



黑河流域

水—生态—经济系统
综合管理研究

程国栋 等著



科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

黑河流域水-生态-经济 系统综合管理研究

程国栋 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书拓展了国内外可持续发展领域的热门学科——生态水文学和生态经济学的理论和方法,在生态恢复理论和实践指导下集成的节水型生态系统整体水管理技术体系,建立在野外监测-试验-示范-数字流域平台上的实验生态水文学研究方法和内陆河流域水-生态-经济系统综合管理的可持续发展理论框架,是首部自然和人文学科综合集成、理论联系实际的流域尺度的科学著作。

本书主要供地学、农学、生态学、经济学、流域管理学、信息学等领域的科技研发人员、管理决策层、高等院校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

黑河流域水-生态-经济系统综合管理研究/程国栋等著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-024582-3

I. 黑… II. 程… III. 黑河-流域-水资源管理: 综合管理-研究
IV. TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 074039 号

责任编辑: 韩 鹏 朱海燕 文 杨 王日臣/责任校对: 钟 洋

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 王 浩

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

*

2009 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2009 年 6 月第一次印刷 印张: 37

印数: 1—1 300 字数: 862 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

前 言

可持续发展一直是近些年的重要主题,众多国际公约、国际报告和国际组织均强调可持续发展,如《联合国千年宣言》、2002年的全球可持续发展峰会、2003年的世界水论坛和国际科学联合会(ICSU)等。流域尺度的水资源综合管理在过去的几十年里拓展到可持续发展领域,得到快速的发展,也正是这些发展让学界和政界都意识到知识储备的不足,不仅要科学理论,而且急需应用技术。在生态水文和生态经济基础上认识水-生态过程及其水资源合理利用领域成为流域可持续发展研究的亮点。2001年出版的《流域整体水资源管理》超越了“实体水”理念,意识到水资源整体管理还只是目标。2004年出版的《流域综合管理——生态水文和生物技术》首次综合生态水文学和植物技术考虑流域管理。2004出版的《西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究》丛书的生态环境卷专设章节讨论黑河流域生态环境建设的区域配置与分析。

我国西北干旱区,水是生命和经济活动之源;有水就是绿洲,无水便成荒漠。西北地区每个内陆河流域都是一个山区与平原、绿洲与荒漠,地表水与地下水相互转换的独立单元,可持续地运行该单元的根本是流域内水-生态-经济的协调发展。黑河是我国第二大内陆河,是西北地区灌溉农业大规模开发最早的流域,是急剧恶化的水-生态环境明显影响可持续发展的流域,是一个多民族聚居的流域,是中亚内陆干旱区形成演变和西北水土资源开发利用具有良好代表性的流域。黑河流域生态系统经历了荒漠变绿洲的辉煌,也面临着沙漠化和沙尘暴的尴尬,稀缺的水资源必需平衡环境变化、经济发展和生态健康,在流域尺度提高水效益成为基本目标。

为整治黑河流域,1992年国家计划委员会批复了“黑河干流分水方案”,1995年国务院八部委、院士考察团对流域生态环境进行了全面调研;1997年国务院批准了“黑河干流水量分配方案”,成立了黑河流域管理局;2001年2月在第94次总理办公会上,提出“维护现有绿洲不再退化,使干涸的居延海再现碧波荡漾、天水一色的美景”。国家“黑河流域近期治理规划”项目投入23亿元实施黑河流域生态环境治理,2002年夏末黑河水重新注入东居延海。中国科学院落实国家西部大开发战略,及时启动了中国科学院“西部项目群”,黑河流域项目是其中五大试区之一,也是唯一在流域尺度上进行水资源整体管理试验示范研究的项目。

《黑河流域水-生态-经济系统综合管理研究》一书是我国干旱区首部以流域为单元的水-生态-经济系统综合研究论著,该书依托黑河流域长期野外监测、试验、示范和数字黑河等平台,从流域生态水文学和生态经济学研究的理念入手拓展流域水资源整体管理的理论和方法,融合生态经济学于生态水文学和恢复生态学阐述流域生态系统管理和节水型生态系统恢复与重建的技术,并从生态经济学角度尝试了生态系统价值和服务功能评估,在生态水文学、生态经济学和恢复生态学等科研支持下初步形成了流域水资源整体管理的科学理论和方法。本书主要集成了中国科学院知识创新工程西部行动计划重

大项目“黑河流域水-生态-经济系统综合管理试验示范”(KZCX1-09)、重要方向项目“黑河流域水循环与水资源管理研究(KZCX2-XB2-04)”、国家自然科学基金西部计划重点项目“黑河流域生态-水文过程研究集成(90702001)”等的主要研究成果;是2003年甘肃省科技进步一等奖“陆河流域生态经济学和生态水文学基础理论研究”和通过省级鉴定的两项国际先进成果“黑河中游人工绿洲生态系统节水技术与管理试验示范”和“额济纳绿洲生态环境综合治理试验示范”的部分体现;是黑河团队近五年国内外发表的200多篇论著的系统总结。

全书分为九章,第1章讨论黑河流域水文水资源,从水资源形成与分布、数量、转化、供需平衡和水资源承载力,并在水资源开发利用和未来气候变化情景下对该系统变化进行了预测。第2章流域生态系统主要在流域尺度综合管理目标下,根据系统特征、功能,以水为主线进行了生态系统的分类和功能评价,提出生态系统建设目标。第3章流域经济系统以水为纽带详细阐述了黑河流域社会经济状况,提出了节水型流域产业结构调整的方向和战略。第4章在不同时空分辨率下,研究了黑河流域的水环境和生态环境演变历史、典型过程和特征事件,分析了不同时期环境演变的动力学机制。第5章以试验-示范平台建设和研究为基础阐述了生态恢复技术体系与试验示范研究成果,提出了适合于流域生态系统综合管理的试验-示范-技术推广体系和评价体系。第6章生态水文研究建立在流域实验/试验观测平台的基础之上,在不同尺度上探讨了生态系统的生态水文学机制,提出了流域水资源管理下的生态、环境和社会响应及对策。第7章在生态经济学层面综合分析水-生态-经济系统,构建了流域水资源管理决策支持系统,在就典型绿洲的生态服务功能和价值的探讨中提出流域可持续发展的量化指标。第8章论述了建立在野外监测、试验和示范平台之上的数字黑河体系,并展示了依托GIS对流域蒸发、植被覆盖等与水相关参数的模拟和评估。第9章讨论了黑河流域水-生态-经济系统管理研究中存在的问题和今后的研究展望。

全书由程国栋、肖洪浪、赵文智、冯起、徐中民、李新研定编写提纲,并负责整体改编,在黑河团队的共同努力下,几经修改、定稿。

本书初稿的第1章由冯起、司建华执笔撰写。第2章由赵文智、冯起、张耀生、王根绪、常学向执笔撰写。第3章主要由龙爱华执笔撰写。第4章由肖生春、肖洪浪、靳鹤龄、赵文智、王根绪、拓万全、陈仁升、周茂先执笔撰写。第5章由赵文智、冯起、赵兴全、张耀生、司建华、周茂先执笔撰写。第6章由肖洪浪、赵文智、冯起、张耀生、张小由、司建华执笔撰写。第7章主要由陈东景执笔撰写;第8章由马明国、李新、郭晓寅、卢玲执笔撰写。第9章由肖洪浪、赵文智、冯起、肖生春执笔撰写。

第二稿对初稿做了较大的改编,主要强调各章节的相对独立性和科学性及其与全书的协调性和整体性。第1章、第9章由冯起主笔,第2章、第6章由何志斌主笔,第3章、第7章、第8章由肖洪浪主笔,第4章由肖生春主笔,第5章由张小由主笔,分别对各章节进行了详细增补和删改。肖生春负责全书图、表统一格式编辑和修订,全书统稿由肖洪浪、冯起、肖生春负责。

伍光和先生对第二稿进行了全面的审阅并提出了系统的意见和建议。肖生春负责全书最后的统稿工作,由周茂先、赵良菊、陆明峰、任娟、王勇、李彩芝等参与全书最后

的编改。孙良英女士完成全书插图的编辑清绘。程国栋、肖洪浪负责最后编审和定稿。

在相关项目执行和书稿撰写过程中得到了中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、中国科学院西北高原生物研究所、中国科学院地理科学与资源研究所、甘肃省草原生态研究所、甘肃省张掖市政府、甘肃省肃南县政府、甘肃省临泽县政府、内蒙古自治区额济纳旗政府等单位的大力支持和协作，在此表示衷心感谢！

国家科学技术学术著作出版基金资助了本书的出版；在出版基金申请过程中，郑度院士、傅伯杰研究员和宋长青研究员对本书进行了认真审阅和推荐；中国科学院生态水文与流域科学重点实验室、甘肃省黑河生态水文与流域科学重点实验室部分资助了本书的出版，特此一并致谢！

流域科学和流域管理是全球关注的热点，是探讨 21 世纪全球水问题的基础学科，尽管我们在内陆河流域水资源管理和生态恢复领域做了数十年探索，但因其综合性强、涉及学科多、覆盖决策、科研、管理等范畴；加之我国干旱区流域尺度的生态、经济、社会综合研究仍然处于起步和发展阶段，还有不少科学和实践问题需要进一步研究和探索；编写组历时 3 年，科学审慎地几易其稿、增删数次，但错误和疏漏之处在所难免，敬请读者不吝指正。

作 者

2008 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 黑河流域水文水资源过程	1
1.1 流域水资源形成与分布	1
1.2 流域地表水资源	12
1.3 流域地下水资源	17
1.4 流域水资源总量	33
1.5 水资源系统变化	48
参考文献	53
第 2 章 黑河流域生态系统	54
2.1 生态系统分类	54
2.2 生态系统特征	66
2.3 生态系统管理研究进展	89
2.4 黑河流域生态系统管理亟待解决的科学问题	96
参考文献	98
第 3 章 黑河流域经济系统	100
3.1 经济系统基本理论	100
3.2 黑河流域人文子系统	103
3.3 黑河流域经济子系统	110
3.4 经济子系统的产业结构分析	119
3.5 水资源——黑河流域经济系统发展的困境	131
参考文献	133
第 4 章 黑河流域环境变化	135
4.1 黑河流域现代生态环境变化	135
4.2 黑河下游水环境变化	173
参考文献	239
第 5 章 生态恢复与重建试验示范研究	243
5.1 试验区的设计、内容、布局及其基本原理	243
5.2 上游生态经济系统综合管理	261
5.3 中游经济节水型绿洲试验示范	277
5.4 极端干旱区生态环境恢复技术	319
参考文献	334
第 6 章 黑河流域生态水文	336
6.1 流域尺度的生态水文研究	336

6.2	上游草地与水源涵养	355
6.3	中游经济节水型绿洲建设的生态水文学研究	356
6.4	下游生态与水文过程的耦合	378
6.5	水文与水资源循环特征	408
	参考文献	436
第7章	流域生态经济研究	439
7.1	黑河流域生态安全	439
7.2	环境经济综合账户的核算研究	458
7.3	模型集成和决策支持系统	497
	参考文献	535
第8章	数字流域与模型研究	538
8.1	数字黑河设计	538
8.2	蒸散发的遥感估算	541
8.3	流域净初级生产力 (NPP) 的遥感估算	550
8.4	流域植被监测与模拟	558
	参考文献	568
第9章	黑河流域“水-生态-经济”系统管理研究展望	572
9.1	界面水分传输研究的深化	572
9.2	水分利用效率问题	573
9.3	尺度转换的信息问题	573
9.4	干旱内陆河水热运动研究的扩展尺度	574
9.5	干旱作物水分胁迫的研究	575
9.6	内陆河流域的农业发展方向	577
	参考文献	580

第 1 章 黑河流域水文水资源过程

1.1 流域水资源形成与分布

中国西北干旱区众多内陆河形成于高山地区,山前平原和下游地区为水资源开发利用区和水资源消耗区。祁连山、天山、昆仑山等高大山系成为西北干旱区的水源地,对于干旱内陆区绿洲形成、发展、维持以及经济发展具有特殊意义。西北干旱内陆区河流从发源区到尾间湖泊,依次穿越了高山冰雪冻土带、山区植被带、绿洲带、下游荒漠带四个气候带,形成具有干旱内陆河流域典型特征的冰雪带—山地森林草原—山前绿洲—荒漠复合生态系统,呈现出西部内陆河流域典型的生态景观格局特征:气候梯度和生态梯度明显;生态系统、农业经济系统和牧业经济系统界面分明。这种特殊的地理景观格局和水资源条件决定了山区以牧业经济为主、中游以绿洲农业经济为主、下游荒漠区以生态建设为主的经济格局。近几十年以来,上游山区水资源系统、生态系统主要受气候变化扰动,中下游水资源系统、生态系统受人类活动扰动影响突出,因而中下游地区随着人类经济活动的加强,生态退化问题日趋严重。水资源特殊的分布格局使之成为经济发展和生态建设的主要制约因素,也是社会和生态系统的联系纽带。水资源的开发利用深刻地影响着经济发展与生态环境建设,从而使水资源开发利用成为驱动现代生态环境演变的基本动力。

黑河是西北地区较大的内陆河流之一,发源于青海省祁连山区的冰川和积雪带。黑河流域主要位于祁连山和河西走廊中段($37^{\circ}45' \sim 42^{\circ}40' \text{N}$, $96^{\circ}42' \sim 102^{\circ}04' \text{E}$),流域面积约 13 万 km^2 ,共有大小河流 41 条。从河流的水力联系来看,黑河流域包括讨赖河水系和黑河水系。莺落峡为黑河干流出山口,莺落峡以上为径流形成区,以下为径流消散区,下游额济纳旗为无流区。黑河大部分水资源在进入中游地区以后,用于灌溉农田,有相当一部分被无效蒸发所消耗,只有很少一部分地下水和夏季洪水汇入下游终端湖——东、西居延海。黑河流域横跨青海省、甘肃省、内蒙古自治区(图 1.1),南部为祁连山山地,中部为中游平原,北部为低山山地和阿拉善高原,并部分与巴丹吉林沙漠接壤。按气候和水资源条件,依次可划分为高山冰雪冻土带、山区植被带(包括水源涵养林带)、山前绿洲带和荒漠绿洲带,各带具有独特的地质地貌、水文气候和土壤植被条件。祁连山区为高山寒漠、草甸、草甸草原、草原和森林土壤系列分布区;流域中、下游地区分别属灰棕荒漠土与灰漠土分布区;额济纳旗为以灰棕漠土为主的地带性土壤。

河西地区毗邻青藏高原东北边缘,夏秋季节环绕青藏高原的南支气流在西太平洋副热带高压的北抬西伸的带动下比较活跃,其影响力可达河西地区。因南支气流为上升气流,容易成云致雨。因此,在太平洋暖湿气团边缘控制之下,温湿多雨,5~9 月的降水量可占年降水量的 80%左右。而冬春季节绕行青藏高原北部的北支气流盛行。这个

天气系统是下沉气流,不易形成降水,所以冬春干旱少雨。西部疏勒河高压区降水少,张掖低压常与青藏高原南缘的北上气流相联系,在石羊河与黑河流域的交界处和石羊河流域的黄羊河西侧形成较多降水。而受形成于柴达木盆地热力作用的柴达木热低压影响,祁连山南侧有较多而稳定的降水(陈隆亨等,1992)。

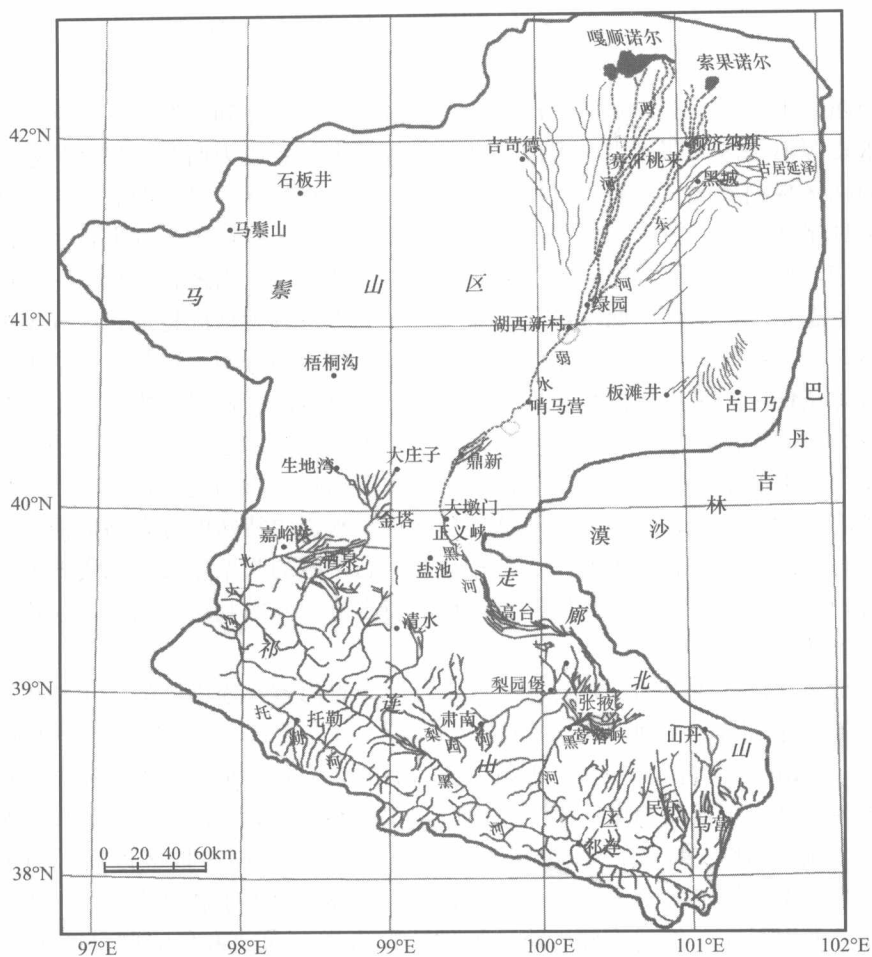


图 1.1 黑河流域水系分布

1.1.1 水文要素及其时空分布特点

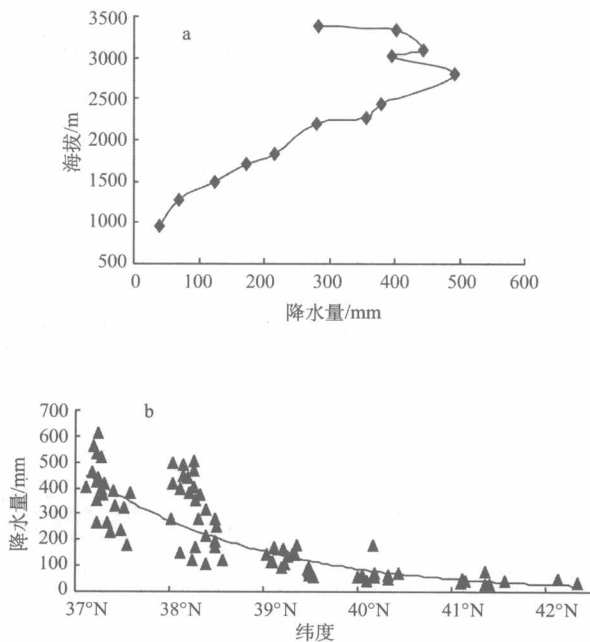
水汽在向本区输送过程中,因沿途多次降水,空气中水汽含量逐渐减少。在大型平原盆地和河谷小型盆地间水汽聚集,形成湿的水汽库,在东南风带动下进一步向西北输送,又多次形成降水过程。随着一次又一次的降水发生,空气中的水汽含量越来越少,所以西北降水稀少。气象观测表明,关中盆地和青海湖周围,常年维持较高的水汽含量,成为西北降水的重要水汽二次输送源地。西北地区水汽输入量来自西南边界最多。

从孟加拉湾及南海北部湾由西南季风携带,经云贵高原—四川盆地—嘉陵江—汉江谷地到达甘肃省长江流域,进而北上渭河、黄河流域,西达祁连山区和走廊区。在走廊最窄的山丹大黄山与祁连山间形成一个狭窄通道,有利于水汽辐合形成降水,使大黄山附近成为黑河流域的降水高值区。同时,由于高大山脉隆起,强烈的地形动力抬升作用形成了降水条件,增大了山地降水量。

1. 降水的时空变化

黑河流域降水量按其大小分为:年降水量大于 300mm 的山区、100~200mm 的中游区和小于 100mm 的下游阿拉善荒漠地带。影响山区降水的主要因素是地形、高程和地理位置。山区降水量一般随海拔增加而增加,空间变化也大,海拔高于 2810m 时,降水量逐渐减少。无论山区还是中游区,降水量都出现从东南向西北逐渐减少的趋势。而中游区降水量一般小于 200mm,从东南向西北减少。下游阿拉善高原从南到北减少,南部梧桐沟为 70.9mm,中部达来呼布为 39.7mm,北部呼鲁赤古特为 36.7mm。从空间分布上看,中游和下游荒漠区降水比较均匀,但数量较少。

黑河流域降水量以海拔 2810m 左右为界,2810m 以下接近线性增加,梯度为 24.4mm/100m,最大降水带出现在 2810m 附近;在 2810m 以上,降水量随海拔增加而下降,下降梯度达到 -37.5mm/100m (图 1.2a)。降水分布的纬度地带性比较好,实际上与海拔对降水的影响相似 (图 1.2b)。黑河流域北部为戈壁沙漠,而南部为流域产流区——祁连山区,因此降水与纬度变化呈现良好的指数关系。而降水与经度的关系比较差,但总体上表现出从东到西减少的趋势 (图 1.2c)。



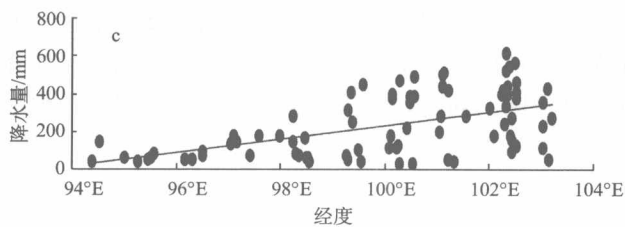


图 1.2 黑河流域降水量变化

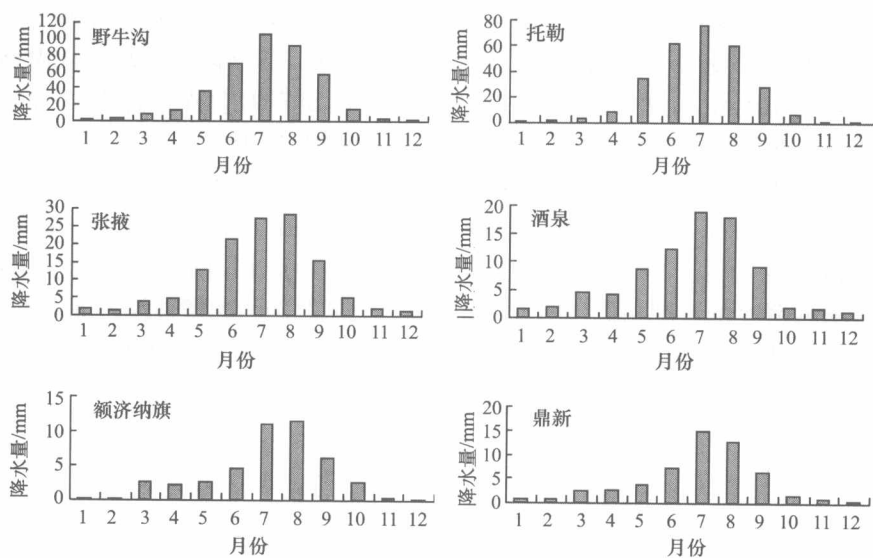


图 1.3 黑河流域降水量季节分配

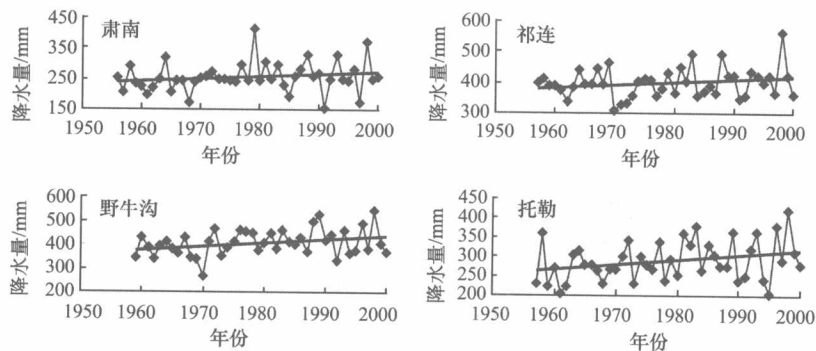


图 1.4 祁连山区降水量多年变化

黑河流域降水量具有明显的雨季和旱季差异,年内分配很不均匀,降水主要集中在5~9月,占年降水量的75.9%~97.2%。5~9月的降水量从东南到西北逐渐增加(Feng *et al.*, 1998),而山区降水量5~9月所占比重比平原区小。汛期连续4个月最大降水量,张掖以东绝大部分地区站为6~9月,山区个别站为6~8月,张掖以西、以北大部分站为5~8月,同期降水量绝对值东部大于西部。

从图1.3可以看出,祁连山区月降水量分布接近正态分布,一般以7月为最大。从1月开始降水逐渐增加,7月以后逐渐减少。中游地区和下游地区降水量基本为正态分布,张掖、酒泉、额济纳旗最大降水量出现在8月,降水量从1月开始逐渐增加,7、8月达到最大,以后迅速减少。

黑河流域典型站降水量变化说明,黑河上游近50年(1950~2000年)降水微弱上升,上升趋势不明显(图1.4)。山区降水上升趋势比较显著,20世纪60年代最枯,80年代最丰。90年代年平均降水量与50年代相比,祁连站增加6.9%,肃南站增加5.4%;而90年代与1960~1990年均值相比,祁连站增加2.6%,肃南站减少0.4%。

黑河流域大部分站50年(1950~2000年)降水量,除张掖、额济纳旗有微弱下降趋势外,没有明显变化,表明降水比较稳定(表1.1)。

表1.1 近50年(1950~2000)黑河平原区降水量各年代际变化

站名	经纬度		海拔 /m	年代际平均降水量/mm					90 年代降水量增加幅度 /(mm/a)	
	N	E		50 年代	60 年代	70 年代	80 年代	90 年代	与 50 年 代比	与 1960~ 1990 年比
山丹	38°48′	101°05′	1 765.9	176.1	185.4	206.5	191.9	196.7	20.6	2.1
民乐	38°27′	100°49′	2 271.5	312.9	307.5	348.3	332.9	340.5	27.6	10.9
张掖	38°56′	100°26′	1 483.7	134.3	116.0	136.8	130.4	123.2	−11.1	−4.5
临泽	39°09′	100°00′	1 454.6	102.9	106.5	119.5	118.8	117.8	14.9	2.9
高台	39°22′	99°50′	1 332.9	87.2	99.4	112.9	105.5	113.3	26.1	7.4
酒泉	39°46′	98°29′	1 478.2	79.6	82.1	91.5	90.3	81.5	1.9	−6.5
金塔	40°00′	98°54′	1 271.2	53.0	55.9	61.0	59.0	76.2	23.2	17.6
鼎新	40°18′	99°31′	1 178.6	50.6	58.1	51.0	54.0	55.5	4.9	1.1
额济纳旗	41°57′	101°04′	941.3	60.9	45.1	37.1	23.3	44.7	−16.2	9.5
莺落峡	34°48′	100°11′	1 674.0	189.3	173.7	184.2	174.2	195.4	6.1	18.0
平均				135.0	134.0	146.0	137.0	144.1	9.0	5.1

黑河流域各地的降水变化不一致:20世纪90年代平均降水量与50年代相比,山丹站增加10.6%,张掖站减少8.7%,酒泉站增加2.2%,额济纳旗站减少46.1%;1990年的降水与1960~1990年的均值相比,山丹站增加1.1%,张掖站减少3.5%,酒泉站减少7.4%,额济纳旗站增加27.0%。

2. 蒸发量的时空变化

蒸发能力和陆面蒸发量是目前科学研究和生产实践中的国际性难题。影响蒸发的因素,主要有温度、风速、气压和饱和差。在实际应用中,由于陆面蒸发可靠性和精度都

比较差,所以人们一般用水面蒸发量来间接估算实际蒸发量。水面蒸发量反映的是一个地区可能蒸发的能力,而真正的水面蒸发量也很难获得,国际上开展了大量试验研究,从 20cm^2 到 100m^2 口径的蒸发器都进行过大量试验。从试验结果看,蒸发器口径越大,观测值越接近实际水面蒸发量。但是,蒸发器口径越大,观测运行成本也随之剧增,而当面积增加到 0.3m^2 时,观测误差的减少非常缓慢,因此,国际上把面积为 0.3m^2 的 E-601 蒸发器观测值作为近似水面蒸发量。

蒸发量主要取决于当地的气温与辐射状况。这两个物理量相对于其他水文气候要素来说比较稳定,而且实际观测也表明水面蒸发量的多年变化比较稳定。我国蒸发观测中以气象部门最为正规,资料系列长、精度高、系列完整,但是气象部门只观测 20cm 口径蒸发器。水文部门大范围使用 E-601 蒸发器始于 1970 年,因此在本研究中,主要采用 E-601 观测成果。黑河流域水面蒸发能力的空间分布规律性比较好,呈现从东南向西北逐渐增加的趋势;从平原区到山区表现为逐渐减少;其空间变化趋势基本与降水量的空间分布特性相反,即降水量大的地方,蒸发能力小;降水量小的地方,蒸发能力较大。降水形成以山体为中心的高值区,而蒸发能力则往往以山体为中心形成低值区,这主要与蒸发能力的影响因素分布有关。

位于西北部沙漠区和山口气流通道上的测站风速大、气温高、湿度小,当地条件对蒸发非常有利,因此一般蒸发能力较大。水面蒸发能力的分布同样与沙漠的分布有关,沙漠区基本上为蒸发能力的高值区,而且沙漠的面积越大,蒸发高值区的面积也越大。祁连山东部的山口为气流的通道,而且靠近沙漠区,蒸发能力明显大于周围地区。地处巴丹吉林沙漠腹地的额济纳旗吉河德、呼鲁赤古特气象站为黑河流域蒸发能力最大的地方, 20cm 口径蒸发器观测多年平均值分别高达 4088.8mm 、 4227.1mm ,换算成 E-601 蒸发器蒸发值,年蒸发能力可达 2371.5mm 和 2451.7mm ,成为研究区域的最高值。

高山区水面蒸发能力明显减小,祁连山冷龙岭为水面蒸发量最小区域,基本与祁连山降水径流高值区重合,年蒸发能力一般小于 900mm ,最小值在 800mm 以下。此外,迎风坡和背风坡也有差别,一般迎风坡较大。

流域水面蒸发能力由南向北递增,北部沙漠区蒸发能力最大,南部浅山区一般在 $800\sim 1200\text{mm}$,走廊区增至 $2000\sim 3000\text{mm}$ 。在同一高程条件下,沙漠区明显比其他地区的蒸发能力大得多。

根据分析,水面蒸发能力随高程的增加而减小,这一点正好与降水的分布规律相反。由于气温随高程的增加而降低,风速和日照随高度的增加而增加,综合作用的结果为蒸发能力随高程的增加反而减小(图 1.5)。同时,蒸发能力随高程的变化率,从干旱区到半干旱区、半湿润区逐渐减少。从额济纳旗到中游绿洲,高程每增加 100m ,蒸发能力减小约 225.7mm ;从中游绿洲到山区,高程每增加 100m ,蒸发能力减小 $63.0\sim 91.4\text{mm}$ 。由此可以看出,山区与平原及山区与河谷之间,水面蒸发量相差很大。

水面蒸发的年内分配:由长系列测站多年平均月蒸发能力的分布可以看出(图 1.6),最大连续四个月蒸发能力均出现在 5~8 月,相当一致;而且流域的蒸发能力,无论是绝对数值还是相对集中程度均较大。黑河流域各站,蒸发能力最大四个月的集中程度由西北向东南递减,正义峡为 58% ,而莺落峡为 57% ;年内最大蒸发能力出现在 6、7 月。

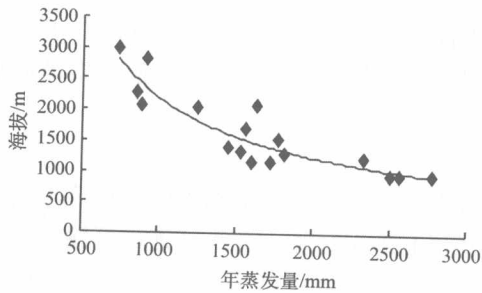


图 1.5 黑河流域蒸发量与海拔的关系

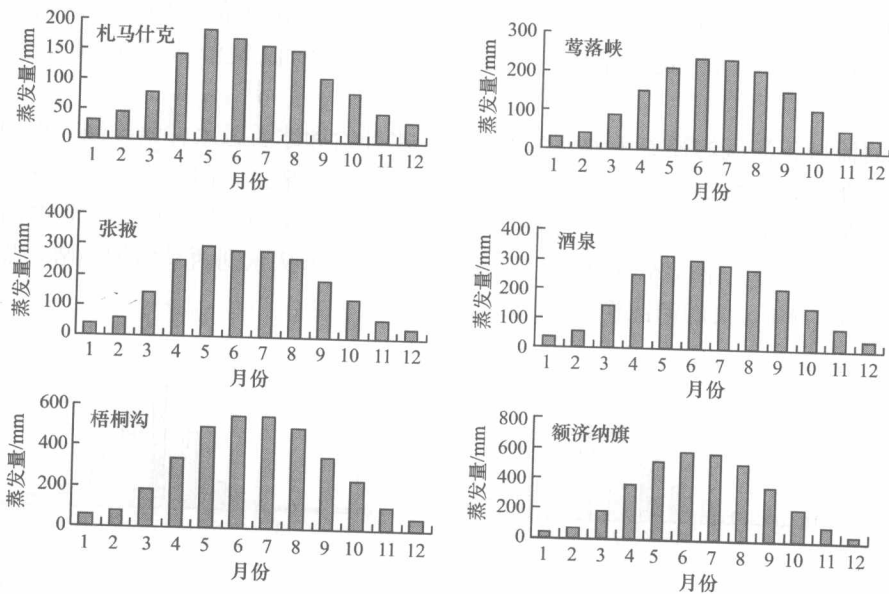


图 1.6 黑河水面蒸发量年内分配

水面蒸发的年际变化：影响水面蒸发的主要因素是气温、风速、湿度和地理条件。地理条件年际之间没有什么变化，气候条件的年际变化也比较平缓，因此水面蒸发的年际变化相对也较小。据流域内长系列蒸发资料分析可知，最大年水面蒸发量与多年平均蒸发量的比值一般在 1.2~1.7 倍，最小比值为莺落峡站 1990 年的 1.18；最小年蒸发量与多年平均蒸发量的比值一般为 0.60~0.80，最大比值为正义峡站 1993 年的 0.82。最大年蒸发量与最小年蒸发量的比值一般为 1.50~2.50，最小比值为莺落峡的 1.47，其次为正义峡的 1.49。

黑河流域蒸发量的多年变化比较复杂，温度是影响蒸发的绝对因素。在全球变暖的大背景下，蒸发应随气温升高而升高，但实际观测表明，在 1990 年温度升高的过程中，

蒸发量在下降。实际上,器测蒸发量反映的是水面对大气蒸发能力的补充作用,并不是一般理解的大气实际蒸发能力。所以,大气温度增加时,土壤及其他能够释放水汽的植被等也相应增加了蒸发量,因此最终相互补偿的平衡结果导致水面蒸发量减少。

3. 径流量时空特点

黑河流域径流空间分布差异很大,南部祁连山区径流丰富,北部径流非常贫乏或者基本不产生径流,地表径流和地下径流主要靠祁连山区输入。发源于深山区的河流降水丰富、径流深大,浅山区发源的河流径流深小。5mm 径流深等值线,基本与 1500m 等高线一致,是季节性产流地带;50mm 径流深等值线基本处于各河流出山口附近。由于河流上游位于祁连山背风坡,降水稀少,植被覆盖差,不利于径流形成。所以,50mm 等值线向上推移到河流发源区的深山沟脑;100mm 等值线在祁连山中东部位于 2000m 等高线附近;西部讨赖河推进到冰雪覆盖区前沿;200mm 等值线处于祁连山中东部冷龙岭深山区,接近冰雪覆盖前沿。大渚马河等个别河流发源区径流深可达 500mm 以上。

黑河流域各河流的径流年内分配主要受降水补给和冰雪融水补给控制,但河流大小和下垫面条件也是影响径流年内分配的重要因素。一般来说,河流来水集中在汛期五个月。各大河流汛期径流占年径流量的 52.3%~80.5%,小河流所占比重更高,可达 90%以上。与降水、径流分布相似,汛期径流所占比重从东到西呈增加趋势,黑河干流莺落峡为 75.6%,讨赖河冰沟为 61.1% (图 1.7)。

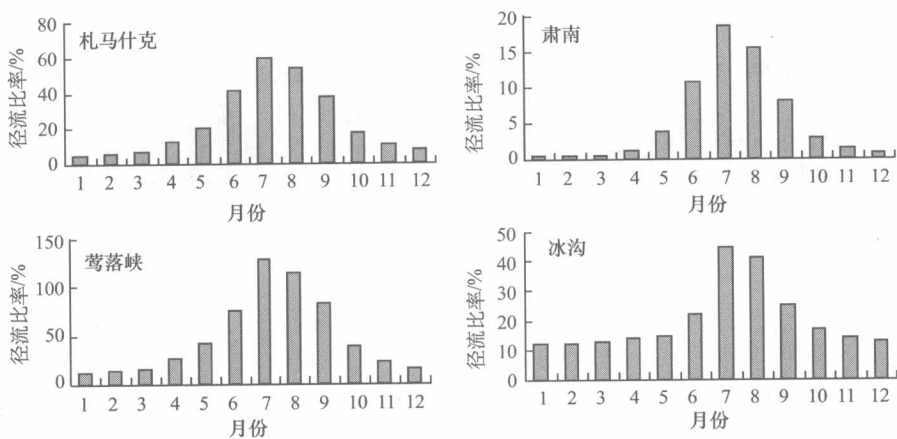


图 1.7 黑河各大河流径流年内分配

河西地区各大河流径流线性变化趋势比降水过程要显著,但远比降水、温度变化复杂得多。由于平原区水文过程完全受人类活动控制,不能反映自然过程,因此它不是气候变化的结果;而出山径流过程大多没有水库控制,即使有水库控制,也是年调节过程,在年径流变化上仍然是准天然过程。

从各水文站天然径流变化过程图可以看出,祁连山中部黑河干流(莺落峡)径流过

程有轻微上升趋势，而讨赖河（梨园堡）为下降趋势且趋势比较明显，下降率达 0.022 亿 m³/a（图 1.8）。

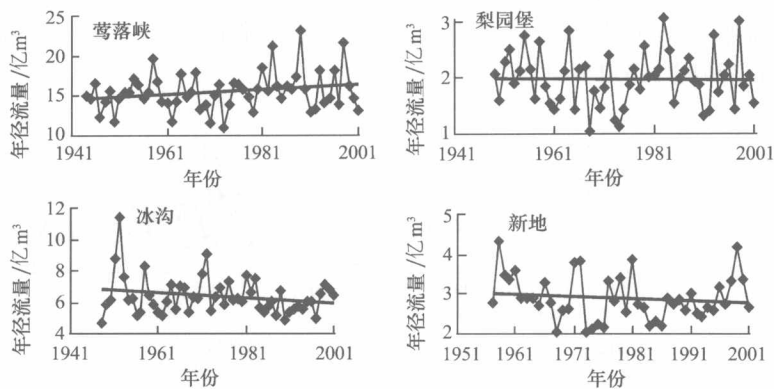


图 1.8 黑河各大河流控制站年径流量变化

从多年平均径流量变化看：黑河流域各河流出山径流量变化过程比较复杂，除黑河干流为上升趋势外，其他各河流变化过程有升有降，但升降趋势并不显著，变化率均小于 0.022 亿 m³/a（表 1.2）。黑河干流 20 世纪 80 年代为丰水期，50 年代和 90 年代为平水期，60 年代和 70 年代偏枯。90 年代与 50 年代相比，莺落峡站径流量减少 0.251 亿 m³/a；90 年代与 1960~1990 年均值相比，其径流量增加 0.154 亿 m³/a。90 年代年平均降水量与 50 年代均值相比，冰沟站径流量减少 1.077 亿 m³/a，与 1960~1990 年年均值相比，其径流量减少 0.358 亿 m³/a。

表 1.2 20 世纪黑河各河流径流量年代际变化

站名	经纬度		海拔/m	年代际平均径流量/(亿 m ³ /a)					90 年代径流量增加值	
	N	E		50 年代	60 年代	70 年代	80 年代	90 年代	/(亿 m ³ /a)	
									与 50 年代比	与 1960~1990 年比
札马什克	38°14′	99°59′	2 635	8.12	6.94	6.66	7.66	6.91	−1.216	−0.178
李桥水库	38°20′	101°11′	2 513	0.63	0.67	0.59	0.55	0.47	−0.157	−0.136
童子坝河	38°14′	100°56′	2 810	0.83	0.74	0.70	0.85	0.57	−0.257	−0.188
双树寺	38°19′	100°50′	2 570	1.15	1.06	1.25	1.30	1.10	−0.051	−0.102
酥油口河	38°31′	100°21′	2 760	0.45	0.41	0.45	0.49	0.45	0.000	0.002
大渚马河	38°26′	100°29′	2 440	0.95	0.84	0.88	0.81	0.79	−0.155	−0.051
莺落峡	34°48′	100°11′	1 674	15.97	14.43	14.83	17.43	15.72	−0.251	0.154
梨园河	38°58′	100°00′	1 626	2.29	2.01	2.04	2.34	2.18	−0.107	0.049
冰沟	39°36′	98°00′	2 015	7.05	6.13	6.72	6.15	5.97	−1.077	−0.358
新地	39°34′	98°25′	1 880	3.00	2.33	2.33	2.20	2.50	−0.503	0.210
平均				4.04	3.56	3.65	3.98	3.67	−0.378	−0.060

与大河流不同，发源于祁连山浅山区的小河流容易受气候变化影响，在气候变化的