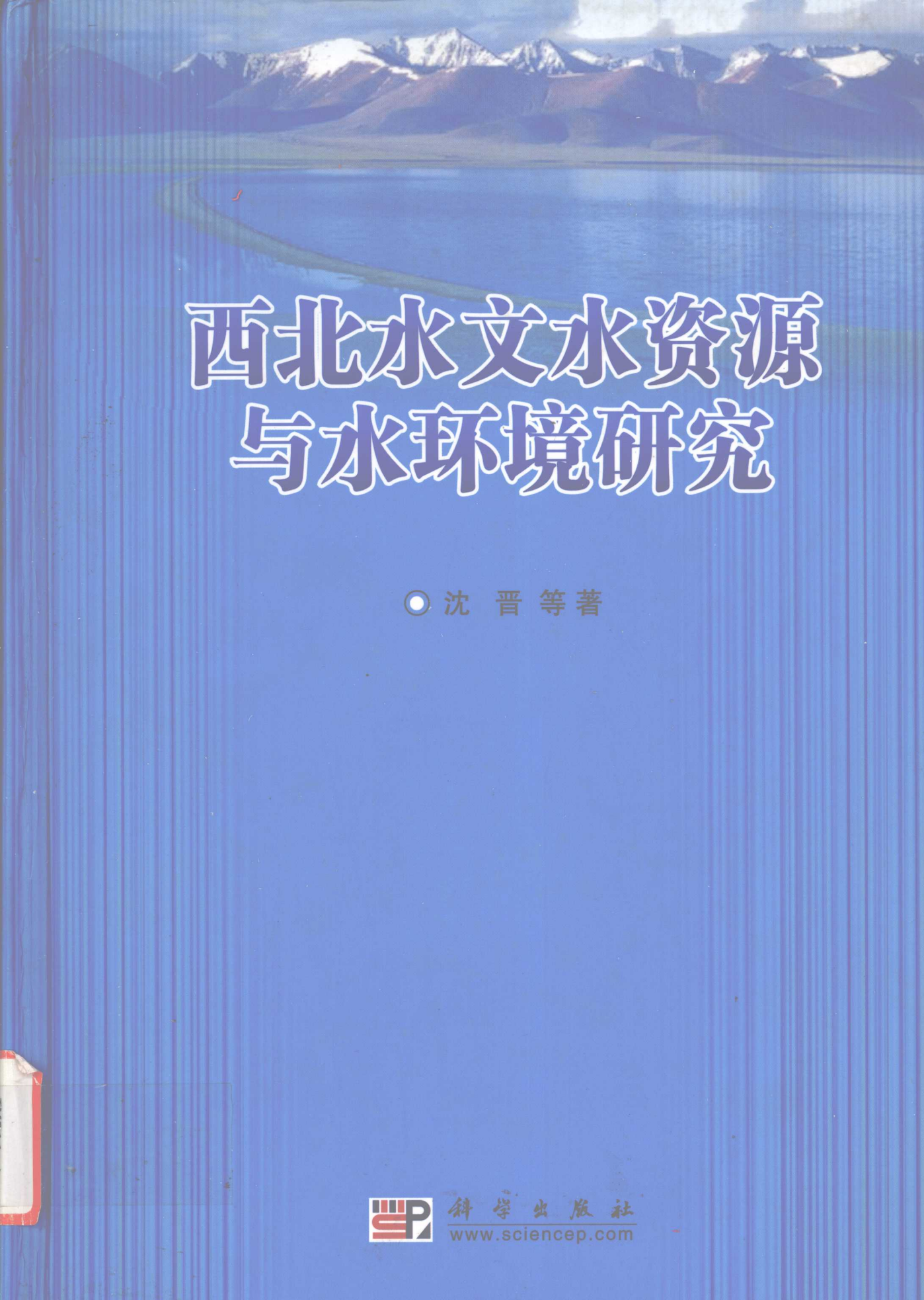




西北水文水资源 与水环境研究

◎ 沈 晋 等著



科学出版社
www.sciencep.com

西北水文水资源与水环境研究

沈 晋 等著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书汇集了沈晋教授以及他所指导的博士生们自1987年以来发表的35篇论文,综合反映了西安理工大学水文学及水资源学科在西北水文、水资源、水环境和农业水资源利用领域的学术思想和研究成果。

本书涉及西北,特别是黄土地区的降雨径流形成机理、土壤侵蚀、流域产汇流与侵蚀输沙、水电站优化调度、水资源优化配置、河流泥沙对污染物的吸附及解吸、非点源污染模拟与负荷估算、土壤溶质运移以及旱区农田灌溉节水与防盐规划等内容。

本书可供水文、水资源、水环境领域及自然地理、气象、环境、农林、生态等专业的科研工作者、管理人员和大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

西北水文水资源与水环境研究/沈晋等著. —北京:科学出版社,2005
ISBN 7-03-015732-X

I. 西… II. 沈… III. ①区域水文学-研究-西北地区②水资源-研究-西北地区③水环境-研究-西北地区 IV. ①P344.24②TV211.1③X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 065124 号

责任编辑:朱海燕 赵 峰 李久进/责任校对:张 琪

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年11月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005年11月第一次印刷 印张:18 3/4 插页:1

印数:1~1 300 字数:433 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

作者简介

沈晋，男，1916年11月生于江苏高邮，1939年毕业于国立武汉大学。新中国成立前曾先后任职于中央水工试验所与四川省水利局合设的灌县实验室、黄河水利委员会水文总站、以及因抗战内迁西北的山西大学及北洋大学西京分院；新中国成立后历任西北工学院、西安动力学院、西安交通大学、陕西工业大学、西北农学院、陕西机械学院及西安理工大学水利系教授、系主任、副院长。曾任全国水力发电学会理事、陕西省水利学会和水力发电工程学会理事长；中国民主同盟陕西省主任委员，中央常委；陕西省政协副主席；全国政协委员；陕西省人大常委会副主任。

沈晋先生是知名的教育家，对教学非常熟悉，各门课程的安排、相互衔接，都仔细协调，为稳定西安理工大学水利系教学秩序和改善教学效果奠定了基础。沈先生认真贯彻党的教育方针，率领水利系师生参与了黄河三门峡、刘家峡等大型水利工程的实验、设计与施工，在实践中锻炼和造就了一支优秀的教师队伍，为国家培养了大批水利建设人才。在“文革”中，水利系历经磨难而不溃散，不仅保持了相对稳定，而且还逐步发展壮大，其根本原因就在于有这样一支既有理论水平又有实践经验的教师队伍。

沈晋先生讲课思路清晰，概念准确，注重启发学生思维，不断更新教学内容，受到学生的普遍赞扬。沈晋先生严格要求青年教师，每次听课总要恰如其分地提出意见或建议，使他们从中受益。他多次被学校 and 原机械工业部评为优秀教师，还被评为陕西省劳动模范和全国优秀教师。他多次参与我国高校统编教材《工程水文学》的编审工作，使之符合我国实际且具有特色。他还参与了《中国大百科全书》水文卷的编写。1981年经国务院学位委员会批准，水文学及水资源学科获博士学位授予权，沈晋教授为首批博士生导师。作为水文水资源学科带头人，沈先生特别重视学术梯队建设，发扬学术民主，使学科组团结一致奋发前进；重视国内外学术交流，建立了与美国南达科他州立大学等院校的联系。他培养了15名硕士、20名博士，多数人成为高校或研究院所的技术骨干；同时也为西安理工大学的水文学及水资源学科的发展奠定了基础，该学科于2001年被评为全国重点学科，这是沈晋先生作为教育家和水文学家的最大收获。

沈晋先生是知名水文学者，曾先后主持完成国家自然科学基金、国家科技攻关等多项课题，研究内容涉及水文、水资源与水环境诸多领域。结合科学研究，他主持撰写了《动力水文实验研究》、《环境水文学》等5部著作，获水利部、陕西省教育委员会科技进步奖多项。

前 言

本书汇集了沈晋教授和他所指导的博士生们自 1987 年以来发表的 35 篇论文, 综合反映了西安理工大学水文学及水资源学科在西北水文、水资源、水环境和农业水资源利用等领域的学术思想和研究成果。

本书所汇编的论文绝大部分已公开发表, 但发表时仅两篇有关评述西北水文特征与实验研究进展的文章由沈晋教授作为第一作者署名, 其余大部分论文是根据沈晋教授的学术思想, 由他的博士生们具体完成的, 因而发表时也是以博士生作为第一作者或单独署名。一方面, 1987 年沈晋先生已年逾古稀, 精力不允许他再从事具体分析计算; 另一方面, 这也是沈晋先生一贯作风, 体现了他淡泊名利和对后辈的支持和勉励。而博士生们一致认为这些成果的取得主要得益于沈先生在研究思路上的引导和启迪。1996 年在祝贺沈晋先生 80 华诞及执教 55 周年之际, 历届学生们倡议编纂沈晋文集, 有关单位和个人捐助了一笔出版经费。经遴选, 汇编成本书, 原拟定名为《沈晋文集》; 但沈先生认为这一文集是整个西安理工大学水文学及水资源学科的研究成果, 不应以他个人名义出版。尊重先生的意见, 本书定名为《西北水文水资源与水环境研究》。

沈晋先生是我国首批水文水资源学领域的博士生导师, 本书的出版旨在弘扬沈先生的学术思想, 扩大我国西北干旱半干旱区水文、水资源与水环境研究的社会影响, 丰富干旱区水文水资源与水环境理论。本书内容涉及西北, 特别是黄土地区的水文过程成因与机理、水电站优化调度、水资源优化配置、水环境保护和农业水资源利用等各个方面的研究成果。诸如黄土地区产汇流与侵蚀输沙机理、系统工程理论在水电站水库优化调度和水资源优化配置中的应用、河流泥沙对重金属污染物的吸附与解吸随机模拟、流域非点源污染负荷估算与模拟, 以及土壤水文动态及灌区节水防盐技术等。对于从事干旱区水文水资源与水环境研究的教师们无疑具有重要意义, 这不仅体现在沈先生眼界的开阔及研究问题的广泛, 也反映了他指导研究生的方式方法。对于这一领域的研究生们更是很好的学习教材。

同时, 本书研究范围涉及整个西北, 对于干旱半干旱区具有较强的代表性。故可供从事干旱半干旱区水文、水资源与水环境研究领域的教学、科研、规划设计、实验研究和管理的工人们应用和借鉴。对从事干旱半干旱区自然地理、土壤侵蚀、生态环境建设、节水节能、水力发电、农林等研究的工作者和大专院校师生的教学也有重要参考价值。

本书内容由沈冰、李占斌、李怀恩初选, 沈冰负责汇集整理, 沈晋先生定稿。由于选编者水平及时间限制, 文集中谬误及不妥之处在所难免, 盼各位读者发现不当之处, 函告西安理工大学水资源研究所本书编辑小组, 以便及时更正。

沈 冰 李占斌 李怀恩

2004 年 12 月

目 录

前言

第一部分 西北水文研究述评

西北干旱半干旱水文特征与实验研究进展	3
西北干旱半干旱地区水文模型研究述评	17

第二部分 水文过程机理研究

Experimental and Numerical Study of Overland Flow Induced by Rainfall on the Loess Slope	25
坡面降雨漫流过程中有效糙率的实验研究	31
短历时降雨强度对黄土坡地径流形成影响的实验研究	40
水文系统的相关识别法及其应用	47
考虑土壤特性空间变异的流域产流模型	56
陕北小流域黄土下渗空间变化实验研究	65
黄土地区小流域降雨空间变化特征分析	72
黄土塬坡降雨击溅产沙过程和数学模拟	78
A Deterministic Gamma-type Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph Based on Path Types	85
Determination of Basin Lag Time in Rainfall-runoff Investigations	97
逆高斯分布瞬时输沙单位线模型	107
城市地面产流的试验研究	115
城市设计暴雨雨型研究	122
区域水资源适度承载能力计算模型研究	129

第三部分 水资源系统工程

跨流域水电站群补偿调节的递阶多目标控制	137
梯级水电群补偿调节的大系统分解协调算法	147
大系统分解协调算法在黄河干流水库联合调度中的应用	156
水库联合调度的多目标多模型及分解协调算法	162
黄河干流水库联合调度模拟优化模型及人机对话算法	172
黄河干流上游梯级水量实时调度自优化模拟模型研究	179
黄河上游水库群防凌优化调度研究	186

第四部分 水环境研究

河流泥沙随机吸附理论及试验研究	197
-----------------------	-----

渭河泥沙对重金属污染物吸附的实验研究	204
渭河沉积物中重金属释放的动态实验研究	213
暴雨径流污染负荷计算的响应函数模型	220
流域非点源污染模型的建立与应用实例	226
降雨条件下黄土坡面溶质随地表径流迁移实验研究	234
黄土坡面溶质随径流迁移相应函数模型	243
非均匀悬移质恢复饱和系数的探讨	248

第五部分 土壤水文及农业节水

黄土区波涌畦灌条件下地表水流运动实验与数值模拟	257
灌区节水防盐设计理论及实践研究	265
非均匀土壤中溶质运移的两区模型及其解析解	271
稳态条件下土壤溶质运移的两区模型及其解析解	282

第三部分 水土保持工程

黄土区波涌畦灌条件下地表水流运动实验与数值模拟	257
灌区节水防盐设计理论及实践研究	265
非均匀土壤中溶质运移的两区模型及其解析解	271
稳态条件下土壤溶质运移的两区模型及其解析解	282

第四部分 水土保持工程

黄土区波涌畦灌条件下地表水流运动实验与数值模拟	257
-------------------------------	-----

第一部分 西北水文研究述评

西北干旱半干旱水文特征与实验研究进展*

摘要 本文简要介绍西北地区自然地理背景及干旱半干旱地区的范围,重点阐述暴雨、洪水、水资源及泥沙的特点,并综述近些年来干旱半干旱区水文工作中的水文测验与实验、暴雨分析、产流计算、汇流计算、冰雪水文、地下水、流域泥沙、水资源评价八个方面的研究进展,在此基础上对今后开展干旱半干旱区水文实验研究工作提出几点建设性意见。

关键词 西北干旱半干旱区 水文特征 实验研究 进展

1 前言

1.1 西北地区自然地理背景

我国西北地区位于世界最大的大陆——欧亚大陆的腹地。它远离海洋,地势高耸,降水量小,蒸发量大,空气干燥,气候寒冷,是我国有名的干旱半干旱地区。

本区位于世界最高的高原——青藏高原北侧,地势一般都在海拔 1000 m 以上。地形起伏很大,分布有许多著名的高山、高原、盆地和沙漠。有秦岭、祁连山、阿尼玛卿山、阿尔泰山、昆仑山、喀喇昆仑山以及天山等一系列高大山脉;含有黄土高原大部分和青藏高原一部分;有柴达木、塔里木、准噶尔和吐鲁番盆地以及乌兰布和、腾格里、古尔班通古特和塔克拉玛干等大沙漠。

本区的水系分外流和内流两类。主要的外流水系有黄河流域和额尔齐斯流域,分别流入太平洋和北冰洋。主要的内流河有塔里木河、伊犁河、布哈河和河西走廊诸河等。由于地处大陆腹地,高山阻拦,外来水汽受到很大阻碍。本区东部的水汽来源,以东、南两个方向为主,而新疆则以西来的水汽为主。

本区气候寒冷,除高山常年积雪外,年平均气温大多在 4~8℃。其中,格尔木五道渠为-5.8℃,系全国年平均气温的最低值。1 月份平均气温都在 4~8℃ 以下;7 月份平均气温,大部分地区都在 20~25℃ 以上,除我国东南沿海外,本区还是较高的。其中新疆吐鲁番为 32.8℃,极端最高气温为 49.6℃,均居全国之冠。本区气温的年较差也很大,一般可达 30℃ 左右。日照时数高达 3000 h 以上,也属全国最高值区;其中青海冷湖高达 3554 h,居全国首位。

本区的年降水量和年径流量,均为全国最少的地区。冬季受西伯利亚干冷气团控制,雨雪稀少。春暖以后,降雨增多,大部分集中在夏秋两季。年降水量分布,东部由东南向西北递减,黄河上游包括洮河和湟水流域为高值区,年降水量可达 500~600 mm。从东到西,横贯腾格里沙漠和塔克拉玛干沙漠,有一条东西向特别干旱带,年降水量不足 100 mm,新疆吐鲁番盆地的托克逊只有 6.3 mm,为实测最小。年径流深的分布与年降水分布类似,黄河上游可达 100~200 mm,伊犁河流域高达 200~300 mm,小范围内甚至

* 原载于:西北干旱半干旱地区水文学术讨论会论文集,1~17 页,1988;发表时署名:沈晋、王维第。

更高。但绝大部分地区年径流深不足 50 mm。而在上述的特别干旱带内,则基本上是不产流区。

1.2 干旱半干旱区的划分范围

关于干旱半干旱区的定义目前尚无统一规定,划分干旱、半干旱区的指标,主要有年降水量和干旱指数,亦称干燥度,为年蒸发能力和年降水量的比值。不同文献对于干旱、半干旱区域的定义见表 1。

表 1 干旱半干旱区域划分标准

分区	年降水量/mm	干旱指数(E_0/q)	参考文献
半干旱	200~400	3~7 1.5~2 1.5~3.49	中国水资源评价(水利部水资源办公室) 中国自然地理(中国科学院地理研究所) 中华人民共和国地图集
干旱	< 200	> 7 > 2 > 3.5	中国水资源评价(水利部水资源办公室) 中国自然地理(中国科学院地理研究所) 中华人民共和国地图集

从表 1 可以看出,对于干旱半干旱区域的规定,还存在较大差异。其所以如此,主要由于对干旱程度的理解不同以及对其考虑的出发点不同所致。

本文重点不在于严格的自然地理区划,而是与干旱半干旱区域有关的水文现象和规律。因此对西北地区干旱、半干旱的地理界限,可以不做过细的推敲。如以水利部水资源办公室的规定为准,则其范围大致为:陕西的陕北地区,甘肃中部、北部和河西走廊地区,青海除黄河源地以外的绝大部分地区以及新疆除额尔齐斯河和中亚内陆河流域外的绝大部分地区。西北干旱半干旱地区的面积占西北地区总面积的 80%以上。从水文分析的角度出发,也可把范围稍为扩大一点。如果把年降水量的上限扩大到 500 mm,则除长江流域、额尔齐斯河流域和伊犁河流域的部分地区以外,其余广大地区基本上均可包括在西北干旱半干旱地区以内。

2 主要水文特性

2.1 暴雨

尽管西北地区干旱少雨,但暴雨仍然是河川径流补给的主要来源。由于日照强烈,地面热力条件好,在一定水汽条件下,遇到有利的地形条件时,特别是在山坡迎风面的抬升作用下,往往发生短历时强烈暴雨,其强度往往不亚于东南沿海。另一方面,由于远离水汽源地,水汽供应不够充分,雨强随历时长减;12 h 以上较长历时的降雨,其强度就远远小于沿海地区了,雨强大、历时短、机遇少,构成本地区暴雨的主要特点。在天气成因上,暴雨多为由中小尺度天气系统产生的以地形抬升和辐合对流为诱因的局地雷暴雨;当这种中小天气系统叠加到一起时,雨强便会更大,历时也往往较长。

与全国比较,1 h 以下的暴雨记录,西北地区占有优势;历时加长,优势渐减,但直到 24 h,仍然可以发生像内蒙古木多才当“77.8”暴雨特大值 1400 mm,除屈居台湾新

察之后,在大陆上还是首屈一指,而且还主要降落在 10 h 以内。但在 24 h 以上的较长历时降雨量,就大大落后于沿海地区了。

短历时降雨量的地区分布和年降水量分布类似,仍以黄河上游、天山山脉诸河、伊犁河和额尔齐斯河为高值区,年最大 24 h 降水量均值最高可达 40~60 mm,而沙漠干旱带为低值区,一般均在 10~15 mm 以下。其相应的变差系数 C_V ,在全国也是最大的。上述高值区年最大 24 h 的 C_V 值为 0.5~0.6,而其余地区的 C_V 值大部分为 0.6~0.9,塔克拉玛干沙漠达到或超过 1.0。这是特大暴雨出现频次稀少的统计特征。

2.2 洪水

西北干旱半干旱地区的洪水,按成因可分为暴雨型、融雪融冰型和雨雪混合型三种主要类型。在地区分布上暴雨洪水多产生在本区的东部和一些沙漠周围地带。融雪融冰洪水产生在源出高山积雪和冰川地带;如果在上述地带降雨量较多时,也可形成雨雪混合洪水。这些主要产生在本区的西部,源出于天山、阿尔泰山、昆仑山和祁连山等山脉的河流。以上三类洪水有一个共同的特点是:在时间上均发生在汛期 6~9 月份,因暴雨和融雪(冰)季节是重合的。

(1) 暴雨洪水。本区由于气候干旱,地表植被一般较差,一旦遇到暴雨,汇流速度很快;特别是在水土流失地区,水沙俱下,来势迅猛,加以地下补给很少,洪水陡涨陡落,许多小河流甚至全年大部分时间没有径流。在特别干旱地区,有时甚至全年或连续几年不发生洪水。洪水陡涨陡落的程度,可以纳希瞬时单位线滞时 m_1 表征。 m_1 愈小,反映洪峰愈尖瘦。根据暴雨径流查算图表统计,在黄土地区,当流域面积 $F < 300 \text{ km}^2$ 时, $m_1 < 1.0$; $F = 300 \sim 1000 \text{ km}^2$ 时, $m_1 = 1 \sim 2$ 。湿润半湿润地区以及森林与草原地区的 m_1 值,显然均较上述数值为大。黄土地区 1000 km^2 以下河流洪峰的 C_V 值,有的竟高达 1.5 以上,也远远超过其他地区。

(2) 融雪融冰洪水。它是以冰雪融水为主要补给的洪水,其特点是洪水过程比较平稳,洪峰模数小,在整个过程中,还出现以日为周期的锯齿形小峰,峰现时刻比较固定。此外,还偶尔出现由于冰湖冰坝的溃决而造成的溃坝型洪水。例如,新疆塔里木河水系的木扎提河,源出天山南坡冰川带,阿合布隆站以上流域面积为 2859 km^2 ,其中冰川面积占 11.1%。在 25 年实测资料中,21 年的最大流量值属融雪融冰洪水,最大洪峰只有 $430 \text{ m}^3/\text{s}$ 。最大最小洪峰流量之比,仅为 1.81,可见其年际变化的平稳性。

(3) 雨雪混合洪水。这种洪水与融雪(冰)型洪水伴随产生,除具有融雪(冰)型洪水的特征外,还往往表现为在平缓的融雪(冰)洪水过程中,降雨洪水叠加其上,形成主峰,因而其主峰部分比较瘦削。例如,新疆的伊犁克什河,源出天山西部冰川带,由于西北水汽输入比较充沛,常形成雨雪混合洪水。在托海水文站 26 年最大流量记录中,融雪(冰)洪水出现了 15 次。混合洪水出现了 11 次,实测最大洪峰 $830 \text{ m}^3/\text{s}$,最大最小洪峰流量之比为 2.65,较前述融雪(冰)洪水为大,但仍比较平稳,其洪峰的 C_V 值仅为 0.28,大大小于暴雨洪水的 C_V 值。

2.3 水资源

西北地区水资源相对贫乏,在地区上分布极不均匀,问题比较突出。特别是和土地

联系起来,地多水少,问题尤其严重。

西北地区总面积约 302 万 km^2 , 年降水量绝大部分在 500 mm 以下, 其中 80% 以上的面积, 年降水量在 300 mm 以下。五省区的河川年径流总量为 2155.6 亿 m^3 , 年产流模数为 7.13 万 m^3/km^2 , 而全国则分别为 26 380 亿 m^3 和 27.48 万 m^3/km^2 。西北地区面积约占全国的 31.5%, 而径流总量仅占 8.2%, 缺水情况可见一斑。另一方面, 西北地区地广人稀, 年人均径流量约 4800 m^3 , 而全国则为 2600 m^3 , 则暂时还有一定优势, 但分布极不均衡, 许多干旱地区, 因缺水而得不到开发, 长期处于荒漠状态。

以上系就整个西北地区而言, 如果将属于半湿润地区的长江流域、额尔齐斯河流域和伊犁河流域(面积占西北总面积的 16.2%, 但河川径流却占了 53.3%)扣除, 仅就干旱半干旱地区而言, 则问题就更突出了。年径流模数骤降至约 5 万 m^3/km^2 , 仅为全国平均值的 18%。

西北五省区和西北干旱半干旱地区的水资源状况分别见表 2、表 3。

表 2 西北五省区水资源估算表

省区	河川径流量/亿 m^3	水资源总量/亿 m^3	产流模数/(万 m^3/km^2)
陕西	422	443	21.7
甘肃	273	280	6.73
宁夏	9.6	12.2	2.38
青海	621	630	8.69
新疆	830	866	5.26
合计	2155.6	2231.2	7.13(平均)

表 3 西北干旱半干旱地区水资源估算表

流域地区	面积/万 km^2	河川径流量/亿 m^3	水资源总量/亿 m^3	产水模数/(万 m^3/km^2)
黄河流域	40.38	469.1	469.1	11.62
河西内陆诸河	51.78	66.3	80.9	1.56
准噶尔内陆诸河	32.23	126.9	135.2	4.19
中亚内陆诸河	7.95	195.6	217.4	27.35
塔里木内陆诸河	112.16	381.5	387.0	3.45
青海内陆诸河	30.16	67.9	76.7	2.04
合 计	274.66	1307.3	1366.3	4.97(平均)

西北干旱半干旱地区的河川径流资源, 具有下列一些特点:

(1) 降雨径流补给和冰雪融水补给均占有重要位置。大体上说, 降雨径流补给的比重, 从东部向西部递减; 冰雪融水补给, 则从西部向东部递减。黄河流域, 主部由降雨

径流补给,虽然源地部分也有冰雪融水补给,但由于面积比重较小,所占比例不大。源出高山冰川或雪线以上,包括祁连山、阿尔泰山、天山、昆仑山、喀喇昆仑山以及帕米尔河流,大多为降雨和冰雪融水混合补给。我国的冰川面积约为 $56\,500\text{ km}^2$,总储水量约 5 万亿 m^3 。西北地区冰川面积约占全国的一半,储量相当丰富。冰雪补给径流的一个重要特点是:干旱少雨年份,气温较高,融水补给量也越大;反之,多雨年份,气温往往较低,融水补给量较少,因此,有很好的补偿调节作用。冰川积雪面积所占流域面积的比例越大,其年径流的 C_v 值越小,一般多在 0.3 以下。

(2) 内陆河流众多。西北地区的内陆河分布面积很广,包括河西、准噶尔、塔里木、青海各内陆河区,总面积约 253 万 km^2 ,约占全国内陆河流域面积的 70%,占西北地区总面积 77%。其中新疆的塔里木河全长 2179 km ,流域面积 19.8 万 km^2 ,是我国最大的内陆河,在世界内陆河中也占有重要地位。在内陆河沿岸,出现了数量众多的绿洲,开垦了大片农田,成为西北地区的重要农牧基地。内陆河流域的一个重要特点是:冰川积雪面积比沿程递减,加以水量的沿程吸收,径流模数沿程递减,以致最后径流大部或全部消失。

(3) 众多的湖泊。西北地区的湖泊,在全国占有重要地位,主要分布在青海和新疆境内。全国湖水面积在 500 km^2 以上的 17 个主要湖泊中,西北地区占了 6 个,湖水面积约占全国总湖水面积的 $1/3$ 。其中青海湖水面积 4583 km^2 ,蓄水量 854.5 亿 m^3 ,是我国有名的咸水湖,也是我国蓄水量最大的湖泊,为我国第二大湖鄱阳湖蓄水量的 2.43 倍。位于黄河源地附近的扎陵湖和鄂陵湖,是一对有名的高原姐妹湖,其蓄水量分别为 46.7 亿 m^3 和 160 亿 m^3 ,水质优良,为淡水湖。新疆的博斯腾湖,是我国最大的吞吐内陆湖,艾丁湖水面高程在海平面以下 154 m ,是我国高程最低的湖泊。西北的最大人工湖——龙羊峡水库,可蓄水 243 亿 m^3 ,目前居全国之冠。这些众多的湖泊,对调节当地气候,径流或补给河川径流,有着重要的作用。

2.4 泥沙

西北地区黄河是世界上罕见的多沙河流,黄河泥沙不仅对地表水资源的开发利用和水利工程效益影响大,而且河道淤积对下游防洪威胁严重。因此,黄河泥沙是重要的水文特征之一。

黄河流域产沙分布与自然地理分区关系密切。在石山林区、高原草原、高山积雪及沼泽沙漠地带,输沙模数小于 $1000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,黄河上游沼泽积雪地带,不少站实测输沙模数只有 $10\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。而黄土高原丘陵沟壑区则水土流失严重,是黄河流域的主要产沙区,输沙模数在 $0.2\text{ 万} \sim 2.3\text{ 万 t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,最高的神木—温家川区间达 $4.01\text{ 万 t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 之多。

湟水河谷、洮河下游、内蒙古浑河一带、陕西盆地大部、陕北高原延河以南等黄土高原丘陵沟壑区,面积 7.6 万 km^2 ,占黄河流域面积 10.1%;输沙量 5.22 亿 t ,占流域总产沙量 26.8%,是强度侵蚀区。甘肃镇原附近的黑河、洪河一带,无定河、北洛河、延河发源地白于山东部,窟野河神木以上,无定河口至龙门区间黄河干流两侧黄土高原丘陵沟壑区,面积只有 3.2 万 km^2 ,占全流域的 4.3%,而输沙量却达 4.28 亿 t ,占全流域 22.0%,是极强度侵蚀区。河口镇—无定河口区间干流两岸各条入黄支流的中下游,

面积 3.8 万 km^2 , 占流域面积 5.1%, 输沙量为 6.41 亿 t, 占流域产沙量的 32.9%, 是特剧侵蚀区。

黄土高原丘陵沟壑区大部分河流的多年平均含沙量大于 200 kg/m^3 , 是黄河流域含沙量最高的地区, 其中以马连河上游洪德站为最大, 实测 22 年平均含沙量达 601 kg/m^3 , 为黄河流域之冠。

含沙量较大的洪水多出现在 6~9 月份, 影响年平均含沙量值的主要几场大洪水, 特别是黄土高原丘陵沟壑区的一些河流, 汛期含沙量一般都高达 800 kg/m^3 左右, 有些河流多年实测最大断面平均含沙量超过 1000 kg/m^3 , 突出的如窟野河温家川站 1958 年 7 月 10 日实测断面含沙量高达 1700 kg/m^3 , 形成高浓度的泥流。

3 西北水文实验和研究的进展

1975 年, 河南发生特大暴雨洪水灾害后, 工程防洪安全受到普遍重视。西北各省(区)在水电部领导下, 大规模地进行历史暴雨、历史洪水的调查、暴雨洪水的成因分析、研究可能大洪水的计算方法。并依据修订的“设计洪水计算规范”, 编制了“暴雨径流查算图表”, 这些工作有力地促进了水文实验研究。在此期间, 国家科委把“全国农业自然资源调查和农业区划研究”列为全国重点科研项目, “水资源的综合评价和合理利用的研究”是其中的重要组成部分, 西北各省(区)也在水电部的总部署下, 编写完成了各省(区)及黄河流域片水资源初步评价报告, 使有关方面对于西北地区水资源的数量、时空分布特点、开发利用现状、水质污染现状、未来用水量和供需关系的分析等方面有了初步了解, 促进了水资源评价和合理开发利用的研究工作。在经济、科技、教育体制改革的新形势下和改革、开放、搞活方针的贯彻过程中, 各水利水电建设部门、科研与教育单位的水利科技工作者、专家、教授都从国民经济建设需要及水文科学技术的发展要求出发, 开展了专门的实验和研究工作。下面仅就几个主要方面简要论述近些年来的研究情况和收获。

3.1 水文测验与径流、水保实验研究

西北五省(区)的水文站网, 经解放后的长期建设, 已具有一定规模, 在大河流和大部分中等河流上, 按直线规划原则, 均设有一批控制性水文站。在一部分小河流上, 按区域代表性原则, 也布设有一批小河站。降水、蒸发、地下水、水质等项目, 也按区域代表性原则, 进行了规划和设站, 其中相当一部分由水文站监测。各类测站自 1980 年以来发展情况及 2000 年计划情况见表 4。

除了常设的水文站网外, 还有一些工程专用站与灌区专用站。原有的子洲径流实验站未能恢复, 但原有的资料已为有关单位用于进行黄土干旱地区产流或汇流的研究(郑悟森, 1981; 沈冰等, 1984; 文康等, 1982)。黄河水利委员会(以下称黄委会)的绥德、西峰、天水三个水土保持实验站则连续进行观测和对比试验并有所发展。西峰水保站建立了大型人工降雨设备和侵蚀试验场地, 与陕西机械学院水利水电学院协作, 开展次暴雨侵蚀模型及水土流失通用方程的研究(黄委会西峰水保试验站等, 1986), 为了探讨黄土地区降雨下渗产流的机理, 李长兴(1986)进行了室内的人工降雨黄土原状土单点土柱的下

表4 西北地区水文测站增长情况表

测站	省 区	1980 年	1985 年	1987 年	2000 年 计划	年增长率/%		
						1980~1987 年	1985~1987 年	1980~2000 年
流量站	陕西	75	75	75	122	0	0	2.46
	甘肃	89	100	100	136	1.68	0	2.14
	宁夏	39	42	42	53	1.06	0	1.54
	青海	65	67	67	72	0.4	0	
	新疆	120	125	134	292	1.59	3.54	4.55
	合计	388	409	418	603	1.06	1.21	2.22
雨量站	陕西	621	627	627	856	0.1	0	1.62
	甘肃	85	89	89	122	0.7	0	1.82
	宁夏	165	184	199	243	2.71	4.00	1.95
	青海	163	198	199		2.89	0.25	
	新疆	362	372	401	561	1.47	3.82	
	合计	1396	1470	1515		1.18	1.52	
蒸发站	陕西	51	52	52	99	0.28	0	3.37
	甘肃	70	71	71	90	0.20	0	1.26
	宁夏	6	15	18	24	17.0	9.54	7.18
	青海	42	54	55		3.92	0.92	
	新疆	84	104	115		4.59	5.16	
	合计	253	296	311		2.99	2.50	

渗实验,研究雨强、前期土壤含水量对下渗的影响。在此基础上,沈冰(1988)又进行了黄土坡面的人工降雨下渗和产流产沙的实验研究。实验中,利用放射性同位素观测土壤含水量,并自制了配套的数据采集、自动处理的微机控制系统。对于冰雪水文的试验研究,中国科学院寒区旱区工程与环境研究所恢复了天山冰川实验站,还应用空间遥感技术监测山区积雪和融雪状况,获得用于融雪径流预报的信息。

在站网规划方面,1981年3月成立了干旱地区水文站网布设原则协作组,对水文分区、布站密度、站址选择、观测年限和人类活动影响等方面进行了探讨,对水文站网的规划、建设和管理起了指导作用。龚庆胜等(1988)用主成分聚类进行分区,体现了诸多水文因子的“集体效应”,增加了分区的客观性。在测验技术方面,对于动船法、比降面积法,利用水工建筑物测流、超声波测流及封冻期测流等做了大量的研究工作,取得了新的经验。对于测验设备的改进,各水文单位都注意吸收和引进先进技术,结合本区具体情况加以消化和应用。陕西水文总站根据测站水浅、流急、涨落猛、含沙量大的水流特性,应用长悬杆缆道测流,使测深精度提高,测速范围扩大,测流历时缩短,加强了抢测洪峰的能力。对于流量测验误差的分析,许多单位应用新的理论,对单次测流的I、II型误差分布及估算进行了研究(陈宏藩,1986;程功武,1985),黄河水利委员会水文局根据野外及室内试验资料,通过理论分析,对测流环节中可能存在的系统误差进行了探讨,取得了一定的定量结果。

随着电算技术的应用和普及,各省(区)均全部或部分地采用了电子计算机进行水位、

流量、泥沙资料的整编工作,出现了一些计算机程序的新成果,有些成果已达通用化,提高了资料整编的速度和精度。

3.2 暴雨的研究

“可能最大暴雨等值线”的编图工作,推动了暴雨研究的开展。并开始了大暴雨资料的建档工作。稀遇暴雨调查是对站网稀疏状况的补救措施,已逐步得到重视。例如,1977年7月5日陕西安塞县王庄24h雨量400mm,1981年6月29日新疆沙湾县安集公社夹河1h雨量240mm,1982年5月宁夏西吉县偏城公社黑泉口1h最大雨量208mm,都接近国内短历时实测暴雨记录;特别是1977年8月1日内蒙古陕西交界的木多才当24h雨量1400mm,已超过世界纪录。这些调查资料否定了以往认为干旱半干旱区暴雨量级小于湿润区的认识,使人们更为重视西北地区大暴雨的研究。

西北地区暴雨一般特性的研究,南京水文研究所以及铁道部勘测一公司桥隧处对此作了分析。认为,对固定地点而言,一般年份暴雨较小,而年际变化极大。大面积长历时暴雨量级比南方小,但小尺度天气系统常叠加于大尺度降雨之中,形成时空分布高度集中的高强度暴雨,其量级之大不亚于湿润区,而造成中小流域洪灾。水文与气象相结合,探讨大暴雨的天气成因及特性,黄河水利委员会规划设计院(现更名为黄河勘测规划设计有限公司)也开展了一些研究。关于设计暴雨,通过“暴雨径流查算图表”的编制实践,积累了丰富经验,全国编图组西北片作了系统的总结(许翼正,1987)。

3.3 产流计算的研究

在干旱半干旱地区,产流计算适当与否,对洪水预报或设计洪水计算成果影响很大。在编制“暴雨径流查算图表”的工作中,西北地区常用“初损后损法”或“下渗曲线扣损法”。“初损后损法”中,在求得单站初损 I_0 后,对 I_0 进行地区综合,综合时或建立 I_0 与流域面积的关系,或分区定值,或与 P_a 建立关系。后损 f 则按地区综合取值,或与雨强建立关系。王维第等(1986)根据西北省(区)短历时高强度暴雨的特点,将雨强分成产流历时 t_F 与产流期降雨 H_c 两个因素考虑,建立了产流期 t_c 内平均损失率(即 f)和产流历时 t_c 、产流期降雨量 H_c 三者的关系,从而选配数学模型,被广泛运用于甘肃、宁夏、青海和新疆的编图工作中。陕西陕北地区在采用“下渗曲线扣损法”中,不考虑下渗率的空间变化,只给一条经验的下渗曲线,并且用下渗率 f 与土壤含水量 S 的关系来表示。

近些年来,干旱半干旱地区流域产流计算模型为水文工作者所重视,对于用陕北岔巴沟流域资料研究产流分析计算,主要有三种不同的类型,都取得了较好的结果。

郑悟森(1981)和赵人俊(1984)用下渗曲线法分单元计算产流量,下渗曲线则根据已有资料,用优选办法,找出下渗率与土壤含水量关系的数学模式。

文康等(1982)考虑下渗能力在流域上的分配,按抛物线型根据资料定出数学模式,下渗曲线则用菲利普(Philip)公式略去稳渗项 $[f=(A/2)t^{-1/2}]$,由资料优选参数 A 并考虑土壤含水量影响下渗的变化来计算产流量。他们还通过数学推导,建立了产流量计算模型。

沈冰等(1984)把降雨下渗计算分别考虑为积水下渗与非积水下渗两种状态,在变动雨强条件下,非积水与积水下渗交替发生,一次降雨过程中,积水时间会有多个。他们分析了梅因-拉森(Moin-Larson)定雨强下渗计算与朱舒同变雨强下渗计算方法,并