

甘肃省十五科技攻关重大项目(GS012-A45-118)
国家自然科学基金重点项目(40333028)

研究专著

中国西北干旱气候动力学引论



罗哲贤 编著

气象出版社

甘肃省十五科技攻关重大项目 (GS012-A45-118)

国家自然科学基金重点项目 (40333028)

研究专著

中国西北干旱气候动力学引论

罗哲贤 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书比较系统地阐述了近半个世纪以来我国西北干旱研究的若干成果。内容涵盖青藏高原热状况、厄尔尼诺事件和台风活动对西北干旱的影响,西北干旱环流及其前期演变特征,西北地区降水量时空变化规律以及涡旋自组织动力学的新进展等。可供环境资源及大气科学相关领域从事理论与业务工作的人员、大专院校师生、研究生参考,也可供政府部门和有关事业部门的领导和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国西北干旱气候动力学引论/罗哲贤编著. —北京:
气象出版社, 2005. 3

ISBN 7-5029-3935-0

I. 中… II. 罗… III. 干燥气候-气候学: 动力
学-研究-西北地区 IV. P468. 24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 022493 号

气象出版社出版

(北京中关村南大街 46 号 邮编: 100081)

总编室: 010-68407112 发行部: 010-62175925

网址: <http://cmp.cma.gov.cn> E-mail: qxcbs@263.net

责任编辑: 陈红 汪勤模 终审: 周诗健

封面设计: 王伟 责任技编: 陈红 责任校对: 黄云华

*

北京燕龙印刷有限公司印刷

气象出版社发行

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 15 字数: 380 千字

2005 年 3 月第一版 2006 年 1 月第 2 次印刷

印数: 1~1000 定价: 45.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等, 请与本社
发行部联系调换

前 言

我国干旱、半干旱区约占全国总面积的 47%，主要位于西北地区。西北干旱不仅对农业生产，而且对水资源、能源、交通运输、生态环境和人民生活均有较大影响，是区域性可持续发展的一个限制因素。

从上世纪五十年代起，西北干旱问题就受到广泛关注，多次立项研究。如“中国西北干旱气候的成因、预测和对策研究”（1991—1995 年，中国气象局重点课题），“中国西北干旱气候变化与预测研究”（1996—2000 年，国家科技部重中之重项目专题），“稀疏植被下垫面与大气的相互作用”（1999—2003 年，国家自然科学基金重点项目）。同时，受其它项目资助或结合业务研究方面，也做了大量工作，均取得丰硕成果。

上述成果一般以论文或论文集的形式发表，具有较高的水平，独到的见解，也自成系统；但其布局以项目或业务框架为限，难以反映西北干旱研究的全貌。另一方面，在《中国西北天气》（白肇烨、徐国昌著，北京：气象出版社，1988）一书中，两位作者从全局的角度论述了西北干旱问题，非常值得一读。缺憾是篇幅太少，仅占一章，约 4 万字。

鉴于上述原因，谢金南先生提议，将近半个世纪以来西北干旱问题的方方面面综述一下，让大家查阅起来方便一些，并将此事作为部分工作内容列入“西北干旱成因及其应用研究”的申请项目。这个项目受到甘肃省科学技术厅的大力支持，被列为十五期间（2001—2005 年）甘肃省重点科研项目。项目执行期间，还得到甘肃省气象局的联合资助。

西北干旱的文献量庞大，头绪纷繁，如何取舍，颇费思量。幸好，一次看到陶诗言先生（2000）的一段话，受到启迪。陶先生说：“西北干旱最强的信号是高原下垫面热状况（含感热、积雪和高原季风），厄尔尼诺事件和台风活动；其次是南亚高压，西太平洋副热带高压的活动以及区域降水量自身演变的特点。”遂以这段话作为全书主要线索。

本书内容依此线索展开。第一章为绪论。第二、三、四章分别讨论青藏高原热状况，厄尔尼诺事件和西太平洋台风活动对西北干旱的影响。第五章概述西北干旱环流型及其前期演变特点。第六章讨论西北地区降水量的演变规律，其中包括干旱化的问题。第七章叙述近年来的一些研究结果，如长江中下游梅雨与西北干旱的联系等。

北宋文学家苏轼曾在陕西扶风任职。到任第二年即遇春旱，已经到了“五日不雨则无麦，十日不雨则无禾”的地步。后来，一场大雨三日乃止，彻底解除了旱情，憂者以喜，病者以愈。苏轼为此专门写了一篇“喜雨亭记”，流传至今。由此例可见，干旱与暴雨是一个事物的两个侧面。干旱之所以持续，就是大雨、暴雨没有形成；或者说，大雨、暴雨没有形成的原因，一定意义上就是干旱持续的原因。在提倡学科交叉的今天，干旱与暴雨研究似有必要加强交流、相互渗透。据夏建平的研究（《中国西北天气》第五章），西北地区东部的大雨与“暴雨云团”有关。此暴雨云团系云块合并生成。云块合并与涡块合并等价。涡块合并是涡自组织的一种主要形式。作者正主持国家自然科学基金的一项重点项目（2004—2007年），此项目主要研究涡自组织的动力学。暴雨云团是如何一步一步自组织起来的，也是该项目研究的内容。这方面的工作刚刚开始，有一些初步的结果。第八章对此做扼要介绍。第九章为总结和展望。

本书的完成得到了陶诗言先生有益的指导和宋连春局长的大力支持。谢金南先生，曾宪麟先生，李栋梁先生百忙之中审阅原稿；邓振镛高级工程师审阅编写提纲；李春虎、邹立尧、任健、王咏青、余锦华、沈武、代刊、滕代高、余晖、高云、周嘉陵、黄世成、王晓芳、张玉娟、王金花、卓嘎、李云艳、王国荣、翟伶俐、黄波、蒋骏、程光光、程莹、付昌、刘传熙、朱复成、马镜娴等参加本书部分工作。气象出版社陈红编辑做了繁重的文字工作。对他们付出的辛勤劳动，作者在此一并致谢。

作者还感谢中国气象局兰州干旱研究所张强所长及全所同志。

本书的出版，受到甘肃省科学技术厅和国家自然科学基金委员会的资助，表示特别感谢。

本书付梓仓促，虽经再三校核，而且西北干旱问题极其复杂，相关文献极为丰富，受编著者学识所限，错漏在所难免，敬请不吝指正，深表感谢。

罗哲贤

2005年1月

目 录

前 言

第一章 绪论	(1)
§ 1 引言	(1)
§ 2 西北干旱强讯号研究框架简介	(3)
§ 3 近年来干旱成因及其应用研究的若干结果	(4)
参考文献	(5)
第二章 青藏高原热状况与西北干旱	(7)
§ 1 青藏高原加热场对西北干旱形成的作用	(7)
§ 2 青藏高原周围下沉支与西北干旱的联系	(9)
§ 3 青藏高原地面加热场强度与西北地区初夏干旱的联系	(12)
§ 4 青藏高原季风对西北干旱的影响	(16)
§ 5 青藏高原积雪的影响	(18)
§ 6 青藏高原局域加热在西北干旱形成中的作用	(20)
§ 7 青藏高原涡旋能量频散与高原东北侧干旱的形成	(32)
参考文献	(36)
第三章 厄尔尼诺事件与西北干旱	(39)
§ 1 厄尔尼诺与西北旱涝联系的观测事实	(40)
§ 2 其它海区 SST 异常与西北干旱的联系	(44)
§ 3 厄尔尼诺与西北干旱相关的稳定性问题	(50)
§ 4 厄尔尼诺事件影响西北干旱的可能机制	(54)
§ 5 理想模式中非轴对称扰动的吸收和发展	(59)
参考文献	(64)
第四章 西太平洋台风活动与西北干旱	(67)
§ 1 台风活动与西北干旱联系的观测事实	(67)
§ 2 台风对西太平洋副热带高压短期时间尺度变化的作用	(74)
§ 3 台风活动对副热带高压位置和强度的作用	(82)
参考文献	(88)
第五章 西北干旱环流及其前期演变特征	(90)
§ 1 西北干旱环流的基本特征	(90)
§ 2 西北干旱环流的垂直结构	(101)
§ 3 西北干旱环流物理量的诊断分析	(105)
§ 4 西北干旱前期环流演变	(115)

§ 5 西北重大干旱年份环流特征	(122)
参考文献	(128)
第六章 西北地区降水量长期演变规律的研究	(130)
§ 1 西北地区降水量的主要周期	(130)
§ 2 降水量三年周期的稳定性问题	(135)
§ 3 西北干旱变化趋势的基本特征	(138)
§ 4 西北地区东部干旱化的若干事实	(150)
§ 5 西北地区降水量时间演变的混沌特性	(155)
§ 6 模式大气中流型的准三年周期振荡	(164)
参考文献	(168)
第七章 近年来西北干旱强讯号研究的若干进展	(171)
§ 1 平流层环流特征及其与我国东部降水量的联系	(171)
§ 2 西北干旱的平流层环流特征	(173)
§ 3 西北干旱与长江中下游梅雨的联系	(179)
§ 4 西北地区东部可降水量的变化趋势	(184)
§ 5 厄尔尼诺事件影响的不同类型	(189)
参考文献	(190)
第八章 涡旋自组织的初步研究	(193)
§ 1 非轴对称双涡的自组织	(193)
§ 2 多涡自组织的过程	(203)
§ 3 多涡自组织的条件	(211)
参考文献	(223)
第九章 总结和展望	(225)
§ 1 西北干旱研究的若干进展	(225)
§ 2 西北干旱研究的展望	(231)

第一章 绪 论

§ 1 引 言

1.1 西北干旱研究的意义

西北地区东部位于青藏高原东北侧。从气候上区分,大体上属于东南季风的边缘区域。同时又受到西风带环流、高原季风和高原天气系统的影响,夏半年有时还会受到在我国东南沿海登陆台风的间接影响,这些使得该地区的气候问题变得极其复杂。

我们知道,一个科学问题越是复杂,就越容易引起人们的关注;而且全球气候对人类活动(如二氧化碳排放量增加)的响应,往往在气候带交接的边缘区域表现得最为清楚。因此,西北地区东部的干旱问题始终受到我国气候工作者的重视。20世纪80年代中后期,在西北重镇兰州举行的一次干旱会议,吸引了全国一百多位气候专家和学者到会,就是一例。

西北地区东部干旱问题的研究结果,不仅可以提供给其它学科参考,有时甚至是必不可少的。冰川进退,污染扩散,植树种草,作物品种培育,城乡规划设计,项目环境评价等等都与重大干旱事件及干旱化趋势密切相关。

西部大开发的一个关键问题是水资源。水资源涉及到空气中可降水量的多少,自然降水的变化规律,冰川积雪的存储量及其融化速度等。这些都离不开干旱气候领域的研究。同时,干旱监测预测在工农业生产和国民经济发展中的作用也十分重要。

1.2 研究背景和研究历史

1.2.1 从大气环流到全球变化

20世纪50年代到80年代中期,在我国大气动力学领域,东亚大气环流是一个重要的研究方向。在此期间,已经有一系列论著问世,如关于6月和10月大气环流的季节突变,东亚大气环流的若干问题,青藏高原经圈和纬圈垂直环流的研究,南亚高压低频振荡的研究等。

20世纪90年代,中国科学院大气物理研究所为叶笃正院士出版了一本纪念性的论著。书名是《从大气环流到全球变化》。这个书名高度概括了叶先生从1940年代到1990年代50年研究领域的要点,转折和拓展,这也是西北干旱研究背景的一次变化。

20世纪80年代后期,陶诗言院士在兰州曾做过一次学术演讲,题目是“南半球季风活动对我国西北干旱的影响”。这意味着我国科学家已经认真地以全球范围的眼光来看待西北干旱问题了。这是研究观念上的一个改变。干旱研究背景的这个变化,在西北地区东部干旱研究的历史上是有迹可寻的。

20世纪50年代到80年代中期,西北地区东部干旱研究的一个侧重点是干旱环流的分型及其前期演变特征。1980年代后期,白肇烨、徐国昌^[1]在《中国西北天气》一书中,用

一章总结了西北干旱的研究成果,其中,干旱环流占据了相当的篇幅。我们注意到,此类研究曾经受到前苏联房根盖依姆关于“自然天气周期”和“自然天气季节”概念的启发;这些研究又启发了后来的不少工作,包括我们已经做的和现在正在做的一些工作,如阻塞流型及其相应的强迫场等^[2]。

20 世纪 80 年代后期起,以全球范围眼光看待西北干旱的另一个例子是朱炳瑗和李栋梁^[3,4]的研究。他们在赤道东太平洋海温异常和西北旱涝之间建立了联系,并用于预测业务。

八五(1991—1995 年)期间,“中国西北干旱气候的成因、预测和对策研究”是中国气象局的一个重点课题。九五(1996—2000 年)期间,“中国西北干旱气候变化与预测研究”是国家科技部重中之重项目的一个专题。这两项研究均已论著^[5,6]汇总问世。目前,作为十五(2001—2005 年)期间甘肃省重点科研课题的“西北干旱成因及其应用研究”,在省科技厅和省气象局的联合资助下,正在执行过程之中。在这三个课(专)题的结果中,以全球范围眼光分析西北干旱问题的工作已占据相当大的比重。

1.2.2 从大气圈到东亚气候系统

20 世纪 80 年代后期以来,研究背景的另一个重大变化是从大气圈向东亚气候系统的改变^[7]。也就是说,以前一般把 500hPa 的干旱环流型看成是西北干旱的直接原因;现在则要全面分析东亚气候系统对西北干旱的综合作用。这里,东亚气候系统的成员包括:大气圈中的东亚季风、西太平洋副热带高压、中纬度扰动、海洋圈中的 ENSO 循环、热带西太平洋暖池和印度洋的热力状态、青藏高原的动力、热力作用,以及高原积雪和欧亚大陆积雪等。除了要弄清东亚气候系统各个成员各自的作用外,还要弄清各个成员之间的相互作用,这就涉及到非线性相互作用的新领域。

我们注意到,研究背景的另一变化,对西北干旱研究的影响也有所体现。对青藏高原热力、动力作用等关注正在日益加深。这方面的例子可以在文献^[8,6]中看到。由于问题的复杂性,距问题的彻底解决尚待时日。

除上述两个方面的变化外,计算机的普及,信息量的扩大(数值预报产品输出和再分析资料增加),释用技术和统计方法的改善也促使台站范围干旱预测技术的进步。

1.3 西北地区东部干旱的强讯号

西北地区东部干旱研究适应上述研究背景的变化,已完成了大量的工作。这些工作涉及面太多,篇幅数量很大,不易弄清脉络。幸好,陶诗言先生^[6]从干旱强讯号的角度将其条理化。陶先生指出:最强的干旱讯号是高原下垫面热状况(含感热、积雪和高原季风),厄尔尼诺事件和台风活动;其次是南亚高压、西太平洋副热带高压(简称西太副高)的活动,还有区域降水量自身演变的特点。

1.4 章节安排

根据上述对我国西北干旱研究的发展脉络,作者将本书的章节安排如下:

本书第一章为绪论。第二至第六章依次叙述西北干旱预测的几类强讯号及其相关研究。它们包括:青藏高原热力状况(第二章),厄尔尼诺事件(第三章),台风活动(第四章),干旱流型及其前期演变(第五章)和区域降水量演变特征(第六章)。第七章介绍近年来西

北干旱研究的部分新结果及相关的背景材料。第八章概述涡旋自组织动力学和若干进展。第九章为总结和展望。

§ 2 西北干旱强讯号研究框架简介

下面摘要介绍西北干旱几类强讯号的研究框架。在这些框架内,均已取得结果。

2.1 青藏高原热力状况

(1) 青藏高原、东亚和太平洋上空垂直环流圈的研究。叶笃正^[8]最先发现在高原上升的气流,有一支在西北地区中东部下沉,这支下沉气流与西北干旱有关。

(2) 提出了一系列表征高原热状况的物理量,如高原温度距平指数、高原地面加热场强度距平指标、OLR 指数、NCEP 地面热通量格点值、高原季风指数、积雪冷却强度等,发现在这些物理量和西北地区东部降水量之间存在联系。这些联系在西北干旱预测中具有应用潜力。

(3) 在模式大气中,分析了高原热源和高原天气系统在西北干旱形成中的作用。

2.2 厄尔尼诺事件的影响

(1) 厄尔尼诺年及其次年,西北地区东部旱涝的不同特点。

(2) 厄尔尼诺与西北地区东部旱涝相关的稳定性。

(3) 厄尔尼诺影响长期天气过程的可能机制。

(4) 除赤道太平洋东部海区外,太平洋其它海区、印度洋、大西洋海面温度异常与西北干旱的相关性。

2.3 台风活动与西北干旱的联系

(1) 长期以来,人们认为台风主要影响我国东南沿海地区,对相距遥远的东北、西北似乎影响不大。近年来,这种状况正在发生改变。如黑龙江省气象工作者发现:台风也是造成该省暴雨的重要天气系统,并建立了“黑龙江省台风暴雨专家系统”。又如黄小莉^[9]普查了西北地区东部的 10 次特大降水过程,发现其中有 7 次,均与我国东南沿海的台风有关。

(2) 台风活动多少与西北旱涝的诊断分析。

(3) 模式大气中,台风影响西太副高的位置和强度,进而影响东南季风深入内陆的程度。据此初步解释了台风影响西北干旱的一种可能原因。

2.4 干旱环流型及其前期演变

(1) 中纬度西北地区东部干旱月和多雨月 500hPa 环流的基本特征。

(2) 副热带高压脊线位置与西北地区东部降水的相关分析。

(3) 西北干旱整层环流特征的分析,包括 300、400、500、600、700hPa 各层次的环流特征。

(4) 干旱环流物理量的诊断分析。

(5) 干旱前期环流演变特征的研究。

2.5 区域降水量自身演变特点

- (1) 降水量年际变化的主要周期。
- (2) 降水量主要周期的稳定性。
- (3) 西北干旱化趋势的分析。
- (4) 降水量时间演变的混沌特征及可预报年限的研究。
- (5) 模式大气中流型的准 3 年周期振荡。

§ 3 近年来干旱成因及其应用研究的若干结果

上节内容大多涉及八五、九五期间的工作结果。本世纪以来,除在上节框架内继续研究外,还有一些新的工作正在开展,其中有些结果已经发表。

3.1 高度场扰动的吸收和发展

20 世纪 70 年代以来,曾庆存^[10]提出了旋转适应理论。该理论证明,在一定的条件下,旋转大气中轴对称带状环流上叠加的扰动将被基流吸收,运动趋向于轴对称状态;但在另一些条件下,则不可能有完全的适应,甚至走到适应的反面——扰动强烈发展。同时指出,旋转适应理论揭示了旋转流体运动的一个最基本的性质,有可能用来解释自然界中更广泛的现象。这一点在台风动力学中已得到证实^[11]。

我们知道,在厄尔尼诺事件期间,赤道东太平洋海温会升高,在该区上空的热源异常会引起热带东太平洋上空 500hPa 扰动高度场出现正距平区。这个正距平区即可视为非轴对称的扰动。按照旋转适应理论,这个扰动既可能被轴对称环流吸收,也可能在基流中维持、发展、向外传播。至于究竟出现哪一类演变,理应认真分析,分别对待。从这个角度来看,将厄尔尼诺事件和西北干旱之间建立一一对应的确定性联系,不加区分,一概用于预测业务,可能有些欠缺,看来需要进一步完善。这方面的研究工作正在进行之中。

3.2 东亚气候系统各成员的异常对西北地区水汽通量的作用

近年来国内外对区域可降水量和水汽通量散度问题比较关注。蔡英、钱正安、宋敏红^[12]认为,近 50 年来,西北地区东部大气可降水量逐渐减少,这可能是该区域明显干旱化的一个原因。我们也对此进行着研究。

3.3 梅雨活动与西北干旱的联系

近来的分析表明,长江中下游的梅雨活动与西北地区东部旱涝之间也有比较清楚的联系,这与台风活动有些相似。由于我国气象工作者对梅雨的形成规律有更长时间的深入研究,这方面的积累有可能被用于西北干旱预测。如鄂霍茨克海阻塞高压(简称鄂海阻高)是梅雨流型的重要成员。以往鄂海阻高动力学在西北地区东部并不是很受重视的。现在看来,既然梅雨与西北干旱关系密切,鄂海阻高理应受到更多的关注。这对于拓宽西北干旱研究的

思路是有益的。

3.4 平流层下层的环流特征

众所周知,在对流层下层 850、700hPa 的历史天气图上,常常有一些空间尺度比较小的天气系统。在对流层中层 500hPa 图上,这些小的系统不再存在。长期天气预报可能与空间尺度较大的系统关系更密切一些,因此,一般分析干旱流型时,常用 500hPa 图。

随着平流层资料的日益丰富,对平流层流型的关注度也有所提高。其中的一个原因就是平流层环流比对流层中层环流更为稳定,受近地面较小尺度系统的“干扰”更小。此外,与 500hPa 干旱流型这个二维图像相比,从对流层扩展到平流层下层,可以得到相应的三维图像,这样可使认识深化。关于平流层下层西北干旱的流型特征目前也有一些新的结果。

3.5 涡旋自组织的研究

徐国昌(见[1]第四章)很早就指出,对干旱月平均环流的分析一般是与多雨月平均环流对比进行的。从这个工作思路出发可以得到更全面的认识。我们把这个思路也用于本书的编写。

一场透雨(大雨和暴雨)往往使干旱缓解或者使一次干旱事件结束。从这个角度来说,干旱之所以持续不能缓解,与大雨、暴雨不能生成直接有关。也就是说,干旱成因与暴雨成因两者之间是有联系的。

夏建平(见[1]第五章)对西北地区东部暴雨预报的着眼点做过总结。他认为,有些着眼点与国内其它地区相同,如注意副热带和热带环流系统,注意风场辐合和水汽条件,注意边界层系统等。还有些着眼点则考虑了区域的特殊性,其中之一是中尺度系统的就地生成和发展。具体过程如下:在高原东侧容易形成积云团,其云底海拔高度较高原主体积云低,云体含水量多。云团生成后,随副热带高压外围偏西南气流向东北方向移动,与高原北侧西风带冷槽南端云块合并。在云图上白亮云块范围扩大,成为较典型的中尺度对流复合体,会形成暴雨。这个复合体称之为暴雨云团。夏建平的这一论述是根据 46 次云团生成归纳的,而非有些一次个例分析的工作可比拟的。

20 世纪 90 年代后期,在青藏高原上空,也发现有多云块合并,形成一个较大尺度云团的观测事实^[13]。

从这些观测事实中可以提炼出一个科学问题,即两个或多个云块合并的条件、过程以及合并后云团的统计性质。据文献^[14],云块与涡块具有一定的等价性,因此,作为简化,云块合并可用涡块合并来代替。这就需要分析双涡或多涡合并的动力学,或者说,需要分析初始多个涡块是如何一步一步组织起来,形成一个较大尺度的涡结构。这就需要研究双涡或多涡自组织的动力学。这方面目前已有一些新结果。此外,用云模式直接分析云块合并的工作也在进行。

参 考 文 献

- [1] 白肇烨,徐国昌.中国西北天气.北京:气象出版社,1988,152~201
- [2] 罗哲贤.阻塞高压形成机制的数值研究.中国科学 B 辑,1989,6:665~672
- [3] 朱炳瑗,李栋梁.1845—1988 年期间厄尔尼诺事件与我国西北旱涝.大气科学,1992,

16 (2): 185~192

- [4] 朱炳瑗, 李栋梁. 热带太平洋海温与中国西北夏季降水的关系. 气象学报, 1991, 49 (3): 21~28
- [5] 孙国武. 中国西北干旱气候研究. 北京: 气象出版社, 1997, 384 页
- [6] 谢金南. 中国西北干旱气候变化与预测研究. 北京: 气象出版社, 2000, 第一卷, 1~347; 第二卷, 1~308; 第三卷, 1~376
- [7] 黄荣辉等. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究. 大气科学, 2003, 27 (4): 770~787
- [8] 叶笃正, 杨广基, 王兴东. 东亚和太平洋上空的平均垂直环流 (一): 夏季, 大气科学, 1979, 3 (1): 1~11
- [9] 黄小莉. 不同区域大尺度涡旋系统相互影响的初步研究 [M], 85—906—07 课题组, 台风科学、业务试验和动力学理论的研究, 第 2 分册. 北京: 气象出版社, 1996, 105~109
- [10] 曾庆存. 旋转大气中运动的非线性相互作用和旋转适应过程. 中国科学, 1979, (10): 986~995
- [11] 罗哲贤. 台风轴对称环流和非轴对称扰动非线性相互作用的研究. 中国科学 D 辑, 2003, 33 (7): 686~694
- [12] 蔡英, 钱正安, 宋敏红. 华北和西北区干湿年间水汽场及东亚夏季风的对比分析. 高原气象, 2003, 22 (1): 14~23
- [13] 马禹, 王旭, 陶祖钰. 中国及邻近地区中尺度对流系统的普查和时空分布特征. 自然科学进展, 1997, 7 (6): 701~706
- [14] Chen Y, Yau M K. Spiral bands in a simulated hurricane. Part 1: Vortex Rossby wave verification. J Atmos Sci, 2001, 58: 2128~2145

第二章 青藏高原热状况与西北干旱

陶诗言先生指出：西北异常干旱最强的一个信号是青藏高原下垫面的热状况。高原下垫面热状况在西北干旱问题中能位居如此重要的地位，必定有其独到的原因。本章试图从三个方面对此分析和综述。

第一，众所周知，夏季青藏高原下垫面平均而言是热低压环流，低层辐合。辐合的气流上升。有上升必有下沉，叶笃正先生等最先发现有一支下沉气流落在西北地区中、东部，形成气候干旱。这支下沉气流在异常干旱年份会明显加强。此外，高原北侧西风绕流及高原侧边界效应又会在西北地区中、东部形成一片负涡度区及相应的反气旋流场，其中包括兰州小高压。这些对西北干旱形成也有影响。关于这些问题，在 § 1、2 节讨论。

第二，青藏高原热状况与西北地区降水量之间存在着大量的统计联系，这些联系通过统计学的检验，可以认为是一种客观存在的观测事实。这些事实显示了高原热状况在干旱预测中的重要性。为了将这些联系定量化，需要对高原热状况用若干特征量来描述。这些特征量包括：高原温度距平指数、高原地面加热场强度距平指标、OLR 指数、NCEP 地面热通量格点值、高原季风指数、积雪冷却强度等。这些特征量与年、季、月西北地区降水之间的联系及其应用，在 § 3、4、5 节讨论。

第三，在理想模式的框架内，在合理的参数范围，数值试验的结果显示：高原局域热源在西北干旱流型的形成中起着不可或缺的作用；高原涡旋在东移过程中，能量频散和局域加热的共同作用，会在高原东北侧生成一片负涡度区。这些意味着，高原热状况和西北干旱之间的联系不仅是一种观测事实，而且在物理上也是合理的。这部分内容在 § 6、7 节讨论。

§ 1 青藏高原加热场对西北干旱形成的作用

我们知道，夏季相对于周围的自由大气，青藏高原是对流层中部的一个大热源，该热源与周围大气组成一个热机。从转盘试验看^[1]，这个热机的作用是很清楚的。它的一个结果是：加热模型的中部为上升系统，它的南北两侧各有一个下沉区，此外，从北边向加热高原辐合的气流不是来自低空，而是产生于高原模型的高层附近。从这支向高原辐合的气流中分出一支，在高层北坡下沉。

叶笃正等^[2]的结果指出：这些转盘试验的结果在实际大气中依然存在。

文献 [2] 中，所用的资料取自中央气象局出版的《北半球高空气候图集》。在 $50^{\circ}\text{E} \sim 130^{\circ}\text{W}$ 、 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 范围内从图集上读出 850、700、500、300、200 和 100hPa 上每 5 个经纬

度格点上的 u (纬向风) 和 v (经向风), 用下列方程

$$D = \frac{\partial u}{\alpha \cos \varphi \partial \lambda} + \frac{\partial v}{\alpha \partial \varphi} - \frac{v \tan \varphi}{\alpha} \quad (2.1)$$

计算出各层散度 (D) 的分布, 然后通过垂直积分算出垂直运动 (ζ)。下界自 850hPa 算起, 850hPa 上的 w 为

$$w = \sqrt{\frac{K}{2f}} \zeta \quad (2.2)$$

上界积到 100hPa。上式中的 $f=2\omega \sin \varphi$ 为科氏参数, ζ 为 850hPa 的涡度, K 为涡动黏滞系数取 $30\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。但由于 100hPa 上的 w_{100} 可能有积累误差, 为消除这种误差, 人为地把 w_{100} 减少一半, 并将这减少的一半按比例修正下面各层的 w , 修正系数到 850hPa 减少为零。青藏高原的平均高度在 4km 以上, 故在这里 500hPa 作为下界。在这些地方还考虑了地形爬坡作用。

计算结果分布很合理, 上下配置也很相宜。一般量级为若干 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大值达 $3\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 发生于孟加拉湾。从大形势上看以及和过去的工作相比, 计算结果是可信的。

计算结果显示, 在高原主体, 7 月平均为一强大的上升气柱, 在 300hPa 以上从这个上升气柱向南北两侧辐散, 在两侧的狭窄区域下沉形成两个南北环流圈 (图 2.1)。

这两个小环流圈是因为相对于四周大气高原是个加热区而产生的, 此结果与转盘模拟实验的结果^[1]相同。在 Hahn 和 Manabe^[3]的夏季西南季风的数值试验中, 高原的南北侧也有这两个环流圈, 不过他们计算的位置与实况不符。

在高原南侧环流圈的下沉支的下面, 有深厚的西南季风向高原爬坡上升。再向南进入了季风环流圈的大规模上升区, 这个上升区一直延续到 5°N 以南。从 $75^\circ \sim 110^\circ\text{E}$ 的平均经向环流图 (图 2.2) 看, 这个季风环流的下沉气流将落在南半球的热带地区。

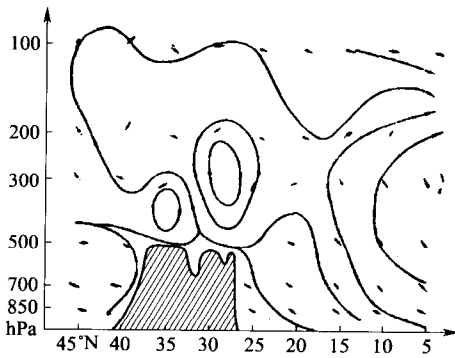


图 2.1 沿 90°E 平均七月经圈垂直环流, 垂直距离扩大 200 倍

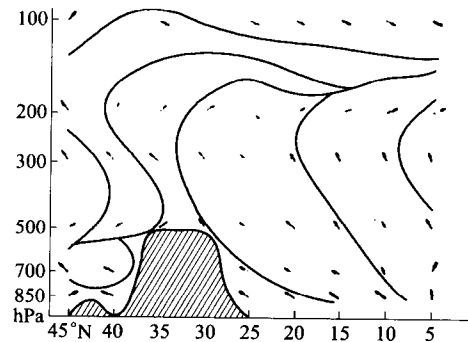


图 2.2 $75^\circ \sim 110^\circ\text{E}$ 平均七月经向垂直环流, 垂直距离扩大 200 倍

高原北侧的情况和南侧是不对称的, 这里向高原辐合的气流发生在 500hPa 左右比较浅薄的一层 (图 2.1)。这支向高原辐合的偏北气流与从南面向高原辐合的偏南气流相遇于 $30^\circ \sim 35^\circ\text{N}$ 之间, 这正是高原上夏季辐合切变线的平均纬度。从图 2.1 我们还看到, 这股从北面向高原辐合的气流在 500hPa 左右分出一股沿高原北坡下滑, 这一下滑气流不仅出现于

90°E 的剖面, 沿 80°~90°E 的经向剖面都有这样的下滑风。上述这种现象在转盘模拟实验里也是存在的。

在沿 35°N 的纬向垂直环流图 (图 2.3) 上, 从高原流出的气流越到高空向东输送得越远, 而在高原以东的大陆上升的气流向东传送较近, 也就是说, 从高原主体上升的气流对西太副高的加压作用影响不大, 而主要是下沉到中东太平洋副高区内。从这点来看, 青藏高原与中东太平洋尤其是东太平洋有着密切的遥相关。从西边下沉到西太副高的空气, 只是来自青藏高原以东的大陆上升气流。这些从沿 30°N (图略) 的纬向垂直环流也看得很清楚。在这巨大的东西环流之内还有波长较短的波动, 它的波谷正好位于高原东侧, 可以推断, 这个波动是高原动力和热力的共同作用引起的。在模拟实验里也出现了这种波动。

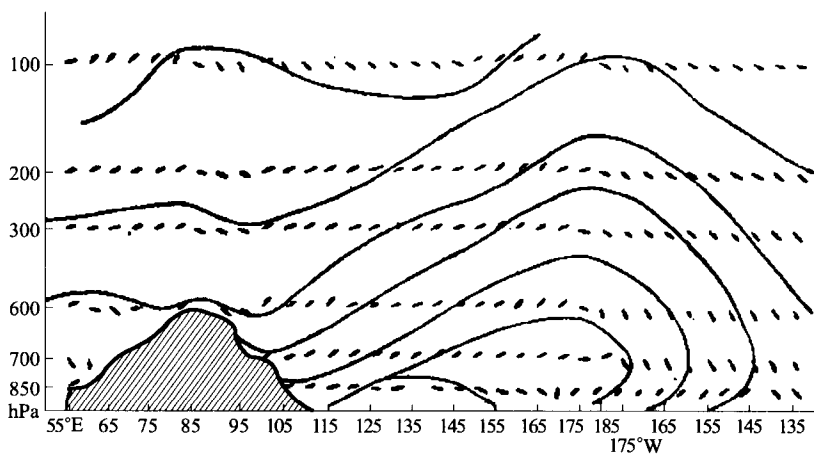


图 2.3 沿 35°N 的平均七月纬向垂直环流, 垂直距离扩大 500 倍

上述高原北坡经向环流圈的下沉气流, 沿北坡的下滑气流, 以及纬向垂直环流较短波长的波谷, 对于西北地区东部干旱气候的形成, 都有着重要影响。

§ 2 青藏高原周围下沉支与西北干旱的联系

叶笃正等^[2]的研究, 首先揭示了在高原南北侧存在次级垂直环流圈的观测现象, 也为西北干旱研究提供了一条新的途径。此后, 沿着这条途径, 徐国昌和张志银^[4]、吴统文和钱正安^[5,6]做了进一步的分析, 取得了新的结果。

徐国昌和张志银^[4]使用的资料是《高原气候图集》^[7]和《中国高空风资料》^[8]。这些资料与文献 [2] 所用资料《北半球高空气候图集》^[9]相比, 测站更多, 在高原及附近计有 81 个测站的资料可用。物理量的计算方法与文献 [2] 相同。

图 2.4 是 7 月 500, 300hPa 平均垂直速度场。由图可见: 下沉运动中心位于南疆东部到柴达木盆地西部, 300hPa 中心强度达 $+12 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。高原主体部分为上升运动, 长轴成东西走向, 300hPa 中心强度达 $-10 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。四川盆地到黄河下游为上升运动。

垂直速度场的分布与7月平均降水量的分布(图2.5)对应得比较好。例如,南疆东部到柴达木盆地西部的强下沉运动与少雨中心相配合,四川到黄河下游的上升运动带与多雨带相配合,在青藏高原东北侧自北向南伸向宁夏和甘肃中部的干舌在垂直速度场上也有反映。这说明高空资料比较稠密的平均垂直速度场对雨带和降雨中心有一定的反映能力,同时也说明垂直速度场的计算基本上是可信的。

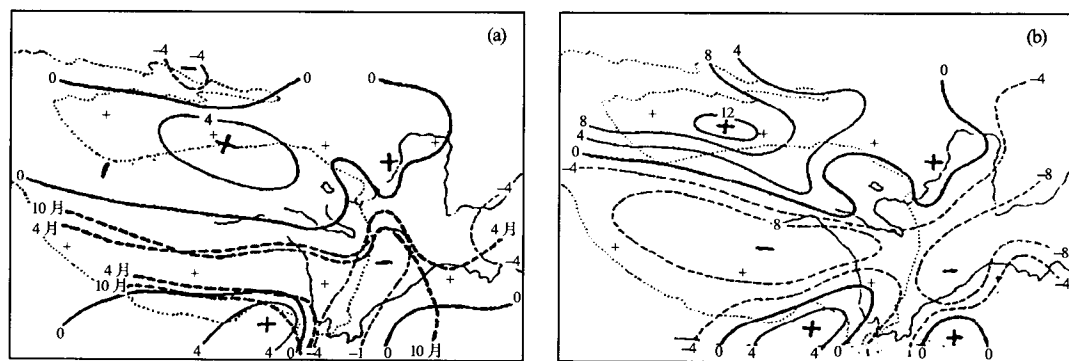


图 2.4 7 月平均垂直速度场 (单位: $10^{-4} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

a. 500hPa; b. 300hPa, 粗断线为 4 月、10 月垂直速度的零线

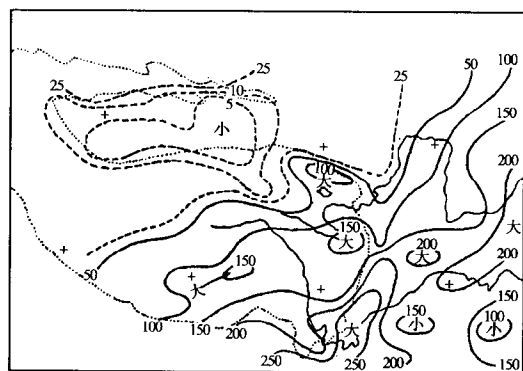


图 2.5 7 月平均降水量 (mm)

北侧 700hPa 多小高压活动,并认为是高原西风绕流的动力作用形成的。事实上高原北侧边界层(以 700hPa 为代表)全年均盛行偏西风。看来主要由于高原北侧的侧边界摩擦作用使高原北侧形成一条东西向的负涡度带(图 2.7ab)。最近纪立人、沈如金等^[11],根据高原的纯动力侧边界摩擦作用,在高原北侧较好地模拟出边界层的反气旋性环流。文献[4]和他们的模拟结果是一致的。

在 500hPa 图上,高原东北侧 1 月、7 月也受负涡度区控制(图略)。

叶笃正等^[2]、徐国昌等^[4]的研究中,所用的资料是 20 世纪 60 年代的。吴统文和钱正安^[12]根据 1979—1986 年 8 年 ECMWF 逐日格点资料,得到了沿 90°E 的 7 月平均经圈环流圈。文献^[12]的一个特点是,将干旱年和湿润年区分开来研究。他们先用新疆诺羌、和田和

4 月、10 月垂直速度分布与 7 月类似(图略),但高原北部的下沉运动区域更加扩大(见图 2.4a 上的粗断线),高原主体上的上升运动区显著缩小。

1 月青藏高原附近盛行下沉运动,主要下沉运动中心位于高原东北侧(见图 2.6)。

可以看出,青藏高原北侧和北部柴达木盆地一带,一年四季均盛行下沉运动。

由边界层垂直速度方程可以看出,边界层垂直速度由边界层涡度决定,边界层下沉运动的形成问题,实际上是负涡度的形成问题。高由禧、罗四维等^[10]早已注意到高原