

水 科 学 前 沿 丛 书

# 黄河流域旱情监测与水资源调配 原理与技术

王 煜 彭少明 等 著



科 学 出 版 社

水科学前沿丛书

# 黄河流域旱情监测与水资源调配原理与技术

王 煜 彭少明 等 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书面向黄河流域干旱应对与水资源调度管理的实践需求,发展了多时间尺度干旱评估与演变特征识别、基于陆气耦合的大型灌区干旱实时监测、基于多源降雨信息的洪水/径流多尺度嵌套耦合预报、多年调节水库旱限水位优化控制、多泥沙河流综合运用水库汛限水位优化、应对干旱的流域梯级水库群协同优化调度以及干旱应对与风险管理等关键技术,构建了支撑流域旱情实时监测与应对的水资源优化调配技术平台,优化提出了流域应对干旱的水资源调配方案及管理策略,有效提升了流域应对干旱的水资源调度管理水平。

本书可供水文学及水资源、大气科学、减灾等相关专业的科研人员及高等院校师生,以及从事水利工程规划、水资源管理等领域的工作人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

黄河流域旱情监测与水资源调配原理与技术 / 王煜等著. —北京: 科学出版社, 2017. 3

(水科学前沿丛书)

ISBN 978-7-03-052022-7

I. ①黄… II. ①王… III. ①黄河流域-旱情-监测②黄河流域-水资源管理 IV. ①P426.616②TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 047580 号

责任编辑: 王 倩 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 肖 兴 / 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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张: 26 1/4

字数: 600 000

**定价: 208.00 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<br>常<br>编 | 编<br>副<br>主<br>编<br>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，迫切需要我们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 一

随着全球气候的持续变暖,近年来我国干旱发生频率和强度均呈现增加趋势,严重影响了人类生存和经济社会可持续发展,成为影响最大的自然灾害之一。黄河是我国西北、华北地区重要的水源,流域内土地、矿产资源十分丰富,在我国经济社会发展格局中的地位十分突出。但是黄河流域历史上就是旱灾最严重的地区之一,由于降水量少、抗旱能力差,素有“十年九旱”之说。特别是近50年来,黄河流域气温明显升高,河川径流减少,且有逐渐干旱化的趋势。自20世纪80年代以来,黄河流域干旱尤其是极端干旱发生的频次有增加趋势,尤其是20世纪90年代以来,为干旱发生较为频繁且严重的时期。干旱年份灌区用水受到限制,流域每年因旱灾造成的损失巨大,干旱和缺水问题成为严重制约黄河流域及相关地区经济社会的可持续发展瓶颈。

干旱应对和旱灾控制一直是世界关注的热点和研究的前沿问题。当前流域干旱监测与水资源调配存在干旱实时监测与早期预警技术手段缺乏、应对干旱的水源调配技术体系不完善、流域干旱管理机制不健全等问题,尚不能完全满足流域抗旱减灾的需求,流域干旱应对是正面临的重大科学技术挑战。针对这一重大问题,王煜及其领导下的团队以“十二五”国家科技支撑项目为依托,将信息技术、模拟技术及空间分析技术等前沿技术融合,通过4年攻关研究,在旱情的监测评估、径流/洪水预报、梯级水库调度以及干旱应对管理领域取得了多项创新性成果:

第一,综合考虑水文、气象、下垫面等因素对区域干旱演变的影响,构建了适用于多时间尺度的综合干旱监测与评估指标,全面揭示了水通量转化过程对干旱演化进程的影响,实现流域干旱的科学评估。

第二,建立了流域尺度高时空分辨率的陆面与大气耦合的灌区旱情实时监测系统,实现气象、水文、农业、生态等干旱过程的实时监测和评估,提高了灌区干旱的预报精度,灌区尺度干旱监测准确率达到86.2%以上,为灌区旱情的监测和预报提供了基础平台。

第三,实现了多年调节水库旱限水位控制、汛限水位优化和水库群协同优化技术创新,建立了集成应对干旱的水库群协同调控技术体系,实现了流域水资源年际调控、年内优化、库群协同、空间的协调,开辟了流域有序应对气候变化和流域干旱的新途径。

第四,建立了多层次多部门联动干旱风险管理机制,突破了传统应急式、短期式抗旱模式,提出了具体、系统、有效的组织体系和行动方案,实现流域干旱管理的定量化、精细化和高效化。

《黄河流域旱情监测与水资源调配原理与技术》一书是在“十二五”国家科技支撑计划重大项目“黄河流域旱情监测与水资源调配技术研究与应用”课题研究成果基础上提炼而成的,凝聚了作者多年来的科研成果。我相信该书的出版对应对于旱的水资源调配技术

的发展和完善具有重要的推动作用。由于气候变化对流域干旱及水资源影响的科学问题极为复杂，希望作者和读者在成果的推广应用中进一步深入地开展研究，不断提升流域应对干旱水资源管理与调度的水平，为国家抗旱减灾做出更大贡献。

中国科学院院士

刘昌明

2017 年 3 月

## 序 二

干旱和干旱化是影响人类社会最严重的灾害之一，旱灾控制一直是世界关注的热点问题，及时精准的监测及科学合理的应对，是减少旱灾损失的重要途径。

黄河流域历史上就是旱灾严重的地区之一，上游的宁蒙河套平原、中游汾渭盆地及下游引黄灌区是我国重要的农业生产基地，同时也是干旱化最严重的地区。在过去 60 年间，流域气温明显升高，干旱发生的频次和强度均有所增加；2000 年以来，黄河流域多次发生严重旱情，给流域水资源安全和能源、粮食、生态安全保障带来了极大风险。急需突破干旱实时监测技术瓶颈、创新抗旱水源优化调配方法，提高旱灾控制能力和水资源管理水平，实现干旱的有序应对、减少旱灾损失。

以王煜为带头人的研究团队，以“十二五”国家科技支撑计划课题为依托，针对流域干旱评估方法、灌区干旱实时监测技术与应对干旱的水资源调配原理等关键问题，从灌区干旱监测、预报及科学应对等方面开展了系统的研究，经过 4 年的攻关，取得了丰硕的成果：揭示了黄河流域干旱、洪水发生和演变特征，以及灌区灌溉需水对干旱的响应关系，在流域干旱发生规律、演变趋势和灌溉需水响应领域取得了新认识，为精确、有序应对干旱提供了重要的科学基础。发展了干旱评估与演变特征识别技术、灌区干旱实时监测技术、洪水/径流多尺度嵌套耦合预报技术、应对干旱的流域梯级水库群协同优化调度技术，为进一步提升黄河流域干旱监测与水源调度技术水平提供了重要的支撑。开发了大型灌区旱情实时监测、应对干旱的黄河大型梯级水库群优化调度、黄河干流洪水预报等模型、系统，为流域旱情实时监测与水资源优化调配提供了重要的技术平台。

《黄河流域旱情监测与水资源调配原理与技术》一书的出版发行，对干旱有序应对领域的发展、提升黄河流域旱情监测水平和应对干旱的水资源调配管理能力将起到积极的推动作用。

黄河水利委员会副主任

薛松贵

2017 年 4 月

# 前 言

气候变暖及日益频发的极端天气气候事件对我国粮食安全、水安全、生态安全和城市安全等造成严重威胁。研究表明,气候变化导致我国主要江河河川径流量减少,水资源时空分布不均,高温、干旱、洪涝、缺水问题尤为突出。黄河流域面积79.5万 $\text{km}^2$ ,横贯中国东西,按气候因素,流域大致可分为干旱区、半干旱区和半湿润区。上游宁蒙河套平原、中游汾渭盆地及下游引黄灌区是我国重要的农业生产基地,同时也是干旱化严重的地区。近50年间,随着气候变化和人类活动加剧,黄河流域河川径流减少了17%。自20世纪80年代以来,黄河流域干旱发生频次呈增加趋势,尤其是20世纪90年代以来,为干旱发生较为频繁的时期,灌区用水受到限制,大面积的农田得不到灌溉,每年流域因旱损失超过100亿元,开展干旱监测、预测及科学应对已成为抗旱减灾的关键。当前干旱监测与水资源调配研究尚不能满足流域抗旱减灾的需求,主要存在以下问题:

第一,缺乏准确的灌区干旱实时监测与早期预警技术手段。当前干旱监测方法主要分为两类,即遥感为主的观测监测和基于耦合模式的数值模拟监测。遥感监测具有空间覆盖广的优势,但由于受波段的限制,在灌区尺度上存在空间分辨率和水量变化区分难等问题,同时也无法满足实时监测的时效性要求。地面站点观测具有数据准确可靠的特点,但布点稀少,代表性差,难以监测区域尺度的干旱。利用耦合模式的数值模拟监测尽管能够提供高时空分辨率的实时大气陆面要素的变化,但其模拟结果的可靠性依赖于气象观测资料和模式本身物理过程的描述。

第二,应对干旱的水源调配技术体系不完善。工程调节是将水资源进行时空尺度再分配,降低复杂气候、水文条件下来水的不确定性,为不同用水户提供相对稳定的供水水源,是应对流域干旱和规避旱灾风险的有效途径之一。现有研究多局限于应急层面,从流域水资源系统整体角度研究流域水资源合理组织、优化调配、提升流域抗旱能力的成果较少,对于流域梯级系统应对干旱的协同调度研究不够深入,尚未形成完善的技术体系。

第三,尚未形成完善的流域干旱管理机制。气候变化和人类活动具有复杂性,使得降水预报和需水预测难以做到实时准确,未能达到预报标准的要求,因此,需要完善的机制指导干旱有序应对,降低干旱的危害。当前黄河流域应对干旱的水资源管理与调配体制、机制尚不健全,行动方案属被动、单一应干旱的危机管理,缺乏全面风险管理与主动应对的方案。

“十二五”国家科技支撑计划“黄河流域旱情监测与水资源调配技术研究与应用”课题(2013BAC10B02)正是依据上述三大问题立项的,主要研究黄河流域大型灌区旱情的实时监测、干流洪水预报、应对干旱的黄河骨干水库调度技术,集成流域洪旱灾害监测与预警、抗旱水资源调度等综合适应技术体系,并提出流域干旱管理的策略,为黄河水资源

调度与管理提供科学依据和技术支撑,提高黄河水资源安全保障能力。课题于2013年4月启动,在研究过程中课题组先后多次组织了黄河流域的调研、查勘和数据收集工作,创建了多时间尺度的干旱评估与演变特征识别、基于陆气耦合的灌区干旱实时监测、基于多源降雨信息的洪水/径流多尺度嵌套耦合预报、多年调节水库旱限水位优化控制、多泥沙河流综合利用水库多分期汛限水位优化、应对干旱的流域梯级水库群协同优化调度以及流域干旱应对与风险管理7项关键技术,揭示了流域干旱、洪水发生演变规律以及干旱与灌区需水关系3项认识,形成黄河流域旱情监测、抗旱水资源调度等综合适应技术体系;研发出灌区实时监测系统、应对干旱的黄河梯级水库群优化调度模型、黄河干流洪水预报系统3套模型系统,形成了支撑流域旱情监测与水资源高效利用的技术平台。课题于2016年6月通过科技部验收、8月经国内多名院士和知名专家鉴定,研究成果达到国际领先水平。

本书是在“十二五”国家科技支撑计划课题研究的基础上,针对黄河水资源短缺、旱灾频发等重大问题,以应对干旱的黄河流域水资源调配作为切入点,集成大型灌区旱情实时监测、大型梯级水库群优化调度等关键技术,提出黄河流域抗旱水源调度、旱灾监测与预警等综合适应技术体系,建立应对干旱的响应机制。全书共9章:第1章讲述国内外及黄河流域应对干旱的现状基础,总结干旱监测与科学应对领域面临的主要问题,阐述了本书研究的目标、内容和技术路线;第2章构建适合于黄河流域灌区的干旱评估指标与方法,分析黄河流域农业干旱发生的特征和规律,定量研究黄河流域灌区需水与干旱的相关关系;第3章结合黄河流域气候类型和干旱特征建立了基于陆气耦合模式的干旱监测系统,采用3层嵌套模式开展黄河流域旱情的实时监测;第4章通过建模研究龙羊峡水库入库径流、小浪底水库入库洪水预报,并采用贝叶斯模型平均法对多个确定性预报结果进行综合,实现多模型综合的概率预报;第5章提出了最小保有灌溉水量概念,研究多年调节水库应对干旱的跨年度调节的最优控制水位,提出了多年调节水库年旱限水位控制策略;第6章从黄河中下游汛期洪水泥沙分期特点入手,提出基于分期运用的小浪底水库正常运用汛限水位优化方案;第7章统筹考虑黄河流域防洪、供水等要求,建立应对干旱的黄河梯级水库群调度规则;第8章分析干旱主要致灾因子,提出黄河流域应对干旱风险管理的基本框架;第9章总结研究所取得的主要成果、结论,展望未来流域干旱应对与适应气候变化领域的研究发展方向。

本书的研究工作得到“十二五”国家科技支撑计划“黄河流域旱情监测与水资源调配技术研究与应用”课题(2013BAC10B02)、国家国际科技合作项目(2013DFG70990)和河南省重点科技攻关计划项目(142102310091、152102310040)的共同资助。本书编写具体分工为第1章由王煜、彭少明、马柱国、任立良、武见、靖娟、蒋桂芹执笔;第2章由袁飞、蒋桂芹、郑子彦、马明卫执笔;第3章由马柱国、李明星、郑子彦、陈亮、杨庆、向卫国、朱克云执笔;第4章由王春青、刘晓伟、梁忠民、王中根、蒋桂芹、刘龙庆、许珂艳、刘吉峰、范国庆、张利娜等执笔;第5章由彭少明、王煜、张永永、蒋桂芹、郑小康、王林威、崔长勇、贾冬梅执笔;第6章由刘红珍、李超群、张厚军、李荣容、韦诗涛、王鹏执笔;第7章由赵麦换、李克飞、武见、韩岭、王慧杰、蒋桂芹、郭兵

托、毕黎明执笔；第8章由任立良、袁飞、杨肖丽、沈鸿仁执笔；第9章由王煜、彭少明、马柱国、任立良、王春青、靖娟执笔。全书由王煜、彭少明统稿。

本书在研究和写作过程中，得到中国工程院王浩院士、丁一汇院士，中国科学院刘昌明院士、符淙斌院士和水利部黄河水利委员会副主任薛松贵教授级高工、副总工刘晓燕教授级高工，黄河水利委员会科技委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！

由于气候变化影响的不确定性以及极端气候事件发生的随机性，干旱实时监测、精确预报及科学应对问题高度复杂，是国际国内研究的前沿、热点问题和新方向，加之编写人员水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请专家读者批评指正。

作 者

2016年11月

# 目 录

序一

序二

前言

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 第1章 绪论 .....                       | 1   |
| 1.1 黄河流域应对干旱的需求 .....              | 1   |
| 1.2 黄河应对干旱的现状 .....                | 12  |
| 1.3 国内外研究进展 .....                  | 14  |
| 1.4 研究目标、内容与技术路线 .....             | 25  |
| 第2章 多时间尺度干旱评估与演变特征识别 .....         | 31  |
| 2.1 黄河流域干旱评估指标与评估方法 .....          | 31  |
| 2.2 黄河流域干旱演变特征 .....               | 42  |
| 2.3 黄河流域灌溉需水对干旱的响应研究 .....         | 51  |
| 2.4 本章小结 .....                     | 62  |
| 第3章 基于陆气耦合的大型灌区干旱实时监测系统开发 .....    | 64  |
| 3.1 基于观测数据建立陆面模式气象驱动场 .....        | 64  |
| 3.2 基于陆气耦合原理的干旱监测系统建立 .....        | 80  |
| 3.3 灌区旱情监测示范 .....                 | 96  |
| 3.4 本章小结 .....                     | 106 |
| 第4章 应对干旱的径流/洪水预报关键技术研究 .....       | 108 |
| 4.1 龙羊峡水库中长期径流预报 .....             | 108 |
| 4.2 三门峡水库入库洪水预报 .....              | 120 |
| 4.3 基于贝叶斯理论的水文预报不确定性分析 .....       | 149 |
| 4.4 水文预报示范 .....                   | 168 |
| 4.5 本章小结 .....                     | 175 |
| 第5章 基于水资源年际调控的多年调节水库旱限水位优化控制 ..... | 177 |
| 5.1 黄河流域最小保有灌溉需水量分析 .....          | 177 |
| 5.2 多年调节水库旱限水位的提出 .....            | 184 |
| 5.3 龙羊峡水库旱限水位控制 .....              | 186 |
| 5.4 旱限水位控制风险分析 .....               | 211 |
| 5.5 本章小结 .....                     | 216 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 第 6 章 面向洪水资源利用的小浪底水库多分期汛限水位优化研究 ..... | 217 |
| 6.1 黄河中下游汛期分期洪水研究 .....               | 217 |
| 6.2 小浪底水库汛限水位优化策略研究 .....             | 240 |
| 6.3 基于分期优化的小浪底水库正常运用期汛限水位优化研究 .....   | 250 |
| 6.4 基于水库逐步淤积调控的小浪底水库拦沙期汛限水位优化研究 ..... | 272 |
| 6.5 本章小结 .....                        | 279 |
| 第 7 章 应对干旱的黄河大型水库群联合蓄泄规则 .....        | 281 |
| 7.1 黄河梯级水库群应对干旱的需求 .....              | 281 |
| 7.2 应对干旱的梯级水库群协同优化调度模型 .....          | 285 |
| 7.3 应对干旱的黄河水库群水量调度结果分析 .....          | 302 |
| 7.4 应对干旱的黄河梯级水库群水量调度规则 .....          | 336 |
| 7.5 黄河干流水量调度示范 .....                  | 339 |
| 7.6 本章小结 .....                        | 350 |
| 第 8 章 黄河流域干旱应对与风险管理 .....             | 351 |
| 8.1 干旱风险识别与应对技术 .....                 | 351 |
| 8.2 流域干旱风险管理 .....                    | 365 |
| 8.3 黄河下游灌区干旱应对与管理方案 .....             | 376 |
| 8.4 本章小结 .....                        | 388 |
| 第 9 章 总结与展望 .....                     | 389 |
| 9.1 总结 .....                          | 389 |
| 9.2 创新性成果 .....                       | 395 |
| 9.3 展望 .....                          | 397 |
| 参考文献 .....                            | 399 |

# 第 1 章 | 绪 论

干旱和干旱化是影响人类社会最严重的灾害之一，也是长期以来备受关注的科学问题（符淙斌和安芷生，2002；马柱国和符淙斌，2006）。根据全国自然灾害损失统计，气象灾害损失占全部自然灾害损失的 61%，而旱灾损失占气象灾害损失的 55%，干旱已成为我国主要自然灾害之一。

干旱是一种由气候变化等引起的随机的、临时的水分短缺现象，按表现形式可分为气象干旱、水文干旱、土壤干旱和作物干旱等。按影响对象可分为农业干旱、城市干旱、生态干旱、人畜饮水困难等。旱情，是指干旱在发生、发展过程中，农村、城市、生态受影响的情况，包括干旱历时、影响范围、发展趋势和受旱程度等。旱灾，是指因降水减少、水工程供水不足引起的用水短缺，并对生活、生产和生态造成危害的事件。当降水减少、水工程供水不足进而引起用水短缺、水资源供需失衡，并对生活、生产和生态造成危害时，干旱发展为旱灾。

由于干旱发生具有隐蔽性和干旱发展具有长期性，准确的干旱监测、预警及水资源合理调配对抗旱减灾具有重要的实用价值。

## 1.1 黄河流域应对干旱的需求

按气候因素，黄河流域大致可分为干旱区、半干旱区和半湿润区。上游宁蒙河套平原、中游汾渭盆地及下游引黄灌区是我国重要的农业生产基地，同时也是干旱化显著的地区。在过去 60 年间，随着气候变化和人类活动加剧，黄河流域气温明显升高，河川径流减少 17%，流域有逐渐变旱的趋势，干旱年份大面积灌区得不到灌溉，给流域水资源安全和能源、粮食、生态安全保障带来了极大风险。

### 1.1.1 黄河流域概况

黄河是我国第二大河，自西向东，流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 省（区），在山东省垦利县注入渤海，干流河道全长 5464km，流域面积 79.5 万 km<sup>2</sup>。黄河流域位于我国北中部，属大陆性气候。东南部基本属湿润气候，中部属半干旱气候，西北部属干旱气候。流域冬季几乎全部在蒙古高压控制下，盛行偏北风，有少量雨雪，偶有沙暴；春季蒙古高压逐渐衰退；夏季主要在大陆热低压的范围内，盛行偏南风，水汽含量丰沛，降水量较多；秋季秋高气爽，降水量开始减少。黄河流域区位如图 1-1 所示。



图 1-1 黄河流域区位图

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。总的趋势是由东南向西北递减, 降水量最多的是流域东南部湿润、半湿润地区, 如秦岭、伏牛山及泰山一带年降水量达 800 ~ 1000mm; 降水量最少的是流域北部的干旱地区, 如宁蒙河套平原年降水量只有 200mm 左右。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 倍以上, 干旱、半干旱区最大与最小年降水量的比值一般为 2.5 ~ 7.5 倍, 黄河流域降水量等值线如图 1-2 所示。

黄河流域水面蒸发量随气温、地形、地理位置等变化较大。兰州以上多系青海高原和石山林区, 气温较低, 平均水面蒸发量为 790mm; 兰州至河口镇区间, 气候干燥、降雨量少, 多沙漠草原, 平均水面蒸发量为 1360mm; 河口镇至龙门区间, 水面蒸发量变化不大, 平均水面蒸发量为 1090mm; 龙门至三门峡区间面积大, 范围广, 从东到西, 横跨 9 个经度, 下垫面、气候条件变化较大, 平均水面蒸发量为 1000mm; 三门峡到花园口区间平均水面蒸发量为 1060mm; 花园口以下黄河冲积平原平均水面蒸发量为 990mm。黄河流域蒸发量等值线图如图 1-3 所示。

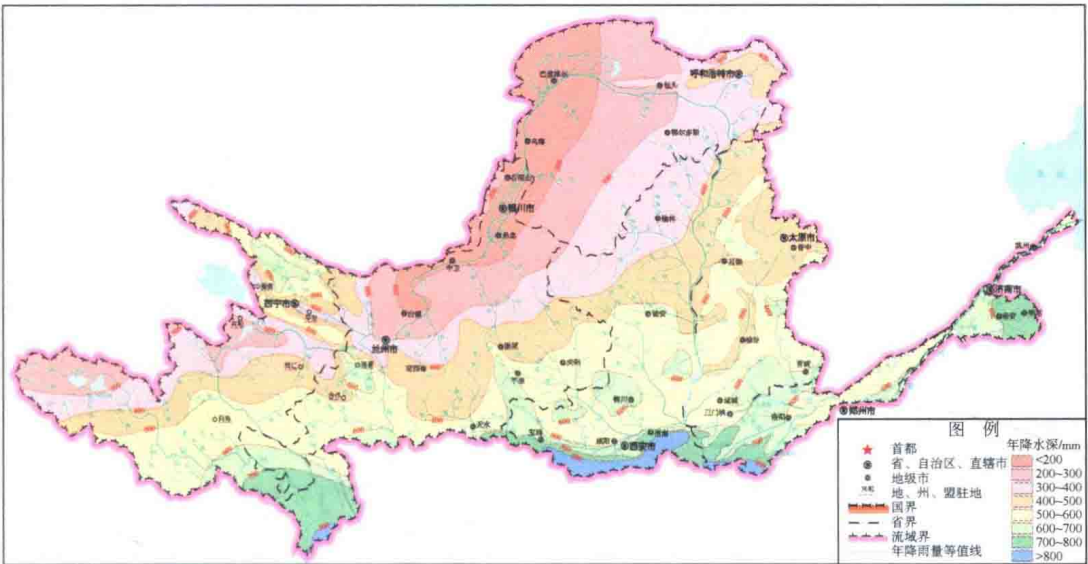


图 1-2 黄河流域降水量等值线图

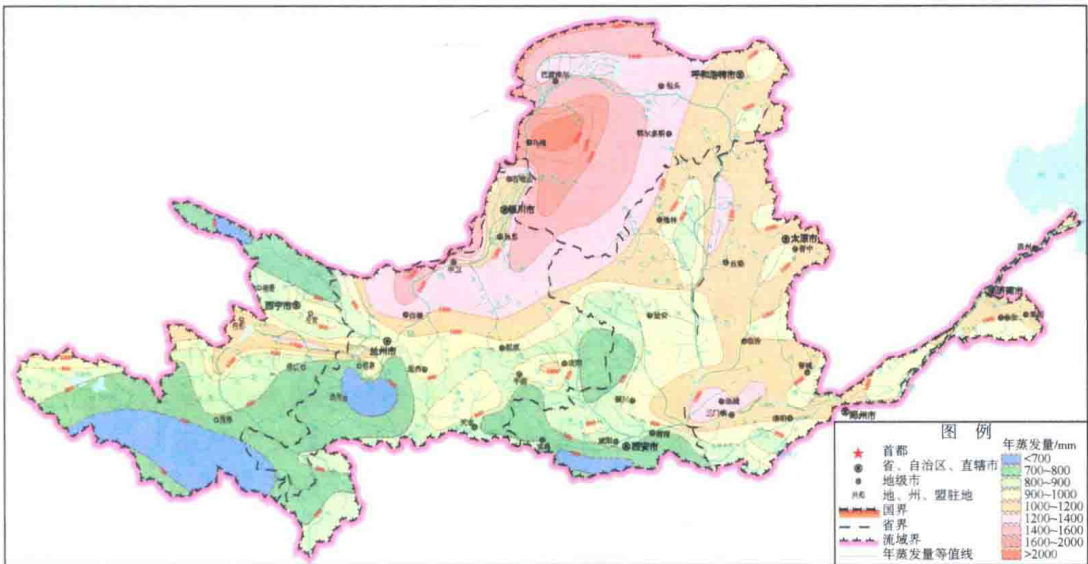


图 1-3 黄河流域蒸发量等值线图

### 1.1.2 黄河流域水资源问题

黄河流域降水量少、蒸发量大，水资源短缺、需求旺盛，正常年份水资源供需矛盾突出，干旱枯水年份水资源短缺更加突出。据《黄河流域水资源综合规划》评价成果，1956 ~ 2000 年黄河流域多年平均分区地表水资源量为 607.2 亿  $\text{m}^3$ ，黄河花园口断面多年平均径流量为 532.8 亿  $\text{m}^3$ 。黄河流域当前面临的主要水资源问题包括以下几个方面（刘昌明，

2004；薛松贵和张会言，2011）。

(1) 水资源总量不足

黄河流域多年平均河川天然径流量为 534.8 亿 m<sup>3</sup>，仅占全国河川径流量的 2%，却承担占全国 15% 的耕地面积和 12% 的人口供水任务，同时还有向流域外部分地区远距离调水的任务。黄河是世界上泥沙最多的河流，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，使可用于经济社会发展的水量进一步减少。随着经济社会的发展，黄河流域及相关地区耗水量持续增加，水资源制约作用已经凸现。不断扩大的供水范围和持续增加的供水要求，使水少沙多的黄河难以承受，黄河流域供水量由 1980 年的 446 亿 m<sup>3</sup> 增加到目前的 512 亿 m<sup>3</sup>。

据预测，不考虑气候变化因素影响，2020 年黄河流域需水量将达到 521.13 亿 m<sup>3</sup>，而通过积极挖潜后地表水、地下水及非常规水源的总供水量为 445.81 亿 m<sup>3</sup>（不包括向流域外供水量 92.8 亿 m<sup>3</sup>），流域缺水量为 75.32 亿 m<sup>3</sup>，缺水率为 14.5%。到 2030 年黄河流域需水量将增加到 547.33 亿 m<sup>3</sup>，流域可供水总量为 443.18 亿 m<sup>3</sup>（不含向流域外供水量 92.42 亿 m<sup>3</sup>），流域缺水量将达到 104.16 亿 m<sup>3</sup>，将严重影响流域的供水安全。黄河流域水资源供需形势见表 1-1。

表 1-1 黄河水资源供需形势 (单位：亿 m<sup>3</sup>)

| 水平年  | 流域内<br>需水量 | 流域内供水量 |        |       |        | 流域内<br>缺水量 | 流域内<br>缺水率 | 流域外<br>供水量 | 入海<br>水量 |
|------|------------|--------|--------|-------|--------|------------|------------|------------|----------|
|      |            | 地表水    | 地下水    | 其他    | 合计     |            |            |            |          |
| 2020 | 521.13     | 309.68 | 123.70 | 12.43 | 445.81 | 75.32      | 14.5%      | 92.80      | 188.82   |
| 2030 | 547.33     | 297.54 | 125.28 | 20.36 | 443.18 | 104.16     | 19.0%      | 92.42      | 185.79   |

(2) 年内年际分布不均、连续枯水段长

黄河是降水补给型河流，黄河流域又属典型的季风气候区，降水的年际、年内变化决定了河川径流量时间分配不均。黄河干流各站最大年径流量一般为最小年径流量的 3.1 ~ 3.5 倍，支流一般达 5 ~ 12 倍；径流年内分配集中，干流及主要支流汛期 7 ~ 10 月经流量占全年的 60% 以上，且汛期径流量主要以洪水形式出现，中下游汛期径流含沙量较大，利用困难，非汛期径流主要由地下水补给，含沙量小，大部分可以利用。黄河自有实测资料以来，相继出现了 1922 ~ 1932 年、1969 ~ 1974 年、1977 ~ 1980 年、1990 ~ 2000 年的连续枯水段，四个连续枯水段平均河川天然径流量分别相当于多年均值的 74%、84%、91% 和 83%。

黄河河川径流年际变化大、年内分配集中、连续枯水段长，开发利用黄河河川径流必须进行调节。由于黄河流域属资源性缺水地区，在干旱枯水年水资源供需矛盾十分尖锐，灌区用水受到限制，据分析，连续枯水段由于需水量增加、可供水量减少，2020 年和 2030 年水平黄河流域缺水量分别较多年平均增加 76.20 亿 m<sup>3</sup> 和 67.78 亿 m<sup>3</sup>，向流域外供水量减少约 20 亿 m<sup>3</sup>，入海水量减少约 43 亿 m<sup>3</sup>，流域水资源矛盾更加突出。连续枯水段黄河流域水资源供需形势见表 1-2。