

基于动态响应模型的 干旱驱动及传播方向研究综述

邢贞相¹, 刘明阳¹, 刘云涛^{2*}, 关越¹

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
2. 黑龙江省安澜工程技术咨询有限公司, 哈尔滨 150080)

摘要:中国独特的地理位置、气候特点和粮食生产需求对干旱监测和防治提出了迫切要求。本文介绍了干旱的成因、类型, 归纳了干旱事件的识别、驱动因子分析的方法, 并从干旱的水文气象因子间存在相互影响的研究视角, 介绍了一种可以用于干旱驱动因子分析的动态响应关系模型。分析总结了时间序列相关分析的局限以及因果关系在干旱研究中应用的发展过程, 进而介绍了时间序列因果关系分析方法并重点深度分析了格兰杰因果关系在水文气象领域的应用前景, 可为干旱驱动及传播方向的研究提供新途径。

关键词:干旱驱动; 动态响应模型; 干旱传播; 向量自回归模型; 格兰杰因果

中图分类号: P343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2736(2024)-0062-8

0 引言

水资源是不可替代的基础自然资源, 在生产生活中占据重要地位^[1,2], 水也是战略性经济资源, 是经济发展的基础。然而我国面临的水资源问题十分突出, 洪旱灾害、水资源短缺已成为制约我国社会经济高速发展的主要因素^[2]。

从洪旱灾害时空分布上看, 干旱研究需要了解其时空上的分布特征。在全国自然灾害损失统计中, 气象灾害占全部灾害损失的61%, 而干旱灾害损失占气象灾害损失的55%, 干旱是我国主要的自然灾害之一^[3]。西北绝大部分地区受自然干旱的影响, 属于干旱、半干旱区, 是全国干旱最严重的地区, 近20年中国西北地区产生了“暖湿化”现象^[4]。东南沿海旱涝频次具有明显的地域分异, 旱灾呈现为“南少北多”的格局、涝灾呈现“南重北轻”的格局, 本世纪初, 东南地区旱灾大幅增加^[5]。张筱渲等^[6]研究发现东北地区冬季干旱有所减轻, 而春夏秋三季干旱有所加重, 该地区中南部干旱有加重趋势, 而北部则呈现湿润趋势。

从水资源短缺的问题来看, 干旱研究需要了

解区域水资源总量和人水匹配程度。国家统计局给出水资源总量的定义为: 区域内降水形成的地表和地下产水量, 即地表径流量与降水入渗补给量。降水量的减少会导致区域水资源总量的减少, 当总量不能满足社会经济发展所需水资源量时, 就会产生水资源短缺问题^[7]。王红瑞等对干旱和水资源短缺问题进行了探讨, 分析了干旱和水资源短缺之间的相互作用^[8], 西北地区地形复杂, 境内沙漠与绿洲共存、灌溉农业区、雨养农业区并存, 不同土地利用类型和不同区域农业区、林业区、畜牧业区对水分的需求不同, 使得该区域对水资源短缺评估困难^[9]。东南诸河区水资源数量较丰沛、水质总体较好, 但局部地区水污染严重, 且该区域存在水资源利用效率低, 水资源开发利用程度低等问题, 制约了区域经济社会的可持续发展, 水资源问题将更加突出^[10]。东北地区则是存在农业水土资源匹配欠佳, 耕地多, 占有的水资源量却较少, 匹配系数低于全国平均水平的问题^[11], 对于干旱—半干旱区水资源相对缺乏的东北地区, 在降水量不大、农业需水较高的制约下, 水资源短缺现象和干旱现象的相互作用会使水资源短缺更加严重。干旱和水

资源短缺之间存在共同点,二者都属于涉水风险,关系密切,且存在共同的致险因子。干旱是导致水资源短缺的基础条件之一,而当干旱发生时,人类活动对其影响程度较低^[12],故应分析干旱的形成机制和响应机制,进而从干旱的形成机制入手提出针对不同干旱的应对措施,从干旱响应机制入手分析干旱传播的方向和时滞,这更有利于做出合理决策以减轻干旱和水资源短缺的相互促进作用,从而避免造成更大损失。因此,进行干旱传播和演化机制研究存在其必要性。

1 干旱驱动及传播研究进展

干旱是指长期无降水或降水不足,水分供求失衡导致的气象灾害,是最严重的气象灾害之一。由干旱导致的水利工程供水不足而引起的水短缺,并对生活、生产和生态造成危害的事件就是干旱灾害。干旱灾害可能会导致农作物减产或欠收,进而引发粮食问题甚至饥荒。干旱通常可以归纳为四种情况,分别是气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱^[13],这四种情况可以分别表示气候、径流、作物和社会经济水分供需的不平衡^[14]。气象干旱是由降水量和潜在蒸发量的长期水分收支失衡引发的,即蒸发量超过降水量,水分收入无法弥补支出的空缺而形成的一种干旱^[15,16],也可以用某时段低于平均值的降水来定义^[13]。农业干旱是土壤水分供给无法满足农作物对水分的需求,进而导致作物水分亏缺,最终体现在作物生长受限、减产或绝收的一种干旱^[17]。水文干旱通常指地表水量、地下水量持续性偏少,无法满足用水需求的现象,常以径流量和地下水量的亏损来衡量^[15,18]。社会经济干旱指的是自然系统-人类社会系统水资源供需不平衡造成的水短缺现象^[19]。

干旱事件具有发生缓慢、连续、灾前无明显征兆的特点,故而需要对干旱监测、识别和评价,并据此制定合理的应对措施。干旱事件的识别和评价需要构建相应的干旱指标(干旱指数),因此干旱指标也就成为研究干旱的基础^[20]。由于不同干旱类型关注的侧重点不同,而出现了不

同的干旱指标用以量化不同类型的干旱:从关注方向来看,主要分为气象干旱指数、农业干旱指数、水文干旱指数和社会经济干旱指数四种方向^[21];从应用的技术及考虑的尺度角度,还有遥感干旱指数和综合干旱监测指数两类^[22]。干旱指数的研究存在一个发展的过程,在所有干旱类型中,气象干旱表现得最直接,因此早期干旱指数通常是气象干旱指数^[23],这其中包括降水距平百分率、基于降水量的标准差指标^[24]、Z指数、标准化降水指数(SPI)等等。随着干旱研究的深入,一些复杂的能够表征部分干旱机理的指标逐渐产生,如考虑了温度和降水共同影响的Ped干旱指数、德马顿(De. Martonne)干旱指数^[25],考虑了降水和潜在蒸发共同影响的标准化降水蒸散指数(SPEI)等等。由于潜在蒸发对气象干旱产生了重要的影响,近10年基于SPEI的研究逐渐增多,Satish Kumar等^[26]分析了包括SPEI在内的多种干旱指标在印度南部的干旱特征识别工作,发现年统计尺度该指数和GRACETWS的相关度高于季尺度和6个月尺度。沈国强^[27]分析了SPEI指数在东北地区的实用性,发现该指数不仅满足数理统计要求,而且与干旱灾情数据关联性极高,在东北地区干旱预测和研究中适用性较好。水文干旱指标通常以径流量大小为主要考虑因素^[28]。李根运用SRI、SPEI和SSI分别表征水文、气象、农业干旱并构建了一种综合性指数分析挠力河流域灌区干旱特征。Shraddhanand Shukla^[29]采用SRI指数和SPI指数在融雪区干旱事件的行为进行了对比,得到SRI可以用于描述水文干旱的结论。农业干旱一般通过灾害损失评价旱灾的严重程度,然而这种评价方法不利于在干旱发生前进行及时的监测和反应,由此基于其他农业相关变量构建的农业干旱指数得以发展,其中土壤水分是农业干旱指标中最经常考虑的变量,依此构建的标准化土壤湿度(水分)指数常被用来监测和分析农业干旱情况。冯凯等^[30]利用标准化土壤湿度指数表征了农业干旱,并分析了西北地区气象干旱和农业干旱之间的关系,构建气象、农业干

旱变量间响应概率特征曲线。陈莉会等^[31]同样运用标准化土壤湿度指数对农业干旱进行识别,并分析不同时间统计尺度农业干旱时空演变。

独立的干旱事件可以运用上述干旱指标和方法进行识别与分析,然而干旱的形成原因复杂,不同干旱类型之间也存在响应与传播关系,这种关系是通过相互关联的水文循环和陆气系统进行的^[32],是一种在不同的时间空间中干旱类型间传播或转化的特征。目前已有很多研究详细地介绍了干旱传播的定义、特征、统计方法、影响因素及研究的重难点。目前干旱传播研究的重难点在于干旱传播驱动的机理研究、多元数据多模型融合研究、旱灾链条延伸等方向^[33,34]。在张强等^[35]的文章中指出,干旱的传递会存在一个“气象干旱—农业干旱—水文干旱—生态干旱—社会经济干旱”的链式过程。Xuan Zhang^[36]也明确了干旱从降水到土壤水分到径流量到地下水的传播过程。然而干旱传播的链条也存在争议,田丰等^[37]总结该链条中水文干旱会导致农业干旱,农业干旱再反作用于水文干旱。田丰等^[37]通过总结干旱传播领域研究成果,归纳出干旱传播研究的基本框架“特征—过程—机制”,并指明了干旱传播研究中存在的不足之处,如缺少空间维度传播分析、视角仅限于干旱传播的概率研究等。最后田丰指出了干旱响应与传播研究的意义即干旱传播是干旱研究的重要内容,是制定御旱、抗旱措施的前提。

2 向量自回归模型的应用

向量自回归模型(VAR)是2011年诺贝尔经济学奖得主之一的克里斯托夫·A·西蒙斯教授于20世纪80年代提出的一种计量经济学模型。上世纪70年代后期,由于传统大型联立方程模型在预测和政策分析方面的失效,该方法受到了计量经济学家的质疑与批评。Sims教授认为模型中内生变量、外生变量不应人为假定,因为这不一定符合经济运行的实际^[38]。Sims以统计学相关理论为基础创立并发展了VAR模型^[39],这种模型具有不区分内、外生变量,不

前提约束条件,易于估计,具有良好的实用性的特点,在宏观经济学领域大量应用^[40]。随着模型不断发展,VAR模型也被其他领域学者使用,用来研究的领域逐渐拓展,包括环境科学与资源利用领域、工农业经济领域、旅游、人口学等领域。由于VAR模型可以用来分析变量间的动态关系,因此该模型越来越多的应用在多变量时间序列分析中^[40]:

(1)在计量经济学领域,大量研究者运用VAR模型分析同变量存在关联的宏观经济数据带来的影响,并相应地给出结论和政策建议。付晓煜^[41]注意到银行流动性问题备受重视,于是运用VAR模型分析了系统重要性银行流动风险的影响因素,得出了宏观外部因素比内部因素更能影响其自身流动性风险的结论。陈静^[42]以微信理财通产品为例分析了货币市场、资本时长和外汇市场对基金收益率的影响,并给投资者提出了建议。李晶^[43]选取了包括地区生产总值、土地供应面积等序列,分析北京房地产价格的影响因素,并使用这些序列构建VAR模型,通过脉冲响应分析房价VAR模型受冲击的动态变化和变量扰动方向,运用方差分解分析每个冲击对变量变化的贡献率,得出了商品房可售面积和贷款利率会对房价造成直接影响的结论。杨尚晨^[44]则是分析了数字普惠金融对城乡居民消费的影响,通过脉冲响应得到了,数字普惠金融会给居民消费带来先上升后下降,最终趋于0的扰动,方差分解结果,得出了数字普惠金融对农村居民的消费促进作用强于城镇居民的结论。

(2)在其他领域也有采用VAR模型进行影响因素分析的案例,这些领域多是从计量经济学领域发展而来的。在(1)部分提到的研究中可以发现,脉冲响应和方差分解可以分别提供影响因子带来冲击给模型扰动的方向和影响因子变化对变量的影响程度,比如在自然资源、农业政策及农业产值分析方向。许朗等^[45]分析了农田水利投资与农业经济增长的动态关系,得到陕西水利建设投资变化整体表现为正向响应。曲立等^[46]运用VAR模型分析了粮食产量的影响因

素,发现农用化肥施用量对粮食产量冲击最大,并给出了保证粮食增产的建议。刘国昊等^[47]通过构建农业产业用水和经济增长序列构建的VAR模型分析农业产值和农业用水量之间的关系,通过脉冲响应分析了提高未来农业产值的政策和方法。在环境科学与资源利用领域,大量的研究对碳排放的影响因子进行了分析^[48-51],在旅游分析领域,研究多集中在旅游业对经济增长的影响^[52,53]。

近年来,应用VAR模型解决问题的领域不断扩大,已远超经济学相关领域,尤其在自然资源和生态环境方面的研究势头强劲^[40]。VAR模型能够使用脉冲响应和方差分解给出因子对变量的扰动方向及影响程度,该功能可以用在干旱驱动因子对干旱的驱动分析中,可以明确给出各驱动因子对干旱的扰动方向和影响强弱。因此,在气候变化领域的研究中也可引入此方法,用以研究干旱的形成机制,并进一步分析干旱的驱动机制和动态响应机制。

3 时间序列因果发现研究进展

3.1 因果关系研究的历史沿革

因果关系及因果观是各派哲学家们长期以来争论的中心之一^[54],也是科学研究的重要使命^[55]。David·Hume是英国近代著名哲学家,他推翻了传统观念的因果关系,创建了基于经验论的因果观^[56]。后来Hart等人主张“原因是导致结果发生变动的一种变动”,因果性的概念众说纷纭,哲学家和科学家对因果关系的探讨也从未停止^[55]。上世纪90年代,禄存义对因果关系进行了分类,他总结出因果关系发现的五种方法(契合法、差异法、契合差异并用法、共变法、剩余法)具有半经验半理性的性质,依此方法得到的因果关系不能确保得到的就是真正的因果关系^[57]。近几十年,随着科学技术的发展,大数据和人工智能研究的深入,利用数据评价变量之间的因果性,从而发现因果关系成为了研究的热点问题之一^[58]。

3.2 时间序列相关分析在干旱传播研究中局限性

时间序列分析同样也是当前应用于干旱传播研究的热点问题,如何从时间序列中抓取有效信息在诸多领域都具有重要意义^[59]。在研究多变量系统的运行机理时,人们常常分析系统内变量间的相关关系,这也是最简便实用的分析方法。以干旱传播为例,很多研究者通过分析不同干旱类型之间或者不同时间统计尺度下干旱指数的相关性,判断干旱传播最可能的时滞情况,使用如Pearson相关系数、Spearman秩相关系数等方法。然而相关性并不能说明不同干旱类型或不同统计尺度下,干旱指数是否存在因果关系。变量间存在相关性是变量间存在因果关系的必要非充分条件。随着模型复杂度的增加,相关性分析可能不再满足建模需求^[59],因此需对观测到的数据进行因果关系发现研究。

3.3 基于时间序列因果关系及其不同领域的应用研究

基于观测数据的因果关系发现可以分为基于时间序列数据的因果关系发现方法和非时间序列的因果关系发现方法^[60]。非时间序列因果关系发现可采用的方法有基于约束的方法、基于因果函数模型的方法和混合型方法^[61],时间序列的因果关系发现方法可以分为基于信息论的因果分析、基于状态空间的时序分析、格兰杰因果分析三类^[59]。格兰杰因果关系检验是一种基于统计假设检验来进行因果关系判断的方法,它由2003年诺贝尔经济学奖得主克莱夫·格兰杰于1969年提出,后经Sims发展。目前格兰杰因果关系检验已经是经济学家们普遍接受的因果检验方法。这种方法的理念是通过比较“已知上一时刻所有信息,这一时刻Y(因变量)的概率分布情况”和“已知上一时刻除X(自变量)以外的所有信息,这一时刻Y的概率分布情况”来判断X对Y是否存在因果关系,这种因果检验模型利用观测数据可以从统计意义上检验变量之间的因果性^[62,63]。这种模型简单实用,因此在经济

分析领域得到的广泛的应用。在其他学科,格兰杰因果检验也在逐步地推广,近年来该模型已从社会经济学科领域成功引入到自然科学领域^[64]。

格兰杰因果检验从经济学向社会科学、自然科学和工程科学的引入花费了约 30 年时间。上世纪 80 年代该方法主要应用于经济学领域,至 90 年代发展到了社会科学其他领域和社会工程—自然科学交叉领域,到 21 世纪以后该方法已在自然科学于工程科学领域快速发展^[64]。目前该模型的主要应用领域以社会科学—经济学相结合为主,社会科学—自然科学相结合次之,在医学、自然科学中的气象科学^[65,66]、地理学的应用较少。干旱涉及众多自然和社会因素,因此该方法在水文学、气象学领域势必会有广阔的应用前景。

4 结语

综上,由于水文气象因素间存在相互影响的特点,干旱指标的变量及驱动因子间也应存在动态响应关系,可以以此为基础构建动态响应模型,并判断干旱的驱动因子及其作用方向。采用短历时干旱指标构建向量自回归模型将有助于分析特定区域的干旱驱动机制,并依此识别干旱主要影响因子,以便针对特定区域的干旱防御和治理提出应对解决方案。借助格兰杰因果关系可以判断干旱传播链条是否存在于特定区域,并分析干旱传播短期滞时,可为旱灾防灾减灾救灾工作的“两个预防”、“三个转变”提供技术支持。

参考文献(References):

- [1] 王瑗, 盛连喜, 李科, 等. 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究[J]. 水资源与水工程学报, 2008(3): 10-14.
- [2] 张利平, 夏军, 胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116-120.
- [3] 倪深海, 吕娟, 刘静楠, 等. 变化环境下我国干旱灾害演变趋势分析[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(10): 1-7.
- [4] 汤连盟, 吕伟才, 蒲涛, 等. 西北地区干旱时空动态分布及成因分析[J]. 遥感信息, 2023, 38(5): 66-72.
- [5] 王米雪, 延军平, 李双双. 1960-2013 年中国东南沿海地区旱涝时空变化特征及其趋势分析[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2307-2315.
- [6] 张筱渲, 王蕊, 单凤君, 等. 1961—2020 年东北三省干旱时空分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(1): 78-88.
- [7] 费卓越. 基于改进模糊评价方法的干旱区水资源短缺风险综合评估[J]. 水利技术监督, 2022(3): 148-152.
- [8] 王红瑞, 洪思扬, 秦道清. 干旱与水资源短缺相关问题探讨[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 1-4+24.
- [9] 赵梦凡, 周秉荣, 赵彤, 等. 青海省草地植被干旱评估及驱动力分析研究[J]. 草地学报, 2021, 29(S1): 93-103.
- [10] 苏爱平. 东南诸河区水资源形势及管理对策浅议[J]. 水利科技, 2012(2): 6-8.
- [11] 刘彦随, 甘红, 张富刚. 中国东北地区农业水土资源匹配格局[J]. 地理学报, 2006(8): 847-854.
- [12] 张伟光, 王红瑞, 范琳琳, 等. 干旱风险与水资源短缺风险关系辨析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(4): 418-422.
- [13] 孙荣强. 干旱定义及其指标评述[J]. 灾害学, 1994(1): 17-21.
- [14] Hao C, Zhang J, Yao F. Combination of multi-sensor remote sensing data for drought monitoring over Southwest China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 35: 270-283.
- [15] 姚璐. 海河流域气象干旱与水文干旱演变特征及响应分析[D]. 中国矿业大学, 2023.
- [16] 朱光磊. 嫩江流域植被动态变化及其对气象干旱的响应研究[D]. 延边大学, 2022.
- [17] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1835-1848.
- [18] 王孟浩, 江善虎, 任立良, 等. 基于时变参数和阈值的非平稳水文干旱评估方法构建[J]. 水利

- 学报: 1-12.
- [19] 周佳伟, 陈晓宏. 气象、水文和社会经济干旱的特征与响应关系[J]. 水文, 2022, 42(4): 18-22.
- [20] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007(1): 60-65.
- [21] 李伟光, 刘少军, 侯美亭, 等. 气象与农业干旱指数研究进展[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(3): 76-82.
- [22] 宋艳玲. 全球干旱指数研究进展[J]. 应用气象学报, 2022, 33(5): 513-526.
- [23] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展, 2004(6): 982-991.
- [24] Wang Z, Zhai P, Zhang H. Variation of drought over northern China during 1950 - 2000[J]. Journal of Geographical Sciences, 2003, 13(4): 480-487.
- [25] 李柏贞, 周广胜. 干旱指标研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1043-1052.
- [26] Satish Kumar K, Venkata Rathnam E, Sridhar V. Tracking seasonal and monthly drought with GRACE - based terrestrial water storage assessments over major river basins in South India[J]. Science of The Total Environment, 2021, 763: 142994.
- [27] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. SPEI 指数在中国东北地区干旱研究中的适用性分析[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3787-3795.
- [28] 李根. 基于区域水文循环的挠力河流域灌区干旱特征及成因研究[D]. 东北农业大学, 2023.
- [29] Funk C, Shukla S. Droughts, Governance, Disasters, and response systems [M]//Drought Early Warning and Forecasting. Elsevier, 2020: 1-21.
- [30] 冯凯, 李彦彬, 许桂平, 等. 西北地区农业干旱对气象干旱的时空多角度响应[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 59-69.
- [31] 陈莉会, 贺中华, 潘杉, 等. 基于不同时间尺度的喀斯特农业干旱时空演变特征及驱动探测——以贵州省为例[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2): 136-148.
- [32] 张翔, 黄舒哲, 管宇航. 干旱传播的研究进展、挑战与展望[J]. 地球科学进展, 2023, 38(6): 563-579.
- [33] 智协飞, 田云涛, 陈昌春, 等. 干旱传播研究进展与展望 I——干旱传播含义、特征、类型与研究方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 625-653.
- [34] 智协飞, 田云涛, 陈昌春, 等. 干旱传播研究进展与展望 II——影响因素与干旱传播研究展望[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 654-668.
- [35] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 500-521.
- [36] Zhang X, Hao Z, Singh V P, et, al. Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors [J]. Science of The Total Environment, 2022, 838: 156021.
- [37] 田丰, 杨建华, 刘雷震, 等. 地理学视角的干旱传播概念、特征与影响因素研究进展[J]. 地理科学进展, 2022, 41(1): 173-184.
- [38] 张延群. 向量自回归(VAR)模型中的识别问题——分析框架和文献综述[J]. 数理统计与管理, 2012, 31(5): 805-812.
- [39] 刘海莺, 张华新. 向量自回归模型及其在宏观计量经济学的演进发展[J]. 统计与决策, 2013(16): 62-64.
- [40] 王红利. 建三江垦区灌溉用水量对降水和人类活动的动态响应研究[D]. 东北农业大学, 2023.
- [41] 付晓煜. 基于 VAR 模型的系统重要性银行流动性风险影响因素研究[D]. 辽宁大学, 2023.
- [42] 陈静. 基于 VAR 模型的收益率影响因素研究[D]. 东北财经大学, 2023.
- [43] 李晶. 基于 VAR 模型的北京市房地产价格影响因素分析[D]. 对外经济贸易大学, 2022.
- [44] 杨尚晨. 数字普惠金融对山西城乡居民消费支出的影响[D]. 山西财经大学, 2023.
- [45] 许朗, 凌玉, 耿献辉, 等. 农田水利投资与农业经济增长的动态关系——基于全国省级面板 VAR 模型[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(3): 458-461.
- [46] 曲立, 栾慧雨, 高凯焯, 等. 基于 VAR 模型的粮食产量影响因素分析[J]. 数学的实践与认识, 2022, 52(4): 61-73.
- [47] 刘国昊, 王鹏程, 王海英, 等. 基于 VAR 模型的

- 新疆农业水资源配置研究[J]. 塔里木大学学报, 2020, 32(3): 113-120.
- [48] 陆文捷. 基于 VAR 模型的中国碳排放与经济增
长的分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2021(12): 3
-6+25.
- [49] 张余, 姜博, 赵映慧. 基于 VAR 模型的广东省土
地利用碳排放影响因素研究[J]. 福建农业学报,
2022, 37(8): 1100-1108.
- [50] 漆雁斌, 韩绍葵. 四川省碳排放量影响因素的
VAR 模型分析[J]. 中国经贸导刊(中), 2019
(10): 36-38.
- [51] 于晓玉. 我国金融发展对碳排放影响的实证研究
[D]. 山西财经大学, 2023.
- [52] 孟利, 关志强. 山东省全域旅游与区域经济的
动态关系研究——基于 VAR 模型[J]. 资源
开发与市场, 2020, 36(4): 442-448.
- [53] 蔡芳娜. 基于 VAR 模型的福建省旅游业对经济
增长影响研究[J]. 三明学院学报, 2021, 38(5):
38-44.
- [54] 徐天兴. 浅谈休谟的因果观[J]. 文化创新比较
研究, 2018, 2(32): 36+38.
- [55] 曹永福. 格兰杰因果性检验评述[J]. 数量经济
技术经济研究, 2006(1): 155-160.
- [56] 王志刚. 简析黑格尔对休谟因果关系理论的批评
[J]. 福建论坛(社科教育版), 2011(12): 11
-12.
- [57] 禄存义. 因果律及其发现的方法[J]. 文史哲,
1990(1): 90-93.
- [58] 英乃文, 苗旺, 耿直. 因果作用评价与因果关系
发现[J]. 军事运筹与评估, 2022, 37(3): 10
-19.
- [59] 任伟杰, 韩敏. 多元时间序列因果关系分析研究
综述[J]. 自动化学报, 2021, 47(1): 64-78.
- [60] 蔡瑞初, 伍运金, 陈薇, 等. 面向多元时间序列
的群体因果关系发现算法[J]. 计算机工程,
2023, 49(2): 127-135.
- [61] 蔡瑞初, 陈薇, 张坤, 等. 基于非时序观察数据
的因果关系发现综述[J]. 计算机学报, 2017, 40
(6): 1470-1490.
- [62] 孔凡文, 才旭, 于森. 格兰杰因果关系检验模型
分析与应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学
版), 2010, 26(2): 405-408.
- [63] 张书云. Granger 因果检验用法探讨[J]. 数理统
计与管理, 2009, 28(2): 244-251.
- [64] 郑秋红, 李婧华, 吴灿. “格兰杰因果检验”及其
应用——基于文献计量的分析[J]. 气象科技进
展, 2014, 4(3): 70-73.
- [65] Mosedale T J, Stephenson D B, Collins M, et, al.
Granger Causality of Coupled Climate Processes: O-
cean Feedback on the North Atlantic Oscillation[J].
Journal of Climate, 2006, 19(7): 1182-1194.
- [66] 曹鸿兴, 郑艳, 虞海燕, 等. 气候检测与归因的
格兰杰检验法[J]. 气候变化研究进展, 2008(1):
37-41.

作者简介:

第一作者: 邢贞相, 1976 年生, 男, 山东胶南人, 博士, 东
北农业大学, 教授, 主要研究方向为水文学及水资源。

Email: zxxing@neau.edu.cn;

通讯作者: 刘云涛, 1974 年生, 男, 黑龙江密山人, 本科,
黑龙江省安澜工程技术咨询有限责任公司, 高级工程
师, 主要研究方向为水利水电工程。Email: 175492081@
qq.com

A Review of Drought – Driven and Propagation Directions based on Dynamic Response Models

XING Zhenxiang¹, LIU Mingyang¹, LIU Yuntao^{2*}, GUAN Yue¹

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150006;

2. Heilongjiang Anlan Engineering Technology Consulting Co. , Ltd, Harbin 150080)

Abstract: Due to the unique geographical location, climatic characteristics and grain production requirements in China, drought prevention and control is greatly significant. This paper summarizes the methods of drought monitoring and identification of driving factors, and introduces a dynamic response relationship model that can be used in the analysis of drought drivers from the perspective of the interaction between hydrometeorological factors. By pointing out the limitations of time series correlation analysis and the diachronic evolution of causality using in research of drought, the method of time series causality analysis is introduced, and the application prospect of Granger causality in the field of hydrometeorology is emphatically suggested. It can provide a new idea for the study of drought propagation.

Key words: drought – driven; dynamic response; drought propagation; vector autoregressive model; granger cause and effect