



干旱区

HYDROLOGICAL MODEL OF  
INLAND RIVER BASIN IN  
ARID LAND

内陆河流域  
水文模型

陈曦 等 编著

中国环境科学出版社

国家自然科



633) 资助出版

# 干旱区内陆河流域水文模型

Hydrological Model of Inland River Basin in Arid Land

陈曦等编著

中国环境科学出版社·北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

干旱区内陆河流域水文模型/陈曦等编著. —北京: 中国环境科学出版社, 2012.5

ISBN 978-7-5111-0898-2

I. ①干… II. ①陈… III. ①水文—流域模型—研究 IV. ①P343.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 019959 号

责任编辑 陈金华  
责任校对 扣志红  
封面设计 玄石至上

---

出版发行 中国环境科学出版社  
(100062 北京东城区广渠门内大街 16 号)  
网 址: <http://www.cesp.com.cn>  
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)  
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司  
经 销 各地新华书店  
版 次 2012 年 5 月第 1 版  
印 次 2012 年 5 月第 1 次印刷  
开 本 787×1092 1/16  
印 张 16  
字 数 310 千字  
定 价 118.00 元

---

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换





# 序

流域水文模拟是 20 世纪中期发展起来的一种新技术，是研究流域水文学和水资源管理的重要工具。它将流域的水文过程建立数学模型，在计算机上实现模拟。这种技术在解决水文实际问题与进行水文规律的研究上具有显著的作用。迄今为止，国内外水文学者研发了许多水文模型。我国著名水文学家赵人俊教授 1984 年提出了适用于湿润和半湿润地区的新安江模型与适用于干旱地区的陕北模型，有力地推动了我国陆地水文学的发展，为水文学研究作出了贡献。

然而，在全球变暖的背景下，河流对全球气候变化的响应成为水文学界关注的热点问题。这在主要依赖河流出口径流量维系人类生存和繁衍的内陆干旱区显得尤为突出。干旱区的水分循环过程呈现出这样的特征：盆地平原不产生径流，地表水和地下水同源于山区，一个流域就是一个独立的、与外界无水力联系的地表水和地下水相互依赖的生态功能单元，而且产流区（山区）面积不大，径流的变化对气候变化的敏感性更为显著。近 20 年来，随着温度的升高，加速了山区积雪和冰川的溶解，冰雪融水量发生了很大变化，河流的径流量随之变化。气温变化直接影响了干旱区水文过程，在极端雪—温组合的条件下，洪旱灾害变得越加频繁。冰川退缩和气温升高是否会对干旱区水资源带来重大影响成为目前亟待回答的科学问题。

基于上述因素，陈曦团队在国家自然科学基金委和欧盟联合项目的支持下，结合国际水文学前沿理论和方法，开展了“干旱区内陆河流域水文模型”研究。以系统论的观点和现代地理科学技术手段，采用实地观测实验和遥感信息分析



相结合的方法，同化站点观测数据与多源遥感系列数据，实现了干旱区无资料  
和缺资料流域水文建模的参数化。揭示了干旱区内陆河流域特殊的地理环境、  
水文要素及水文过程特征，分析了内陆河流域水文循环系统对全球变化的响应，  
提出了切合干旱区流域特征的分布式水文模型建模方法。

该书内容丰富、资料翔实、结构合理，有许多新观点、新方法和新结论，  
是一部优秀的科学著作。我相信并希望《干旱区内陆河流域水文模型》一书的  
出版与发行，将对我国乃至世界干旱区的水文学科建设和经济社会的发展起到  
重要的推动作用，为干旱地区的水文研究提供有益的借鉴，为干旱区研究工作者  
提供重要参考。

中国工程院院士

2012年1月20日



# 前言

水是生命的源泉，在干旱区更是这样。水在干旱区山地、绿洲和荒漠三大生态系统中的循环截然不同。山地形成了干旱区所有的河流，绿洲成为干旱区水资源的主要消耗区，荒漠则像海洋一样成为所有内陆河流的归宿地，由此，构成了干旱区独特的水循环过程。干旱区水的形成、转化、运移和分配，决定了干旱区社会经济的发展以及生态系统的状况。如何定量描述干旱区水循环过程一直是水文学家研究的焦点和热点。水文模型是研究流域水文循环及水文预报的主要工具，干旱区流域水文模型尤其复杂，而且山区气象和水文观测资料稀缺，更增加了模型模拟的难度。《干旱区内陆河流域水文模型》是近年来对新疆天山南、北典型流域水文过程模拟研究的归纳和总结，期望通过本书能够给干旱区水文过程研究者提供一些基础研究结果，能够为干旱区水文模型研究者提供一些可借鉴的经验。

干旱区的河流绝大多数属于内陆河流，且季节性河流众多，地表水系除黄河与额尔齐斯河分别注入太平洋、北冰洋外，其余均为内陆水系，多消失于荒漠或汇聚于尾间湖泊，如塔里木河、玛纳斯河、疏勒河、黑河、石羊河等。高山和盆地相间的地形，使所有发源于高山的河流大都为冰雪融水补给，径流量的年际变化小，保证率较高。在年内分配上，水量集中于夏秋两季。盆地四周各河流都向盆地汇集，组成向心式水系。一些流量较小的河流在出山口后就消失于内部盆地之中；一些水量较大的河流，可在盆地的低洼处滞成湖泊。也有一些河流从一个盆地流到另外一个盆地。如开都河水系，汇集到焉耆盆地的最低处博斯腾湖，孔雀河又从博斯腾湖流出汇集到塔里木盆地的低洼处罗布泊。从小流域内部水循环到大的水系内部（或局地）的水循环，构成了亚洲中部干旱区水循环最基本的规律。

内陆河流域水循环由于产流区面积不大，其水资源的变化对全球气候变化的敏感性显著。积雪量减少会导致融雪径流量减少，温度变化将导致冰川和融雪的变化，从而导致径流季节性分配变化，直接影响用水可靠性和生态环境健康发展；在极端雪—温组合条件下，会造成严重洪旱灾害。水资源分配不均形成的极端水文现象（如洪水、干旱等），可能导致干旱区流域水资源更加短缺和洪涝灾害更加频繁，对人类的生存和社会经济可持续发展构成严重威胁。另外，干旱区流域水文要素的空间变异性大，降雨的空间变化显著，雨量





的时空观测记录与局部产汇流形成的急剧变化的洪水过程很不匹配；高山雪冰、冻土带的下垫面由积雪、冰川、多年冻土和高山草甸等组成，导致多种消融产流过程共存。因此，干旱区流域水文过程在时空变化上的复杂性，导致了年内水文过程波动的难以预测性。

认识干旱区水文系统特征，以模型为手段，对内陆河流域的水文循环过程进行模拟，是合理开发利用水资源，以及科学评估气候变化对干旱区水文过程影响的重要途径和措施。本书使用最新资料和研究成果（截至 2011 年），尽可能引用权威数据、权威结论，以系统论的观点和现代科学技术手段，对干旱区内陆河流域特殊的地理环境、水文要素及水文过程特征和以内陆河流域为独立单元的水文水循环系统对全球气候变化响应等进行了系统的研究与总结。本书所采用的研究方法和取得的研究成果，通过进一步拓展，应用于其他流域的综合管理，可为解决我国干旱区水资源评估与管理的一系列实际问题，为科学、高效的决策提供强有力的理论基础和应用支撑。

本书分为 8 章，第 1 章、第 2 章由陈曦、胡汝骥、黄粤、王亚俊、班卫强等完成，总体介绍了干旱区的定义、分布和地理特征，以及干旱区内陆河流域水文系统与水文循环要素的主要特征；第 3 章至第 7 章由陈曦、黄粤、窦燕、于梅艳、冯先伟、陈晓娜、王亚俊等完成，论述了流域水文模型在新疆天山南、北坡典型流域的应用，系统提出了干旱区内陆河流域水文建模、参数化及模型不确定性分析的技术方法与方案；第 8 章由陈曦、黄粤完成，从多方面对全书内容进行了系统总结。包安明研究员、杨辽研究员、王伟胜副研究员在数据处理和软件编制方面做了大量的工作。胡汝骥、王亚俊对全书进行了统稿和编辑。阿不都米吉提·阿不力克木、班卫强、骆君和李燕惠组成的技术小组所做的插图编制等卓有成效的工作，为完成本专著提供了保障。中国环境科学出版社陈金华副编审、吴再思编审为本书出版做了大量的工作。在此表示衷心感谢。

本书是在国家自然科学基金重点项目 40730633 和中比政府间合作项目的支持下完成的，感谢国家自然科学基金委的大力支持。感谢王浩院士在百忙中为本书作序，感谢比利时鲁文大学、比利时 VITO 的大力支持，感谢中国科学院新疆生态与地理研究所学术委员会及研究所的领导和同事们热心帮助和大力支持。

由于时间仓促和作者经验不足，书中错误敬请指正。

2011 年 11 月



# 目录

第 1 章	干旱区内陆河水文特征 .....	1
1.1	干旱区 .....	1
1.2	内陆河水文特征 .....	7
第 2 章	干旱区内陆河流域产汇流机制与模型 .....	19
2.1	干旱区内陆河流域产汇流机制 .....	19
2.2	流域水文模型 .....	20
第 3 章	缺资料区域水文模型参数的反演 .....	29
3.1	降雨资料的（数据的）遥感反演 .....	29
3.2	地表覆被参数的遥感反演 .....	36
3.3	蒸散的遥感反演 .....	38
3.4	土壤含水量的遥感反演 .....	43
3.5	积雪覆盖和雪水当量的遥感反演 .....	45
第 4 章	典型流域气象水文及下垫面特征 .....	49
4.1	天山北坡典型流域气象、水文及下垫面特征 .....	49
4.2	天山南坡典型流域气象、水文及下垫面特征 .....	67
第 5 章	典型流域水文过程建模与模拟 .....	101
5.1	玛纳斯河流域融雪过程模拟 .....	101
5.2	开都河流域水文过程模拟分析 .....	127
第 6 章	典型流域模型尺度效应与不确定性 .....	173
6.1	不确定性识别 .....	173
6.2	尺度效应分析 .....	174
6.3	降水输入对径流模拟的影响 .....	182



第 7 章 典型流域水文过程对气候变化的响应 .....	184
7.1 全球气候变化.....	184
7.2 干旱区对气候变化的响应.....	184
7.3 全球气候模式 (GCM) .....	190
7.4 数据处理方法.....	194
7.5 玛纳斯河流域水文过程对气候变化的响应.....	195
7.6 开都河流域水文过程对气候变化的响应.....	211
第 8 章 结束语.....	233
参考文献.....	238

# 第 1 章 干旱区内陆河水文特征

## 1.1 干旱区

### 1.1.1 干旱区的定义及其分布

顾名思义，干旱区一般是指降水量少，年蒸发量大于降水量，因而干旱缺水的地区，一般是指作物或植物不能维持正常生长的地方。

在地球上，干旱半干旱区占地球表面的 1/3 以上。据联合国环境开发署（UNEP）统计，按气候条件划分，世界上有干旱半干旱土地面积  $4.88 \times 10^7 \text{ km}^2$ ，另有  $9.10 \times 10^6 \text{ km}^2$  的“人类时代”沙漠，这些沙漠是由人类不合理开发造成的（表 1-1）。

表 1-1 世界陆地干旱区的面积

大陆	极干旱区/ $10^6 \text{ km}^2$	干旱区/ $10^6 \text{ km}^2$	半干旱区/ $10^6 \text{ km}^2$	总计/ $10^6 \text{ km}^2$	占陆地面积 百分比/%
澳洲	0	3.9	2.5	6.4	83
非洲	4.5	7.3	6.0	17.9	59
亚洲	1.0	7.9	7.5	16.5	38
北美和中美	0.03	1.3	2.6	4.0	10
南美洲	0.20	1.2	1.6	3.0	8
欧洲	0	0.2	0.8	1.0	1
总计	5.73	21.8	21.0	48.8	36.3

干旱区是自然—社会综合体，存在着复杂性和多变性等特征。因而，关于干旱区的范围和界限，至今还没有一致的认识。目前，划分世界干旱地区的方法和指标很多，根据气候、植被、土壤、地貌指标划分的都有。因为干旱区的实质是气候干旱，所以，在各种划分干旱区的方法中，气候方法最为重要。一般用蒸发量与降水量之比，即干燥度的大小及降水量的多少来表征一个地方的干湿状况。

但是，由于目前还没有可靠的、统一的蒸发量测算方法，传统使用的气候方法是单纯以年降水量来划分的。一般将年降水量不足 250 mm 的地区划为干旱区，年降水量 250~500 mm 的地区划为半干旱区，年降水量 500~600 mm 容易出现干旱的地区划为半湿润区（吴正，2009）。也有将年降水量不足 200 mm 的地区划为干旱区的（孙荣强，1994；孙国



武, 1997; 秦大河, 2003)。

1959年, 中国科学院自然区划工作委员会<sup>①</sup>采用干燥度作为划分全国干湿程度的指标:

- 干燥度 $<1.0$ 为湿润(森林)地区。
- 干燥度 $=1.0\sim 1.5$ 为半湿润地区, 天然植被是森林草原。
- 干燥度 $=1.5\sim 2.0$ 为半干旱地区, 天然植被是干草原, 虽然可以勉强进行旱作农业, 但其产量很不稳定。
- 干燥度 $>2.0$ 为干旱地区, 不灌溉就不能农耕, 其中干燥度 $=2.0\sim 4.0$ 的天然植被是荒漠草原; 干燥度 $>4.0$ 为荒漠地带。也有人进一步将干燥度 $=4.0\sim 32.0$ 称为干荒漠, 将干燥度 $>32.0$ 称为极端干旱荒漠(耿宽宏, 1986)。

干燥度的数值用下列经验公式求得:

$$K = E/r = 0.16 \sum t/r$$

式中:  $K$ ——干燥度;

$E$ ——可能蒸发量 $=0.16 \sum t$ ;

$\sum t$ ——日气温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 持续期间的活动积温总和, 以 $^\circ\text{C}$ 表示;

$r$ ——同期间降水量, 以 $\text{mm}$ 表示;

0.16——在中国气候背景下的一个经验系数。

1977年, 联合国粮农组织等机构提出的荒漠化图, 以干旱指数 $P/E_p$ (降水/蒸腾)来确定干旱区(王铮, 2009)。

$P/E_p < 0.03$ 的地区为极端干旱区;

$0.03 \leq P/E_p < 0.20$ 为干旱区;

$0.20 \leq P/E_p < 0.50$ 为半干旱区。

1994年, 国际荒漠化公约政府间谈判委员会(INCD)确定, 并在《联合国防治荒漠化公约》中应用, 以湿润指数来划分气候区的方法。湿润指数是根据桑斯威特(C.W.Thornt Rmaite, 1948)提出的可能蒸散公式计算的。其公式为:

$$I_m = 100 (S - 0.6D) / n$$

式中:  $I_m$ ——INCD计算的湿润指数;

$S$ ——湿季土壤剩余水分,  $\text{mm}$ ;

$D$ ——干季土壤水分亏缺,  $\text{mm}$ ;

$n$ ——植物需水量, 即为年平均可能蒸散量,  $\text{mm}$ 。

$n$ 由下式计算:

$$n = E_0 \times CF$$

式中:  $CF$ ——按纬度而异的每月日照时数;

$E_0$ ——每月可能蒸散量,  $\text{mm}$ 。

$E_0$ 由下式确定:

<sup>①</sup> 中国科学院自然区划委员会《中国综合自然区划》及《中国气候区划》, 1959。



$$E_0=16 (10T/I)^a$$

式中： $a$ ——因而异的常数；

$T$ ——温度；

$I$ ——12个月总和的热量指标或称为热指数。

$I$ 由下式计算：

$$I = \sum_{i=1}^{12} (T_i/5)^{1.514}$$

通过以上计算，确定世界气候区按湿润指数划分的标准为：

- 极端干旱区：湿润指数  $I_m < 0.05$ 。
- 干旱区： $I_m = 0.05 \sim 0.20$ 。
- 半干旱区： $I_m = 0.21 \sim 0.50$ 。
- 半湿润区： $I_m = 0.51 \sim 0.65$ 。
- 湿润区： $I_m > 0.65$ 。

同年，慈龙骏（1994）利用中国科学院植物研究所数量生态开放实验室的700多个气象站点30年的平均气象记录，以及联合国环境规划署的湿润指数标准，进行了计算机模拟和绘图，得出了我国干旱区、湿润区等的面积和分布（表1-2）。慈龙骏把青藏高原北部和西北部的高寒干旱、半干旱区，也包括在西北干旱区的范围内。

表 1-2 中国干旱、半干旱区面积

类型	湿润指数	面积/ $10^4 \text{ km}^2$		占总国土面积/%	
极端干旱区	$< 0.05$	69.7		7.3	
干旱区	$0.05 \sim 0.20$	137.0	314.7	14.3	32.8
半干旱区	$0.21 \sim 0.50$	108.0		11.2	
半湿润区	$0.51 \sim 0.65$	52.6		5.5	
湿润区	$> 0.65$	592.7		61.7	

据慈龙骏1994年资料整理（吴正，2009）。

我国是世界上干旱地区分布最多的国家之一。它幅员辽阔，位于欧亚大陆腹地，地处 $35^\circ \sim 50^\circ \text{N}$ ，东起大兴安岭西麓，西止于国境，连绵4000 km以上，横跨50个经度，时差达3.5h之多。它的总面积约占全国土地总面积的30%。在行政区划上，包括新疆维吾尔自治区和内蒙古自治区的全部，宁夏回族自治区的大部以及甘肃、陕西、山西及河北等省的部分地方（赵松乔等，1990）。地理环境是一个整体，其特征取决于自然和社会因素的综合。我国西北干旱区包括我国极端干旱、干旱和半干旱区在内的广大地域。因而，也有称为“北方干旱区”。

朱震达等（1994）在研究我国沙漠和沙漠化中统计表明，我国西北干旱区的面积为 $3.06 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，占全国土地总面积的32.0%。在行政区划上，包括新疆维吾尔自治区、宁夏回族自治区和内蒙古自治区的绝大部分，以及甘肃、青海、陕西、山西、河北等省的部分地区。

在我国，按照地理位置、大气候特征和地势轮廓等最重要的自然地理的地域分异因素及社会经济状况，将我国划分为三大自然区（赵松乔等，1985），即西北干旱区、东部季风区和青藏高原区。在这三个自然地理区的范围内都分布着一定面积的干旱、半干旱地区。本书所介绍的将仅限于自然地理学所划分的西北干旱区内，年降水量小于 200 mm，干燥度大于 3.5 的中国干旱区，即东起贺兰山以西，西到国境线，中纬度西风带作用的温带和暖温带气候带（详见《中国自然地理·总论》中国气候区、带图。科学出版社，1985）。它地处欧亚大陆中心，地处 35°~50°N，连绵 2 500 km 以上，横跨 30 个经度。它的总面积约占全国土地面积的 22%。在行政区划上，包括新疆维吾尔自治区全部，内蒙古自治区西部和甘肃省的河西走廊以及宁夏贺兰山西坡地区。

### 1.1.2 干旱区的自然地理特征

#### 1.1.2.1 特殊的山地环境

我国干旱区，在地貌上以高大山地与内陆盆地为主体。盆地平原一般海拔 1 000~1 500 m，局部洼地在 500 m 以下，吐鲁番盆地的艾丁湖为-154 m，是世界上第二低地，中国陆地最低点。盆地的周围为昆仑山、喀喇昆仑山、阿尔金山、祁连山、天山山脉和阿尔泰山等高山环绕，海拔高达 4 000 m 以上（图 1-1）。这些高大的山体对截留环流水汽，为形成有效降水起了重要作用。同时，高大山体的顶峰终年积雪，并发育了巨大的冰川，构成独具一格的高山极地雪冰世界景观，全然有别于北非、西南亚、澳大利亚等干旱荒漠区的山地环境。地貌外营力主要是干旱气候条件下的物理风化、物质移动、流水侵蚀、堆积及广泛的风力吹蚀。常有超过 5 m/s 的起风沙。大风日数在安西达 34.8 天，托克逊 70 天，阿拉山口多达 165 天。最大风速一般在 30 m/s 以上。吐鲁番盆地曾实地测到 50 m/s 的特大风速。因此，地面组成物质粗糙贫瘠，以砂为主的沙漠、以砾石为主的戈壁、以基岩为主的山地广布，山麓也有部分黄土分布（胡汝骥，2004，2011；陈曦，2010）。

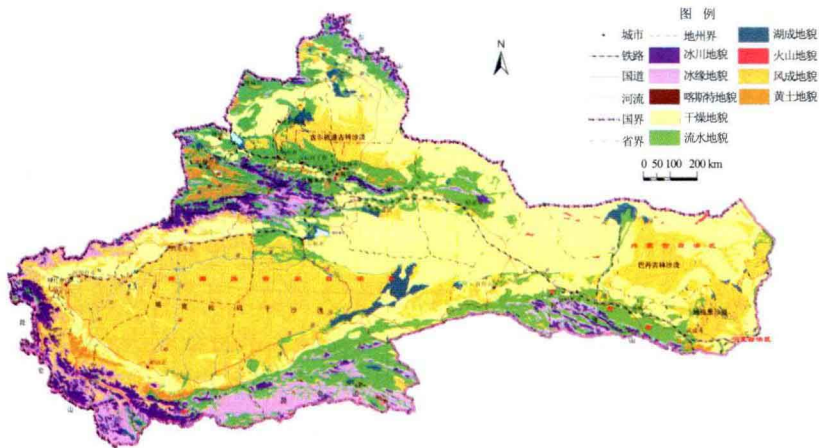


图 1-1 中国干旱区地貌成因类型图

### 1.1.2.2 典型的干旱气候

干旱区大气含水量通常较低，我国干旱区的降水量仅 50~150 mm。新疆多年平均降水量为 157.4 mm，为全国平均降水量 650.5 mm 的 24.2%，在全国排位倒数第一（胡汝骥，1996，2004，2011；陈曦，2008，2010）。

(1) 山区多于平原和盆地。干旱区的降水主要集中在山区，而平原和盆地的降水量相对较少。新疆山区面积约为  $7.0 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，占全疆总面积的 42.7%，多年平均年降水量  $206 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，折合降水深 294 mm，占全疆年降水量的 81.1%；平原区面积为  $9.44 \times 10^5 \text{ km}^2$ （包括  $6.69 \times 10^5 \text{ km}^2$  的沙漠及荒漠区），占全疆总面积的 57.3%，多年平均年降水量  $482 \times 10^8 \text{ m}^3$  时，折合降水深仅为 51.1 mm，占全疆年降水总量的 18.9%（苏宏超等，2007）。

(2) 降水稀少且极不均匀。在环流系统（西风）的作用下，中国干旱区多过境水汽，所以降水稀少，且受地形的影响，降水分布极不均匀（图 1-2）。

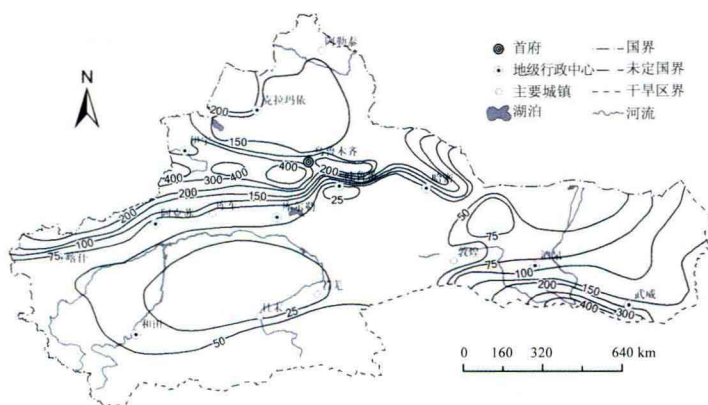


图 1-2 中国干旱区平均年降水量分布图

(3) 降水垂直地带性明显。在山区年降水量随高程上升而增大，垂直分布规律明显。由于山脉对气流有阻挡和抬升作用，加强了气流的垂直和水平运动，影响气团和锋面活动。在新疆海拔 3 000 m 以下，天山北坡西部的垂直递增率为 40~60 mm/100 m；准噶尔西部山地和天山北坡中部地区为 30~35 mm/100 m；阿尔泰山地为 25~30 mm/100 m；天山南坡为 10~20 mm/100 m，昆仑山的递增率为 10 mm/100 m。海拔 3 000 m 以上地区目前无实测资料，降水与高程的关系比较复杂。

(4) 降水量年内分配不均。降水量的年内分配受水汽条件和地理位置的影响，地区间存在差异。新疆春季降水大于秋季，其差异南疆大于北疆；降水量主要集中在春夏两季，北疆地区春夏两季降水占年降水量的 40%~75%，南疆地区更为集中，占 65%~85%，且有自北向南，自西向东集中程度增加的规律（薛燕等，2003）。

同时，蒸发量的分布形势与降水相反。半干旱区年最大蒸发量在 1 000 mm 以下，贺兰山以西明显增加，围绕塔里木、吐鲁番—哈密和准噶尔三大盆地形成强烈的蒸发中心，最大值达 4 000 mm 以上。干旱区的蒸发是形成或者控制干旱的重要因素，其中的潜水蒸发是干旱区灌区产生土壤盐碱化的主要诱因。干旱区的蒸发与地形有着密切的关系，新疆

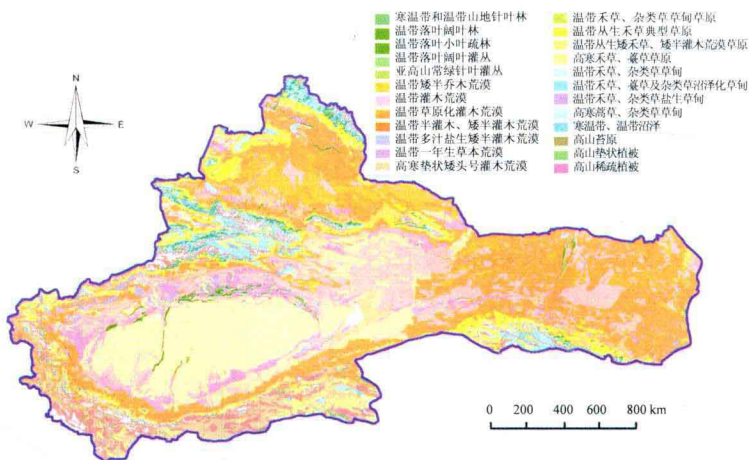


四周高山环绕，具有独特的高山和盆地相间，丘陵和平原相间，平原和沙漠相间的多种地貌组合，由此形成了该区域复杂多样的气候条件和资源条件，使得水面蒸发量在地区上的分布差异较大，地区分布规律与气温分布相呼应，而与降水量分布相反，即水面蒸发量山区小、平原大；随着地势的升高，降水量逐渐增大，水面蒸发量则逐渐减小；受气温、湿度和风速等主要气象因素的影响，低温湿润地区水面蒸发量一般相对较小，高温干燥地区水面蒸发量相对较大。北疆山区水面蒸发量低于 1 000 mm，乌鲁木齐天山冰川站（海拔 3 539 m）年水面蒸发量仅为 579.7 mm（李忠勤等，2011）。

（5）云量少，日照率高，太阳能资源丰富。中国干旱区全年日照时数 2 500~3 549 h。年平均日照率在 60%~70%，夏秋季高达 80%。新疆年总辐射平均超过 5 500 MJ/m<sup>2</sup>。无霜期 120~300 天，≥10℃积温在 2 000~4 000℃，其中吐鲁番盆地为 4 500~5 390℃。光合有效辐射为 3 000~2 400 MJ/（m<sup>2</sup>·a），有利于作物生长。但是，冬季漫长而寒冷，气温年变化和日变幅巨大，夏日午间地表气温可达 60~70℃，古尔班通古特沙丘表面的一次性实测温度达到 83℃。而冬季富蕴、可可托海 1960 年 1 月 21 日出现最低气温为-51.5℃，也是全国气温最低记录之一。这都不利于植物生存生长（李江风等，1996）。

### 1.1.2.3 生物和土壤

（1）荒漠植被。中国干旱区位于亚非荒漠东段，特殊的地域环境使其自然地理类型众多，独特和极端生境多样，在这样的生境条件下，植被“三向地带性”仍然清晰可见，且明显地打上了“荒漠”的烙印，荒漠植被成为山地植被垂直带谱的基带，而且结构趋于简化，坡向分异显著（图 1-3）。另外，经过长期演化，孕育了丰富的、有别于非干旱区的植物种质资源，其中盐生、旱生、短命植物和野生果树等在抵御逆境、提高光合生产与水分利用效率以及果树育种等方面具有不可替代的优势，为人类提供了丰富的基因资源。



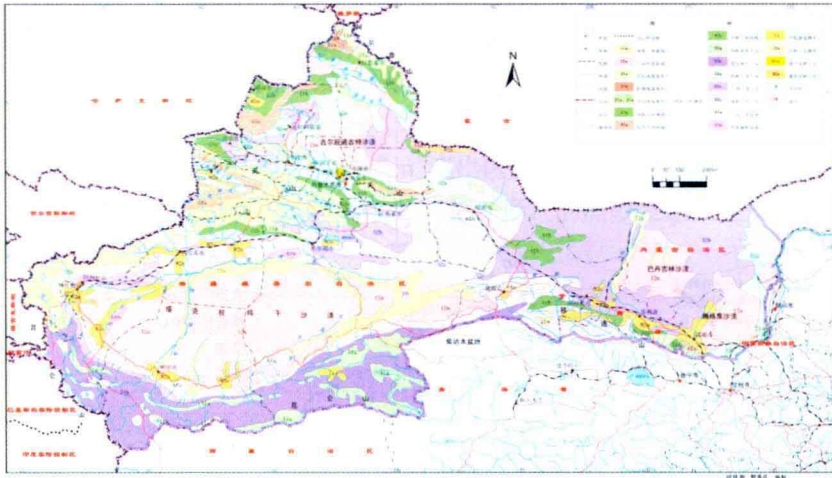
资料来源：据中国科学院中国植被图编辑委员会，2007b。

图 1-3 中国干旱区植被图

中国干旱区地处中亚、西伯利亚、蒙古和西藏的结合部，历史时期境内自然地理环境几经变迁，给处于各植物区系成分的接触、混合和特化提供了条件。因此，区系特性

表现出强烈的旱生性和鲜明的温带性质；区系差异悬殊，且分布不均匀；起源古老，特有属贫乏，但是有特有种较多，其中种子植物达 109 种，它们在植被组成中占据重要地位，构成了中国干旱区旱生、超旱生灌木、半灌木群落（中国科学院中国植被图编辑委员会，2007a）。

（2）特殊生态地理环境下的土壤。地质大循环是自然土壤形成的物质基础，生物小循环是其条件，两个循环过程共存，并相互作用才能形成具有一定剖面 and 肥力特征的土壤。从《中国干旱区土壤图》中可以清楚地看出，干旱区土壤形成过程具有明显的垂直地带性规律。早更新世以来，冰期与间冰期的循环，高山带不同时期的冰川沉积层序，生物和土壤同步发生、演化，形成了性质各异的生物聚积层，新老冰碛母质上，分别发育着原始土壤和顶级土壤。间冰期，高山带的大面积积雪及雪冰融水，不仅给盆地平原带去大量固态径流物质，而且输送了较多的可溶性盐类和动物残骸，在古湖滩地、河流老阶地、冲积扇缘，形成单层或多层重叠的膏盐层，分别孕育了干旱土、盐成土和人为土（图 1-4）。



资料来源：陈曦等，2010。

图 1-4 中国干旱区土壤类型图

## 1.2 内陆河水文特征

干旱区主要依赖内陆河流出口径流量维系山地森林—草原与盆地平原绿洲—荒漠间脆弱的生态系统平衡和经济社会可持续发展。其水分循环过程、水资源有效利用方式完全不同于湿润区域。盆地平原不产生径流，地表水、地下水同源源于山区。干旱区在地球陆地上基本无地表径流和地下径流与全球大洋相通，而且也不与其他集水区域相连，在陆地上的物质、能量和信息流具有显明的局地特性。它的每一个流域都有自己独立的径流形成区（山区），独立的水系和尾间湖，以及恒定的大气低层环境系统；它的每一个流域就是一个地表水和地下水相互依赖的生态功能单元，其中水流是纽带、连接相互分离的山区径流形成区与盆地平原径流散失或消耗区。以水分循环为主体，并与生物、生态系统紧密联



系，构成一个独特而又完整的内陆河流域水分循环体系，以及相互作用的山地森林草原—盆地平原绿洲—荒漠生态系统（胡汝骥等，2011）。

### 1.2.1 地表水水文特征

#### 1.2.1.1 径流主要形成于山区

阿尔泰山、天山、祁连山等是径流的形成区；在径流形成区中，由于各河流源头海拔较高和地形切割，人类活动稀少，高山积雪冰川每年夏季消融，成为多数河流的源头；山地坡陡降水较多，形式多样，除消耗于蒸散发和植被蒸腾外，就形成降雨径流和季节性积雪融水径流，并迅速汇集于河道，同时还有一部分降水和径流在山坡和河谷盆地入渗地下，随地形地质变化出流进入河道，因此，地表径流随山溪河流沿程增加，到达出山口时，河川径流达到最大。准噶尔盆地、塔里木盆地和河西走廊等是径流的散失区，盆地中心大部分是沙漠。中国干旱区除额尔齐斯河为外流河，其余 800 多条河溪均从高山汇集封闭盆地，并构成一个个完整的小流域（图 1-5）。同时，构成千百条没有水力学联系的，各自独立的局地水文循环系统。这种水资源分布特点，促使人口及工农业生产集中在盆地和平原地带，从而加剧了生产用水和天然生态用水的矛盾（陈曦等，2010）。

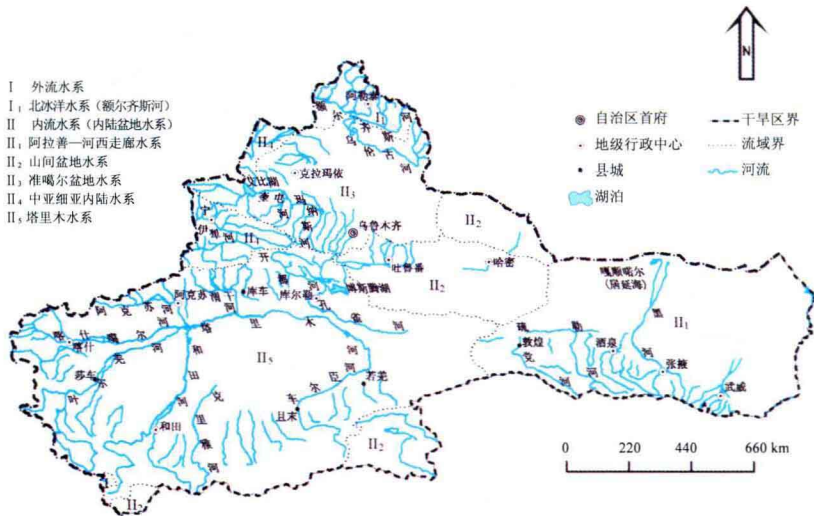


图 1-5 中国干旱区水系图

图 1-6 为中国干旱区水分循环和水量平衡的示意图。山区与平原之间水资源运移转化关系比较复杂。山区地下水大部分以基流形式补给河流转化为地表水，此外还有  $89.1 \times 10^8 \text{ m}^3$  以山前侧渗和河床潜流形式直接补给平原区地下水，成为平原区地下水天然补给量的主要来源。