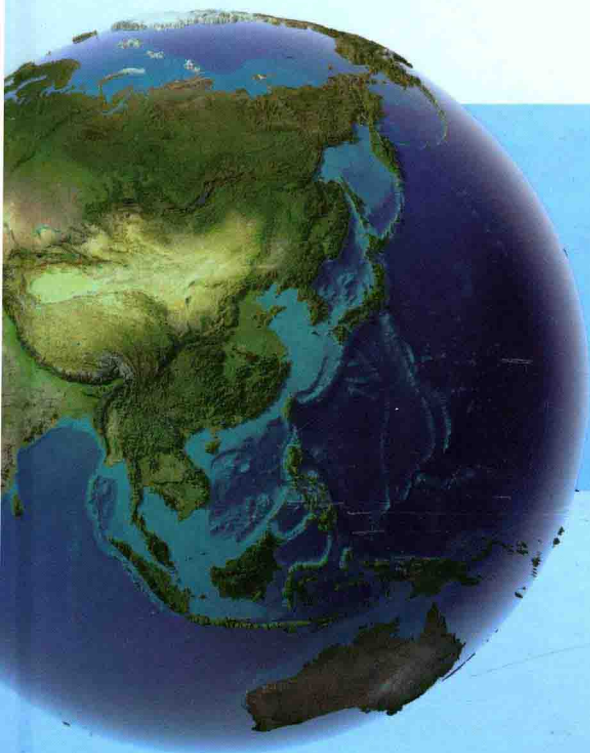


“十三五”国家重点图书出版规划项目

气候变化对中国东部季风区陆地水循环与
水资源安全的影响及适应对策



气候变化对北方农业区 水文水资源的影响

莫兴国 章光新 林忠辉 等 著
陈 东 胡 实



科学出版社

“十三五”国家重点图书出版规划项目

气候变化对中国东部季风区陆地水循环与
水资源安全的影响及适应对策

气候变化对北方农业区 水文水资源的影响

莫兴国 章光新 林忠辉 等 著
陈 东 胡 实



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从历史实证资料和未来气候变化情景出发,系统论述了气候变化对中国北方典型农业区(黄淮海平原和松嫩-三江平原)和生态脆弱区(黄土高原)的水循环关键要素及区域水资源的影响。基于1950年以来的实测资料和生态水文模型模拟结果,论述了中国北方主要农业和生态脆弱区干旱事件发生的时空特征,分析了东亚夏季风变化对北方地区水资源量的影响,模拟分析了不同流域生态水文过程和水资源的时空演变特征,系统阐释了中国陆域植被蒸散的时间变化及区域分异规律。在此基础上,根据GCM多模式集成未来情景数据,基于生态水文模型模拟,分析了未来气候变化对华北和东北地区主要农作物产量、耗水、灌溉需水和区域水资源的可能影响;探讨了应对气候变化的主要农业生产措施和对策;以流域水土资源平衡为目标,评估了黄淮海地区作物种植品种区域布局和结构调整、东北平原水稻种植面积扩张的水资源效应。书中还系统介绍了生态水文动力学模型的数学物理原理、关键参数的区域扩展方法。

本书可作为流域生态水文模拟、气候变化对区域农业和水资源影响评估方面的研究和教学参考书,供相关研究人员和高校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

气候变化对北方农业区水文水资源的影响 / 莫兴国等著. —北京: 科学出版社, 2016. 5

(气候变化对中国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策)

“十三五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-048096-5

I. ①气… II. ①莫… III. ①气候变化-影响-农业区-区域水文学-研究-中国 ②气候变化-影响-农业区-水资源-研究-中国 IV. ①P344.2 ②TV211.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 093750 号

责任编辑: 李 敏 周 杰 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 铭轩堂

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 5 月第一次印刷 印张: 20 3/4 插页: 2

字数: 500 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



国家重点基础研究发展计划（973计划）2010CB428400项目

气候变化对我国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策

《气候变化对中国东部季风区陆地水循环 与水资源安全的影响及适应对策》 丛书编委会

项目咨询专家组

孙鸿烈	徐冠华	秦大河	刘昌明
丁一汇	王浩	李小文	郑度
陆大道	傅伯杰	周成虎	崔鹏

项目工作专家组

崔鹏	王明星	沈冰	蔡运龙
刘春蓁	夏军	葛全胜	任国玉
李原园	戴永久	林朝晖	姜文来

项目首席

夏军

课题组长

夏军	罗勇	段青云	谢正辉
莫兴国	刘志雨		

《气候变化对北方农业区水文水资源的影响》 撰写委员会

课题负责人 莫兴国

承担单位 中国科学院地理科学与资源研究所

参加单位 中国科学院东北地理与农业生态研究所

参加人员 莫兴国 章光新 林忠辉 陈 东
胡 实 刘苏峡 黄志刚 孟德娟
卢洪健 李峰平 李夫星 王丝丝

序

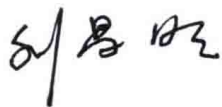
中国北方传统的农业区水土资源开发强度大，社会经济快速发展，资源性缺水问题日趋严重。近三十年来，因气候变暖、降水减少、严重干旱事件频发、人类活动强度加大等因素，地表产流和河道径流减少，加剧了水资源供需矛盾。区域地表水过度利用，地下水局部超采严重，引发了一系列环境问题。气候变化背景下农业旱灾频发和成灾面积均呈上升趋势，对区域农业、生态和社会经济的可持续发展构成了巨大威胁。根据气候变化预测，未来北方地区气温升高，降水格局改变，干旱化趋势明显，农业生产的水资源保障和作物高产稳产均面临持续压力。开展气候变化对中国北方农业和生态脆弱区（华北平原、黄土高原和松嫩-三江平原）水资源影响的研究，有助于厘清区域水资源变化和农业生产的关系，提高应对气候变化的能力，为决策者提供科学依据。

华北平原和松嫩-三江平原是中国重要的商品粮生产基地，农业用水总量占总用水量的60%以上。华北平原目前广泛推行的小麦-玉米一年两熟制属于高耗水种植模式，作物总耗水量超过年降水量，需要大量灌溉水补充。随着社会发展，工业和生活需水不断挤压农业和生态环境用水，农业用水比例逐年下降，水资源的这种变化对区域农业生态与生产的影响是重大科研问题，水资源不足已成为华北农业稳定发展的限制性因素，区域水资源优化配置和高效利用研究能够为决策部门提供重要的科学依据。松嫩-三江平原是国家新世纪粮食增产工程计划的主要地区，两者水热天然条件均属一年一熟。与华北平原相比，松嫩-三江平原水资源较丰富，农业需水与其他部门的竞争态势相对缓和。随着气候变暖，东北地区水稻种植面积呈快速扩张态势，农业开发、湿地保护和社会经济之间的用水矛盾日益突出，需要深入研究环境保护、经济发展和水资源保障之间的协调关系。黄土高原是华北平原的生态屏障和重要的水、沙来源区，气候变化背景下，黄土高原地区干旱化更趋严重，加上广泛实施的水土保持措施，导致河川径流减少，影响了黄河下游平原区的可利用水资源量，因而黄土高原生态和水资源的演化休戚相关。

气候变化对中国北方地区农业水资源产生了怎样的影响？未来气候情景下，农业水资源和农业生产对气候变化与人类活动将如何响应？我们需要采取什么应对措施和策略？在科技部重点基础研究发展计划项目研究成果的基础上，该书作者结合多年的研究积累，采用“现状、未来、问题、适应”的框架，系统阐述了华北平原、松嫩-三江平原黄土高原气候要素及干旱的演变特征；从气候变化、生态与水文过程相互作用的视角，基于分布式

生态水文动力学模型（VIP 模型等），集成遥感信息，模拟分析了农业、生态环境耗水和作物生产力的空间格局和变化趋势；利用气候变化的集合预报情景数据，预估了气候变化对北方地区流域水资源、作物用水和产量的可能影响；以水土资源平衡为原则，提出和评估了区域农业种植制度调整等适应措施对农业产量、水资源可持续利用的效益。该书的研究成果提升了气候变化对中国北方农业和生态脆弱区水循环和水资源影响机理、作用途径和未来变化趋势的科学认识，为进一步探索气候变化下区域农业发展、粮食安全的水资源保障策略提供依据。

该书是作者近年来辛勤工作的荟萃。其研究成果可为中国农业、水资源管理部门深入开展气候变化适应对策和制定适应措施提供科学参考。



中国科学院院士
2016 年 4 月

前 言

农业是社会经济发展的基础，关系到国家粮食安全和社会稳定。粮食生产需要消耗大量的水土及其他资源，与社会生产生活其他门类存在着资源消耗竞争。以全球变暖为主要特征的气候变化以及不断增强的人类活动导致的环境变化，显著改变了全球生态系统尤其是农业生态系统的环境条件，加剧了水资源在社会生产各部门之间的竞争态势。例如，农业灌溉用水与区域可利用水资源之比由20世纪70~80年代的80%左右降到60%左右。究其原因，一方面是灌溉技术的进步导致灌溉水量的减少，另一方面是其他部门用水需求不断增加的压力所致。气候变化对农业和水资源的影响一直受到政府、社会和农业生产部门的特别关注。农业生产中如何减缓和适应气候变化，是全球变化领域首要关注的焦点问题。

华北和东北地区耕地资源集中，是国家重要的商品粮基地，对国家粮食安全具有举足轻重的作用。但因社会发展程度较高、人口分布密度大、干旱频发等自然社会因素，导致水资源供求矛盾不断加剧，生态环境问题突出。华北和东北地区自1950年以来气候明显趋暖，气温增幅高于全国平均水平，然而降水变化幅度不大，甚至稍有下降，气候暖干化趋势尤为突出，正在逐步改变区域农业种植结构、水资源配置格局和利用效率。气候变暖趋势对作物生产有有利的一面。例如，有效积温增加，改善了作物生长的气象条件。华北平原冬小麦种植北界将逐步向更高纬度推移，南部地区双季稻种植适宜区域也逐步扩大；在东北松嫩-三江平原，中晚熟水稻品种种植面积大幅扩张，显著提高了粮食产量。大气CO₂浓度升高的施肥效应，将促进作物光合作用，抑制蒸腾耗水，提高了水资源利用效率。气候波动和气候变暖对作物生长和粮食生产也有不利的一面。例如，温度升高缩短了作物生育期，增加植物器官的呼吸消耗，对作物产量形成和品质呈负面影响。温度和CO₂对作物生长的影响不具有累加效应，在不同温度区间可能是正向也可能是负向。大气CO₂浓度增加的肥效作用能否充分发挥，作物碳同化等生理过程对大气高CO₂浓度的气候适应过程仍需进一步研究。尤其在全球气候变暖的同时，极端天气气候事件（如高温热浪、大风冰雹、暴雨洪水和干旱等）的发生频率、强度也随之增加，作物生产将面临极端天气气候灾害增多的风险。例如，高温对作物的影响是非线性的，主要影响作物花期授粉、灌浆期高温催熟和加重水分胁迫，其临界点因作物类型、品种而异，超过临界点后的高温胁迫对作物的伤害是破坏性的，高温热浪出现概率的增加使得作物面临绝收的风险增大。研究结果表明，随着温度增幅的扩大，中国北方地区作物蒸散耗水呈上升趋势，作物生育期蒸散比降水增加的幅度高，更多的灌溉水量将用于满足作物需求。根据预测，2050年华北地区水稻-小麦轮作系统的需水量将增加8%~16%，小麦-玉米轮作系统将增加7%~10%，其中玉米和水稻的灌溉水量将大幅度增加。总而言之，在区域气候暖干化的变化趋势下，粮

食和水资源安全的风险增加，将不可避免地恶化区域水资源利用的竞争态势，挑战当今流域水资源管理理论与方法。

气候变化对农业水资源的影响涉及多个方面，国际社会、各国政府管理部门、研究单位和农户等不同层面，都在探索、研究、尝试采用相关的应对策略和具体应对措施，以适应变化的环境。尽量减少极端气候的暴露度，降低作物产量灾损和水土资源低效利用的风险，提高农业生态系统应对气候变化的弹性，是农业适应气候变化的主要目标。气候变化对农业生产的影响和适应，涉及多层次、多尺度和多部门交叉。从国家层面，要制订系统性的行动纲领和路线图，积极主动面对气候变化的挑战，确保国家粮食安全和水资源安全。应对策略可着眼于短期、中期和长期三个时间尺度，研究设计无悔的适应性理论、方法和技术。从空间尺度上，要在田间、流域和区域等不同尺度，统筹水土气生资源，研究最优配置方案。在具体应对措施方面，研究机构和管理部门、生产部门要通力合作，构建系统性的措施体系。例如科研部门要着力于：①抗逆品种的选育（耐高温、耐干旱）；②不同时间尺度的灾害性天气预报和预警，对可能出现的极端气候事件做出概率预测；③开展农业物理模型-经济模型-气候模型的耦合模拟预测，研究协调农户收益、水土资源利用、环境保护之间的不同适应方略。管理和技术服务部门要着力于：①协助农业生产者改变耕作方式和种植结构，提高农业技术管理水平，促进水、土、气、生资源的高效利用；②建立健全农业生产灾害的经济保障机制，如灾害保险等。全社会需要从不同层面、不同方向共同努力，积极应对全球变化新形势，实现社会可持续发展。

本书集成的研究成果主要是在科技部 973 计划项目“气候变化对中国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策”的第四课题“气候变化对北方典型农业及生态脆弱区水资源的影响”（2010CB428404），国家自然科学基金项目“华北平原水分胁迫对作物需水和生产力的影响机理与模拟”（31171451）等项目的支持下取得的。针对如下科学问题：①未来气候变化下，华北平原和东北三江平原的降水、温度等变化的时空格局会是什么？②相应地水资源的时空格局将会如何变化？③干旱的发展趋势是什么？发生概率和强度有什么变化？④对粮食生产的影响有多大？⑤满足国家粮食战略工程的水资源需求有多大？项目组成员以华北黄淮海平原、东北松嫩-三江平原、黄土高原中部为主要研究区，通过野外调查和统计数据收集、田间和野外小流域生态水文试验、遥感信息反演、区域生态水文模型模拟等多种研究手段，对 1950 年以来黄淮海平原、松嫩-三江平原、黄土高原的水循环过程、水资源变化、干旱时空变化格局进行了模拟分析，预估了未来气候变化情景下研究区农作物需水、水资源、干旱强度和频率的变化。针对存在的问题，探讨了相应的适应对策和措施，以缓解华北、东北日益严重的水危机。具体内容涉及华北平原、松嫩三江平原和黄土高原地区气候水文变化特征，干旱的时空演变特征和未来变化趋势；区域生态水文过程及其对气候变化的响应模拟方法；气候变化对华北平原和松嫩-三江平原农业和水资源的影响；未来气候变化情景下区域农业产量、耗水量和灌溉需水量的变化；气候变化应对措施的评价等。

全书共分 7 章，第 1 章主要由莫兴国、章光新、陈东等人执笔；第 2 章由莫兴国、胡实、卢洪健执笔；第 3 章由莫兴国、胡实执笔；第 4 章由莫兴国、刘苏峡、胡实、王丝

丝，孟德娟执笔；第5章第5.1节由陈东执笔，第5.2、5.3节由莫兴国、刘苏峡执笔；第6章第6.1、6.5和6.6节由章光新、李峰平、黄志刚执笔；第6.2、6.3和6.4节由莫兴国、孟德娟执笔；第7章第7.1节由莫兴国执笔，第7.2节由陈东、李夫星执笔；第8章第8.1~8.3节由林忠辉、胡实、莫兴国执笔，第8.4节由章光新执笔。全书由莫兴国、胡实、林忠辉统稿，王丝丝、谭丽萍、黄法融、王盛、丁文浩等人承担了部分文稿的翻译。

限于作者手能力和知识水平，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

著 者
2016年3月

目 录

第 1 章 中国北方典型农业和生态脆弱区气候变化与气候情景	1
1.1 华北地区气候变化与情景	1
1.1.1 气候基本要素的变化	2
1.1.2 农业气象指标的变化	6
1.1.3 气候变化情景下降水和温度变化	9
1.2 松花江地区气候变化与情景	11
1.2.1 气候基本要素变化	12
1.2.2 农业气候指标的变化	15
1.2.3 气候变化情景下降水和温度变化	17
1.3 黄土高原气候变化与情景	22
1.3.1 气候基本要素变化	24
1.3.2 气候变化情景下水文参数的变化	26
第 2 章 中国北方地区干旱强度及频率的演变和趋势	34
2.1 干旱指数及其计算方法	34
2.1.1 Palmer 干旱烈度指数	34
2.1.2 标准化降水指数 (SPI) 和降水-蒸发指数 (SPEI)	36
2.1.3 遥感干旱指数	39
2.2 华北地区干旱的演变特征	40
2.2.1 华北干旱时空演变特征	40
2.2.2 未来华北干旱强度和频率的变化趋势	47
2.3 东北地区干旱的演变特征	49
2.3.1 东北地区干旱格局和演变	49
2.3.2 未来情景下松嫩-三江平原干旱时空变化	57
2.4 未来气候情景下北方地区干旱强度和频率的变化趋势	60
2.4.1 未来温度和降水的变化趋势	60

2.4.2	北方地区干旱强度的变化趋势	61
2.4.3	极端干旱发生频率与范围的变化特征	63
2.4.4	温度升高对极端干旱的影响	67
第3章	VIP生态水文动力学模型的原理与方法	69
3.1	能量平衡	70
3.1.1	热量平衡	70
3.1.2	入射辐射	72
3.1.3	冠层辐射传输	74
3.1.4	水汽和热量交换阻力的参数化	76
3.2	土壤水热运动	76
3.2.1	土壤热传导	77
3.2.2	土壤水分运动	77
3.3	光合作用与植被动态	78
3.3.1	冠层光合作用	78
3.3.2	植被动态	80
3.4	土壤碳氮循环	81
3.4.1	地表凋落物库	82
3.4.2	根茬凋落物库	83
3.4.3	微生物库	83
3.4.4	腐殖质库	84
3.5	地表产汇流	84
3.5.1	地表产流	84
3.5.2	地下水汇流	87
3.5.3	水库调度	87
3.6	光合参数的遥感反演	88
3.6.1	光合参数遥感反演方案	89
3.6.2	光合参数 (V_{cmax}) 的空间格局及验证	95
3.6.3	光合参数反演方案的评价	103
第4章	气候变化对华北水资源和作物生产力的影响	114
4.1	土壤水分的变化趋势	114
4.1.1	土壤水分时空格局	115

4.1.2 土壤水分的变化趋势	119
4.2 蒸散和作物生产力的格局及演变	121
4.2.1 遥感 ET 和 GPP 模型	121
4.2.2 预测 ET 和 GPP 的验证	124
4.2.3 ET 的空间分异性	126
4.2.4 GPP 和 WUE 的空间分异性	127
4.2.5 ET 和 GPP 的年际变化	128
4.3 SRES 气候情景下蒸发和径流的变化	130
4.3.1 Thornthwaite-Schreiber 方法	130
4.3.2 蒸发变化	132
4.3.3 年径流变化	137
4.4 RCP 排放路径下黄淮海流域水资源变化	139
4.4.1 实际蒸散和径流的响应	140
4.4.2 流域水量盈亏量的变化	142
4.5 作物产量和耗水对气候变化的敏感性	144
4.5.1 气候变化情景	145
4.5.2 对比方法	146
4.5.3 不考虑 CO ₂ 肥效时作物产量对气候变化的响应	148
4.5.4 考虑 CO ₂ 肥效时产量对气候变化的响应	149
4.5.5 C ₃ 和 C ₄ 作物对气候变化的响应	150
4.5.6 作物产量对降水变化的响应	150
4.5.7 灌溉在作物产量响应气候变化中的作用	151
4.5.8 泊头和怀远作物产量波动对气候变化的响应	152
4.5.9 气候变化的适应性认识	153
4.6 CMIP5 RCP 多情景下华北冬小麦耗水和产量的响应	154
4.6.1 生育进程的响应	155
4.6.2 产量和耗水的响应	157
4.6.3 收获期稳定对作物产量和耗水量的影响	159
4.7 多模式集合预测冬小麦-夏玉米蒸散和产量的变化	160
4.7.1 未来气候要素变化	161
4.7.2 作物产量对气候变化的响应	163

4.7.3	作物蒸散量对气候变化的响应	167
4.7.4	气候变化对作物水分利用效率的影响	169
第5章	气候变化对黄土高原水资源的影响	171
5.1	气候变化对径流的影响	171
5.2	气候变化对黄土高原典型流域生态水文过程的影响	173
5.2.1	无定河流域水量平衡的分布式模拟	173
5.2.2	无定河流域土壤水分的时空演变特征	183
5.2.3	气候变化对无定河流域生态水文过程的影响	200
第6章	气候变化对松花江流域水文水资源的影响	207
6.1	潜在蒸散和径流变化的归因分析	208
6.1.1	基于 Budyko 公式的潜在蒸散和径流变化归因分析方法	208
6.1.2	潜在蒸散对气象要素敏感性分析	211
6.1.3	Budyko 模型模拟年径流的验证	212
6.1.4	松花江流域气候因子对径流和潜在蒸散的贡献率	213
6.2	气候变化与人类活动对松花江流域径流影响的分离	214
6.2.1	集水区划分及水文气象数据收集	214
6.2.2	气候变化和人类活动对径流影响的定量区分方法	215
6.2.3	气候变化和人类活动对松花江流域径流变化的贡献	217
6.3	植被蒸散和生产力的时空格局及演变	221
6.3.1	研究方法和数据	223
6.3.2	ET 和 GPP 验证	223
6.3.3	ET 和 GPP 时空格局及驱动机制	225
6.3.4	ET 和 GPP 的年际变化	228
6.4	基于 Budyko 模型的松花江流域年径流未来变化预测	229
6.5	基于 SWAT 模型的松花江流域径流未来变化预测	232
6.5.1	未来气候情景下径流变化趋势	232
6.5.2	未来径流空间分布特征	234
6.5.3	未来气候情景下水资源量预估	236
6.6	气候变化对松嫩平原作物耗水和灌溉需水的影响	236
6.6.1	研究方法	237
6.6.2	水稻全生育期需灌溉水量变化	240

6.6.3	不同生育时段需灌溉水量变化	244
6.6.4	气候变化对水稻水分需求贡献率	247
6.6.5	2010~2049 年水稻需水量及灌溉水量预估	248
第 7 章	中国陆域蒸散和径流的演变趋势	249
7.1	蒸散格局与演变趋势	249
7.1.1	数据及其处理方法	250
7.1.2	ET 模拟结果的多尺度验证	252
7.1.3	年参考蒸散和实际蒸散的空间变化	253
7.1.4	实际蒸散的季节和年际变化	256
7.1.5	不同植被类型的 ET_a 年际变化	259
7.2	中国东部季风强度变化预测径流响应	260
7.2.1	东部径流变化与夏季风强度指数的关联性	261
7.2.2	西太平洋副热带高压对径流变化的影响	262
7.2.3	未来情景下径流变化预测	270
第 8 章	确保粮食安全和水资源可持续利用的区域农业气候变化适应措施与对策	272
8.1	历史气候变化对中国北方气候资源和农业生产的影响	272
8.1.1	农业气候资源的变化对主要粮食作物生产的影响	272
8.1.2	作物生长其他条件的改变对作物生产的影响	273
8.2	农业适应气候变化的内涵	274
8.2.1	农业适应气候变化的措施	274
8.2.2	农业适应气候变化措施的评估	275
8.3	基于水资源安全的黄淮海地区气候变化适应	275
8.3.1	未来气候变化对黄淮海地区水资源供需影响分析	275
8.3.2	黄淮海地区几种农业适应性措施的效果模拟评估	277
8.3.3	黄淮海地区农业应对气候变化的对策建议	283
8.4	应对气候变化的松花江流域水资源管理适应性对策	284
参考文献		288

第 1 章 中国北方典型农业和生态脆弱区 气候变化与气候情景

中国北方季风区受东亚和南亚季风的影响，冬季在西伯利亚和蒙古高压的控制下，盛行寒冷干燥的西北风；而夏季则受西太平洋副热带高压的控制，以南海季风为主，盛行西南风，高温、潮湿多雨。位于其中的华北平原、松嫩三江平原作为中国的粮食主产区，是国家粮食安全的保障；而黄土高原水土流失严重、植被盖度低，是内陆干旱区向季风气候区的过渡带，其生态环境脆弱，对气候变化尤为敏感。黄土高原也是冬春季沙尘暴的主要来源，对华北平原生态和水资源安全影响深远。

在气候自然驱动力和人类活动（如土地利用变化、温室气体排放等）的共同作用下，近百年来全球气候发生了明显变化，主要表现为气温上升了 0.74°C 、极端天气气候事件（超级台风、强寒潮、特大暴雨、热浪、持续性干旱等）增加，严重威胁了人类社会赖以生存的生态系统结构与功能。政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告预测，21 世纪末全球温度将上升 $0.3 \sim 4.8^{\circ}\text{C}$ ，温度每上升 1°C ，降水则增加 1%。然而，气候变化在不同气候带上呈明显的空间分异性，很可能出现“湿的更湿，干的更干”的境况。为保障粮食、纤维和水资源等社会福祉，预测和评估气候变化对农业生态系统和区域水资源的影响变得尤为迫切，为此国际社会投入了大量的人力物力开展相关研究，取得了大量气候变化及其影响的新认识。以农业为例，研究表明，作物对极端温度的响应呈非线性关系，高温干旱将是未来气候变化下作物产量下降的主要因素。除此之外，温度上升，作物受到的热胁迫持续时间延长，也会影响谷物籽粒的灌浆效率，从而引起产量不稳定。尽管大气 CO_2 浓度增加具有肥效作用，FACE（free air CO_2 enrichment）实验显示，其肥效作用并不能完全抵消增温对作物产量的不利影响（Long et al., 2006）。根据预测，到 2050 年，中国玉米产量将增加 2%，水稻产量没有明显变化，小麦产量将减少 5%（Lobell, 2007）。由于气候变化的空间分异性，特别需要甄别气候变化的区域响应特征，以便制订和采取切实有效的适应措施。中纬度地带气候变化最为明显，其中农业及生态脆弱区对气候变化尤为敏感，增加了农业生产的不稳定性，威胁区域粮食和生态安全。因此，深入了解华北、东北和黄土高原区域水循环与农业生态系统对气候变化的响应机制，正确预测和评估未来气候变化对区域水资源和农业生产的影响，有助于提出科学的气候变化适应对策与措施，减缓其不利影响，促进人与自然和谐关系的构建，实现区域社会和经济的可持续发展。

1.1 华北地区气候变化与情景

华北平原（黄淮海平原）位于 $112^{\circ}48'\text{E} \sim 122^{\circ}45'\text{E}$ ， $31^{\circ}14'\text{N} \sim 40^{\circ}25'\text{N}$ ，包括河北、河