

气候变化背景下 东北地区干旱演变规律研究

◎来文立 赵志忠 著



中国农业科学技术出版社

气候变化背景下 东北地区干旱演变规律研究

◎来文立 赵志忠 著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

气候变化背景下东北地区干旱演变规律研究 / 来文立, 赵志忠著. —北京:
中国农业科学技术出版社, 2019. 12

ISBN 978-7-5116-3517-4

I. ①气… II. ①来… ②赵… III. ①干旱—研究—东北地区 IV. ①P426.616

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 294945 号

责任编辑 崔改泵 李 华

责任校对 李向荣

出版者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街12号 邮编: 100081

电 话 (010) 82109708 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)
(010) 82109709 (读者服务部)

传 真 (010) 82106650

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京建宏印刷有限公司

开 本 710mm × 1 000mm 1/16

印 张 7.25

字 数 122千字

版 次 2019年12月第1版 2019年12月第1次印刷

定 价 85.00元

❖ 版权所有 · 翻印必究 ❖

前 言

随着气候变化的加剧，干旱、洪涝、高温热浪、低温冷害等极端气候事件频发，尤以干旱灾害波及范围最广，持续时间最长，由此导致的环境、生态、社会问题凸显。

东北地区作为我国重要的粮食、工业和能源基地，地处东亚季风区，是连接太平洋和亚洲大陆的重要地区，其水—热过程极易受到气候变化的影响，是我国重要的气候脆弱区之一；位于我国干旱—湿润过渡带，冬春少雨，夏季降水变率大，干旱发生频繁并由来已久，尤其是1990s中期以来，干旱不断加剧，导致生态系统的脆弱性随之加大，制约了东北地区的农业发展和生态系统平衡。根据农业部门统计结果，1980s时期东北地区平均每年受到干旱影响的面积可达300万公顷，并且干旱影响的面积一直处于增长态势，1990s增长约33%，到2000s增加到550万公顷，干旱程度明显加剧。另外，因旱损失由2004年的118.9亿元增加到2007年的超过303.7亿元。因此，干旱已成为影响该地区的自然生态系统平衡，限制经济社会发展的重要因素。

中国的科学工作者，一向对干旱的研究十分重视，并取得了丰硕的成果。近年来，对东北地区的干旱缺水问题依然非常重视，在国家科委、水利部、国家自然科学基金委员会、中国科学院、中国气象局等单位的积极支持下，通过遥感、地理信息技术等手段，针对东北地区干旱特征、规律、预测，以及各项防旱抗旱技术措施和水利建设等方面开展了卓有成效的研究。但由于干旱的频繁发生和水资源紧缺，现实的生态平衡和农业生产依然未摆脱干旱的困扰。我们在北京师范大学水科学研究院王红瑞教授的鼓励和指导下，针对东北地区干旱演变规律进行了系统地分析与研究，

并总结成书。

本书内容共七章。第一章为绪论，主要介绍本研究的背景和国内外对干旱研究的进展；第二章为研究区概况与数据来源，首先对东北地区的气候条件和历史旱灾概况进行介绍，其次对研究中涉及的数据资料进行整理及预处理；第三章是干旱研究的基础内容，在分析东北地区气候变化特征的基础上，明晰东北干旱的气候本底值；第四章是干旱指标的选取与验证，首先对不同蒸散发算法的气象干旱指标（SPEI）进行计算和分析，其次利用CCI遥感土壤湿度数据分别从波动一致性、趋势一致性和预报准确率3个方面，对SPEI在农业旱情监测中的可靠性进行验证；第五章是本书的重点，这章内容是以第四章为基础，利用优选出的具有物理机理的Penman-Monteith蒸散发算法所得SPEI1（仅考虑当月气候条件）对东北地区干旱时空变化特征进行分析，主要包括：干旱周期、干旱事件识别、极端干旱事件变化过程分析以及干旱时空分解分析；第六章是本书的又一重点，主要内容是选取位于北半球的主要的大尺度气候因子，包括北极涛动（AO）、太平洋年代际振荡（PDO）、厄尔尼诺（El Nino），分别分析各大尺度气候因子与东北干旱的相关关系，并进一步探讨气温、降水和干旱发展/消退速率与大气环流的相关关系，旨在从半球尺度上分析气候变化对东北地区旱涝的影响，揭示该区域气候干湿变化的机理；第七章是对本书主要内容的总结和展望。

全书主要由来文立、赵志忠负责撰写、组织、设计、编排和统稿。第一章由来文立撰写，第二章研究区概况由赵志忠撰写，数据资料来源与处理由来文立撰写，第三章至第七章均由来文立撰写。来文立在本书中完成的工作量达到11万字以上。

海南师范大学 来文立

2019年10月

目 录

1	绪论	1
1.1	研究背景与意义	1
1.2	国内外研究进展	2
1.3	研究内容及框架	13
2	研究区概况与数据来源	16
2.1	研究区概况	16
2.2	数据资料来源与处理	20
3	东北地区气候变化特征分析	22
3.1	气候要素变化特征	22
3.2	降水均一性时空特征	30
3.3	降水气温联合概率分布特征	33
3.4	小结	36
4	东北地区干旱指标的选取与验证	37
4.1	东北地区干旱指标计算与分析	38
4.2	干旱指标验证分析	46
4.3	小结	55
5	东北地区干旱时空变化特征分析	57
5.1	东北地区干旱周期分析	57
5.2	干旱事件识别与强度分析	60

5.3	极端干旱事件过程分析	63
5.4	东北地区干旱时空分解	67
5.5	小结	71
6	东北地区干旱与大气环流的遥相关关系	72
6.1	东北干旱与AO相关性分析	73
6.2	东北干旱与PDO相关性分析	75
6.3	东北干旱与Nino4相关性分析	77
6.4	不同大尺度气候因子对东北干旱的影响比较	80
6.5	干旱发展/消退速率与大气环流的相关性分析	83
6.6	小结	85
7	结论与展望	87
7.1	主要结论	87
7.2	主要的创新点	89
7.3	存在不足与展望	89
	参考文献	90
	附录	104

1 绪论

1.1 研究背景与意义

干旱作为一种常见的自然灾害，具有发生频率高、持续时间较长、范围广、时空分布不均等特点，对农业生产和生态系统的影响巨大。干旱的发生与温度、风速、湿度有关，并且与降雨的历时、降水强度、雨天分布等特征有密切的关系，干旱的研究和分析对于农业生产、生态平衡、水资源的合理规划和优化配置具有重要的意义（李茂松等，2003；Mishra and Singh, 2010）。

全球变暖在目前的研究中已经达成共识，由此引发的全球以及局部区域的高温天气以及旱涝等灾害频发，给生态系统平衡、农业生产以及社会经济可持续发展带来严重影响，已引起全球的高度重视（Kennedy, 2003；蓝永超等，2005；马明敏，2008）。特别是在气候变化背景下，降水与气温的变化直接影响了我国旱涝的时空格局（Wang et al., 2011；Zheng et al., 2015）。自1950年以来，中国的诸多地区频繁发生干旱，尤其是1990年后，北方大部分地区都会发生持续时间长的严重干旱事件（Wang et al., 2011），甚至2005年以来西南地区也出现多次大旱（2005年春季的云南大旱，2006年夏季的川渝特大干旱，2009—2012年整个西南地区出现有气象记录以来最严重的气象干旱事件）（尹晗和李耀辉，2013）。

我国东北地区是典型的“气候敏感区”，是气候变暖影响最为敏感地区之一，同时作为我国最大的商品粮产区和重要的重工业和能源基地，已经成为我国干旱问题显著的地区之一（姜晓艳等，2009；Dai, 2011）。尤

其是1990s中期以来,干旱不断加剧(孙力等,2003;袭祝香,2013),导致生态系统的脆弱性随之加大,制约了东北地区的农业发展和生态系统平衡(Chen et al., 2011; Zheng et al., 2015)。根据农业部门统计结果,1980s时期东北地区平均每年受到干旱影响的面积可达300万 hm^2 ,并且干旱影响的面积一直处于增长态势,1990s增长约33%,到2000s增加到550万 hm^2 ,干旱程度明显加剧(陈晓华,2009)。另外,因旱损失由2004年的118.9亿元增加到2007年的超过303.7亿元。

对于干旱的争论也层出不穷,许多专家和学者认为,干旱的主要原因是全球变暖,如Dai等(2004, 2011)在对全球的干旱研究中指出,自20世纪50年代,尤其是1970年后,全球气温的上升导致了全球干旱的加剧,增加了干旱的风险;但Sheffield等(2012)指出,由于干旱算法的不确定性可能高估了全球的干旱。对于东北地区的干旱趋势诸多学者的观点也不尽相同,许多学者认为,近年来东北地区干旱发生频率增加,干旱更加严重(马柱国等,2006; Yu et al., 2014);而王亚平等(2008)在东北地区干旱分析中发现,20世纪80年代后东北大部分地区呈现出干旱缓解的趋势。因此,干旱问题作为全球热点之一也存在很多争议,东北地区的干旱趋势也尚未统一。

鉴于此,本研究选取我国重要的粮食生产基地和气候变化敏感区的东北地区(主要针对黑龙江、吉林、辽宁3省)作为研究区域。在气候变化背景下,剖析东北地区气候变化特点和趋势。针对干旱算法不确定性带来的结果差异,本文选取国标推荐的两种不同蒸散发算法,深入探讨干旱演变特征,并对其结果进行对比和验证。在此基础上,为进一步揭示东北地区干旱演变机理,对影响东北地区干旱的大尺度气候因子进行细致分析,综合刻画东北地区干旱演变规律。本研究结果可以为东北地区的粮食生产、生态环境、水资源调度、经济发展等方面提供理论依据,同时对不同区域的干旱相关研究具有一定的借鉴意义。

1.2 国内外研究进展

随着全球气候变暖、气候系统稳定性降低,旱涝等自然灾害频发,灾害持续时间、范围及其强度也呈现增加趋势(Dai et al., 2011; IPCC,

2012)。东北地区作为全球变暖敏感区之一，也是我国干旱高风险区，对东北地区干旱研究已取得许多研究成果。围绕本研究内容，分别从干旱的定义和干旱指数、气候变化背景下干旱的演变规律、干旱与大气环流的响应关系、东北地区干旱研究现状4个方面系统分析了当前国内外研究的热点、发展方向以及取得的成果。

1.2.1 干旱的定义与干旱指标

1.2.1.1 干旱的定义与类型

干旱作为频发的一种极端气候事件(Heim et al., 2002; Dai et al., 2011)，最初被定义为长期累积降水缺乏的结果。Mishra和Singh(2010)提出，干旱是在一定的时期范围内降水量比多年平均明显偏少的现象。这两种定义仅从供水角度，均是以降水量与多年平均降水量的偏差作为衡量指标，这种思想一直影响至今。但随着干旱研究的开展，诸多学者认为干旱不仅要考虑水资源供给，还要考虑水资源需求(Palmer, 1965; Wilhite et al., 1985; Bonacci and Ognjen, 1993; Mishra and Singh, 2010)。但由于研究领域和角度的不同，气象、水文变量、社会经济因素的不同以及不同区域需水量的差异，很难对干旱有一个统一的定义。

可根据干旱不同的研究角度将干旱划分为以下4类。

(1) 气象干旱。Palmer(1965)提出“干旱是指某时间范围内，水分供应比多年平均明显并持续偏低的现象”。但也有学者把气象干旱简单的描述为在区域内某时段降水明显偏少的现象(Santos, 1983)，降水量作为影响气象干旱最重要的影响因素之一，普遍用于气象干旱分析中。但这一概念强调了降水的影响作用，并没有考虑水循环中另一重要环节——蒸散发的影响，而已有的大量研究中表明，降水和蒸散发是共同影响干旱的重要因素(Hodell et al., 2001; Mishra and Singh, 2010; 刘文琨等, 2014; 李柏贞和周广胜, 2014)。《气象干旱标准等级》(GB/T 20481—2006)中，对气象干旱重新定义为某时段由于蒸发量和降水量的收支不平衡，水分支出大于水分收入而造成水分短缺现象，强调了水分的收支平衡，即降水与蒸发之间的关系，也更全面地表征了干旱程度。

(2) 水文干旱。指一段时期内地表、地下水短缺导致水资源系统中可用水的缺乏，径流数据已经广泛地应用于水文干旱研究中(Clausen and

Pearson, 1995; Sen, 2014)。强调河川水量异常导致的缺水现象(袁文平和周广胜, 2004)。水文干旱通常由气象干旱引起, 多发生于气象干旱之后。已有研究表明, 除气候条件外, 流域地质状况也是影响水文干旱的一个重要因素(Zecharias and Brutsaert, 1988; Vogel and Kroll, 1992)。

(3) 农业干旱。指一段时间内土壤湿度下降, 地表水、地下水资源没有对土壤水分进行补充而导致粮食减产的现象(Mishra and Singh, 2010)。土壤湿度的变化受多种因素的影响, 这些因素同样也是气象干旱与水文干旱的主要原因, 同时也造成作物实际蒸腾蒸发量与作物潜在蒸腾蒸发量的差异。农业干旱与作物生长关系密切, 气候条件决定了作物生长期的水分供应, 同时作物的生物特性、生长期所处阶段以及土壤理化性质也对作物生长状况产生一定影响。因此, 在研究农业干旱时, 不仅要气候条件(降水、气温等)和土壤湿度等纳入计算, 同时还要考虑作物的布局、品种以及生长特性和生长阶段, 共同表征农业干旱(袁文平和周广胜, 2004; 董秋婷等, 2011; 张淑杰等, 2013; Yin et al., 2016a, 2016b; Guo et al., 2017)。由于气象因素是农业干旱形成的主要因素, 农业干旱一般发生在气象干旱之后, 对于农业旱情的评估也常用气象干旱指标(冯平, 1997)。

(4) 社会经济干旱。指一段时间内, 水资源供应达不到社会生产和人类活动所需水总量的现象(Dai, 2011)。在自然系统和人类社会经济系统中, 由于水分短缺导致的水资源无法满足经济生产和人类活动需水量的现象(袁文平和周广胜, 2004; Mishra and Singh, 2010)。从时间顺序来看, 社会经济干旱是干旱发展的最后阶段, 通常出现在气象干旱、水文干旱及农业干旱之后, 主要用来表征水资源无法满足社会经济需求的情况, 强调水资源的短缺对社会经济以及居民生活的影响。

1.2.1.2 干旱指标

为了能够更好定量化干旱, 采用干旱指标的形式反映干旱的程度。从不同研究角度出发, 所选取的干旱指标也有所差异。根据干旱的分类, 干旱指标大体可以分为气象干旱指标、农业干旱指标、水文干旱指标和社会经济干旱指标4类(Mishra and Singh, 2010)。在干旱研究中, 气象干旱指标在一定程度上能够反映农业、水文以及社会经济干旱, 具有重要的

基础意义，可以为其他指标的分析提供研究背景和参考依据（邹旭恺等，2005）。

干旱指标的选取和计算是干旱事件时空演变特征、风险评估的前提和基础，干旱成因复杂，受多种气候条件共同影响，评价指标不同可能会导致最终的评价结果差异很大，甚至相互矛盾（李维京等，2003；Dai et al., 2004；Vicenteserrano et al., 2010；Dai, 2011；Sheffield, 2012）。不少科学工作者针对干旱指标的选取做过探讨，主要有标准化降水指数（SPI）（武建军等，2011；Yu et al., 2014；Wang et al., 2014）、降雨Z指标（鞠笑生等，1998；袁文平和周文胜，2004）、标准化降水蒸散指数（SPEI）（Vicente-Serrano et al., 2010；张勃等，2015；李翔翔等，2017；沈国强等，2017）和帕尔默干旱指数（PDSI）（叶敏等，2013；王亚许等，2016）等。

SPI是基于多年降水概率分布的干旱指标，可以反映某时段内降水量与多年平均水平的偏差，因其计算简单得到广泛应用，但SPI仅考虑水循环中的水分供给环节，未考虑蒸散发能力的改变对干旱带来的影响（Vicente-Serrano et al., 2010）。PDSI基于土壤水分平衡，结合前期降水、蒸散发和土壤有效持水量量化评估干旱的指标。该指标考虑因子较多，计算复杂，对数据要求较高，使得PDSI在计算时诸多地区受到数据资料的限制，并且PDSI在计算中使用了多个经验参数，这些经验参数的取值依赖于研究的区域（杨庆等，2017），在干旱实证研究中其结果准确性并不高（Dai et al., 2004；Zhang et al., 2017）。SPEI是在SPI的基础上发展而来，不仅延续了SPI多时间尺度的优势，并且综合考虑了降水与潜在蒸散发，近些年在干旱监测中得到了广泛应用（Vicente-Serrano et al., 2010；孙滨峰等，2015；Stagge et al., 2016；李明等，2016）。Vicente-Serrano等（2010，2012），研究指出SPEI与PDSI反映旱涝的能力相当，且均具有一定的物理机理，但SPEI具有需求变量少、计算方法更为简单和多时间尺度的优势。

已有研究发现，与PDSI相比，SPI2、SPI3与土壤湿度（0.5m）相关性更高，能够更好地反映农业干旱（Mishra and Singh, 2010；Wang et al., 2016）。Xu等（2015b）从气候学角度在全国的干旱时空变化研究中发现，SPI3、RDI3、SPEI3都可以验证遥感土壤水分数据。

1.2.2 气候变化背景下干旱的演变规律研究进展

全球气候变化正在加剧，由此带来的干旱影响面积不断增加，发生频率也有所上涨（刘燕华等，2005；Utsumi et al., 2011；Trenberth et al., 2014）。国际大气研究中心指出，从1970—2000年，全球遭受严重干旱的地区占全球陆地面积的比重增加了2倍（孙丽，2014；NCAR, 2005）。在IPCC第五次评估报告中指出，干旱已经成为全球最严重的自然灾害之一，并且在未来一段时期内，干旱风险将呈现不断增加的趋势（IPCC, 2012），因此，干旱的研究已经成为当今热点课题之一。

众多学者在研究中提出，干旱的加剧主要原因很可能是全球变暖（Sherwood and Qiang, 2014；Rajah et al., 2015；Trenberth et al., 2014），IPCC第五次报告中提出，全球陆面平均气温（1880—2012年）上升了 0.89°C ，尤其是20世纪50年代以来气温显著上升。气温的升高加快了地表水分蒸发过程，引发水循环加速从而导致降水量也增加。但根据克劳休斯-克拉勃龙（Clausius-Clapyeron）方程，“全球变暖”的加剧引起饱和水的含水量增加，引起短期极端降水（日极端降水或小时极端降水）事件的增多，Utsumi等（2011）研究表明，气温每上升 1°C ，极端降水会增加 $6\% \sim 7\%$ （超过降水量的变化率， $1\% \sim 3\%/^{\circ}\text{C}$ ）。极端降水的增加势必会增大洪涝的风险，同时不降水天数也在增加，加大了极端干旱的发生概率。针对降水的时间分配均一性问题，Rajah（2015）选取全球逐日降水数据，引入基尼系数的方法，比较分析降水序列各年Gini系数，全球日降水具有非均一性的趋势，证实了全球变暖使得降水过程更容易形成“长期不下雨，或强降雨”的极端状况，降水在时间尺度上的分配更为不均，增大了旱涝的风险。

近年来，区域干旱演变规律从单尺度指标小范围的分析，逐步过渡到多尺度多指标大范围的研究。不同学者采用历史数据、实测数据、重建数据、反演数据等多种数据集，通过游程理论、滑动平均、小波分析、Copula方法、频谱分析、经验正交函数等方法，建立了SPI、SPEI、PDSI、降水Z指数等诸多指标体系，对干旱事件的持续时间、干旱程度、干旱频率、周期、干旱重现期、发生范围等特征进行了分析，时间尺度包括50年、100年、200年甚至2 000年等多时间尺度，空间尺度包括全球、各国以及不同地区范围等，取得了丰富和有意义的成果（张丕远等，1997；严华

生等, 2004; 郝志新等, 2010; 邹旭恺等, 2010; 徐燕等, 2011; Zhang et al., 2012; 胡亚楠, 2013; 叶敏等, 2013; Yu et al., 2014; Spinoni et al., 2014; Claran and Wei, 2014; 卢洪健等, 2015; 沈国强等, 2017a; 2017b)。

但对于干旱是否加剧, 国内外学者研究结果依然存在争议。在全球变暖的持续影响下, 通常认为全球趋于干旱化的趋势, 但从全球水热平衡的角度来看, 地面净辐射量整体上呈现下降趋势并伴随风速的停滞, 势必会导致蒸发能力的下降, 引起水循环过程减缓 (Sherwood and Qiang, 2014)。但不少学者通过综合考虑气候变化因素 (包括降水、气温、风速、辐射、日照时数等气候因素), 发现干旱趋势并未显著增加 (Sheffield, 2012; 赵静等, 2015; Zhang, 2016)。因此, 干旱是否加剧尚无定论。Chen (2005) 研究中发现, 全球/区域蒸发皿长时间序列的趋势与全球变暖带来的干旱趋势不一致的现象, 称之为“蒸发悖论”。基于此, 在全球变化背景下评估区域或全球干旱趋势时, 不能仅考虑全球变暖对干旱的影响, 需要将气候变化的诸多因素纳入分析中, 综合探讨干旱变化趋势更具有科学意义。

1.2.3 旱涝与大气环流相关研究进展

1.2.3.1 旱涝与北极涛动 (AO) 关系研究

太阳辐射是地球的最主要能量来源, 由于地球本身的自转作用外加陆地—海洋系统的复杂性, 导致地球呈现洋流和季风有规律的运动。在不同纬度之间 (特别是北半球) 由于辐射的不均匀分配, 导致在北极极地与中高纬度地区形成大尺度气压梯度, 这种有规律的气压梯度变化, 导致不同区域在大气环流作用下, 水汽进行着有规律的运移。北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 描述北半球海平面气压场的波动规律性变化 (北极地区与周围环状地区气压存在负相关性), 很好地揭示了环状气压场的时空变化特征, 对北半球及区域气候研究具有重要的理论指导意义 (Thompson and Wallace, 1998; 龚道溢和王绍武, 2003)。近年来的研究表明, 北极涛动影响北半球中高纬度地区的气候时空特征, 它不仅影响年内的气候变化, 而且对年际 (甚至年代际) 气候变化均具有重要影响 (琚建华等, 2006)。AO指数与地面温度 (Thompson and Wallace, 1998; Ghasemi

and Khalili, 2006)、降水和降水特征 (Hu and Feng, 2010; Mao et al., 2011) 以及其综合影响, 如干旱、洪涝 (Wang et al., 2007; Wang et al., 2013) 在区域/全球尺度的, 已经取得了大量的研究成果。近几十年来AO向持续高位的趋势是北半球冬季变暖的重要原因 (Thompson and Wallace, 2001), 有研究表明, 20世纪70年代以来的全球变暖也可能与AO处于强西风位相有因果关系 (王绍武, 2001)。

对于我国而言, 针对不同地区AO与降水和气温的关系研究也不胜枚举 (Gong and Wang, 2003; Wang and Fang, 2004; Mao et al., 2011; Zuo et al., 2015; 覃郑婕等, 2017; 陈亚宁等, 2017), 但AO对干旱的影响方面的研究较少。何春 (2002) 研究发现, 北极涛动与我国北部季风区气温 (特别是冬季气温) 存在显著的正相关关系, 龚道溢和王绍武 (2003) 指出当AO指数偏强时, 我国大部分地区冬季气温偏高, 同时降水也偏多。司东等 (2016) 对2015—2016年极端气候事件进行分析, 发现极端严寒事件的发生与AO指数的异常有关。因此AO异常变化是我国极端气候事件暴发 (特别是中高纬度地区) 的重要诱因之一。

1.2.3.2 旱涝与太平洋年代际振荡 (PDO) 关系研究

太平洋年代际振荡 [(Pacific (inter) Decadal Oscillation, 简称PDO)] 最早由Mantua等 (1997) 提出, PDO是年际甚至年代际尺度的气候变化信号 (Mantua et al., 1997), 具有增强气候变化敏感信号的优势。PDO可用于辨析和识别气候变化的敏感性, 尤其对太平洋及其周边地区 (包含本研究区) 气候的影响明显 (杨修群等, 2004); 1976—1977年北半球地区突现显著的年代际异常现象 (Miller et al., 1994), 导致PDO的冷暖位急转, 对气候系统的年际变率的异常具有重要的调节作用。PDO主要影响北半球中高纬度地区 (以北太平洋和北美地区为主), 次要影响地区是北半球低纬度地区 (热带太平洋) (Latif, 1996; 朱益民和杨修群, 2003; Yang and Zhang, 2003), 对PDO敏感区域的气候特征、水文特性、生态系统敏感性以及渔业生产的影响进行系统性分析 (Mantua et al., 1997; Benson et al., 2003)。已有大量的研究证实, 在年代际尺度 (长时间尺度) 以及较短的时间尺度 (年际尺度), PDO信号均会对气候变化产生重要的影响, 这种大尺度气候因子的影响与ENSO之间存在相应性反馈, 在年际尺度上PDO的变化极有可能影响ENSO发生的时间、频次以及强度 (张瑞等, 2011)。

太平洋年代际振荡与中国不同区域气候年代际变化之间的关系,近年来已成为水文气象学家关注的热点问题。王绍武等(1979)利用百年尺度旱涝观测及反演资料,明晰了海气(海陆)反馈与响应的36年周期变化机制。于淑秋等(1997)采用经典的滑动T检验法(双边,置信度为 $P<0.05$)对北太平洋海温年代际突变点进行了系统性分析,研究发现在1976—1977年间海温存在突然的上升,从而诱发我国部分地区汛期降水量的减少,这种降水的异常减少在东北地区尤为明显,与此同时华北地区降水偏多,随着海温突变后进入稳定期,降水盈亏的空间格局反转。黄荣辉等(1999)则强调,中国夏季降水的年代际变化(70—80—90形成少—多—少的年代际变化)主要是由于20世纪60年代至20世纪90年代初赤道中、东太平洋海表温度明显增加引起,同时20世纪70年代海温明显降低所造成。Chang等(2000a, 2000b)研究了汛期PDO对我国长江中下游地区和华南地区降水量的影响,发现PDO冷暖位相中这两个区域夏季雨量与太平洋海温之间存在6个月左右的滞后性。朱益民等(2003)研究了PDO变化对中国气候变率的影响,指出PDO对ENSO信号在中国夏季气候异常时具有缓冲的调制作用。

1.2.3.3 旱涝与厄尔尼诺(El Nino)关系研究

厄尔尼诺(El Nino)现象是热带海表温度最强的年际异常信号,是不同海洋温度与水汽运输相互作用的结果(李丽平等, 2015),已有研究发现全球变暖导致极端El Nino事件频率增加(Cai et al., 2014)。El Nino的出现对热带地区的气候带来急剧的变化(如南半球的暴雨异常以及印度洋沿岸干旱等),而且也给广大中高纬地区乃至全球的天气异常都带来显著的影响(张先恭和赵汉光, 1988)。

厄尔尼诺对气候变化的影响研究由来已久,诸多学者针对El Nino现象与我国不同地区的气候异常的关系进行研究,已有研究表明El Nino事件发生后次年的夏季,我国不同地区均表现出干湿异常,我国东部季风区(特别是长江流域、江南北部)均出现降水偏多,北疆地区、黄河流域和海河流域也出现一个多雨中心,长江中下游地区容易发生洪涝,而江淮流域降水偏少(刘颖和倪允琪, 1998; 金祖辉和陶诗言, 1999; 黄荣辉等, 2003; 赵亮等, 2006; 宗海锋等, 2008)。此外,针对El Nino事件对我国东部降水乃至全国的降水都产生至关重要的影响(林学椿, 1993; 秦

坚肇, 2014; 顾薇, 2016; 翟盘茂等, 2016)。李丽平等(2015)研究发现, 对于我国东部地区而言, 无论逐月或季节降水, Nino3、Nino4、Nino3.4型均表现为正向的影响与反馈, 其中Nino4型的降水正向影响—反馈的程度最强、Nino3.4型最弱。

1.2.4 东北地区干旱研究现状

虽然过去从整体上分析中国干旱特征的工作已经有过不少(黄嘉佑, 1991; 章名立, 1993; 于星, 2001; 王英等, 2006; 王遵娅, 2007; 朱玉祥, 2007; 姚玉璧等, 2013; Zhang et al., 2014; Zhang et al., 2016), 针对某一区域旱涝的研究也有所开展(李崇银, 1992; 黄嘉佑等, 1996; 李栋梁等, 1997; 孙力等, 2000; 谢安等, 2003; 袭祝香等, 2013; 高蓓等, 2014; 齐文栋, 2014), 但相比之下, 详细探讨中国东北地区的干旱演变规律的研究并不是很多。许多学者对我国不同地区进行干旱风险评价, 结果表明, 东北地区为我国干旱高风险区, 也是气候变暖最为敏感区之一(陈育峰, 1995; 朱琳, 2002; 王素艳, 2003; Yin et al., 2014)。

在东北地区干旱变化特征分析中, 目前国内外常采用SPI(Wang et al., 2014; Yu et al., 2014; Wang et al., 2015)、SPEI(高蓓等, 2014; 孙滨峰等, 2015; 李明等, 2016; 梁丰等, 2017; 沈国强等, 2017a; 2017b; 蔡思扬等, 2017)、PDSI(李晓辉等, 2013; 王亚许等, 2016)、土壤湿度(Cong et al., 2017)、作物水分亏缺指数(CWDI)(董秋婷等, 2011; 张淑杰等, 2013; 解文娟等, 2014;)等干旱指标, 对东北地区干旱时空变化特征和发展趋势进行研究, 得到了许多有意义的成果。除采用干旱指标外, 也有一些探讨只是集中在对该地区降水和气温异常时空分布规律的分析上, 如在孙力等(2003)利用东北地区多台站、长时间序列、高质量气象观测数据分析了东北地区地表水—热变化特征及趋势; 姜晓艳等(2008, 2009)在分析主要观测站百年气温变率的基础上, 运用小波转换在周期分析中的优势构建了适用于东北地区的多时间尺度小波分析方法, 分别对气温和降水进行周期分析。此外, 魏凤英和张婷(2009)运用游程理论对东北地区的干旱强度、频率等重要统计特征进行综合性分析, 并自下而上深入探究了干旱与大气环流之间的可能联系。

在干旱指标的选择和时间尺度选取方面, 徐一丹等(2017)利用多