

南京信息工程大学

硕士学位论文

沙漠地区春季近地层气象要素分布规律的观测研究

姓名：程穆宁

申请学位级别：硕士

专业：大气物理学与大气环境

指导教师：牛生杰

20080501

摘 要

沙尘天气作为一种灾害现象严重地影响着人们的日常生活, 为了深入了解沙尘天气条件下气象要素的变化规律, 本文利用 2005 年 1 月-2006 年 4 月朱日和地区 20m 气象塔的风向、风速、气温、相对湿度的观测资料及 PM_{10} 沙尘质量浓度数据, 结合天气形势, 分析了晴天、浮尘、扬沙以及沙尘暴天气条件下近地层气象要素的变化规律, 并将其结果进行对比分析。得出以下结论:

(1) 春季温度回升, 风速最大, 相对湿度最小, 利于起沙, 故沙尘天气频繁。风速满足幂指数率分布规律。在沙尘暴、扬沙、背景、浮尘的天气条件下, 春季近地面层风速梯度依次增大, 湍流动量、热量交换系数依次减小; 风向以西南为主。

(2) 浮尘、扬沙天气条件下气温的变化主要取决于长短波辐射的强弱和沙尘气溶胶的辐射强迫, 各气层平均增温率分别大于或小于同时段的背景大气; 气温在沙尘暴期间由于沙尘气溶胶的辐射强迫和冷空气的影响迅速减小, 平均降温率为 $0.61^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。

(3) 春季相对湿度的平均递减率(递增率)与平均增温率(降温率)的大小正相关。浮尘天气相对湿度的平均递减率大于同时段的背景大气; 扬沙天气相对湿度的平均递减率小于同时段的背景大气; 相对湿度在沙尘暴期间基本上呈递增态势, 平均增大率为 $2.80\%/h$, 2006 年 3 月 9 日的沙尘暴天气, 结束后比发生前相对湿度增大 32.81%。

(4) PM_{10} 质量浓度在沙尘暴、扬沙、浮尘天气条件下依次递减, 沙尘暴发生时的 PM_{10} 平均值是扬沙的 2.5 倍、浮尘的 2.6 倍、背景大气的 50.1 倍。

关键词: 沙尘天气, 近地层, 气象要素, PM_{10}

ABSTRACT

The dust weather events have affect people's daily life seriously as one kind of disaster, so we should study on the variation of the meteorological elements deeply during different dust weather. The characteristics of meteorological elements evolution of atmospheric surface layer during clean air, floating dust, blowing sand, and dust storm processes were studied using the observational data of wind speed, wind direction, temperature and relative humidity obtained from 20m meteorological tower in Zhurihe from January, 2005 to April, 2006 and PM_{10} mass concentration data with weather synoptic. Meanwhile, the processes are analyzed by contrast, the results show:

(1) The temperature rises rapidly, the wind speed is maximal and the relative humidity is minimal in spring, which is beneficial to remove the sand, so the sand dust weather is frequent. The wind speed accords with exponential disciplinarian and the exponential m could reflect well the change of wind speed in different altitudes. In the sand storm, blowing sand, clean air and floating dust weather condition, the wind speed of atmospheric surface layer raises gradually in spring. Meanwhile, the turbulent exchange coefficient diminishes gradually in spring. The main wind direction is southwest.

(2) The change of temperature during floating dust or blowing sand is affected mainly by long-wave, short-wave radiation and radiative forcing of dust aerosol. Compared to clean air, the average rate of temperature increase is larger in floating dust, less in blowing sand. The temperature diminishes rapidly during dust storm, and the average change of temperature reduces in dust storm which is $0.61^{\circ}\text{C}/\text{h}$.

(3) There is a positive correlation between the average rates of relative humidity decrease and temperature increase, and also between those of relative humidity increase and temperature decrease in all layers. Compared to clean air, the average rate of decrease is larger in floating dust, less in blowing sand. And the relative humidity rises basically, the average change of it enhances in dust storm

which is 2.80%/h. However, the change of the relative humidity enhances 32.81% during dust storm on March 9th, 2006.

(4) The PM_{10} mass concentration decreases gradually during the sand storm, blowing sand, and floating dust.

Key Words: Dust weather events, Atmospheric surface layer, Meteorological elements, PM_{10}

学位论文独创性声明

本人郑重声明：

- 1、坚持以“求实、创新”的科学精神从事研究工作。
- 2、本论文是我个人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。
- 3、本论文中除引文外，所有试验、数据和有关材料均是真实的。
- 4、本论文中除了引文和致谢的内容外，不包含其他人或其他机构已经发表或撰写过的研究成果。
- 5、其他同志对本研究成果所作的贡献均已在论文中作了声明并表示了谢意。

作者签名：程穆宁

日 期：2008.6.1

学位论文使用授权声明

本人完全了解南京信息工程大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版；有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅；有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索；有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

作者签名：程穆宁

日 期：2008.6.1

第一章 绪 论

1.1 沙尘天气概述

沙尘天气作为一种自然现象由来已久，它是在特定的地理环境和下垫面的条件，由特定的大尺度环境背景和某种天气系统发展所诱发的一种小概率、危害性的灾害天气。根据《地面气象观测规范》^[1]，沙尘天气分为3个不同的等级：由于强风将地面大量尘沙吹起，使空气很混浊，水平能见度小于1.0km为沙尘暴；由于大风将地面沙尘吹起，使空气相当混浊，水平能见度在1.0km至10.0km以内为扬沙；尘土、细沙均匀地浮在空中，使能见度小于10.0km为浮尘。

根据《沙尘天气年鉴》(2005)沙尘天气路径分为偏北路径型、偏西路径型、西北路径型、南疆盆地型和局地型五类。

(1) 偏北路径型：沙尘天气起源于蒙古国或我国东北地区西部，受偏北气流引导沙尘主体自北向南移动，主要影响西北地区东部、华北大部和东北地区南部，有时还会影响到黄淮等地。

(2) 偏西路径型：沙尘天气起源于蒙古国、我国内蒙古西部或南疆南部，受偏西气流引导沙尘主体向偏东方向移动，主要影响我国西北、华北，有时还影响到东北地区西部和南部。

(3) 西北路径型：沙尘天气一般起源于蒙古国或我国内蒙古西部，受西北气流引导沙尘主体自西北向东南方向移动，或先向东南方向移动，而后随气旋收缩北上转向东北方向移动，主要影响我国西北和华北，甚至还会影响到黄淮、江淮等地。

(4) 南疆盆地型：沙尘天气起源于新疆南部，并主要影响该地区。

(5) 局地型：局部地区有沙尘天气出现，但沙尘主体没有明显的移动。

沙尘天气的季节分布基本上是呈“春多秋少”型，这是因为春季我国北部地区冷空气比较活跃，大风频繁，气温上升，土壤解冻，地表少有植被覆盖，故易起沙。相比较而言，各地区沙尘天气的季节分布有所差异，大致可分为三类：(1) 春季最多型：以北京、朱日和为代表，例如北京3—5月扬沙、沙尘暴日数分别占全年总出现日数的67.2%和52.6%。

(2) 冬末春初最多型：以兴海为代表，兴海2—4月扬沙、沙尘暴日数分别占全年总出现日数的70.0%和69.4%。(3) 春夏频繁型：以和田、民勤、张掖等为代表。

2005 年,我国共出现了 11 次沙尘天气过程,其中扬沙过程 6 次、沙尘暴过程 4 次、强沙尘暴过程 1 次。这 11 次沙尘天气过程中西北路径和偏西路径各出现了 4 次,偏北路径出现 3 次。首次发生的沙尘天气过程为 2005 年 2 月 21-22 日的沙尘暴天气过程,末次是 11 月 5-6 日的扬沙天气过程。2005 年沙尘影响范围最广的是 5 月 2-5 日的扬沙天气过程,沙尘天气主要出现在我国西部的新疆、内蒙古、青海、甘肃、宁夏、陕西、山西、四川等省(区)。2005 年最强的沙尘天气过程是 4 月 27-28 日的强沙尘暴天气过程,沙尘暴和强沙尘暴主要出现在内蒙古中部地区,有 7 个测站出现了沙尘暴,其中 4 个测站出现了强沙尘暴。

近年来,随着社会、经济的发展和西部大开发战略的实施,沙尘天气给国民经济、生态环境和社会活动,甚至人民生命财产等诸多方面造成的灾害越来越引起国际和国内的关注。如 2006 年 4 月 16-18 日发生的沙尘天气,其影响范围包括新疆、青海、甘肃、宁夏、内蒙古中西部、陕西、山西、河北、北京、天津等 10 个省(区、市)562 县(旗、市),此次沙尘前期过程几乎影响到北方所有的省份,影响面积大约 161 万平方公里,受影响人口约 2 亿,其中内蒙古朱日和地区出现了能见度只有 200 米的沙尘暴。2007 年 12 月 27 日内蒙古二连浩特口岸出现了近年罕至的冬季沙尘暴,风力达到 7 级以上,能见度小于 500 米,气温骤降。目前,我国对沙尘天气也越来越重视,监测手段的逐渐增多以及沙尘天气研究工作取得的进展,使沙尘天气的预报水平逐渐提高,为防御和减少沙尘天气造成的损失做出了重大贡献。

1.2 研究目的及意义

我国沙尘天气的研究已在各个方面取得了丰硕的成果,但在观测和研究方面仍有大量的问题有待解决。沙尘暴的研究涉及到气象、水文、地质、地理、化学和遥感等多种学科,其影响涉及到气候、环境、生态以及社会和经济部门。至于沙尘粒子的气候、环境效应,特别是对海洋生物的影响,直到最近才开始重视。目前,尚未有学者系统地对沙尘天气过程中气象要素的垂直分布规律进行研究,对沙漠地区的研究主要集中在沙尘暴个例的气象要素研究、太阳辐射能量平衡以及沙尘气溶胶,因此有必要对比分析晴天、浮尘、扬沙和沙尘暴天气条件下的近地层气象要素的变化规律,为揭示出不同天气条件下气象要素的变化规律提供进一步根据。

1.3 国内外研究进展

沙尘天气问题已经成为一个重要的环境问题，对于它的记载在我国古代早已有之，但多集中于沙尘暴。《诗经》注释中称：“终风且霾，传霾雨土”^[1]。《尔雅》曰“风尔雨土曰霾”。“终风”、“风尔”讲的都是风后降尘的天气现象，由于古代扬沙降尘天气不时发生，因此“霾”就成了这一天气现象的专称^[2]。晋惠帝永康元年（公元 300 年），甘肃“十一戊午朔，大风从西北来，折木飞沙走石，六日始息”，表明这场风沙形成的沙尘暴摧折树木，沙石均被吹起，持续 6 天方平息^[3]。《朔方通志》载天启元年（公元 1621 年）“四月乙亥午宁夏洪广堡，风霾大作，坠灰片如瓜籽，纷纷不绝，逾时而止，日沉降，作红黄色”^[4]。康熙十四年（公元 1675 年）三月二十六日，冀州起异风，“黄霾蔽天，屋瓦皆飞”。雍正元年（公元 1732 年）四月初七，“献县风霾，昼晦”；恩县“夜起大风，飞石拔木有顷，黑霾如墨，良久复变红霾，乍明乍暗，逮晓方息”等等，表明我国人民自古以来对沙尘天气一直给予了高度关注^[5]。

1.3.1 沙尘天气的成因及特征

国外对沙尘暴的研究起步早于我国，从 20 世纪 20 年代起，就对沙尘暴的时空分布、成因与结构以及监测与对策等方面开始进行研究。20 世纪初，Hankin(1921)对印度的“*Andhi*”进行了研究，最初只是对沙尘暴的上升、下沉支气流进行研究^[6]。此后，Sutton (1925)对“*Andhi*”和“*Haboob*”型沙尘暴也进行了分析研究^[7]。Wolfson 等对“*Phanton*”型沙尘暴的特征进行了分析研究^[8]。Bhalotra(1954)、Lawson(1971)和 Idso (1972)先后对沙尘暴的气候特征、沙尘暴与雷暴中湿度场差异，沙尘暴的平均风速及其发生发展的地理区域和频数等等作了多方面的综合研究^[9-11]。

我国从 20 世纪 70 年代开始对沙尘暴天气进行研究，对沙尘暴的研究大多集中在沙尘事件活动时间和空间分布的统计分析及气候学研究方面。曲绍厚等^[12]讨论了 1980 年 4 月 18 日强沙尘暴的来源，结果表明这次沙尘来源比较复杂，不止来源某一单一地区。王式功等^[13]通过对沙尘暴形成的宏观天气气候条件和下垫面状况的系统分析，认为沙尘暴主要发生在春季和初夏季节有 5 个方面的原因：丰富沙尘源的下垫面和特殊的地形条件；冬半年长时间的干燥和冻结，导致春季解冻后地表土质变得很疏松；春季高空急流轴所处位置是

北方地区易吹大风的重要原因；春季大气层结不稳定性增大，午后易产生对流，有利于高空动量下传；春季是北方冷锋活动最频繁的季节，锋后大风也是产生沙尘暴最重要的因素之一。

Brazel A J 和 Nicking W C 对 1965—1980 年在美国亚利桑那州产生沙尘暴的天气类型进行了统计分类，并且将其划分为四种类型（锋面型、雷暴和对流型、热带扰动型及上部低压或切断低压型）^[14]。Jauregui 对墨西哥城沙尘暴的时空分布也进行了系统的研究，同时提出沙尘暴天气在 3 月份出现的频率最大^[15]。Gillette 研究美国由于风蚀所引起的沙尘暴时空变化，并且通过对粒子质量通量（粒子半径小于 $10\mu\text{m}$ ）与地面摩擦速度的测量，发现沙粒运动的临界速度值^[16]。

1.3.2. 气象要素的梯度变化研究

目前对气象要素梯度变化的研究涉及范围较广，其中以对北京 325m 气象塔^[17]、天津 250m 气象塔^[18]研究为最多。此外，彭艳等^[19]分析了青藏高原近地面层气象要素变化特征：近地层风速廓线一般满足对数规律；青藏高原近地层，无论是长期处于干燥状态的中西部地区还是东部的昌都地区，都观测到逆湿现象，逆湿的强度、出现时间和高度因地区的不同而有所差异。

张杰^[20]对塔克拉玛干沙漠腹地沙丘表面温度进行了初步探讨和分析，指出：沙丘表面的日最高温度出现在落沙坡，落沙坡与沙丘其他部位的温差以冬季沙丘右翼为最大；沙丘表面日较差最大的部位是落沙坡，夏季大于冬季，日较差最小的部位冬季发生在右翼，而夏季则发生在顶部；沙丘各部位浅表地温以落沙坡为最高；沙丘不同部位表层导温率也有很大差别。

游庆龙等^[21]利用自动气象站和气象塔观测资料分析了纳木错 2005 年 7 月 14 日至 2006 年 7 月 13 日一年的气象要素变化特征，结果表明：纳木错站年平均气温为 0°C ，最冷月为 12 月，最热月为 7 月；年平均相对湿度为 52.6%，雨季和干季分明，全年夜雨率为 78.6%；年平均风速为 4m/s ，1 月风速最大为 6.1m/s ，上午风弱、午后风强。

董旭光等^[22]利用宁夏鸳鸯湖地区 61m 铁塔一年的气象观测资料，分析了该地区 2004 年 8 月至 2005 年 7 月近地层不同高度各气象要素的变化规律：地面年平均气温为 8.0°C ，10m 高度年平均气温为 9.1°C ，30m 为 9.5°C ，60m 为 9.9°C ；低空逆温

明显, 逆温最强时(凌晨 2 时前后)从 10m 高度至 60m 高度温差约 2.4°C 。10m 高度年平均风速为 3.5m/s , 30m 为 3.7m/s , 60m 为 4.0m/s , 全年静风出现频率很小; 5-6 级大风出现日数较多, 且随高度的升高, 大风出现日数也明显增多。

佴抗等^[23]利用 20m 的观测塔对巴丹吉林沙漠的比湿进行观测, 研究表明: 远离绿洲的沙漠近地层比湿随高度基本上呈等值分布, 临近绿洲的沙漠近地层经常为逆湿分布; 无论临近还是远离绿洲的沙漠地区, 感热通量占地气之间能量交换的主导地位, 潜热通量可以忽略不计。

1.3.3. 沙尘天气过程中气象要素的变化研究

沙尘天气过程中, 气象要素变化剧烈, 尤其是强沙尘暴, 常常是飞檐走石、遮天蔽日, 给当地的农业生产和人民生命财产造成重大损失。Joseph^[24]对印度西北部“*Andhi*”型对流沙尘暴研究结果表明: 强沙尘暴过境时, 能见度由 3000m 迅速降至 200m, 甚至近 100m; 风速可由 4m/s 猛增至 20m/s ; 气温降低 5°C 左右, 相对湿度增加 10% 以上。

McNaughton^[25]对波斯湾和阿拉伯湾地区春季沙尘暴的研究结果表明, 特强沙尘暴的风头像一道黑墙, 一般自西向东或自西北向东南迅速推移, 在其过境前后, 气象要素变化十分剧烈, 过境前温度很高, 气压很低, 天气晴好, 风速很小; 黑风暴过境时, 顿时狂风大作, 沙尘飞扬, 气压猛升, 温度骤降。同时, 他还认为沙尘暴天气总是与中尺度低压或飑线相联系。

孙继明等^[26]通过对沙漠地区沙尘天气微气象特征的研究说明了在沙漠地区春季晴空条件下, 白天热力湍流甚于动力湍流, 在近地层最重要的物质交换是湍流感热交换; 浮尘天气条件下, 近地层湍流较晴空天气弱; 扬沙天气条件下, 近地层湍流感热交换和湍流动量交换都是主要的湍流交换, 并且湍流动量通量的峰值较晴空峰值大将近一个量级, 湍流感热通量的峰值大于浮尘天气峰值, 但小于晴空条件下峰值; 沙尘暴天气条件下, 湍流动量通量和感热通量一样都是重要的湍流交换, 湍流交换强于扬沙天气, 强的感热对沙漠地区局地性沙尘暴的产生和加强起着重要作用。

徐国昌等^[27]对发生在 1977 年 4 月 22 日甘肃河西走廊的黑风暴进行了观测, 结果表明张掖站黑风暴过后 10 分钟内, 气压猛升 2.8hPa , 气温下降 6.8°C , 风向由偏东转为偏西,

平均风速猛增至 20m/s 以上, 瞬时最大风速超过 30m/s。

胡泽勇^[28]通过分析 2000 年 6 月 4 日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素指出:在沙尘暴过境时地面水平风风向经历了从稳定到多次调整, 再到稳定, 最后崩溃的演变。风向调整时, 风速减弱, 而调整之后, 风速加大, 同样有很强的上升气流。沙尘暴天气来临前, 地面空气呈干热状态, 处于低气压控制之下; 而在沙尘暴过境时和过境后, 地面空气显得相对湿冷, 地面气压急剧上升, 并处于高压控制之下。

L. Natsadorj 等^[29]通过对蒙古国 1937-1999 年沙尘暴的分析总结出, 沙尘暴多发生在风速 6~20 m/s, 相对湿度平均值在 20%~40%的条件下。

2005 年李艳春等^[30]统计分析了宁夏中北部地区沙尘暴天气的持续时间及相关气象要素的变化及成因, 结果表明: 风向对沙尘暴天气的发生具有重要影响, 从西到北之间的五个风向下发生沙尘暴天气的次数占沙尘暴天气总次数的 70%以上; 在同一次沙尘暴天气过程中, 不同代表站沙尘暴天气的持续时间与地形、地貌及地理环境的关系最密切, 其次是与最大风速的关系; 沙尘暴天气发生总次数越多的测站, 在同一沙尘暴天气过程中持续时间相对越长。

1.3.4. 沙尘气溶胶的辐射特性

Carlson T. N.等^[31]在对撒哈拉沙尘的辐射强迫作用的分析过程中, 提出了沙尘气溶胶对整个地—气系统辐射能收支的强迫作用与沙尘特性、浓度、地表状况、沙尘层高度及天气和气候条件等因素有关, 高地表反照地区的沙尘能够减小大气顶行星反照率, 并减少长波辐射向大气外层的逸出。

周明煜等^[32]研究了 1980 年 4 月 18 日袭击北京的一次沙尘暴, 发现了镉、钼及钕等元素只存在黄沙粒子中。石广玉等^[33]报道了利用太阳华盖辐射计对 1991 年春夏之交的北京地区大气气溶胶光学特性的测量结果, 发现了当沙尘暴袭击北京时, 整层大气气溶胶的光学厚度、大气粒子浓度及粒子散射相函数等均有大幅度增加。

沈志宝、文军^[34]对沙尘大气对地面辐射平衡的影响分析研究表明:明显浑浊的沙尘大气使地面总辐射减少, 向下的长波辐射增大, 地面向上的长波辐射白天减小,

夜间增大。其综合结果是：白天地面净辐射能收入减小，夜间地面净辐射能支出减小，因而起着白天抑制地面增温、夜间抑制地面冷却的作用。Schwartz S. E.等^[35]认为沙尘气溶胶是地球—大气—海洋系统的一个重要组成部分，它主要通过三种方式影响气候变化：直接辐射强迫、间接辐射强迫和间接异类化学影响。直接辐射强迫取决于沙尘气溶胶的光学特性、时空分布、大气状况及地表反照率等因素。

胡隐樵、田光宁^[36]对甘肃省 1993 年 5 月 5 日出现沙尘暴时的太阳辐射进行观测，平川出现沙尘暴时太阳辐射下降，0.5h 后太阳辐射降至 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下，并较长时间维持在这一水平，1.5h 后有一次回升，反映了沙尘空间分布的不均匀性。

魏丽、沈志宝^[37]通过对 1991 年 3—5 月在黑河实验区过境的 10 次 AVHRR 测量资料 and 同期大气浑浊度观测资料的分析结果表明，大气沙尘会导致地气系统后向散射增大，即增大了行星反照率，对地气系统射出长波辐射的影响主要是通过影响地表温度而反映出的。

Karyampudi V. M.等^[38]人的研究表明，撒哈拉沙尘气溶胶的辐射加热在海洋上形成一个深厚的暖气团，从而有利于减弱赤道辐合带内的垂直运动。

Quijano A. L.等^[39]指出沙尘气溶胶对地表的短波辐射强迫远大于大气顶，其对太阳辐射的衰减作用导致地表降温。Alpert P.等^[40]通过对撒哈拉矿物沙尘的研究，说明沙尘气溶胶对长波辐射的吸收导致沙尘层及以下大气增温，而沙尘层以上大气冷却，大气温度垂直分布的改变将影响大气动力结构、大气环流和降水分布。

Underwood G. M.^[41]认为沙尘气溶胶不仅有上述的性质，还通过影响大气中半挥发痕量物质的含量、提供化学反应载体和途径及输送痕量物质到海洋等方式改变大气光化学过程，温室气体等痕量物质浓度的增加和光化学反应产生的气溶胶颗粒对辐射收支有重要影响。

辛金元等^[42]研究了沙尘气溶胶对直接太阳辐射的衰减，结果表明：在干洁晴好的天气，气溶胶的消减率小于瑞利散射的消减，瑞利散射对太阳直接辐射起主要作用；且从大气浑浊度的平缓变化可以发现，干洁晴好天气的沙尘气溶胶是按一定规律分布的。而在沙漠地区常出现的沙尘天气下，气溶胶的衰减要远大于其他因素造成的衰减；并且从大气浑浊度的规则变化可以说明，沙尘天气时沙漠气溶胶的时空分布是很不均匀的。

高庆先等^[43]通过对北方沙尘气溶胶对地表辐射影响的分析指出，沙尘

暴天气发生和影响期间,入射太阳辐射和地面散射辐射之间有明显的反相关关系,相关系数达到0.64。在沙尘暴天气发生和影响期间源区总辐射和反射辐射之间的相关关系,相关系数达到0.91。姚济敏等^[44]利用中国科学院沙坡头沙漠试验研究站2001年9月至2002年5月的太阳光度计辐射资料,计算了该地各月平均大气气溶胶光学厚度,并对该地区秋、冬、春三季平均的光学厚度进行了比较,同时对日变化也做了分析。

1.3.5 卫星、雷达数据及数值模拟

Ott,S.T.和 A.Ott 曾利用卫星和 GATE 资料对撒哈拉尘暴的爆发做过分析^[45]。近年来,随着对土壤风蚀过程的研究不断深入,Shao^[46,47]等将地理信息系统(GIS)、气象模式与起沙模式耦合起来,对澳大利亚墨累河—达令河流域(Murray-Darling-Basin)和澳大利亚大陆的土壤风蚀做了模拟。

Marticorena 等^[48]将设计的起沙方案用于模拟撒哈拉的沙尘暴天气的起沙过程,模拟结果与卫星云图比较一致。上述两种模式在模拟沙尘源和起沙率方面都有较好的能力。黄美元等^[49]在比较国内外起沙机制模型的基础上,结合我国北方大量气象台站的有关起沙过程的观测资料,提出了一个适合我国北方地区用于黄沙长距离输送模拟与预报的起沙模式。

方宗义等^[50]根据卫星探测的特点,针对2000年4月6—7日华北地区大范围沙尘天气,具体探讨了用星载扫描辐射仪检测沙尘暴的原理和方法。2002年3月至5月间,国家卫星气象中心、国家气象中心、中国科学院地理科学与资源研究所、中国科学院大气物理研究所等单位的科研人员和香港城市大学邵亚平博士联合成立了沙尘暴预报研究小组,使用了集成的风蚀预报系统,对中国的沙尘暴天气进行了数值预报试验,成功地模拟了沙尘暴的发生和传输^[51]。

1.4 本文研究的内容

沙尘天气的发生主要取决于三个方面的因素:一是地表要有丰富干燥的松散沙尘源;二是强劲持久的风力;三是有热力不稳定的大气层结。在以往的沙尘天气研究过程中,多侧重于沙尘暴个例的分析。然而对于沙尘暴强度、地理位置、移动路径等不同的情况,所产生的变化也不同。

1. 本文将内蒙古锡林郭勒盟朱日和测站（2005 年 1 月—2006 年 4 月）1-20m 气层的气象要素按照沙尘天气（浮尘、扬沙、沙尘暴）与晴天分别归类，并研究其过程中风速、风向、温度、相对湿度以及湍流动量、热量交换系数变化的普遍规律。

2. 选取典型沙尘天气（浮尘、扬沙、沙尘暴），结合其发生发展过程中的天气形势，探讨其过程中梯度理查逊数的变化、1—20m 气层气象要素的变化趋势、 PM_{10} 沙尘质量浓度的变化及其产生变化的原因。

第二章 资料及方法

2.1 资料来源

沙尘天气是干旱半干旱地区风蚀荒漠化过程中的一种特有的灾害性天气，它的形成受自然因素和人类活动的共同影响。我国有 5 个比较强的沙尘天气高发区，从东到西依次是：以和田为中心的南疆盆地区；以拐子湖为中心的阿拉善高原区；以民勤为中心的河西走廊区；以伊克乌素镇为中心的鄂尔多斯高原区；以朱日和为中心的浑善达克沙地区。在强的环流背景的影响下，从这 5 区产生的强沙尘天气次数占到我国北方沙尘天气总频数的 $\frac{2}{3}$ ，而且互相联系，互相加强。

周自江^[52]研究表明朱日和测站 90 年代扬沙次数多于 50 年代，而北京、呼和浩特、银川等测站明显少于 50 年代，并且朱日和地区扬沙、沙尘暴日数的总体趋势是增多的，而其他地区基本上是减少的。因此研究朱日和地区的沙尘天气变化状况极具代表性。

朱日和 ($42^{\circ}24'N$, $112^{\circ}54'E$)，位于内蒙古中部南缘，南接阴山山脉，地形南高北低，海拔高度 1152m，处于浑善达克沙地的西端。浑善达克沙地是沙尘暴产生的重要源地之一。另外，浑善达克沙地是蒙古民族的聚居区，人口约 40 万，由于历史和地域等诸多因素的制约，沙区经济发展缓慢，过度放牧和超载的巨大压力使该地区的生态系统受到严重破坏。因此，研究这一地区的沙尘暴天气形成和发展特征具有历史和现实意义。

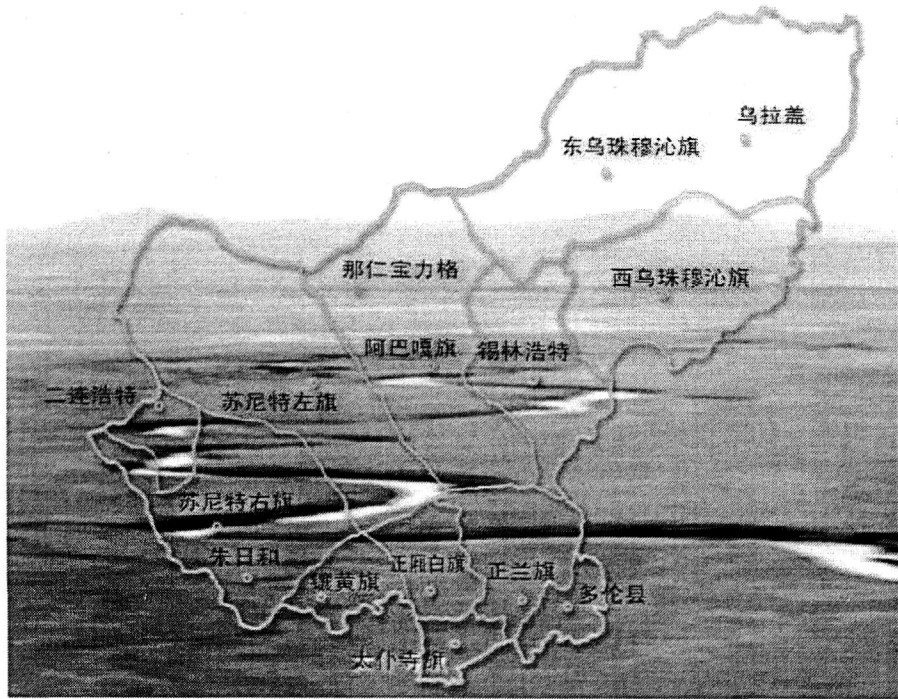


图 2.1 锡林郭勒盟气象站分布图

Fig. 2.1 The meteorological observing stations of Xilinguole

利用朱日和气象站 20m 气象塔的观测记录, 获得沙尘天气(浮尘、扬沙、沙尘暴)的温度、风速、风向、相对湿度数据。其中, 温度、相对湿度、风速均为 5 层(1m、2m、4m、10m、20m), 风向为 3 层(1m、4m、20m)。分别用铂电阻温度传感器、湿敏电容湿度传感器、三杯风速传感器测定。 PM_{10} 采用美国 R&P 公司的 TEOM1400a 型大气粒子监测仪测得, 数据记录频率为每 5 分钟一次。将以上资料进行对比分析, 揭示出不同天气条件下气象要素、沙尘质量浓度的变化规律。

2.2 资料分析

2.2.1 梯度理查逊数 Ri

空气的水平速度对沙尘的起沙非常重要, 但空气的水平速度并不能直接引起沙尘暴, 尤其是强沙尘暴。沙尘暴的形成需要沙粒在风力作用下通过湍流输送而移动

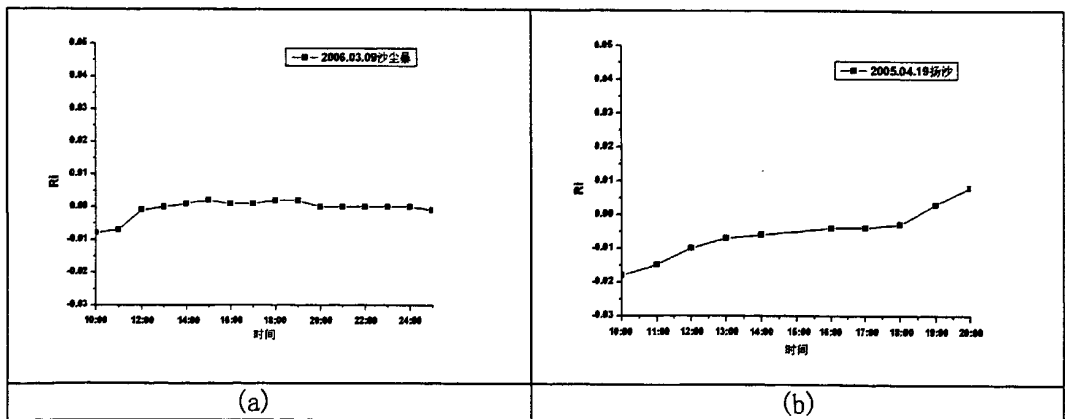
所致。通过梯度理查逊数可以判定大气层结的稳定性，计算公式如下^[53]：

$$Ri = \frac{g}{T_0} \frac{\partial \theta}{\partial z} / \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \approx \frac{g}{T_0} \frac{(z_2 - z_1)(T_2 - T_1)}{(u_2 - u_1)^2}$$

式中， T_0 为 2m 处大气绝对温度 (K)， u 为风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)， g 为重力加速度， θ 为位温 (K)， z 为高度 (m)。在实际计算中，用差分形式近似代替微分形式，位温梯度用温度梯度代替。计算出 2-20m 气层的 Ri 数。

负理查逊数总是表示静力和动力不稳定气流，这种气流将肯定是湍流；正理查逊数总是表示静力稳定的，但在 $0 < Ri < 1$ 的小范围内，正理查逊数是动力不稳定的，而且有可能是湍流^[54]。一般把 0.25 作为临界理查逊数。即当 $Ri > 0.25$ 时，湍流混合作用很弱，甚至根本不存在湍流；当 $Ri < 0.25$ 时，湍流混合作用比较强。

2006 年 3 月 9 日沙尘暴、2005 年 4 月 19 日扬沙及 2005 年 4 月 29 日浮尘过程中，Ri 均小于 0.25 且接近 0，这主要是由于较大的风切变引起的，2-20m 气层风速梯度平均值依次为 5.57、5.36、3.13 m/s。但是在不同沙尘过程中，Ri 数呈现了不同的变化特征（图 2.2），主要是热力因子的作用。沙尘暴天气开始前， $Ri < 0$ ，沙尘暴过程中略有增大，接近 0，并且维持到该过程结束，整个过程中 Ri 变化不大，趋于均一状态；总体而言，扬沙及浮尘生消过程中，Ri 数分别随时间增大和减小。相应的，在沙尘暴过程中，温度垂直梯度较小，接近 0；扬沙及浮尘过程中，温度垂直梯度随时间分别增大和减小，与梯度理查逊数变化一致。



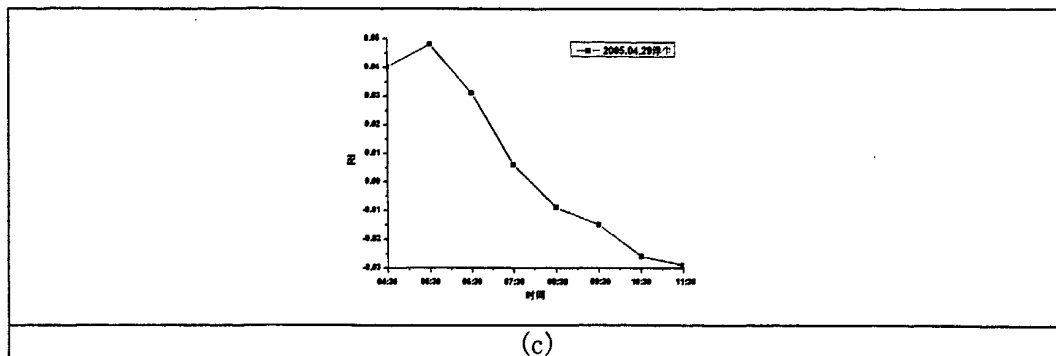


图 2.2 不同沙尘天气过程中 2-20m 气层 Ri 的变化

Fig.2.2 The evolution of Ri in 2-20m during different dust weather events

2.2.2 风速的幂指数率

风速的幂指数率公式如下：

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m$$

式中 z_1 、 z 分别取 2m、20m， u_1 、 u 是 2m、20m 的风速， m 是与下垫面粗糙度和大气层结稳定度有关的幂指数。

根据上述公式，我们可以得到不同的天气条件下 m 值的变化规律。如表 2.1 所示，在不同的天气条件下， m 值呈现出一定的规律性。 m 值的平均值在沙尘暴、扬沙、背景、浮尘的条件下依次增大。 m 值是随风速和大气层结而改变的， m 的大小反映了风速随高度变化的快慢。 m 值大表示风速梯度大或风速随高度变化快， m 值小表示风速梯度小或风速随高度变化慢。 m 值能够反映出湍流的强弱：湍流强度大时，上下层空气能够充分的混合，进而风速梯度小，故 m 值小；湍流强度小时，上下层空气混合较弱，进而风速梯度大。 m 值是大气稳定时大，不稳定时小，接近中性平衡时介于两者之间。在春季近地面层沙尘暴、扬沙、背景、浮尘的条件下，风速梯度依次增大，即湍流交换的强度依次减小。

表 2.1 不同天气条件下的 m 值变化

Table 2.1 The change of m in different weather phenomena

天气现象	m 最大值	m 最小值	m 平均值
背景 (32 天)	0.292	0.047	0.161
浮尘 (5 天)	0.311	0.050	0.165
扬沙 (21 天)	0.211	0.009	0.160
沙尘暴 (13 天)	0.194	0.121	0.158

2.2.3 湍流交换系数

湍流交换系数 K_m 和 K_h 是表征近地面层湍流发展强弱程度的物理量，分别为湍流动量交换系数及湍流热量交换系数。为了定量地反映各气层的湍流状况，将气温和风速变化有机地结合起来，本文计算了湍流交换系数随高度的分布。计算公式采用 Blackadar (1976, 1979) 根据湍流理论的二阶闭合近似发展得到的结论^[55-56]。

$$\text{不稳定: } K_m = l^2 S (1 - 21 Ri)^{\frac{1}{2}} \quad K_h = l^2 S (1 - 87 Ri)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{稳定: } \begin{cases} K_m = K_h = 1.1 \left(\frac{Ri_c - Ri}{Ri_c} \right) l^2 S & Ri \leq Ri_c \\ K_m = 0 & Ri \geq Ri_c \end{cases}$$

临界值 Ri_c 取 0.25。

式中 S 的表达式为：

$$S = \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left| \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1} \right|$$

近地层内，混合长 l 表示为： $l = \kappa z$ 。 κ 为卡门常数，取 0.4。

从表 2.2 中可以看出，湍流交换系数随高度的升高而增大，这与 Stull^[57] 的观测结果是一致的。这是因为在近地层处，由于沙粒等的摩擦作用，导致湍流增强，同时近地层也是能量消耗的最大区域。故在二者的共同作用下，使得湍流交换系数随高度的升高而增大。

基本上 1-2m、2-4m、4-10m、10-20m 四个气层的动量、热量交换系数均呈现出沙尘暴天气条件下最大，扬沙次之，浮尘最小的特点（除 1-2m 和 2-4m 气层处浮尘的 K_m 值，该处

浮尘的 K_m 值大于背景天气的 K_m 值,可能是所选取的浮尘天气贴地层风速切变与背景天气相比较,湍流有所发展,且以动力湍流为主的缘故。这是因为沙尘暴天气条件下沙尘粒子较多,摩擦作用增强,湍流交换系数较大。浮尘天气近地层湍流较弱,主要是由于空中大量浮尘的存在减小了地面的净辐射,从而抑制了湍流的发展。除2-4m 气层处沙尘暴条件下 K_h 值略小于 K_m 值外,其余 K_h 值均大于 K_m 值。因此在近地层,湍流感热交换占主导。

表 2.2 不同天气条件下湍流交换系数的变化

Table 2.2 The change of turbulent exchange coefficient in different weather phenomena

天气现象		背景	浮尘	扬沙	沙尘暴
K_m (m^2/s)	1-2m	0.286	0.292	0.358	0.417
	2-4m	0.345	0.394	0.745	0.900
	4-10m	1.482	1.198	2.381	2.587
	10-20m	7.192	6.561	9.124	10.076
K_h (m^2/s)	1-2m	0.530	0.482	0.541	0.589
	2-4m	0.409	0.394	0.752	0.899
	4-10m	2.189	1.480	2.705	2.870
	10-20m	12.961	10.833	14.282	14.782

第三章 近地层气象要素及气溶胶年变化特征

扬沙和沙尘暴的季节分布基本上是春多秋少，呈“~”型，朱日和为春季最多型。这是因为春季我国北部地区冷空气活跃，多大风，气温回暖解冻，地表裸露，容易起沙。

3.1 气象要素

由于各层气象要素月平均变化趋势相同，图 3.1 仅列出了 2005 年朱日和气象塔 4m 处气象要素的变化，从图中可以看出：4 月风速最大，8 月风速最小。2-4 月风速呈现出递增的态势，4-8 月风速大幅度下降，8-11 月风速又呈增加态势，11-12 月风速又有所下降。春季风速最大，秋季次之，夏季最小，平均值分别为 5.11m/s、4.50 m/s、3.67 m/s。

气温在 7 月达到最大值，12 月为最小值。夏季温度最高，平均温度达到 22.71℃；秋季次之；冬季最低，平均温度只有-14.28℃。

相对湿度在 12 月为最大，4 月为最小，与气温并未呈现出完全的反相关关系。冬季最大，平均达到 64.36%，春季最小，平均为 31.26%。

入春之后，温度回升到 0℃以上，沙源土壤开始解冻，这为沙尘天气的发生提供了物质条件。同时，极大的风速及干燥的环境对起沙十分有利。

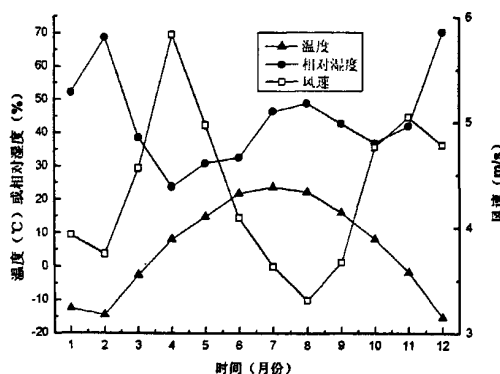


图 3.1 2005 年近地层气象要素的月平均变化

Fig. 3.1 The average monthly changes of meteorological elements of atmospheric surface layer

3.2 TSP 和 PM₁₀

大气中 TSP 的增加, 将导致大气污染的加剧, 而沙尘天气过程中 TSP 浓度急剧增大。以 1993 年 5 月 5 日特强沙尘暴为例, 甘肃省金昌市的室外空气 TSP 浓度达到 $1016\text{kg} / \text{m}^3$, 室内为 $80\text{kg} / \text{m}^3$, 超过国家标准的 40 倍。

图 3.2 是 2005 年 TSP 质量浓度的月平均变化, TSP 平均值在春、夏、秋、冬四个季节依次递减, 分别为 $352.6\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $181.2\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $158.3\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $56.5\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

PM₁₀ 平均值在四季中也存在类似的变化。这与朱日和春季沙尘天气最多是一致的。PM₁₀ 平均值在背景大气、浮尘、扬沙、沙尘暴依次为 $107.3\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $2036.7\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $2178.7\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $5379.6\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 沙尘暴发生时的 PM₁₀ 平均值是背景大气的 50.1 倍、浮尘的 2.6 倍、扬沙的 2.5 倍。

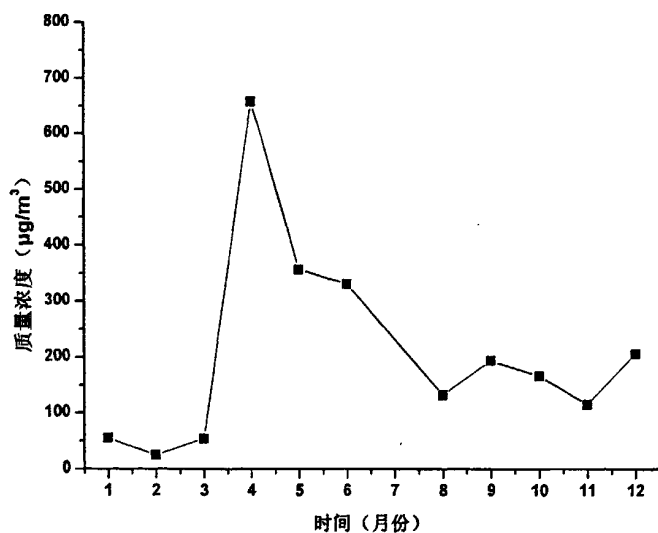


图 3.2 TSP 质量浓度的月平均变化
Fig.3.2 The average monthly changes of TSP mass concentr

第四章 沙漠地区春季近地层气象要素分布规律的观测研究

到目前为止,对沙漠地区的研究主要集中在沙尘暴个例的气象要素研究、太阳辐射能量平衡以及沙尘气溶胶,而对沙漠地区近地层气象要素研究相对较少。本章分析了 2005、2006 两年春季近地层气象要素的变化,进而比较分析了晴天、浮尘、扬沙、沙尘暴天气条件下的近地层气象要素的变化规律,为揭示出不同天气条件下气象要素的变化规律提供进一步根据。

4.1 晴天条件下春季气象要素的变化特征

表 4.1 春季晴天背景下各高度气象要素的平均变化

Table 4.1 The average changes of meteorological elements with different height on clean air in Spring

高度 (m)	风速 (m/s)	最多频率风向	温度 (℃)	相对湿度 (%)
1	3.85	SW	14.50	22.09
2	4.21		13.96	22.07
4	4.66	SW	14.11	23.11
10	5.32		14.20	21.97
20	6.06	SW	13.99	21.49

4.1.1 风

根据观测数据计算得到 1m、2m、4m、10m、20m 高度春季平均风速分别为 3.85m/s、4.21 m/s、4.66 m/s、5.32 m/s、6.06 m/s(表 4.1),风速随高度升高明显增大,各高度春季平均风速为 4.82 m/s。

图 4.1 为朱日和地区气象塔春季不同高度逐时平均风速变化曲线。从每天 24 时次平均风速来看,各高度风速均在上午 8 时达到最大,8 时至 16 时平均风速波动式

缓慢递减, 16 时至 20 时降幅较大, 20 时至 23 时风速又呈快速增加态势, 24 时至翌日上午 8 时, 各高度风速普遍增大。整体而言, 呈单峰单谷分布。

观测期间朱日和地区各高度最多风向均为西南(表 4.1), 这与朱日和位于蒙古气旋的底前部有关。1m、4m、20m 高度西南风频率分别为 57.67%、49.86%、47.06%, 最多风向出现频次随高度的升高有减小的趋势。

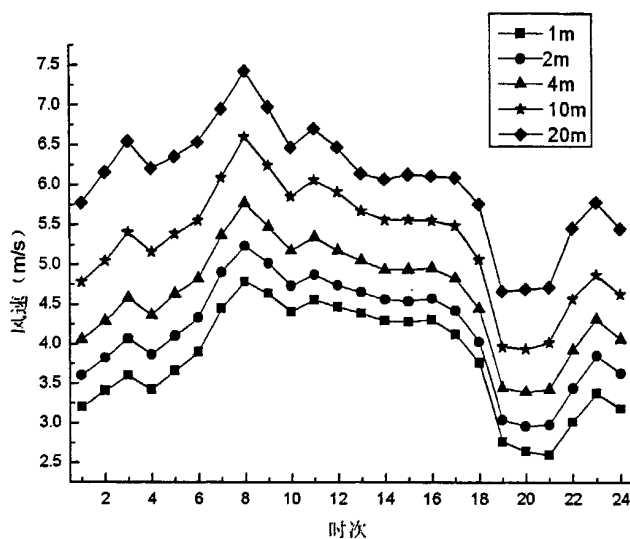


图 4.1 春季晴天不同高度逐时平均风速的变化

Fig. 4.1 The mean hourly changes of wind speed with different height on clean air in Spring

4.1.2 温度

通过对朱日和春季气象塔的观测资料统计分析得到: 1m、2m、4m、10m、20m 高度平均气温分别为 14.50℃、13.96℃、14.11℃、14.20℃、13.99℃(表 4.1), 2m 处气温最低, 1m 处气温最高, 2-10m 普遍存在逆温。

图 4.2 为春季不同高度逐时气温变化曲线。从每天 24 时次平均气温看: 16 时气温达到最高, 5 时气温为最低; 19 时至翌日 6 时 2m 高度气温最低; 朱日和地区 2-20m 低空逆温明显, 逆温从傍晚 19 时开始, 至翌日上午 6 时结束, 逆温强度在 21 时达到最强, 从 2m 高度至 20m 高度温差为 0.92℃。

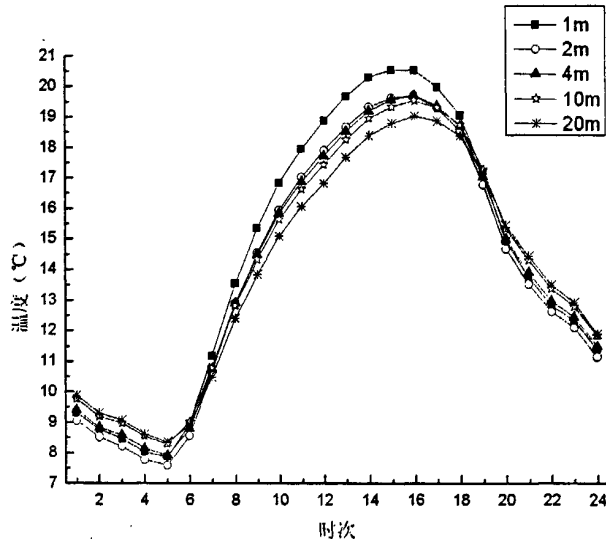


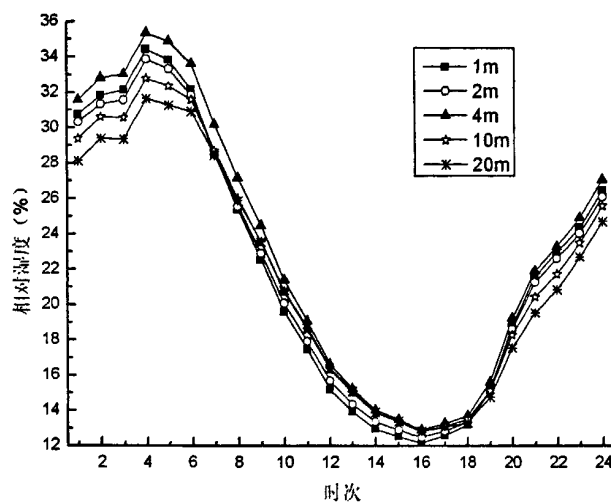
图 4.2 春季晴天不同高度逐时平均温度的变化

Fig. 4.2 The mean hourly changes of temperature with different height on clean air in Spring

4.1.3 相对湿度

春季 1m、2m、4m、10m、20m 高度平均相对湿度分别为 22.09%、22.07%、23.11%、21.97%、21.49%(表 4.1)，总体说来，4m 处相对湿度最大，20m 处相对湿度最小。9 时至 16 时，除 4m 高度外，1m、2m、10m、20m 高度处相对湿度依次递增，最大逆湿强度出现在 11 时，为 6.38%/100m；最小出现在 10 时，为 1.04%/100m；平均为 4.79%/100m。

图 4.3 是春季不同高度逐时平均相对湿度变化曲线，与图 4.2 相比可以看出，相对湿度与温度呈反相关关系。从图 4.3 中可以看出：逐日 24 时次均为 4m 处相对湿度最大，可能原因是 2m 处气温最低，2-4m 存在逆温且逆温强度较强，水汽向逆温层顶聚集导致。19 时至翌日 6 时 20m 处相对湿度最小。7 时至 18 时 1m 高度处相对湿度最小。



(c)平均相对湿度

图 4.3 春季晴天不同高度逐时平均相对湿度的变化

Fig.4.3 The mean hourly changes of relative humidity with different height on clean air in Spring

4.2 沙尘天气条件下春季气象要素的变化特征

4.2.1 风

总体趋势是风速随高度的升高而增大，五层风速随时间呈同位相波动。

近地层的风速满足幂指数率公式，它可以反映出水平风速随高度的变化。胡非等^[58]用大量的试验数据拟合表明，幂函数对于描述北京 325m 气象塔风速分布是合适的。

如表 2.1, 2.2 所示，在春季近地面层沙尘暴、扬沙、背景、浮尘的条件下，风速幂指数率逐 m 渐增大，风速梯度依次增大，即湍流交换的强度依次减小。

不同的沙尘天气条件下，风向的变化略有不同。除 2005 年 6 月 12 日 1m、4m、20m 及 2005 年 4 月 19 日 4m、20m 气层为西北风外，其余过程中的三层风均为西南风。可见，朱日和站在不同的天气条件下均为偏西风，且主要为西南风。沙尘天气发生时，西南风出现的频率大大增加，说明沙尘天气多伴随蒙古气旋产生。

4.2.2 温度

(1) 浮尘天气

浮尘天气条件下, 温度随时间增大, 2m 处温度廓线存在拐角(图 4.4)。各气层的增温率随高度递减, 平均增温率为 $1.77^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 大于同时段的背景大气增温率 $1.50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。可能的原因是, 浮尘天气都发生在早晨, 太阳辐射较弱, 故沙尘气溶胶对太阳辐射的削弱作用较小; 由于沙尘对地面长波辐射的吸收及向地面的长波辐射反馈作用较强, 起主导作用, 故平均增温率较背景大气有所增大。

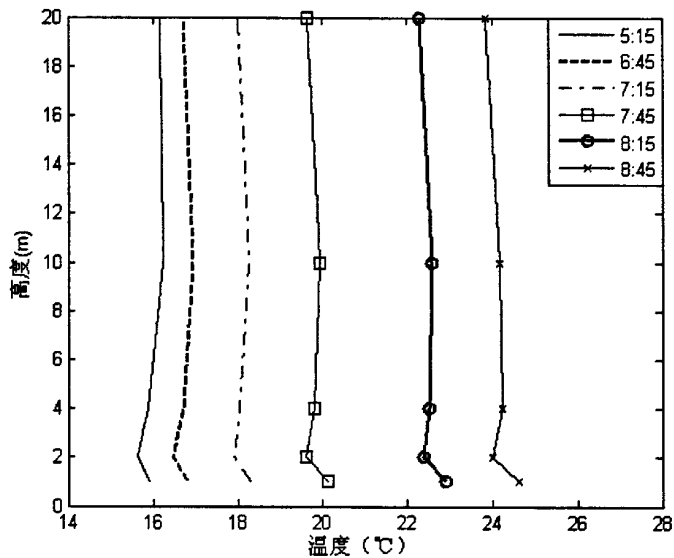


图 4.4 浮尘天气条件下的温度廓线 (2005 年 4 月 29 日)

Fig.4.4 The temperature profiles in floating dust (2005 年 4 月 29 日)

(2) 扬沙天气

扬沙天气条件下, 温度变化以增温为主 (图 4.5), 个别扬沙天气会出现先增温后降温或持续降温情况。且均在 2m 处温度廓线存在拐角。

扬沙天气增温的幅度不同, 这主要与扬沙发生的强弱有关。在两年的春季观测期内, 扬沙天气条件下 1-20m 气层增温幅度最大达到 $1.23^{\circ}\text{C}/\text{h}$ (2006 年 4 月 9 日), 最小为 $0.43^{\circ}\text{C}/\text{h}$ (2006 年 4 月 6 日), 平均增温率为 $0.77^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 小于同时段背景增温率 $0.89^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。究

其原因,扬沙天气多发生在午后,该时段太阳辐射较强,但由于近地层沙尘粒子数浓度和质量浓度明显大于浮尘天气^[59],故沙尘气溶胶对太阳辐射的削弱作用增强,导致近地层升温率相对较小。

4-20m 气层温度随高度降低,最大降温率 $4.11^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (2006 年 4 月 13 日),最小降温率 $2.97^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (2006 年 3 月 30 日),平均降温率为 $3.55^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

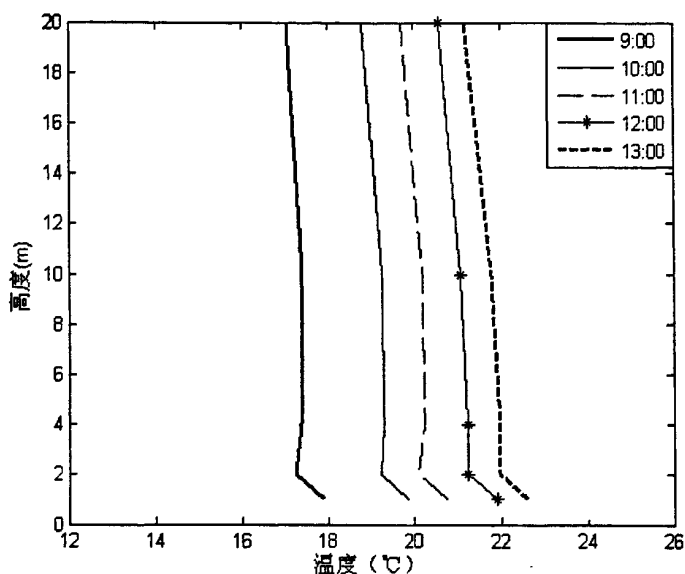


图 4.5 扬沙天气条件下的温度廓线 (2006 年 4 月 9 日)

Fig.4.5 The temperature profiles in blowing sand (2006 年 4 月 9 日)

(3) 沙尘暴天气

沙尘暴天气条件下,温度变化以降温为主,温度廓线在 2m 处存在拐角 (图 4.6)。个别沙尘暴天气温度变化会出现先升温后降温或持续升温情况,这与沙尘暴发生的强弱有关。

在两年的春季观测期间,沙尘暴天气条件下 1-20m 气层降温幅度最大达到 $1.04^{\circ}\text{C}/\text{h}$ (2006 年 3 月 26 日),最小为 $0.16^{\circ}\text{C}/\text{h}$ (2006 年 4 月 8 日),平均降温率为 $0.61^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。可见,沙尘暴爆发时,温度下降。说明伴随沙尘暴而至的冷空气的降温作用要大于太阳辐射对近地层的加热作用。4-20m 气层温度随高度降低,最大降温率 $3.31^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (2005 年 4 月 19 日),最小降温率 $1.13^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (2006 年 3 月 9 日),平均降温率为 $2.72^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

4-20m 气层的温度递减率小于扬沙天气条件的递减率,可见沙尘暴天气条件下大气湍流运动强烈,使上下层温度能够得到混合,进而使递减率减小。

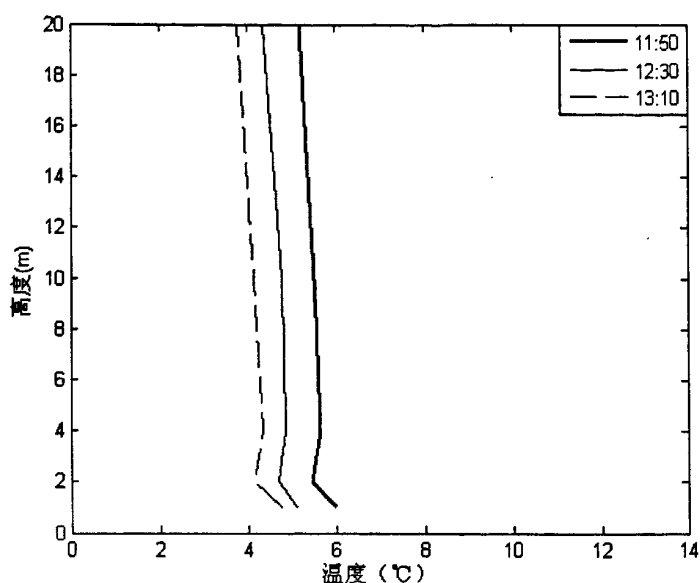


图 4.6 沙尘暴天气条件下的温度廓线 (2006 年 3 月 26 日)

Fig.4.6 The temperature profiles in dust storm

4.2.3 相对湿度

沙漠地区地表含水量低,蒸发量极少,故大部分时间段内,近地层温度升降导致相对湿度随之减小或增大,即相对湿度与温度呈反相关性。但也有相对湿度和温度变化一致的情况,可能是水汽平流或高层水汽向下输送引起的。同时,相对湿度也呈现出最大值、最小值分别在 4m、1m 层出现频率最大的特征(表 4.2)。由于沙尘天气多发生在午后至傍晚,此时基本上是 1m 层处的温度最高,故相对湿度最小;至于 4m 层相对湿度最大,如前所述,可能是 2-4m 逆温引起的。

表 4.2 不同天气条件下 20m 以下气层相对湿度极值的垂直分布 (单位:次)

Table 4.2 The vertical distribution of relative humidity extreme values under 20m in different weather phenomena

天气现象	相对湿度极值	1m	2m	4m	10m	20m	合计
背景大气	极大值		1	18	10	1	30
	极小值	22		6		2	
浮尘	极大值			7			7
	极小值	3				4	
扬沙	极大值			16	3		19
	极小值	15	2			2	
沙尘暴	极大值			14			14
	极小值	9	5				

注:1 次表示 1 个分析时次 (1h), 相对湿度的极值为 1h 内的平均情况

(1) 浮尘天气

浮尘天气条件下各气层相对湿度随温度的升高而逐渐减小(图 4.7), 递减率为 3.05%/h, 比同时段背景天气的平均递减率 1.25%/h 大。说明浮尘天气各气层相对湿度下降速率大, 这主要是因为浮尘天气各气层增温率大于背景天气的缘故。

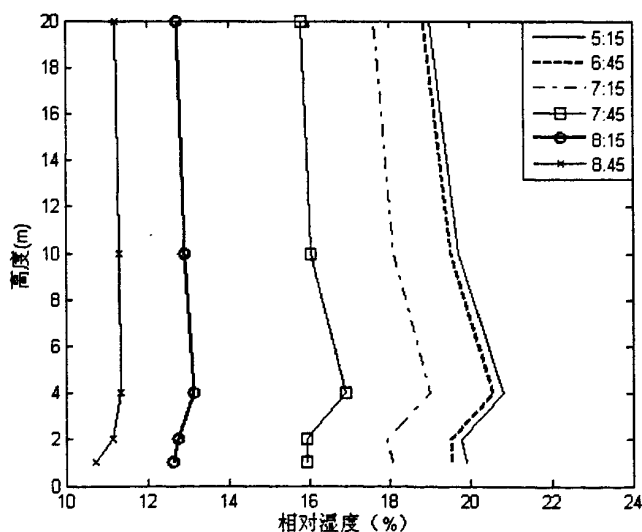


图 4.7 浮尘天气条件下的相对湿度廓线

Fig.4.7 The relative humidity profiles in floating dust

(2) 扬沙天气

扬沙过程中，相对湿度随温度的升高而减小，是主导现象（图 4.8）。个别扬沙过程中出现了相对湿度先减小后增大或始终增大的情况。

在扬沙天气条件下，相对湿度递减率最大值为 8.25%/h（2006 年 4 月 6 日），最小值为 0.74%/h（2006 年 3 月 21 日），平均递减率为 1.31%/h，小于同时段背景天气的平均递减率 1.81%/h。这是由扬沙天气条件下平均增温率小于背景天气导致的。2006 年 4 月 6 日扬沙过程中，增温率大导致相对湿度减小率亦大。

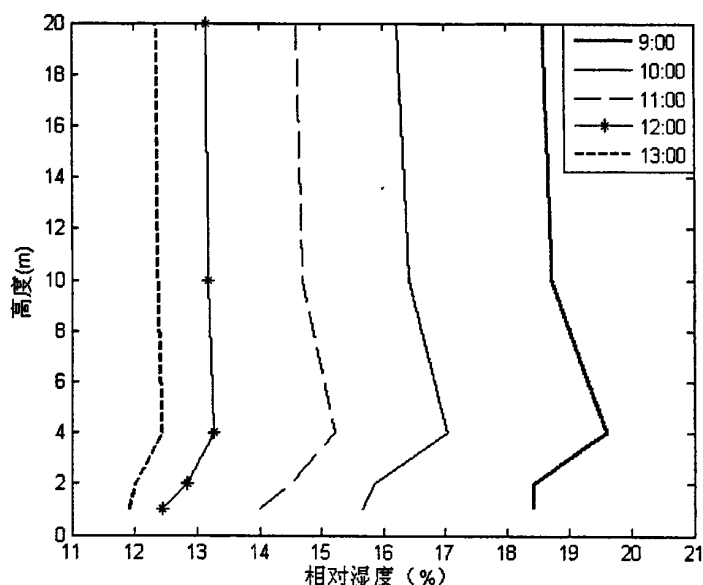


图 4.8 扬沙天气条件下的相对湿度廓线

Fig.4.8 The relative humidity profiles in blowing sand

(3) 沙尘暴天气

沙尘暴过程中，相对湿度随温度的降低而增大，是主导现象（图 4.9）。个别沙尘暴过程中出现了相对湿度先减小后增大、先增大后减小或始终减小的情况。

在沙尘暴天气条件下，相对湿度增大率最大值为 5.77%/h（2006 年 3 月 26 日），最小值为 0.82%/h（2005 年 4 月 19 日），平均增大率为 2.80%/h。2006 年 3 月 26 日沙尘暴过程中，降温率大导致相对湿度增大率亦大。

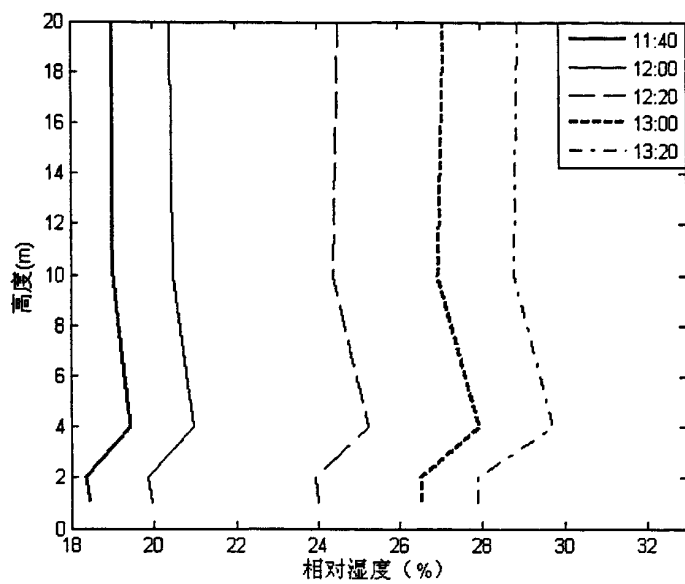


图 4.9 沙尘暴天气条件下的相对湿度廓线

Fig.4.9 The relative humidity profiles in dust storm

第五章 典型沙尘天气过程近地层气象要素演变特征的观测研究

本章根据内蒙古朱日和气象站 2005 年 1 月-2006 年 4 月梯度塔的沙尘天气观测资料, 结合 PM_{10} 记录资料, 分析典型沙尘天气过程近地层气象要素的演变特征。

分别选取 2006 年 3 月 9 日、2005 年 4 月 19 日及 2005 年 4 月 29 日作为沙尘暴、扬沙、浮尘的典型天气事件。

5.1 典型沙尘天气形势分析

5.1.1 沙尘暴天气

朱日和地区 9 日 10:25-11:20 出现扬沙, 11:20-次日 00:07 出现沙尘暴, 其中 11:20-20:00 沙尘暴最低能见度达 40m, 20:00-次日 00:07 沙尘暴最低能见度到达 20m, 甚至曾一度达到了黑风暴的标准, 这次沙尘暴的强度是历年同期罕见的。沙尘暴来临时, 边界层结构发生明显变化。

这是一次随着脊前不稳定小槽发展, 最终取代东亚大槽, 蒙古西部的气旋越过萨彦岭和阿尔泰山后强烈发展成为蒙古气旋的天气过程。据通常对蒙古气旋的分类, 属暖区新生气旋型。这次过程中气旋形成于 7 日 8 时至 14 时之间。7 日 14 时气旋中心位置在乌兰巴托西侧, 气旋形成后逐步发展。先东南移向中蒙边境, 之后又向西北上, 10 日 08 时移出内蒙古自治区。在地面气旋发生发展过程中, 大风、降温、沙尘等天气现象均有出现, 造成内蒙古中部一次强烈的沙尘天气过程。

此次气旋天气过程开始时, 500hPa 格陵兰以东洋面上出现一个小槽, 此后南下到贝加尔湖以东地区形成一个有闭合中心的深厚的冷性低槽, 配合-44℃的冷中心, 槽后有强烈的冷平流。与之对应, 槽前低压强烈发展, 由于气旋越过萨彦岭受下坡地形作用, 高空锋区加强, 槽线上有明显的冷平流输送, 乌拉尔山高空脊强烈发展, 引起地面气旋进一步发展移到中蒙边境, 气旋发展强盛, 移速减小(图 5.1)。由于低槽前的正涡度平流明显增强, 引起地面气旋进一步减压(图 5.2)。中心位置在内蒙古中部的锡林郭勒盟的西南部, 朱日和正处于西南部, 槽前西南大风加剧, 此时由于地面裸露, 造成朱日和地区出现沙尘天气, 同时 9 日 08 时的 850hPa 高度场和温度场的叠加可看出两者反位相很明显, 预示着沙尘天气很强烈。

低层 700hPa 和 850hPa 图(图略)上, 从 8 日 08 时至 9 日 08 时, 原在中西伯利亚的低槽强烈发展、东移南下, 且温度槽仍落后于高度槽, 地面气旋仍在高空槽的前方。这种温压场形势, 有利于地面气旋一面向前移动一面加深发展, 也有利于高空槽的东移发展。10 日 08 时高空槽移出内蒙, 到达黑龙江地区。

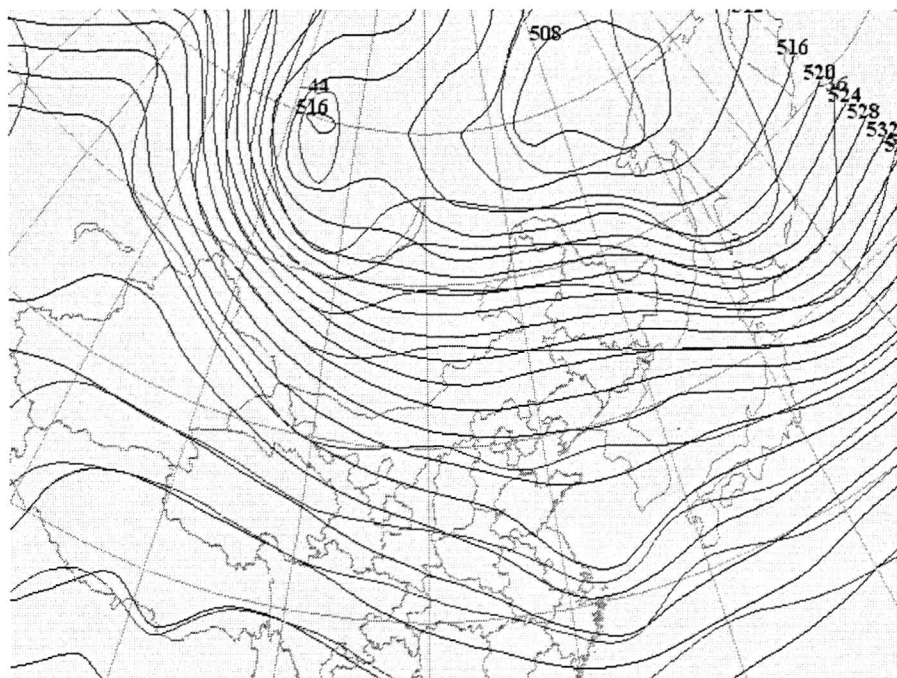


图 5.1 2006 年 3 月 9 日 08 时 500hPa 形势图

Fig.5.1 500hPa weather map at 0800BST on March 9th, 2006

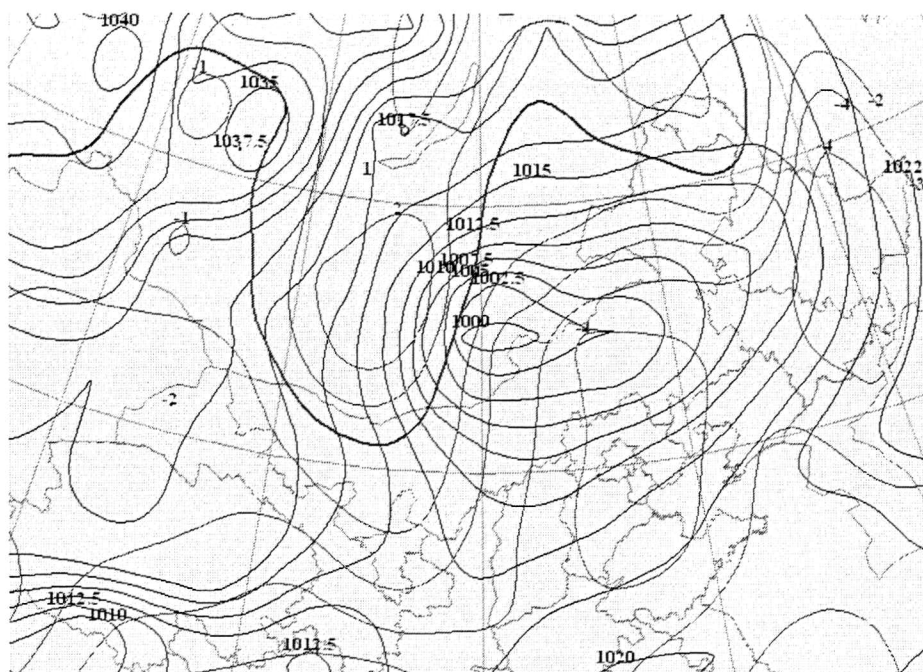


图 5.2 2006 年 3 月 9 日 14 时地面形势图

Fig.5.2 Surface map at 1400BST on March 9th, 2006

5.1.2 扬沙天气

2005 年 4 月 19 日朱日和地区出现了扬沙和短时沙尘暴天气。10: 48-11: 40 出现扬沙, 11: 40-14: 20 出现沙尘暴, 最小能见度为 700m, 14: 20-19: 37 扬沙天气再次出现。

这是一次随着西风槽的东移，内蒙古中部气旋与蒙古西部气旋合并，西北上的一次天气过程。这次过程中，7日14时，两股气流合并，在蒙古中部加强，之后向东北方向移动，但与前一次过程相比，气旋的中心始终在蒙古人民共和国，朱日和地区只是受气旋后部的西北气流影响，所以强度较前一次略弱。同时从高空形势场看(图5.3)，这次过程主要是西来槽影响，强度较前一次略弱，等压线和等温线没有前一次密集，低层的高度场和温度场反位相不是很明显。不过在气旋发展东移南下过程中，温度槽也落后于高度槽，地面气旋也在高空槽的前方(图5.4)。这种温压场形势，也有利于地面气旋的发展。

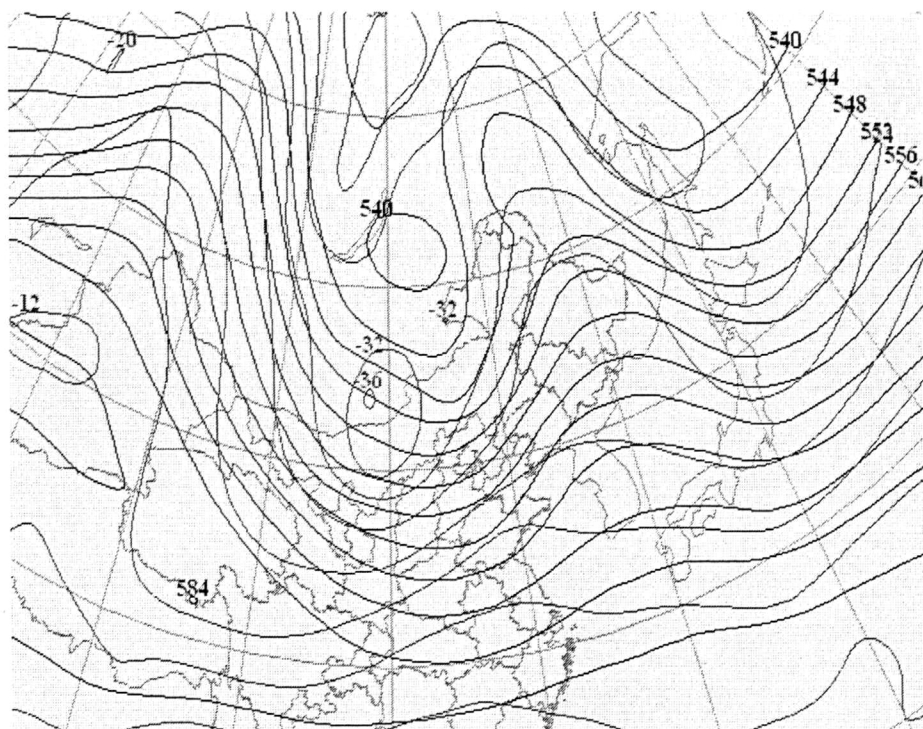


图 5.3 2005 年 4 月 19 日 08 时 500hPa 形势图

Fig.5.3 500hPa weather map at 0800BST on April 19th, 2005

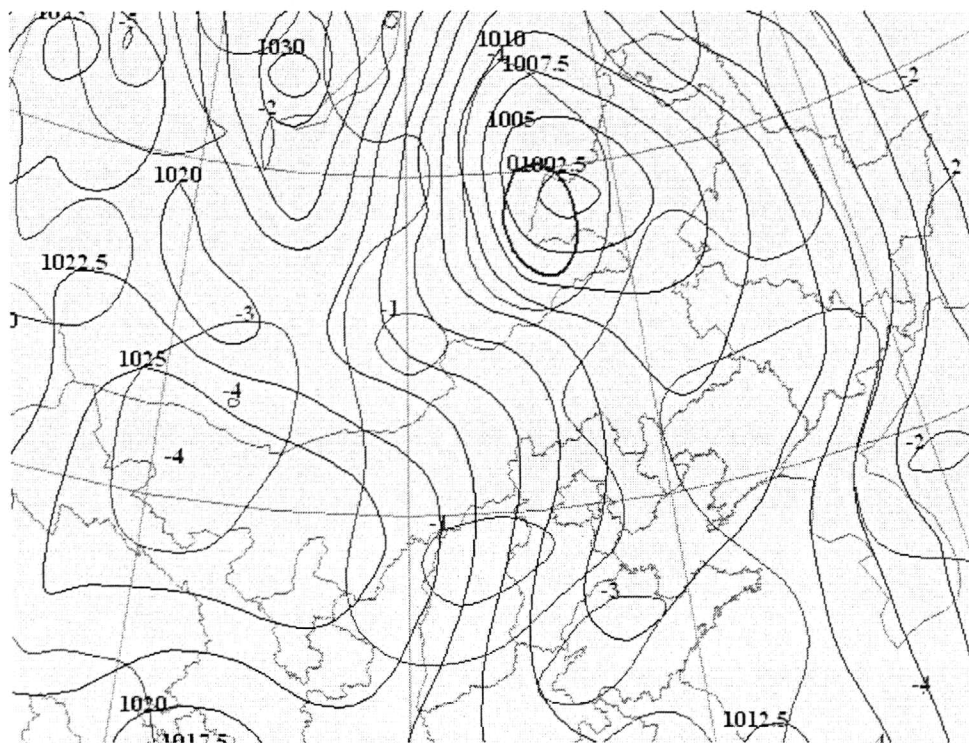


图 5.4 2005 年 4 月 19 日 14 时地面形势图

Fig.5.4 Surface map at 1400BST on April 19th, 2005

5.1.3 浮尘天气

朱日和地区 4 月 29 日 5:13-8:27 出现浮尘天气, 8:27-11:06 出现扬沙天气。

这是一次在西风带平直气流上的小波动和地面气旋的共同影响下造成朱日和地区 29 日出现了沙尘天气现象。从前期环流形势看, 中纬度处于平直西风带的控制, 贝加尔湖地区以北有小股冷空气分裂南下, 29 日 08 时 500hPa 高空形势图显示(图 5.5), 该小股冷空气在内蒙古中部产生一个弱的小波动, 同时由于 850hPa 和 700hPa (图略) 中西伯利亚一带的低槽分裂小股空气南下, 并且温度槽落后于高度槽, 地面气旋加强, 气旋中心处于内蒙古中部地区, 旋转并向东北方向移动(图 5.6), 但与前两次过程相比, 此次过程的高空形势相对更弱, 冷空气的势力很弱, 虽然地面气旋发展很强烈, 由于高低层配合不是很好, 同时由于正处于 4 月底, 草原上草芽正在发芽, 植被相较于前两次过程要好的多, 不利于沙尘暴的发生, 所以没有造成很强烈的天气, 只是局部地区出现了一些浮尘天气。

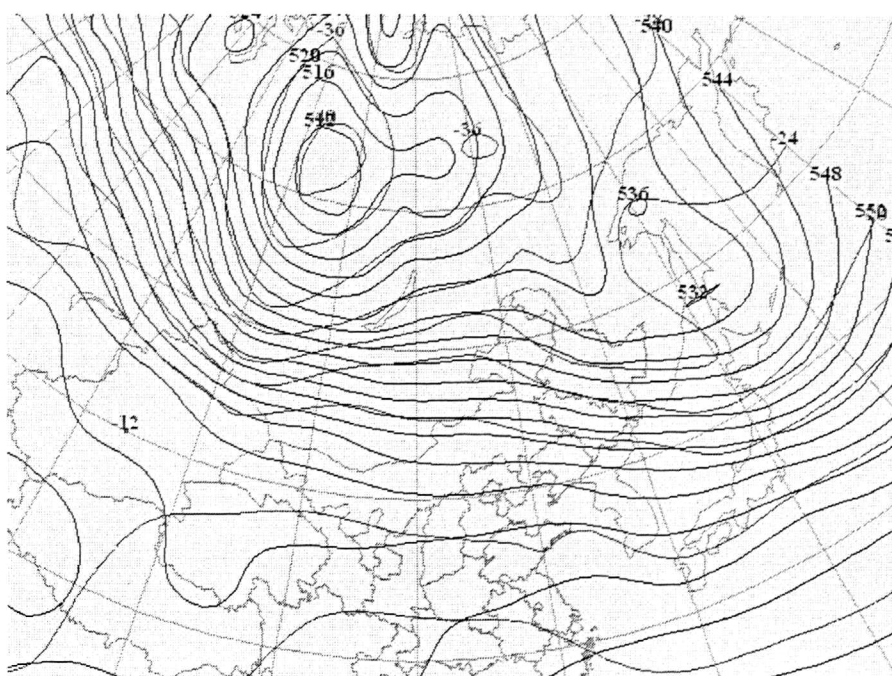


图 5.5 2005 年 4 月 29 日 08 时 500hPa 形势图

Fig.5.5 500hPa weather map at 0800BST on April 29th, 2005

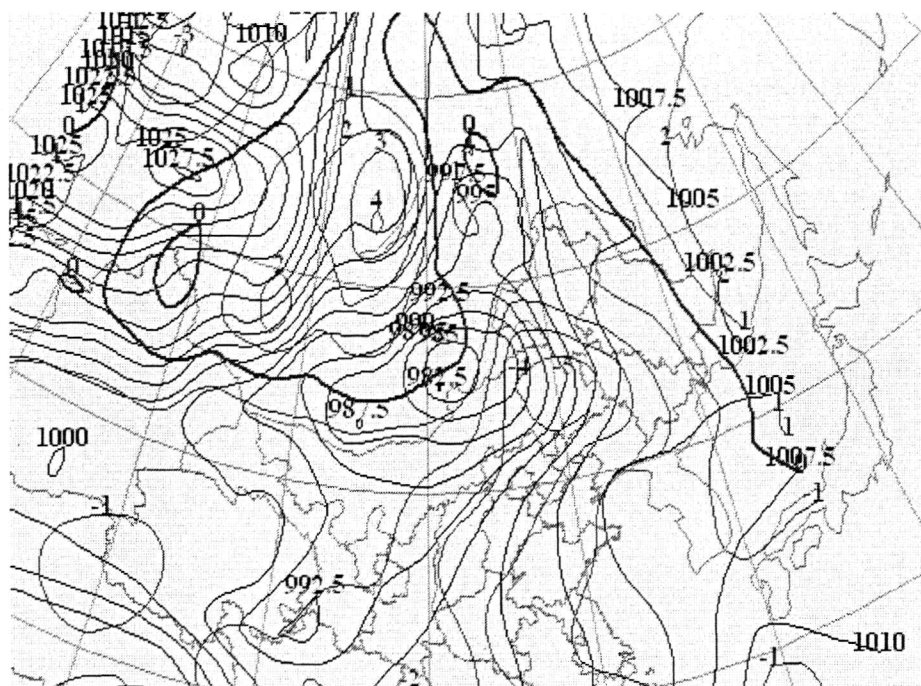


图 5.6 2005 年 4 月 29 日 14 时地面形势图

Fig.5.6 Surface map at 1400BST on April 29th, 2005

5.2 风

5.2.1 沙尘暴

如图 5.7 所示, 20m 气层的风速梯度变化明显, 随高度逐渐增大。10 时 (沙尘天气尚未形成), 20m 气层内的平均风速为 11.91m/s, 风速较大, 为沙尘天气的发生提供了动力条件。10:25 出现扬沙天气, 11 时, 20m 气层内的平均风速略有增大。11:20-21:00, 为沙尘暴天气, 该时段风速迅速增大, 地面瞬时最大风速达到 17.5 m/s, 风向为西北偏北, 最低能见度仅 40m。21:00-次日 00:00, 仍为沙尘暴天气, 此时近地层仍处于不稳定状态, 虽然风速有所减弱, 但由于沙尘粒子的惯性, 仍有大量沙尘粒子悬浮在大气中, 加之瞬时大风的作用, 最低能见度仅 20m。01 时, 20m 气层内的平均风速为 9.72 m/s, 较发生前降低。

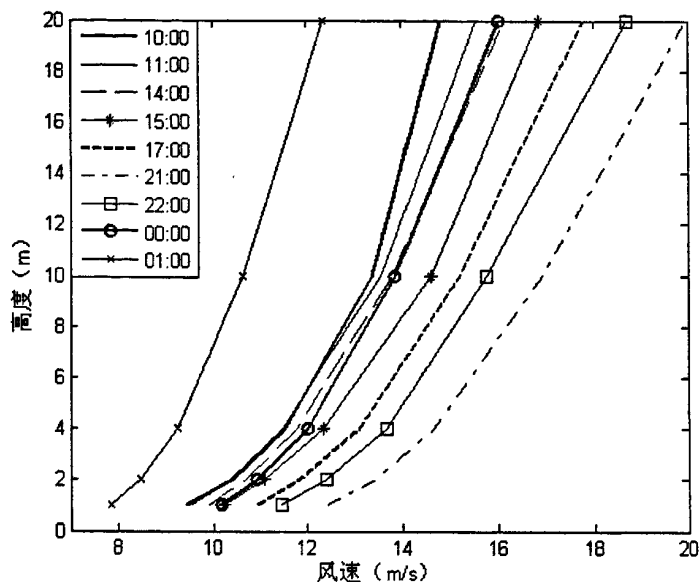


图 5.7 沙尘暴天气条件下风速廓线

Fig. 5.7 The profiles of wind speed in dust storm

5.2.2 扬沙

10:00-14:00, 20m 气层内风速随时间增大。10 时, 20m 气层内平均风速为 12.86m/s, 至 14 时平均风速已达到 15.60 m/s。14:00-20:00, 20m 气层内风速随时间减小, 瞬时最大风速 15.8m/s。扬沙天气过程中风速逐渐减小, 说明一旦起沙即使风速有所下降, 沙尘粒子仍会滞留在大气中一段时间直至风速降到无法承载沙尘粒子。扬沙结束后, 20 时的平均风速降到 7.97m/s (图 5.8)。14:20 发生的扬沙出现四次阵性大风, 最长一次持续近 4 个小时。

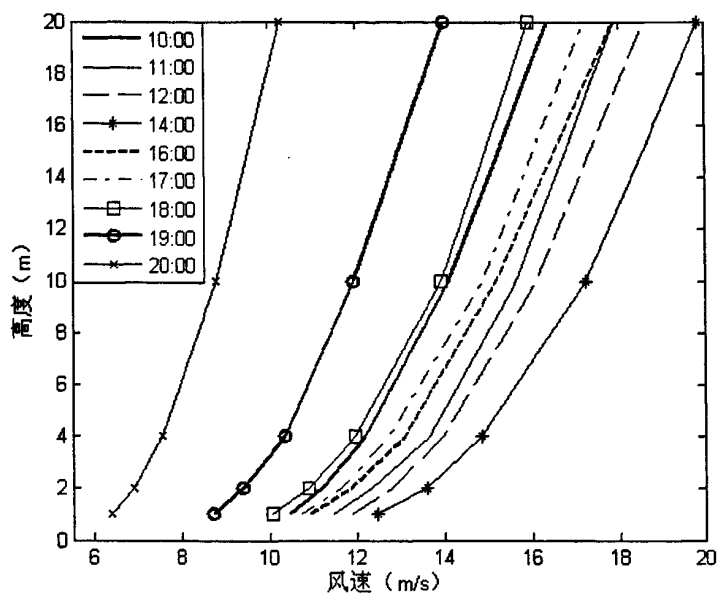


图 5.8 扬沙天气条件下风速廓线

Fig.5.8 The profiles of wind speed in blowing sand

5.2.3 浮尘

4:30 浮尘天气尚未形成, 由图 5.9 可知, 此时 20m 气层内的平均风速为 6.64 m/s。5:30 风速有所下降, 平均风速为 5.24 m/s, 随后风速逐渐增大, 瞬时最大风速为 12.8m/s。浮尘天气结束时 20m 气层内的平均风速增大到 8.87 m/s。此后风速进一步加大, 9:30 达到最大, 20m 气层内的平均风速为 10.62m/s。可见, 浮尘天气过程中风速持续增大。

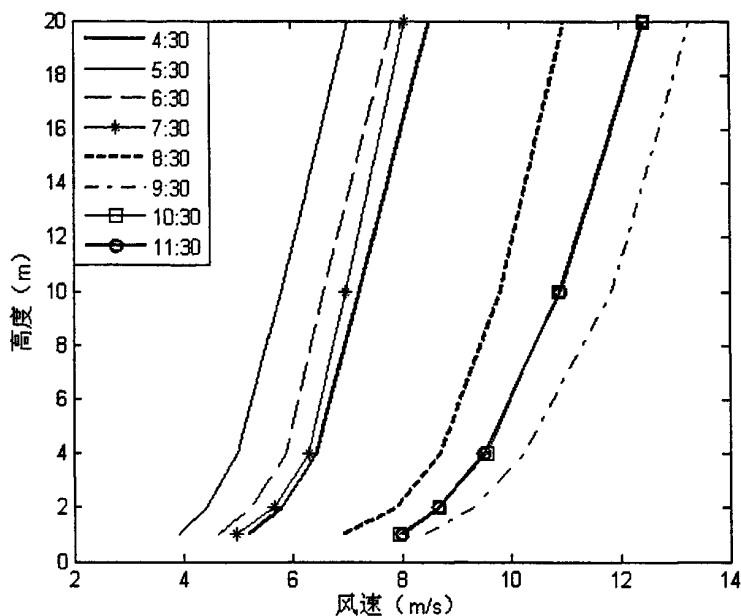


图 5.9 浮尘天气条件下风速廓线

Fig. 5.9 The profiles of wind speed in floating dust

5.3 温度

5.3.1 沙尘暴

如图 5.10 所示, 10 时, 2-4m 出现小范围逆温, 10:00-11:00, 随着太阳短波辐射的增强, 20m 气层(近地层)内温度随时间逐渐增大, 11 时, 2-10m 气层逆温强度 $2.12^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。此后, 温度持续下降直至沙尘暴结束, 逆温强度逐渐增大, 19 时逆温强度达到最大, 为 $4.95^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。次日 00 时, 20m 气层内平均温度已降至 -1.43°C , 逆温强度为 $3.80^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。沙尘暴过程中平均降温率 $0.97^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 沙尘暴结束后 1h 温度降低 1.22°C , 逆温强度最小, 为 $2.96^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 并出现了降雪天气。

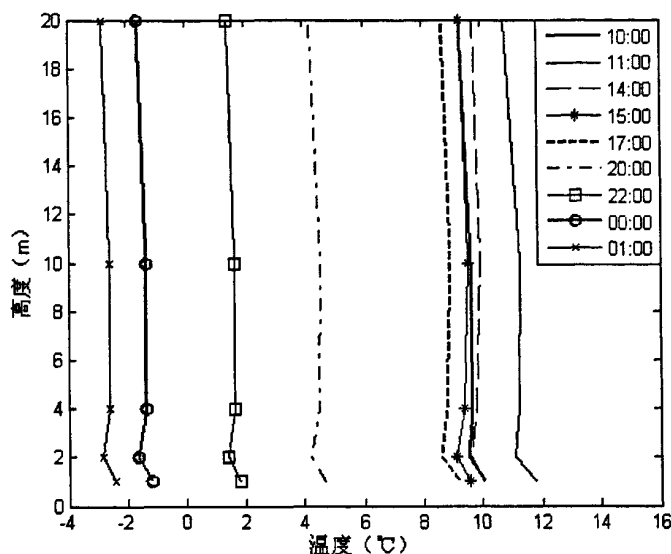


图 5.10 沙尘暴天气条件下温度廓线

Fig. 5.10 The profiles of temperature in dust storm

5.3.2 扬沙

由图 5.11 可以看出:14:00-20:00, 2-10m 气层呈现出逆温, 且逆温强度从 14 时的 $1.10^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 增大到 20 时的 $4.46^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。14:00-17:00, 20m 气层内的平均增温率 ($0.75^{\circ}\text{C}/\text{h}$) 大于同时段的背景大气 ($0.42^{\circ}\text{C}/\text{h}$) (选取 2005 年 4 月所有晴天条件下各时段的气象要素平均值作为背景大气, 下同); 日落之后 (17:00-19:00), 20m 气层内的平均降温率 ($0.30^{\circ}\text{C}/\text{h}$) 又小于同时段的背景大气 ($1.33^{\circ}\text{C}/\text{h}$)。这主要是由于沙尘气溶胶的存在抑制了地面长波辐射的热损耗, 导致沙尘层及以下大气的平均增温率较大或者降温率较小。可见, 太阳辐射和地面辐射的强弱决定了近地层温度的变化趋势, 而沙尘气溶胶的辐射强迫又影响了温度变化速率。

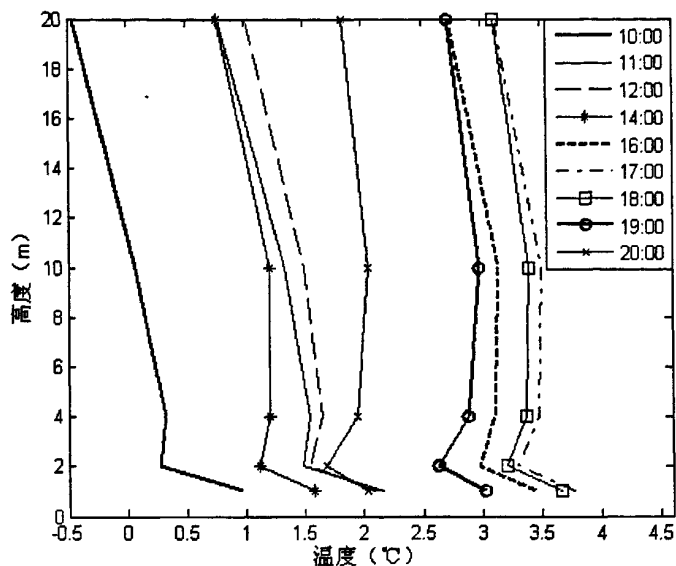


图 5.11 扬沙天气条件下温度廓线

Fig.5.11 The profiles of temperature in blowing sand

5.3.3 浮尘

浮尘发生前(4:30-5:30)各气层温度随时间降低,浮尘过程中各气层温度随时间均增大。5:30-8:30, 20m 气层内的平均增温率($2.50^{\circ}\text{C}/\text{h}$)大于同时段的背景大气($1.50^{\circ}\text{C}/\text{h}$),原因同4月19日扬沙过程。期间2-10m 气层出现逆温,10-20m 气层近似等温(图5.12);随着太阳辐射逐步增强,2-10m 气层逆温强度减小,同时10-20m 气层温度递减。所以此次浮尘过程中,温度的变化主要决定于太阳辐射,沙尘气溶胶的辐射强迫对温度变化速率有影响。

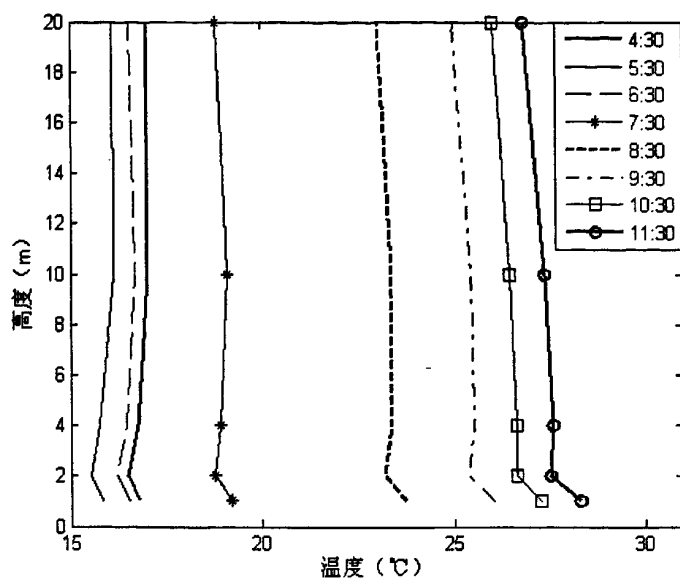


图 5.12 浮尘天气条件下温度廓线

Fig. 5.12 The profiles of temperature in floating dust

5.4 相对湿度

5.4.1 沙尘暴

10 时 20m 气层内的平均相对湿度为 21.35%；11 时下降到 17.92%；此后，温度持续下降，但相对湿度却出现周期为 2-4 个小时的震荡，增湿与降湿相互转化，与气温并未呈现出完全的反相关关系；次日 00 时 20m 气层内的平均相对湿度增大到 38.37%；沙尘暴结束后，20m 气层内相对湿度继续增大，01 时，达到 45.76%（图 5.13）。总体而言，相对湿度呈增加态势。

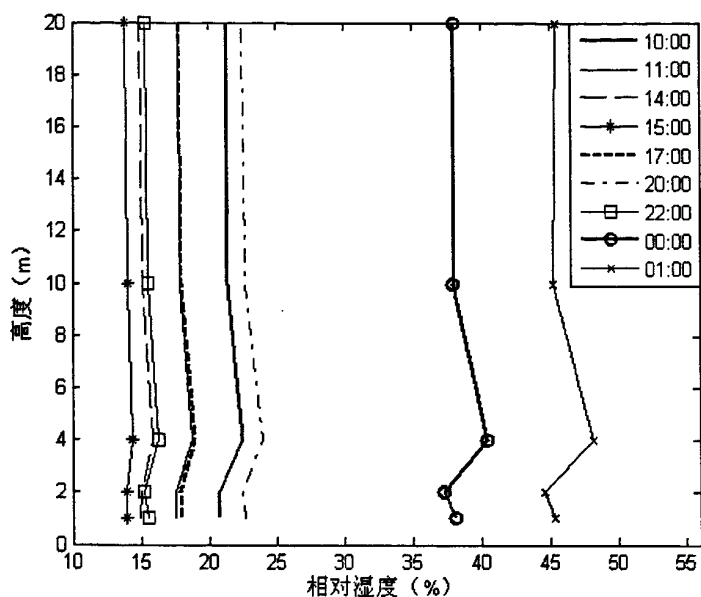


图 5.13 沙尘暴天气条件下相对湿度廓线

Fig.5.13 The profiles of relative humidity in dust storm

5.4.2 扬沙

由图 5.14 可以看出：14:00-17:00，相对湿度随温度升高而减小，递减率为 $3.03\%/h$ ，17:00-19:00，相对湿度随温度降低而增大，达 $0.65\%/h$ ，小于同时段的背景大气 $0.95\%/h$ ，同时降温率 $0.39^\circ\text{C}/h$ 小于同时段的背景大气 $1.16^\circ\text{C}/h$ ，即降温率较小，相对湿度增加率亦较小。

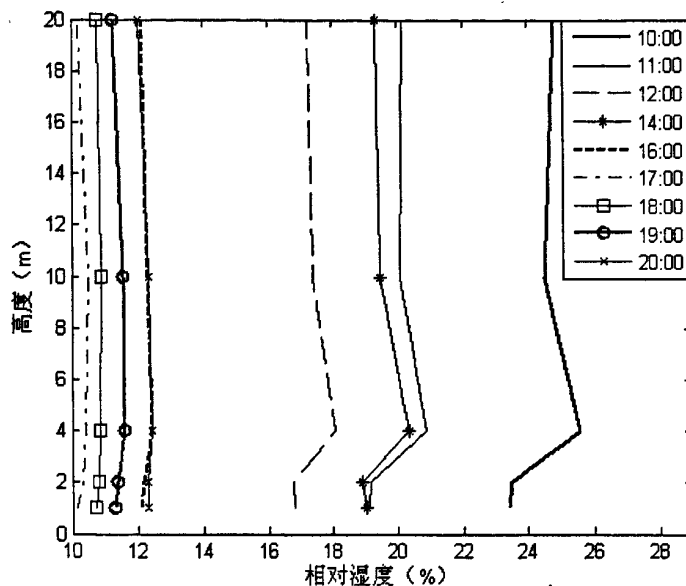


图 5.14 扬沙天气条件下相对湿度廓线

Fig. 5.14 The profiles of relative humidity in blowing sand

5.4.3 浮尘

各气层相对湿度在浮尘发生前随时间增大, 递增率为 $1.61\%/h$; 5:30-11:30 随温度的升高而逐渐减小, 浮尘期间, 平均递减率 ($2.69\%/h$) 比同时段背景天气的递减率 ($1.25\%/h$) 大(图 5.15)。扬沙期间, 平均递减率为 $0.77\%/h$ 。说明浮尘天气各气层相对湿度下降速率大, 这主要是因为浮尘天气各气层增温率大于背景天气的缘故。

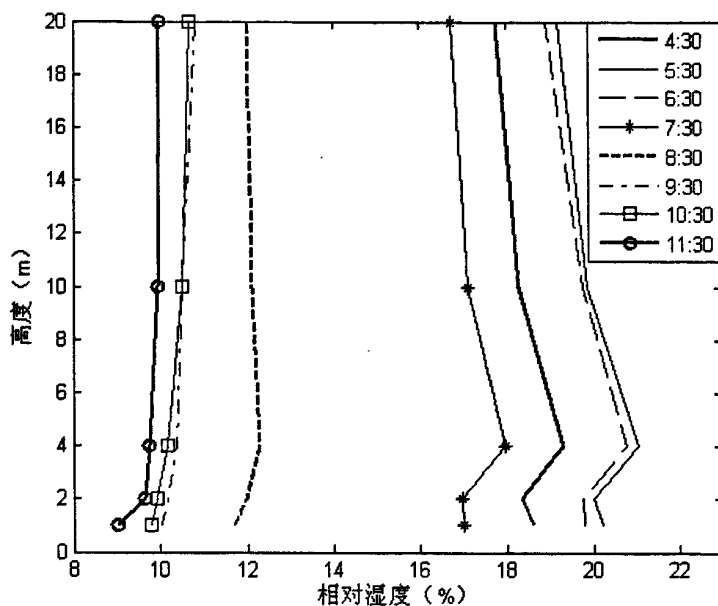


图 5.15 浮尘天气条件下相对湿度廓线

Fig. 5.15 The profiles of relative humidity in floating dust

5.5 PM_{10}

5.5.1 沙尘暴

沙尘天气发生前 1 小时, PM_{10} 的平均质量浓度为 $1897.16\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。扬沙期间 PM_{10} 的平均质量浓度为 $2878.93\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由于故障, 紧随其后的沙尘暴过程中的 PM_{10} 的数据缺失, 沙尘暴结束后 1 小时的 PM_{10} 平均质量浓度为 $6094.08\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 5.16), 由此推知沙尘暴发生时 PM_{10} 的浓度相当大, 数量级甚至能达到 $10^5\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

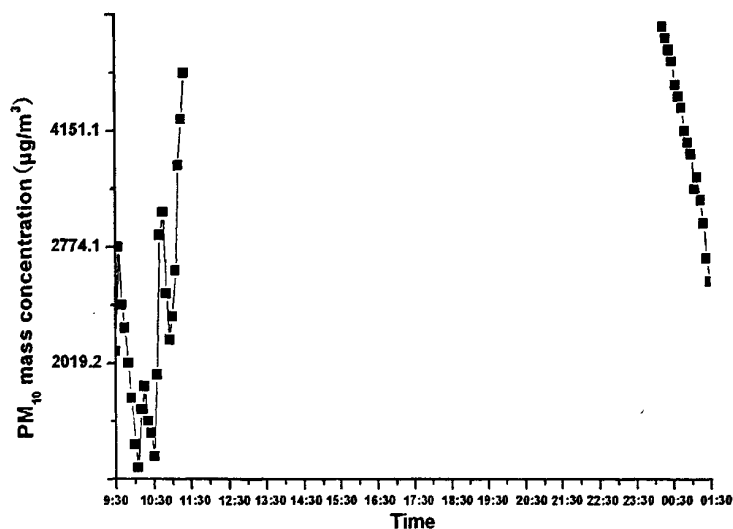
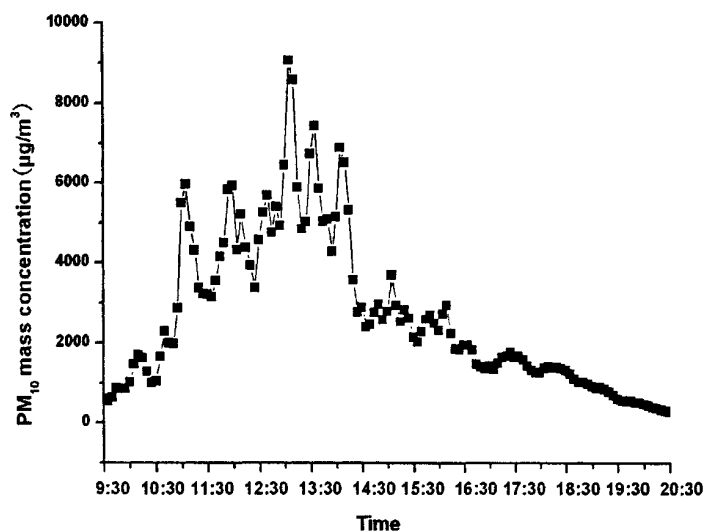

 图 5.16 沙尘暴天气条件下的 PM_{10} 质量浓度变化

 Fig. 5.16 The change of PM_{10} mass concentration in dust storm

综上所述,沙尘暴发生前风速较大,受太阳辐射的影响,气温较高,相对湿度较小, PM_{10} 质量浓度较大;过程中风速迅速增大,干冷空气的介入导致温度骤降,相对湿度猛增, PM_{10} 质量浓度大幅度增加;结束后风速减小,温度持续下降,相对湿度持续增大, PM_{10} 质量浓度减小。

5.5.2 扬沙

扬沙天气发生前 1 小时, PM_{10} 的平均质量浓度为 $1254.02\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。之后的扬沙天气过程中, PM_{10} 浓度迅速增大, 平均值为 $4006.06\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。沙尘暴期间, PM_{10} 浓度达到最大, 平均值为 $5436.38\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。14:20-19:37 扬沙天气维持, PM_{10} 浓度有所下降, 平均值为 $1799.49\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 此次沙尘天气以扬沙为主。扬沙天气结束后 1 小时内, PM_{10} 浓度迅速下降, 平均值为 $428.15\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 5.17)。在该日的沙尘天气过程中, 共发生两次扬沙天气。前一次风速较大, 为沙尘粒子的上扬和传输提供了动力条件, 导致 PM_{10} 平均质量浓度较大, 这也为随后发生的沙尘暴提供了物质基础。沙尘暴结束后的扬沙天气 PM_{10} 平均质量浓度相对较小, 该时段风速逐渐减小, 大的沙尘粒子由于重力作用逐渐沉降, 导致大气中悬浮的沙尘粒子浓度降低。

图 5.17 扬沙天气条件下的 PM₁₀ 质量浓度变化Fig. 5.17 The change of PM₁₀ mass concentration in blowing sand

综上所述,扬沙发生前风速较大,尤其是之前发生的沙尘暴风速猛增,温度升高,相对湿度下降,PM₁₀质量浓度迅速增大;过程中风速逐渐下降,受太阳辐射的影响温度升高,相对湿度降低;至 17 时,温度开始降低,相对湿度增大,PM₁₀质量浓度降低;结束后风速减弱,气温下降,相对湿度增大,PM₁₀质量浓度再次降低。

5.5.3 浮尘

浮尘天气发生前 1 小时, PM_{10} 的平均质量浓度为 $1567.36\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。浮尘过程中 PM_{10} 的平均质量浓度为 $1765.53\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 略有增大。扬沙发生时, PM_{10} 的平均质量浓度为 $2194.85\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。扬沙结束后 1 小时内, PM_{10} 的平均质量浓度迅速减小, 为 $1366.76\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 比浮尘发生前 1 小时有所下降(图 5.18)。

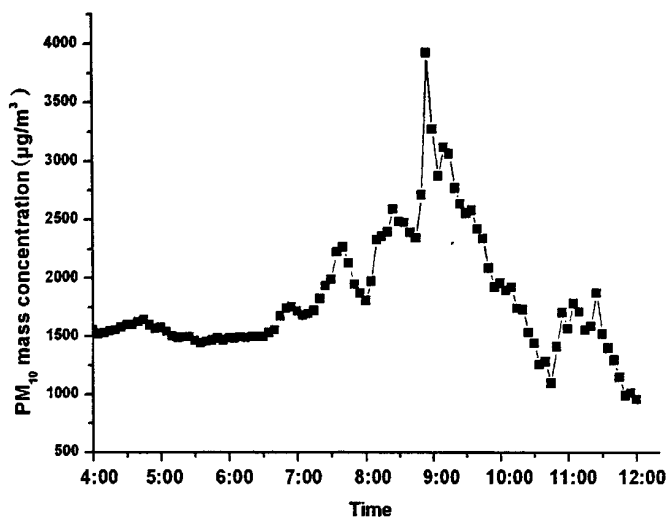


图 5.18 浮尘天气条件下的 PM_{10} 质量浓度变化

Fig. 5.18 The change of PM_{10} mass concentration in floating dust

综上所述, 浮尘发生前风速较小, 温度下降, 相对湿度增大, PM_{10} 质量浓度较大; 过程中风速逐渐增大, 温度升高, 相对湿度下降, PM_{10} 质量浓度略有增大; 结束后风速再次下降, 温度持续升高, 相对湿度降低, PM_{10} 质量浓度比过程开始前略有减少。

第六章 主要结论与创新点

6.1 主要结论

本文利用朱日和地区 2005 年 1 月-2006 年 4 月 20m 气象塔的风速、风向、温度、相对湿度资料及 PM_{10} 沙尘质量浓度数据的分析,得到气象要素在晴天和沙尘天气条件下的变化特征,以及 PM_{10} 在典型沙尘天气条件下的变化特征,结果表明:

(1) 朱日和地区春季温度回升,风速最大,相对湿度最小,利于起沙,故沙尘天气频繁。春季晴天条件下,风速随高度升高而增大;相对湿度的变化与温度呈反相关关系;气温在 2m 处最低,1m 处最高,2-10m 普遍存在逆温;从 24 时次平均气温看,16 时气温达到最高,5 时气温为最低;相对湿度在 24 时次均为 4m 处最大,19 时至翌日 6 时 20m 处相对湿度最小,7 时至 18 时 1m 处相对湿度最小。

(2) 近地层风速符合幂指数率的分布规律,并且幂指数 m 能够较好的反映出风速梯度的变化情况。在沙尘暴、扬沙、背景、浮尘的天气条件下,春季近地面层风速梯度依次增大,湍流动量、热量交换系数依次减小。风向以西南为主,这跟朱日和处于蒙古气旋的底前部有关。

(3) 在沙尘气溶胶对长波辐射的吸收反馈作用、对短波辐射的削弱作用以及冷空气等的共同影响下,浮尘天气温度变化以增温为主,各气层平均增温率大于同时段的背景大气;扬沙天气温度变化亦以增温为主,但各气层平均增温率小于同时段的背景大气;沙尘暴天气温度变化以降温为主,平均降温率为 $0.61^{\circ}\text{C}/\text{h}$,而同时段的晴天条件下是增温的。

(4) 相对湿度廓线的最大值、最小值分别在 4m、1m 层出现频率最大,2-4m 气层存在逆湿。春季相对湿度的平均递减率(递增率)与平均增温率(降温率)的大小正相关。浮尘天气相对湿度的平均递减率大于同时段的背景天气,扬沙天气相对湿度的平均递减率小于背景天气,沙尘暴天气相对湿度随时间增大,平均增大率为 $2.80\%/h$ 。

(5) 对 2006 年 3 月 9 日、2005 年 4 月 19 日及 2005 年 4 月 29 日发生在朱日和地区的典型沙尘暴、扬沙、浮尘天气对比分析后发现:总体说来,沙尘天气条件下, R_i 都较小且接近 0。近地层风速切变较大,动力湍流发展旺盛。温度廓线近似等温或递减,甚至超绝热递减。因此,近地层总的湍流发展旺盛。沙尘暴、扬沙发生发展过程中风速较大,梯度变化明显,瞬时最大风速分别达到 17.5m/s 、 15.8m/s ,浮尘天气风速相对较小,整个过程均呈现出递增态势,瞬时最大风速 12.8m/s 。沙尘暴、扬沙、浮尘结束后比开始前的风速均

有所减小。气温在沙尘暴期间主要受冷空气的影响迅速减小,过程平均降温率为 $0.97^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。扬沙过程中,不同时段 20m 气层内的平均增温率或降温率分别大于或小于同时段的背景大气。浮尘天气条件下,20m 气层内的平均增温率大于同时段的背景大气。可见,扬沙和浮尘天气条件下,长短波辐射决定了近地层温度的变化趋势,而沙尘气溶胶的辐射强迫又影响了温度变化速率。沙尘暴天气发生时,相对湿度基本上呈增加趋势,出现了周期为 2-4 个小时的震荡。扬沙、浮尘天气条件下,相对湿度与温度完全呈现出反相关关系,且相对湿度均较小。 PM_{10} 质量浓度在沙尘暴、扬沙、浮尘天气条件下依次递减。沙尘暴结束后, PM_{10} 质量浓度依然较大;而扬沙、浮尘结束后, PM_{10} 质量浓度比其开始时有所减小。

6.2 本文创新点

(1) 利用 20m 气象塔资料,分析了沙尘天气发生发展过程中气象要素的演变特征,并与同时段晴天条件下气象要素的演变特征作了对比分析,初步揭示了沙尘天气过程中气象要素的梯度变化,以期对沙尘天气的认识更进一步,进而对深入研究沙尘天气发生发展机理提供帮助,为今后的沙尘预报提供参考。

(2) 分析典型沙尘天气发生前、中、后的 PM_{10} 质量浓度变化,表明沙尘暴过程中 PM_{10} 质量浓度数量级较大,结束后亦较大,而扬沙和浮尘过程中 PM_{10} 质量浓度数量级较接近,为起沙模型的建立提供部分观测数据基础。

(3) 根据湍流理论的二阶闭合近似发展得到的结论,计算不同沙尘天气条件下不同气层的湍流动量交换系数 K_m 及湍流热量交换系数 K_h ,定量地反映各气层的湍流状况,结果表明,湍流交换系数随气层高度的升高而增大,这一结果与国外的观测是一致的。基本上 1-2m、2-4m、4-10m、10-20m 四个气层的动量、热量交换系数均呈现出沙尘暴天气条件下最大,扬沙次之,浮尘最小的特点。因此,对沙尘天气强度的预警有一定的参考价值。

6.3 存在问题和研究展望

本文为沙漠地区春季近地层气象要素的分布规律研究提供了初步的分析结果，但仍存在以下的不足：

(1) 仅对 2005 年 1 月-2006 年 4 月期间发生在朱日和的沙尘天气进行研究，初步分析了不同沙尘天气条件下近地层气象要素的垂直分布情况，对于高层大气中的气象要素是否也存在这样的规律，还需进一步探讨。

(2) 由于 PM_{10} 质量浓度数据的缺失，不能系统地反映出沙尘暴、扬沙、浮尘天气条件下 PM_{10} 质量浓度的相互关系，只选取其中典型个例进行对比分析。

进一步研究可将不同沙漠地区气象塔的数据结合分析，同时区分沙尘的源地（本地源及外来源），结合天气形势探究沙尘移动路径，并且配合探空资料，系统深入地研究沙尘天气发生发展过程中气象要素的垂直变化规律，揭示出导致气象要素发生变化的深层原因，为建立起沙模型及沙尘天气预警系统打下坚实的基础。

参考文献

- [1] 中国气象局.地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 23.
- [2] 王伟, 方宗义. 沙尘暴天气及其研究进展综述[J]. 应用气象学报, 2004, 15 (3): 366~381.
- [3] 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 韩茂莉, 程龙. 大漠狂风—沙尘暴历史、现实的思考. 太原: 山西人民出版社, 2002.
- [5] 孟昭华. 中国灾荒史记. 北京: 中国社会科学出版社, 1999.
- [6] Hankin E H. On dust raising winds and descending currents. *India Met Memoirs*, 1921, 22, Part VI.
- [7] Sutton, I. J. Haboob. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1925, 51: 25~30.
- [8] Wolfson N, Matson M. Satellite observations of a phantom in the desert. *Weather*, 1986, 41(2): 57~60.
- [9] Bhalotra, Y.P.R. Will it be a duststorm or a thunderstorm? *Indian Journal of Meteorology and Geophysics*. 1954, 5(3): 290.
- [10] T. J. Lawson. Haboob Structure at Khartoum. *J. of Weather*, 26: 105~112.
- [11] Idso S B, Ingram R S, Pritchard J M. An American Haboob. *Bullentin of the American Meteorological Society*, 1972, 53(10): 930~935.
- [12] 曲绍厚等, 北京地区一次沙尘暴过程的来源, 环境科学学报, 1984, 4: 80~85.
- [13] 王式功, 杨德保, 金炯等. 我国西北地区沙尘暴时空分布及其成因分析[A]. 中国科协第二届青年学术年会论文集(资源与环境科学分册)[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995: 364~370.
- [14] Brazel A J, Nicking W C. The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona. *J Climatology*, 1986, 6(3): 255~275.
- [15] Jauregui E. The dust storms of Mexico City. *Inter J Climatology*, 1989, 9(2): 169~180.
- [16] Gillette D.A, J. Adams *et al.*, Threshold velocities for input of soil particles into air by desert soils. *J. Geophys. Res*, 1980, 85 (c15) : 5621~5630.
- [17] 赵鸣. 论塔层风、温廓线[J]. 大气科学, 1993, 17(1): 65~76.
- [18] 解以扬, 刘学军. 天津气象塔风温梯度观测资料的统计特征[J]. 气象, 2003, 29(1): 592~595.
- [19] 彭艳, 张宏升, 刘辉志, 等. 青藏高原近地面层气象要素变化特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(2): 180~190.
- [20] 张杰. 塔克拉玛干沙漠腹地沙丘表面温度特征初探[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 592~595.

- [21] 游庆龙,康世昌,李潮流,等.青藏高原纳木错气象要素变化特征[J].气象,2007,33(3):54~60.
- [22] 董旭光,王栋成,陈艳春,等.宁夏鸳鸯湖地区低空气象要素观测分析[J].干旱气象,2006,24(3):62~67.
- [23] 俱抗,胡隐樵.远离绿洲的沙漠近地面观测实验[J].高原气象,1994,13(3):282~290.
- [24] Joseph P V, Raipal D K., Deka S N, "Andhi", the convective dust storms of Northwest India. *Mausam*, 1980, 31, 431~442.
- [25] McNaughton, D L. Possible connection between anomalous anticyclones and sandstorms, *Weather*, 1987, 42(1):8~13.
- [26] 孙继明,肖稳安,牛生杰,等.沙漠地区沙尘天气近地层湍流输送特征分析[J].南京气象学院学报,2002,25(4):489~495.
- [27] 徐国昌,陈敏连,吴国雄.甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析[J].气象学报,1979,37(4):26~35
- [28] 胡泽勇,黄荣辉.2000年6月4日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征的变化[J].大气科学,2002,26(1):1~8
- [29] L. Natsadorj, D. Jugder, Y. S. Chung. Analysis of dust storms observed in Mongolia during 1937-1999. *Atmospheric Environment*, 37(2003):1401~1411.
- [30] 李艳春,赵光平.宁夏中北部沙尘暴过程中气象要素变化特征及成因分析[J].高原气象,2005,24(2):212~217.
- [31] Carlson T. N., S. Benjamin. Radiative heating rates for Sahara dust. *J. Atmos. Sci.*, 1980, 37: 193~213.
- [32] 周明煜,曲绍厚,宋锡铭等.北京地区一次尘暴过程的气溶胶特征,环境科学学报,1981,1: 207~218.
- [33] 石广玉,许黎,陈继平等.北京地区1991年春夏之交的大气气溶胶光学特性测量[J].第四届全国气溶胶学术会议论文集,合肥,1992,33~37.
- [34] 沈志宝,文军.沙漠地区春季的大气混浊度及沙尘大气对地面辐射平衡的影响[J].高原气象,1994,13(3):330~338.
- [35] Schwarta S. E., Coauthors. Group report: Connection between aerosol and properties and forcing of climate[R]. In: Charlson R. J., J. Heintzenberg eds. *Aerosol Forcing of Climate*. 1995. 251~280.
- [36] 胡隐樵,光田宁.强沙尘暴发展与干飚线—黑风暴形成的一个机理分析[J].高原气象,

- 1996, 15 (2): 178~185.
- [37] 魏丽, 沈志宝. 大气沙尘辐射特性的卫星观测[J]. 高原气象, 1998, 17(4): 347~355.
- [38] Karyampudi V. M., S. E. Koch, J. T. McQueen. Analysis and numerical simulations of the Sahara air layer and its effects on easterly wave disturbances. *J. Atmos. Sci.*, 1998, 45: 3102~3136.
- [39] Quijano A. L., I. N. Sokilik, O. B. Toon. Radiative heating rates and direct radiative forcing by mineral dust in cloudy atmospheric conditions. Underwood G. M. 2000, 105(D12): 12207~12219.
- [40] Alpert P., E. Ganor. Sahara mineral dust measurements from TOMS: Comparison to surface observations over the Middle East for the extreme dust storm, March 14-17 1998. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(D16): 18132~18146.
- [41] Underwood G. M. Heterogeneous reactions of XO₂ and HNO₃ on mineral oxides and mineral dust: A combined laboratory and modeling study. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106((D16): 18055~18078.
- [42] 辛金元, 张文煜, 袁九毅等. 沙尘气溶胶对直接太阳辐射的衰减研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23 (3): 311~315.
- [43] 高庆先, 任阵海, 李占青等. 中国北方沙尘气溶胶时空分布特征及其对地表辐射的影响[J]. 资源科学, 2004, 26 (5): 2~10.
- [44] 姚济敏, 张文煜, 袁九毅等. 典型干旱区沙尘气溶胶光学厚度及粒度谱分布的初步分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26 (1): 77~80.
- [45] Ott S T, A Ott. Analysis of a Trans-Atlantic Saharan dust outbreak based on satellite and GATE data. *Mon Wea Rev*, 1991, 119(8): 1832~1850.
- [46] Shao, Y. P., M. Raupach, and D. Short, Preliminary assessment of wind erosion patterns in the Murray-Darling-Basin. *Aust. J. Soil Res.*, 1994, 34, 309~342.
- [47] Shao, Y. P., and L. M. Leslie, Wind erosion prediction over the Australian continent. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(D25): 30091~30105.
- [48] Marticorena, B., G. Bergametti *et al.*, Modeling the atmospheric dust cycle, Part 2: Simulation of Saharan dust sources, *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(D4): 4387~4404.
- [49] 黄美元, 王自发, 东亚地区黄沙长距离输送模式的设计, 大气科学, 1998, 22, 625~637.
- [50] 方宗义等, 用气象卫星遥感监测沙尘暴的方法和初步结果, 第四纪研究, 2001, 21, 48~55.
- [51] 王伟, 宋振鑫, 邵亚平, 等. 沙尘暴天气数值预报系统及其预报效果检验. 气象科技,

2005, 33 (2): 25~31.

[52] 周自江.近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气[J].第四纪研究, 2001, 21 (1): 9~17.

[53] 赵德山, 洪钟祥.典型辐射逆温生消过程中的爆发性特征.大气科学, 1981, 4 (5): 407~414.

[54] Roland B.Stull.边界层气象学导论.北京:气象出版社, 1991, 182~194.

[55] Blackadar A K. Modeling the nocturnal boundary layer. Preprints of the Third Symposium on Atmospheric Turbulence, Diffusion and Air Quality, Raleigh [M]. NC, 19~22 October 1976, Amer. Meteor. Soc., Boston, 46~49.

[56] Blackadar A K. High resolution models of the planetary boundary layer [J]. Advances in Enviromental and Scientific Engineering, Vol. I , Gordon and Breach,1979, 55~85.

[57] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology [M]. Boston: Kluwer Academic Punlishers, 1998,11.

[58] 胡非.湍流、间歇性与大气边界层[M].北京:科学出版社.1995.175~178.

[59] 牛生杰,孙继明,陈跃,等.贺兰山地区春季沙尘气溶胶质量浓度的观测分析[J].高原气象,2002,20(1):82~87.

参加科研项目、学术活动及发表或待发表论文

资助项目：

- (1) 国家自然科学基金项目“沙尘天气近地层气象要素分布及起沙通量研究”(40765001);
- (2) 科技部公益项目“沙尘气溶胶辐射模型及气候环境生态效应研究”(项目编号: 2005DIB3J108);
- (3) 教育部博士点基金“沙尘气溶胶辐射模型构建及其气候强迫研究”(项目编号: 20050300002);
- (4) 南京信息工程大学“沙尘通量与辐射模型”(项目编号: KLME05006);
- (5) 中国大气气溶胶及其气候效应研究“沙尘气溶胶间接效应研究”(973 项目编号: 2006CB403700);
- (6) 国家自然科学基金“典型草原区多因素交错作用下的风沙流结构特征”(40705005)。

参加学术会议及国际培训：

- (1) 2008 年 5 月参加江苏省博士研究生学术论坛(江苏, 南京);
- (2) 2007 年 11 月参加南京地区冬季雾的野外观测(江苏, 南京);
- (3) 2007 年 10 月参加第四届全国环境化学学术大会(江苏, 南京);
- (4) 2007 年 9 月参加长江三角洲城市群可持续发展中的气候与环境问题科学研讨会;
- (5) 2007 年 7 月上海气象局实习(上海);
- (6) 2007 年 5 月南京信息工程大学气象台实习 ;
- (7) 2007 年 4 月内蒙古锡林郭勒盟气象局观测实习(内蒙古, 锡林浩特);
- (8) 2006 年 12 月参加南京地区冬季雾的野外观测(江苏, 南京);
- (9) 2006 年 7 月参加“云、气溶胶和辐射相互作用”培训班(江苏, 南京);
- (10) 2005 年 11 月参加第八届全国气溶胶会议暨第二届海峡两岸气溶胶研讨会(江苏, 南京)。

发表的文章：

- (1)程穆宁,牛生杰. 沙漠地区春季近地层气象要素分布规律的观测研究[J].中国沙漠(录用待刊)
- (2)程穆宁,牛生杰,葛增平,吕晶晶. 典型沙尘天气过程近地层气象要素演变特征的观测研究[J].气候与环境研究(在审)

致 谢

感谢我的导师牛生杰教授，三年中对我学习、生活无微不至的关心和爱护。导师那严谨的治学态度、精湛的学术造诣、高尚的道德情操、开阔的思维方式以及敏锐的洞察力，不仅授我以文，而且教我做人，是我今后学习、生活、工作的指路明灯。牛老师平易近人，对待学生亲切和蔼，给我们提供良好的学习环境，鼓励指导我的论文创作，使我受益匪浅。在此谨向导师致以最衷心的感谢和敬意！

感谢内蒙古锡林浩特气象局吉局长、郝丽，锡林浩特国家观象台王台长、吴台长、武站长、董会计、王敏等给予难得的实习机会和无私的帮助！

感谢南京信息工程大学钱翼梅老师、朱文镇老师、周淑琴老师、何亚群老师以及研究生部所有的老师多年来给予我的诸多帮助！感谢应用气象学院杨军老师、银燕老师、邱玉琚老师、徐珍老师、耿小雷老师及所有关心和帮助我的老师，谢谢你们给我的支持与关怀！

感谢上海气象局应朋友处长、龚淑琴主任、浦东气象局李丽局长、谈建国局长在我实习期间给予的悉心指导和热情帮助！

感谢我同门的兄弟姐妹们，有你们的相伴是我一生宝贵的财富！感谢我的舍友赵姝慧、孙丹，带给我无限的欢乐和支持！

特别感谢父母的养育之恩，家人是我的坚强后盾，有你们的支持和谅解，我才能踏踏实实走好每一步，能够取得今天的成绩是母亲的坚强和执着赋予我的强大动力！感谢父亲的不辞辛苦，父亲的关爱与理解，为我卸掉所有的羁绊，让我轻装上阵，抛开所有顾虑与忧愁，徜徉于知识的海洋，衷心谢谢您！

最后，我要感谢我的男友陆春松，是他一直在背后默默鼓励支持我，为我分担忧愁！

回顾这三年的求学之路，要感谢的人实在是太多太多，最后祝愿所有理解、帮助、支持过我的人们，一生幸福平安！

程穆宁

2008年5月