

全球变化背景下东亚气候 年际—年代际变率及其 可预报性研究

李清泉 封国林 等 著



科学出版社

全球变化背景下东亚气候 年际-年代际变率及其可预报性研究

李清泉 封国林 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

年际-年代际(1~30 年)特别是年代际(10~30 年)气候预测正迅速成为气候变化的一个新的优先研究领域。东亚季风气候具有显著的年际-年代际变率,对我国旱涝灾害的发生有显著影响,同时也将影响政府部门的很多长期计划的制订。本书围绕“全球变化背景下东亚季风区气候年际-年代际变率及其可预报性研究”的核心问题,介绍作者的研究团队近年来的相关研究成果。主要内容包括西太平洋副热带高压年际-年代际变率及其影响、青藏高原积雪和海表面温度对中国东部夏季降水年代际变率的影响、增暖背景下东亚气候的年代际转折特征、年际-年代际海洋转折的预警信号辨识与捕捉、基于复杂网络配置的中国夏季降水影响因子辨识及预测模型构建、中国旱涝的年代际趋势转折可预报性研究、BCC_CSM 模式年际-年代际变率可预报性研究、BCC_CSM 动力模式误差年代特征及中国夏季降水预测方案。

本书可供大气科学、海洋科学等领域的科研、业务人员参考。

审图号: GS (2018) 5081 号

图书在版编目(CIP)数据

全球变化背景下东亚气候年际-年代际变率及其可预报性研究/李清泉等著. —北京: 科学出版社, 2019.1

ISBN 978-7-03-059148-7

I. ①全… II. ①李… III. ①气候变化-长期天气预报-研究-东亚 IV. ①P456.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 240880 号

责任编辑: 杨帅英 张力群 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 图阅社

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 3 月第二次印刷 印张: 22

字数: 500 000

定价: 238.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序 一

我国地处东亚季风区,年际-年代际变率及其可预报性的相关研究工作的开展,有利于提高对我国汛期降水、冬季气温等气候要素的预报能力。同时,对于政府和公众关心的洪涝、干旱和高温热浪等灾害性事件的预报,也能够提供重要的科学支撑。随着全球气候变暖的加剧,年际-年代际气候变化的研究也成为国际气候变化及其可预报性研究计划的重要内容之一。年际-年代际的气候变率和可预报性问题研究,具有多时间尺度、多驱动因子等特征,使其成为当前的一项世界性的科学难题。该书讨论了当前科学研究中面临的热点和难点问题,涉及了国家急需和科技前沿。围绕“全球变化背景下东亚季风区气候年际-年代际变率及其可预报性研究”这一核心,分析了西太副高和东亚夏季降水的年际-年代际变率,揭示了高原积雪和海温对中国东部夏季降水年代际变率的影响,进而开展了年际-年代际海洋转折的预警信号辨识与捕捉的研究。在此基础上,该书进一步分析了BCC_CSM模式年际-年代际变率可预测性,构建了中国夏季降水影响因子辨识及预测模型,针对BCC_CSM动力模式误差年代特征的中国夏季降水预测方案,形成了部分具有国际水平的原始创新研究成果。总之,该书在辨识年际-年代际气候转折期间气候系统的主要背景因子,加深对东亚气候系统年际-年代际变率机理的认识和理解,探索东亚气候年际-年代际变率的可预报性等方面具有非常重要的理论意义和实际应用价值。

该书作者李清泉研究员等长期从事短期气候预测研究,有很深厚的学术造诣,取得过一系列重要的创新性研究成果。该书侧重于详细介绍作者的研究成果、思想、方法和理论体系,对于大气科学领域的相关研究人员详细了解并应用这方面的内容具有重要参考价值,是开展教育培训和科学研究的一本重要参考书。

丑纪范

2016年11月于兰州大学大气科学学院

序 二

东亚季风气候具有显著的年际-年代际变率,对我国旱涝灾害的发生有显著影响,因而将影响政府部门防灾减灾和经济社会可持续发展应对计划的制订。理解东亚季风气候年际-年代际变率机理并进行预测对中国显得尤为迫切,而此领域的研究还处于一个初步阶段,因此亟需进行系统研究。在全球变化研究中,年代际尺度信号的变率越来越受到重视。年代际尺度气候变化也是历次 IPCC 评估报告的重要内容之一。

由李清泉研究员等编写的《全球变化背景下东亚气候年际-年代际变率及其可预报性研究》一书,正是对这一领域的一个大胆尝试。该书首先针对东亚季风区的关键环流系统和降水特征进行了深入分析,并重建了西太平洋副热带高压指数,更加客观地表征出东亚季风的年际-年代际变率。发展了基于突变转折的识别技术,从而辨识出年际-年代际气候转折期间气候系统的主要背景因子。研发了针对气候变化趋势拐点预测的理论和方法,开展了年代际尺度旱涝转折的预测试验,从而加深了对东亚气候系统年际-年代际变率机理的认识和理解。书中还分别利用统计和动力模式两种途径,探讨了在全球变暖背景下东亚季风区年际-年代际变率的可预报性,为改进季节-年际-年代际业务预测提供了重要的科学基础。

该书结构清楚,文字通畅,条理清楚。有很高的科学参考价值,很值得有兴趣的读者一读。

丁一江

2016 年 11 月

序 三

我国受季风气候影响大，加之北半球中-高纬度大气环流系统变异显著，对我国天气气候有重要调制作用。因此，科学认识我国气候变异过程和规律、有效预测气候变异是科学难题，也极具重要性。由李清泉等撰写的《全球变化背景下东亚气候年际-年代际变率及其可预报性研究》一书，概要介绍了近年来作者的研究成果，包括降水、气温变异特征分析和机制研究、突变过程的辨识以及一系列预测新方法方面的探讨等。该书还介绍了国家气候中心的同化和预测系统构建方面的进展。相信该书的出版对有关科研、业务人员有一定的参考价值，也对气候预测业务的发展有借鉴意义。

王会军

2016年11月于南京信息工程大学

前 言

东亚季风气候具有显著的年际-年代际变率,对我国旱涝灾害的发生有显著影响,同时也将影响政府部门很多长期计划的制订,如南水北调工程、大型水坝、电力设施、粮食产量等。理解东亚季风气候年际-年代际变率机理并进行预测对中国显得尤为迫切,而此领域的研究还处于一个初级阶段,因此亟须进行系统研究。这不仅对科学预测年际-年代际气候变化有重要科学意义,而且对未来评估气候变化所引发的风险及社会影响,进而提出合理的应对策略具有重要指导意义,是国家在战略决策层面上的重大需求。

本书作者及其研究团队在近年来,围绕“全球变化背景下东亚季风区气候年际-年代际变率及其可预报性”的核心问题,坚持对东亚气候年际-年代际变率的影响机制、预测理论、方法和技术等方面开展探索研究,取得了不少创新性的学术研究成果:研发了基于熵和过程理论的气候系统突变转折识别的新技术,探讨了全球变暖背景下年际-年代际变率信号识别问题,拓展了国内传统年代际变率识别方法;改进重建了西太平洋副高指数,并以此研究了西太平洋副高的年际变率,发现西太平洋副高具有显著的准两年振荡(TBO)信号,且近30年TBO的变率显著增大,具有年代际尺度的变化特征;探索性地构建了非线性年代际旱涝转折预测模型,并开展可预报性研究,该模型不仅对序列长期变化趋势具有较高的预报技巧,同时对未来给定时段内可能发生的转折次数及发生时间也具有一定的预报能力;基于最优集合插值(ENOI)方法,建立了BCC_CSM海洋资料同化系统,并开展了年代际试验,分析表明海洋初值准确有助于年代际预测效果改进;基于动力-统计相结合的理论,建立BCC_CSM模式误差与历史相似信息之间的联系,发展了一种能够利用海气系统年代际相似信息改进中国夏季降水预测的新方案,为气候预测提供了新理论和技术。一些成果在气候预测的业务和科研实践中得到了试验应用,取得了明显的经济效益。本书旨在抛砖引玉,引发学界共鸣,为今后进一步深入研究气候预测的理论和方法提供基础,兼具理论和实践的双重意义。

全书共分九章,依次为绪论、西太平洋副高年际-年代际变率及其影响、青藏高原积雪和海表面温度对中国东部夏季降水年代际变率的影响、增暖背景下东亚气候的年代际转折特征、年际-年代际海洋转折的预警信号辨识与捕捉、基于复杂网络配置的中国夏季降水影响因子辨识及预测模型构建、中国旱涝的年代际趋势转折可预报性研究、BCC_CSM模式年际-年代际变率可预报性研究、BCC_CSM动力模式年代际误差特征及中国夏季降水预测方案。主要作者为李清泉、封国林、刘芸芸、龚志强、司东、章大全、颜鹏程、赵俊虎、胡泊、魏敏、李淑萍和乔少博等。最后由李清泉对全书进行了统稿。

本书的出版得到了国家重点基础研究发展计划(课题编号:2012CB955203)的资

助。衷心感谢丑纪范院士、丁一汇院士、王会军院士、张人禾院士、刘征宇教授、何金海教授、赵宗慈研究员、李维京研究员、李栋梁教授等，他们多年来对我们的科学研究工作给予了关心和指导。

期待本书的出版对我国气候预测科研和业务发展起到些许推动和借鉴作用。由于水平所限，本书瑕疵在所难免，真诚欢迎有关的专家和学者批评指正。

谨以此书祝贺尊敬的丁一汇先生 80 华诞。

李清泉

2017 年 5 月

目 录

序一

序二

序三

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义和现状	1
1.2 研究内容	4
1.3 本书结构	5
参考文献	7
第 2 章 西太平洋副高年际-年代际变率及其影响	10
2.1 西太平洋副高的不同类型下我国汛期大尺度旱涝特征	10
2.1.1 夏季西太平洋副高的分类	11
2.1.2 副高的不同类型下我国夏季旱涝的分布特征	14
2.1.3 副高的不同类型下我国夏季旱涝分布的成因	16
2.2 夏季西太平洋副高的客观量化预测及其对汛期降水的指示	19
2.2.1 高度场客观量化预报方案	20
2.2.2 副高预测效果检验及其所属类型下夏季降水特征	22
2.2.3 副高指数投影及其所属类型下夏季降水特征	24
2.3 西太平洋副高指数的重建与应用	30
2.3.1 重建的副高指数定义标准	31
2.3.2 重建的副高指数与业务指数的对比分析	32
2.3.3 重建的副高指数与夏季降水的关系	38
2.4 西太平洋副高的年际特征及其与热带海表面温度和大气环流异常的关系	42
2.4.1 副高的准两年变化特征分析	42
2.4.2 与准两年振荡相关的海表面温度和大气环流异常	45
2.5 夏季西太平洋副高两次北跳及其与我国东部夏季降水的关系	51
2.5.1 夏季副高两次北跳的定义及其气候特征	52
2.5.2 夏季副高两次北跳与我国东部夏季降水的关系	55
参考文献	57
第 3 章 青藏高原积雪和海表面温度对中国东部夏季降水年代际变率的影响	60
3.1 青藏高原冬季积雪和东亚夏季降水关系的年代际变化	60
3.1.1 20 世纪 90 年代末高原冬春积雪的减少	61

3.1.2	20 世纪 90 年代末东亚夏季降水的变化	62
3.1.3	高原积雪和东亚夏季降水关系的年代际变化及其可能原因	65
3.2	中国东部夏季降水年代际变率与海表面温度的可能联系	74
3.2.1	观测的中国东部夏季降水的年代际变化	75
3.2.2	中国东部夏季降水年代际变化的模拟	79
3.2.3	海表面温度和大气内部动力过程对中国东部夏季降水年代际变化的相对贡献	84
3.3	热带西太平洋海表面温度异常对梅雨年代际变化影响的数值模拟	86
3.3.1	热带西太平洋海表面温度异常对梅雨年代际变化的影响	87
3.3.2	热带西太平洋海表面温度异常对东亚环流年代际变化的影响	89
3.4	近年来梅雨特征分析	92
3.4.1	中国梅雨监测指标	93
3.4.2	2011~2016 年中国梅雨总体特征	95
3.4.3	2011~2016 年中国梅雨期间的大气环流特征	97
3.4.4	2011 年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因分析	101
	参考文献	119
第 4 章	增暖背景下东亚气候的年代际转折特征	123
4.1	20 世纪 90 年代末东亚夏季降水年代际变化及其与水汽输送的关系	123
4.1.1	20 世纪 90 年代末东亚夏季降水年代际变化特征	124
4.1.2	20 世纪 90 年代末东亚夏季大尺度气候异常与水汽输送联系	126
4.1.3	20 世纪 90 年代末水汽输送与海表面温度年代际异常的关系	130
4.2	近 52 年长江中下游地区夏季年代际尺度干湿变化及其环流演变分析	136
4.2.1	1961~2012 年长江中下游地区夏季干湿变化	137
4.2.2	不同时段夏季环流背景场异常特征分析	139
4.2.3	不同时段前期(前冬、春季)环流背景场异常特征	145
4.2.4	不同时段环流演变及其概念模型	148
4.3	欧亚北部 2004 年以来频繁冷冬的特征分析及机理	150
4.3.1	2004 年以来冬季低温显著影响区	151
4.3.2	2004 年以来欧亚北部两种类型冷冬对比	152
4.3.3	2004 年以来 4 个全区偏冷年形成机理	155
4.3.4	2004 年以来 3 个南部偏冷年形成机理	157
	参考文献	160
第 5 章	年际-年代际海洋转折的预警信号辨识与捕捉	164
5.1	年际-年代际转折识别新方法	164
5.1.1	基于滑动移除近似熵的年际-年代际转折识别方法	164
5.1.2	基于突变过程的年际-年代际转折识别方法	166
5.2	滑动移除近似熵在年际-年代际转折识别中的应用	174

5.2.1 不同趋势对 MC-ApEn 的影响研究	175
5.2.2 噪声对 MC-ApEn 的影响	184
5.3 突变过程分析方法在年际-年代际转折识别中的应用	190
5.3.1 近百年来 PDO 序列突变及其过程	190
5.3.2 500hPa 温度场的突变与突变过程	195
5.3.3 全球海表面温度的突变与突变过程	201
参考文献	213
第 6 章 基于复杂网络配置的中国夏季降水影响因子辨识及预测模型构建	215
6.1 环流系统关联网络的构建	215
6.2 环流系统关联网络的结构特征	216
6.2.1 北半球中高纬度环流系统空间结构的时间演变特征	218
6.2.2 北半球中高纬度环流系统遥相关型的年代际配置特征	219
6.2.3 遥相关型与中国夏季降水的可能联系	227
6.2.4 多因子物理统计模型的构建	230
6.2.5 基于多因子物理统计模型的中国夏季降水预测方法	231
6.2.6 独立样本检验	233
参考文献	235
第 7 章 中国旱涝的年代际趋势转折可预报性研究	237
7.1 中国近 60 年旱涝转折时空分布特征	237
7.1.1 中国近 60 年旱涝年代际演变特征	237
7.1.2 中国近 60 年区域旱涝变化周期分析	241
7.1.3 年代际旱涝变率与北太平洋涛动的关系	244
7.2 中国年代际旱涝趋势转折预测研究	245
7.2.1 时间序列趋势转折点的提取及预测	245
7.2.2 Lorenz 系统分量序列趋势转折预测试验	246
7.2.3 趋势转折预测模型的构建和回报检验	250
7.2.4 中国未来 10 年旱涝趋势转折预测	252
参考文献	254
第 8 章 BCC_CSM 模式年际-年代际变率可预报性研究	256
8.1 BCC_CSM 模式对海洋年际-年代际变率的模拟和可预报性	257
8.1.1 海表面温度年际变化	258
8.1.2 海表面温度年代际变化	266
8.2 BCC_CSM 模式对中国气温的模拟和预估	273
8.2.1 中国 10 年平均气温的模拟结果	274
8.2.2 中国年平均气温的模拟结果	278
8.2.3 空间场的模拟	280
8.2.4 中国未来 10~30 年气温变化预估	282

8.3	CMIP5 模式对西太平洋副高的模拟和预估	286
8.3.1	模式对 500hPa 环流场和海表面温度场的模拟及订正	288
8.3.2	模式对副高气候特征的模拟	291
8.3.3	未来情景下副高的可能变化趋势	296
8.4	基于 ENOI 同化方法改进 BCC_CSM 模式海洋初值和年代际预测	299
8.4.1	海表面温度初值改进和海表面温度的可预报性分析	301
8.4.2	全球与东亚气候的可预报性分析	309
	参考文献	315
第 9 章	BCC_CSM 动力模式年代际误差特征及中国夏季降水预测方案	321
9.1	东亚夏季降水及模式预报中的年代际变化特征	322
9.2	欧亚环流系统及模式预报的年代际变化特征	325
9.3	海表面温度及模式预报中的年代际变化特征	329
9.4	实况及模式预报中东亚夏季降水与海表面温度年代际变化的联系	331
9.5	20 世纪 90 年代末东亚夏季降水年代际变化的订正	333
	参考文献	337

第 1 章 绪 论

1.1 研究意义和现状

年际-年代际 (1~30 年) 特别是年代际 (10~30 年) 气候预测正迅速成为气候变化的一个新的优先研究领域。2007 年的政府间气候变化专门委员会第四次评估报告基本上肯定了工业革命以来观测到的全球变暖现象是人类活动引起的, 因此气候变化研究的焦点问题不再仅关注百年时间尺度全球变化的大趋势, 未来几十年特定区域的气候变化将得到各国政府和社会的更大关注。东亚季风气候具有显著的年际-年代际变率, 对我国旱涝灾害的发生有显著影响, 同时也将影响政府部门的很多长期计划的制订, 如南水北调工程、大型水坝、电力设施、粮食产量等。理解东亚季风气候年际-年代际变率机理并进行预测对中国显得尤为迫切, 而此领域的研究还处于一个初级的阶段, 因此亟须进行系统研究。这不仅对科学预测年际-年代际气候变化有重要科学意义, 而且对未来评估气候变化所引发的风险及社会影响, 进而提出合理的应对策略具有重要指导意义, 是国家在战略决策层面上的重大需求。

受全球变暖影响, 气候变化的年代际尺度信号越来越显著。年代际尺度气候变化是 IPCC 第五次评估报告 (AR5) 的重要内容之一。在 IPCC AR5 之前, 关于气候变化的研究重点主要是关于气候系统对外强迫变化的敏感性。比如, IPCC 第四次评估报告 (AR4) 对比了不同温室气体和气溶胶排放情景下, 2100 年全球表面气温的变化幅度。但研究表明, 在未来 30 年, 全球气温变化并不十分依赖于不同的排放情景 (Meehl et al., 2009)。第五阶段耦合模式比较计划 (CMIP5) 新加入了多组 10~30 年的年代际尺度回报和预测试验 (Taylor et al., 2012)。在年代际甚至更长的时间尺度上, 不仅要考虑外强迫 (太阳活动、火山喷发、人类活动引起的温室气体排放等) 和气候系统内部变率的影响, 还需要更多关注模式的初始状态。在这一时间尺度上, 模式初始条件比边界条件的影响可能更为重要 (Latif et al., 2006)。Branstator 等 (2012) 对 6 个耦合气候模式在同样外强迫条件下进行积分, 以研究模式初始状态对可预测性的影响。其研究表明, 模式初始状态在北大西洋和北太平洋海域的影响大约可以维持 10 年, 但这一限制在不同的模式间变化较大, 特别是在北大西洋海域。每个模式的最高相关区域都有所不同。水平传播对初值信号的演变影响较大, 这是导致不同模式存在可预测性差异的一个关键因素。Keenlyside 等 (2008) 的研究结果表明, 同化海表面温度 (SST) 的初始化方案的年代际预测试验成功模拟出了北大西洋经向翻转环流 (AMOC) 的年代际振荡, 从而提高了北大西洋海表面温度、欧洲和北美地表气温的年代际变化预报技巧; 同时其研究也表明, 加入海表面温度初始信息的年代际试验比传统气候模式的增暖幅度更接近于观测值。Mochizuki 等 (2010) 对耦合模式 MIPOC 同化海洋上层温度、盐度的年代际试验提高了

对太平洋年代际振荡 (PDO) 的预报技巧。吴波和周天军 (2012) 基于 FGOALS_g1 模式采用 IAU 方案同化海洋客观分析资料的三维温度和盐度场的年代际试验结果表明, 海洋初始化过程能够有效提高耦合模式对年代际变率较大区域的预测技巧。Metha 等 (2011) 研究表明, 通过同化三维温度和盐度场的初始化方案为部分区域的年代际气候预测提供了一定的预报技巧, 特别是在北大西洋和北太平洋区域。这些初始化方案在陆地上预报技巧提高并不明显, 热带外地区预测能力高于热带地区。

在 2009 年开始的第五阶段耦合模式比较计划 (CMIP5) 将年代际预测 (decadal prediction) 作为试验内容之一 (Taylor et al., 2012)。国际上有 18 个模式 (包括国家气候中心的气候系统模式 BCC_CSM1.1) 提交了年代际预测试验的结果, 对这些试验结果的分析进一步推动了年代际尺度气候预测研究 (Mehta et al., 2011; Chikamoto et al., 2012; Goddard et al., 2012; van Oldenborgh et al., 2012; Wu et al., 2012; Doblas-Reyes et al., 2013; Karspeck et al., 2015)。多模式集合的年代际预测结果成为 IPCC AR5 近期 (near-term) 预测的主要内容, 是近年来气候研究领域的重要成果之一 (Kirtman et al., 2013; Vikram et al., 2013)。气候模式工作组在 2016~2020 年将逐步开展第六阶段耦合模式比较计划 (CMIP6) 试验计划, 年代际气候预测试验子计划 (DCPP) (Boer, 2014) 是其中的一个重要子计划。如何提高气候模式的年代际预测能力是世界气候研究计划 (WCRP) 根据 IPCC AR5 研究结果提出的八大科学挑战之一 (Eyring et al., 2016), 也是 CMIP6 关注的科学问题之一。

对年际-年代际变率的突变性及其统计预报, 也有一些初步研究。侯威等 (2008) 运用多种线性和非线性统计模型预测的结果表明, 未来 10~20 年仍然处于干旱阶段, 之后有可能向相对湿润的时期过渡; 对我国北方帕尔默旱涝指数等旱涝指标进行小波分析发现, 20 世纪 80 年代以来, 我国华北、西北东部和东部地区的干湿变化存在着显著的准 20 年振荡周期; 距平分析表明, 我国华北和西北东部干湿位相的持续期为 10~20 年; 按年代际周期估算, 华北和西北东部未来可能出现转型, 也就是说这两个地区可能转湿, 但温度的持续升高增加了这种估算的不确定性, 增温可能会延缓或者阻止这种转型。龚志强和封国林 (2008) 发现华北区的干湿变化与温度的变化具有较好关系, 此外太平洋年代际振荡 (PDO) 也可能对我国的干湿变化有一定的影响。联系中国近 50 年帕尔默干旱严重程度指数 (PDSI) 指数的情况, 其经验正交函数分析 (EOF) 第一模态对 20 世纪 70 年代转折响应较强, 而第三模态则对 21 世纪初转折响应较显著。从当前 PDSI 的年代际状态及 EOF 第一模态看, 东北、华北、西北中部和东部、西南大部为干旱, 西北西部、西藏、江南和华南为湿润; 结合 PDSI 指数第一模态的时间系数, 可以认为这种模态在未来一段时间可能会继续维持 10~20 年。其他研究表明, 太平洋的年代际突变在东亚有明显信号 (Li and Zhang, 2009)。龚志强等 (2012) 从北半球 PNA、NAO、AO、EUPA 和 WP 这五种显著的遥相关型、年代际尺度配置作用中心的移动和作用强弱的变化角度给出了北半球遥相关型年代际尺度配置特征与气候突变之间的可能联系。这些遥相关型与东亚气候年际-年代际变化的关系还值得深入研究。

在自然变率和人为变率的共同作用下, 东亚地区的夏季气候尤其是夏季降水表现出显著的年代际变化特征 (Chen et al., 1992; Ding et al., 1992; Huang et al., 1999, 2004)。

近 50 年来,东亚地区的夏季降水在 20 世纪 70 年代末、90 年代初和 90 年代末等经历了多次明显的年代际调整过程 (Wang et al., 2001; Ding et al., 2008; 黄荣辉等, 2011)。就 20 世纪 90 年代末期而言, 1993~1998 年期间中国东部夏季降水异常为从南到北的“+—”经向三极子型与“+—”偶极子型的结合, 而 1999~2009 年期间则调整为“南涝北旱”式的“+—”经向偶极子型分布 (黄荣辉等, 2011)。孙力等 (2000, 2002) 研究则表明, 东北地区的夏季降水存在明显的年代际变化特征, 同时就结构而言, 存在复杂的空间尺度划分。国家气候中心 (2013) 监测诊断年报的数据也表明, 经历了 20 世纪 90 年代初以来的降水偏多期后, 东北亚地区的夏季降水距平自 20 世纪 90 年代末以来出现持续偏少的特征, 但 2011 年和 2012 年则又连续出现了两年的异常偏多, 2013 年夏季东北地区及俄罗斯远东地区等降水持续增多, 久违的洪涝频繁发生预示着东北亚地区夏季降水可能出现新一轮的调整 (顾薇和李崇银, 2005; 龚志强等, 2013)。

在太平洋年代际振荡 (Pacific decadal oscillation, PDO) 和大西洋多年代际振荡 (Atlantic multidecadal oscillation, AMO) 等海洋外部强迫的作用下, 东亚地区的夏季气候尤其是夏季降水表现出了显著的年代际变率 (Chen et al., 1992; Ding et al., 1992; Huang et al., 1999; 2003)。北太平洋地处欧亚大陆的下游地区, 海洋和陆地对大气加热在年代际尺度所表现出的不均性为东亚副热带环流系统异常创造了良好的热力学条件 (Ding et al., 1992; 廉毅等, 2003; 2004)。例如, PDO 作为太平洋 20°N 以北月平均海表温度的主模态反映了长期的类 El Niño 型太平洋气候变率 (Bond and Harrison, 2000), 在一定程度能够通过改变各种遥相关对应的年代际尺度平均流的背景场, 进而调节 ENSO 对副热带地区气候的影响 (Gershunov and Barnett, 1998; Birk et al., 2010; Huang et al., 1998)。杨修群等 (2005)、马柱国和符淙斌 (2007) 等揭示了东亚夏季风 (EASM) 的减弱与 PDO 的变化有重要的联系。张庆云等 (2007) 和邓伟涛等 (2009) 也充分强调了 PDO 在东亚夏季降水年代际变化中的作用。此外, AMO 作为大西洋海表温度冷暖位相交替变化的主要模态 (Enfield et al., 2001), 对欧亚地区的夏季气候变化特征有着重要的影响。例如, Ma 等 (2007) 认为 AMO 是中国华北夏季降水年代际变化的一个主要原因, 表现为正位相的 AMO 对中国夏季北方降水有促进作用。Wu 等 (2012) 研究表明, 夏季北大西洋三极子海表面温度异常能进一步激发中高纬地区的大西洋-欧亚遥相关型 (AEA), 调制位于乌拉尔山和鄂霍次克海地区的阻塞高压, 从而影响自西向东的纬向水汽输送。Xu 等 (2013) 提出北大西洋的海表面温度三极子结构可以通过所谓“大气桥”和“海洋桥”的相互作用, 影响下一季节东亚中北部地区的降水异常。因此, 北太平洋和西太平洋海表面温度等所表现出来的年代际异常, 必然也会对东亚地区的气候变率产生重要的影响, 改进的研究必然都需要关注北太平洋和西太平洋海表面温度的作用。

年代际尺度气候预测研究的目的, 一方面在于改进初始场驱动下模式对未来气候变化的预估。这一领域目前已经引起了越来越多气象学家的注意 (Smith et al., 2007; Pohlmann et al., 2009; Meehl et al., 2009), 且许多的研究都致力于提高海表面温度的预报技巧和变率等 (Keenlyside et al., 2008; Smith et al., 2010)。另一方面则在于如何为季节气候预测提供可信的背景信息, 换言之, 如何增加模式季节预报中的年代际变化

信息。但值得指出的是,目前模式针对一些与社会生产有重要联系的气候变量的年代际尺度的预报技巧还相对较低,距业务应用还有较大的差距(Kim et al., 2012; Van et al., 2012; MacLeod et al., 2012)。同时,受资料长度的限制,年代际预测效果的检验和评估,有时也采用个例分析的方法而非传统意义上的预报技巧评分的方式进行。年代际气候变化研究中的个例分析方法也被应用于揭示 20 世纪 90 年代大西洋海表面温度显著增暖的可预报性(Robson et al., 2012; Yeager et al., 2012)和验证太平洋海表面温度的年代际调整的可能性(Meehl and Teng, 2013)。

简言之,东亚季风气候年际-年代际变化非常复杂,不是能用个别指标表达(Li and Zeng, 2003)。东亚季风气候的年际-年代际变化机制也有多样性,与下垫面(海洋和陆地)变化有密切联系。而这些下垫面变化,特别是海洋的变率,是由不同的海气耦合模态决定的。所以,东亚季风气候年际-年代际变率的可预报性取决于耦合模态的可预报性及其与东亚季风气候的相互影响。这些都还有待深入研究。

1.2 研究内容

为了推进年际-年代际气候变率研究,北京大学主持的“东亚季风区年际-年代际气候变率机理与预测研究”项目作为国家重大科学研究计划项目之一,于 2012 年成立,2016 年顺利通过了科技部组织的结题验收。其中第三课题“全球气候变化背景下年际-年代际变率信号的辨识及可预报性研究”的研究目标是发展基于突变转折识别技术,辨识年际-年代际气候转折期间气候系统的主要背景因子;研发针对气候变化趋势拐点预测的理论和方法,开展年代际尺度旱涝转折的预测试验;加深对东亚气候系统年际-年代际变率机理的认识和理解,探索东亚季风区年际-年代际变率的可预报性,从而为改进季节-年际-年代际业务预测提供科学基础。研究内容为:

(1) 基于复杂网络配置的年际-年代际背景因子辨识。构建气候系统的复杂网络,基于网络结构特征量,实现大气遥相关和活动中心等空间分布和作用强度的全局图像化,给出历年北半球中高纬度系统的全局配置图和遥相关等因子间耦合作用的时空演变特征,揭示 20 世纪 50 年代末、80 年代初和 90 年代末等全球变化的年际-年代际调整期北半球中高纬环流系统中发生显著变化的背景因子。

(2) 年际-年代际气候转折的早期预警信号的辨识与捕捉。从气候及气候变化的非线性动力学特征出发,采用长程相关性、时间序列的复杂性(熵)等特征量来揭示气候突变来临前动力学系统演变的内禀特征,探讨气候转折或突变发生前信息量的消长情况,分析气候变化的自组织临界状态及其时空多层次分形结构,提取不同气象要素变化的多重分形特征,分别从单一气象要素单点时间序列和气象要素的空间图像角度出发,捕捉和识别气候转折或突变来临前的早期预警信号。

(3) 中国年代际旱涝趋势转折预测。根据旱涝历史资料研究我国旱涝时空分布特点及发生发展规律,对影响我国旱涝分布型的主要海气系统因子变化趋势进行分析,研究长期大尺度环流型调整、海表面温度的变化以及太阳黑子活动等气候系统因子与旱涝时空分布及转折之间的关系。基于上述研究成果,应用数理科学中的最新研究成果,发展

针对中长期旱涝趋势转折变化的动力统计结合预测技术,并构建模型对我国未来旱涝长期发展趋势以及可能出现的转折进行预估。

(4) 年际-年代际气候变率的可预报性研究。将集合卡曼滤波(EnKF)初值化方案整合进国家气候中心气候系统模式(BCC_CSM),通过系统的研究,加深对东亚季风区年际-年代际气候变率机理的理解,开展年际-年代际气候变率可预报性研究。在提取20世纪80年代和21世纪前10年全球气候历年相似因子基础上,结合国家气候中心动力气候模式对全球温度和高度场等要素的历史回报结果和历史实况,建立模式历年预报误差的集合。采用动力-统计相结合的方法,对模式20世纪80年代和21世纪前10年冬季预测结果进行订正试验,基于气候转折或突变的早期预警信号,开展年际-年代际气候转折或突变的可预测性研究。

1.3 本书结构

综上所述,在全球变暖的背景下,全球和东亚气候均发生了明显的变化,极端气候事件频发,增加了国家和社会对于提高气候预测准确率的需求。由于气候系统的高度复杂性,且气候变暖导致了气候系统与天气气候之间的关系发生了突变,使得气候预测困难重重,无论是国内还是国外,目前预测水平依然不高,还远远达不到国家和社会的业务需求。年际-年代际(1~30年)特别是年代际(10~30年)气候预测正迅速成为气候变化的一个新的优先研究领域。以上这些科学问题和业务问题都亟须进行系统的研究和回答,才能有助于进一步提高气候的预测水平,使之更好地为政府防灾减灾决策服务。基于以上研究思路,本书共分为9章,各章的内容如下。

第1章:绪论。扼要地概述了全球变暖背景下东亚气候年际-年代际变化的特征,总结了东亚地区的气候年际-年代际变率主要影响机制及研究进展,介绍了国内外年际-年代际变率的预测现状和存在的问题,进而提出了研究内容。

第2章:西太平洋副热带高压(简称“副高”,下同)年际-年代际变率及其影响。阐明了夏季西太平洋副高分类、副高的不同类型下我国夏季旱涝的分布特征、副高的不同类型下我国夏季旱涝分布的成因,重点介绍了夏季西太平洋副高的客观量化预测及其对汛期降水的指示,包括高度场客观量化预报方案、副高预测效果检验及其所属类型下夏季降水特征、副高指数投影及其所属类型下夏季降水特征。针对业务指数存在的问题,研究了西太平洋副高指数的重建,包括重建的副高指数定义标准、重建指数与业务指数的对比分析、重建的副高指数与夏季降水的关系;基于新指数分析了西太平洋副高的年际特征及其与大气环流和热带海表面温度异常的关系,即副高的准两年变化特征及其与准两年振荡相关的海表面温度和大气环流异常。进一步研究了西太平洋副高两次北跳及其与我国东部夏季降水的关系。

第3章:青藏高原积雪和海表面温度对中国东部夏季降水年代际变率的影响。揭示了青藏高原冬季积雪和东亚夏季降水关系的年代际变化及其可能原因,指出20世纪90年代末高原冬春积雪的减少和东亚夏季降水的变化相关联;研究了中国东部夏季降水年代际变率与海表面温度的联系,指出海表面温度和大气内部动力过程对中国东部夏季降