通量的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 299-309.

[35] 许炯心. 黄土高原植被-降水关系的临界现象及其在植被建设中的意义[J]. 生态学报,2005,25(6):1233-1239.

[36] 刘成林,樊任华,武建军,等. 锡林郭勒草原植被生长对降水响应的滞后性研究[J]. 干旱区地理,2009,32(4):512-518.

[37] JIANG Bohan, CHEN Wen, LI Siliang, et al. Complex interactions of "water-light-heat" climatic conditions on spring phenology in the mid-high latitudes of the Northern Hemisphere[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2025, 367: 110520. DOI: 10.1016/j.agrformet.2025.110520.

[38] ZHANG Xueqin, LI Xueqin. Three-dimensional differentiation of the contribution of climatic factors to vegetation change in The Pan-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2023, 128(3): e2022JG007244. DOI: 10.1029/2022JG007244.

[39] NAIDOO S. Commentary on the contribution of working group III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. South African Journal of Science, 2022, 118(9/10): 16-19.

[40] 刘海,姜亮亮,刘冰,等. 近40年中国干旱特征及其对植被变化的影响[J]. 生态学报,2023,43(19):7936-7949.

[41] 闫文波,何云玲,余岚,等. 干旱对云南省植被净初级生产力的影响研究[J]. 云南大学学报(自然科学版),2021,43(4):736-745.

[42] 袁艳峰,胡永红,王鹤松,等. 高温热浪对北欧极地植被生产力的影响[J]. 生态环境学报,2025,34(6):831-844.

[43] 马文婧,李英年,张法伟,等. 一次热浪事件对祁连山海晏草甸草原$CO_2$通量的影响过程[J]. 生态科学,2023,42(6):33-43.

[44] 陈琦,毛方杰,杜华强,等. 中国亚热带极端降水时空演变及其对潜在净初级生产力的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(11): 2117-2127.

[45] 杨梅焕,赵滢滢,王涛,等. 黄土高原极端降水变化及其对植被覆盖度影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(8): 3086-3095.

[46] 史军,崔林丽,顾宇丹,等. 气候变化背景下复合极端事件研究进展[J]. 地球科学进展,2023,38(8):771-779.

[47] 张更喜,王慧敏,粟晓玲,等. 复合干热胁迫下黄土高原夏季植被脆弱性评估[J]. 农业工程学报,2024,40(6):339-346.

[48] ALLEY R, BERNTSEN T, NATHANIEL L, et al. Climate change 2007: The physical science basis [R/OL]. (2007-05-31)[2025-07-20]. https://www.docin.com/D-181312355.html.

[49] TRENBERTH K. Changes in precipitation with climate change[J]. Climate Research, 2011, 47(1): 123-138.

[50] TABARI H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 13768. DOI: 10.1038/s41598-020-70816-2.

[51] DAI Aiguo, ZHAO Tianbao, CHEN Jiao. Climate change and drought: A precipitation and evaporation perspective [J]. Current Climate Change Reports, 2018, 4(3): 301-312.

[52] ZHANG Yongqiang, CHIEW F H S, PEÑA-ARANCIBIA J, et al. Global variation of transpiration and soil evaporation and the role of their major climate drivers[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(13): 6868-6881.

[53] XIONG Jinghua, YANG Yuting. Climate change and hydrological extremes[J]. Current Climate Change Reports, 2025, 11(1): 1. DOI: 10.1007/s40641-024-00198-4.

[54] ZHOU Sha, YU Bofu, LINTNER B R, et al. Projected increase in global runoff dominated by land surface changes[J]. Nature Climate Change, 2023, 13(5): 442-449.

[55] WANG Zhengrong, YANG Yuting. Stationarity of high-and low-flows under climate change and human interventions across global catchments[J]. Earth and Space Science, 2024, 11(1): e2023EA003456. DOI: 10.1029/2023EA003456.

[56] GIMENO L, SORÍ R, VAZQUEZ M, et al. Extreme precipitation events[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2022, 9(6): e1611. DOI: 10.1002/wat2.1611.

[57] KVOČKA D, FALCONER R A, BRAY M. Flood hazard assessment for extreme flood events[J]. Natural Hazards, 2016, 84(3): 1569-1599.

[58] CUNHA A P M A, ZERI M, DEUSDARÁ LEAL K, et al. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019[J]. Atmosphere, 2019, 10(11): 642. DOI: 10.3390/atmos10110642.

[59] HAN Juntai, LIU Ziwei, WOODS R, et al. Streamflow seasonality in a snow-dwindling world [J]. Nature,2024, 629:1075-1081.

[60] WANG Hong, LIU Junguo, KLAAR M, et al. Anthropogenic climate change has influenced global river flow seasonality[J]. Science, 2024, 383: 1009-1014.

[61] ASADIEH B, KRAKAUER N Y. Global change in streamflow extremes under climate change over the 21st century[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(11): 5863-5874.

[62] 张利平,杜鸿,夏军,等.气候变化下极端水文事件的研究进展[J]. 地理科学进展,2011, 30(11): 1370-1379.

[63] ZHANG Shulei, ZHOU Liming, ZHANG Lu, et al. Reconciling disagreement on global river flood changes in a warming climate[J]. Nature Climate Change, 2022,12:1160-1167.

[64] WANG Zhengrong, YANG Yuting, ZHANG Cicheng, et al. Historical and future Palmer drought severity index with improved hydrological modeling [J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127941. DOI:10.1016/j.jhydrol.2022.127941.

[65] YUAN Yuan, GAO Hui, DING Ting. Abrupt flood-drought alternation in Southern China during summer 2019[J]. Journal of Meteorological Research, 2021, 35:998-1011.

[66] BI Wuxia, LI Meng, WENG Baisha, et al. Drought-flood abrupt alteration events over China[J]. Science of The Total Environment, 2023, 875: 162529. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162529.

[67] BAI Xiaoyan, ZHAO Chengxin, TANG Yihan, et al. Identification, physical mechanisms and impacts of drought-flood abrupt alternation: A review[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1203603. DOI: 10.3389/feart.2023.1203603.

[68] WANG Simin, JIANG Rengui, ZHAO Yong, et al. Quantifying the drought-flood abrupt alternation events over Wei River Basin: Dynamic evolution characteristics, driving factors and inherent mechanism [J]. Atmospheric Research, 2025, 323: 108185. DOI: 10.1016/j.atmosres.2025.108185.

[69] CHEN Zhiheng, ZHENG Zhihai. The strongest early-summer drought-flood abrupt alternation event over the Huang-Huai-Hai River Basin in 2024 since the 1980s: Perspective of anomalous subseasonal circulation evolution[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2025,18(5): 100648. DOI: 10.1016/j.aosl.2025.100648.

[70] ZHAO Ying, WENG Zhaohui, CHEN Hua, et al. Analysis of the evolution of drought, flood, and drought-flood abrupt alternation events under climate change using the daily SWAP index [J]. Water, 2020, 12(7): 1969. DOI:10.3390/w12071969.

[71] YANG Yuheng, WENG Baisha, BI Wuxia, et al. Climate change impacts on drought-flood abrupt alternation and water quality in the Hetao Area, China[J]. Water, 2019, 11(4): 652. DOI: 10.3390/w11040652.

[72] 李小雁.干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制[J]. 中国科学:地球科学,2011,41(12):1721-1730.

[73] 陈喜,宋琪峰,高满,等.植被-土壤-水文相互作用及生态水文模型参数的动态表述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(3):362-368.

[74] BENGOUGH A G. Water dynamics of the root zone: Rhizosphere biophysics and its control on soil hydrology[J]. Vadose Zone Journal, 2012, 11(2): 460. DOI:10.2136/vzj2011.0111.

[75] 杨大文,雷慧闽,丛振涛.流域水文过程与植被相互作用研究现状评述[J]. 水利学报,2010,41(10): 1142-1149.

[76] 张建云,张成凤,鲍振鑫,等.黄淮海流域植被覆盖变化对径流的影响[J]. 水科学进展,2021,32(6): 813-823.

[77] 陈浩,王豆豆,崔钦凯,等.草地植被冠层与根系对黄土坡面侵蚀过程的影响[J]. 生态学报,2024,44(15): 6841-6853.

[78] 孙特生,李波,张新时.北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应:以准格尔旗为例[J]. 生态学报,2012,32(19):6155-6167.

[79] 宋午椰,许行,林毅雁,等.黄土高原植被净初级生产力时空变化特征及驱动因子分析[J]. 北京林业大学学报,2023,45(8):29-42.

[80] 金佳鑫,肖园园,金君良,等.长江流域极端水文气象事件时空变化特征及其对植被的影响[J]. 水科学进展,2021, 32(6): 867-876.

[81] HUANG Erhan, CHEN Yuxin, FANG Miao, et al. Environmental drivers of plant distributions at global and regional scales[J]. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(3): 697-709.

[82] 李小英,段争虎.黄土高原土壤水分与植被相互作用研究进展[J]. 土壤通报,2012,43(6):1508-1514.

[83] KÉFI S, GÉNIN A, GARCIA-MAYOR A, et al. Self-organization as a mechanism of resilience in dryland ecosystems [J]. Proceedings of the National

Academy of Sciences, 2024, 121(6): e2305153121. DOI: 10.1073/pnas.2305153121.

[84] ZHANG Shanghong, Li Zehao, HOU Xiaoning, et al. Impacts on watershed-scale runoff and sediment yield resulting from synergetic changes in climate and vegetation[J]. Catena, 2019, 179: 129-138.

[85] 邹慧,高光耀,傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J]. 生态学报,2016,36(11): 3127-3136.

[86] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2021: The physical science basis [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2023. DOI:10.1017/9781009157896.

[87] LI Wantong, MIGLIAVACCA M, MIRALLES D G, et al. Disentangling effects of vegetation structure and physiology on land-atmosphere coupling [J]. Global Change Biology, 2025, 31(1): e70035. DOI: 10.1111/gcb.70035.

[88] BRODY M, KULIKOV M, ORUNBAEV S, et al. The global energy and water exchanges (GEWEX) project in central Asia: The case for a regional hydroclimate project [J]. Advances in Atmospheric Sciences,2024,41:777-783.

[89] DOUGHTY C E, METCALFE D B, GIRARDIN C A J, et al. Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia[J]. Nature, 2015, 519: 78-82.

[90] ANDEREGG W R L, KANE J M, ANDEREGG L D L. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 30-36.

[91] 李沐春,李柏延,王昀琛. 近30 a城市土地利用变化模拟研究进展[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2024,45(1):87-97.

[92] 占车生,宁理科,邹靖,等. 陆面水文-气候耦合模拟研究进展[J]. 地理学报,2018,73(5): 893-905.

[93] CHRISTIAN J I, HOBBINS M, HOELL A, et al. Flash drought: A state of the science review [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2024, 11 (3): e1714. DOI:10.1002/wat2.1714.

[94] ZHANG Yuqiang, YOU Qinglong, CHEN Changchun, et al. Characteristics of flash droughts and their association with compound meteorological extremes in China: Observations and model simulations[J]. Science of The Total Environment, 2024, 916: 170133. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170133.

# Research Progress and Prospects of the Climate-Vegetation-Hydrology Coupling Mechanism

*HE Yingying, BAO Yangcan, LI Boyan*[*]

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** The interactions among climate, vegetation, and hydrology are intricate and complex. A deep understanding of the coupling mechanisms among these three elements is a key scientific issue for studying changes and mechanisms in terrestrial surface systems. Using bibliometric analysis, knowledge mapping, and comprehensive introduction, this study systematically reviewed 10 298 selected relevant articles (1990-2024), summarized the main findings and progress on the impacts of climate change on vegetation and hydrology processes, along with the coupling relationships among them, and highlighted key scientific issues and future research directions. It aimed to provide insights for a deeper understanding of the mechanisms of climate-vegetation-hydrology interactions and promote regional sustainable development. The results show that vegetation's response to climate change depends on regional hydrothermal conditions, exhibiting spatial heterogeneity and time-lag characteristics. Extreme climate events and their compound occurrences exacerbate the nonlinear impacts of these responses and alter the ecological functions of vegetation itself. Climate change significantly affects the hydrological cycle by regulating precipitation and evaporation, thereby increasing the frequency of extreme runoff, drought, and flood events, with rapid transitions between droughts and floods being particularly typical. There is a significant bidirectional coupling relationship between vegetation and hydrological processes, jointly regulating watershed water balance and ecosystem productivity. Future research should focus on developing high-precision integrated climate-vegetation-hydrology coupling models. This will enhance the understanding of system responses and resilience characteristics under extreme events while incorporating human activity factors. Such efforts will promote coordinated management of the human-environment system, achieving a balance between ecological protection and sustainable water resource utilization.

**Key words:** climate; vegetation; hydrology; coupled model; ecohydrology; coupling mechanism; extreme climate

(责任编辑 高继红)