

气候变化对水文过程影响 及不确定性分析

任 政 路 明 龚家国/著

Climate Change Impact on Hydrological
Processes and Uncertainty Analysis



科学出版社

气候变化对水文过程影响 及不确定性分析

任 政 路 明 龚家国 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以淮河(蚌埠站)流域为研究对象,综合气象、水文、水资源、概率统计和运筹学等多个学科,从分析气候变化对水文过程影响的不确定性因素出发,重点介绍了水文模型参数的不确定性分析方法;结合流域气象观测和全球气候模式预测结果,阐述了气候模式区域适应性评价方法,进一步介绍了气候模式预测结果的时空降尺度方法;根据淮河流域气候模式时空降尺度结果,结合大尺度分布式水文模型,预测淮河流域2010~2099年的水文过程,进一步分析了淮河流域极端水文事件出现的概率和强度。

本书适用于水文、水资源、气象、环境等相关专业的本科生、研究生、大学教师和科研人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

气候变化对水文过程影响及不确定性分析 / 任政, 路明, 龚家国著.
—北京: 科学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-03-054318-9

I. ①气… II. ①任… ②路… ③龚… III. ①气候变化-影响-陆面过程-研究 IV. ①P339

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 214054 号

责任编辑: 王 倩 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 9 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017 年 9 月第一次印刷 印张: 10

字数: 251 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

| 前 言 |

近百年的事实表明我国气候变暖使极端天气事件出现的频率增加，从而使生态环境和社会经济受到影响。根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）第四次报告预测，21 世纪末我国气温将增加 $3.9 \sim 6.0^{\circ}\text{C}$ ，水循环速度将进一步加剧，极端洪旱事件导致社会经济遭受灾害的风险日益增高，气候变化成为制约社会可持续发展的最重要因素。探索未来气候变化对水文过程的影响成为科学研究的紧迫任务，也是水利科学面临的挑战。

本书旨在提出气候变化对水文过程影响的不确定性方法，为进一步研究流域洪旱灾害及其规律，指导防灾减灾、科学编制流域水资源开发利用方案等方面具有重要意义。同时，在保证流域社会可持续发展和维持河流健康等方面也给予重要的参考。本书以淮河作为研究对象，构建了淮河流域大尺度 VIC 模型系统，并针对水文模型参数的不确定、气候模式选择、气象资料的降尺度、未来极端洪水分析等方面展开研究，主要成果包括以下几个方面：

1) 基于改进 GLUE 方法的模型参数识别

基于 GLUE 方法、MCMC 抽样技术，以及多目标模型的进化算法，充分考虑水文模型参数率定和校核过程中置信区间对实测流量的覆盖率和区间性质，提出多目标 GLUE 的水文模型参数率定方法。实证表明该方法能够以最优置信区间捕获实测数据，从而增强了水资源预测结果及其影响评价的可信程度。

2) 气候模式性能评价指标体系构建

基于淮河流域基准期（1961 ~ 1990 年）的实测降水和气温资料，采用相关系数法和 Spearman 秩次法检验气象因子时间序列趋势、STARS 法和 R/S 法检验序列突变、功率谱分析法检验序列周期。根据气候模式序列对实测序列相似指标、序列统计特征值指标、气候模式模拟性能指标，构建了气候模式评价指标体系。通过对 IPCC AR4 的 22 个模式 A1B、A2 和 B1 情景进行评价，结果表明 HADCM3 和 GIEH 模式能够较好地模拟淮河流域的降水和气温变化趋势，这两种模式对当前气候变化的“再现能力”为检验未来气候变化的可信度及其影响评价奠定了基础。

3) 气候模式情景的时间降尺度研究

由于 IPCC 提供的气候模式结果大多是逐月过程，而研究气候变化对水文过程影响往往需要气象数据的逐日输入，因此有必要构建月-日的时间降尺度方法。在降水的时间降尺度方面，通过考虑站点的历史降水规律，提出了一阶马尔科夫链的月降水天数分配到旬的方法，然后应用随机抽样方法实现月-日的降水序列降尺度，减小了月降水时间直接分配日的随机性。结合逐日气温的历史变化信息，本书提出了线性插值与 MCMC 相结合气温（月-日）降尺度方法。

4) 气候变化下淮河流域未来极端洪水预测

利用 HADCM3 模式 A1B、A2 和 B1 三种气候情景预测结果，通过时空降尺度，将气候情景资料耦合到大尺度 VIC 模型，预测淮河流域 21 世纪的水资源变化趋势和极端洪水发生的可能性。结果表明淮河流域未来水资源量具有不断增加的趋势，且与降水的变化趋势是一致的：在未来 90 年发生超过“1954 洪水”的一级极端洪水，在 A1B 情景下的概率最大，而且出现在 2020s（2010 ~ 2039 年）的概率是最大的，日平均流量极有可能达到 $23875\text{m}^3/\text{s}$ ，月平均流量极有可能达到 $10877\text{m}^3/\text{s}$ 。

在本书即将出版之际，感谢河海大学郝振纯教授对大部分内容给予的指导，感谢河北工程大学对出版给予的经费支持。气候变化对水文过程影响是一项庞大而又复杂的问题，也是各国政府和科学工作者长期关注的一个重要主题，限于作者对这一问题认识和理解水平，仍会存在不足，望读者批评与指正。

| 目 录 |

第 1 章	气候变化对水文过程影响不确定性研究进展	1
1.1	气候变化事实及其影响	1
1.2	气候变化对水文过程影响的不确定性因素	9
1.3	国内外研究进展	13
第 2 章	流域水文模型参数的不确定性研究	23
2.1	引言	23
2.2	贝叶斯统计推断	24
2.3	GLUE 方法	26
2.4	NSGA- II 算法	33
2.5	多目标 GLUE 方法	40
2.6	实证分析	41
2.7	小结	51
第 3 章	淮河流域气候变化及 IPCC 气候模式评估	53
3.1	淮河流域概况	53
3.2	气候因子时间序列分析方法	54
3.3	淮河流域气候变化分析	60
3.4	淮河流域 IPCC 气候模式评估	67
3.5	气候模式对淮河流域气候变化情景预估	80
3.6	小结	85
第 4 章	淮河流域 VIC 模型构建及其参数识别	87
4.1	VIC 模型理论基础	88
4.2	淮河流域 VIC 模型的构建	97
4.3	基于多目标 GLUE 方法的 VIC 模型参数识别	107
4.4	小结	112
第 5 章	气候变化下淮河流域未来水资源预测	114
5.1	空间降尺度	114
5.2	时间降尺度	117

5.3	未来水资源预测和极端洪水分析	126
5.4	小结	138
第 6 章	气候变化对水文过程影响研究展望	140
6.1	数据同化研究	140
6.2	水文过程影响的归因分析	141
6.3	水文极端事件研究	142
6.4	时空尺度问题	143
参考文献		145

第 1 章 气候变化对水文过程影响不确定性研究进展

1.1 气候变化事实及其影响

1.1.1 我国气候变化事实

气候是地球自然系统的重要组成部分，它的任何变化都会对生态环境和社会经济产生不可忽视的影响。百余年的观测数据显示，全球气候正经历一次以变暖为特征的显著变化。1960~2005 年线性增温为 0.74°C ，其中 1995~2006 年有 11 年的气温位列 1850 年以来最暖。唐国利和任国玉采用温度观测中的最高气温和最低气温的平均值代表月平均气温^[1]，计算了我国陆地范围 $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 格点的气温距平，然后根据格点代表的面积加权得到中国平均气温，即 T 序列，并计算 T 序列对 1971~2000 年平均气温的偏差，如图 1-1 所示。

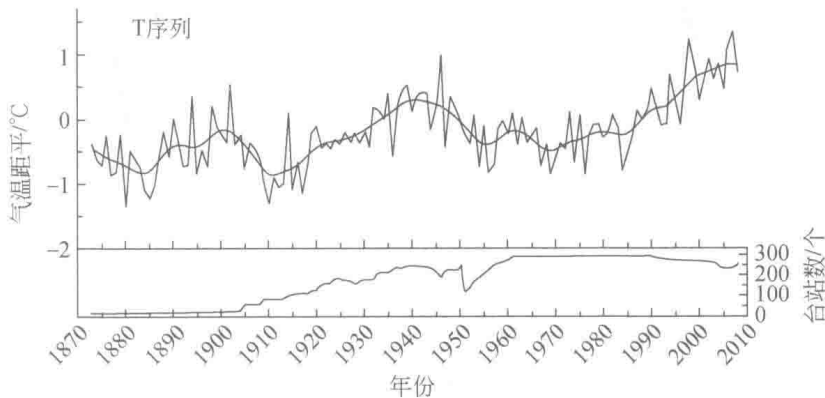


图 1-1 中国年平均气温距平

从图 1-1 可以看出，1885 年以来我国经历了 3 个升温阶段：第一阶段出现在 1885~1900 年，且在 1900 年达到峰值，周期为 15 年；第二个阶段出现在 1910~1940 年，且在 1940 年达到峰值，周期为 30 年；第三个阶段出现在 1970 年以后，

其中 2007 年成为百年来最暖的 1 年。由此表明，我国近百年来（1910 ~ 2007 年）年平均气温具有明显的变暖趋势，直线增温速率为 $0.86^{\circ}\text{C} / 100\text{a}$ ，且自 1885 年以来变暖周期具有增加趋势。

1.1.2 气候变化对我国洪旱灾害影响

我国位于欧亚大陆的东南部，东临太平洋，南北纬度的跨度范围大。由海陆之间热力差异造成的季风气候特别显著，其造成了我国降水年内时空分布不均，年际差异较大。据我国 2005 ~ 2015 年的十大自然灾害统计，我国共发生旱灾 17 次，洪涝灾害 67 次，其他灾害 26 次（含地震灾害 17 次）。洪旱灾害是我国主要的自然灾害，占总重大自然灾害发生次数的 76.36%。表 1-1 列举了 2005 ~ 2015 年的我国典型洪旱灾害，具有如下特征。

1) 发生的频率和强度增加

在我国十大自然灾害中，每年出现旱灾 1 ~ 3 次，出现洪涝灾害 4 ~ 8 次，其中由台风引发的强降雨洪涝灾害 1 ~ 4 次。

从旱灾来看：降水量偏少程度、气温偏高幅度和旱灾出现频率不断突破历史记录。2008 年 3 ~ 6 月，宁夏原州区降水量为同期 1957 年以来的最小值；2009 年 5 ~ 8 月，华北、东北和西北部分地区平均降水量为 1951 年以来同期最小值；2014 年 6 ~ 8 月，辽宁、吉林、内蒙古和山西降水量为 1961 年以来同期最小值。2006 年 5 ~ 9 月，四川有 77 县日最高气温突破历史极值；2008 年 5 ~ 9 月，新疆北部和天山山区平均气温偏高幅度位列同期第一位，新疆 64 个气象站所测得气温偏高幅度突破历史同期极值；2010 年秋冬春，云南平均气温为 1952 年以来同期最高；2005 年，海南经历了 1980 年以来最严重的夏秋冬春连旱，2006 年，川渝夏秋遭遇自 1951 年以来最严重的旱灾，总体上达到了百年一遇的水平；2007 年 6 ~ 8 月，辽宁遭受了自 1952 年以来最严重的旱灾；2008 年 5 ~ 9 月，新疆遭遇历史上第二个严重干旱年；2010 年，西南地区遭遇 1951 年以来最严重的秋冬春连旱。

从洪灾来看：台风级数偏大幅度、降水量偏高程度和洪水水量不断突破历史记录。2014 年 7 月，“威马逊”在海南登陆，其中心出现的 14 ~ 16 级强风造成昌化江中下游、南渡江流域普遍超过警戒水位。2007 年 7 月，淮河、重庆和济南的降水量分别为 1951 年历史最高值、1892 年历史最大值和有观测记录以来的最大值；2011 年 6 月，长江中下游部分地区降水量为 1956 年以来最高值；2012 年，北京日降水量为 1951 年以来最大值，其中 11 个气象站的雨量观测超过建站历史记录；2014 年 6 月，广西鹿寨县 19 时降水量为 1985 年以来最高；

2006年7月,四川部分地区发生了百年一遇的暴雨洪水。2007年7月,淮河出现了仅次于1954年的流域性大洪水;2008年10~11月,广西郁江和云南的元江出现了历史同期最大洪水;2010年7月,松花江、牡丹江等河流出现超历史最大洪水;2013年8月,黑龙江发生了百年一遇的特大洪水,其中浑河和寇河发生了超历史记录洪水等。

2) 受灾损失和范围不断扩大

一次洪旱灾害最少损失几亿元。例如,2008年10~11月,长江沿线及江南地区的秋涝造成云南、重庆、湖南、广西和贵州5省级行政区421.3万人受灾,受灾损失为8.2亿元。一次洪旱灾害也可能造成高达千亿元损失。例如,2010年5~7月,长江中下游出现的14次强降雨天气,造成江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南6省受灾,受灾人口1亿人次,受灾损失高达1287.2亿元。受灾情况出现多种多样,且时空范围不断扩大。

旱灾时空范围扩大。从空间上看,旱灾易出现在降水量较少的北方,如2009年5~8月,华北、东北和西北共9省级行政区遭遇不同程度的干旱灾害。但有时也存在南北同旱情况,如2011年河北、山西、江苏、安徽、山东、河南、陕西和甘肃8省同时遭遇冬春连旱;还出现在降水量较为充沛的南方,如2013年7~8月,湖南、贵州、江西、湖北、重庆、安徽、浙江、福建、广西和江苏10省级行政区也经历了旱灾。从时间上看,旱灾不仅出现在年降水稀少的冬春季节,如2005年云南遭遇严重春旱;也出现在年降水较为集中的夏秋季节,如2009年华北、东北、西北遭受严重夏旱。此外,秋冬季节也可出现干旱,如2010年西南的干旱。甚至有时会出现连续四季干旱,如2005年海南的四季连旱。

洪涝灾害空间范围不断扩大。洪涝灾害常发生在年降水较为集中的初夏到秋末时段,主要发生在夏季,例如如2015年5月赣闽等地的洪涝灾害,2013年7月的四川及江淮洪涝和2011年9月的华西秋雨灾害。在空间上,洪涝灾害易发生在降水充沛的南方地区和台风易于登陆的地段。例如,2012年7月,四川至江淮洪涝降水量为同期该地区降水量的2倍以上,长江三峡出现建库以来的最大洪峰流量。洪涝灾害也出现南北同涝。例如,2011年9月华西秋雨及2013年7月发生的四川及西北、华北洪涝造成四川、重庆、湖北等地出现超警戒以上洪水,同时也造成中原河南、西北陕甘宁青、华北晋冀蒙、东北吉林出现强降水和大洪水。

3) 不同类型灾害交替出现

旱涝灾害年内交替出现。例如,2011年6月,四川、重庆遭受强降水洪涝灾害,夏秋季节紧接发生旱灾,在9月上旬又出现秋雨洪涝灾害。南方旱涝灾害年际交替出现。例如,2005年海南出现四季连旱,造成全省341万人受灾,直接经

济损失高达 35 亿元；2006 年 7 月受“碧利斯”台风影响，海南遭受强降水袭击，引发滑坡和泥石流流灾害，同年 8 月受“派比安”台风影响出现大范围强降水天气，引发严重的洪涝、滑坡和泥石流流灾害。华北西北旱涝灾害年际交替出现。例如，2007 年 7 月末，晋陕豫三省交界出现严重洪涝灾害，造成直接经济损失达到 55 亿元；2010 年冬，河北、山西、江苏、安徽、山东、河南、陕西和甘肃 8 省冬小麦区出现严重的旱灾，造成直接经济损失达到 146.4 亿元。东北地区连续旱涝灾害出现。例如，2006 年春季旱灾造成大兴安岭火灾，2007 年 6~8 月遭受伏旱，2009 年春季遭受春夏连旱，2010 年 7 月遭受洪涝灾害，2012 年 8 月遭受洪涝冰雹灾害，2014 年 6~8 月遭受旱灾。

表 1-1 近 11 年来中国各年“十大自然灾害”中典型旱涝灾害事件

年份	事件	特征	经济损失/亿元	受灾类型
2005	海南遭遇四季连旱	海南遭遇 26 年来最严重的夏秋冬春连旱	35	旱灾
	云南遭受严重春旱	受灾人口 1332 万人	41	旱灾
	6 月华南、江南洪灾	浙、闽、赣、湘、粤和桂 6 省级行政区发生严重洪涝、滑坡、泥石流灾害共 2127 万人受灾	157	洪涝灾害
	7 月四川发生百年不遇的洪涝灾害	四川达州、巴中、广安、南充、宜宾、泸州、甘孜等地先后发生暴雨洪涝，造成 76.65 万人受灾	31.34	洪涝灾害
2006	5~9 月川渝特大旱灾	5 月中旬重庆旱灾是 1891 年有气象资料记录以来最严重的一次旱灾，夏旱连伏旱，总体上达到了百年一遇的水平。四川持续高温，有 77 县日最高气温突破历史极值，8 月有 102 县降水量较往年同期减少 80% 以上，是自 1951 年以来最为严重的旱灾	222.7	旱灾
	5~6 月严重暴雨洪涝	浙江、福建、江西、湖南、广东、广西、重庆、四川和贵州等 9 省级行政区 3137 万人受灾，京九铁路一度中断，建瓯高考受阻，建瓯城区水深达到 6m，市区 65% 范围遭淹	168.1	洪涝灾害
	7 月“碧利斯”台风	浙江、福建、江西、湖南、广东和广西 6 省级行政区遭受强降水袭击，3194 万人受灾，导致京广线南段中断 3 日，广东韶关市区部分居民区断水断电长达 50 多小时	348.2	洪涝灾害

续表

年份	事件	特征	经济损失/亿元	受灾类型
2007	6~8 月东北地区伏旱	内蒙古中东部、辽宁、吉林和黑龙江大部分地区遭受夏旱连伏旱, 3340.7 万人受灾。辽宁遭受 1951 年以来最严重的旱灾, 黑龙江旱灾是历史上受旱持续时间最长、受灾面积最大、损失程度最重的 1 年	430.9	旱灾
	7 月淮河流域大洪水	淮河流域平均降水量达到 315mm, 为 1953 年以来历史同期第 4 名。江苏、上海的平均降水量均为 1951 年以来历史同期次高值。这次洪水为新中国成立以来仅次于 1954 年的流域性大洪水。32 地(市)、193 县(市、区) 3208.6 万人受灾	195.9	洪涝灾害
	7 月重庆最强雷暴雨	16 日重庆沙坪坝、璧山、合川等 22 个区县出现暴雨至特大暴雨天气, 沙坪坝降水量达 266.6mm, 突破 1892 年有气象观测记录的历史最大降水量, 742.24 万人受灾	29.78	洪涝灾害
	7 月济南暴雨袭击	18 日山东济南、青岛、烟台等 9 市遭受暴雨袭击, 济南遭受有气象记录以来最大暴雨袭击, 全市受灾人口 62.93 万人	15	洪涝灾害
	7 月四川连续洪涝灾害	四川出现入汛以来范围最广、强度最大的区域性暴雨天气, 降水过集中在四川盆地东北部和南部, 1057 万人受灾	16	洪涝灾害
2008	5~9 月新疆干旱	新疆北部气温偏高 1.6℃, 天山山区偏高 1.8℃, 偏高幅度均居历史同期第 1 位, 新疆全境有 64 个气象站气温偏高幅度突破历史同期极值; 全疆平均降水量为 59 mm, 比常年同期偏少 24%, 旱情仅次于 1974 年, 是历史上第 2 个严重干旱年	不详	旱灾
	3~6 月宁夏严重干旱	宁夏中部累积降水量仅为 17~57mm, 为 1960 年同期最少, 固原市原州区降水量为 1957 年以来最小值。中部干旱带及固原市辖区内的 53 个乡镇旱情严重, 70.4 万人受灾	不详	旱灾
	10~11 月长江秋涝	广西郁江及云南元江等河流发生超警戒线洪水, 洪水量级达历史同期最大, 造成云南、重庆、湖南、广西、贵州 5 省级行政区发生严重洪涝, 421.3 万人受灾	8.2	洪涝灾害

续表

年份	事件	特征	经济损失/亿元	受灾类型
2009	5~8月华北、东北、西北遭受严重夏旱	山西、黑龙江、甘肃、宁夏和新疆5省级行政区降水量明显偏少，出现较为严重的春旱；6月下旬，辽宁、吉林、内蒙古、黑龙江、宁夏、河北、山西、甘肃和新疆等9省级行政区出现不同程度初夏旱。5~8月，无有效降水，部分地区平均降水量为1951年以来历史同期最小值。根据旱情发展趋势，于8月16日将响应等级提升至二级	不详	旱灾
	11月至次年2月华北、西北及黄淮部分地区发生大范围冬春连旱	降水量不足10mm，气温较常年偏高。干旱特点：一是持续时间长；二是受旱面积大；三是受旱区域集中；四是旱冻叠加；五是造成影响大。旱灾高峰时，主要涉及600多个县，473万人口饮水困难	不详	旱灾
	7月湖南遭遇强降雨	24~27日100mm以上暴雨、大暴雨集中在怀化东北部、邵阳北部、湘潭西南部和娄底西部和东南部地区，造成12市503.9万人受灾	25.5	洪涝灾害
2010	西南秋冬春特大干旱	降水量较同期减少30%~50%，气温偏高1~2℃以上，其中云南和贵州降水量分别偏少49.2%和51.2%，均为有气象数据观测以来同期最小值，云南气温为1952年以来同期最高，贵州为1952年以来同期第3高。为60年以来最严重的秋冬春连旱，造成广西、重庆、四川、贵州、云南5省级行政区58市6910.6万人受灾	423.9	旱灾
	5~7月长江中下游洪灾	共出现14次强降雨天气，造成长江中下游地区多处出现超警戒水位，使江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南6省受灾，受灾人口1亿人次	1287.2	洪涝灾害
	7月东北洪涝灾害	遭受两次明显降雨过程。吉林第二松花江上游及部分支流、牡丹江上游等十余条河流发生超历史洪水，造成辽宁、吉林和黑龙江3省529.6万人受灾	511.3	洪涝灾害
	7月安康山洪泥石流	16~20日，安康境内普降大到暴雨，绝大多数乡镇累计降水量超过50mm，山洪泥石流灾害导致159.7万人受灾	71.4	洪涝灾害

续表

年份	事件	特征	经济损失/亿元	受灾类型
2011	西南地区夏秋连旱	大部分降水持续偏少，部分地区持续高温，造成广西、重庆、四川、贵州、云南等省级行政区 4440.8 万人受灾	314.7	旱灾
	长江中下游春夏连旱	少雨程度重、持续时间长、干旱区集中、旱情反复导致部分地区旱情严重。造成江苏、安徽、江西、湖北、湖南等省 4327.9 万人受灾	222.3	旱灾
	冬麦区冬春连旱	2010 年冬至 2011 年春华北大部、黄淮及江淮北部降水量不足 50mm，减少 80% 以上，造成河北、山西、江苏、安徽、山东、河南、陕西和甘肃 8 省 6225.7 万人受灾	146.4	旱灾
	9 月华西秋雨灾害	华西和黄淮等地降水量异常偏多，秋雨影响范围广、局地降雨强度大、持续时间长、部分地区气温显著偏低；河南、山东等部分地区连续降水日数突破历史极值。陕西中南部降水量大、雨日多。嘉陵江、汉江和陕西渭河等江河出现超警戒以上洪水，造成山西、河南、湖北、重庆、四川、陕西等省级行政区 2319.3 万人受灾	305.6	洪涝灾害
	6 月南方洪涝灾害	长江中下游降水量偏多 62%，是 1955 年以来历史同期最多，造成江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、重庆、四川、贵州、云南等省级行政区 4209.2 万人受灾	483.5	洪涝灾害
2012	7 月华北地区洪涝	华北北部、内蒙古大部降水量偏多 50% 至 2 倍及以上，21 ~ 22 日北京降水量达 190.3mm，为 1951 年以来最大值，11 个气象站雨量突破建站以来历史极值，造成北京、天津及河北等地出现城市内涝，青龙峡水库超警戒水位 2m，京广铁路断运	不详	洪涝灾害
	7 月四川至江淮洪涝	黄淮、江南大部及湖北东部、贵州、四川西部等地累计降水较常年同期偏多 50% 至 2 倍及以上。长江上游干流和部分支流发生超保证水位洪水，24 日长江三峡迎来建库以来的最大洪峰	不详	洪涝灾害

续表

年份	事件	特征	经济损失/亿元	受灾类型
2013	6~7月四川江淮洪涝	涉及安徽、湖北、重庆、四川4省级行政区 1319.8万人受灾	164.8	洪涝灾害
	7~8月南方干旱灾害	涉及湖南、贵州、江西、湖北、重庆、安徽、 浙江、福建、广西和江苏10省级行政区 8590.3万人受灾	590.4	旱灾
	7月四川及西北华北洪涝	8~15日，四川盆地、西北地区东部、华北南部及黄淮北部出现强降雨，雨量普遍达到100~250mm；涉及河北、山西、内蒙古、吉林、山东、河南、四川、陕西、甘肃、青海、宁夏11省级行政区1590.7万人受灾	527.6	洪涝灾害
	8月东北洪涝灾害	松花江流域发生1998年以来最大流域性洪水；黑龙江下游同江至抚远江段发生百年一遇特大洪水，辽宁浑河、寇河发生超历史纪录洪水；涉及内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江4省687.9万人受灾	447.1	洪涝灾害
2014	5月长江以南洪灾	涉及江西、湖南、广东、广西、贵州5省级行政区等洪涝灾情	9.3	洪涝灾害
	6~8月东北黄淮旱灾	东北、西北、华北、黄淮及长江上中游部分地区降水偏少；6月以来，辽宁大部、吉林西部、河北东部、河南大部、湖北北部等地降雨较常年减少50%~70%，其中辽宁、吉林7月以来降水量为1961年以来历史同期最少	不详	旱灾
	6月南方洪涝灾害	涉及范围福建、广东、广西、重庆、四川和贵州6省级行政区340万人；广西4日8时至5日15时鹿寨县黄冕乡降雨量为326mm，为达鹿寨县30年之最	36.5	洪涝灾害
	7月“威马逊”台风	海口、文昌普遍出现14~16级强风；昌化江中下游、南渡江流域普遍超警戒水位，其中松涛水库上游的福才水文站出现超历史最高洪水位；海南全省18个市325.8万人受灾	119.5	洪涝灾害

续表

年份	事件	特征	经济损失/亿元	受灾类型
2015	5 月赣闽等地洪涝灾害	13~14 日婺源县降水量达 150mm，造成福建、江西和湖北 3 省共 20.1 万人受灾	7.5	洪涝灾害
	6 月湘鄂川黔南方地区洪涝风雹灾害	涉及江南、华南、西南地区东部等；受灾人数 6794 万人	632.6	洪涝灾害
	7~8 月北方地区夏伏旱灾害	西北东部、华北大部降水量不足 200mm，较常年同期减少 2%~5%，其中内蒙古中部、陕西和山西部分地区减少 5%~8%。华北地区平均降水量为 155.5mm，比常年同期减少 30.3%，为 1961 年以来历史同期第 3 少；内蒙古和陕西降水量均为 1961 年以来历史同期最少	378	旱灾

1.2 气候变化对水文过程影响的不确定性因素

在科学界，全球气候变化及其影响早已成为重要的科学研究内容。1985 年世界气象组织出版了气候变化对水文水资源影响的综述报告，并推荐了一些检验和评价方法，之后又出版了水文水资源系统对气候变化的敏感性分析报告^[2]。研究气候变化对水文过程影响的方法众多，其中利用气候情景，结合水文模型和水资源评价模型评估气候变化对水文过程影响成为当前最为流行的方法^[3-5]。自然气候系统和流域下垫面极其复杂，具有各种尺度（时间尺度和空间尺度）的非线性反馈，气候变化情景、评价模型和评价过程都存在很大的不确定性。

1.2.1 气候变化情景的不确定性

气候情景包括类别情景、惯性情景、增量情景和 GCMs 情景，但以采用增量情景和 GCMs 情景的研究最为多见。增量情景研究本质上是一种敏感性试验，不具有气候-水文预测功能^[6]。GCMs 情景是指基于 GCMs 模拟的全球未来气候变化情况。现有的 GCMs 对一些重要的陆面过程，特别是水文过程的处理还相当粗糙。由于地球气候系统的复杂性和缺乏可靠的资料，不同 GCM 模拟结果差异甚大。例如，联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第三次评估报告中大约 80 个气候模式预测结果均认为随着温室气体增加，全球平均气温增加。根据 GCMs 预测的排放情景（special report on emissions scenarios, SRES），在 A1、A2、

B1、B2 四种社会经济情景下，21 世纪末全球气候变暖 $1.4 \sim 5.8^{\circ}\text{C}$ 。但统计结果表明，没有 3 个或 3 个以上模式计算的变暖值是相同的，不同模式模拟的变暖数值差异较大，对一些极端天气事件模拟的能力更差，未来气候变化情景的不确定性是造成影响评估不确定性的主要原因之一。影响气候变化情景不确定的主要因素包括三个方面：气候模式的不完善、情景设定的不确定性和降尺度技术的不确定性。

1. 气候模式的不完善

由于影响气候变化的自然因素很多，加之大气-海洋-陆面-冰雪等系统内部的相互作用和反馈，构成了气候变化的复杂性、多样性和计算分析的困难性。在 IPCC 出版的第四次评估报告中，采用不同复杂程度的大气-海洋-陆面耦合模式 (coupled ocean-atmosphere general circulation model, CGCM) 进行未来气候变化的预测。尽管模拟精度和参数化方案不断改进，但当前的气候模式所能模拟的气候状况与真实情况还存在很大的差距。目前，用 GCMs 或 CGCM 进行的 CO_2 浓度倍增的试验结果表明，云反馈、海洋过程和生物反馈是影响气候模式模拟结果的主要不确定性因素。其中，云反馈过程由于云种类和过程的多变性，数学参数化更加困难，成为不同气候模式预测结果差异很大的最主要因素^[7]。其次，预测的不确定性来自于大气和海洋、大气和地表、海洋上层与深层之间的能量交换过程。模式对海冰和对流的处理很粗糙，气候模拟中也很少考虑生物反馈和完善的化学过程。一些简单模式要么完全忽视了大气运动，要么对大气动力过程做了不适当的过分简化。大气环流模式和海气耦合模式对辐射过程的简化处理、对云和气溶胶等物理过程的参数化处理，以及大气成分变化对水汽分布及云和降水形成过程影响的简化处理都会造成一定误差。因此，要准确预测未来 50 ~ 100 年的全球或区域气候变化，必须进一步完善气候模式，依靠更复杂的全球海陆气耦合模式和高分辨率的区域气候模式。

2. 情景设定的不确定性

温室气体排放预测是气候模式的重要输入条件，其不确定性也必然会对气候模式的输出结果产生一定的影响。目前，已制定了多种排放情景，如 IS92 情景和 SRES 情景。其中，SRES 情景用于 IPCC 第四次评估报告。温室气体排放预测的不确定性主要来源于不能准确地描述和预测未来社会经济、环境、土地利用和技术进步等非气候情景的变化。非气候情景对于准确表述系统对气候变化的敏感性、脆弱性及适应能力是非常重要的，比较准确地预测未来几十年甚至是 100 年的非气候情景是评估气候变化面临的最大挑战。IPCC 第四次评估报告中采用了