

基于 CiteSpace 知识图谱的新疆水汽循环及其影响研究进展*

张强[†] 何昌原 申泽西[†] 范科科

(北京师范大学地理科学学部, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室,
地表过程与资源生态国家重点实验室, 100875, 北京)

摘要 水汽循环的时空特征、机制和影响是水文学和水资源研究的核心问题,也是水旱灾害防灾、减灾和救灾的关键。选取中国知网(CNKI)收录的 252 篇文献和 Web of Science(WOS)收录的 256 篇文献作为样本数据,基于 CiteSpace 绘制知识图谱,结合文献计量方法分析文献数量分布、主要作者、研究机构和知识演进,并追踪热点问题,为大气、水文及气象学者了解和把握中国新疆地区水汽循环相关问题的研究热点和发展趋势提供基础性数据依据,以期推动新疆水汽循环、水文水资源与水生态及区域可持续发展。

关键词 新疆;水汽;知识图谱;CiteSpace;文献计量

中图分类号 P468.0

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022113

0 引言

全球变化与自然灾害风险研究均为当前地球科学研究的热点与前沿。全球变暖以及由此引起的全球水循环加剧已经导致区域乃至全球范围内日益频繁的洪旱灾害,人类社会可持续发展正面临着巨大的环境压力和挑战,以极端水灾害与气象灾害发生规律与机制为重大科学问题的全球变化研究已成为当今重大科学前沿之一^[1-3]。水资源是西北干旱区基本保障性自然资源和战略性经济资源,是制约经济社会发展的关键要素^[4]。气候变化将进一步加剧西北干旱区水资源供给的不确定性,导致气象水文极值事件日益频发和洪旱灾害风险日趋加剧^[5]。西北干旱区地处中纬度地带,区域生态及水资源对全球气候变化影响最为敏感^[6]。在气候变化和人类活动的综合影响下,干旱区以冰雪融水为基础的水资源系统非常脆弱,温度升高引起冰雪融水径流的季节性变化^[7-8]。这些变化导致水资源在时空上的变异性,使得干旱区水循环系统的稳定性和水资源的可再生性显著降低,并导致极端气候事件与水文气象极值事件发生频率和强度日趋增大^[9-11]。

水文循环时空特征及机制一直是水文水资源学领域研究的核心科学问题,也是该领域的研究热点与难点^[12]。其中,水循环研究是探讨洪旱灾害致灾因子、成灾机制等的理论关键,也是洪旱灾害防灾减灾救灾的关键应用基础研究^[13-16];同时,水循环过程也是地球气候系统的一个重要环节^[17]。新疆地处中国西北部,水资源由周边山区的降水和融水补给构成,是一个对气候变化高度敏感的干旱、半干旱地区^[18]。该地区的特点是大陆性气候和广泛的内流盆地,其气候条件和水文过程都与区域社会民生紧密联系,气候变化可能导致水资源短缺等问题^[19-20]。此外,该地区高山积雪和冰川分布对气候变化也是极具敏感性^[21]。

水文气象过程的时空变异性以及多时间尺度性一直是水文气象学领域研究的热点与难点,也是气象水文过程可预测性研究的理论关键^[22]。近年来,围绕新疆地区的水汽循环研究热度逐渐升高。杨莲梅等^[23]整理了 20 世纪 60 年代以来新疆地区水汽研究的主要成果,并总结归纳了新疆水汽源地、输送路径和降水演变特征。谢泽明等^[24]回顾了近 40 年来以新疆地区降水事件为主题的相关文献,总结了该地区降水时空分布、动力机制、大气环流、水汽输送等研究的结

* 新疆维吾尔自治区寒旱区水资源与生态水利工程研究中心新疆水专项资助项目(2020.A-003);国家重点研发计划资助项目(2019YFA0606900)

[†] 通信作者:张强(1974—),男,博士,教授,博士生导师。研究方向:水文气象学研究、洪旱灾害机理、水循环过程及其对气候变化的响应机制与机理等领域。E-mail: zhangq68@bnu.edu.cn;

申泽西(1996—),博士研究生,研究方向:气象水文过程及其灾变与生态效应。E-mail: shenzexi@mail.bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-02-05

论及相关数值分析模拟的方法。陈亚宁等^[25]通过文献梳理,综合分析了在全球气候变化视角下新疆天山地区降水变化、冰川变化和积雪变化等主要水文要素的时空演变,揭示了该地区水汽来源、水汽输送机制和区域水循环的演变及其对该地区降水的影响。Shen 等^[26]从气候变化角度回顾了新疆地区山区气候和水文变化的研究进展,指出受气候变暖影响新疆地区水循环可能会加剧,未来极端降水事件可能会变得更加频繁,而该地区水资源的可用性与可持续性将会受到威胁。

尽管众多学者对新疆地区的水文气候变化研究已取得系列研究成果,但由于区域条件和数据来源不同,结果也有所不同。在经济快速增长、人口数量增加和气候变化导致水资源需求持续增加的情况下,为进一步加深对该地区水文气候变化及其对区域农业、生态、水资源管理等方面的理解和认识,本文对新疆地区水汽相关研究的进展进行全面回顾、梳理与总结。本文运用可视化知识图谱分析方法对中国知网(CNKI)和 Web of Science(WOS)中新疆水汽研究领域的相关文献进行梳理,旨在揭示新疆水汽研究领域的知识演进脉络,厘清相关新兴热点,以期为该区域水文气象过程及其对区域水资源和生态环境的影响研究提供依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源 本文对中英文论文分别进行文献计量并开展分析。首先以中国知网(CNKI)为文献检索平台,选择《中国学术期刊网络出版总库》中的核心论文集作为数据库,以“TI=新疆 AND TI=(水文+水汽+水循环+降水+气温+水蒸气+地气)”为检索式,选择中文学术期刊,为反映文献数量变化趋势将文献发表的时间范围限制为 2021 年 12 月 31 日之前,并剔除与研究主题不相关的文献,共检索到 252 篇与研究内容相关的有效样本;然后以 Web of Science(WOS)为文献检索平台,选择其中的 SCI 核心文献集作为数据库,以“(TI=(vapor)) OR (TI=(moisture)) OR (TI=(precipitation)) OR (TI=(water cycle)) OR (TI=(FLEXPART)) AND (TS=(Xinjiang))”为检索式,同样将文献发表的时间范围限制为 2022 年之前(不含 2022 年),共得到 256 篇与研究内容相关的有效样本。

1.2 研究方法 知识图谱作为以信息与知识为研究对象的一种图形分析方法,旨在揭示科学知识的发展进程与结构关系,可以让研究者快速从不同层面了解一个学术领域发展概况及研究进展,从而全面地审视知识单元或知识群之间的学术互动与学术演进^[27]。采用知识图谱方法计量分析特定主题系统的文献,可以

有效探测出该领域的研究热点话题与研究趋势,对某一学科领域的科学技术管理、知识计量与信息可视化有一定辅助功能。

CiteSpace 系列软件是由美国德雷克塞尔大学陈超美^[28]基于 Java 语言开发的文献计量学应用程序,该系列软件能够借助共引分析方法对目标学科范畴内的文献进行可视化分析,其具备合作网络、共现网络、共被引网络和文献耦合等可视化功能,并能够通过计算节点之间的关系强度,对某个科学领域的知识进行概念化和可视化。利用 CiteSpace 软件可以处理来自 WOS、CNKI 等权威数据库的引文数据,绘制科学知识图谱,从而分析与展现学科领域演化进程中的关键路径、转折点以及学科发展前沿。本文将经过预处理的数据导入 CiteSpace 5.3.R3 中,通过调整参数阈值,整体分析该领域文献发表规律、作者合作、研究机构、主题内容和研究前沿等方面的重要信息。

2 文献总体概况

文献是衡量学科发展程度与技术创新水平的重要指标,通过文献计量的方式定量分析某一学科的文章,可以客观认识该领域的发展全貌。本文主要从发表趋势、主要作者和研究机构 3 个方面概括新疆水汽循环研究领域的总体情况。

2.1 发表趋势分析 新疆水汽循环研究领域的论文发表数量变化是衡量该领域进展的关键要素。通过绘制文献发表数量的年份分布图(图 1),可使研究者从整体上把握该学科领域的发展阶段,从而预测其未来演进趋势。

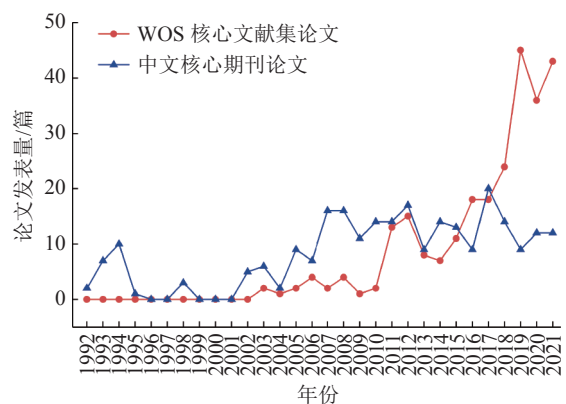


图 1 新疆水汽研究论文发表量年份分布

从图 1 中可以看出,最早的有关新疆水汽研究的核心期刊论文发表于 1992 年,该文对 1990 年夏季新疆东部地区的一次大降水天气过程进行了较为深入的讨论,分析了大气环流演变、局地流场、垂直运动、水汽输送等特征,指出了低空急流的存在及其在降水过程中的重要作用^[29]。在 1995—2001 年存在研究活跃度低潮期,这一时间文章发表量较少。从 2002 年

开始,有关新疆水汽循环研究的中文学术论文呈较快增长趋势.自 2007 年以来中文核心期刊论文的年均发表量约为 15 篇,整体较平稳,但有所波动,呈不温不火的状态.而新疆水汽研究领域的 SCI 论文发表量呈现类似指数增长的态势,尤其是自 2014 年以来,该领域的 SCI 论文数量暴增,2019 年的 SCI 论文发表数量更是上一年的近 2 倍.有关新疆水汽循环的学术论文在国际学术期刊上的发表量显著增长,说明随着气候变化及其对区域水循环影响研究的深入,干旱区水汽循环及其对气候变化的响应研究已成为国际学界研究的热点.这主要是因为干旱区与半干旱区生态系统脆弱,对水资源变化敏感,而水汽循环的变化是这一研究的理论核心.同时这也表明新疆水汽循环研究在全球干旱区环境研究中的国际影响力逐年提高.

2.2 作者分析 从事科研工作的学者是学科发展的主体,通过对发文学者及其合作关系进行分析,可以明晰该领域的核心研究人员及研究团队,进一步把握该领域的研究脉络.在 CiteSpace 的“Node Type”中选择“Author”可以绘制出 CNKI 中文核心期刊和 SCI 论文的作者合作网络图谱(图 2、3).图中每个圆形表示一名研究学者,节点直径大小表示该研究者的论文发表量,节点之间的连线表示研究者之间的论文合著关系,线条的粗细表示研究者之间的合作强度.解读文献作者之间的团队合作与知识交流是探寻该领域知识演进脉络的重要渠道.

在中文核心期刊论文的作者合作网络图谱中,发文章量最多的研究者是成都信息工程大学的赵勇研究员(原单位为中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所),其次是中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所的杨莲梅研究员和毛炜峰研究员.赵勇研究员的主要研究

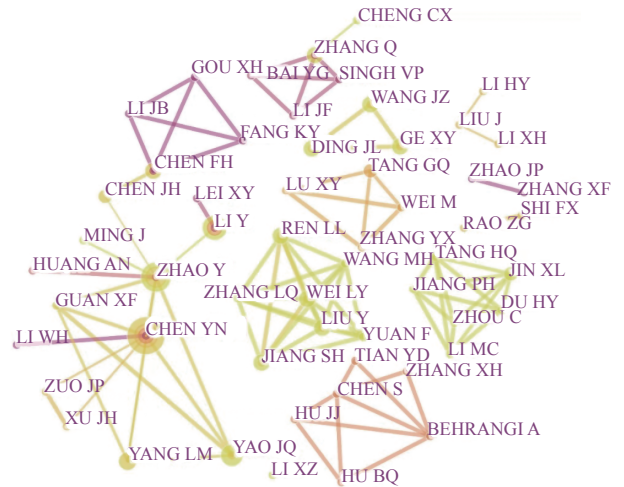


图 3 SCI 论文中新疆水汽主题的作者合作共现网络

方向是极端天气气候事件、青藏高原热力作用和未来气候变化预估,杨莲梅研究员的主要研究方向是中亚天气气候研究,毛炜峰研究员的主要研究方向是气候诊断、区域气候变化影响预测.从合作强度来看,以相对独立的合作团队为主,从图 2 可以看出,大致形成了 10 个研究团队,各研究团队之间的合作较少,其中史玉光、杨莲梅、赵勇等 3 个研究团队有研究上的合作与交流.

SCI 文献中作者合作网络图谱呈现出“部分集中、整体分散”的状态,最大的团队是以中国科学院新疆生态与地理研究所的陈亚宁研究员和在中文核心期刊中发文最多的赵勇研究员为中心的合作团队,陈亚宁研究员的主要研究方向是干旱区水文水资源、生态水文过程、资源开发与环境保护.综合来看,新疆水汽相关研究领域的核心研究团队即为以陈亚宁、赵勇、杨莲梅、毛炜峰为核心的研究团队.虽然新疆水汽相关研究领域的研究团队较多,但团队间的作者合作均呈现较为分散的态势,加强团队间的交流与合作有利于该领域取得更多创新性成果,推动该领域快速发展.

2.3 研究机构分析 科研机构是相应学科领域研究资源和专业人才的集中地,是本学科领域内研究的主要力量.通过对论文发表的科研机构进行统计分析,可以在一定程度上了解各机构在新疆水汽相关研究领域的学术地位及研究的活跃程度.在 CiteSpace 的“Node Type”中选择“Institution”,得到新疆水汽相关研究领域机构合作知识图谱(图 4、5).图中每个圆形结点表示一个机构,其余表示的含义与图 2、3 中的作者合作共现网络相同.根据发文频次对主要研究机构进行排序,分别统计出在中文核心期刊和 SCI 论文中发文频次大于 10 次的研究机构(表 1、2).

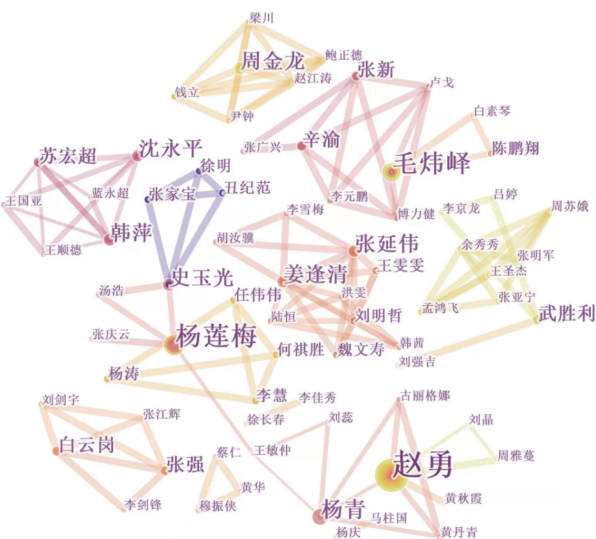


图 2 中文核心期刊论文中新疆水汽主题的作者合作共现网络

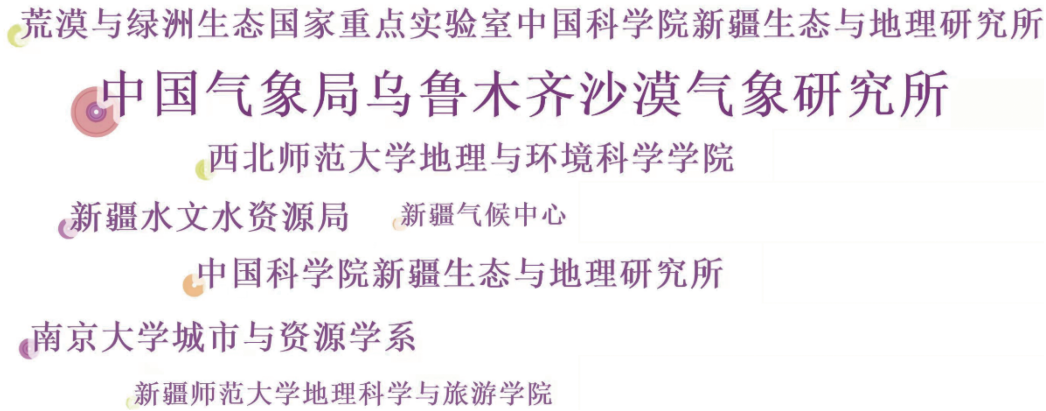


图 4 中文核心期刊论文中新疆水汽主题的主要机构共线图

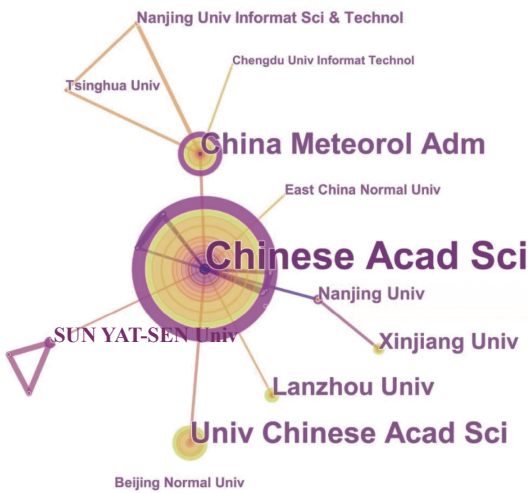


图 5 SCI 论文中新疆水汽主题的主要机构共线图

表 1 中文核心期刊中新疆水汽主题的主要研究机构

| 排名 | 机构单位 | 发文频次 |
|----|------------------|------|
| 1 | 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所 | 46 |
| 2 | 中国科学院新疆生态与地理研究所 | 20 |
| 3 | 新疆气象局 | 17 |
| 4 | 新疆农业大学 | 17 |
| 5 | 新疆大学 | 15 |
| 6 | 新疆气象台 | 13 |
| 7 | 新疆气候中心 | 12 |
| 8 | 新疆师范大学 | 12 |
| 9 | 中国科学院大气物理研究所 | 12 |
| 10 | 新疆水文水资源管理局 | 11 |
| 11 | 南京大学 | 11 |

由图 4、5 及表 1、2 可以直观地看出,从文章发表数量来看,中国气象局和中国科学院是新疆水汽相关研究领域的主阵地,也是上文所分析的作者合作网络中核心研究团队的所在单位.其中,中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所主要围绕新疆气象防灾减灾与应对气候变化开展应用研究工作;中国科学院新疆生

表 2 SCI 论文中新疆水汽主题的主要研究机构

| 排名 | 机构单位 | 发文频次 |
|----|--|------|
| 1 | Chinese Academy of Sciences(中国科学院) | 117 |
| 2 | University of Chinese Academy of Sciences (中国科学院大学) | 37 |
| 3 | China Meteorological Administration(中国气象局) | 34 |
| 4 | Lanzhou University(兰州大学) | 18 |
| 5 | Xinjiang University(新疆大学) | 13 |

态与地理研究所主要以干旱区生态与环境为研究对象,在干旱区生态学与干旱区地理学领域围绕自然资源开发、生态修复、环境治理、生物多样性保育和区域可持续发展等重大问题开展研究.从中文核心期刊的文章发表来看,除中科院及中国气象局下属研究机构以外,位于新疆的高校是研究新疆水汽与水资源等相关领域的主要机构,新疆区域以外的主要研究高校为南京大学.从国际期刊学术论文发表来看,兰州大学与新疆大学是该领域研究高校中的主力军与领头羊.

从机构的合作来看,中文核心期刊论文和 SCI 论文中的机构合作模式有较大差异.该领域 SCI 论文中,Chinese Academy of Sciences(中国科学院)与其他各不同研究机构都有学术上的联系,与 University of Chinese Academy of Sciences(中国科学院大学)、China Meteorological Administration(国家气象局)等多个高校和科研机构合作广泛;但在中文核心期刊论文中,合著作者主要以研究机构内部的合作为主,几乎不存在跨单位、跨地区与跨学科的机构合作,所以图 4 中的结点之间没有连线.这从另一角度表明:虽然新疆水汽相关研究领域的研究已经有了一定水平的发展,但在知识融合与共同深度探索方面,各研究机构之间仍有进一步加强合作研究的空间.通过对作者单位的进一步梳理可以发现,之所以中科院与其他单位有着较强的合作,一方面是单位之间的人员有合作,同

时也与中科院相关人员到其他单位就职有关,也从侧面反映了中科院与其他单位之间的人才流动与人员交流情况。

3 研究内容

3.1 研究主题 共词分析法是一种研究内容梳理与分析方法,共现分析文献关键词有助于研究者概述学科领域的发展历程,从而确定该领域在某一时段的核心研究主题。绘制新疆水汽相关研究领域中文核心期刊论文和 SCI 论文的关键词共现网络聚类图(图 6、7)。图中各关键词在样本文献中出现的总频次越高,其文字字号和结点越大。从图 6、7 可以看出,中文核心期刊论文的关键词网络可以构建出#1 水汽含量、#2 水汽输送、#3 降水、#4 气候变化、#5 时空分布 5 个聚类,而 SCI 论文的关键词网络由#1 Climate Change、#2 Vapor、#3 Water Cycle、#4 Precipitation 这

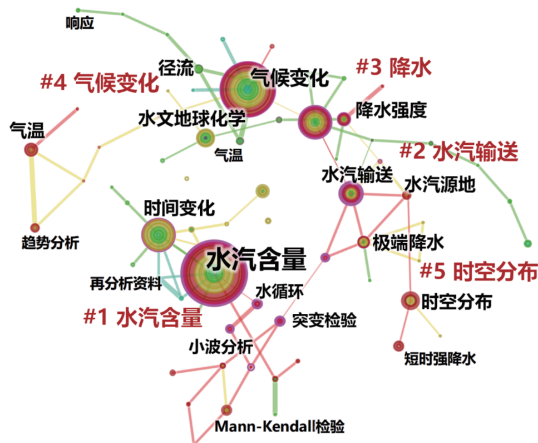


图 6 中文核心期刊中新疆水汽主题的关键词共现聚类

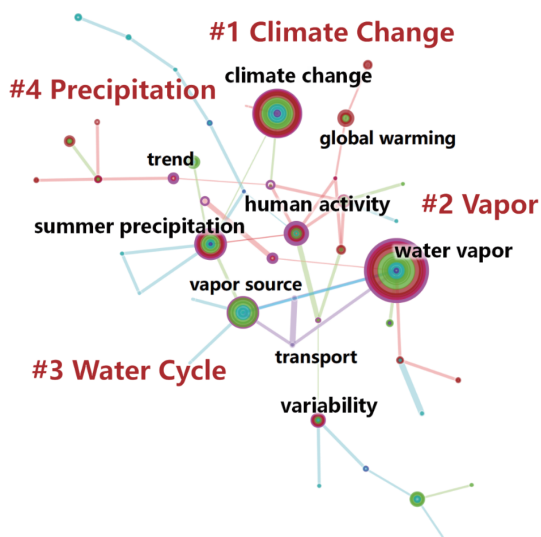


图 7 SCI 论文中新疆水汽主题的关键词共现聚类

4 个聚类组成。水汽是大气中的重要组成部分,也是水文循环研究的主要研究对象,关键词的共现聚类可以反映出新疆水汽研究领域的热点主题^[30]。新疆地区水循环过程较为特殊,水文生态系统稳定性弱,其水资源短缺的问题突出。因此深入开展新疆区域水循环与水资源研究,对缓解西部干旱区生态脆弱性、解决水资源短缺问题和进一步推动“一带一路”21 世纪新型经济战略国际合作具有重要的现实意义。鉴于此,本文根据中英文论文关键词聚类内容进行文献追溯和扩展,可以将整个研究领域划分为新疆地区水汽含量相关研究、新疆地区水汽变化及地气相互作用、气候变化对新疆地区水汽相关问题的影响 3 个子课题,并对其进行详细分析。

3.1.1 新疆地区水汽含量相关研究 水循环是地球系统中最为基础的也是最为重要的物质循环之一。从图 6 可以看出,水汽含量的研究是水汽循环研究的核心内容。水汽作为水文循环系统中的主要成分,其含量直接关系到气候变化和生态环境。水汽含量又称可降水量,是降水事件的物质基础和水分平衡的重要影响因素。根据关键词聚类结果和相关文献追溯,又可以将新疆地区水汽含量相关研究分为水汽含量的空间分布与时间变化、水汽含量的突变分析、水汽含量与降水量的关系 3 部分。

1)水汽含量的空间分布与时间变化。水汽含量与水资源问题息息相关,对水汽含量的时空分布与变化进行研究能够为高效利用大气水资源提供理论基础。水汽含量的时空变化是水汽含量最为重要的特征。刘蕊^[31]利用理论公式、经验公式、NCEP 再分析资料等方法对新疆水汽含量进行计算,认为新疆地区的大气水汽含量在空间分布上主要可以归纳为准噶尔盆地地区和天山西部地区 2 个大值区,且塔里木盆地地区的大气水汽含量高于阿尔泰山地区、天山中部地区、天山东部地区和昆仑山地区的低值区;在季节分布方面,新疆地区大气水汽含量在春季与秋季的空间分布与最值分布较为相近,且夏季的含量最大,冬季最小。王凯等^[32]根据 ECMWF 和 NCEP/NCAR 的 1979—2016 年逐月再分析数据利用公式计算了我国西北地区大气水汽含量的时空分布及其输送特征,提出我国西北地区水汽源主要位于新疆天山山脉等地。Han 等^[33]以新疆灌溉强度的量化指标数据集为研究对象,探究新疆农业灌溉对近地表水汽含量的影响,结果表明高耕地利用水平站点的灌溉开发增强了相应季节近地表的水汽含量。Guan 等^[34]基于 ERA-Interim 再分析数据评估了 1979—2012 年期间中亚及中国干旱区上空水汽的空间分布、季节变化、年变化和传输特征,研究表明:新疆北部地区水汽终年汇聚,但新疆

南部以及巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠常年发生水汽分流,1979—2012年中国干旱区的水汽通量为负值,该地区的净水汽通量在春季减少,冬季增加,秋季和夏季基本保持不变。

2)水汽含量的突变分析.对水汽含量进行突变分析,有助于把握水汽变化周期和演变特征,对区域生态环境研究具有重要意义.黄小燕等^[35]利用我国西北地区1960—2015年的地面气象资料和探空资料,采用Mann-Kendall检验、小波分析等方法对研究区水汽含量与气象要素的关系进行分析,结果表明西北地区年平均水汽含量存在明显的突变特征和周期性变化特征,其值在1983年前后发生突变,主振荡周期为4年左右,且西北地区水汽含量与平均气温、相对湿度呈正相关性,与平均风速呈负相关性.Yao等^[36]研究了1961—2011年中国西北干旱区水汽压力的时空变化,通过Mann-Kendall检验发现水汽压力具有垂直纬向性和经度纬向性,其值随海拔升高由低到高递减,新疆西北部的的水汽压力值受气候变化等因素影响较大。

3)水汽含量与降水量的关系.水汽含量是产生降水的物质基础及前提条件,对区域降水天气及气候有直接影响.任国玉等^[37]根据再分析资料提出,西北干旱区在实测降水量出现较明显增加趋势的同时,大气中的水汽含量并没有明显增加,并由此推断实测降水量与全球大气水汽含量增加及区域外水汽输入通量变化的关系可能并不显著,实测降水量的增长可能是区域内气候变化与变异响应的一种表现形式.张扬等^[38]基于1970—2013年西北干旱区高空和地面气象资料进行研究,结果表明新疆地区空中水汽含量呈显著增加趋势,其中时间上以夏季增速最高,在空间上北疆水汽含量增加速率最大.Chen等^[39]基于NCEP/NCAR全球再分析网格数据,分析了新疆地区降雨强度分布的影响因素,结果表明新疆地区水汽含量不是降水量差异的根本原因,降水量可能受动力条件差异等因素的影响。

3.1.2 新疆地区水汽变化及地气相互作用

1)水汽源地与输送路径.水汽来源及含量主要受到区域位置、海拔高度和大气环流等因素的影响.新疆地处中纬西风带,通常认为大西洋上空水汽随西风带进入新疆^[23].戴新刚等^[40]基于新疆稳定水汽输送的主要特点设计了判断新疆水汽来源和输送路径的模式,结果显示新疆冬春季降水的水汽主要来自地中海和里海等区域.从季节上来看新疆地区的水汽输送主要在夏季,其主要载体是西风气流^[41].在输送路径上受盛行西风带影响,新疆地区的平均水汽通量在长时间以来以欧亚大陆西部为主要源地^[42].研究表明新疆地区主要有3个通道进行水汽输送与转化:①西

风环流输送的欧亚大陆和大西洋等地的蒸发水汽;②南海和西太平洋的水汽通过东亚夏季风被带入新疆地区;③南亚季风携带来自印度洋的水汽穿越青藏高原到达新疆南部^[43-45].近年来,研究者用拉格朗日粒子扩散模型(FLEXPART)进行水汽溯源及循环的研究较多.Zhou等^[46]从暴雨事件出发对水汽来源进行研究,通过FLEXPART模型研究了2008—2015年4—9月与中国新疆暴雨相关的水汽输送,提出与暴雨事件有关的水汽主要由西风输送,研究结果揭示了阿勒泰、伊犁河谷、哈密、阿克苏-喀什4地暴雨形成的水分主要来自新疆和中亚地区.Yao等^[47-48]采用FLEXPART模型模拟了1979年3月—2018年2月全球气团轨迹,分析新疆地区降水的水汽来源,结果表明冬夏2季新疆水汽输送路径相似,分别为地中海—里海—巴尔喀什湖、东欧平原—西西伯利亚平原—巴尔喀什湖和阿拉伯半岛—伊朗高原—帕米尔高原,春季(秋季)的水分输送路径与冬季(夏季)相似;并用同种方法确定了1979—2018年雨季新疆强降水的水源,提出了新疆地区强降水的4种主要气象模式,并进一步分析出4种气象模式的4个水源区及贡献率,即新疆南部29%~37%、中亚北部19%~27%、新疆北部14%~19%和中南亚13%~16%。

2)水汽收支与地气相互作用.对新疆水汽输入、输出与收支进行计算,对于深入理解新疆水文循环过程十分关键.杨柳等^[49]应用2000—2011年NCEP/NCAR再分析逐日资料,分析了新疆天山地区年平均、四季大气中不同层次水汽输入、输出和收支情况,结果表明新疆天山山区水汽总输入量占全疆水汽输入量的44.1%,天山山区地面至气压100 hPa海拔的区域间年平均水汽净收支为 1.67×10^{10} t,其中西、北边界为输入,东、南边界为输出,对流层中层水汽输送量最大,夏季为天山山区水汽输送量最大的季节,输入量和输出量为全年的41.6%.刘晶等^[50]以2016年新疆伊犁河谷地区的一次极端强降水事件为研究案例,使用拉格朗日方法进行HYSPLIT轨迹模式模拟,并结合伊犁河谷地区的GPS观测,揭示了强降水期间的大尺度水汽输送、辐合特征及伊犁河谷局地水汽变化特点,发现在此次降水期间水汽主要集中在900~500 hPa,通过垂直输送项向高层输送。

地气相互作用作为水循环的基础,对新疆地区的气候和生态环境研究具有重要的科学意义.地气作用过程主要由地球下垫面和大气之间的物质、动量和热量交换构成.刘永强等^[51]通过观测和研究沙漠地表反照率、土壤热容量等地气相互作用参数获取了相关参数的季节性变化规律,为揭示西部干旱区环境的地气相互作用机制研究提供了理论支撑.马耀

明^[52]在青藏高原地区开展了大范围与长时间的地气相互作用观测试验,揭示了地气相互作用和水汽循环对区域气候、自然环境和社会发展的影响.在数据方面,青藏高原科学数据中心基于梯度气象、地表辐射、土壤温度和湿度等多要素开发了时间序列为2005—2016年的逐时陆气相互作用观测数据集,为青藏高原地区水循环机制研究和数值模式的发展提供了可靠的数据保障^[53].

3.1.3 气候变化对新疆地区水汽相关问题的影响 气候变暖和生态环境的相应变化会改变新疆地区的水汽来源、水汽输送及水汽循环过程,也对该区域的水资源管理具有直接影响.陈亚宁等^[25]提出,全球变暖打破了原有的自然平衡,加速了天山山区冰川、积雪以及冻土等的消融,因此以冰雪融水补给为主的河流其水文过程也发生了变化,这种变化将直接影响区域水汽、径流等水资源的分配模式.蓝永超等^[54]从相应水文气象站的数据资料出发,从气候变化角度分析了新疆地区降水事件的时空分布、演变趋势及演变原因,研究结论指出由于全球变暖事件的加剧,由境外输送至新疆地区的水汽逐渐增多,致使近半个世纪以来新疆地区的年降水量呈上升态势,且新疆内部不同区域中的降水空间分布有显著差异.姚俊强等^[55]从全球变暖背景下的区域水循环过程出发,创建了新疆天山地区水汽含量与地面水汽压之间的经验公式,借助公式分析了天山地区水汽含量的时空分布,探究水汽含量的时空分布与气候变化相关因素的关联性,提出水汽对全球气候变化存在负反馈作用的可能性,而冬季北大西洋涛动(NAO)和北极涛动(AO)与水汽的关联程度最为紧密.Piao等^[56]认为中国北部地区的夏季变暖会在很大程度上增加蒸散量,从而可能会增加对水资源的压力,并且在西北地区强降雨、热浪和干旱等极端事件的发生频率更加频繁.Zhang等^[57]认为气候变暖也可能增加降雨和径流导致洪水风险增加,从而影响下游环境并带来自然灾害,在这种情况下,位于新疆的半干旱地区生态系统易受到气候变化的影响.因此,新疆地区的水汽研究也应贴合应对水资源短缺和极端气候变化的水资源管理战略,以应对持续的气候变化.

3.2 知识演进 前沿热点是指某一学科领域研究中最具有前瞻性和潜力的科研主题,挖掘该领域研究的新兴热点有助于把握学科发展趋势,进而推动研究者在原有科研成果基础上取得新突破.研究文献中特定关键词频次的爆发现象表明,相关新兴主题在学界中的受关注程度和潜在研究价值.为进一步认识新疆水汽相关研究领域的新兴热点与发展趋势,借助CiteSpace软件中提供的burstness功能,分别检测了样

本集内中文核心期刊与SCI论文中的关键词,分别提取中文核心期刊和SCI论文数据集内突现强度排名前10的论文关键词(如表3、4所示).

表3 中文核心期刊新疆水汽领域研究关键词突现分布

| 关键词 | 突现强度 | 出现年份 | 结束年份 |
|-------|---------|------|------|
| 大降水 | 2.456 7 | 1992 | 1994 |
| 径流 | 2.339 5 | 2005 | 2010 |
| 水循环 | 2.251 9 | 2006 | 2012 |
| 全球变暖 | 2.456 7 | 2006 | 2012 |
| 气温 | 2.754 4 | 2011 | 2017 |
| 降水 | 2.062 9 | 2015 | 2017 |
| 突变检验 | 1.800 3 | 2015 | 2019 |
| 地下水 | 1.974 9 | 2015 | 2019 |
| 短时强降水 | 3.604 0 | 2018 | 2017 |
| 时空分布 | 3.419 7 | 2019 | 2019 |

表4 SCI论文新疆水汽领域研究关键词突现分布

| 关键词 | 突现强度 | 出现年份 | 结束年份 |
|----------------------|---------|------|------|
| trend(趋势) | 1.982 2 | 2006 | 2008 |
| index(指数) | 1.192 1 | 2009 | 2010 |
| vegetation(植被) | 2.259 7 | 2009 | 2012 |
| soil moisture(土壤水) | 4.384 3 | 2009 | 2012 |
| rainfall(降雨) | 4.822 8 | 2012 | 2017 |
| model(模型) | 4.146 9 | 2012 | 2017 |
| climate change(气候变化) | 1.731 2 | 2012 | 2019 |
| Bosten Lake(博斯腾湖) | 1.751 4 | 2013 | 2019 |
| variability(可变性) | 5.514 2 | 2014 | 2017 |
| intensity(强度) | 3.426 1 | 2016 | 2019 |

这些高频关键词涵盖了新疆水汽相关研究的对象、内容、目的、方法和研究尺度等,在新疆水汽相关研究的整个领域内,国内外学者的主要工作都以这些关键词为中心进行论述和研究.这些高频关键词最早出现的年份是1992年,集中爆发的时间段是2009—2016年.其中中文核心期刊的突现词根据出现年份由早到晚排序依次是:大降水、径流、水循环、全球变暖、气温、降水、突变检验、地下水、短时强降水和时空分布;SCI论文的突现词是trend(趋势)、index(指数)、vegetation(植被)、soil moisture(土壤水)、rainfall(降雨)、model(模型)、climate change(气候变化)、Bosten Lake(博斯腾湖)、variability(可变性)和intensity(强度).这表明,在新疆水汽研究领域,气温和降水是与水汽的含量、分布、输送与循环最直接相关的气候因素,径流、植被与土壤水也与大气中的水汽变化息息相关.在研究方法

方面,在 2015 年前后用突变检验方法进行水汽的相关研究是当时的热点,而在全球气候变化的背景下进行新疆水汽研究的热度持续时间最长,与水汽研究相关的水资源管理和气候变化应对研究,也将成为该地区未来研究的前沿热点之一。

4 结论与讨论

水汽循环的跨学科发展、全球气候变化的影响及新疆地区的特殊地理位置使得与新疆水汽相关的研究主题不断推陈出新,这在促进知识交叉融合的同时也为相关科研工作带来新的挑战。本文借助可视化文献分析工具 CiteSpace,从发表情况、主要作者、研究机构、研究主题和知识演进几方面综述了近年来新疆地区水文气象过程和水汽输送相关研究文献,得出以下结论并进行讨论。

4.1 结论

1)从论文总体发表趋势来看,新疆水汽相关研究领域在中文核心期刊和 SCI 论文中的总论文发表数量呈现显著增长态势,且该领域的 SCI 论文发表量增长更为明显,国际影响力也逐年提高;以中国气象局和中国科学院为核心的多个科研合作团队是全球范围内该领域研究的主力团队,陈亚宁、赵勇、杨莲梅、毛炜峰是该领域内的主要研究者,在相应团队内承担着沟通与组织的“桥梁”角色。随着新理论的不整合与我国交叉学科建设的进一步发展,该领域研究者数量和论文发表量将有很大的上升空间,相关研究的质量也会有突破,并进一步赢得国际学界的认可及国际学术话语权。

2)从研究内容来看,新疆水汽研究领域主要包括新疆地区水汽含量相关研究、新疆地区水汽变化及地气相互作用、气候变化对新疆地区水汽相关问题的影响 3 个方面。其中水汽含量在时间与空间 2 个方面的变化特征是当前研究的主要内容,同时,水汽循环及其对降水过程的影响也是重要的研究内容。另外,部分内容涉及水汽循环与径流、水文地球化学等方面的研究,多学科交叉研究态势逐步呈现。

4.2 讨论

新疆水汽相关研究历经了 30 年左右的发展,已取得了显著进展并产生了丰富的学术成果。

与此同时,新疆地区水汽研究也存在着一定的不足,新疆地区尤其是山地复杂地形条件下的气象资料和水文资料获取尚不全面,学界对水汽模拟及未来变化趋势预测的研究中还存在一定的不足及不确定性,与此相关的不同水汽源区、路径及气候变化等还有待于进一步研究。

从研究热点和未来研究趋势来看,随着气候变化对区域水循环、水资源、水生态影响研究的深入,国内外学界及决策者对区域生态安全、粮食安全、水安全的科技需求日益增加,气候变化背景下和未来不同温升情景下新疆地区降水变化机制、地气相互作用机制和水文模型构建等热点问题,应是我国西部干旱区水文研究的重点发展方向。同时在人类活动影响下,水汽循环及其影响研究作为未来地球物质循环研究的关键主题也将进一步受到关注,基于多源异构数据的多时空尺度、多过程的全链条水汽循环研究,包括时空特征、变化机制及其影响的综合研究将是未来涉水领域研究的发展趋势,也是新时代区域可持续发展的重大科技需求。

5 参考文献

- [1] MILLY P C D, WETHERALD R T, DUNNE K A, et al. Increasing risk of great floods in a changing climate[J]. *Nature*, 2002, 415(6871): 514
- [2] PALMER T N, RÄISÄNEN J. Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate[J]. *Nature*, 2002, 415(6871): 512
- [3] EASTERLING D R, MEEHL G A, PARMESAN C, et al. Climate extremes: observations, modeling, and impacts[J]. *Science*, 2000, 289(5487): 2068
- [4] 中国工程院“世纪中国可持续发展水资源战略研究”项目组. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告[J]. *中国工程科学*, 2000, 2(8): 1
- [5] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(1): 1
- [6] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295
- [7] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 513
- [8] 尚华明, 范煜婷, 张瑞波, 等. 帕米尔高原东部径流量变化及其对气候变化的响应[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(3): 352
- [9] ZHANG Q, SUN P, LI J F, et al. Spatiotemporal properties of droughts and related impacts on agriculture in Xinjiang, China[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(7): 1254
- [10] 陈亚宁, 王怀军, 王志成, 等. 西北干旱区极端气候水文事件特征分析[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(1): 1
- [11] 夏军, 刘春蓁, 任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(1): 1
- [12] 夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战[J]. *资源科学*, 2002, 24(3): 1
- [13] SHI W Z, HUANG S Z, LIU D F, et al. Drought-flood abrupt alternation dynamics and their potential driving

- forces in a changing environment[J]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2021, 597: 126179
- [14] 翁白莎, 严登华. 变化环境下我国干旱灾害的综合应对[J]. *中国水利*, 2010(7): 4
- [15] 徐翔宇, 郦建强, 李原园. 干旱灾害风险调控的理论技术分析[J]. *中国水利*, 2019(5): 30
- [16] 严登华, 任立良, 王国庆, 等. 关于陆地水循环演变及其在全球变化中的作用研究设想[J]. *水科学进展*, 2016, 27(6): 935
- [17] WORDEN J, NOONE D, BOWMAN K, et al. Importance of rain evaporation and continental convection in the tropical water cycle[J]. *Nature*, 2007, 445(7127): 528
- [18] 苏宏超, 沈永平, 韩萍, 等. 新疆降水特征及其对水资源和生态环境的影响[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(3): 343
- [19] 李元寿, 贾晓红, 鲁文元. 西北干旱区水资源利用中的生态环境问题及对策[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 217
- [20] 刘伟, 姜逢清, 李小兰. 新疆气候变化的适应能力时空演化特征[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(3): 531
- [21] SHEN Y, CHEN Y, LIU C, et al. Ecohydrology of the inland river basins in the northwestern arid region of China: PREFACE[J]. *Ecohydrology*, 2013, 6(6): 905
- [22] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. *水利学报*, 2013, 44(7): 779
- [23] 杨莲梅, 刘晶. 新疆水汽研究若干进展[J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(2): 1
- [24] 谢泽明, 周玉淑, 杨莲梅. 新疆降水研究进展综述[J]. *暴雨灾害*, 2018, 37(3): 204
- [25] 陈亚宁, 李稚, 方功焕. 中亚天山地区关键水文要素变化与水循环研究进展[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(1): 1
- [26] SHEN Y J, SHEN Y J, GUO Y, et al. Review of historical and projected future climatic and hydrological changes in mountainous semiarid Xinjiang (northwestern China), Central Asia[J]. *Catena (Giessen)*, 2020, 187: 104343
- [27] 何昌原, 张鹏, 李驰原, 等. 中国安全文化科学研究热点与演进: 基于2010—2019年中国知网数据库的知识图谱分析[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(5): 152
- [28] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242
- [29] 巴哈尔古丽. 新疆偏东地区夏季一次大降水过程分析[J]. *新疆气象*, 1992(3): 16
- [30] 姚俊强, 杨青. 近10a我国大气水汽研究趋势及进展[J]. *干旱气象*, 2011, 29(2): 151
- [31] 刘蕊. 新疆大气水汽含量、水汽通量及其净收支的计算和分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2009
- [32] 王凯, 孙美平, 巩宁刚. 西北地区大气水汽含量时空分布及其输送研究[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(2): 290
- [33] HAN S J, TANG Q H, XU D, et al. Observed near-surface atmospheric moisture content changes affected by irrigation development in Xinjiang, Northwest China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 130(1/2): 511
- [34] GUAN X F, YANG L M, ZHANG Y X, et al. Spatial distribution, temporal variation, and transport characteristics of atmospheric water vapor over Central Asia and the arid region of China[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 172: 159
- [35] 黄小燕, 王圣杰, 王小平. 1960—2015年中国西北地区大气可降水量变化特征[J]. *气象*, 2018, 44(9): 1191
- [36] YAO J Q, CHEN Y N, YANG Q. Spatial and temporal variability of water vapor pressure in the arid region of Northwest China, during 1961-2011[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 123(3/4): 683
- [37] 任国玉, 袁玉江, 柳艳菊, 等. 我国西北干燥区降水变化规律[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(1): 1
- [38] 张扬, 李宝富, 陈亚宁. 1970—2013年西北干旱区空气中水汽含量时空变化与降水量的关系[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(6): 1043
- [39] CHEN R, ZHANG M, WANG S, et al. Spatio-temporal variation of hourly rainfall intensity and its affecting factors in Xinjiang in summer during the period from 2008 to 2014[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(6): 1240
- [40] 戴新刚, 李维京, 马柱国. 近十几年新疆水汽源地变化特征[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(12): 1651
- [41] 李万莉, 王可丽, 傅慎明, 等. 区域西风指数对西北地区水汽输送及收支的指示性[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(1): 28
- [42] YATAGAI A. Evaluation of hydrological balance and its variability in arid and semi-arid regions of Eurasia from ECMWF 15 year reanalysis[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(14): 2871
- [43] 王秀荣, 徐祥德, 王维国. 西北地区春、夏季降水的水汽输送特征[J]. *高原气象*, 2007, 26(4): 749
- [44] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. *水科学进展*, 2005, 16(3): 432
- [45] 姚世博. 新疆降水水汽来源的模拟研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021
- [46] ZHOU Y S, XIE Z M, LIU X. An analysis of moisture sources of torrential rainfall events over Xinjiang, China[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(10): 2109
- [47] YAO S B, JIANG D B, ZHANG Z S. Moisture sources of heavy precipitation in Xinjiang characterized by meteorological patterns[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2021, 22(8): 2213
- [48] YAO S B, JIANG D B, ZHANG Z S. Lagrangian simulations of moisture sources for Chinese Xinjiang precipitation during 1979-2018[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(2): 216
- [49] 杨柳, 杨莲梅, 汤浩, 等. 2000—2011年天山山区水汽输送特征[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2013, 7(3): 21

- [50] 刘晶, 周玉淑, 杨莲梅, 等. 伊犁河谷一次极端强降水事件水汽特征分析[J]. 大气科学, 2019, 43(5): 959
- [51] 刘永强, 何清, 张宏升, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地地气相互作用参数研究[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1294
- [52] 马耀明, 胡泽勇, 田立德, 等. 青藏高原气候系统变化及其对东亚区域的影响与机制研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(2): 207
- [53] 马耀明. 青藏高原地气相互作用过程高分率(逐小时)综合观测数据集[DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, DOI: 10.11888/Meteoro.tpcd.270910. CSTR: 18406.11. Meteoro.tpcd.270910.2020
- [54] 蓝永超, 沈永平, 苏宏超, 等. 全球变暖情景下新疆降水的变化[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 66
- [55] 姚俊强, 杨青, 胡文峰, 等. 天山山区空中水汽含量及与气候因子的关系[J]. 地理科学, 2013, 33(7): 859
- [56] PIAO S, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467(7311): 43
- [57] ZHANG Q, GU X H, 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

Hydrological cycle and impacting factors in Xinjiang as analyzed with CiteSpace

ZHANG Qiang HE Changyuan SHEN Zexi FAN Keke

(Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Sciences, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Temporal and spatial characteristics, mechanism and influence of hydrological cycle are core issues in hydrology and water resources research, and are key in flood and drought disaster prevention, mitigation and relief. A total of 252 papers on water vapor cycle in Xinjiang, China, from China National Knowledge Infrastructure (CNKI), 256 papers from Web of Science (WOS) were subject to analysis with CiteSpace to obtain a knowledge atlas. Hotspot issues were tracked for atmospheric, hydrological and meteorological scholars. This atlas will help to understand research hotspots and to develop trends of water vapor-related issues in Xinjiang, China.

Keywords Xinjiang; water vapor; knowledge atlas; CiteSpace; bibliometrics

【责任编辑:刘先勤】