



水 科 学 前 沿 丛 书

变化环境下黄河与墨累-达令河 流域水资源管理策略比较研究

王 煜 彭少明 王慧杰 周翔南 靖 娟 著

海外借



科学出版社

水科学前沿丛书

变化环境下黄河与墨累－达令河流域水资源 管理策略比较研究

王 煜 彭少明 王慧杰 周翔南 靖 娟 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书面向新时期国家实行最严格水资源管理制度的科技需求,紧密围绕攻克“三条红线”控制与管理的技术瓶颈,以变化环境下黄河与澳大利亚墨累-达令流域水资源利用对比研究为切入点,在总结黄河与墨累-达令河流域面临水资源量减少、供需矛盾突出、生态环境恶化等相似问题基础上,对比分析了流域规划、水量分配、水权交易、一体化管理等领域的成功经验与问题,充分吸收墨累-达令河流域的先进经验,形成了适用于变化环境下黄河流域的最严格水资源管理决策方法和策略体系,为我国实现最严格水资源管理制度建设提供理论和方法依据。

本书可供从事水资源开发、利用、管理、保护工作的科技人员,以及广大关心黄河治理与开发的社会各界人士阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

变化环境下黄河与墨累-达令河流域水资源管理策略比较研究/王煜等著. —北京:科学出版社,2018.5

(水科学前沿丛书)

ISBN 978-7-03-056793-2

I. ①变…… II. ①王… III. ①黄河流域-水资源管理-研究 ②流域-水资源管理-研究-澳大利亚 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第048773号

责任编辑:王 倩/责任校对:彭 涛

责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

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

*

2018年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018年5月第一次印刷 印张:10 3/4

字数:250 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《水科学前沿丛书》编委会

(按姓氏汉语拼音排序)

顾	问	曹文宣	陈志恺	程国栋	傅伯杰
		韩其为	康绍忠	雷志栋	林学钰
		卯智	孟伟	王超	王浩
		王光谦	薛禹群	张建云	张勇传
主 编 常 务 副 编 委	编 委	刘昌明			
		徐宗学			
		蔡崇法	常剑波	陈求稳	陈晓宏
		陈永灿	程春田	方红卫	胡春宏
		黄国和	黄介生	纪昌明	康跃虎
		雷廷武	李怀恩	李义天	林鹏
		刘宝元	梅亚东	倪晋仁	牛翠娟
		彭世彰	任立良	沈冰	王忠静
		吴吉春	吴建华	徐宗学	许唯临
		杨金忠	郑春苗	周建中	

《水科学前沿丛书》出版说明

随着全球人口持续增加和自然环境不断恶化,实现人与自然和谐相处的压力与日俱增,水资源需求与供给之间的矛盾不断加剧。受气候变化和人类活动的双重影响,与水有关的突发性事件也日趋严重。这些问题的出现引起了国际社会对水科学研究的高度重视。

在我国,水科学研究一直是基础研究计划关注的重点。经过科学家们的不懈努力,我国在水科学研究方面取得了重大进展,并在国际上占据了相当地位。为展示相关研究成果、促进学科发展,迫切需要对过去几十年国内外水科学不同分支领域取得的研究成果进行系统性的梳理。有鉴于此,科学出版社与北京师范大学共同发起,联合国内重点高等院校与中国科学院知名中青年水科学专家组成学术团队,策划出版《水科学前沿丛书》。

丛书将紧扣水科学前沿问题,对相关研究成果加以凝练与集成,力求汇集相关领域最新的研究成果和发展动态。丛书拟包含基础理论方面的新观点、新学说,工程应用方面的新实践、新进展和研究技术方法的新突破等。丛书将涵盖水力学、水文学、水资源、泥沙科学、地下水、水环境、水生态、土壤侵蚀、农田水利及水力发电等多个学科领域的优秀国家级科研项目或国际合作重大项目的成果,对水科学研究的基础性、战略性和前瞻性等方面的问题皆有涉及。

为保证本丛书能够体现我国水科学研究水平,经得起同行和时间检验,组织了国内多位知名专家组成丛书编委会,他们皆为国内水科学相关领域研究的领军人物,对各自的分支学科当前的发展动态和未来的发展趋势有诸多独到见解和前瞻思考。

我们相信,通过丛书编委会、编著者和科学出版社的通力合作,会有大批代表当前我国水科学相关领域最优秀科学研究成果和工程管理水平的著作面世,为广大水科学研究者洞悉学科发展规律、了解前沿领域和重点方向发挥积极作用,为推动我国水科学研究和水管理做出应有的贡献。



2012年9月

序

长久以来,淡水资源短缺是我国一大基本国情,尚不完善的水资源管理使得我国淡水资源短缺问题更加严重。随着工业化、城镇化深入发展和全球气候变化影响,我国水资源、水生态、水环境面临更加严峻的形势。为构建适用于我国的流域水资源管理综合技术体系,落实最严格水资源管理制度,开展用水总量控制、用水效率、水污染物总量控制,以及水资源管理制度等水资源利用与管理方面研究工作势在必行。

黄河以全国 2% 的河川径流量,承担着全国 12% 的人口、15% 的耕地和沿河 50 多座大中城市的供水任务,是我国水资源最为短缺的地区之一。黄河也是世界上最为复杂难治的河流,来沙量大、含沙量高,有限的水资源还必须承担一般清水河流所没有的输沙任务。在新的形势下,需要对黄河流域实行最严格的水资源管理制度,充分利用遥感(RS)、地理信息系统(GIS)等现代高新技术,通过对国外先进技术的引进与吸收,解决黄河流域水量优化配置及水污染防治等技术瓶颈,形成具有我国自主知识产权的流域水资源管理综合技术体系,促进流域(区域)经济、社会和环境可持续发展,并推广应用到其他流域。

澳大利亚在水资源管理与利用方面科研与实践优势明显,1994 年即实行了流域用水总量控制,且在提高用水效益、改善水生态环境等方面研究处于世界领先水平。这些前沿理论和关键技术均是我国新时期落实最严格水资源管理制度亟待引进和深入研究的重要内容。有必要通过中澳双方合作研究和技术交流,吸收和借鉴澳方研究优势和先进技术,构建适用于我国的最严格水资源管理技术体系。黄河流域与澳大利亚墨累-达令河流域在流域地位、水资源条件、供用水情况方面具有很大的相似性,墨累-达令河流域过去面临的很多水问题都是现在黄河流域所遇到的新问题,在流域水资源管理方面有较成熟的技术可供黄河流域借鉴。经过多年的努力,我国的治黄成果丰硕,取得了显著成效,这些管理和实践经验可为澳大利亚借鉴,从而达到优势互补,互利共赢的国际合作成效。

黄河勘测规划设计有限公司以王煜教授为首的团队长期从事黄河流域水资源规划和研究工作,围绕黄河流域水资源时空动态演变、水资源优化配置、水量精细调度以及综合管理等方面开展了大量的研究,总结和积累了丰富的经验。该书以变化环境下黄河与澳大利亚墨累-达令河流域水资源利用对比研究为切入点,从流域规划方法、配置策略、调度手段、管理制度等方面开展系统的比较,通过国际合作研究与技术引进,充分吸收墨累-达令河流域水资源可持续利用的国际领先的研究成果、应用技术与管理理念,形成适用于黄

河流域乃至全国的“三条红线”控制与管理的综合技术体系，进而形成黄河流域最严格水资源管理和可持续利用的强力支撑。

该书的出版将会对黄河流域水资源管理方法的发展与完善起到巨大的推动作用，促进缺水流域最严格水资源管理制度和策略向更加广阔的视野和更加深入方向发展。

中国工程院院士



2018年5月

前言

供水不足、用水效率不高、水污染严重引发的水危机日益成为全球性危机，也是黄河流域、墨累－达令河流域面临的重大问题。受气候变化和人类活动的双重影响，黄河流域与墨累－达令河流域面临水资源量减少、需水量不断增加，流域水资源可持续利用与生态环境良性维持面临共同挑战，开展水资源利用与管理的对比研究和相互借鉴有助于提升流域水资源利用水平和管理能力。

黄河流经地区多为干旱和半干旱地区，水资源贫乏，河川径流量仅占全国的 2%，却承担着占全国 15% 的耕地、12% 的人口、14% 的 GDP 及 60 多座大中城市的供水任务，流域及相关地区引黄用水需求大，水资源供需矛盾十分突出。随着经济社会的快速发展，黄河流域及相关地区引黄用水量不断增加，致使黄河下游自 1972 年开始频繁断流，生态系统遭到严重破坏。为缓解黄河流域水资源供需矛盾，1987 年国务院批准了《黄河可供水量分配方案》，1999 年国务院授权实施年度水量分配和干流水量统一调度，2006 年实施《黄河水量调度条例》将水量统一调度的范围由黄河干流延伸到支流。综合运用行政、法律、工程、科技、经济等手段，实现了黄河干流未再断流，河流生态系统功能明显改善，促进了流域节水型社会建设，有力地支撑了流域及相关地区经济社会可持续发展。

受环境变化影响，近 30 年来黄河流域水资源情势发生显著变化，水资源量减少了 17.8%，而同期流域用水增长超过 80 亿 m^3 ，水资源供需矛盾进一步加剧。预测未来黄河流域水资源供需矛盾更为尖锐，水资源短缺已成为制约黄河流域及相关供水地区经济社会可持续发展的重要瓶颈，水资源统一管理调度面临严峻挑战。

墨累－达令河是澳大利亚最大的河流，流域面积占其土地面积的 14%，水文、气象等特征与黄河流域相似，变化环境下流域水资源供需矛盾突出，各州之间水资源开发利用纠纷不断。澳大利亚在水资源利用与管理方面成就领衔全球，1991 年实行环境流量控制，1994 年实行严格用水总量控制，在全流域范围建立了完善的水市场，最近十年实现全过程计量节水高效利用。本书通过对比研究变化环境下黄河与墨累－达令河流域水资源利用与管理历程和特点，充分吸收和借鉴澳方研究优势和先进技术，构建适于黄河流域的最严格水资源管理技术体系，支撑水资源的可持续利用，为实现国家粮食安全和国家安全战略及国民经济可持续发展提供保障。

本书共分为 6 章，第 1 章总结了变化环境下黄河与墨累－达令河流域水资源面临的相似问题与挑战；第 2 章对比分析了黄河与墨累－达令河流域规划在解决重大问题方面的举

措和经验，提出完善流域综合规划的建议；第3章对比研究了黄河与墨累－达令河流域以水权为基础的水量分配和水权交易制度，提出了完善流域水资源管理的建议；第4章分析了墨累－达令河流域一体化管理方法与策略，总结了其成功经验以及对我国流域管理的启示；第5章在结合黄河流域特点、充分吸收墨累－达令流域综合管理决策方法与先进理念的基础上，提出了变化环境下黄河流域最严格水资源管理决策方法与策略；第6章总结了本书的主要研究成果。

本书研究工作得到了国家重点研发计划项目（2017YFC0404404）和国家国际科技合作项目（2013DFG70990）的共同资助。本书撰写具体分工为：第1章由彭少明、王慧杰执笔；第2章由王煜、彭少明、靖娟执笔；第3章由彭少明、王煜、周翔南执笔；第4章由王慧杰、周翔南、靖娟执笔；第5章由周翔南、靖娟执笔；第6章由王煜、彭少明执笔。全书由王煜、彭少明统稿。

本书在研究和写作过程中，得到了中国工程院王浩院士、中国科学院刘昌明院士，以及水利部黄河水资源委员会副主任薛松贵教授级高工、黄河水利委员会科学技术委员会主任陈效国教授级高工等诸多专家的悉心指导，并得到课题组成员的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。变化环境下流域水资源管理研究现今仍处于探索阶段，本书研究内容还需要不断充实完善。由于作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，敬请专家读者批评指正。

作者

2018年2月

目 录

第 1 章	变化环境下黄河与墨累 - 达令河流域的比较	1
1.1	黄河流域水资源及其开发利用的问题	1
1.2	墨累 - 达令河流域水资源及其面临的问题	13
1.3	两流域相似性	21
第 2 章	以水资源可持续利用为目标的流域规划对比	24
2.1	黄河流域水资源规划解决的重大问题	24
2.2	墨累 - 达令河流域水资源规划的重大格局	37
2.3	流域水资源规划比较与借鉴	46
第 3 章	以水权为基础的流域水量分配与交易制度研究	52
3.1	黄河流域水量调度与水权建设	52
3.2	墨累 - 达令河流域水量分配与水市场建立	79
3.3	流域水量分配和水市场比较与借鉴	88
第 4 章	墨累 - 达令河流域综合管理决策方法与策略研究	93
4.1	水资源一体化管理概述	93
4.2	一体化宏观决策	96
4.3	实施控制手段	103
4.4	机制保障体系	109
4.5	评估制度	110
4.6	经验与启示	112
第 5 章	变化环境下黄河流域最严格水资源管理决策方法与策略	113
5.1	黄河流域最严格水资源管理制度	113
5.2	实施最严格水资源管理的决策方法	118
5.3	实施最严格水资源管理的策略	129

5.4 实施最严格水资源管理的技术支撑	142
5.5 经验与启示	153
第 6 章 研究结论.....	155
6.1 变化环境下流域水资源面临的挑战	155
6.2 水资源规划的比较与借鉴	156
6.3 水量分配与水市场的比较与借鉴	156
6.4 一体化管理经验总结	157
6.5 研究的技术突破	157
参考文献.....	158

第 1 章 变化环境下黄河与墨累 - 达令河流域的比较

黄河是中华民族的母亲河，流经我国西北和华北地区，流域多属于干旱半干旱地区，水资源总量不足、供需矛盾突出，水资源规划、管理难度大。墨累 - 达令河是澳大利亚最大的河流，流域面积占澳大利亚国土面积的 14%，水文、气象等特征与黄河流域相似，多年平均降水量与黄河流域接近，流域水资源供需矛盾突出，水资源开发利用问题导致各州之间纠纷不断。受气候变化和人类活动的双重影响，黄河流域与墨累 - 达令河流域面临水资源量减少、需水量不断增加等问题，以及流域水资源可持续利用与生态环境良性维持等共同的挑战。

1.1 黄河流域水资源及其开发利用的问题

1.1.1 黄河流域概况

黄河是中国的第二大河，流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东九省区，全长达 5464km，流域面积为 79.5 万 km^2 (包括内流区 4.2 万 km^2)，占全国国土面积的 8%，是我国重要的粮食、棉花生产区。截至 2008 年底，黄河流域总人口为 11 370.9 万人，约占全国总人口的 8.6%，其中城镇人口为 4771.9 万人，城镇化率约为 42.0%。黄河流域是中华民族的发祥地，流域土地、能源矿产资源十分丰富，在国家发展战略中的地位十分突出；流域生态环境脆弱，生态环境保护对国家生态安全具有重要意义。

黄河流域及下游引黄地区地域辽阔、土壤肥沃、光热资源丰富、昼夜温差大，日照时数大部分地区为 2400 ~ 3200h，日照百分率多在 60% 以上，大于 10℃ 的年积温为 2200 ~ 4000℃，有利于小麦、玉米、棉花、花生和苹果等多种名、优、特粮油和经济作物生长。上游丰茂的草原和宁蒙平原是我国畜牧业和粮食生产基地；中游的汾渭盆地及下游的沿黄平原是我国粮食、棉花、油料的重要产区，在我国国民经济建设中具有十分重要的战略地位。黄河流域耕地面积为 24 361.54 万亩^①，耕垦率为 20.4%。黄河上中游地区还

^① 1 亩 $\approx$ 666.67 m^2 。

有宜农荒地约 3000 万亩, 占全国宜农荒地总量的 30%, 是我国重要的后备耕地地区, 只要水资源条件具备, 开发潜力很大。黄河下游流域外引黄灌区耕地面积约为 5764 万亩, 农田有效灌溉面积约为 3700 万亩, 是我国重要的粮棉油生产基地。

黄河流域煤炭等矿产资源丰富, 是我国重要的能源、重化工基地, 综合开发潜力很大, 油气资源、煤炭资源和多种矿产资源具有明显的优势, 是我国经济持续发展重要的能源、矿产资源储备区和接替区, 在我国的能源安全中地位举足轻重。已探明煤产地 (或井田) 685 处, 保有储量为 4492 亿 t, 占全国煤炭储量的 46.5%, 预测煤炭资源总储量为 1.5 万亿 t 左右。黄河流域地域广阔, 资源丰富, 长期以来, 因人口增长和经济社会的发展, 对土地和水等自然资源的需求量超过了环境的承载能力, 生态环境遭到了严重的破坏, 河道断流、水土流失、土地沙漠化、沙尘暴加剧, 不仅损害了当地人民的生存环境, 而且对我国中、东部地区和首都圈的生态安全及环境质量构成严重威胁。黄河流域生态环境保护问题, 已成为全社会关注的焦点, 对全国生态安全的保障具有重要意义。

黄河是世界上含沙量最高的河流之一, 多年平均输沙量和含沙量在世界大江大河中居第一位, 黄河泥沙主要来自黄土高原。据 1956 ~ 2000 年统计, 黄河龙门、华县、河津、淤头四站合计年平均实测输沙量为 12.5 亿 t, 平均含沙量为 $34.4\text{kg}/\text{m}^3$, 平均来沙系数 (指含沙量与流量比值, 下同) 为 $0.030\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$; 三门峡站年平均实测输沙量为 11.2 亿 t, 平均含沙量为 $31.3\text{kg}/\text{m}^3$, 平均来沙系数为 $0.028\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 。

黄河流域产沙时间集中, 年内分配不均。黄河上游干流站多年平均连续最大 4 个月输沙量多出现在 6 ~ 9 月, 中游干流站均出现在 7 ~ 10 月, 连续最大 4 个月输沙量占全年输沙量的 80% 以上。黄河各支流站, 多年平均连续最大 4 个月输沙量出现在 6 ~ 9 月, 4 个月输沙量占全年输沙量的 90% 以上。7 月、8 月黄河流域降水量占年降水量的 40% 以上, 而输沙量干流站占年输沙量的 60% 左右, 支流站占年输沙量的 70% 以上, 陕北高原各河均在 80% ~ 90%。

1.1.2 水资源及其特点

根据 1956 ~ 2000 年系列评价, 黄河流域多年平均年降水量为 445.8mm, 降水具有地区分布不均和年际、年内变化大的特点。据评价, 黄河流域现状下垫面条件下多年平均天然河川径流量为 534.8 亿 m^3 (利津断面), 相应径流深为 71.1mm。

(1) 黄河流域降水特点

受纬度、距海洋的远近、水汽来源及地形变化的综合影响, 黄河流域降水呈现以下特点: 黄河水资源具有时空分布不均, 年内集中、年际变化大的特征。东南多雨, 西北干旱, 山区降水大于平原; 年降水量由东南向西北递减, 东南和西北相差 4 倍以上。黄河流域 400mm 年降水量等值线, 自内蒙古清水河县经河曲、米脂以北、吴旗、环县以北、会宁、兰州以南绕祁连山出黄河流域, 又经过海晏进入黄河流域, 经循化、同仁、贵南、同德, 沿积石山麓至多曲一带出黄河流域, 把整个流域分为干旱、湿润两大部分。

黄河流域降水量的年内分配极不均匀。流域内夏季降水量最多, 最大降水量出现在 7

月；冬季降水量最少，最小降水量出现在12月；春秋介于冬夏之间，一般秋雨大于春雨。连续最大4个月降水量占年降水量的68.3%。

黄河流域降水量年际变化悬殊，降水量越少，年际变化越大。湿润区与半湿润区最大与最小年降水量的比值大都在3以上，干旱、半干旱区最大与最小年降水量的比值一般在2.5~7.5，极个别站在10以上，如内蒙古乌审召站最大与最小年降水量的比值达18.1，为黄河流域之最。由于黄河流域降水量季节分布不均和年际变化大，黄河流域水旱灾害频繁。1956~2000年，出现了1958年、1964年、1967年、1982年等大水年，1960年、1965年、2000年等干旱年，1969~1972年、1979~1981年、1991~1997年等连续干旱期。

（2）黄河流域河川径流的主要特点

一是水资源贫乏。黄河流域面积占全国国土面积的8.3%，而年径流量只占全国的2%。黄河流域内人均水量为 473m^3 ，为全国人均水量的23%；耕地亩均水量为 220m^3 ，仅为全国耕地亩均水量的15%。实际上考虑向黄河流域外供水后，人均、亩均占有水资源量更少。

二是径流年内、年际变化大。干流及主要支流汛期7~10月径流量占全年的60%以上，支流的汛期径流主要以洪水形式形成，非汛期11月至次年6月来水不足40%。干流断面最大年径流量一般为最小值的3.1~3.5倍，支流一般达5~12倍。自有实测资料以来，出现了1922~1932年、1969~1974年、1990~2000年连续枯水段，3个连续枯水段年平均河川天然径流量分别相当于多年均值的74%、84%和83%。

三是地区分布不均。黄河河川径流大部分来自兰州以上，年径流量占全河的61.7%，而兰州以上流域面积仅占全河的28%；龙门至三门峡区间的流域面积占全河的24%，年径流量占全河的19.4%。兰州至河口镇区间产流很少，河道蒸发渗漏强烈，其流域面积占全河的20.6%，年径流量仅占全河的0.3%。

1.1.3 黄河流域环境变化与水资源演变

20世纪80年代以来，在自然和人类活动的双重驱动下，黄河流域水资源演化的二元结构特征明显，黄河流域经济社会发展和水资源利用情况已发生了较大变化。自然条件下，黄河流域气温、降水、蒸发等水文要素发生了显著变化，水资源量减少。人类活动改变了部分地区的下垫面条件和产汇流关系，人类取水—用水—排水过程中产生的蒸发渗漏，对黄河流域水文特性产生了直接影响，人类活动使天然状态下降水、蒸发、产流、汇流、入渗、排泄等黄河流域水循环特性发生了全面改变。随着黄河流域内外工农业用水的不断增长，黄河流域水资源供需矛盾日益突出，缺水已成为沿黄地区社会和经济可持续发展的主要制约因素，也给黄河流域的生态环境带来了严重影响。

1.1.3.1 黄河流域水文要素的变化

黄河的主要产水区位于中纬度干旱、半干旱地区，是全球气候变化的敏感地区。1951~2009年，黄河流域的平均气温、水面蒸发和降水等水文要素发生了明显变化，进一步影响了黄河流域的水资源。

(1) 气温升高

据黄河流域 14 个气象站点 1951 ~ 2009 年气温观测分析, 黄河流域年均气温与全球气温增温一致, 具有波动的升高趋势, 如图 1-1。

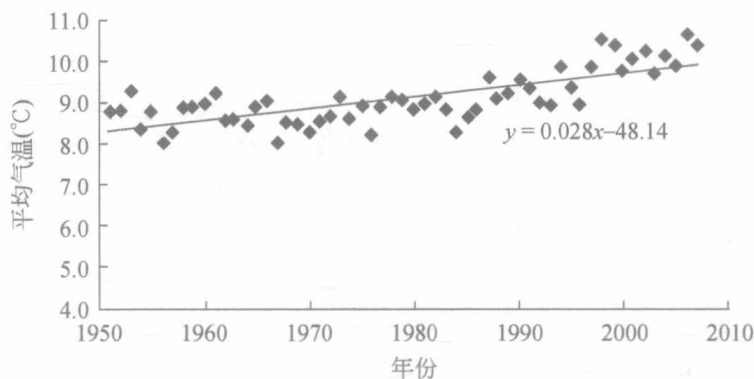


图 1-1 黄河流域气温变化情况

分区气温变化研究表明, 由于地理位置的差异, 黄河流域内气温变化的空间差异比较大, 黄河流域上中下游气温变化幅度有所不同, 上游温度变化大于中下游。河源区气温升高幅度最大, 1951 ~ 2009 年平均气温线性升温率为 $0.267^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 高于全球及我国平均气温的上升速率; 从年代变化看, 20 世纪 80 和 90 年代气温变化幅度最大, 尤其是 90 年代, 黄河流域气温增幅达到 0.7°C 。

(2) 水面蒸发增大

气温升高影响了黄河流域的蒸发能力。研究表明, 在气温升高 1°C 的情况下, 黄河中游蒸发能力增大 $5.0\% \sim 7.0\%$, 导致黄河水资源减少。

观测事实和研究均表明, 黄河流域最近几十年的蒸发皿蒸发呈下降趋势, 且以春季和夏季下降最为明显。研究表明 (郭军和任国玉, 2005), 近 50 年黄河流域蒸发量减少十分显著, 造成蒸发量减少的直接气候原因可能是日照时数及太阳辐射的减少, 平均风速和气温日较差的降低可能也起着重要的作用; 与蒸发皿蒸发相反, 黄河流域实际蒸发量呈逐年增大的趋势。据分析, 蒸发皿蒸发下降的主要原因是近年来全球太阳辐射的下降; 黄河流域陆面实际蒸发量明显增加, 这是由于灌溉等用水量增多造成的, 尽管太阳辐射有所减弱, 但是在比较干旱的地区, 供水条件是决定陆面蒸发的主要因素。

(3) 降水量减少

从 1956 ~ 2010 年系列降水量变化来看, 黄河流域年降水量波动减少的趋势较为明显, 如图 1-2 所示。

从降水量的年代变化来看, 1956 ~ 1969 年黄河流域降水量最大, 年均均为 471.3mm , 之后的 20 世纪 70 ~ 90 年代降水量持续减少, 90 年代年均降水量减少为 425.3mm , 2000 年以后降水量较 90 年代略有增加。不同年代黄河流域降水量变化见表 1-1。

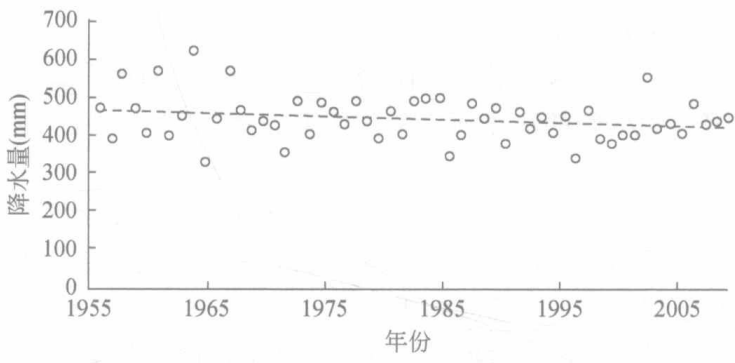


图 1-2 黄河流域系列降水量变化

表 1-1 黄河流域不同时段降水量变化 (单位: mm)

时段	1956 ~ 1969 年	1970 ~ 1979 年	1980 ~ 1989 年	1990 ~ 1999 年	2000 ~ 2010 年
降水量	471.3	444.6	443.9	425.3	437.4

1.1.3.2 黄河流域下垫面变化

20 世纪 70 年代以来, 水利工程建设、水土保持工程建设、地下水过量开采等人类活动的不断加剧, 改变了黄河流域下垫面条件, 导致入渗、径流、蒸发等水平衡要素发生了变化, 改变了部分地区下垫面条件和产汇流关系, 如图 1-3 所示。

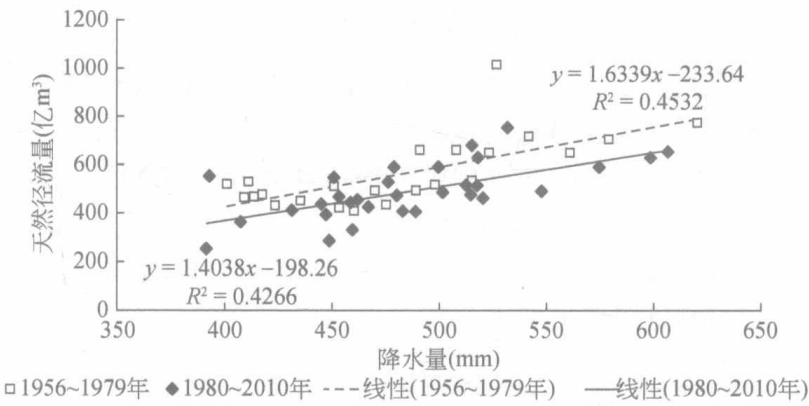


图 1-3 黄河流域降水径流关系

受下垫面变化影响黄河流域降水径流关系发生显著偏离, 1980 ~ 2010 年降水量较 1956 ~ 1979 年减少了 4.2%, 而径流量减少了 21.3%。黄河流域降水径流关系变化尤其以中游河口镇至三门峡区间最为剧烈, 1980 ~ 2010 年降水量较 1956 ~ 1979 年减少了 4.4%, 而径流量却减少了 41.6%。黄河流域降水径流变化的归因分析, 概括起来包括以下几个方面。

1) 水土保持等生态建设, 减少地表径流量。20 世纪 70 年代以来, 黄河中上游水土流失治理面积为 18.45 万 km², 水土保持林草建设的实施, 改变了土地类型, 大量植被形

成增加了林冠截流、草冠截流及淤地坝等人工建筑物截流量，并通过植物的蒸腾、水面蒸发等消耗。据研究，1980 年以来，黄河上中游水土保持年均消耗水量为 10 亿 m^3 ，大致分布情况为：兰州至河口镇区间的清水河、祖厉河等为 0.5 亿 m^3 ，河口镇至龙门区间为 6.4 亿 m^3 ，龙门至三门峡区间为 2.8 亿 m^3 ，三门峡至花园口区间为 0.3 亿 m^3 。

2) 地下水过量开采改变了水资源的转换关系，导致黄河河川径流量减少。1980 年，黄河流域浅层地下水开采量为 93 亿 m^3 ；2008 年，开采量达到 137.18 亿 m^3 。随着黄河流域地下水开采量不断增加，原来以基流形式补给、形成地表径流的部分地下水，由于地下水的过量开采，而不再以地表径流出现，特别是一些工程傍河取水，直接对黄河河川径流量造成了一定影响。另外，由于地下水过量开采造成地下水位持续下降，部分河流的地表径流则转向补给地下水。

3) 水利工程水面蒸发损失。水利工程尤其是黄河干流大型水库的修建增加了水面蒸发附加损失量，进而也减少了黄河流域地表径流的消耗量。据统计，目前黄河流域共建成蓄水工程 19 025 座，其中小（I）型水库以上 492 座，总库容为 797 亿 m^3 ，按照水面蒸发年均均为 1000mm 的净损耗折算，黄河流域水利工程年均水面蒸发损失接近 15 亿 m^3 。

4) 集雨利用消耗。黄河流域大部分地区属干旱和半干旱地区，降水量少、气候干燥，雨水资源利用是偏远地区解决水源问题的重要途径，雨水的积蓄利用直接减少了地表径流的产生量。黄河流域现有集雨工程多达 240 万个，直接利用消耗雨水约 1.0 亿 m^3 ，雨水的直接利用减少了黄河径流。

1.1.3.3 黄河流域水资源情势变化

由于气候变化和人类活动对下垫面的影响，黄河流域水资源情势发生了变化，其中黄河中游变化尤其显著，水资源数量明显减少。据第二次水资源评价，1956 ~ 2000 年系列黄河河川径流量为 534.79 亿 m^3 ，较 1919 ~ 1979 年系列的 580 亿 m^3 减少了 45.21 亿 m^3 。与 1956 ~ 1979 年相比，1990 ~ 2000 年黄河流域平均降水量减少 8.5%，而天然径流量却减少了 19.9%。2001 ~ 2010 年黄河流域年均径流量为 474.5 亿 m^3 ，少于地表水资源量的系列均值。黄河流域水资源变化见表 1-2。

表 1-2 黄河流域不同时段降水量及天然径流量

项目	1956 ~ 1979 年	1980 ~ 2000 年	1990 ~ 2000 年	1956 ~ 2000 年	2001 ~ 2010 年
降水量 (mm)	460.20	432.01	421.29	447.04	437.4
径流量 (亿 m^3)	557.48	508.86	446.64	534.79	474.5

从各主要水文站天然径流量变化来看，黄河不同区域径流变化也有所不同。黄河源区径流变化幅度相对较小，与 1956 ~ 1979 年相比，1990 ~ 2000 年黄河源区天然径流量减少了 14%，2001 ~ 2010 年天然径流量减少了 12%，而同期黄河中游的龙门站天然径流量分别减少约 17% 和 19%，三门峡站天然径流量分别减少了约 20% 和 23%，是黄河流域径