



海河流域 二元水循环研究进展

RESEARCH ON
DUALISTIC WATER CYCLE IN HAIHE BASIN

秦大庸 刘家宏 陆垂裕 等 编著
杨志勇 栾清华



科学出版社

海河流域二元水循环 研究进展

秦大庸 刘家宏 陆垂裕 等 编著
杨志勇 栾清华

国家重点基础研究发展计划(“973”计划项目)“海河流域二元水循环模式
与水资源演变机理”(项目编号:2006CB403401)

国家“十一五”支撑课题“南水北调水资源综合配置技术研究”(项目编号:2006BAB04A16)

国家自然科学基金重点项目“社会水循环系统演化机制与过程
模拟研究”(项目编号:40830637)

国家自然科学基金创新群体研究基金“流域水循环模拟与调控”(项目编号:51021006)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以海河流域为研究区域,综合论述了“自然-社会”二元水循环研究进展,内容包括三部分:第一部分(第1~4章)总结了降水过程、蒸发过程、地表水过程、地下水汇流等基本循环过程及其相关理论和技术方法;第二部分(第5~8章)阐述了强人类活动干扰下,水循环二元化过程中伴随的水环境二元演变、水生态的二元演变,以及农业水循环、城市水循环的形成和演变;第三部分(第9~12章)论述了研究二元水循环所需的流域下垫面获取技术,分布式水文模型,区域目标ET控制技术、地下水CFCs定年和环境示踪技术等有关方法的研究进展及其在海河流域典型单元的应用研究。

本书可供水文学及水资源专业,农田水利、环境工程、水文地质等相关专业的科研人员、高等院校的教师和研究生等阅读。

图书在版编目(CIP)数据

海河流域二元水循环研究进展/秦大庸等编著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-030072-0

I. ①海… II. ①秦… III. ①海河-流域-水循环-研究 IV. ①P339

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第011849号

责任编辑:何舒民 童安齐 / 责任校对:王万红
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2011年8月第一次印刷 印张:24

印数:1—1 200 字数:540 000

定价:70.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229 010-64034315; 13501151303

前 言

全球天然水循环过程自从出现人类以来就开始遭受不同程度的干扰,现代环境下,大规模的工农业生产、城市化建设所需的人工取、用、耗、排水等活动更是无时不在深刻改变着天然水循环的各个环节,致使流域水循环呈现出明显的“自然-社会”二元特性。水资源短缺、水污染和水生态退化等水问题即是流域二元水循环演化衍生出的一系列后效。海河流域是我国乃至全世界人类活动对于流域水循环扰动强度最大、程度最深、类型最复杂的地区,该流域高强度人类活动干扰下的流域二元水循环研究对于其他弱扰动缺水地区无疑具有直接的参考和借鉴意义。本书以海河流域为研究区域,以“自然-社会”二元水循环理论为指导,内容涵盖了水循环相关理论及应用的研究进展。全书内容包括三部分(12章):第一部分(第1~4章)总结了基本循环过程、相关理论及其研究的技术方法,主要涉及降水过程、蒸发过程、地表水过程、地下水过程等;第二部分(第5~8章)针对天然水循环过程受到人类活动干扰这一事实,对水循环的二元演化及其伴生过程进行了论述和探讨,主要包括水环境的二元演变、水生态的二元演变及农业水循环、城市水循环的形成和演变;第三部分(第9~12章)介绍了研究二元水循环的先进技术方法及其在海河流域典型单元的应用研究,具体包括下垫面获取技术、分布式水文模型、区域目标 ET 控制技术和地下水 CFCs 定年和环境示踪技术。

本书研究内容得到国家重点基础研究发展计划(“973”计划项目)(项目编号:2006CB403401)、国家“十一五”支撑课题(项目编号:2006BAB04A16)、国家自然科学基金创新群体研究基金(项目编号:51021006)和国家自然科学基金重点项目(项目编号:40830637)共同资助。本书由中国水利水电科学研究院水资源所和中国科学院地质与地球物理研究所等科研单位研究人员共同参与和编写完成,具体编写分工为:第1章,杨志勇、于赢东、栾清华;第2章,邵薇薇、李海红、刘扬;第3章,刘家宏、刘森、于赢东、王瑞芳;第4章,陆垂裕、张俊娥、秦大庸;第5章,秦大庸、肖伟华、葛怀凤、李玮;第6章,尹婧、苟思、侯卓、胡剑;第7章,张瑞美、杨贵羽、郭迎新;第8章,栾清华、褚俊英、龙爱华;第9章,张瑞美、桑学锋、王明娜;第10章,牛存稳、栾清华、陈强;第11章,刘家宏、张瑞美、秦大庸;第12章,秦大军、赵占峰、李晨。全书由秦大庸、刘家宏和栾清华统稿。“973”项目首席专家王浩院士审阅了全书,并提出了许多宝贵意见和建议,在此表示感谢。

限于作者水平和编写时间仓促,书中不足之处在所难免,敬请广大读者不吝批评赐教。

编著者

2010年10月于北京

目 录

前言

第一部分 基本循环过程、相关理论及其研究的技术方法

1 海河流域降水演变研究进展	1
1.1 降水形成机制	1
1.1.1 降水的形成过程	1
1.1.2 降水形成的主要影响因子	2
1.1.3 降水模拟模型研究进展	2
1.2 海河流域降水的主要特征及影响因子	4
1.2.1 海河流域不同区域降水特征	4
1.2.2 海河流域不同季节降水特征	4
1.2.3 海河流域降水的主要影响因子	4
1.3 气候变化对降水的影响	8
1.3.1 气候变化影响降水的事实	8
1.3.2 大气环流对降水的影响	9
1.3.3 气溶胶对降水的影响	10
1.3.4 气候变化条件下海河流域降水演变特征	10
1.4 人类活动对降水的影响	11
1.4.1 下垫面变化对降水的影响	11
1.4.2 城市化对海河流域降水格局的影响	12
1.5 降水监测与时空展布	13
1.5.1 降水监测方法	13
1.5.2 降水空间展布方法	15
1.5.3 降水时间展布方法	18
参考文献	19
2 蒸发过程	23
2.1 蒸散发理论研究进展	23
2.1.1 蒸散发机理的研究	23
2.1.2 蒸散发的测定	25
2.1.3 蒸散发的两个假设	27
2.2 蒸散发的模拟现状研究	30
2.2.1 分布式水文模型对蒸散发的模拟	30
2.2.2 陆面过程模型对蒸散发的模拟	32

2.3 基于 Budyko 假设的流域水热耦合规律研究	33
2.3.1 Budyko 假设的提出	34
2.3.2 Budyko 理论框架下的研究	35
2.4 海河流域蒸散发研究现状	41
参考文献	43
3 地表过程研究综述	49
3.1 产流机理	49
3.1.1 简述	49
3.1.2 蓄满产流模式	51
3.1.3 超渗产流模式	53
3.1.4 混合产流模式	54
3.1.5 不同产流模式对比	55
3.2 汇流模拟方法	55
3.2.1 水文学方法	56
3.2.2 水动力学方法	60
3.2.3 其他水流演进方法	62
3.3 径流变化的主要研究方法	64
3.3.1 径流变化周期的研究方法	64
3.3.2 径流变化趋势的研究方法	65
3.3.3 径流突变点的研究方法	66
3.4 人类活动对海河径流演变的影响	67
参考文献	69
4 地下水文过程	73
4.1 概述	73
4.1.1 地下水的重要性	73
4.1.2 研究的主要任务	74
4.1.3 地下水研究的历史进展	74
4.1.4 当前研究的关键科学问题	76
4.2 地下水文过程	77
4.2.1 地下水的补给	77
4.2.2 地下水的排泄	80
4.3 地下水评价方法	81
4.3.1 经验方法	82
4.3.2 数值模拟法	86
4.3.3 有关问题的探讨	92
4.4 海河流域地下水演变	95
4.4.1 海河流域地下水概况	95
4.4.2 人类活动下的地下水演变	101

参考文献	105
第二部分 水循环的二元演化及其伴生过程	
5 流域水环境演化机制与水污染控制	109
5.1 流域水环境演变的特征与机理分析	109
5.1.1 流域水环境演变的发展特征	109
5.1.2 海河流域水环境剧烈变化的现状	115
5.1.3 流域水环境演变的应对措施	119
5.2 流域水污染及其控制研究现状与趋势	120
5.2.1 流域水污染及其控制研究现状	120
5.2.2 流域水污染识别与污染特征	122
5.2.3 流域污染负荷总量控制	123
5.2.4 污染源的控制措施与对策	126
5.2.5 流域水污染识别与调控研究的趋势	128
5.3 流域水体水环境承载力	130
5.3.1 水环境承载力研究简述	130
5.3.2 水环境承载力研究的发展	134
5.3.3 水环境承载力研究的方法	138
5.4 流域水环境系统模拟	143
5.4.1 流域水环境系统模拟简述	143
5.4.2 水质模型研究综述	144
5.4.3 流域水环境系统模拟简述	146
5.4.4 流域系统模型研究	147
参考文献	155
6 水生态演变	159
6.1 水生态系统演变	160
6.1.1 水循环过程中的生态效应	160
6.1.2 海河流域水生态系统二元演化驱动力研究	161
6.1.3 海河流域水生态系统演变过程研究	168
6.2 生态需水计算理论	170
6.2.1 河道内生态环境需水	171
6.2.2 河道外生态环境需水	173
6.2.3 海河流域生态环境需水计算理论	175
6.3 水生态系统保护与修复	178
6.3.1 生态水文分区	178
6.3.2 水生态系统保护与修复的时空尺度	183
6.3.3 水生态系统服务功能	185
6.4 总结	191

参考文献	192
7 农业水循环	195
7.1 农业水循环演变	195
7.1.1 雨养农业	196
7.1.2 灌溉农业	198
7.1.3 节水农业	199
7.2 农业水循环通量	200
7.2.1 农业水循环通量核算	200
7.2.2 农田蒸散发核算	201
7.3 农业用水量	209
7.3.1 作物需水量	210
7.3.2 非耕地与人畜用水量	211
7.3.3 农业用水量核算与预测	212
7.3.4 海河流域农业用水量	216
7.4 农业用水效益和效率	219
7.4.1 农业用水效益	219
7.4.2 农业用水效率	222
7.4.3 高效用水	224
7.4.4 节水潜力的计算	227
7.5 农业生态系统的服务功能	229
7.5.1 农业生态系统的内涵	229
7.5.2 农田生态系统服务功能价值评价	231
参考文献	237
8 城市水循环	243
8.1 城市化的水循环效应	243
8.1.1 城市化对自然水循环的影响	243
8.1.2 城市化对社会循环的影响	247
8.1.3 城市化的虚拟水效应	248
8.2 城市二元水循环过程及其演变	249
8.2.1 城市二元水循环过程	249
8.2.2 城市二元水循环过程的水量演变	254
8.3 城市水循环系统健康状态评价及调控机制	262
8.3.1 城市水循环系统状况表征	262
8.3.2 城市水循环系统健康评价研究	263
8.3.3 健康目标下的城市水循环系统调控机制研究	265
8.4 基于二元水循环的城市和农村水资源联合调控	270
8.4.1 以水源类型为区分的取水调控	270
8.4.2 以侧支水循环为基础的用水调控	273

8.5 展望	275
参考文献	276

第三部分 二元水循环的先进技术方法及应用研究

9 流域下垫面数据获取技术	279
9.1 地形数据及其处理	279
9.1.1 地形数据	279
9.1.2 地形数据 DEM 的获取方法	280
9.1.3 地形数据 DEM 在流域水文的应用	280
9.1.4 强人类活动干扰下的平原区数字水系提取实例应用	281
9.2 土地利用和土壤数据获取与处理	286
9.2.1 土壤数据获取与处理	286
9.2.2 土地利用数据获取与处理	290
9.3 人工用水数据获取与处理	293
9.3.1 人工用水过程	293
9.3.2 人工用水数据处理及展布	294
9.4 小结	295
参考文献	296
10 分布式水文模型技术	297
10.1 分布式水文模型综述	297
10.1.1 国外研究进展	297
10.1.2 国内研究进展	298
10.2 流域分布式水循环模型 WEP	299
10.2.1 WEP 模型的发展	299
10.2.2 WEP 模型结构	300
10.2.3 WEP 模型特点	302
10.2.4 海河流域 WEP 模型	302
10.3 SWAT 模型	306
10.3.1 SWAT 模型的发展	306
10.3.2 SWAT 模型结构	306
10.3.3 SWAT 模型特点	307
10.3.4 SWAT 模型应用进展	309
10.3.5 海河流域强人类活动地区 SWAT 模型	310
参考文献	316
11 区域目标 ET 控制技术	319
11.1 区域 ET 研究进展	319
11.2 区域目标 ET 计算	322
11.2.1 区域目标 ET 的制定原则	322

11.2.2	区域目标 ET 分类	322
11.2.3	区域目标 ET 的计算方法	323
11.3	区域目标 ET 的调控措施	330
11.3.1	合理调整种植结构	331
11.3.2	推广抗旱节水品种	331
11.3.3	测墒灌溉	332
11.3.4	秸秆覆盖	332
11.3.5	灌溉设施节水	332
	参考文献	332
12	地下水 CFCs 定年和环境示踪技术	335
12.1	概述	335
12.2	CFCs 定年方法及原理	337
12.2.1	数学物理模型	337
12.2.2	地下水 CFCs 年龄计算	337
12.2.3	地下水补给温度估算	338
12.2.4	地下水 CFCs 比值年龄	339
12.2.5	地下水混合比估算	339
12.3	影响 CFCs 地下水定年的主要因素	340
12.3.1	温度对 CFCs 定年的影响	341
12.3.2	过量空气	341
12.3.3	不饱和带厚度	341
12.3.4	土壤吸附	341
12.3.5	生物降解	341
12.3.6	污染	342
12.4	地下水 CFCs 定年和示踪若干应用	342
12.4.1	降水垂直入渗速率估算	342
12.4.2	岩溶水与河水的关系	343
12.4.3	农灌水入渗评价	343
12.5	北京平原区地下水 CFCs 年龄和可更新能力	344
12.5.1	研究区概况	344
12.5.2	研究方法	345
12.5.3	平原区水文地质条件	345
12.5.4	第四系浅部含水层分布特征	346
12.5.5	第四系深部含水层分布特征	347
12.5.6	同位素组成及特征	348
12.5.7	地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 同位素	349
12.5.8	浅层地下水年龄	353
12.5.9	深层地下水年龄	355

12.5.10 地下水年龄与可更新能力评价	357
12.5.11 结论	363
12.6 河水与地下水关系应用研究——以关中盆地为例	364
12.6.1 研究区概况	364
12.6.2 采样和测试	364
12.6.3 结果分析	365
12.6.4 结论	366
参考文献	367

第一部分 基本循环过程、相关理论 及其研究的技术方法

1 海河流域降水演变研究进展

降水是一个重要的气候因子,在很大程度上决定了一个流域或区域的气候特征,是划分气候分区的重要指标;同时,降水过程也是一个重要的水循环过程,是流域水资源的最终来源,其时空分布在很大程度上决定了一个流域或区域的水资源条件。在全球气候变化和强烈的人类活动影响下,降水数量及其时空分布也发生了显著的变化,前人已经对降水形成的机理、主要影响因素等方面开展了大量的研究,但是成果相对较为零散。本章以海河流域为主要研究区域,对降水形成机制、影响因子等研究成果进行了整理,重点对气候变化和人类活动条件下降水的演变进行了梳理和总结。

1.1 降水形成机制

1.1.1 降水的形成过程

降水是指从大气中的液态水或固态水,包括露、霜、雹等在重力作用下,克服空气阻力从空中降落到地面的现象(芮孝芳,2004)。降水的形成主要包括以下三个环节。

(1) 水气凝结过程

水气是成云致雨的物质条件。某区域降水过程中的水气主要来源于两个方面:一是从海洋或其他区域平流输送过来的水气;二是本地蒸发和蒸腾产生的水气(伊兰,陶诗言,2005)。当实际水气压超过饱和水气压时,气块上升膨胀和冷却形成过饱和水气,使得水气能够在大气微粒上凝结形成一个个细小的水滴(即云滴)。

(2) 水滴的增长过程

由水气凝结形成的小水滴的体积都很小,而这些小水滴要变成雨滴、冰粒、雪花等形式降落到地面,其体积需要增长到100多万倍。水气凝结成云滴时其半径只有 $1\sim 20\mu\text{m}$,若此空气块继续上升并一直保持着过饱和状态,过饱和空气中的水气分子就会向云滴扩散,在其表面发生扩散凝结,从而形成雨滴,这一过程被称为雨滴形成的扩散过程。扩散过程中云滴发展成为雨滴的时间较长。

(3) 碰撞合并过程

无数云滴通过碰撞合并过程迅速发展成为直径较大的雨滴的过程被称为碰撞合并过

程。云滴在云中一般是大小不等的,在云滴不断运动的过程中,由于大云滴的体积较大相对阻力较小而具有更快的速度;当大云滴追上小云滴时发生碰撞合并使得云滴体积进一步增大,并加快了云滴之间的合并过程;当合并后的云滴重力大到可以克服阻力时,便以各种降水形式降落到地面(黄荣辉,2005)。扩散过程和碰撞合并过程是水滴积累和增长的两种方式。

1.1.2 降水形成的主要影响因子

水气是降水过程的输入端,在降水过程中起着重要的作用,而水气通量是影响水气来源的关键因素。大气气溶胶的多少可以直接影响到云滴间的碰撞合并过程,也可以通过影响云滴的数量和浓度从而影响到降水的形成。水气通量和大气气溶胶是形成降水的两个重要影响因子。

(1) 水气通量

水气通量是用来描述水气输送的物理量。大气中水气含量及其输送直接影响到降水来源以及水气在大气中的分布情况,同时它也是大气水循环的重要组成部分(张建云,李继生,2002)。

由于不同地区水气分布及其气候模式不同,造成了不同地区的不同降水成因,国内外针对水气通量对于降水形成的影响过程已经取得了一些重要的研究成果,张人禾等于2001年分析了印度夏季风水气输送对我国华北地区降水的影响,发现印度夏季风与我国降水呈负相关,即印度夏季风越强,我国夏季水气输送量就会越少;于淑秋等(2008)分析了东亚夏季风年际变化以及对我国降水的影响,东亚—西太平洋地区海平面气压存在蒙古低压和西太平洋高压之间纬向的偶极子振荡型(Atlantic and Pacific Dipole, APD)。APD指数可以作为东亚夏季风强度的指示指数且与我国长江以南流域的降水量呈负相关关系。乔云亭等(2002)分析了东亚夏季风对我国气候的影响。黄荣辉(2005)分析了印度季风区和东亚季风区气候平均水气输送的经向和纬向分量。

(2) 大气气溶胶

大气气溶胶是指悬浮在大气中的固态和液态颗粒物的总称(张小曳,2007)。气溶胶主要通过三种机制来影响全球气候:①由于气溶胶浓度增强,云的属性发生改变,进而改变其辐射特性,从而对降水等其他气候要素产生影响;②气溶胶通过吸收太阳辐射,产生直接辐射强迫,从而造成气候变化;③气溶胶粒子可以改变大气中不同种类的化学组成,通过这些成分浓度和类别比例的改变而间接影响气候(王耀庭,王桥,2005)。

气溶胶对降水过程的作用比较复杂:一方面,气溶胶作为云凝结核参与云的微物理过程,当气溶胶增多时,云凝结核增多使得云粒子半径减少,从而对降水产生抑制作用;另一方面,气溶胶增加使云滴数量增加,这在一定程度上增加了云滴之间的碰撞合并过程,对降水形成起到积极的作用。以往研究成果表明,气溶胶的增加对降水的形成总体上还是有抑制作用(段婧,毛节泰,2008)。

1.1.3 降水模拟模型研究进展

1. 区域气候模式对降水的模拟

针对全球降水分布不均,容易发生局部旱涝灾害的情况,利用区域气候模式模拟降水

显得尤为必要。Giorgi(1989)、Dickinson 和 Errico(1989)在 PSU/ NCAR 的 MM4 模式和 NCAR 的全球谱模式 CCM1 的基础上,发展了第一代区域气候模式(RegCM1)(范广州,吕世华,1999)。Giorgi 等(1989)将该模式运用到欧洲东大西洋以及美国西部,并指出该模式比全球谱模式 CCM1 预测结果好得多(马艳,等,2006)。自此之后,区域气候模式得到快速的发展。Giorgi 等(1993)和 Bates 等(1993)发展了第二代区域气候模式,第二代区域气候模式在第一代的基础上加入 Grell 方案,将陆面过程进行升级,与此同时把 CCM1 辐射包改为 CCM2,在边界层同化的基础上加入指数松弛方案,并考虑不同尺度系统在不同高度层的作用(Giorgi,1993;Bates,1993;陆其峰,潘晓玲,2003)。

随着计算机技术的发展,第二代区域气候模式在全球的应用更为广泛。Giorgi 等(1989)将该模式运用到东大西洋得到较好的结果。Liu 等(1994)利用全球区域气候模式模拟了东亚地区夏季风气候。结果表明,该模式很好地模拟了夏季风雨带的变化情况以及整个爆发过程。丁一汇将第二代区域气候模式的辐射包由 CCM2 改为 CCM3 的辐射包(陆其峰,潘晓玲,2003),并将该模式应用到东亚降水的模拟(范广州,吕世华,1999),由于考虑了可变云中的冰粒半径以及更为真实的气溶胶分布,该模式得到了极为接近真实情况的降水模式(陆其峰,潘晓玲,2003)。

国际理论物理中心(ICTP)在 NCAR 的 RegCm2 的基础上于 2002~2003 年提出第三代区域气候模式(RegCM3)(Elguindi, et al., 2004;周建玮,王咏青,2007),该模式发展了新的大尺度云降水方案,方案中考虑了次网格尺度云的变率,该方案的引入减少了区域气候模式对海表降水过多的模拟,辐射方案在原来的基础上考虑了大气气溶胶及温室气体的影响(周建玮,王咏青,2007)。Pal(2003)利用该模式对欧洲 1994~1995 年的气温与降水进行了模拟。结果表明,该模式对温度与降水的分布模拟效果很好,但在降水量的模拟上偏大。Pal(2003)还利用该模式模拟了 1988 年北美大旱和 1993 年北美中西部地区洪涝,效果非常好,这也证明了第三代区域气候模式对于极端气候事件的模拟具有良好的适应性。

2. 天气发生器对降水模拟

天气发生器是基于统计特征的降水模拟模型,其原理是根据某一地区天气或气候的一般特征模拟出该地区一年内逐日天气数据(廖要明,等,2004)。天气发生器可以模拟的气象要素包括降水量、太阳辐射、最高(低)气温等。天气发生器对降水的模拟主要包括以下优点(廖要明,等,2004):①天气发生器可以通过参数的插值实现对无资料地区逐日气候条件进行随机模拟,这对于无资料地区降水乃至水文循环过程的研究显得极为重要;②天气发生器可以生成未来某种气候条件下逐日气候资料,这对于系统的研究长系列气候变化影响有很重要的作用;③天气发生器可以随机模拟足够长时间的逐日气候资料,这对于研究极端气候事件的发生及其风险分析有极为重要的作用。

近年来,国内外许多学者开发了多种天气发生器并将其应用到实践中。廖要明等(2004)利用常用的随机天气发生器对中国各地区的逐日降水进行了模拟并得到较好的模拟结果。吴金栋等(2001)在典型天气发生器的基础上发展了能够实现短期模拟的天气发生器。该模型在中国的东北部地区进行了应用,并且实现了气候变化条件下对作物产量以及区域产流量的模拟。Valeriy 等(2007)开发了一套能够模拟水文气象中各项参数的

天气发生器。该天气发生器可以应用在水文循环、生态循环、农业循环等多项循环系统中。Hutchinson(1995)等建立了基于地面数据的随机时空天气发生器。该模型可以对降水实现日尺度和月尺度的模拟,同时可以模拟出降雨的时空分布。对天气参数不同时间尺度以及不同空间尺度的模拟将是未来的发展方向。

1.2 海河流域降水的主要特征及影响因子

海河流域多年平均降水量一般为 500~650mm,降水年际变化差异较大,存在连丰或连枯的规律。同时,海河流域降水时空分布呈明显的地带性、季节性(朱新军,王中根,2008)。

1.2.1 海河流域不同区域降水特征

海河流域包括海河、滦河、徒骇马颊河三大水系(朱新军,王中根,2008)。水利部海河水利委员会与中国气象科学研究院根据河系的水文特征把海河流域分成九个区(徐志龙,等,2009),即滦河流域区、密云库区、官厅库区、岗南库区、白洋淀区、京津塘区、东部平原区、滏阳河区、岳城水库及全区,同时对 1951~2005 年各区水文资料进行了统计和研究,得出海河流域汛期区域降水具有以下特征(徐志龙,等,2009):①从降雨量上说,九个分区中多年平均降水量京津塘地区最多,滦河流域次多,白洋淀区、东部平原区和岳城库区居中,而滏阳河区、密云库区、岗南库区和官厅库区,平均降水量最少;②从降雨的年际变化上说,九个分区中滏阳河降水量年际变化最大,白洋淀次之,京津塘第三,东部平原区和岳城库区居中,滦河流域区、密云库区、岗南库区和官厅库区较小;③分区降水年际变化的剧烈性与该区域的旱涝事件的发生率呈正相关关系。

1.2.2 海河流域不同季节降水特征

海河流域降水的季节性变化十分显著,年内降水主要集中在夏季,6~9 月降水量占全年总降水量的 80%。从降水相对变化率的数值上看,冬季少雨但降水变化较大,夏季降水量较多但年际变化不大(张利平,赵志朋,2008)。

陈峪和高歌(2005)对海河流域各季节多年降水资料进行统计得到各季节的降水分布:春季降水量占全年降水量的 13%,夏季占 69%,秋季占 16%,而冬季仅占 2%;海河流域的降水主要集中在夏季,这是由于海河流域季风气候所决定的。海河流域夏季降水变化情况主要受大气环流的影响,大气环流的异常往往导致流域内夏季干旱和洪涝年份的出现。海河流域春季、秋季和冬季降水量较少,但年际变化不大。

1.2.3 海河流域降水的主要影响因子

从海河流域降水的成因来看,海河流域降水的形成与大气环流特征密切相关(陈峪,高歌,2005;张磊,2007;李想,2005),李想(2005)通过对 1951~2002 年 50 年的气象资料进行分析,选取赤道东太平洋海温、南方涛动指数、太平洋十年涛动期指数(PDO 指数)、西太平洋副高面积指数、青藏高原积雪日数等海河流域降水的主要影响因子进行了分析。

(1) 赤道东太平洋海温

由于海洋热状况的变化和海汽相互作用对短期气候的形成具有重要的作用,李想(2005)利用海河流域和黄河流域 1951~2002 年的降水资料与 Nino3 区的海温距平资料作了相关分析。通过分析表明,海河流域夏季和年降水与 Nino3 区的夏季 6~8 月的海温距平资料呈负相关并且相关性很好。从中得到如下结论:当赤道太平洋海温升高时,厄尔尼诺过程发展,对降水产生了抑制作用,使得海河流域夏季降水与年降水容易偏少;当赤道太平洋海温降低时,拉尼娜过程发展,使得海河流域夏季降水与年降水容易偏多。赤道东太平洋海温对海河降水的影响过程如图 1.1 所示。

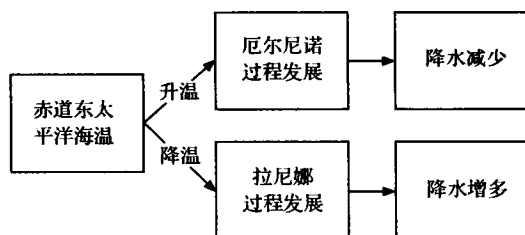


图 1.1 赤道东太平洋海温对海河降水的影响过程

(2) 南方涛动指数

南方涛动(southern oscillation),是热带环流年际变化最突出、最重要的一个现象,主要是指发生在东南太平洋与印度洋及印度尼西亚地区之间的反相气压振动,即东南太平洋气压偏高时印度洋及印度尼西亚地区气压偏低,反之亦然。南方涛动是一种行星尺度的现象,这种振荡造成气压的高低波动对全球很多地区和大气活动中心产生了影响。南方涛动包括南太平洋高压和南印度洋高压。南太平洋高压升高时,南印度洋气压降低,东西气压梯度增大,涛动强;当南太平洋高压降低时,南印度洋气压升高,东西气压梯度减小,涛动弱(张磊,2007)。

南方涛动指数是用来表示涛动强弱的物理量,正指数代表涛动强,负指数代表涛动弱。

由于南方涛动指数对于印度洋和太平洋地区的影响最为显著,李想(2005)利用海河流域 1951~2002 年的降水资料与南方涛动指数作了相关分析。结果表明,海河流域夏季和年降水与南方涛动指数呈正相关且相关性很好。换言之,当南方涛动偏强时有利于雨带向北移动,海河流域降雨丰裕;当南方涛动偏弱时,有利于雨带向南移动,海河流域干旱少雨(李想,2005)。

(3) PDO 指数

PDO(Pacific Decadal Oscillation)指数定义为北纬 20° 以上的海温作经验正交函数所得到的时间序列。PDO 指数相位变化时,代表海温有相应的大规模改变。李想(2005)收集了 1951~2003 年逐月 PDO 指数资料并对数据进行了系统分析(图 1.2),可以看出,在 20 世纪 50~70 年代, PDO 指数以负值为主,而在 70 年代以后 PDO 指数变为正值占优势,而这也正与海河流域在 50~70 年代处于多雨期而在 70 年代以后进入少雨期的实际变化情况相一致。

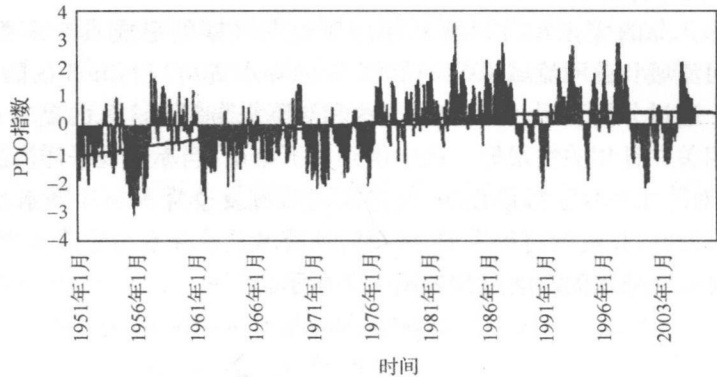


图 1.2 1951~2003 年逐月 PDO 指数(李想,2005)

为了进一步研究 PDO 指数与我国各地区降水间的相互关系,李想(2005)利用1951~2003 年 160 站月降水资料与同期 PDO 指数做了相关分析,分析的结果如图 1.3 所示,可以发现,整个海河流域 PDO 指数处于负值区,与此同时我国南方的长江流域,东南诸河流域和珠江流域均处于正值区。根据上述统计分析,可以推断 PDO 指数与海河流域降水密切相关,并且呈负相关关系,当 PDO 指数为正值时,恰好对应海河流域的少雨期,此时长江以南各流域处于多雨期;当 PDO 指数为负值时,海河流域处于多雨期,而长江以南各流域处于少雨期。根据以上分析,可以推断 20 世纪 70 年代后海河流域 PDO 指数以正距平为主是海河流域持续少雨的原因之一(李想,2005)。

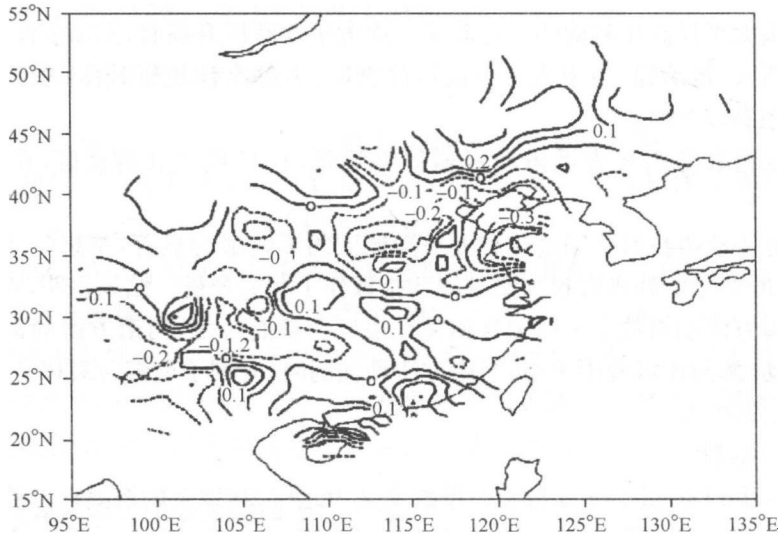


图 1.3 1951~2003 年 160 站月降水资料与同期 PDO 指数相关分析图(李想,2005)

(4) 西太平洋副高面积指数

副热带高压是制约大气环流变化的重要成因之一,是控制热带、副热带地区的、持久