

《国家重点基础研究发展规划》项目

我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究

第一部分 我国重大气候灾害的形成机理和
预测理论研究项目论文集(三)



青藏高原与西北干旱区 对气候灾害的影响

TIBETAN PLATEAU

吴国雄 孙菽芬 陈 文 等编

气象出版社

《国家重点基础研究发展规划》项目

我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究

第一部分 我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究
项目论文集(三)

青藏高原与西北干旱区对气候灾害的影响

TIBETAN PLATEAU

吴国雄 孙菽芬 陈文 等编

气象出版社

内容提要

本集是《国家重点基础研究发展规划》首批启动项目之一“我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究”第一部分“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究”项目论文集序列的第三集。它集中反映了本项目在关于青藏高原和我国西北干旱区热状况、陆面过程、陆-气相互作用及其对我国重大气候灾害影响的观测、分析和理论研究成果。本集共收入有关论文 16 篇,包括了以下三个部分的研究成果:

(1) 青藏高原热状况变化的气候效应及其对气候灾害的影响;

(2) 青藏高原和欧亚积雪对我国气候灾害的影响;

(3) 西北干旱区陆-气相互作用及其对气候的影响。

本书可供大气科学、海洋科学和环境科学的科研人员、有关院校师生参考;也可供从事防灾减灾、环境保护的工作人员和从事全球变化研究的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

青藏高原与西北干旱区对气候灾害的影响/吴国雄 孙菽芬 陈文 等编

—北京:气象出版社,2003.11

ISBN 7-5029-3680-7

I. 青… II. ① 吴… ② 孙… ③ 陈… III. ① 干旱区-影响-气象灾害-西北地区

② 青藏高原-影响-气象灾害 IV. P461

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 098349 号

青藏高原与西北干旱区对气候灾害的影响

吴国雄 孙菽芬 陈文 等编

责任编辑 李太宇 袁信轩 终审 纪乃晋

出版:气象出版社

发行:新华书店总店北京发行所 全国各地新华书店经销

出版社地址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

出版社电话:68406262

出版社网社:<http://cmp.cma.gov.cn/>

电子邮箱:ams@cma.gov.cn

印刷:北京市金瀑印刷有限责任公司

开本:787×1092 1/16

印张:13.5

字数:346 千字

定价:35.00 元

邮政编码:100081

传真号码:62176428

版次:2003 年 11 月第一版

印次:2003 年 11 月第一次印刷

印数:1~1000 册

ISBN 7-5029-3680-7/P·1302

《国家重点基础研究发展规划》项目

我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究

第一部分

我国重大气候灾害的形成机理和 预测理论研究

项目论文集总编辑委员会

主编:黄荣辉

编委:曾庆存 巢纪平 丑纪范

吴国雄 李崇银 王绍武

陈泮勤 张人禾 陆日宇

序

我国地处东亚季风区,由于东亚季风年际和年代际变化很大,因此,我国气候灾害发生频繁且严重,尤其是 20 世纪 80 年代以来,大范围的旱涝等重大气候和天气灾害已给我国工农业生产和国民经济带来严重损失。每年由于旱涝灾害造成经济损失达 2000 亿元左右,约占国民经济总产值的 3%~6%。1998 年长江流域、松花江和嫩江流域的特大洪涝灾害给国民经济带来了 2600 亿元的严重经济损失;1999~2001 年我国华北地区严重干旱不仅给工农业生产带来严重损失,而且严重影响到华北地区水资源和生态环境,特别是造成扬沙和沙尘暴天气剧增。因此,开展我国重大气候灾害的形成机理和预测理论的研究,提高跨季度和年度气候异常的预测水平,从而防御和减轻旱涝等重大气候灾害造成的经济损失是我国国民经济建设当务之急。

气候异常的机理及其预测是当前国际大气科学的前沿研究课题,也是“国际气候变率及其可预测性研究计划(CLIVAR)”的核心内容。鉴于我国重大气候和天气灾害的严重性,《国家重点基础研究发展规划》把我国重大气候和天气灾害的形成机理和预测理论作为首批项目的重点研究内容之一。此项目鉴于气候和天气灾害在时间和空间尺度的差别又分成两部分:我国重大气候灾害的形成机理和预测理论与我国重大天气灾害的形成机理和预测理论研究。第一部分“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究”作为我国参加 CLIVAR 国际计划的一个核心计划,此项目从我国旱涝重大气候灾害的发生为研究的切入点,从气候系统各圈层相互作用,特别是从“东亚气候系统”各成员的相互作用进行了深入分析,提出我国重大气候灾害的形成机理,并构建相应的气候数值模型,从而提出我国重大气候灾害的跨季度和年度预测理论和模式;并且,为了更好地揭示气候灾害的形成机理并在数值模型中能有更真实的物理参数,本项目还成功地进行了两个大型野外观测试验,获取了许多有关海—气和陆—气相互作用宝贵的科学观测数据。

在国家科学技术部的《国家重点基础研究发展规划》首批启动项目之一“我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究”第一部分“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究”的资助下,来自中国科学院有关研究所、教育部有关院校、国家气象局和国家海洋局,以 6 位中国科学院院士为指导的 70 多位专家组成的项目研究队伍经过四年多的辛勤努力,在重大气候灾害的形成机理和预测理论方面取得了重大进展。为了总结本项目在这四年多的研究成果,特别是反映本项目所取得创新和具有闪光点的研究进展,在项目全体参研人员的撰稿基础上,项目专家组特编辑如下论文集序列:

第一部:我国旱涝重大气候灾害及其形成机理研究

第二部:ENSO 循环机理和预测研究

第三部:青藏高原与西北干旱区对气候灾害的影响

第四部:气候系统的动力理论、模型和预测研究

在本论文集序列的编辑、修改与编排中,耿淑兰、王磊、刘春燕等同志作出了不少贡献,特此感谢。由于撰写和编辑此论文集序列时间匆忙,论文集的文章肯定有不少欠妥之处,恳请指正。

《国家重点基础研究发展规划》首批启动项目

我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究

第一部分 我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究(G1998040900(I))

项目首席科学家 黄荣辉

2003年4月10日

前 言

本集是《国家重点基础研究发展规划》首批启动项目之一“我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究”第一部分“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究”项目论文集序列的第三集。它集中反映了本项目在关于青藏高原和我国西北干旱区热状况、陆面过程、陆-气相互作用及其对我国重大气候灾害影响的观测、分析和理论研究成果。本集共收入有关论文 16 篇,包括了以下三部分的研究成果:

- (1) 青藏高原热状况变化的气候效应及其对气候灾害的影响;
- (2) 青藏高原和欧亚积雪对我国气候灾害的影响;
- (3) 西北干旱区陆-气相互作用及其对气候的影响。

参加本集编审工作还有黄荣辉院士、卫国安研究员、刘屹岷副研究员等。

吴国雄 孙菽芬 陈文

2003 年 4 月 20 日

目 录

序 前言

第一部分 青藏高原热状况变化的气候效应及其对气候灾害的影响

大气热力适应原理在青藏高原地区的应用·····	刘屹岷 吴国雄 刘 新 李伟平(3)
青藏高原加热对季节变化和我国夏季降水异常的影响 ·····	····· 吴国雄 段安民 刘屹岷 李伟平 刘 新(17)
青藏高原的地面加热作用及其变化特征 ·····	李国平 卢敬华(29)
青藏高原东侧地区夏季气温变化及其成因分析 ·····	李跃清 李崇银(38)
青藏高原热状况和 ENSO 对季节转换年际变化的影响 ·····	····· 毛江玉 吴国雄 刘屹岷(48)

第二部分 青藏高原和欧亚积雪对我国气候灾害的影响

青藏高原雪盖异常对初夏东亚季风的影响 ·····	孙照渤 刘华强 陈海山(65)
青藏高原冬春积雪异常对东亚季风和我国夏季降水的影响与机理分析 ·····	····· 韦志刚 黄荣辉 陈 文(76)
欧亚积雪异常分布对东亚冬季风环流的影响 ·····	陈海山 孙照渤(96)
冬季格陵兰海、巴伦支海海冰变化对局地大气的影响 ·····	武炳义(110)
欧亚冬季积雪异常分布影响东亚夏季气候的敏感性试验·····	孙照渤 陈海山(123)
积雪季节变化的数值模拟和敏感性试验·····	陈海山 孙照渤(132)
青藏高原积雪对 El Niño 事件的响应 ·····	刘华强 孙照渤 朱伟军(145)

第三部分 西北干旱区陆-气相互作用及其对气候的影响

西北干旱区敦煌戈壁局地陆面过程野外试验研究·····	张 强 卫国安 黄荣辉(157)
中国西北干旱区及青藏高原地区地表能量通量的卫星遥感参数化 ·····	····· 马耀明 苏中波 Osamu Tsukamoto 黄荣辉 等(178)
西北干旱区绿洲、沙漠相互作用的数值模拟研究 ·····	高艳红 吕世华(189)
我国典型干旱区边界层大气加热率的特征·····	胡泽勇 谷良雷 姚济敏 钱泽雨(199)

第一部分

青藏高原热状况变化的 气候效应及其对气候灾害的影响

大气热力适应原理在青藏高原地区的应用*

刘屹岷 吴国雄 刘 新 李伟平

(中国科学院大气物理研究所, LASG, 北京 100029)

摘要 本文首先使用再分析资料, 利用热力适应原理进行了盛夏季节大气环流场对于青藏高原热源强迫适应调整的诊断分析。结果表明高原加热作用造成的低层正涡源是低层气旋式环流得以稳定维持的重要原因。而边界层摩擦产生的负位涡是平衡正位涡的主要因素。加热还在高原上空形成负位涡, 侧边界位涡通量收支的分析表明, 西边界和南边界有净的正位涡向外输送, 但小于东边界和北边界的负位涡向外输出, 高原上空大气因而成为影响盛夏大气环流的负涡源。这也是青藏高原上空强大而稳定的反气旋环流得以维持的重要因素。然后利用 IAP/LASG GOALS 气候模式分别考察了青藏高原表面感热输送和表面摩擦拖曳对夏季青藏高压的影响。结果表明, 表面感热输送显著增强了高原近地层气柱中正涡度的制造和气旋性环流, 同时增强了高原上空气柱高层的负涡度制造和反气旋性环流。因而高原表面的感热输送和表面摩擦拖曳对夏季青藏高压都有增强的作用。表面摩擦拖曳对上空环流的影响随着高度升高而减弱, 而表面感热输送引起的高层负涡度的增加与低层正涡度的增加在数值上相当甚至更大。数值试验的结果证实高原表面的感热输送和表面摩擦拖曳对夏季青藏高压都有增强的作用, 验证了热力适应的理论研究和诊断研究的结果。

关键词 高原加热 热力适应 夏季环流

1 引言

夏季青藏高原大气受到强烈的加热; 高原表面有强大的低压环流, 高层有深厚的反气旋环流。关于青藏高原的热力作用是通过什么样的动力学机理影响大尺度环流场的问题, 一直是引起人们关注的一个重要课题。

自 20 世纪 50 年代以来, 叶笃正、Flohn 等一批学者就此开展了大量的研究^[1~7]。动力方面主要是高原大地的机械阻挡作用^[8~10], 热力方面主要是高原对大气的非绝热加热。关于高原的热力影响, 叶笃正等^[1]指出高原上空气柱在夏季是个热源区。朱抱真^[11~12]用环流资料计算了北半球 1 月和 7 月对流层下半部热源和热汇的分布, 并用小扰动法得到两层斜压模式的解析解, 显示考虑了热源和地形共同作用后所得扰乱流型更接近实况, 提出热源和地形作用通过动力过程在大气环流中相互制约的统一性。陈隆勋和李维亮^[13]利用 1979 年第一次青藏高原气象科学试验 (TIMEX) 资料重新计算了青藏高原热源强度。研究表明, 陆面上表面感热输送的贡献很大, 在雨季到来之后, 凝结潜热的作用也增强, 尤其是高原东部地区^[5, 14~16]。这个高耸的热源强烈影响东亚大气环流的季节变化, 并维持着亚洲夏季的季风环流。Wu 和 Zhang^[17]利用观测资料对高原表面感热对大气环流季节变化尤其是夏季风的阶段性爆发进行了详细的讨论。夏季强大的南亚高压位于青藏高原上空就与该地区大气的热源效应有密切关系。张琮^[18]根据观测资料诊断结果将该现象称为青藏高压 (南亚高压偏东的一类平衡态) 的“趋热性”——即向大气暖中心的位置靠拢。根据数值模拟结果, 吴国雄等^[19]提出了“感热气泵”的概

* 本研究得到《国家重点基础研究发展规划》G1998040900, 中国科学院重要方向创新项目 ZKCX2-SW-210 的联合支持。

念,认为春夏季高原表面感热输送造成了低层向高原地区的辐合,形成了夏季高原上空强烈的上升运动,由此造成的降水凝结潜热加剧了上升运动以及高空的辐散,维持着高原上空的高压。最近,吴国雄和刘屹岷^[20]提出“热力适应”的理论,揭示了高原上空非绝热加热的垂直不均匀分布是形成近地层浅薄热低压和中高层深厚的青藏高压的重要因素。

本文将综述我们近年的有关成果^[20~22]。首先利用位涡方程去分析大气中的热力适应过程,阐述热力适应的基本原理;第3节针对青藏高原上的热状况,通过资料诊断研究高原上非绝热加热对高原上空大气环流的维持的贡献;第4节利用数值试验分析高原上的感热加热和摩擦效应。讨论和结论在第5节给出。

2 热力适应的基本原理

2.1 位涡、涡度和环流

Ertel 位涡^[23](以下简称位涡) P 为单位质量流块的三维绝对涡度 $\vec{\zeta}$ 和位温的三维梯度的标量积,在坐标中即

$$P = \frac{1}{\rho} \vec{\zeta}_a \cdot \vec{n} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (1)$$

式中 $\vec{n}$ 为沿 θ 递增方向的单位矢量, Δz 为两 θ 面之间的厚度。在 θ 面上的单位面积元为 $ds = dx dy$, 对(1)式面积分可得

$$\frac{1}{S} P dm = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \zeta_{an} d\theta \quad (2)$$

其中 S 为 θ 面上的积分面积, ζ_{an} 为 S 面上沿 n 方向的平均绝对涡度。(2)式是从一般定义出发,与是否存在加热或(和)摩擦等外过程无关,因此具有普适性,其物理涵义可解释如下:

(a) 在绝热无摩擦场合, θ 和 P 守恒。因此绝对涡度的改变必须伴有面积 S 的改变, S 缩小,绝对涡度增加; S 增加,绝对涡度减小。

(b) 对截面积 S 不变的流柱而言,以质量为权重的位涡的增加(减少)必伴有以 θ 为权重的绝对涡度的增加(减少)。

为简单起见,考虑静力稳定的静止大气中有3个水平分布的等熵面,在区域 S 中,非绝热加热 Q 在下层($\theta_1 - \theta_2$)中由零单调增加到 Q ,在上层($\theta_2 - \theta_3$)中由 Q 单调递减至零(见图1a)。设 θ_1 面即为地面。这时在气柱中将发生如下两个过程:热力过程和动力过程,如图1所示。流场因而向加热场适应。

2.2 热力适应过程中位涡的平衡机制

通量形式的位涡变化的方程^[24,25]为

$$\frac{DW}{Dt} = \vec{F}_\zeta \cdot \nabla \theta + \vec{\zeta}_a \cdot \nabla Q, \quad (3)$$

其中 $\vec{F}_\zeta$ 为三维涡度方程中的摩擦耗散项, Q 为非绝热加热, $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla$ 。

$$W = \rho P = \vec{\zeta}_a \cdot \nabla \theta \quad (4)$$

为气块的总位涡。把 W 分解为垂直(W_v)和水平(W_h)两部分:

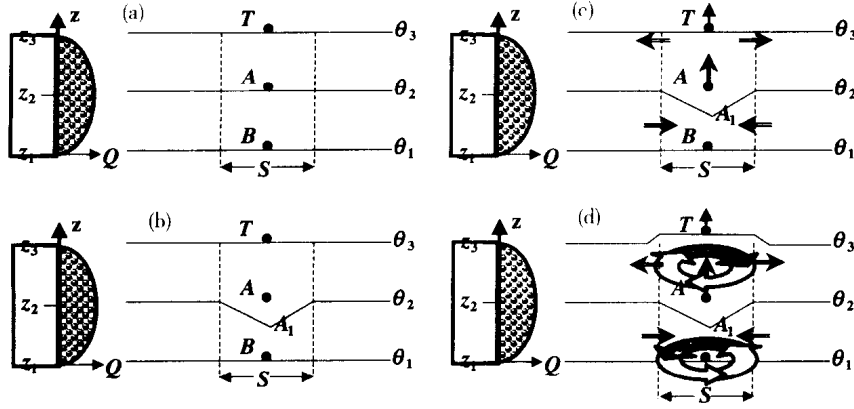


图1 大气环流(箭矢)对外部加热 Q 的热力适应的发展过程示意图(引自文献[20])

图中左侧表示区域 S 中 Q 随高度(等熵面)的分布, T 、 A 和 B 表示起始位于 θ_3 、 θ_2 和 θ_1 上的质点(参见 Hoskins^[24], Fig. 2); (a) 起始态; (b) 热力效应使气柱位温 θ 升高; (c) 动力效应使下层空气辐合, 上层辐散; (d) 热力适应使下层出现气旋环流, 高层出现反气旋环流; 顶部出现冷中心和“过流”

$$\begin{cases} W = W_v + W_h \\ W_v = (f + \zeta_z)\theta_z \\ W_h = \nabla \times \vec{V} \cdot \nabla_h \theta \end{cases} \quad (5)$$

取中纬度大气大尺度运动的特征值, 可知与热力适应相伴随的另一重要现象, 即沿着加热区的侧边界斜压位涡 $\nabla \times \vec{V} \cdot \nabla_h \theta$ 为负, 且其值大于正压位涡 $(f + \zeta_z)\theta_z$ 。这是维持气柱中位涡平衡的必要条件。

下层大气 $z_1 - z_2$ 层沿边界位涡的平衡性质为:

$$\begin{aligned} \nabla_h \cdot \vec{V} W &\approx \vec{F}_z \cdot \nabla \theta + \vec{\zeta}_a \cdot \nabla Q \\ (b) &> 0 \quad (d) < 0 \quad (e) > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

在区域 S 上从 z_1 到 z_2 对(3)积分, 并利用高斯定理则对长时间尺度的下层大气有:

$$\begin{aligned} \int_{z_1}^{z_2} dz \oint_{\Gamma} W \vec{V} \cdot \vec{n} dl + \int_S W_2 ds &= \int_{z_1}^{z_2} \int_S [F_z \theta_z + (f + a_s z) \frac{\partial Q}{\partial z}] ds dz \\ (b) &> 0 \quad (c) > 0 \quad (d) < 0 \quad (e) > 0 \end{aligned} \quad (7)$$

上式中 Γ 为区域 S 的边界线, 反时针为正, $\vec{n}$ 为 Γ 外法向上的单位矢量。由于低层辐合把周围 W 小的流体源源不断地输入区域 S 中($\vec{V}_r \cdot \vec{n} < 0$); 而 z_2 界面上的上升运动又把下层制造的正涡度向高层输送, 再根据(5)式, 可知(7)式中(b)~(e)各项的符号为(+), (+), (−), (+)。这就是说, 低层加热所制造的正涡度除了被摩擦耗散外, 还通过上界涡度的“逸散”及侧边界交换的“稀释”作用而保持平衡。表明正是由于加热使沿边界 θ 面的倾斜及斜压位涡 W_h 的加强, 导致位涡的稀释, 才使得加热区域中位涡的平衡得以维持。

在自由大气 $z_2 - z_3$ 层, $\frac{\partial Q}{\partial z} < 0$ (图1), 有负涡度制造及反气旋式环流形成。在该层中摩擦项可略。沿上层的边界 Γ 也出现对称不稳定结构, 其位涡平衡的性质成为

$$\begin{aligned} \nabla_h \cdot \vec{V} W &\approx \vec{\zeta}_a \cdot \nabla Q \\ (b) &< 0 \quad (e) < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

在区域 S 上从 z_2 到 z_3 对 (3) 式积分可得

$$\int_{z_2}^{z_3} dz \oint_{\Gamma} W \vec{V} \cdot \vec{n} dl - \int_S W_2 w_2 dS = \int_{z_2}^{z_3} \int_S (f + \zeta_z) \frac{\partial Q}{\partial z} dS dz \quad (9)$$

(b) < 0 (c) < 0 (e) < 0

因此,上层加热所制造的负位涡度一方面被底层上传的正位涡所“稀释”,但更主要的,必为沿边界 Γ 的负位涡的“散逸”所平衡。因此负的斜压位涡沿边界向外“散逸”是保持位涡平衡所必不可少的。

如果在 S 上从 z_1 到 z_3 对 (3) 式积分,则定常的位涡平衡关系可以由 (7) 和 (9) 式之和予以分析。这时通过界面 z_2 的位涡输送项 (c) 消失;在求垂直积分时加热项中的大项 $[f \frac{\partial Q}{\partial z}]$ 为零,唯余小项 $\zeta_z \frac{\partial Q}{\partial z}$ 的积分。换言之,在对 (3) 式从 z_1 到 z_3 的积分中, (b)、(d) 为大项。因此,表面摩擦制造的负位涡 [(7) 式中的 (d) 项 < 0] 必须靠上层大气中负位涡的“逸散” [(9) 式中 (b) 项 < 0] 才能建立平衡。这时,沿着气柱上层的侧边界负位涡的逸散 [9 式 (b) 项] 必须大于下层侧边界的正涡度的“稀释”。

综上所述,可以把热力适应过程中位涡的平衡机制用图 2 示意如下:在分层模型中 (图 2a),在加热随高度增加的底层,正的位涡制造被地面负的摩擦涡源、侧边界的负位涡输入及上边界正位涡的输出所平衡;在加热随高度减少的上层,负的位涡制造被下边界正位涡的输入及侧边界负位涡的输出所平衡。在气柱垂直积分模型 (图 2b) 中,摩擦施加于气柱的负位涡除了被气柱中正位涡的制造 $[\int_{z_2}^{z_3} \zeta_z \frac{\partial Q}{\partial z} dz > 0]$ 所抵消外,所余的负位涡在高层沿侧边界向外输送。

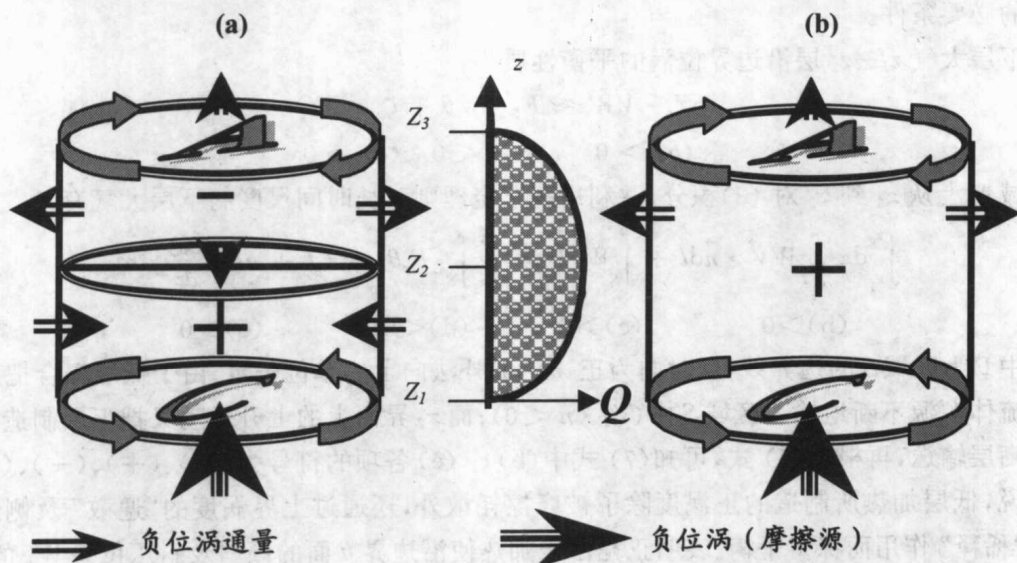


图 2 在大气热力适应的过程中总位涡 W 收支示意图 (引自文献 [20])

(+), (-) 表示总位涡的源和汇, 箭矢表示总位涡负通量的方向; (a) 在分层模式中; (b) 在整层气柱模式中

2.3 热力适应中的“过流”问题

在 θ_3 层上非绝热加热为零, 质点没有相对于 θ 面的“垂直运动”。在 z 坐标中在没有水平平流作用的场合, 由热力方程推知, 由于图 1 中 z_3 处 $\frac{\partial \theta}{\partial z} \neq 0$, 那里的垂直运动应为零。这里定义的“过流”(overshooting) 类似“上冲”, 就是指由于热力适应, 在 θ_3 层及以上层次仍然存在上升运动及反气旋性辐散(见图 1、2)。文献[20]已经证明“过流”是非绝热加热的必然伴随现象, 可以出现在较厚的层次中, 下面讨论过流在维持涡度平衡中的重要作用。

过流首先增加了 z_2 层以上反气旋涡度向外散逸($\int dz \oint W \vec{V} \cdot \vec{n} dl < 0$) 的垂直厚度, 更多的补偿了摩擦制造的负涡度; 其次过流的绝热冷却作用使 θ_3 面上凸(图 1d), 于是使 $z_1 - z_3$ 中 θ_z 减少。从位涡的观点来看, 整层气柱中静力稳定度的减少使气柱中正压位涡 W_z 减少, 于是沿边界的对称不稳定更迅速地出现, 从而加速了高低层位涡平衡的建立[见(7)、(9)两式]。后面的数值试验中将显示出过流及其在热力适应中的作用。

基于热力适应理论, 就可以研究青藏高原的热力强迫作用对大气环流维持的影响及其影响全球气候异常的机制。

3 青藏高原加热和大尺度流场的热力适应

刘新等^[21]从位势涡度(以下简称位涡)平衡的角度分析夏季青藏高原及邻近地区加热场和环流场的特征, 及通过高原侧边界的位涡通量; 利用热力适应理论讨论青藏高原非绝热加热对大尺度流场影响的机理。所用资料为 NCEP/NCAR 的再分析资料, 包括相对涡度和非绝热加热率。

3.1 夏季青藏高原及其邻近地区环流场特征及高原加热的气候特点

夏季青藏高原高空被强大而稳定的反气旋环流所控制, 对应着负涡度和辐散; 而低空则是一个较浅薄的气旋环流, 对应着正涡度和辐合(图略)。刘新等^[21]指出青藏高原高、低空环流场和涡度场的结构特点是与青藏高原上空大气的加热特性相关的。图 3 是 1986~1995 年 10 年平均的 7 月份青藏高原地区及孟加拉湾上空大气的加热率廓线图。图中所用资料来自 NCEP/NCAR 再分析数据集(Kalnay, et al.^[26])中的加热率资料。其水平分辨率为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ 经纬度网格。垂直方向 σ 从 0.995 到 0.0027 共 28 层。青藏高原区域取为 $(80^\circ \sim 100^\circ \text{E}; 27.5^\circ \sim 37.5^\circ \text{N})$ 。从高原上空的加热率廓线可以看出其最大加热层较低, 接近高原表面, 强度达 10Kd^{-1} 以上。这主要是由于地表的感热加热(大于 11Kd^{-1}) 所致。但纬度较低的孟加拉湾 $(80^\circ \sim 100^\circ \text{E}; 10^\circ \sim 20^\circ \text{N})$ 上空的加热率随高度增加, 最大加热层接近 300hPa, 与凝结加热率廓线基本是一致的。显而易见, 孟加拉湾地区上空大气加热主要来自凝结加热。正是这两个地区上空加热特性的不同, 使它们两者上空的环流场有不同的结构。

图 4 给出了该 10a 7 月平均的通过高原的位温和风场的垂直剖面。青藏高原加热作用在夏季非常明显。从 30°N 的纬向剖面图(图 4a)可以看到青藏高原上空气柱在同纬度带上位温最高, 而且高原及其东侧东亚季风区上空是同纬度带上升运动最大的中心(图中垂直运动 w 乘了 10^3)。在 90°E 的经向剖面(图 4b)中看到等位温面的最大暖中心位于青藏高原上空, 而且

高原上空有很强的上升运动,仅次于孟加拉湾区域。它表明7月份高原东侧和东亚季风区以及高原南侧和孟加拉湾地区是大气中重要的定常加热源。

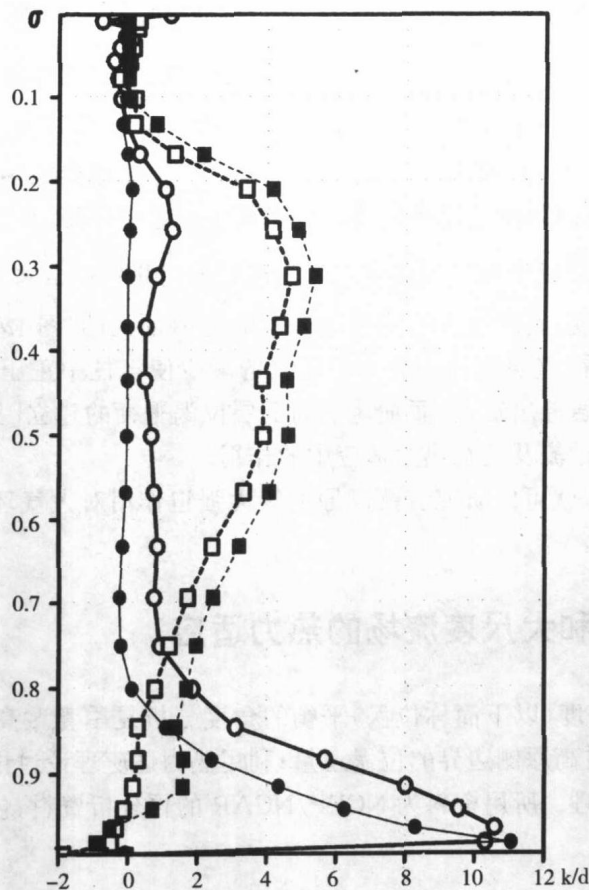


图3 10年(1986~1995)7月平均青藏高原和孟加拉湾上空加热率廓线(引自文献[21])
空心圆粗实线和实心圆细实线分别为高原上空平均的总加热率和垂直扩散加热率;
空心方块粗虚线和实心方块细虚线分别为孟加拉湾上空平均的总加热率和凝结加热率。
横坐标单位:K/d

3.2 位涡、位涡平衡和位涡方程诊断分析

对通量形式的位涡方程(3)求月平均,并用“—”和“'”分别表示月平均量和对月平均的偏差,由于局地变化项的月平均很小可以略去,可得

$$\nabla \cdot \bar{V}\bar{W} = \bar{\xi}_a \cdot \nabla \bar{\theta} + R \quad (10)$$

$$R = \bar{F}_\zeta \cdot \nabla \bar{\theta} + \overline{\bar{\xi}'_a \cdot \nabla \bar{\theta}'} + \overline{\nabla \cdot \bar{V}'W'} \quad (11)$$

其中 R 为(2)式的余差项,代表摩擦及时间尺度小于12h的瞬变过程的贡献。利用NCEP/NCAR 1986年至1995年7月的每日两次(00Z和12Z)再分析资料,计算了位涡方程(2)中各主要项。由于缺少逐日各层次的非绝热加热资料,计算中加热率($\theta = \frac{d\theta}{dt}$)由 θ 的空间分布作为视热源予以反算。

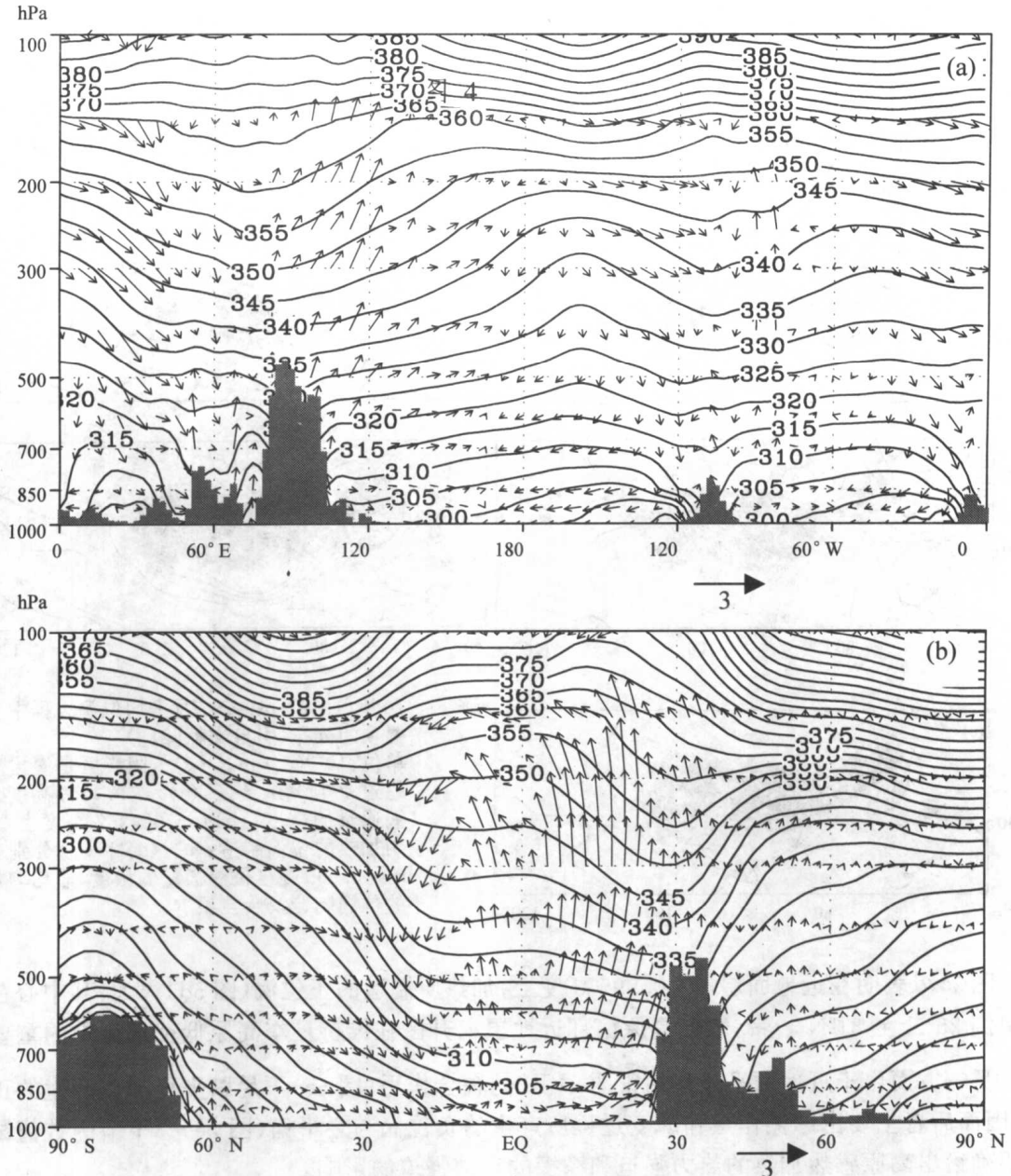


图 4 10a(1986~1995)平均位温和风矢量垂直剖面图(等压面)(引自文献[21])风场
单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 位温单位: K; (a) 7 月沿 30°N , (b) 7 月沿 90°E

图 5a, b 是 $\sigma=0.4357$ 高度(约为 250 hPa)上 10 年平均的方程(10)中的前两项, 即位涡通量的散度(a)和非绝热加热的位涡制造(b)的空间分布。图中的一个显著特点是在高原上空有负位涡通量的辐散大值中心。这与高原上空持续维持的反气旋环流是相应的。两个强度达 $2 \times 10^{-6} \text{ TU s}^{-1}$ ($1 \text{ TU} = 10^{-6} \text{ K s}^{-1} \text{ m}^{-1}$) 的负中心分别位于高原的东部和西北部。此两中心区域与(b)中加热项对负位涡制造的中心基本重合, 且二者的量级也相当。由此看出, 青藏高原上空反气旋环流维持所需的负涡度来源, 主要是空间非均匀的非绝热加热造成的, 或者说是非绝热加热制造的负位涡维持了高原上空负涡度通量的辐散。这一结果与我们过去的结果[7]有所不