

中国西北

干旱区陆-气相互作用 及其对东亚气候变化的影响

黄荣辉 陈文 马耀明 高晓清 吕世华 韦志刚 等著
张强 卫国安 胡泽勇 周连童 周德刚

DROUGHT

中国西北干旱区陆-气相互作用及其 对东亚气候变化的影响

黄荣辉 陈文 马耀明 高晓清 吕世华 韦志刚 等著
张强 卫国安 胡泽勇 周连童 周德刚

 气象出版社
China Meteorological Press

内 容 简 介

本书介绍了我国西北陆-气相互作用观测试验以及有关分析和模拟研究的多项科学成果和许多干旱区陆面过程参数。全书分 12 章:第 1 章,中国西北干旱区的气候和环境状况;第 2 章,中国西北干旱区陆-气相互作用在东亚季风气候系统的重要性及观测试验的科学意义;第 3 章,中国西北干旱区陆-气相互作用——敦煌观测试验概况与质量评价;第 4 章,中国西北干旱区戈壁下垫面的陆面过程观测分析;第 5 章,中国西北干旱区戈壁下垫面的地表参数特征;第 6 章,敦煌试验区沙尘暴发生时地表附近的气象特征与陆面过程;第 7 章,敦煌地区陆面参数及地表通量的卫星遥感反演;第 8 章,中国西北干旱区戈壁下垫面陆-气相互作用的数值模拟研究;第 9 章,中国西北干旱区边界层特征及区域能量平衡的数值模拟研究;第 10 章,中国西北干旱区感热变化及其对气候异常的影响;第 11 章,中国西北干旱区陆-气相互作用对气候变化影响的过程和机理研究;第 12 章,总结。本书图文并茂,可供从事陆-气相互作用和气候系统研究以及气候数值模式设计等科研人员的参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国西北干旱区陆-气相互作用及其对东亚气候变化的影响/黄荣辉等著.
北京:气象出版社,2011.8
ISBN 978-7-5029-5265-5

I. ①中… II. ①黄… III. ①陆地-大气-相互作用-研究-中国
②陆地-大气-相互作用-影响-气候变化-东亚
IV. ①P468.2 ②P468.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 163859 号

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:李太宇 王祥国

封面设计:方 方

责任校对:赵 媛

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:589 千字

版 次:2011 年 9 月第 1 版

印 数:1~1500 册

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:汪勤模

责任技编:吴庭芳

印 张:23

彩 插:7

印 次:2011 年 9 月第 1 次印刷

定 价:78.00 元

序

陆地约占全球表面的三分之一。人类居住在陆地上,陆地状况直接影响着人类的生存条件 and 生产活动。但是,人类活动和气候变化又会严重影响陆地状况、特别是影响陆地的生态和环境,而陆地状况、生态和环境的改变又直接影响着气候的变化。

在全球陆地面积中,干旱/半干旱地区约占 35%,它是地球表面上仅次于海洋面积的大气下垫面。由于干旱/半干旱区下沉气流强,降水量少,空气和土壤十分干燥,且由于缺少植被,地表的反照率高,陆-气相互作用相当强,在干旱/半干旱区的陆面过程参数与季风湿润区的有关参数有很大差别。因此,对干旱/半干旱区陆-气相互作用进行观测试验研究是非常重要的,这也是全球能量和水分循环试验计划(GEWEX)重要的研究内容。由于干旱/半干旱区是人烟稀少、自然条件恶劣的荒漠地区,气象观测很少,只有加强干旱/半干旱区陆-气相互作用的观测试验,才能更好地了解此区域的陆-气相互作用特征,特别是对此区域的热量和水分循环的认识,从而提高此区域气候的数值模拟和预测水平。

我国干旱/半干旱区总面积约为 504 万 km^2 ,为国土面积的 52.5%,其中,干旱区大部分位于我国西北部。西北干旱区大部分为戈壁、沙漠和稀疏植被所占据,这里的年降水量不足 200 mm,有的地区(如敦煌地区)不足 50 mm,而年蒸发能力竟达到 3000 mm 以上,是全世界典型的干旱区之一。由于此区域陆-气相互作用非常强,它是欧亚大陆感热输送最强的区域,此区域的感热对于东亚季风系统的变化与异常有重要影响,因此,开展此区域陆-气相互作用的观测试验及其气候效应的研究具有十分重要的科学意义。

“中国西北干旱区陆-气相互作用观测试验”是继 20 世纪 80 年代开展的“黑河地区地-气相互作用野外观测试验研究”(简称 HEIFE)之后又一个典型干旱区陆-气相互作用的观测试验。不过,此观测试验是在比黑河地区更干旱的敦煌戈壁区进行,所进行的研究内容更具有典型干旱区陆面过程的代表性。并且,此观测试验进行了 10 年之久,获得了包括典型干旱区的陆面过程参数和有关典型干旱区

陆-气相互作用特征及其对东亚气候影响等方面的许多研究成果。因此,本书的出版不仅可以进一步了解西北干旱区陆-气相互作用特征及其对东亚气候的影响,而且书中许多有关干旱区陆面过程参数可以为比较不同下垫面陆面过程的异同提供参考。

叶笃正^{*}

2011年5月16日

* 叶笃正,中国科学院院士。

前 言

鉴于我国西北干旱区陆-气相互作用对东亚季风系统有严重影响,而目前干旱区陆面过程有关参数还远远满足不了此区域能量和水分循环特征分析和气候数值模式的需要,为此,在《国家重大基础研究发展规划》首批启动项目“我国重大气候灾害的形成机理与预测理论研究”(黄荣辉院士为项目首席科学家)中开展了我国西北干旱区陆-气相互作用的野外观测试验及有关分析研究。在此项目的资助下,在敦煌的双敦子戈壁下垫面、临泽的巴丹吉林沙漠下垫面,以及在五道梁的高寒地区分别建立了干旱区陆-气相互作用观测试验站,并于 2000—2003 年在这三个观测试验站同时进行了“中国西北干旱区陆-气相互作用观测试验”(The Field Experiment on Interaction between Land and Atmosphere over Arid Region of Northwest China, 简称为 NWC-ALIEX)。随后,又在国家自然科学基金委员会重点基金项目“我国西北干旱区陆-气相互作用特征及其对气候影响机理研究”(黄荣辉院士为项目主持人)、中国科学院知识创新工程项目“干旱/半干旱地带陆-气相互作用及模型设计机理和数值模拟”(陈文研究员为项目主持人)以及《国家重大基础研究发展规划》另一项目“全球变暖背景下东亚能量和水分循环变异及其对我国极端气候的影响”(黄荣辉院士和韦志刚研究员为其中两相关课题的负责人)的资助下,以及中国科学院资源与环境科学技术局“野外观测试验站运行费”的支持下,于 2004—2010 年相继在敦煌戈壁下垫面进行了较长期的干旱区陆-气相互作用观测试验,并争取此观测试验能继续进行下去。

通过此观测试验项目 10 年多的连续观测,积累了大量有关典型干旱区陆-气相互作用和陆面过程参数的原始观测资料。经过多年的分析研究,得到了许多有关干旱区陆面过程参数、陆-气相互作用特征及其对东亚季风气候系统影响方面很有意义的科学成果。为了系统地总结这些观测和研究成果,特撰写此书。

此书共分 12 章:第 1 章,中国西北干旱区的气候和环境状况:主要阐述中国西北干旱区地理、地貌、气候和环境状况,由高晓清研究员撰写,刘扬也参加了 1.2 和 1.3 节的撰写;第 2 章,中国西北干旱区陆-气相互作用在东亚季风气候系统的重要性及观测试验的科学意义:主要阐述中国西北干旱区陆-气相互作用对东亚季

风气候系统的重要作用、中国西北干旱区陆-气相互作用观测试验研究关键的科学问题和观测试验的科学意义,由黄荣辉院士(2.1、2.2、2.4和2.5节)、张强研究员和王胜副研究员(2.3节)撰写;第3章,中国西北干旱区陆-气相互作用——敦煌观测试验概况和质量评价:主要阐述了中国西北干旱区(特别是敦煌)观测试验的观测内容、仪器标定、常规观测和加强观测、观测数据整编、资料质量和代表性评价等,由卫国安研究员(3.2、3.3和3.4节)、韦志刚和胡泽勇研究员(3.1节)、韦志刚研究员和王超(3.5节)、周德刚博士(3.6和3.7节)撰写;第4章,中国西北干旱区戈壁下垫面的陆面过程观测分析:主要阐述典型干旱戈壁下垫面的地表辐射收支、地表热量平衡的日变化,以及戈壁下垫面地表辐射收支、气象要素和能量通量的季节和年际变化,由张强研究员和王胜副研究员(4.1和4.2节)以及陈文研究员(4.3、4.4和4.5节)撰写;第5章,中国西北干旱区戈壁下垫面的地表参数特征:主要阐述了戈壁下垫面地表动量、热量总体输送系数、粗糙度、地表反照率、地表湍流输送通量参数化、土壤的热力参数以及土壤水分传输特征,由张强研究员和王胜副研究员撰写;第6章,敦煌试验区沙尘暴发生时地表附近的气象特征与陆面过程:主要阐述了西北干旱区沙尘暴发生概况、沙尘暴发生的天气过程、气象特征和地表能量收支以及沙尘暴对太阳辐射的阳伞效应,由胡泽勇研究员、高洪春高级实验师、卫国安研究员和侯旭宏高工撰写;第7章,敦煌地区陆面参数及地表通量的卫星遥感反演:主要阐述利用气象卫星资料并结合地面观测资料对敦煌干旱地区地表反照率、地表温度、植被等参数和地表能量平衡的反演原理和结果,由马耀明研究员、胡晓工程师、马伟强副研究员、文军和王介民研究员撰写;第8章,中国西北干旱区戈壁下垫面陆-气相互作用的数值模拟研究:主要阐述土壤-植被-大气数值模式、NCAR/LSM、CoLM和BATS等陆面过程模式对戈壁下垫面陆面过程的数值模拟以及这些模式的模拟结果比较,由陈文研究员(8.3和8.4节)、吕世华研究员(8.2节)、张强研究员和王胜副研究员(8.1节)和周德刚博士(8.5节)撰写;第9章,中国西北干旱区边界层特征及区域能量平衡的数值模拟研究:主要阐述西北敦煌戈壁区边界层特征的观测及模拟,沙漠-绿洲边界层和地表能量平衡的模拟,由吕世华研究员(9.2节和9.3节)、胡泽勇研究员(9.4节)和韦志刚研究员(9.1节)撰写,此外,张强研究员和王胜副研究员也参与了9.1节的撰写;第10章,中国西北干旱区感热变化及其对气候异常的影响:主要阐述中国西北干旱区感热变化特征及其与中亚地区感热的关联、西北干旱区地-气温差、感热的年际和年代际变化特征及其对中国东部夏季降水的影响,由周连童副研究员撰

写,其中 10.3.2 小节由韦志刚撰写;第 11 章,中国西北干旱区陆-气相互作用对气候变化影响的过程和机理研究:主要阐述西北干旱区热力变化对东亚夏季风环流和华北降水的年际和年代际变化的影响过程、机理及其数值模拟,由陈文研究员(11.3 和 11.4 节)和周连童副研究员(11.1 和 11.2 节)撰写;第 12 章,总结:在本书各章阐述内容的基础上,简要总结本书的主要内容,即主要阐述西北干旱区陆-气相互作用在东亚季风气候系统变化中的作用及进行“中国西北干旱区陆-气相互作用”观测试验的科学意义、西北干旱区戈壁下垫面陆-气相互作用观测试验的主要科学成果,以及今后需进一步研究的科学问题,由黄荣辉院士撰写。本书最后由黄荣辉院士、陈文研究员和周德刚博士进行了包括章节编排、各章节内容调整、章节中文字、图表和参考文献的修改等统稿工作。

作者们在撰写此书时,力求能尽量反映我国西北陆-气相互作用观测试验以及有关分析和模拟研究的各项成果,并尽量做到图文并茂。本书力求能成为从事陆-气相互作用和气候系统研究以及气候数值模式设计等科研人员的参考书,并对今后进行干旱区陆-气相互作用研究能有所启发和帮助。本书的出版得到国家自然科学基金资助项目“我国西北干旱区陆-气相互作用特征及其对气候影响机理研究(40730952)”、国家重点基础研究发展规划项目“全球变暖背景下东亚能量和水分循环变异及其对我国极端气候的影响(2009CB421400)”、中国科学院知识创新工程项目“干旱/半干旱地带陆-气相互作用及模型设计机理和数值模拟(KZCX2-YW-220)”、以及中国科学院资源与环境科学技术局“野外观测试验站运行费”的资助;并且,在中国西北干旱区陆-气相互作用观测试验 10 年多的连续观测中,卫国安研究员和侯旭宏高工对于台站运行和观测做了大量工作;叶笃正院士、孙淑芬和刘辉志研究员对于本书各章结构和内容提出了宝贵意见;在本书各章内容的收集、编排和统稿过程中,周德刚博士和李太宇编审付出了大量精力,并得到王磊工程师和刘春燕实验师的许多帮助,谨在此一并表示衷心的感谢。

由于撰写时间匆忙,作者较多,书中肯定有不少不妥之处,敬请批评指正。

作者

2011 年 2 月 26 日

目 录

序

前言

第 1 章 中国西北干旱区的气候和环境状况	(1)
1.1 中国西北干旱区的地理和地貌特征	(1)
1.2 中国西北干旱区的气候概况	(6)
1.3 中国西北干旱区近 50 年来气候的变化状况	(12)
1.4 中国西北干旱区的环境变化状况	(18)
1.5 中国西北干旱区的沙尘暴变化状况	(22)
1.6 小结	(26)
参考文献	(27)
第 2 章 中国西北干旱区陆-气相互作用在东亚季风气候系统的重要性及观测试验 的科学意义	(28)
2.1 东亚季风气候系统及其成员	(28)
2.2 中国西北干旱区陆-气相互作用在东亚季风气候系统中的作用	(38)
2.3 关于西北干旱区陆-气相互作用研究的关键科学问题	(42)
2.4 中国西北干旱区陆-气相互作用观测试验的科学意义	(48)
2.5 小结	(56)
参考文献	(56)
第 3 章 中国西北干旱区陆-气相互作用——敦煌观测试验概况与质量评价	(61)
3.1 观测试验区的地理、地貌和气候状况	(61)
3.2 西北干旱区陆-气相互作用观测试验的内容、仪器与标定	(64)
3.3 西北干旱区陆-气相互作用观测试验的常规观测与加强观测	(69)
3.4 西北干旱区陆-气相互作用观测试验的资料数据库与数据整编	(73)
3.5 敦煌戈壁站的塔站资料质量评价	(76)
3.6 敦煌戈壁站湍流通量的观测与订正	(83)
3.7 敦煌戈壁站湍流通量的质量评价和代表性评价	(89)
3.8 小结	(96)
参考文献	(97)
第 4 章 中国西北干旱区戈壁下垫面的陆面过程观测分析	(100)
4.1 西北干旱区戈壁下垫面的地表辐射收支的日变化特征	(100)
4.2 西北干旱区戈壁下垫面地表热量平衡的日变化特征	(104)
4.3 西北干旱区戈壁下垫面辐射收支的季节和年际变化	(106)
4.4 西北干旱区戈壁下垫面气象要素的季节和年际变化	(116)

4.5 西北干旱区戈壁下垫面能量通量的年际变化	(127)
4.6 小结	(135)
参考文献	(136)
第5章 中国西北干旱区戈壁下垫面的地表参数特征	(138)
5.1 戈壁下垫面的动量、热量总体输送系数	(138)
5.2 戈壁下垫面地表特征参数	(145)
5.3 戈壁下垫面地表湍流通量参数化	(158)
5.4 戈壁下垫面土壤的热力参数	(160)
5.5 戈壁下垫面土壤-大气水分传输特征	(162)
5.6 小结	(169)
参考文献	(170)
第6章 敦煌试验区沙尘暴发生时地表附近的气象特征与陆面过程	(173)
6.1 21 世纪初中国西北干旱区沙尘暴的发生情况	(173)
6.2 敦煌戈壁区沙尘暴发生的天气过程背景	(175)
6.3 敦煌戈壁区沙尘暴发生的气象特征	(180)
6.4 沙尘暴的“阳伞效应”	(185)
6.5 沙尘暴发生时戈壁下垫面的地表能量收支	(188)
6.6 小结	(190)
参考文献	(190)
第7章 敦煌地区陆面参数及地表通量的卫星遥感反演	(192)
7.1 敦煌地区的地表反射率	(193)
7.2 敦煌地区的地表温度	(196)
7.3 敦煌地区的植被分布	(198)
7.4 敦煌地区的地表能量平衡	(200)
7.5 小结	(205)
参考文献	(206)
第8章 中国西北干旱区戈壁下垫面陆-气相互作用的数值模拟研究	(208)
8.1 土壤-植被-大气模式对戈壁下垫面陆面过程的模拟	(208)
8.2 NCAR/LSM 模式对戈壁站陆-气相互作用特征的模拟	(215)
8.3 CoLM 模式对戈壁下垫面陆面过程的模拟	(224)
8.4 BATS 模式对戈壁下垫面陆面过程的模拟	(239)
8.5 模式模拟结果比较	(245)
参考文献	(246)
第9章 中国西北干旱区边界层特征及区域能量平衡的数值模拟研究	(249)
9.1 敦煌地区边界层结构特征的观测事实	(249)
9.2 非静力平衡中尺度模式 NCAR/MM5V3.6 对干旱区边界层特征的模拟	(255)
9.3 非静力平衡中尺度模式 NCAR/MM5V3.6 对干旱区沙漠-绿洲大气边界层 结构的数值模拟	(261)
9.4 区域大气模式系统(RAMS)对干旱区区域地表能量平衡的模拟	(263)

9.5 小结	(269)
参考文献	(270)
第 10 章 中国西北干旱区感热变化及其对气候异常的影响	(272)
10.1 中国西北干旱区感热与中亚干旱区的关联	(272)
10.2 中国西北干旱区地气温差年际和年代际变化特征	(279)
10.3 中国西北干旱区春季地气温差变化对中国夏季降水的影响	(285)
10.4 中国西北干旱区感热的年代际变化特征及其与中国夏季降水的关系	(289)
10.5 小结	(293)
参考文献	(293)
第 11 章 中国西北干旱区陆-气相互作用对气候变化影响的过程和机理研究	(295)
11.1 西北干旱区热力变化对东亚夏季风环流的机理研究	(295)
11.2 西北干旱区热力变化对华北干旱影响的机理研究	(303)
11.3 西北干旱区地面感热影响东亚夏季气候的模拟研究	(312)
11.4 干旱区地面感热影响东亚夏季气候的敏感性试验研究	(323)
11.5 小结	(334)
参考文献	(335)
第 12 章 总结	(337)
12.1 中国西北干旱区陆-气相互作用在东亚季风气候系统中的作用	(338)
12.2 中国西北干旱区陆-气相互作用研究的关键科学问题及观测试验的主要 科学意义	(339)
12.3 中国西北干旱区陆-气相互作用观测试验内容及观测数据的质量评价	(342)
12.4 中国西北干旱区陆-气相互作用观测试验科学成果 I: 西北干旱区陆面过程 和陆-气相互作用主要特征	(343)
12.5 中国西北干旱区陆-气相互作用观测试验科学成果 II: 西北敦煌戈壁区沙尘 暴发生时陆面过程的变化	(347)
12.6 中国西北干旱区陆-气相互作用观测试验科学成果 III: 敦煌地区陆面过程 参数的卫星遥感反演	(349)
12.7 中国西北干旱区陆-气相互作用观测试验科学成果 IV: 关于西北干旱区陆面 过程和边界层结构的数值模拟	(350)
12.8 中国西北干旱区陆-气相互作用观测试验科学成果 V: 西北干旱区陆-气 相互作用变化特征及其对东亚气候影响的机理	(352)
12.9 今后的研究	(354)
参考文献	(355)

第1章 中国西北干旱区的气候和环境状况

本书所指的西北地区是指在自然区划中以干旱气候、荒漠景观占优势为特征的一个自然区域,通常称为西北干旱区,包括新疆、甘肃、内蒙古西部、宁夏、陕北和青海西北部。

西北地区地域辽阔,各地纬度和海拔不同,受海洋影响程度各异,因而气候十分复杂。西北地区因距海洋较远,受地形阻挡影响,从海洋来的气流势力大大削弱,降水稀少,空气干燥,春夏季温度很高,蒸发量很大,地表大部分是戈壁或稀疏植被下垫面。因此,中国西北地区不仅是欧亚大陆的极旱区,而且是全球重要的干旱气候区之一。

1.1 中国西北干旱区的地理和地貌特征

西北地区位于(32°11′—49°33′N、73°21′—108°46′E)。其最西端在新疆阿克陶县乌孜别里山口以西,最北端在新疆布尔津县北部友谊峰以北,最东端为甘肃合水县境的陕甘省界(108°46′E),最南端在甘肃文县南部的甘川省界(32°11′N)。西北干旱区面积 $218.04 \times 10^4 \text{ km}^2$,占中国的 22.71%。在中国地图上,如近似地以 104°E 线和 36°N 线之交点为中心,可以清楚地看到全区绝大部分都位于此中心点西北部。西北地区地理位置的又一特点是远离海洋。甘肃最东端距渤海和黄海分别约 800 和 1000 km,最南端距北部湾约 1300 km,河西走廊和新疆完全深居内陆。对于中国这样以东亚暖湿气流为主要降水来源的国家而言,远离海洋和青藏高原的阻挡作用导致西北降水奇缺,形成大片地区的荒漠景观。

1.1.1 中国西北干旱区自然地理概况

(1)地质环境与宏观地貌格局

西北地区半属西伯利亚板块,半属中国板块之塔里木中朝地块。两者的分界线大致通过塔里木盆地北缘、北山南缘、巴丹吉林沙漠西南部至宁夏北部。阿尔泰山是西伯利亚板块上的早古生代褶皱带。西准噶尔有一条北东向深断裂,东准噶尔有一条晚古生代板块缝合线,它在阿尔泰山和天山之间呈东南东向,延伸至北山以北。天山两侧均为晚古生代板块俯冲带。塔里木盆地及河西走廊西段是太古—元古代中朝地块的一部分。祁连山地作为早古生代褶皱带,范围比现在的祁连山大得多,其北缘的早古生代板块俯冲带位于河西走廊以北,南缘是早中生代板块俯冲带。昆仑山地是一个晚古生代褶皱带,其以南为早中生代褶皱带(赵松乔, 1985)。

前震旦纪时,西北地区尚淹没于深海之中,加里东运动期间由于板块俯冲,阿尔泰和祁连褶皱成山、晚古生代天山亦因板块俯冲而褶皱成山,昆仑山北部当时上升量虽不大,但沉积环境已有所改变。准噶尔在震旦纪后一度上升,但在泥盆纪转为沉陷。塔里木地块一直保持上升趋势。石炭—二叠纪是西北主要山地隆升最高的时期。南天山褶皱上升的同时内部开始出现构造凹陷,南昆仑剧烈褶皱而西部发生断块凹陷,祁连山褶皱上升使其古生代地层隆起和凹陷,石炭纪前曾长期隆起的北山继续断裂上升,阿尔金山与塔里木、柴达木一起发生区域性

隆升。

华力西期之后,西北地区山地曾长期处于宁静状态、阿尔泰山在三叠纪被夷平为准平原,天山经过三叠纪初开始的长期剥蚀夷平,也形成了准平原,准噶尔西部山地成为一些低丘,准噶尔中部和塔里木西部为内陆凹陷区,后者部分被海水淹没,柴达木也有小片内陆凹陷。燕山运动使所有古生代山脉都经历了新的褶皱、断裂和局部凹陷,但升降幅度不大。塔里木和柴达木虽有小幅上升,与周边山地相比较仍处于相对下沉状态、盆地地貌形成,塔里木西部仍被海水淹没。

喜马拉雅运动期间,西北地区没有发生大的褶皱作用,但大部分山地发生了阶段性上升和断裂,阿尔泰山发生块状断裂,古天山准平原再次掀升和凹陷,昆仑山大幅度隆升,祁连山出现平缓褶皱并形成一些小盆地,海水完全退出塔里木西部(赵济和陈传康,1999)。

地质构造从宏观上奠定了西北地区的地貌格局。褶皱带、板块俯冲带、缝合线和深断裂带的上升一侧成为高大山系,整体隆升区域成为高原,沉陷带则成为平原和盆地。因此,山地、盆地、高原相间分布成为西北地区最突出的地貌特征。

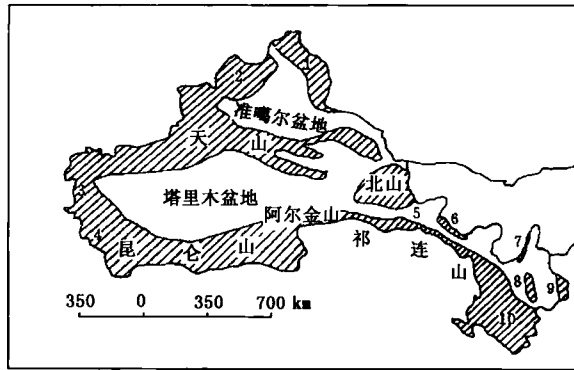


图 1.1.1 西北地区山地与盆地相间分布示意图(赵济和陈传康,1999)

1. 阿尔泰山, 2. 准噶尔西部山地, 3. 帕米尔, 4. 喀喇昆仑山, 5. 河西走廊, 6. 走廊北山, 7. 贺兰山, 8. 六盘山, 9. 子午岭, 10. 西秦岭

(2) 冰川、冰缘、风沙、黄土地貌等优势地貌类型

西北地区许多高山、高原位于雪线以上,成为中纬度区域山岳冰川和多年冻土发育的理想场所。北起阿尔泰山、南到昆仑山、西起帕米尔、东到阿尼玛卿山,所有高山都有现代冰川发育。冰川既是寒区一个重要的自然地理要素,又是一种特殊的外动力。冰川的侵蚀和堆积作用造就相应的冰蚀和冰碛地貌。

冰缘地貌与冻土关系密切。昆仑山、祁连山和天山的冻土下界依次为 4200 m、3500 m 和 2700 m。到 48°N 的阿尔泰山,更降至 2200 m。由此可见其随纬度增加而递降的趋势是很明显的(王绍武和董光荣,2002)。

风沙地貌是干旱气候的产物,包括风蚀地貌和风积地貌两类。新疆、甘肃干旱,多大风,地表出露新生代湖相地层的地区,如罗布泊周围地区、河西走廊西段、准噶尔盆地西部和东疆分布亦较广。中国沙漠主要部分在西北干旱区。塔克拉玛干沙漠面积达 $33.76 \times 10^4 \text{ km}^2$, 在世界上仅次于阿拉伯半岛之鲁卜哈利沙漠而居第 2 位, 占中国沙漠面积 $87.63 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的 38.5%。若加上北疆古尔班通古特沙漠($4.88 \times 10^4 \text{ km}^2$), 新疆东南的库姆塔格沙漠($2.14 \times$

10^4 km^2),则西北地区沙漠共占中国全国的46.5%(王绍武和董光荣,2002)。

黄土是沙漠和古冰川堆积物中的粉沙通过风力吹扬到半干旱、半湿润地区,并经过黄土化过程而形成的一种松散第四纪沉积物。黄土分布很广,但大面积连续覆盖的厚层黄土主要分布于陕甘宁三省区,并形成了著名的黄土高原。新疆塔里木南缘、甘肃河西走廊、西秦岭和岷山山地中的盆地和谷地都有黄土分布。

黄土疏松,具垂直节理和所谓湿陷性,极易被流水侵蚀。故黄土高原大部分地区的侵蚀模数都在 $4000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 以上,个别小流域甚至高达 $3.5 \times 10^4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。黄土高原水土流失严重,是黄河含沙量特高的直接原因,由黄河水输送的黄土在黄河下游形成了广阔的冲积平原,但遗留给高原自己的却是千沟万壑、极为破碎的地表形态。沟谷密度一般为 $2 \sim 3 \text{ km}/\text{km}^2$,但最高可超过 $10 \text{ km}/\text{km}^2$ 。峡谷与河谷盆地相间排列,使河谷总的形态呈串珠状,成为黄土高原西部河谷地貌的一大特色(唐克丽,1991)。

1.1.2 中国西北干旱区河流水文特征

西北地区河流的主要特征,主要有以下几点(赵济和陈传康,1999):

(1) 平均河网密度偏小

中国东部河网密度多在 $0.3 \sim 2 \text{ km}/\text{km}^2$ (局部地区如杭嘉湖平原高达 $12 \text{ km}/\text{km}^2$),而西北地区除甘肃、宁夏沿黄河带、河西地区、阿尔泰和天山山地可达 $0.5 \sim 0.7 \text{ km}/\text{km}^2$ 外,普遍低于 $0.5 \text{ km}/\text{km}^2$,干旱盆地平原更是小于 $0.05 \text{ km}/\text{km}^2$ 。黄土高原沟谷密度居中国全国之首,河网密度只有 $0.2 \sim 0.3 \text{ km}/\text{km}^2$ 。

(2) 补给形式多样化和冰雪融水补给比重大

除降水外,冰川融水和地下水补给也很重要。愈是干旱地区冰川融水补给率愈高。天山渭干河、木扎提河、帕米尔盖孜河高达 $78\% \sim 85\%$,是最突出的例子。昆仑山策勒河、玉龙喀什河约为 60% ,叶尔羌河及阿克苏河约为 53% ,供给敦煌用水的党河达 39.1% ,足以说明冰川融水对于干旱区河流补给的重要性。

(3) 径流深值整体偏低且地域差异显著

中国东部北方径流深值,除个别地区不足 100 mm 外,大部分在 200 mm 以上,南方则多在 $400 \sim 1000 \text{ mm}$ 。西北地区截然相反,两大干旱盆地不足 5 mm ,其中包括大片无径流区。陇南南部 $400 \sim 600 \text{ mm}$,为西北地区最高值区,其余各地包括阿尔泰山、天山、帕米尔、祁连山等均在 $100 \sim 400 \text{ mm}$ 。

(4) 径流季节分配不平衡,年际变化显著

冬春两季径流量一般只占全年的 $10\% \sim 20\%$,干旱区河流则大多断流。春汛不明显,夏季为汛期,径流量占全年的 $40\% \sim 50\%$,冰源河可达 $60\% \sim 70\%$ 。秋季径流量一般占全年的 $20\% \sim 30\%$ 。显然,径流量季节分配不平衡是与多种补给源的组合特征密切关联的。径流量年际变化显著,且各地差异很大。两大干旱盆地和河西走廊河流变差系数(C_v 值)在 $0.8 \sim 1.0$,高山高原腹地却只有 0.2 ,因为后者的降水径流与冰雪融水径流存在一种互补关系。多雨年夏季气温偏低,抑制冰川消融;少雨年夏季气温偏高,促进冰川消融。冰川对河川径流的调节作用颇为重要。

(5) 除陇南外,西北地区河流都有或长或短的结冰期

甘南高原、祁连山、天山山地等河流的冬季结冰是由高海拔造成的,结冰期长短亦随海拔

高度不同而变化,最长的可达4~5个月。盆地河流的结冰则主要是纬度偏高所致。

(6) 内流河流多以荒漠盆地为最后归宿

分两种情况,一是由于强烈蒸发、渗漏和日益增加的引水灌溉,径流耗费殆尽,流程逐渐缩短;二是出山后经过伏流、重现,最终注入尾间湖。前者的例子如塔里木河,过去曾流入罗布泊,而现在下游已完全干涸;孔雀河、车尔臣河没入塔里木荒漠;伊犁河在境外注入巴尔喀什湖;疏勒河曾一度以罗布泊为其归宿,而现在已没有水流出河西走廊;黑河(弱水、额济纳河)以索果湖、嘎顺湖为归宿;石羊河下游消失于腾格里沙漠南缘,等等。

内流河中,塔里木河以其2137 km的长度居第一位。塔里木河流域囊括了塔里木盆地西部和北部。尽管其三大源流和田河、叶尔羌河和阿克苏河出山径流量多达 $212.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,但下游逐渐干涸,流程日益缩短。以博斯腾湖为归宿的开都河(年径流量 $33.8 \times 10^8 \text{ m}^3$)和作为北疆重要灌溉水源的玛纳斯河(年径流量 $13 \times 10^8 \text{ m}^3$)同样面临水量锐减的问题。伊犁河流域位于天山山地内部,是中国年径流量最多的内流河($170 \times 10^8 \text{ m}^3$)。河西各内流河出山径流量共约 $75 \times 10^8 \text{ m}^3$,但党河、疏勒河、黑河和石羊河四条最重要的河流分别只有 $3.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $9.94 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $15.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $6.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(7) 西北地区的主要外流河

西北地区的主要外流河有长江支流嘉陵江、黄河、额尔齐斯河和奇普恰普河四条。嘉陵江流域仅局限于甘南高原东部和陇南山地。值得一提的是,历来被当做嘉陵江支流的白龙江,长度和径流量都远胜于前者。根据“河源唯远”原则,白龙江应是嘉陵江正源。黄河两度进出甘肃,在甘肃形成峡谷与盆地相间的串珠状,盆地中发育多级阶地,然后自南向北纵穿宁夏进入内蒙古。额尔齐斯河是中国唯一属于北冰洋水系的河流,流域分布于准噶尔盆地北部,年径流量 $126 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。奇普恰普河是一条常常被忽视的河流,但它却是重要的国际河流印度河的源流段的一支。尽管其在中国境内的流域面积仅有 4410 km^2 ,年径流量也只有 $2.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,但它表明中国西北喀喇昆仑山地部分属于印度洋水系。

1.1.3 中国西北干旱区植被环境

由于西北干旱区降水稀少,且具有地带性差异,故物种类贫乏且空间差异性很大。

(1) 植物区系地理

西北地区植物种类贫乏,多单属科、单种属和寡种属植物。以高等植物论,准噶尔盆地不过500余种,塔里木盆地与河西走廊不过200余种。山地除北山、昆仑山、阿尔金山仅100~300种外,祁连山约有1200余种、陇南诸山2000余种,而天山超过2500种。西北地区植物区系地理成分复杂,主要包括地中海-西亚成分、中亚-亚洲中部成分、温带亚洲成分、旧大陆温带亚洲成分及北温带成分等。其中的中亚-亚洲中部成分是西北地区荒漠植被最重要的组成成分。

此外,西北地区还有北极高山成分、温带广布种以及东亚成分。东亚成分,特别是其中的耐旱成分,在甘肃黄土高原草原植被中常占较大比重,如白羊草、多种胡枝子、茵陈蒿、铁杆蒿、芨芨等。陇南山地更是多种成分交汇之地,并含若干特有种属和单种属,华北成分有油松、白皮松、辽东栎、白桦、侧柏、山杨、毛白杨,华中或亚热带成分有连香树、红桦、漆树、杜仲等,华西成分有密枝杜鹃、金背杜鹃、桦叶荚蒾,东亚成分有刺楸,甚至有中国—喜马拉雅成分的华山松等(伍光和,1998)。

(2) 大陆性和过渡性纬度地带分异

西北地区地域辽阔,植被、土壤的水平方向的变化是最显著的,其中,东西方向因降水量递减形成的自森林和森林草原向荒漠的变化,属于热量相似背景下的干湿度分异,南北方向的变化则是干旱背景下热量条件不同而形成的纬度地带性分异(赵济和陈传康,1999)。

西北地区有以下纬度地带:

温带荒漠地带:包括准噶尔盆地、北山山地及河西走廊东中段。植被类型比较简单,多为灌木、半灌木和小乔木荒漠,覆盖度小。

暖温带荒漠地带:包括塔里木盆地、东疆及河西走廊西段。植物区系起源与准噶尔相似,但种类数大减,常见种有多种柽柳、多种盐生草、列氏合头草、黑果枸杞等。

以上两个地带作为纬度地域分异的产物,显然是亚欧大陆腹地纬度地带谱的组成部分,与东部季风区内海洋性纬度地带谱有本质区别。热量条件不同是分异的主导因素,干燥程度的差别居次要地位。

温带草原地带:分布于甘肃中东部和宁夏南部黄土高原区。代表性草原群系为长芒草原和长芒草加芨芨草原。陇中北部和宁夏中部气候偏旱,植被类型转变为温带荒漠草原。

暖温带落叶阔叶林地带:分布于陇南山地,主要落叶树种有栓皮栎、槲树、槲栎、锐齿栎、山杨、漆树等,林下灌木、藤本、草本植物都比较多。

北亚热带常绿阔叶林地带:分布于甘肃最南部岷山支脉摩天岭一带,海拔在 900 m 或 1000 m 以下,常绿乔木树种有柏木、桉木、杉木、马尾松、铁坚油杉、橘、橙、油樟、黑壳楠、慈竹、棕榈、珙桐等。土壤为黄棕壤。

显而易见,后面三个地带是既不同于西北西部大陆腹地,也有别于中国东部沿海的过渡性纬度地带谱。在这里,海洋性气候特点已明显减弱,但还没有达到出现荒漠地带的程度。

(3) 绿洲

荒漠中有地表径流通过或地下水出露、地势相对低平且地表主要由土状物质组成的地段,在天然状态下植被发育良好,经人工开发从事种植业、林业、畜牧业、兴建工厂和城镇,即成为绿洲。所以,绿洲是荒漠内部因水分作用于地表土状物质而致的地域分异的产物。地表土状物质和淡水是形成绿洲的两个不可或缺的物质前提,而一定的光照和辐射条件则是形成绿洲的能量基础。

绿洲作为荒漠内部地域分异的产物,对荒漠地理环境具有反馈作用。所谓冷岛效应即是一例(胡隐樵等,2003)。绿洲内部防护林和农作物使风速减缓,蒸散强烈使相对湿度增加,下垫面的改变使温度变幅减小且平均值低于周围荒漠。这些特点不仅有利于绿洲化过程持续进行,还对绿洲边界附近的荒漠侵袭起着某种抑制作用。

西北绿洲所在地区同全球其他荒漠绿洲区相比,其海拔和纬度双双偏高,但日照时数多,太阳辐射值高,热量标准至少达到温带水平,一般情况下不致成为农业生产的障碍,水源则堪称得天独厚,因此农业发达,成为中国西北的粮棉瓜果基地。

据统计,中国西北地区人工绿洲共约 $9.45 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中新疆 $7.34 \times 10^4 \text{ km}^2$,甘肃 $1.79 \times 10^4 \text{ km}^2$,宁夏 3200 km^2 ,主要分布于塔里木盆地和准噶尔盆地边缘、天山山间盆地、河西走廊和宁夏平原。其中以天山北麓西段、叶尔羌河流域、伊犁河谷地、喀什噶尔河三角洲、阿克苏河流域、塔城盆地、疏勒河流域、黑河(弱水)流域、石羊河流域以及宁夏平原等绿洲群面积最大。此外,额尔齐斯—乌伦古河流域、艾比湖区、天山北麓东段、焉耆盆地、吐哈盆地、孔雀河

三角洲、渭干河流域、和田河流域、东昆仑—阿尔金山前平原、阿拉善高原南缘甘肃金昌、民勤一带也有小块绿洲分布。

西北地区现有的 $984 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 耕地中,约有 $442 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 分布于绿洲中。其中新疆为 $314 \times 10^4 \text{ hm}^2$,甘肃河西地区为 $95 \times 10^4 \text{ hm}^2$,宁夏 $32 \times 10^4 \text{ hm}^2$,它们已成为中国重要的粮食、棉花、油料和糖料基地。而绿洲农业的迅速发展,则主要得益于 20 世纪 50 年代以来空前规模的农垦事业。

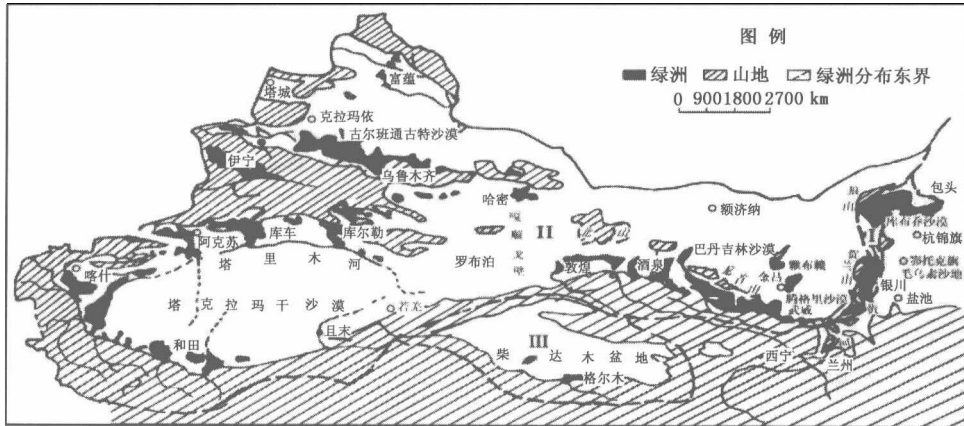


图 1.1.2 中国西北地区绿洲分布图(樊自立和马英杰,2005)

1.2 中国西北干旱区的气候概况

西北地区因距海洋较远,加之地形阻挡,从海洋来的气流已经大大削弱,是其气候干旱的根本原因。加之西北地区南有青藏高原、西有帕米尔高原等分别阻隔南来和西来湿润气流,北冰洋气流虽能越过准噶尔西部山地,影响准噶尔盆地,却难以越过天山进入南疆,东亚季风及西南季风到达甘肃中部已成强弩之末,只能给西北地区东部一隅有限的影响。西风急流则只能给高山带来降水。由此可知,除地理位置外,大气环流形势和宏观地貌特征也是西北地区重要的气候形成因素。

西北干旱区降水稀少,空气干燥,加之春夏气温较高,蒸发量很大。因此,中国西北干旱区不仅是欧亚大陆极旱区,而且是全球典型干旱区之一。

1.2.1 西北干旱区气候概况

西北地区地域辽阔,各地纬度和海拔不同,受海洋影响程度各异,因而气候十分复杂。陇南南部谷地是典型的亚热带湿润气候区,甘肃黄土高原和北疆大部分属半干旱气候区,但干旱仍是西北地区主要的气候特征。

冬季,蒙古—西伯利亚高压从北方移近并控制西北地区大部分地区,导致空气剧烈冷却。 100°E 附近的高空高压脊及相应的地面高压中心,受阿尔金山的阻挡,使气流辐散形成两大风系。东支即西北风系沿河西走廊向东南推进,西支即东北风系倒灌入塔里木盆地。夏季,地面强烈增温,热低压成为主要气压系统。强烈的西风急流北支,在天山以南形成高空热带大陆气