

“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



气候变化影响下 中国水资源的 脆弱性与适应对策

夏 军 李原园 等 著



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

气候变化影响下 中国水资源的脆弱性与适应对策

夏 军 李原园 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系 973 计划项目课题 6 “气候变化影响下中国水资源脆弱性与适应对策” (2010CB28406) 的科研成果。本书系统地介绍了气候变化背景下中国东部季风区水资源管理面临的问题, 提出变化环境下水资源脆弱性多元函数新的理论与方法、应对气候变化水资源适应性管理的新途径及其在东部季风区八大流域应用的具体实例。针对国家水资源重大战略需求、流域水资源规划和重大调水工程管理以及全球变化国际学科前沿, 提出了面向 21 世纪未来 30~50 年, 如何应对气候变化、保障水资源安全的若干适应性管理对策与建议。

本书可供研究和关心气候变化与水资源安全适应性管理的各专业人士和管理者参考, 也可供水利、水电、环境、气候、气象、地理等相关专业的科技工作者和管理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

气候变化影响下中国水资源的脆弱性与适应对策 / 夏军等著. —北京: 科学出版社, 2016. 7

(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 978-7-03-047525-1

I. ①气… II. ①夏… III. ①水资源管理—研究—中国 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 044324 号

责任编辑: 李 敏 周 杰 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 黄华斌

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 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 7 月第一次印刷 印张: 19 插页: 2

字数: 460 000

定价: 158.00 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		

《气候变化影响下中国水资源的脆弱性与适应对策》 撰写委员会

课题负责人 夏 军 李原园

承担单位 中国科学院地理科学与资源研究所

参加单位 水利部水利水电规划设计总院
武汉大学

参加人员 夏 军 李原园 傅国斌 王金霞
沈福新 柳文华 曹建廷 刘小莽
占车生 潘兴瑶 邱 冰 雒新萍
翁建武 陈俊旭 洪 思 宁理科
张利平 欧阳如琳 万 龙 石 卫
杨 鹏

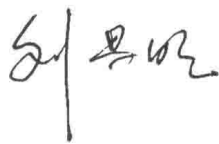
序

水是生命之源，生产之要，生态之基，是国家基础性的自然资源，也是战略性的经济资源，它维系生态环境的良性循环，是国家综合国力的有机组成部分。水资源安全直接影响经济社会的可持续发展，成为全球水资源安全面临的重大挑战性问题。

中国是水资源短缺最为严重的国家之一，人均水资源量只有世界人均水平的 1/4 且时空分布极不均匀。随着经济社会的快速发展和水环境问题的日益加重，中国水资源短缺和供需矛盾越来越突出。气候变化对水循环和水资源的影响不仅改变了水资源的时空分布，而且可能进一步加剧水资源的供需矛盾和水资源的安全危机。因此，气候变化对水资源的影响及其联系的水资源脆弱性和适应性研究，已经成为国际全球变化重大科学前沿问题之一和国家水资源安全保障的重大需求问题。

自 2010 年以来，由中国科学院地理科学与资源研究所、水利部水利水电规划设计总院、武汉大学等单位组成的研究团队，通过承担国家 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”课题 6，深入地开展了中国东部季风区水资源脆弱性与适应性研究，发展了气候变化背景下水资源脆弱性评估与适应性管理的理论方法与评估-决策模型；产出了与生产实际应用结合的研究成果与系列产品，其中包括《气候变化影响下中国东部季风区水资源脆弱性与适应性图集》《流域水资源规划与工程设计的适应性水资源管理导则》等成果；提出了中国东部季风区从区域到流域和农户多层次有实用价值和科学意义的对策与建议，其中基于提出的《改进流域水资源规划和重大工程规划管理应对气候变化影响的建议》、《关于南水北调中线工程面临新问题的分析与对策建议》等咨询报告，得到国家领导人的批示和采纳。以上成果为应对气候变化影响，保障中国水安全的重大工程布局，变化环境下流域水资源规划与配置，适应性水资源管理与对策作出了重要的贡献。该书是在气候变化与水资源适应性管理研究领域最新的优秀成果。

特此为序。



中国科学院院士
2015 年 8 月 8 日

前 言

气候变化对水资源安全的影响是国际上普遍关心的问题，也是中国可持续发展面临的重大战略问题。中国是世界 13 个贫水国家之一，尤其在人口稠密的东部季风区，水资源供需矛盾突出，旱涝灾害频繁。在气候变暖的背景下，过去 30 多年中国北方地区旱情加重，水生态环境恶化，南方地区极端洪涝灾害增多，严重制约了经济社会的可持续发展。未来气候变化将极有可能对中国“南涝北旱”的格局和未来水资源分布产生更为显著的影响，对中国华北和东北粮食增产工程、南水北调工程、南方江河防洪体系规划等国家重大工程的预期效果产生不利的影响。以中国东部季风区的江河流域为重点，开展气候变化对水资源影响及适应对策的研究，是保障中国水资源安全的重大战略需求。

本书是在国家重点基础研究发展计划（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”（2010CB428400）中的第 6 课题“气候变化影响下中国水资源的脆弱性与适应对策”的研究成果基础上总结完成的。主要科学研究问题包括变化环境下水资源脆弱性评估理论与适应性管理方法。结合中国东部季风区经济社会发展对水资源需求进行分析，探讨了气候变化背景下水资源与水资源供需系统的变化关系，分区评价了水资源的脆弱性，提出了气候变化对中国东部季风区重点流域水资源供需态势影响及脆弱性的系列成果图；分析了气候变化对南水北调中线重大调水工程的影响和对区域水资源安全的影响，提出了应对气候变化影响的适应性对策。

本书重点介绍了中国东部季风区气候变化下水资源脆弱性和适应性的对策研究成果，内容包括：①水资源脆弱性的理论与方法。界定了水资源脆弱性的基本概念，探讨了气候变化背景下水资源脆弱性的理论与方法。在分析中国东部季风区流域水资源变化的基础上，构建了水资源脆弱性评价指标体系及对其阈值进行分析，研究了气候变化背景下水资源脆弱性的评估模型与途径。②气候变化对水资源供需态势的影响及脆弱性评价。分析了中国东部季风区经济社会发展对水资源需求变化的事实，研究了气候变化对水资源供给和需求的影响机理，探讨了气候变化对水资源供需态势的影响。依据水资源脆弱性评价指标体系，结合气候变化对水资源影响的检测与成因等研究成果和需水预测研究，以全国水资源综合规划中确定的水资源三级区为单元，科学评价了中国东部季风区重点流域水资源的脆弱性；研究未来社会经济发展对区域水资源安全保障需求，分区确定气候变化背景下水资源安全阈值。③气候变化对南水北调重大调水工程的影响研究。在南水北调中线水源区和受水区陆地水循环要素变化和预估的基础上，结合南水北调工程总体规划，研究了气候变化背景下调水区和受水区的水文丰枯遭遇及其水资源情势，研究气候变化对南水北调中线工程水资源保障的风险，提出了不同气候变化情景下水资源配置方法和方案，研究了实现南水北调工程效益优化的适应性对策。④气候变化对中国水资源安全影响的适应性对策

研究。在中国东部季风区水循环要素演变历史和未来变化预估的基础上,结合流域水资源综合规划,研究气候变化下干旱对供水安全、水生态安全,以及极端气候事件对防洪安全的影响;研究气候变化下水资源影响适应性管理对策;评估中国目前应对气候变化适应性措施的适应效能;分析实施适应性措施的成本收益与制约因素;探讨气候变化下水资源适应性管理的制度、模式及保障途径。

全书共分7章。第1章绪论,重点论述了中国的水资源问题、气候变化的影响、水资源脆弱性与适应性重点关注的科学问题以及本书科学研究与创新点,提出了本书的总体构架,由夏军撰写。第2章变化环境下水资源脆弱性的理论与方法,包括基本概念、指标体系、函数分析方法脆弱性与适应性的区别及联系等系统分析内容,分析对象包括南水北调中线工程概况和气候变化对南水北调中线工程调水及受水区水循环变化的影响,重点分析了径流变化丰枯遭遇和汉江中下游脆弱性,并提出适应对策与建议,由夏军、邱冰、陈俊旭、雒新萍、宁理科撰写;第3章变化环境下水资源适应性的理论与方法,内容包括变化环境下水资源管理的变革与新思路的水资源适应性管理的理论与方法,以及变化环境下中国东部季风区水资源适应性多目标管理的模型,由夏军、洪思、宁理科、石卫撰写;第4章气候变化背景下中国东部季风区水资源的脆弱性评价及未来情势预估,内容包括中国东部季风区八大流域概况,气候变化背景下水资源供需分析及脆弱性的现状评价和未来变化环境下的脆弱性评估,由李原园、沈福新、曹建廷、邱冰、陈俊旭、雒新萍、宁理科撰写;第5章气候变化对南水北调重大调水工程的影响研究,由柳文华、刘小莽、夏军撰写;第6章应对气候变化影响的水资源适应性管理与对策,由夏军、李原园、王金霞、洪思、宁理科、石卫撰写;第7章结论与建议,由夏军、雒新萍撰写。全书由夏军统稿。

在课题研究和本书撰写的过程中,得到了973计划项目咨询专家组孙鸿烈院士、秦大河院士、徐冠华院士、刘昌明院士、郑度院士、丁一汇院士、陆大道院士、李小文院士、傅伯杰院士、王浩院士、周成虎院士、崔鹏院士的悉心指导,得到了973计划项目专家组王明星研究员、沈冰教授、蔡运龙教授、刘春蓁教授级高工、任国玉研究员、姜文来研究员的悉心帮助,特别感谢刘春蓁教授级高工对本书的修改与完善提出了重要的修改建议。参与本书编辑与绘图等工作的人员还有杨鹏、史超等。在此一并对他们表示衷心的感谢!

本书研究成果得到国家973计划项目(2010CB428406)课题资助,本书部分研究还得到国家自然科学基金面上项目“气候变化背景下海河流域水资源脆弱性与适应性管理的理论方法与应用研究”(51279140)的资助,在此深表感谢!

由于气候变化对水资源影响及适应对策面临问题的复杂性,特别是气候变化下水资源脆弱性与适应性研究理论还处于发展阶段,虽几易其稿,但书中难免存在认识不足的地方,欢迎广大读者不吝赐教。

作者
2015年8月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 中国东部季风区水资源与气候变化影响问题	1
1.2 气候变化背景下中国水资源面临的挑战	3
1.3 变化环境下水资源脆弱性与适应性的关系	5
1.4 本书的主要内容和科研成果创新点	13
第2章 变化环境下水资源脆弱性的理论与方法	15
2.1 基本概念	15
2.2 水资源脆弱性的指标体系法	21
2.3 水资源脆弱性的函数方法	35
2.4 脆弱性的函数与适应的调控变量的内在关系	48
2.5 本章小结	51
第3章 变化环境下水资源适应性的理论与方法	52
3.1 变化环境下水资源管理的变革与新思路	52
3.2 水资源适应性管理的理论与方法研究	55
3.3 变化环境下东部季风区水资源适应性管理模型	80
3.4 本章小结	83
第4章 气候变化背景下中国东部季风区水资源的脆弱性评价及未来情势预估	85
4.1 东部季风区流域概况	85
4.2 东部季风区水资源需求影响的事实	90
4.3 气候变化对水资源供需态势的影响	107
4.4 中国八大流域水资源脆弱性现状评价	136
4.5 未来变化环境下中国八大流域水资源脆弱性评价	158
4.6 水资源脆弱性评估模型在重点流域的应用	168
4.7 本章小结	191
第5章 气候变化对南水北调重大调水工程的影响研究	192
5.1 南水北调中线工程概况	192

5.2	全球变化对南水北调中线工程水源区与受水区水循环的影响机理	196
5.3	气候变化对南水北调中线工程三个关键问题的影响分析	218
5.4	南水北调中线工程应对全球变化的对策建议	235
第6章	应对气候变化影响的水资源适应性管理与对策	238
6.1	变化环境下东部季风区水资源适应性对策与效果分析	238
6.2	重点流域适应性对策与建议	267
6.3	社区及农户适应性水资源管理	272
第7章	结论与建议	277
7.1	认识总结	277
7.2	对策与建议	278
参考文献		285

第1章 绪 论

1.1 中国东部季风区水资源与气候变化影响问题

中国是一个水旱灾害频发、水资源短缺日趋严峻、社会经济发展面临供需矛盾越来越突出、生态环境问题压力越来越大的发展中国家。变化环境下中国水资源安全问题和水危机十分紧迫,这是影响中国可持续发展和人类未来的一个关键性瓶颈问题。水循环是联系地球系统“地圈-生物圈-大气圈”的纽带,是全球变化的核心问题之一,它受自然变化和人类活动的双重影响,决定着水资源形成及与水土相关的环境演变。中国降水时空分布极为不均,尤其在人口分布最为密集、经济社会发展最快的东部季风区,水资源短缺、旱涝灾害以及与水相关的生态-环境问题非常突出。

从自然地理区划来讲,东部季风区指大兴安岭以东、内蒙古高原以南、青藏高原以东的地区,土地面积占全国土地总面积的46%,而人口占全国总人口的95%,是国家最主要的经济社会发展区域,也是受气候变化影响最为敏感、水资源问题最为突出的地区。东部季风区直接联系着中国最为重要的大江大河,其中包括长江、黄河、淮河、海河、松花江、辽河、东南诸河、珠江八大流域系统(图1-1)。它们也是全国水资源评价和规划中十大流域片最核心的区域。在全球变暖的背景下,与中国东部季风区联系的流域水循环及其组成的陆地水循环与水资源安全,已经成为国家水安全问题研究最为关注的重大课题,也是地球系统水科学的前沿和重要应用基础问题。

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告认为,全球气候变化已是不争的事实,将对全球和区域水资源安全构成严重威胁。IPCC主席帕乔里(Pacioli)在IPCC技术报告之六《气候变化与水》的序言中指出,“气候、淡水和各社会经济系统以错综复杂的方式相互影响。因而,其中某个系统的变化可引发另一个系统的变化。在判定关键的区域和行业脆弱性的过程中,与水资源有关的问题是至关重要的。因此,气候变化与水资源的关系是人类社会关切的首要问题。”(IPCC, 2007; Bates et al., 2008)

由于中国气候和自然地理的区域分异性,导致水资源时空分布很不均匀,降水年际变化大,且多集中在6~9月,径流年际变化显著。总体来看,中国水资源的空间分布总体上呈“南多北少”的态势,其中全国水资源可利用量的2/3分布在长江、珠江、东南和西南诸河流域,黄河、淮河、海河等北方地区可利用水资源量仅占全国可利用水资源总量的1/3。由于中国水资源与土地等资源的分布不匹配,经济社会发展布局与水资源分布不相适应,例如黄河、淮河和海河3个流域的国土面积占全国的15%,耕地、人口和GDP分别占全国的1/3,水资源总量仅占全国的7%,水资源供需矛盾十分突出,水资源配置难度大。

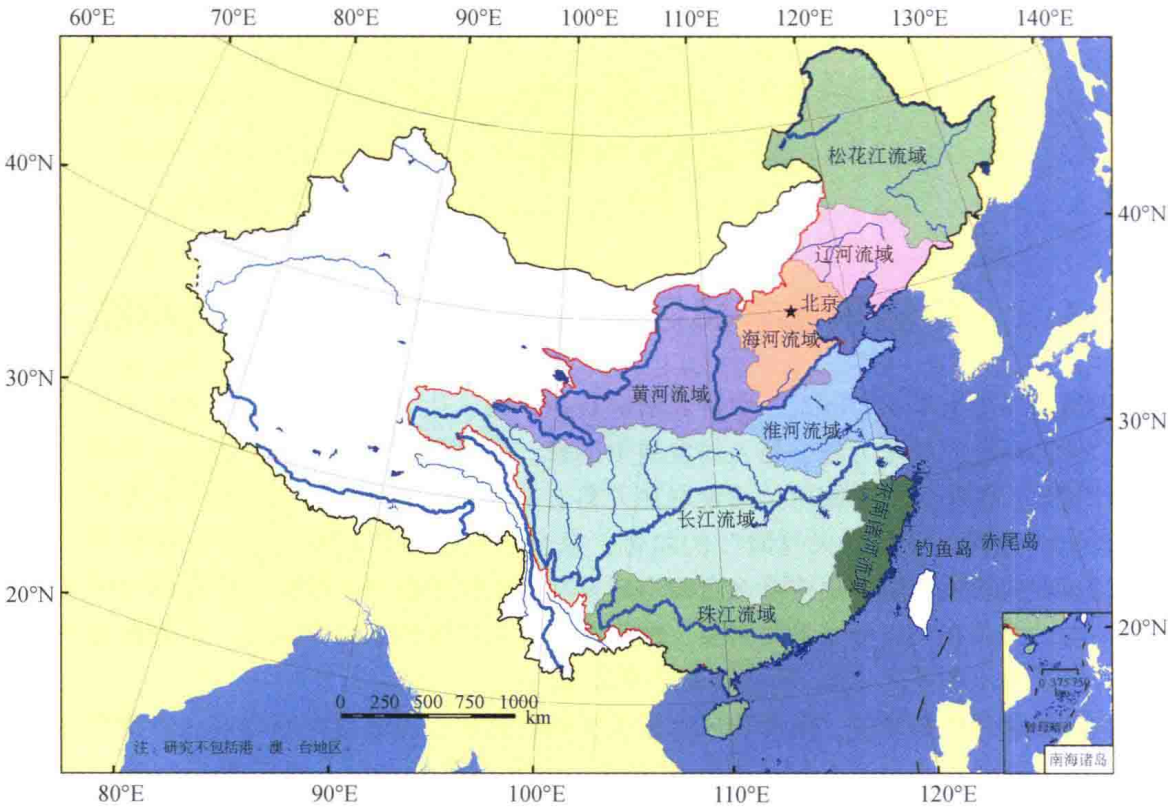


图 1-1 中国东部季风区及其联系的流域系统

1980 ~ 2000 年，中国水资源的区域分布正在发生显著变化。2000 年全国水资源评价最新成果显示（水利部水利水电规划设计总院，2004）：1980 ~ 2000 年水文系列与 1956 ~ 1979 年水文系列相比，分布于北方黄河、淮河、海河和辽河 4 个流域的降水量平均减少了 6%，水资源总量减少了 25%，其中地表水资源量减少了 17%，尤其是海河流域地表水资源量减少了 41%。中国北少南多的水资源格局进一步加重。

中国地理环境分异性大，水资源对气候变化十分敏感。开展水资源系统脆弱性和可持续利用的研究，综合评估未来气候变化对水资源系统的影响，是水资源风险管理和制订应对气候变化措施的战略需求。中国地理环境的区域分异性，使得河川径流对气候变化影响也非常敏感，水资源系统对气候变化影响加剧的承受能力变得更加脆弱。中国人口众多，经济发展迅速，耗水量不断增加，许多地区面临着更为严峻的水资源短缺问题；城市化建设和社会经济的快速发展也使遭遇洪水、干旱后造成了更大经济损失。中国水资源系统面临着来自气候变化与经济社会发展的双重压力。未来全球气候变化究竟在多大范围和程度上可能改变水资源空间配置状态，进一步加剧水资源供给压力和脆弱性？这将直接影响水资源稀缺地区的可持续发展。

为了应对气候变化的影响，近些年水利部和规划部门多次强调“以重大课题研究和技术研发为重点，夯实水资源管理科技支撑。要围绕全球气候变化、经济社会发展、水资源可持续利用和生态系统保护，开展水资源重大专题研究”（陈雷，2009），并且提出将气

气候变化影响问题作为全国流域综合规划修编工作重点突出的第一要点，要求“系统分析全球气候变暖和经济社会快速发展导致流域下垫面改变，对流域洪水、干旱、水资源、生态与环境的影响，研究流域面临的重大水问题”。面对气候变化的影响，加强水资源适应性管理以达成趋利避害的目标，是国家应对气候变化适应性对策与管理的重大战略需求。

1.2 气候变化背景下中国水资源面临的挑战

中国水资源人均占有量低，时空分布不均匀。长江以北水系流域面积占全国国土面积的64%，水资源量却只占全国的19%。目前干旱缺水成为了北方地区主要的自然灾害。中国大部分地区每年汛期连续4个月的降水量占全国的60%~80%，不但容易形成春旱夏涝，而且水资源中大约有2/3是洪水径流量，形成江河的汛期洪水和非汛期的枯水。伴随着社会经济的快速发展和全球气候变化的影响，中国面临着越来越紧迫的水资源问题和挑战。主要表现在以下几个方面。

1.2.1 气候变化下水资源时空分布不均匀加剧，水资源配置难度大

中国多年平均水资源总量约为2.8万亿 m^3 ，人均水资源量为2173 m^3 ，仅为世界人均水平的1/4。水资源可利用量为8140亿 m^3 ，占全国水资源总量的29%，其中南方为5600亿 m^3 ，北方为2540亿 m^3 。2010年，南方人均可利用水资源量约为1100 m^3 ，北方人均可利用水资源量只有359 m^3 。2010年，全国实际用水量已达6022亿 m^3 ，达到了可利用水资源总量的73.9%。

中国的降水年际变化大，且多集中在6~9月，占全国降水量的60%~80%。空间分布总体上呈“南多北少”，长江以北水系流域面积占全国国土面积的64%，而水资源量仅占19%，水资源空间分布不平衡。中国水资源分布不均的特点决定了在经济社会发展中保障供水安全始终是一项重大任务。据2010年水利部有关统计，新中国成立以来，全国已累计解决农村2.82亿人口的饮水困难，4亿多农村人口喝上自来水，城市自来水普及率已经达到了95%以上；农业有效灌溉面积达到5600万 hm^2 ；形成了比较完整的供水体系，基本保障了工业和城市的用水需求。但是中国水资源短缺的状况仍然相当严重，北方地区尤甚，截至2010年，全国农村仍有2亿人口饮水安全没有保障，1/3的乡镇缺乏符合标准的供水设施。一般年份，农田受旱面积为667万~2000万 hm^2 ，粮食平均减产200多亿公斤。工业和城市用水紧张状况日益严重，已经成为一些城市发展主要的制约因素之一。由于多种因素的影响，导致中国年缺水量达536亿 m^3 ，其中河道外缺水，即国民经济缺水达404亿 m^3 ，挤占了河道内的生态用水132亿 m^3 ，总的生态缺水量达347亿 m^3 。2030年，中国人口将接近16亿人，中国的用水总量预计将从2010年的6022亿 m^3 增加到7101亿 m^3 ，全国人均可利用水资源量将从2000年的628 m^3 减少到508 m^3 ，仅占全球人均水资源量2000 m^3 的1/4，已达到全球水危机的红线。由于水资源与土地等资源的分布不匹配，经济社会发展布局与水资源分布不相适应，导致水资源供需矛盾十分突出，水资源配置难度更为艰巨。

1.2.2 气候变化下提高水资源利用效率的节水战略需求愈来愈迫切

与发达国家比较,中国农业和工业的水资源利用效率还比较低,其中农业灌溉水利用率只有40%~50%,发达国家可达70%~80%,全国平均单方水GDP仅为世界平均水平的1/5,单方水粮食增产量为世界平均水平的1/3。一些地区农业生产仍然采取传统的大水漫灌方式,全国灌溉水有效利用系数仅为0.45左右。由于中国现行的水价偏低,生活用水、农业用水、工业用水浪费严重。水价偏低导致用户对价格不敏感,节水观念淡薄,从而造成一方面缺水,另一方面又浪费水的现象。同时,中国东部季风区尤其北方流域面临着开发利用率高的问题。在水资源一级区中,水资源开发利用率最高的是海河区,为101%,其中海河南系高达123%;黄河区也较高,为76%;淮河、西北诸河和辽河水资源开发利用率为40%~50%,其中海河南系、海河北系、辽河流域、沂沭泗河和山东半岛水资源开发利用率分别达到了123%、98%、66%、60%和63%。

中国工业万元产值的用水量是发达国家的5~10倍,城市供水管网漏损严重,全国城市供水管网平均漏损率达20%,东北部分城市超过了30%,工业用水效率偏低,2005年全国万元工业增加值用水量为169m³,约相当于美国的11倍、日本的9倍。污水再生利用进展也比较缓慢,2014年全国设市城市污水再生利用率只有10%。城市雨水利用意识还不强,尽管按年降水量600mm估算,全国城市绿地系统的雨水利用量可达20亿m³,但由于节水意识淡薄,绿地建设中缺乏雨水利用观念,前期雨水含有的污染程度通常超过城市污水,前期雨水处理技术的落后也在一定程度上制约了雨水利用的发展,尤其是大规模的集雨工程。另外,中国生活用水的浪费现象依然严重,节水器具推广缓慢,节水型器具普及率低。非常规水资源开发利用潜力远未挖掘。以海水淡化为例,海水淡化产业化规模不够、价格因素导致的海水淡化成本相对较高和市场需求量不大形成的恶性循环,是长期制约中国海水淡化产业化发展最主要的因素。

在中国,用水结构的不合理和浪费严重,以及水管理体制不顺、多龙治水、多条分割、利益冲突、管理落后等原因导致主要流域的水资源供需关系矛盾日益突出。在气候变化背景下,可能进一步加剧水资源供需矛盾,全社会节水战略应对气候变化也迫在眉睫。

1.2.3 变化环境下中国的水灾害、水环境、水生态问题更加严峻

中国洪涝灾害十分严峻。随着气候变暖、海平面上升和高强度的人类活动,极端气候事件越来越频发,中国沿海地区的洪涝、海水入侵灾害日趋严重,干旱缺水地区和强度有增加态势。此外,随着城镇化的快速推进,城市内涝问题也日益突出。2010年中华人民共和国住房和城乡建设部(住建部)对全国351个城市的调研发现,2008~2010年全国有62%的城市都曾发生过内涝事件,内涝发生3次以上的城市达到39%。小河流的山洪灾害损失严重。一般年份中小河流的洪水灾害损失占全国水灾害总损失的70%~80%,2000~2010年水灾造成的人员伤亡有2/3以上发生在中小河流。气候变化背景下,极端水旱灾害

发生的频率与强度将有增加的态势。北方缺水地区水资源供需矛盾依然十分突出,地下水过度开采趋势短期内难以改变,50%以上的城市面临缺水危机。

河道断流、湖泊干涸、湿地退化等问题严重。2000~2010年全国湿地面积减少了3.4万 km^2 ,减少率达8.82%,湿地成为中国短时间尺度内面积丧失速度最快的自然生态系统。湖泊与湿地生物资源退化,生物多样性下降,生态灾害频发,湖泊水环境恶化、水体富营养化现象普遍,湖泊与湿地不合理利用问题突出。

2000~2010年,中国2/3的地表水已明显被污染,50%以上的地下水水质较差甚至极差,城市饮用水二次污染风险高,末梢水的水质合格率较低,从河流与湖泊的水质来看,59.2%的河长达不到Ⅱ类水质的标准,超过65.8%的湖泊面积达不到Ⅱ类水质的标准。全国地下水水质状况也不容乐观,总体呈现逐渐恶化的趋势,属于较差与极差监测点的数量占全部监测点总数的一半以上。

未来气候变化将导致的水安全问题及其联系的水环境、水生态问题已经成为国际研究的重大热点问题之一。

1.2.4 全球变暖和人类活动加剧了中国水资源的脆弱性

气候变化对水资源影响的脆弱性(vulnerability)是指气候变化对水资源系统造成不利影响的程度。它是研究气候变化对水资源安全影响及评价的重要科学问题,也是应对气候变化水资源管理重要的应用基础。中国水资源系统应对气候变化的适应能力仍然比较脆弱(秦大河,2005;刘春蓁,2004)。有证据表明,1960~2010年中国的气候发生了显著的变化,平均温度升高,年降水量在东北和华北呈减少趋势,而在华南和西北则显著增加(翟建青等,2011;Doerfliger et al., 1999; Brouwer and Falkenmark, 1989)。全球变暖可能加剧中国年降水量及年径流量“南增北减”的不利趋势,在气候变暖的背景下,南涝北旱的格局会进一步加重,区域水循环时空变异问题突出,导致北方地区水资源可利用量减少、耗用水增加和极端水文事件,而水资源短缺也将在全国范围内持续,从而加剧水资源的脆弱性,影响中国水资源配置及重大调水工程与防洪工程的效益,危及水资源安全保障(任国玉等,2008)。另外,经济和人口增长、河流开发等人类活动进一步加剧,不仅增加了需水量,也加剧了水污染,显著改变了流域下垫面条件,对水资源的形成和水循环多有不利影响。未来中国水资源发展态势不容乐观,水资源脆弱性将进一步加大(夏军等,2012)。

1.3 变化环境下水资源脆弱性与适应性的关系

气候变化和高强度人类活动的影响及其相关下垫面变化打破了传统水资源规划与管理基础的水文序列平稳性的基本假定,即不能由过去具有平稳性假定的样本推断未来。实际工作中也经常面临“水资源规划赶不上实际的变化”、水资源配置和工程设计与实际应用和工程运行现实差距大等实际问题。气候变化影响和人类活动导致了水资源规划与管理的

挑战与变革，即由于气候变化影响的非稳态（non-stationary）特性和影响的不确定性风险，迫切需要采取一种适应性水资源管理的方式和对策。因此，气候变化影响下中国水资源的脆弱性与适应性管理及对策是两个非常重要并相互联系的科学问题。

1.3.1 适应性管理研究进展

(1) 适应性管理的来源

适应性管理最初的名称是“适应性环境评估与管理”，首次出现并应用于生态系统理论和实践（Holling, 1978），旨在克服静态评价和环境管理的局限问题，可理解为处理可再生资源管理中不确定性问题的学习与决策过程。Holling 认为，适应性管理是通过对管理全体的管理，促进学习和自身提高而增强对不确定性的有效适应的方式。在此基础之上，Gene（1998）认为，适应性管理是一个连续的过程，包括基础规划、监测、研究和调控等，以此获得较理想的目标和成果。随后适应性管理在资源管理领域（Lee, 1993; Walters, 1986）、社会-生态系统研究（Berks and Folke, 1998），以及人-自然适应研究中得到广泛应用和发展（Nelson and Neil, 2007）。

适应性管理是在学习中管理、管理中学习的一个系统的、连续的过程（Bormann et al., 1999），也是人类-环境系统对已经发生的和未来的变化气候的自我调整或调节过程（Wheeler et al., 2013）。适应性管理也被理解为实现资源的可持续利用的管理，围绕系统管理不确定性展开的一系列设计、规划、监测、管理资源等行动，确保系统整体性和协调性的动态调整过程（佟金萍和王慧敏, 2006）。总体来说，适应性管理是一个面对不确定性因素的、结构性的、重复性的优化决策制定过程，通过科学识别管理降低不确定性，并对战略目标及相应方案进行调整，以适应社会经济状况与环境的快速变化，最终实现经济-社会-生态复合系统的可持续发展。

因此，适应性管理是一科需要不断改进的监测评估与决策管理系统行动，主要过程包括管理目标设定、管理政策制定、政策实施、状况监测和效果评估、政策评估，而政策评估后又对原始目标和政策进行反馈，再次进行前期循环迭代的过程（图 1-2）。

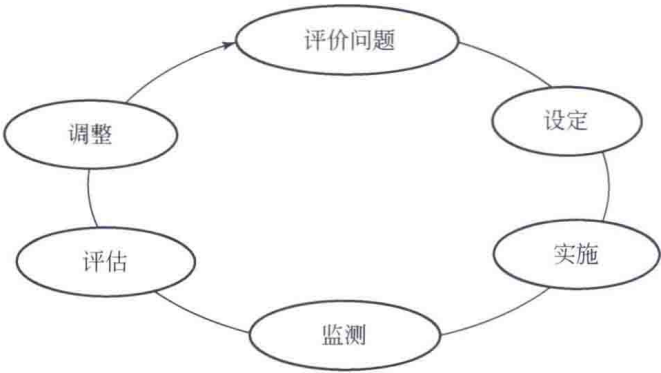


图 1-2 适应性管理方法示意图（Nyberg, 1998）