

Y 868400

分类号 _____

密级 _____

UDC _____

编号 _____

南京信息工程大学

硕士学位论文

宁夏春季沙尘暴大气环流、动力因子分析
及与北太平洋海温的相关关系研究

培 养 单 位：南京信息工程大学

专 业：气象学

申 请 人：郑广芬

指 导 教 师：牛生杰 教 授

副指导教师：赵光平 正研级高工

二〇〇五年十二月

宁夏春季沙尘暴的大气环流、动力因子分析及与北太平洋海温的遥相关关系研究

摘 要

本文根据宁夏春季沙尘暴资料、北太平洋海温资料、NCEP再分析资料及大气环流特征量资料、银川站探空资料等资料,较系统地分析了宁夏春季沙尘暴的基本规律及其异常的大气环流背景、动力不稳定条件,重点研究了北太平洋海温与宁夏春季沙尘暴发生次数之间的遥相关关系、耦合关系以及加利福尼亚海温异常对沙尘暴的可能影响途径,结果表明:

1. 宁夏春季沙尘暴次数在1961~2003年间,总体上呈下降趋势,且具有明显的阶段性特征,80年代中期发生年代际气候突变;

2. 沙尘暴发生前,大气的不稳定性明显增强;沙尘暴天气发生时不稳定性主要发生在700 hPa以下,最为突出的是850 hPa以下;沙尘暴发生过程中不稳定性达到最强;

3. 北半球极涡强度指数、极涡面积指数、亚洲西风环流指数及宁夏春季大风日数、冬季平均气温、冬春季平均气温温差与沙尘暴存在较为一致的年代际变化特征,即决定冷空气活动频次的诸因子在80年代中期也发生了突变;

4. 宁夏春季沙尘暴频次与前一年10月到当年5月加利福尼亚海温有显著的负相关关系;另外发生在北太平洋的ENSO事件对宁夏春季沙尘暴有重要影响,当北太平洋海温场呈厄尔尼诺型分布时,宁夏沙尘暴日数偏少,反之偏多。

5. 关键海区冷水年春季,欧亚大陆高空系统较强,环流经向度加大,蒙古气旋加深,有利于极地冷空气南下,为西北沙尘暴的发生发展创造了有利气候条件。另外,冷水年冬春季东亚大槽位置以偏西为主,极涡强度偏强的年份占优势,西风环流指数负距平的年份偏多,经向环流偏强,冷锋活动频繁,大部分冬季平均气温偏低;而暖水年基本相反。

关键词: 宁夏沙尘暴, 大气环流, 不稳定条件, 北太平洋海温, 耦合相关

Abstract

A study on circumfluence, dynamic factor and the remote correlation with north Pacific ocean SST of spring sandstorm in Ningxia

Using observation of spring sandstorm in Ningxia, North Pacific ocean SST, NCEP reanalyzed data, indices of circumfluence and the data of sonde in Yinchuan, a study on the basic law of spring sandstorm in Ningxia, and its circumfluence, dynamic instability condition was conducted systematically, especially on the remote correlation between north Pacific ocean SST and times of spring sandstorm in Ningxia, coupling relation and the relation between the anomaly of California and its possible impact on the sandstorm. The results show that:

1. The times of spring sandstorm in Ningxia decreased in general with an obvious phase characteristics during 1961-2003 and there was a mutation in the middle of 1980s;

2. The instability increased distinctly before sandstorm occurrence; the instability occurred mainly beneath 700 hPa, and most prominently beneath 850 hPa; the instability touched the summit in the course of sandstorm.

3. Indices of the intensity, area of north hemisphere polar vortex, index of Asia monsoon circumfluence and the days of Ningxia gale in spring, mean temperature in winter, and the difference of temperature between winter and spring have the consistent annual variation features with the sandstorm, that means the factors of frequency of cold air activity experienced a mutation in the middle of 1980s.

4. There is an obvious negative correlation between the frequency of spring sandstorm in Ningxia and the SST in California from the previous October to May in the same year, and the ENSO in the north Pacific impressed the spring sandstorm in Ningxia greatly, less sandstorm with the El Nino pattern, vice versa.

5. The years with colder water in the key region in spring, the Eurasian high air systems are stronger, the meridional circulation increased, lower Mongolian cyclones are favorite to guide the cold air to the south and lead to more sandstorms occurrence. The east Asia troughs locate west and much deeper in the most of the years, western indices are more like to be negative, meridional circulation intensified, the cold fronts are more dynamic, most of the years have lower temperatures. Vice versa.

Keyword: Ningxia, sandstorm, circumfluence, instability, North Pacific SST, coupling

宁夏春季沙尘暴的大气环流、动力因子分析及与北太平洋海温的遥相关关系研究

第一章 引言

1.1 研究的意义

沙尘暴是宁夏主要的气象灾害之一，每年都有不同程度的发生，尤其是北部地区为宁夏沙尘暴灾害的多发区，盐池平均每年沙尘暴发生日数达 20 天左右，是除塔里木盆地南缘以外我国沙尘天气发生频次较高的地区之一，是宁夏地区沙尘暴天气发生频次最高的地区，也是影响我国西北及华北地区沙尘天气非常重要的一个源地^[1]。沙尘暴对社会稳定、可持续发展及人民生命财产造成严重危害。1993 年 5 月 5 日的特强沙尘暴，横扫我国西北 110 万 km²^[2]，仅在宁夏伤亡人数超过 100，直接经济损失达 2.7 亿元，受灾人口达 70 万^[3]。这次沙尘暴造成的直接经济损失和严重的环境问题比我国东部有些暴雨、台风造成的损失还要大^[4]。

荒漠化作为一个全球性的重大环境问题，已受到广泛关注，它与全球气候变化、生物多样性一起构成当今世界三大科学前沿课题。众所周知，荒漠化是由自然因素(主要是气候因素)和人为因素两方面共同作用的结果。其中沙尘暴既是一种加速土地荒漠化的重要过程，又是土地荒漠化发展到一定程度的具体体现，具有一定的指示意义。因此，从沙尘暴的形成机理入手，对其进行全面、系统、深入的研究，有助于搞清荒漠化过程中的某些动力学机制，对防灾减灾趋利避害具有十分重要的意义。

1.2 沙尘暴研究现状

沙尘暴是沙漠及其邻近地区特有的一种灾害性天气。国外从 20 世纪 20 年代就开始了沙尘暴时空分布、成因与结构以及监测与对策方面的研究。我国从 70 年代开始对沙尘暴天气进行研究，自 1993 年 5 月 5 日我国西北地区的特强沙尘暴天气发生后，引起了我国政府和科学工作者们的高度重视，有力地推动了沙尘暴研究的广泛开展，于 1993 年 9 月在兰州召开了“首届全国沙尘暴天气研讨会”。之后 1993 年 11 月 29 日国家科委又召开汇报会，将沙尘暴研究正式列入“八五”攻关项目。1994 年以来，国家自然科学基金委又先后资助了多项沙尘暴方面的研究项目，科技部和部分省、市的有关科技管理部门也相继立项支持对沙尘暴进行研究。

1.2.1 沙尘暴时空分布的统计特征

与土地沙漠化区域相联系，全世界有四大沙尘暴多发区，分别位于中亚、北美、中非

和澳大利亚^[5]。我国的沙尘暴区属于中亚沙尘暴区的一部分，主要发生在北方地区。总的特点是：西北多于东北地区，平原(或盆地)多于山区，沙漠及其边缘多于其它地区。且主要集中在两大区域：一个位于塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠，从巴丹吉林沙漠东部，南至甘肃河西走廊，经腾格里沙漠、乌兰布和沙漠，至库布齐沙地和毛乌素沙地，是另一沙尘暴多发区，也是西北地区涉及范围最大的沙尘暴多发区。有关对西北地区强和特强沙尘暴个别例谱的统计分析^[6]表明：我国西北地区最大的强沙尘暴出现区域，是西起吐鲁番、哈密地区，东接蔓延达 1000 km 的甘肃河西走廊，北连内蒙古阿拉善盟，东延伸到河套地区。另外在北疆克拉玛依地区、南疆的和田地区和青海西北部地区还有三个局地性沙尘暴区。宁夏平原及中部盐池、同心地处乌兰布沙漠和腾格里沙漠的下风侧，也是多发中心之一^[7]。周自江等^[8]研究了我国北方干旱、半干旱地区近 47 年来的扬沙和沙尘暴天气资料，通过统计提出我国沙尘暴发生的高频区集中在塔里木盆地和阿拉善、河西走廊东北部两个地区及邻近地区。钱正安等^[9]根据现代沙尘暴资料分析，发现西北有 3 个强沙尘暴高频地区：甘肃北部至内蒙中部、宁夏，新疆东部至甘肃北部，新疆吐鲁番盆地。

我国沙尘暴的季节和月份变化特点是：春季最多，约占全年总数的 1/2，夏季次之，秋季(新疆地区为冬季)最少；按月份来看，4 月份发生频率最高，3 月和 5 月份次之，秋季的 9 月份(新疆为 12 月或 1 月份)最低^[10]。刘景涛等^[11]对内蒙古中西部地区的分析结果也表明，4 月份沙尘暴出现频率最高，春季(3~5 月)占全年的 73%。墨西哥城的沙尘暴是 3 月份发生频率最高，一般在连续 3 个月降水量小于 13mm 的 3 月份，容易出现沙尘暴。在秋季的 9 月份出现频率最低^[12]。在印度西北部的沙尘暴也主要发生在 4~6 月份，这与我国新疆境内沙尘暴的多发期相一致。沙尘暴也具有明显的日变化特征，据王武功等^[13]对 1994 年 4 月上旬我国西北地区沙尘暴发生频率日变化的研究结果表明：沙尘暴主要发生在午后到傍晚时段内，占总数的 65.4%；清晨到中午时段内，仅占 34.6%。在甘肃河西走廊中部地区，黑风暴大都出现在中午 12 时至晚上 22 时的时段内^[14]。

对于沙尘暴发生频次的年际变化趋势的研究，周自江等^[8]认为近 47 年来，除青海、内蒙古和新疆的小部分地区的沙尘暴呈增长趋势外，我国北方大部分地区的沙尘暴在减少，如甘肃民勤与新疆和田两个强沙尘暴多发区 20 世纪 80 和 90 年代的强沙尘暴明显少于 50 和 70 年代；2000 年华北和西北东部部分地区的沙尘暴多于 90 年代均值，但绝大部分地区仍明显少于常年平均值。钱正安等^[9]研究表明：近 50 年来中国沙尘暴频数变化的特点是，20 世纪 60~70 年代波动上升，80~90 年代波动减少，2000 年后又急剧上升，未来可能将进入新一轮沙尘暴活动的活跃期。

1.2.2 气象要素变化特征、卫星云图与光学特性、沙尘气溶胶的物理化学及辐射特性的研究

特强沙尘暴的风头象一道黑墙，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。1977年4月22日发生在甘肃河西走廊的黑风暴天气过程^[15]、1993年5月5日的黑风暴天气过程^[16]及 Joseph 对印度西北部“*Andhi*”型对流沙尘暴的研究结果^[17]、有关对波斯湾和阿拉伯湾地区春季沙尘暴的研究^[18]均表明:沙尘暴过境前温度很高,气压很低,天气晴好,风速很小;黑风暴一到,顿时狂风大作、沙尘飞扬,气压猛升、温度剧降,同时伴随着相对湿度的快速增加及能见度快速下降。

郑新江等^[19]对沙尘暴天气的云图特征的研究结果表明:1993年5月5日发生在我国西北地区的特强沙尘暴天气过程中,在卫星(NOAA)拍摄的可见光云图上,沙暴区顶反照率与云团和地表的反照率有明显差别,地表反照率最低,沙尘暴顶部比地面高,云团的反照率最高。在红外卫星云图上,沙尘暴、云团和地表的温度有明显的差异。其中,云团的温度最低,沙暴区温度次之,地表温度最高处可达39℃。杨东贞等^[20]对1988年4月份出现在北京地区上空的沙尘暴卫星云图特征的分析也表明,沙尘暴区在可见光卫星云图上呈现浅灰色。江吉喜^[21-22]运用1h间隔的GMS-4数字展宽红外资料分析了1993年5月5日下午到夜间发生在甘肃和宁夏等省(区)的特强沙尘暴的成因后指出,通过卫星云图资料可以分析出此次特强沙尘暴过程中强冷锋前部的中尺度对流系统(MCS)及其伴随的飑线的卫星云图特征。邱金桓等^[23]采用激光雷达和光度计对1988年4月北京地区的三次沙尘暴天气过程进行了综合测定,结果表明:沙尘暴出现以后,北京大气柱气溶胶光学厚度平均值较沙尘暴发生前偏大20多倍。

杨东贞^[20]对1988年4月9-12日出现在北京地区的一次强沙尘暴过程中沙尘的物理化学特性进行了测定,结果表明:TSP(总悬浮微粒)的平均值比正常天气条件下要高15.7倍,沙尘中各元素的浓度也存在较大差异。Legrand^[24]对撒哈拉沙尘暴辐射特性的研究结果表明,尘霾通过影响辐射过程,降低了白天地面的加热作用和夜间近地面的冷却作用。申绍华、陈受钧^[25, 26]利用数值模式研究了沙尘暴爆发时,沙尘暴的辐射效应对锋面系统的强迫作用。研究表明:白天沙尘辐射加热在大气低层导致锋生,晚上沙尘辐射冷却导致锋消。Steven A. Ackerman and Hyosang Chung^[27]就空降尘埃对区域能量收支辐射效应的研究表明:沙尘对大气加热率和地面辐射能量的收支产生一定的影响。它作为沙漠地区的一种气溶胶,是重要的区域气候变量。牛生杰等^[28, 29]通过对贺兰山地区大气背景、浮尘、扬沙和沙尘暴天气的采样,得到在不同天气条件下气溶胶质量浓度,总结出不同沙漠地区不同沙尘天气条件下的大气气溶胶粒子谱的分布规律。

1.2.3 沙尘暴成因及机制研究

据有关研究^[30]指出,沙尘暴的形成有3个基本条件:一是大风,这是形成沙尘暴的动力条件;二是地面上的沙尘物质,它是沙尘暴的物质基础,三是不稳定的空气状态,这是重要的局地热力条件。沙尘暴多发生在午后至傍晚时段内,就充分说明了大气不稳定状态的重要性。王式功等^[31]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,进一步验证了以上的研究结果。尚可政等^[32]通过对甘肃河西沙尘暴与赤道中、东太平洋海温的遥相关分析结果表明:沙尘暴发生频次与海温因子具有很好的相关关系;利用前期赤道中、东太平洋海温距平和给出的相关预报方程,可以较好地预报出河西春季沙尘暴发生次数的多寡。彭公炳等^[33]对西北地区沙尘暴与北太平洋海温的关系进行了研究,结果发现,加利福尼亚区海温偏低,而黑潮及北温带区海温偏高时,沙尘暴增多,反之亦然。

1.2.4 沙尘暴的数值模拟与沙尘输送的研究

沙尘暴,尤其是特强沙尘暴是由大、中、小各种天气尺度及其特殊地形和下垫面条件共同作用的产物。Cautenet^[34]利用中尺度模式对西非尼日尔首都尼亚美上空来自撒哈拉沙尘暴的热力影响进行了数值模拟,获得了令人满意的结果,认为大气中的沙尘含量和辐射特征是最有意义的参数。Gentho^[35]利用大气环流模式研究了沙漠沙尘暴和南极洲的海盐气溶胶的特征。最引人注目的结果是气溶胶分布的垂直结构是数值模拟中特别重要的参数,边界层的稳定性对近地面气溶胶的垂直分布影响较大。沙尘暴天气过程中所产生的沙尘气溶胶可随大气环流输送到较远的地方去,对那里的天气和气候产生影响。Swap^[36]、Ellis JR^[37]、Frenzen^[38]等人的研究表明:撒哈拉及其周围干旱区作为全球四大沙尘暴区之一,其沙尘可由热带东风气流的携带,越过大西洋,输送到美洲大陆。田中丰显的研究表明^[39]:来自中国西北地区的黄沙粒子到达日本后将作为日本上空过冷却云中凝结核的主要部分,对日本的降水起着重要作用。又加之黄沙冰晶核呈碱性,它对防止日本酸雨的产生起着积极的中和作用^[40]。申绍华、陈受钧^[25]分别利用二维和三维数值模式研究了沙尘暴爆发时,沙尘辐射强迫的锋生过程和孤立的沙尘暴辐射效应对锋面环流的影响,研究结果表明:沙尘暴爆发时,沙尘的辐射强迫对天气系统的影响是非常重要的。

程麟生等^[41]利用改进的MM4和高分辨行星边界层(PBL)参数化及40 km细网格控制试验能基本上模拟出“93.5”黑风暴的结构和演变。陈伟民等^[42]利用改进型PSU/NCAR中尺度数值模式,较好地模拟出了1994年4月5-11日西北地区大范围的浮尘和沙尘暴天气过程中海平面气压的演变和分布。敏感性试验表明,沙尘暴中低压的形成与发展主要是受大气中干物理过程制约,热力、动力过程及特殊地形的外源强迫等也起重要作用。

1.3 研究问题的提出

宁夏地处黄土高原西北部边缘的多大风区，气候干燥少雨，其上游甘肃河西、内蒙古一带沙漠纵横，北部与巴丹吉林沙漠接壤，西部与腾格里沙漠毗邻，东部位于毛乌素沙漠，环境极其脆弱，森林覆盖率很低，仅为 1.54%^[1]。加上境内特殊的地形、地貌条件，每年都会发生沙尘暴天气出现，是我国沙尘暴的多发区^[1]。

宁夏的气象工作者近年来将沙尘暴作为研究重点之一，牛生杰等的“贺兰山地区沙尘暴若干问题的观测研究”，对宁夏贺兰山附近沙尘暴趋势、沙尘粒子输送规律和起沙阈值、大气气溶胶的特征等进行了综合分析，带动了宁夏在沙尘暴方面的研究，并取得了可喜研究成果；牛生杰等^[43]对贺兰山东、西两测沙尘暴观测研究表明，贺兰山地区沙尘暴发生日数总的趋势是减少的；杨建玲等^[7]对宁夏 18 站沙尘暴日数变化规律的研究，也进一步验证了这一研究结果。已有研究成果^[44]表明，我国沙化土地面积 20 世纪 50~60 年代中期开始平均每年扩展 1560km²，90 年代每年扩展达 2460 km²。宁夏现有 3/4 的土地受沙漠化的影响，沙化面积已达总面积的 38.3%，盐池县近 10 年中平均每年都有 1.15 万 hm² 土地沙化^[1]。赵光平等^[45]通过对宁夏盐池生态环境年际特征量演变趋势分析，验证了宁夏中部干旱带局部治理，整体恶化的现状，同时指出近 30 年来可致沙尘暴的起暴阈值也已明显下降。随着国家退耕还林政策的实行，近年来西北地区林地面积有所增加，但新增林地的生态调控作用近期难以发挥，加之干旱区水资源短缺等其它不利因素仍将长期存在，因此，生态环境总体呈退化态势不易改变。这意味着我国地表覆被整体在恶化，沙尘暴的物质源越来越丰富，沙尘暴发生次数理应呈增多趋势^[6]。这显然与沙尘暴普遍减少的天气事实不吻合，甚至是矛盾。在这种情况下，沙尘暴的减少必然与天气气候的异常有关。

正是基于此，本文将主要对以下问题进行研究：

- (1) 宁夏春季沙尘暴的主要特征及特强沙尘暴气候背景；
- (2) 采用帕斯廓尔—特纳尔分类法及 Richardson 数，分析宁夏中北部地区沙尘暴发生过程中的不稳定条件的特征；
- (3) 采用累计距平等方法研究宁夏春季沙尘暴频次与大气环流、相关气象要素等异常的关系；
- (4) 采用相关分析，寻找北太平洋海温对宁夏春季沙尘暴影响的关键区及关键时段；采用合成分析、小波分析等方法，研究宁夏春季沙尘暴与北太平洋海温关键区、北太平洋海温关键区与大气环流因子的多时频对应关系；
- (5) 在海温关键区的基础上，采用 SVD 方法，探讨海温异常对宁夏春季沙尘暴的耦合

关系;

(6) 采用有关统计方法, 研究关键区海温异常变化对宁夏沙尘暴影响的可能途径。

通过以上研究, 以期揭示宁夏沙尘暴活动对北太平洋海温异常的响应, 进而探讨北太平洋海温异常通过影响大气环流异常、气象要素异常再影响沙尘暴频次异常的可能机制, 解释宁夏(中国北方)在生态环境总体恶化的情况下, 沙尘暴总趋势下降的可能原因。

第二章 资料及方法

2.1 资料说明

本文所选用的资料具体如下：

1. 宁夏具有代表性的 18 个站（惠农、平罗、陶乐、贺兰、银川、永宁、灵武、吴忠、青铜峡、中卫、中宁、盐池、同心、海原、固原、西吉、隆德、泾源）1961~2003 年共 43 年春季各月（3~5 月）沙尘暴发生次数资料。这里每个站的一次沙尘暴是指某一天（以北京时间 20:00 为界）只要出现沙尘暴（由于强风将地面大量沙尘吹起，使空气浑浊，水平能见度小于 1km 的天气现象），而不管该日有几个时段发生沙尘暴；
2. 1960~2003 年北太平洋范围（10° S-50° N, 125° E-80° W）5° × 5° 共 286 个网格点的逐月海表温度资料；
3. 中国气象局下发的 1960~2003 年逐月 500hpa 74 个环流特征量资料；
4. NCEP 再分析的 1960~2003 年月 500hpa、1000hpa 高度场资料，网格距 2.5° × 2.5° 。
5. 1970~2000 年银川站各层探空资料。

2.2 方法说明

研究工作主要采用了相关分析、合成分析、累积距平法、帕斯廓尔—特纳尔稳定度分类法、Richardson 数、小波分析、奇异值分解等方法。下面对其中一些方法进行说明。

2.2.1 Richardson 数

根据沙尘暴产生的天气学概念模型^[46]，可以用起沙和传输两种过程来概括其产生，同时沙尘暴是冷空气在移动过程中出现的一种强烈锋生过程中的伴随天气现象，并且沙尘暴在其中产生的大气边界层是极其不稳定的(包括静力和动力不稳定)，湍流发展旺盛。起沙说明边界层内必有较强的风速垂直切变存在(动力不稳定)，并可用 $\partial V / \partial Z$ 表示；扬沙说明边界层必然存在浮力上升运动(静力不稳定)，并可用 $\frac{\partial \theta}{\partial Z}$ 表示。我们再把垂直动量锋生(即风速垂直切变加大)和垂直温度锋生(即大气层结趋于更加不稳定)结合起来考虑，就形成一个判定行星边界层稳定和不稳定的一个重要参数：Richardson 数^[46]。负 Richardson 数表示的是静力和动力不稳定气流，这种气流肯定是湍流，此种情况最有利于沙尘暴的产生，

更具体些就是最有利于沙尘上扬到高空； Ri 大于 0 而小于 1，则表示易有动力乱流发展， Ri 大于 1 则表示不易有乱流发展^[46, 48]。 Ri 可用下式表示：各项物理意义详见参考文献^[47]

$$Ri = \frac{g}{T} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + r_d \right) / \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]$$

2.2.2 小波分析方法

小波分析^[49] (Wavelet Analysis) 亦称为多分辨分析，是一种时频分析方法，是由 Fourier 变换方法发展来的。传统的 Fourier 变换方法是一种频域分析，对频率（周期）具有分辨率，但它几乎不能获取信号在任一时刻的频率特征，而在实际问题中所关心的恰恰是信号局部范围内的特征。小波变换基于仿射群的不变性，即平移和伸缩的不变性，从而允许把一个信号分解为对时间和频率（空间和尺度）的贡献。小波变换对于信号处理是十分有用的，它在 n 维场中已具有分辨不同尺度的“显微镜”作用和具有分离信号在不同角度的贡献的“偏振镜”作用。气候资料含有多时间尺度性，由于大小尺度相互包涵，所以就显得杂乱无章，用传统的统计辨别方法很难判别其演变过程，而小波分析具有多分辨性。它就好像是有关数学放大镜，调节其放大倍数就可以清楚地看出气候时间序列在各个层次上的变化趋势以及各层次突变点的确切位置。

对于一维时间序列 $x(t)$ ，其小波变换的定义为：

$$w(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{ab}^* dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt$$

其中， $w(a, b)$ 是小波系数， a 是尺度参数， b 是平移参数， $\psi_{ab}(t)$ 是小波函数， $\psi^*(t)$ 是小波函数 $\psi_{ab}(t)$ 的共轭函数。

上式中， $\psi_{ab}(t)$ 可取不同的形式，本文采用 Mexihat 小波进行变换。

2.2.3 奇异值分解 (SVD) 方法

SVD (奇异值分解: Singular Value Decomposition, 简称为 SVD) 是研究两个气象变量场相关结构的诊断技术，由于其计算简便，近年来广泛应用于气候诊断及预测研究中。施能、江志红等^[50, 51] 对 SVD 在气象场诊断分析中的应用做过大量的分析研究工作。本文应用此方法进行沙尘暴和海温场两个要素场的耦合分析。

SVD 的基本概念是：将 $m \times n$ 阶矩阵分解为

$$A = U \cdot \Sigma V^T$$

式中: U 为 $m \times m$ 列的正交矩阵; V 为 $n \times n$ 列的正交矩阵; Σ 为奇异值,
 $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$, $r \leq \min(m, n)$, $\sigma_1 \geq \sigma_2, \dots, \geq \sigma_r$ 。
 这时的 U, V 都只取 r 列, 奇异值 r 个。

因为

$$A^T \cdot A = V \cdot \Sigma^T \cdot U^T \cdot U \cdot \Sigma \cdot V^T = V \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sigma_r^2 \end{bmatrix}$$

所以, $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_r^2$, 是 $A^T \cdot A$ 的特征值, 而 V 是由对应 σ_1^2 的 $A^T \cdot A$ 的特征向量组成。

同样, 由 $A^T \cdot A$ 可知, $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_r^2$ 也是 $A^T \cdot A$ 的特征值, U 则是由 $A^T \cdot A$ 的特征向量来组成。事实上 $A^T \cdot A$ 与 $A \cdot A^T$ 有相同的非负特征值, A 的奇异值正是这些特征值的正的平方根。

u_1, \dots, u_r 分别组成 U, V 矩阵

$$\begin{aligned} U &= (u_1 \ u_2 \ \dots \ u_r) \\ V &= (v_1 \ v_2 \ \dots \ v_r) \end{aligned} \quad r \leq \min(m, n)$$

v_i 称为右奇向量, u_i 称为左奇向量。

设有两个变量场, 左场 $_{m1}V_n$, 和右场 $_{m2}Y_n$, m_1, m_2 是空间点, n 是时间点。令

则 $A = XY^T$ 是 $m_1 \times m_2$ 矩阵, 对 A 的分解就是实矩阵的奇异值分解。

每对奇异向量的时间系数与该场之间的相关分布, 就是该对向量的空间分布型, 它们在一定程度上代表了两变量场的遥相关型。

2.2.4 西风环流指数计算方法

西风环流指数采用公式^[62]: $I_\Delta = \frac{I_Z}{I_Z} - \frac{I_M}{I_M}$, 其中 I_Z 表示纬向环流指数, $\overline{I_Z}$ 表示纬向

环流多年平均值, I_M 表示经向环流指数, $\overline{I_M}$ 表示经向环流多年平均值。当 $I_\Delta \geq 0$ 时, 表示西风带纬向环流占优势, 反之, 则经向环流占优势。

第三章 宁夏春季沙尘暴气候特征及特强沙尘暴气候背景

3.1 沙尘暴分布

3.1.1 沙尘暴空间分布特征

宁夏沙尘暴主要集中在两个区域(图 3.1.1), 一个位于中部盐池、同心、海原一带, 最大中心位于盐池, 春季平均沙尘暴日数为 13d 左右, 另一个位于北部引黄灌区, 陶乐、平罗一带春季平均沙尘暴日数为 5d 左右, 而固原以南地区基本无沙尘暴天气出现。

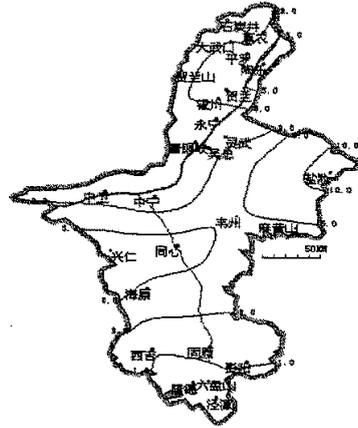


图 3.1.1 宁夏春季沙尘暴日

3.1.2 尘暴时间演变趋势

3.1.2.1 全区平均沙尘暴日数变化趋势

图 3.1.2、图 3.1.3 分别给出自 20 世纪 60 年代以来到 2003 年宁夏 18 个主要站平均沙尘暴逐年春季发生日数变化曲线及沙尘暴日数距平积分曲线, 由图可见自 60 年代以来宁夏春季平均沙尘暴日数总

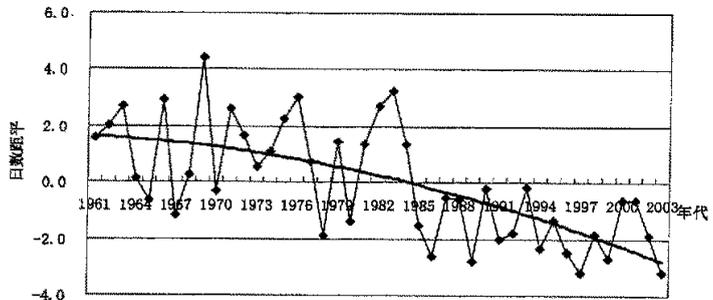


图 3.1.2 宁夏春季沙尘暴日数变化图

体上呈下降趋势, 且具有明显的阶段性特征, 80 年代中期以前为沙尘暴高发期, 其后沙尘暴发生日数明显减少, 80 年代中期为沙尘暴发生突变的时期。

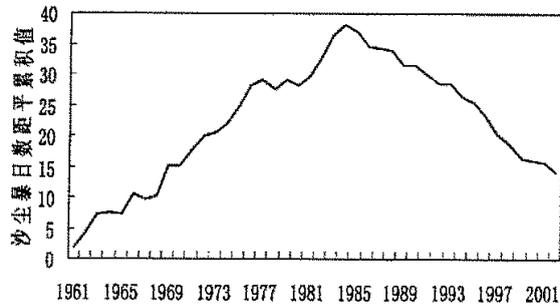


图 3.1.3 春季沙尘暴日数距平积分曲线

不同年代沙尘暴平均发生日数也呈逐渐下降的趋势(表 3.1.1), 60 年代年平均 4.6 日, 70 年代为 4.4 日, 80 年代为 3.5 日, 而 90 年代仅为 1.6 日。

表 3.1.1 各年代宁夏春季沙尘暴日数

	惠 衣	平 罗	陶 乐	贺 兰	银 川	永 宁	灵 武	青 铜 峡	吴 忠	中 卫	中 宁	盐 池	同 心	海 原	固 原	西 吉	隆 德
1961-1970年	7.6	2.6	6.3	4.2	0.9	2.3	4.2	8.9	11	6.3	2.9	7.2	8.2	3.7	2.9	2	0.6
1971-1980年	4	2.8	6.8	6.3	4	0.8	4.3	3.2	3.7	3.8	1.3	14.1	10.8	7.3	2.4	1.4	1.1
1981-1990年	3.5	4	6.3	4.9	4.4	1.9	1.4	2.3	2.3	1.2	1.9	14.2	5	5.3	1.5	1.3	0.2
1991-2000年	0.9	2.1	2.3	2.1	1.9	0.7	0.5	1.2	1.4	1.3	0.7	9.4	1.6	1.6	0.3	0	0

3.1.2.2 不同区域沙尘暴日数变化趋势

宁夏地域虽小, 但南北跨度较大, 再加上境内地形、地貌较为复杂, 因此形成了宁夏较为多样的气候条件。图 3.1.4 给出不同区域沙尘暴变化趋势, 虚线为近 40 年来平均值。图 3.1.4 (a) 为惠农逐年春季沙尘暴日数, 其变化趋势基本代表了石嘴山市大部地区, 自 20 世纪 60 年代初期到 70 年代初期为沙尘暴高发时期, 其后的大部分年代沙尘暴偏少。而银川站(图 3.1.4 (b)) 沙尘暴变化趋势与惠农明显不同, 高发期在 70 年代初期到 80 年代

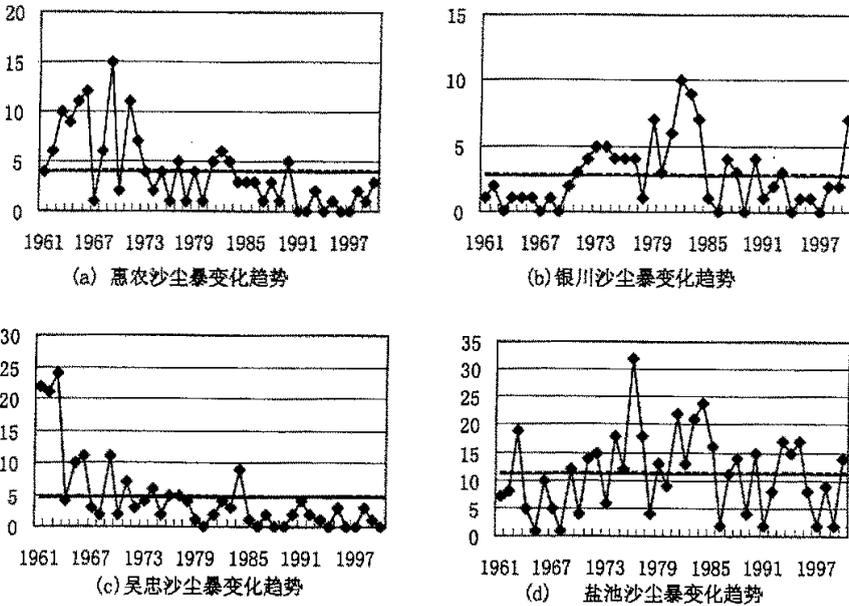


图 3.1.4 不同地区沙尘暴变化趋势

中期,其他大部分年代沙尘暴偏少。吴忠(图 3.1.4 (c))沙尘暴变化趋势则基本代表中部灌区,60年代初即1963年以前沙尘暴异常高发,最高值达到24天,而后发生日数骤减,70年代以后发生日数基本在平均值以下。盐池(图 3.1.4 (d))沙尘暴发生日数基本上偏多年及偏少年交替出现,但其明显高发期在70年代中期到80年代初期。同时,从表 3.1.1也可看出不同地区沙尘暴日数在不同年代具有不同的分布形式,60年代沙尘暴次数最多的在青铜峡、吴忠一带,其次是盐池、同心及石嘴山市的部分地区,惠农沙尘暴发生日数与盐池、同心一带相当。70年代青铜峡、吴忠沙尘暴出现日数明显减少,而盐池、同心沙尘暴明显增多,其发生日数远远高于其他站,海原及陶乐、贺兰为次高值区域。80到90年代,除盐池仍维持较高之外,其它大部分站沙尘暴发生日数均逐渐减少。

3.2 春季沙尘暴连续性分析

根据1961—2003年宁夏18个主要站春季三个月沙尘暴资料,通过计算月际间相关系数,统计分析春季沙尘暴月际持续性气候情况。

3.2.1 相关系数分析

根据18个站3—5月的月际沙尘暴相关系数的计算结果得出,54个相关系数中正相关概率达91%(49/54),其中达到0.001及0.01信度标准的,分别占19%(10/54)及33%(18/54),而达到0.05及0.1信度标准的分别占48%(26/54)及56%(30/54),这表明在月际沙尘暴的关系中,具有

很强的持续性,这种持续性尤以3月和4月表现最为突出,超过0.001信度标准的10个相关系数中的7个出现在此期间。从地域分布看,持续性最好的分布在陶乐、吴忠、

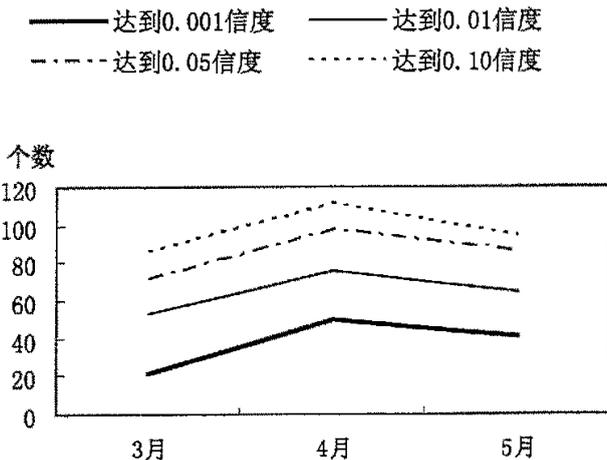


图 3.2.1 3—5月沙尘暴日数相关系数变化曲线

盐池、同心、海原及西吉, 这些站的春季沙尘暴月际间相关系数超过 0.01 信度标准的均在两个以上, 吴忠 3 月与 4 月沙尘暴日数相关系数达到 0.767。

3.2.2 相关概率分析

为分析春季各月沙尘暴的区域持续性, 我们计算了 3—5 月宁夏主要站任意两站之间的相关系数, 共 153 个, 其中 3 月份正相关概率为 93% (142/153), 4 月份正相关概率为 97% (148/153), 5 月份正相关概率为 90% (138/153)。图 3.2.1 给出春季各月 153 个相关系数中达到不同信度的个数, 由图可看出, 无论哪一级标准, 都以 4 月份为最高, 3 月份最低。以上分析表明, 由于宁夏地域较小, 春季各月沙尘暴发生日数具有很强的持续性, 即全区一致的沙尘暴偏多或偏少是其主要分布特征, 这种持续性尤以 4 月份最为明显。

3.3 宁夏春季特强沙尘暴及气候背景分析

3.3.1 特强沙尘暴观测事实

1983 年 4 月 27~29 日, 宁夏全区出现了罕见的大风沙尘暴天气, 刹时天昏地暗, 天空呈红黄色, 沙尘暴持续最长 24h, 能见度一般在 20 m 以内, 同心站能见度只有 2 m。大武口、惠农、青铜峡、同心、海原、兴仁等地阵风风力均达 12 级, 其余大部地区均达 9~11 级。据统计, 造成直接经济损失达几百万元。

1984 年 4 月 25 日, 宁夏中北部地区出现沙尘暴天气, 石嘴山极大风速达 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 青铜峡最小能见度仅 10 m, 风沙遮天蔽日, 天昏地暗。据估算, 造成直接经济损失达几百万元。

1993 年 5 月 5 日, 宁夏大范围内再次出现特强沙尘暴天气, 黑风从甘肃、内蒙进入, 横扫宁夏十六个县市, 短短几分钟, 狂风大作, 天昏地暗, 飞沙走石、尘土弥漫、呼吸困难。中卫极大风速 $37.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 沙尘掠过, 伸手不见五指。此次过程伤亡人数超过 100, 造成直接经济损失为 2.7 亿元, 受灾人口达 70 多万。

1995 年 5 月 16 日下午 16 时左右, 宁夏同心以北地区出现沙尘暴天气, 瞬时极大风速 $21 \sim 31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均风速 $12 \sim 21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 沙尘暴过境时, 遮天蔽日, 能见度几乎为零。是继 1993 年“5.5”沙暴后又一次特强的沙尘暴天气过程。据有关部门估算, 经济损失 2 亿元左右。

3.3.2 特强沙尘暴分布特点

从特强沙尘暴年代分布看, 以上 4 次过程均发生在 20 世纪 80 年代以后, 沙尘暴出现频次相对较少的 90 年代发生了两次, 反映出随着沙漠化土地面积的扩大、发展速率的加快^[68], 宁夏沙尘暴强度有增加趋势; 沙尘暴强度最大的区域一般也不在沙尘暴高发区盐池、

同心一带，而是多发生在北部地区，以上 4 次过程，最大强度除一次在中卫外，其他 3 次均在风速较大的石嘴山市。也就是说，沙尘暴强度与其发生的频率没有必然联系，而强风是特强沙尘暴形成的关键性的动力因子。

从特强沙尘暴发生的时间分布看，其易发生在春季，因为只有春季是强风、沙源及不稳定条件产生的最佳季节；几次特强沙尘暴都发生在热力条件不稳定的午后。

3.3.3 宁夏特强沙尘暴发生的气候背景分析

3.3.3.1 阶段性持续高温少雨，严重干旱为特强沙尘暴的发生提供了有利的气候背景

由图 3.3.1 可见，宁夏降水持续偏少，且伴随气温偏高的共有两个阶段：第一阶段为 1979—1983 年：1979 年秋季至 1982 年，全区持续干旱少雨，据记载部分地区自 1979 年 8 月至 1981 年 4 月前，约 20 个月没有下过一次透雨，旱情十分严重，牧草枯萎，地表沙化

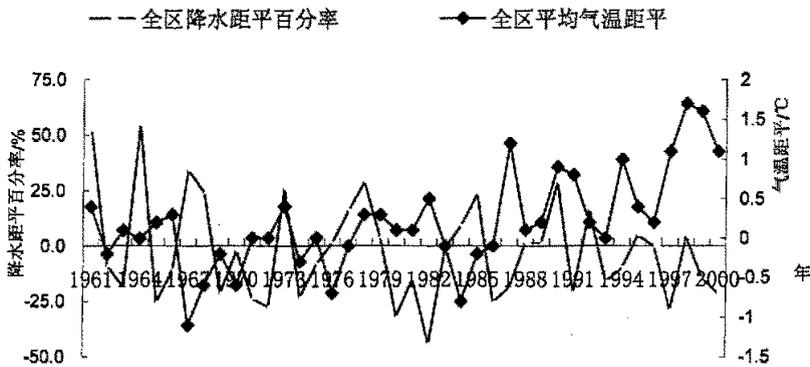


图 3.3.1 全区年平均降水距平百分率及年平均气温距平

严重，人畜饮水问题尤为严重。旱象持续之久，危害之大，程度之重是新中国成立 30 多年来少见的。北部惠农、陶乐 1980—1982 年连续 3 a 降水偏少 41~65%。1982 年为自 1961 年以来的最旱年。1983 年降水量较前几年有所回升，但引黄灌区大部及盐池降水仍偏少。在降水持续偏少的同时，1979—1983 年，我区大部地区年平均气温持续 5 a 偏高，尤其 1982 年，灌区及盐池、同心一带年平均气温偏高 0.5~0.8℃。在这种大的气候背景下，1983 年、1984 年我区相继遭受特强沙尘暴袭击。

第二阶段为 1991—2000 年：期间降水虽有波动，但基本以偏少为主，其中 1992 年虽降水略偏多，但沙尘暴多发的北部及盐池、同心一带降水偏少。1991—1995 年，我区出现持续异常干旱。1991 年 6 月份到 1992 年 4 月，南部山区及川区共 10 个县出现了历史上罕见的夏、秋、冬、春四季连旱，11 个月未下一场透雨，降水量比历年同期减少 50% 以上，

低于此前同期宁夏历史大旱的任何一年，大部分地区土壤干土层达 20cm，固原市 0~50cm 土壤含水率仅为 5.4~8.8%之间，特别是在干旱带上的同心、盐池、海原等地的干土层达 30cm，干旱最严重的地区，土壤含水量率则在 4%以下，从旱情蔓延趋势看已进入历史周期性大旱年份。1993 年、1994 年大部地区降水仍较常年偏少，据统计，北部部分地区自 1991 年至 1994 年连续 4 a 降水偏少 2~4 成。由于持续干旱干土层越来越厚，旱作区农田干土层普遍在 10cm 左右，部分农田达到 20cm。

同时随着全球气候变暖，宁夏大部分地区自 1987 年以后，年平均气温持续偏高，1994 年灌区及盐池、同心一带年平均气温普遍偏高 1.0~1.4℃。1993 年、1995 年我区先后出现特强沙尘暴天气。

1997 年以来，宁夏再次出现持续性高温干旱气候，1997、1999、2000 年，全区降水偏少 1~3 成，同时年平均气温达到有气象记录以来的最高阶段，全区平均偏高 1.1~1.7℃，1998 年达历史最高记录。研究表明近年来沙尘暴呈明显回升趋势，且强度也有所增加，2000 年北方地区出现强或特强沙尘暴达到 9 次之多，为近 50 a 之最^[54]。

为进一步描述气候干湿程度，我们计算了宁夏逐年湿润度指数（图 3.3.2），可见宁夏湿润度指数呈下降趋势，尤其 1979 年以后低于平均值的年份占大多数，最为干燥的阶段为 1979—1983 年，1993 年以来气候持续干燥，湿润度指数基本低于多年平均值。

综合以上分析，持续干旱，使得地表干土层增厚，导致作物播种面积减少，草场因地

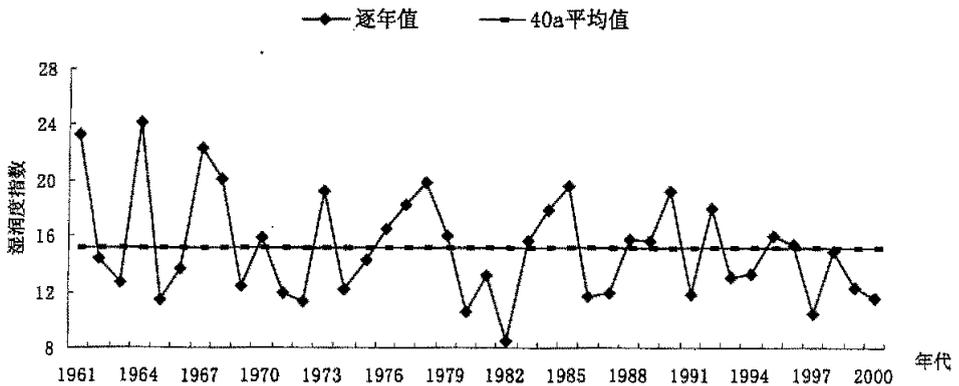


图3.3.2 宁夏湿润度指数逐年变化

表水枯竭、地下水水位下降而枯死，地表覆盖率降低，从而造成大面积长期裸露，加剧了土壤荒漠化。气温偏高，会使地表解冻期提前，同时气候变暖，水分蒸发耗失多，进一步增

加了干旱的程度，因此持续高温干旱的气候背景，为特强沙尘暴的发生提供了有利的条件。

3.3.3.2 前冬严寒，持续深厚的冻土层，为春季特强沙尘暴发生提供了充足的沙源

分析特强沙尘暴发生前的冬季气候状况发现，几次特强沙尘暴发生的前冬大都存在异常低温现象。1983年1月宁夏各地平均气温在 $-11.4\sim-7.5^{\circ}\text{C}$ ，灵武以南各地较常年偏低 $0.7\sim 2.4^{\circ}\text{C}$ ；1984年1~2月份，持续两个月各地平均气温偏低 $1.2\sim 2.8^{\circ}\text{C}$ ，而1993年冬季的严寒程度为各地建站到2001年以来少有，气温普遍偏低 $2.6\sim 4.0^{\circ}\text{C}$ ，极端最低气温达 $-21.0\sim-29.1^{\circ}\text{C}$ 。与之不谋而和，2000年1月宁夏中北部的大部分地区出现了自1993年以后又一最寒冷的冬季。异常的低温严寒天气使得裸露的土壤严重冻结，冻土层深厚。我们分析了近20a来宁夏最大冻土深度变化曲线（图3.3.3），4次特强沙尘暴均发生在最大冻土深度持续深厚的阶段，由于冻土持续几年较深，导致解冻后的干土层不仅偏厚^[9]，而且土质也更加干燥疏松，因此为特强沙尘暴提供了更加充足的沙源。

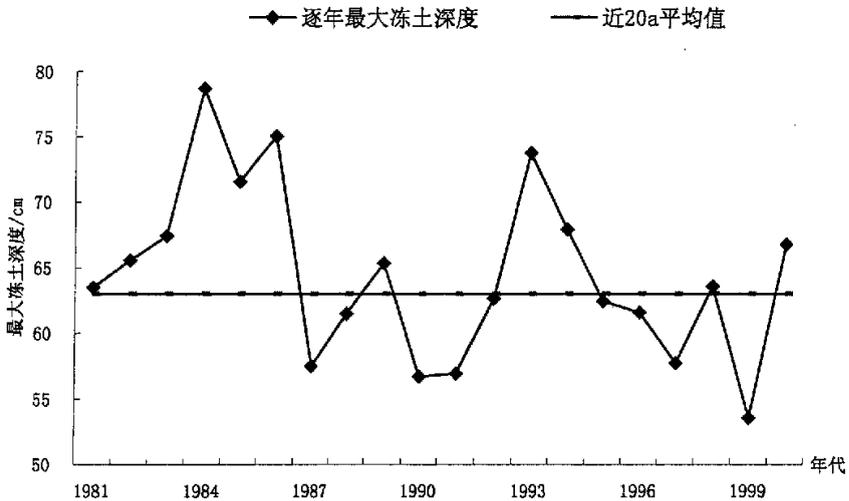


图3.3.3 近20 a 最大冻土深度变化

3.3.3.3 春季干冷的气候，是宁夏特强沙尘暴发生的又一关键性影响因子

图3.3.4给出自1961年以来春季亚洲环流指数变化趋势，由图可清楚的看出，1983年为春季亚洲经向环流指数的转折点，在此之前，经向环流指数基本维持负距平，其后经向环流指数偏强的年份明显增多；而纬向环流的变化趋势基本与之相反。宁夏发生的4次

特强沙尘暴，均出现在春季经向环流偏强，而纬向环流偏弱的年代，且大部分出现在经向环流指数正距平的峰值年，1995年为经向环流指数的极大值年，其纬向环流指数为仅次于

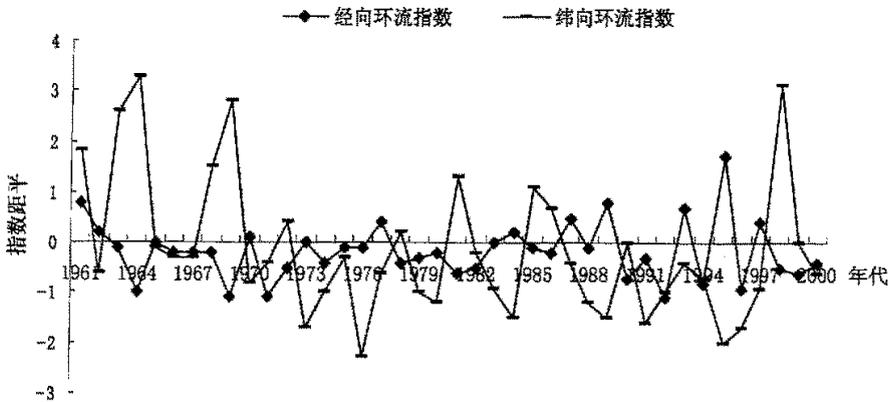


图 3.3.4 春季 (3-5 月) 亚洲环流指数变化趋势

1976 年的第二低值年 (与 1973 年并列)。

东亚大陆较强的经向环流，使得春季冷空气势力强盛，因此造成宁夏特强沙尘暴发生前或发生的当月气温明显偏低。1983 年 3~4 月宁夏出持续性低温，各地月平均气温较常年同期偏低 0.3~2.3℃，1984 年 4 月，大部分地区平均气温较常年同期偏低 0.2~1.0℃，给西北地区工农业生产造成巨大经济损失的 1993 年“5.5”沙尘暴的当月，各地气温普遍偏低，部分地区月平均气温较常年同期偏低 1.1~2.0℃，而 1995 年 4 月各地平均气温也较常年同期偏低 0.5~1.6℃。

与之伴随出现的是大部地区降水偏少，1983 年 11 月至 1984 年 3 月惠农、陶乐、银川、中卫、盐池、同心等 6 站降水量较常年同期偏少 63~85%。自 1992 年 11 月至 1993 年 4 月贺兰以北各地降水较常年同期偏少 38~72%。1994 年 11 月至 1995 年 5 月，各地降水量较常年同期偏少 50~94%；而 1995 年 1~5 月各地降水量较常年同期偏少 61~98%，分析自建站以来同期降水情况，将其从小到大排序，各地降水量均为前三位 (含并列)，部分地区为同期最低值 (含并列)。

以上分析表明，春季较强的经向环流，使得冷空气势力较强，从而造成大风天气频繁；而大风到来之前，如果没有可以抑制扬沙的明显降水，容易诱发特强沙尘暴的发生。

3.4 本章小结

通过以上分析可知：宁夏春季沙尘暴在 80 年代中期发生气候突变；近年来随着荒漠

化的不断发展，宁夏沙尘暴强度有增加的趋势；宁夏特强沙尘暴多发生在春季的午后；强风是特强沙尘暴形成的关键动力因子；宁夏特强沙尘暴发生的气候背景：a 前期连年干旱，土壤缺水严重. b 前冬严寒，冻土深厚，冻融后地表层松软. C 春季东亚环流经向度大，冷空气南下强，形成大风。

第四章 宁夏中北部地区沙尘暴天气发生过程中的不稳定条件分析

研究^[55,56]表明,沙尘暴发生主要受三大因子支配:强风、沙源和不稳定大气。沙源是沙尘暴的物质基础,强风是不可缺少的动力,不稳定大气有利于强对流的发生和发展,从而加强对流性天气过程。我们通过对宁夏自70年代至2000年的134次沙尘暴发生时间的分析发现:有30次发生在12时以前,占22%,12次发生在20时以后,占9%,另外的92次均发生在12时至19时之间,占到总次数的69%。从沙尘暴天气出现的强度来看^[57],下午和傍晚冷锋过境要比上午冷锋过境造成的沙尘暴、大风天气强度强,维持的时间相对也要长一些,这主要是由于下午到傍晚,近地层增温,从而破坏大气的稳定层结,大气不稳定性明显增强,上下层空气容易引起交换,加大了天气影响强度。同时发现,宁夏历史上灾害最为严重的四次特强沙尘暴(1983年4月27日、1984年4月25日、1993年5月5日、1995年5月16日),发生时间均在春季下午增温幅度最高的14时到19时前后,这进一步表明大气不稳定条件既是影响中小尺度天气系统发展的主要物理原因之一,同时也是放大或遏制沙尘暴天气影响强度的关键所在。

本文从形成沙尘暴的三大因子中的稳定度因子入手,对1970年以来宁夏中北部地区沙尘暴过程进行了较为深入的分析研究,给出宁夏沙尘暴天气发生的不稳定条件的特征,旨在为沙尘暴尤其是强沙尘暴预报预测提供依据。

4.1 宁夏中北部地面大气稳定度分布状况

根据帕斯廓尔-特纳尔分类法^[58],对各时次近地层大气稳定度进行分级,共分为A、B、C、D、E、F六个级别(对A~B、B~C、C~D分别向上提半级),A类表示强不稳定,D表示中性,F类表示强稳定。

4.1.1 宁夏中北部地面大气稳定度分布状况

由图4.1.1可见,宁夏中北部(以银川市为代表)一年中以中性类(D)及稳定类(E、F)天气出现频率较高,其中以中性类(D)频率最高,为30.5%,其次是稳定类(E)类,频率为23.4%,不稳定类天气出现频率相对较少,其中强不稳定类(A类)仅为1.4%。

4.1.2 宁夏中北部地面大气稳定度日变化特征

分析发现,地面大气稳定度存在明显的日变化,一天中02时出现频率最高的是稳定类(E、F),频率达81.8%,这是因为夜间地表长波辐射冷却,气温垂直递减率小,故层结稳定。冬季08时日出较晚,地表受热较小,层结较稳定;4月以后,气温升高,日出较早,日射渐渐增强,湍流也有所发展,不稳定层结持续时间较长,08时层结向不稳定转化。因而,从平均状况分析,08时以中性类为主,出现频率47.8%,其次是稳定类(E),频率

为 20.1%，强不稳定类 (A) 未出现；午后，地表受热达到极大，14 时大气最为不稳定，热力湍流最旺盛，层结的温度递减率最大，以不稳定类 (B、C) 为主，频率为 71.2%，而稳定类 (E、F) 未出现；14 时以后，日射逐渐减弱，湍流活动也逐渐变弱，20 时大气渐渐趋于稳定，仅出现中性类及稳定类 (D、E、F) 稳定度。

4.1.3 宁夏中北部春季地面大气稳定度分布特征

沙尘暴多发的春季大气稳定度分布趋势与年平均状况相似 (图 4.1.1)，但不稳定类 (B) 频率略高于年平均值，中性类 (D) 出现频率明显高于年平均状况，强稳定类 (F) 频率明显低于年平均状况。春季沙尘暴多发时段午后 (14 时) 大气以不稳定类为主 (图 4.1.2)，A、B、C 类出现频率为 72.3%，其中以 B 类稳定度出现频率最高为 39%，而稳定类天气未出现。

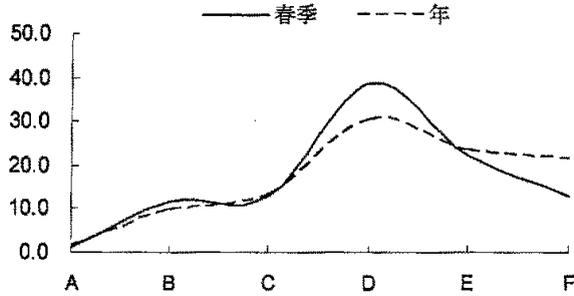


图 4.1.1 宁夏中北部大气稳定度分布 (%)

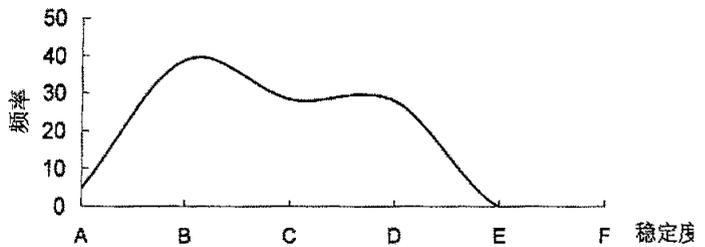


图 4.1.2 春季午后稳定度分布频率 (%)

4.2 沙尘暴发生时地面大气稳定度分析

我们对 70 年代以来宁夏中北部地区的几次大范围沙尘暴天气 (1972 年 4 月 30 日、1982 年 5 月 4 日、1983 年 4 月 27 日、1984 年 4 月 19 日、1993 年 5 月 5 日) 发生当月的大气稳定度进行分析，发现沙尘暴发生前一日或前几日，一般都存在大气稳定度异常现象。

1972年4月30日,宁夏中北部地区出现沙尘暴天气,同心持续时间8小时38分,北部代表站该月稳定度分布见表4.2.1。由表可见,该月08时及14时大气稳定度均以D类

表4.2.1 宁夏中北部1972年4月各级大气稳定度出现日数

	08 时							14 时						
	惠 农	银 川	陶 乐	中 卫	中 宁	盐 池	同 心	惠 农	银 川	陶 乐	中 卫	中 宁	盐 池	同 心
A	0	0	0	0	0	0	0	1	4	3	3	1	4	2
B	9	5	13	10	7	9	0	10	9	10	7	9	4	6
C	4	8	3	4	5	2	8	4	6	7	7	4	4	10
D	17	17	14	16	18	19	22	15	11	10	13	16	18	12

为主,出现日数为10—22天。但沙尘暴发生前稳定度明显异常于月平均状况(表4.2.2),分析该月逐日稳定度分布发现,18日前后至25日前后,大部地区08时、14时基本维持

表4.2.2 宁夏中北部1972年4月30日沙尘暴发生前地面大气稳定

日 期	08 时							14 时						
	惠 农	银 川	陶 乐	中 卫	中 宁	盐 池	同 心	惠 农	银 川	陶 乐	中 卫	中 宁	盐 池	同 心
26	B	C	B	B	B	B	C	B	A	B	A	B	A	B
27	B	C	B	B	B	B	C	B	B	A	A	A	B	B
28	D	C	B	B	C	D	C	D	B	D	D	D	D	D
29	B	B	B	C	B	B	C	B	B	A	A	B	B	B

较长时段的中性(D)类天气,其后大气不稳定性明显加强,26日至29日,也就是沙尘暴发生前大部地区08时维持3—4天C、B类天气,14时则基本维持A、B类天气,陶乐、中卫、中宁该月强不稳定类(A)天气基本出现在该时段。由此看出30日的沙尘暴发生前期,日出至午后时段,地面大气不稳定性增强1—3级。

其它几次大范围沙尘暴天气过程,大部分在维持几天的中性类稳定度后,在沙尘暴出现的前一天14时大气不稳定性增强为A、B类稳定度。

沙尘暴发生当日尤其是在沙尘暴发生时,由于风速较大,地面基本为中性(D)稳定度。

4.3 Richardson 数

4.3.1 沙尘暴发生当日 Richardson 数总体特征

我们对宁夏自 70 年代以来的几乎所有（探空资料缺测除外）沙尘暴过程发生当日 07 时、19 时各层（地面—850hPa、850—700hPa、700—500hPa、500—400hPa、400—300hPa）Richardson 数进行计算（表 4.3.1），结果发现 07 时 153 个个例中，一层以上出现 $Ri < 1$ 的共 83 次，也就是说有 54% 的沙尘暴过程在清晨就已具备动力乱流发展的条件；而 19 时的 155 个个例中，一层以上出现 $Ri < 1$ 的共 106 次，即有 68% 的沙尘暴过程，在其结束（或接近结束时）后，仍具备动力不稳定。同时由于沙尘暴多发生于午后，傍晚虽大多数沙尘暴过程已结束，但 19 时动力不稳定性明显强于 07 时，这一点从我们计算出的两个时次同一高度 Richardson 值的

表 4.3.1 沙尘暴发生当日理查逊数 <1 的天数统计

天 数	时 次	
	07 时	19 时
沙尘暴总天数	153	155
有一层以上 $Ri < 1$	83	106
地面到 850hPa $Ri < 1$	52	77
850hPa 到 700 hPa $Ri < 1$	23	38
700hPa 到 500hPa $Ri < 1$	5	5
500hPa 到 400hPa $Ri < 1$	10	12
400hPa 到 300hPa $Ri < 1$	13	6

表 4.3.2 各高度每 100 米温度垂直递减率 ($\frac{\partial T}{\partial Z}$) 及风垂直切变 ($\frac{\partial V}{\partial Z}$)

项 目	层次 时次	地 面	850 —	700 —	500 —	400 —
		850hpa	700 hpa	500 hpa	400 hpa	300 hpa
$\frac{\partial T}{\partial Z}$	07 时	-0.48	0.62	0.65	0.72	0.68
$\frac{\partial T}{\partial Z}$	19 时	0.31	0.77	0.64	0.70	0.72
$\frac{\partial V}{\partial Z}$	07 时	1.55	0.62	0.55	0.48	0.55
$\frac{\partial V}{\partial Z}$	19 时	1.35	0.63	0.62	0.59	0.51

大小也可看出，尤其在 700hPa 以下表现最为明显。

同时分析还发现，沙尘暴过程中大气的不稳定性主要表现在 700hPa 以下，最为突出的是 850hPa 以下，07 时、19 时分别有 52 天、77 天 $Richardson < 1$ 。从用卫星观测到的沙尘暴顶的温度^[19]，求得得到沙尘暴影响高度大约是 1000—3200m 之间，而边界层的高度也就是在 100—3000 米之间，因此可以说沙尘暴是一种边界层现象^[2]。700hPa 对应的高度大约在 3000 米左右，我们的分析结果与文献^[2]中的结论完全吻合。而两个时次相对最稳定的均为 700—500hPa 层，出现 $Richardson < 1$ 的都为 5 天。结合对温度垂直递减率及风的垂直切变(表 4.3.2)的分析发现，地面到 850hPa 层尽管温度垂直递减率最小，但由于风垂直切变远远大于其它层次，因此该层最不稳定，也可以说该层主要是由动力作用引起不稳定。而 700—

500hPa 层由于风垂直切变及温度垂直递减率相对都较小，因此该层最稳定。

4.3.2 个例分析

以上我们对沙尘暴发生当日 07 时、19 时 Richardson 数总体特征进行了分析，然而以上所有沙尘暴过程与探空资料观测时间并不能一一对应，因此无法很好的代表沙尘暴发生时各层次不稳定状况，为此我们挑选出正好与探空观测时间有很好对应关系的 1983 年 4 月 27—29 日沙尘暴天气过程，及 1993 年“5.5”沙尘暴过程对其发生前后 Richardson 进行分析。

4.3.2.1 1983 年 4 月 27—29 日特强沙尘暴过程分析

表 4.3.3 银川、盐池站 1983 年 4 月沙尘暴发生时间

站名	过 程		
银川	27 日 15: 30—28 日 06: 12	28 日 09: 35—11: 10	28 日 11: 35—15: 25
盐池	27 日 07: 03—10: 40	27 日 17: 21—21: 30	28 日 05: 25—17: 20

1983 年 4 月 27-29 日，宁夏全区出现了罕见的大风沙尘暴天气，其主要特点是持续时段长，具有间断性（见表 4.3.3），强度大，部分地区阵风风力均达 12 级，盐池、同心能见度只有几米。计算结果可清楚的看出（见表 4.3.4），从 21 日开始各层已陆续出现 Richardson 数 <1 的情况，也就是说，具备动力乱流发展的条件，盐池站 24 日、25 日已出现局地性沙尘暴；4 月 21 日—26 日，不稳定基本发生在 850hPa 层以上，随着强沙尘暴的到来，不稳

表 4.3.4 1983 年 4 月 27—29 日、1993 年 5 月 5 日沙尘暴过程 Richardson 数

1983 年				1993 年			
日期	时次	层次	Ri	日期	时次	层次	Ri
4 月 21 日	19 时	850—700hpa	0.3213	5 月 4 日	19 时	750—500hpa	0.7169
4 月 22 日	19 时	地面—850hpa	0.6156	5 月 5 日	19 时	地面—850hpa	0.2231
4 月 24 日	07 时	850—700hpa	0.6156	5 月 6 日	07 时	地面—850hpa	0.0434
4 月 25 日	19 时	850—700hpa	0.8209	5 月 6 日	07 时	500—400hpa	0.7706
4 月 26 日	19 时	700—500hpa	0.9110	5 月 6 日	19 时	500—400hpa	0.6616
4 月 27 日	19 时	地面—850hpa	-0.2416				
4 月 28 日	07 时	地面—850hpa	-0.2696				
4 月 28 日	07 时	700—500hpa	0.8244				
4 月 29 日	19 时	地面—850hpa	-1.1648				
4 月 30 日	19 时	地面—850hpa	0.4630				

定能量下传，且不稳定性明显加强，27 日—29 日沙尘暴发生过程中地面到 850hPa Richardson 数均为负值，28 日 07 时分别有两层 Richardson <1 ，4 月 30 日仍存在动力不稳

定，只是强度减弱，5月1日各层恢复稳定。此次沙尘暴过程不稳定性主要发生在700hPa以下，高层基本维持稳定。

同时分析发现，此次沙尘暴过程另一显著特点强静力不稳定，即温度垂直递减非常剧烈，27日19时，地面到850hPa层温度垂直递减率达 $1.3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，28日07时该层温度垂直递减率仍达 $1.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，均为历次沙尘暴过程同时次、同层次最大值，远远大于沙尘暴发生时平均值（表4.3.2）。28日07时850—700hPa层，也高达每 $0.9^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，为仅次于1973年5月17日、1982年3月14日的第三高值。

4.3.2.2 1993年“5.5”沙尘暴过程分析

1993年5月5日沙尘暴宁夏大部分地区开始于20时左右，持续时间远不如1983年4月27—29日的沙尘暴。其特点是：突发性强，范围广、强度大，中卫极大风速 37.9m/s 。从计算的Richardson数发现，5月3日各层均维持稳定，5月4日19时700—500hPa层具备不稳定条件，5月5日清晨各层仍维持稳定，到5日19时即沙尘暴发生前1小时左右不稳定性明显增强，且已下传到地面到850hPa层，Richardson数为0.2231。6日清晨地面到850hPa不稳定明显强于5日19时，同时500—400hPa层，该日清晨及傍晚均维持不稳定，5月7日，各层恢复稳定。由于此次过程未发生在探空观测期间，因此我们无法准确得出沙尘暴发生时的Richardson数，但可从沙尘暴发生前1小时（5日19时）与结束后（6日07时）的Richardson数值的对比，结合对其它个例（如1983年4月）分析所得到的规律推断：沙尘暴发生时存在不稳定能量的急剧积累；此次过程不仅低层强不稳定，而且高层也存在不稳定性。

同时我们发现，此次过程低层强动力及强静力不稳定相结合，5月6日07时地面到850hPa层风切变达 $3.8\text{m/s}/100\text{m}$ ，为所有沙尘暴发生当日同时次、同层次最大值，温度垂直递减率为 $0.8^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，为除1983年4月27—29日沙尘暴以外为数不多的几次。同时700—400hPa之间各层也表现为明显动力不稳定，700—500hPa、500—400hPa层风切变分别达到 $1.2\text{m/s}/100\text{m}$ 、 $1.3\text{m/s}/100\text{m}$ ，均远远大于平均值（表4.3.2）。

4.4 本章小结

通过对近30年来宁夏中北部沙尘暴发生过程中不稳定条件分析得出如下结论：

- （1）从平均状况而言，宁夏中北部地面大气稳定度一年中以中性类稳定度占主导地位，无论是年平均状况还是沙尘暴高发期春季都遵循该规律；
- （2）大部分沙尘暴天气发生过程中，清晨及傍晚大气具备不稳定条件；
- （3）沙尘暴发生过程中的大气不稳定性主要发生在700hPa以下，以850hPa表现最为

明显；

(4) 沙尘暴发生之前(至少前一日)大气不稳定性已出现,持续时间长的强沙尘暴发生前存在较长时间的不稳定能量的积累过程;突发性强沙尘暴在其发生前不稳定能量急剧积累;

(5) 强沙尘暴发生时低层存在强动力、强静力不稳定;不稳定能量最强时(Richardson数最小),也就是沙尘暴发生时;

(6) 沙尘暴结束后不稳定性逐渐消失。

第五章 宁夏春季沙尘暴频次与大气环流、相关气象要素等异常的关系

沙尘暴是多因子综合作用的结果,其发生不仅与气象条件密切相关,也是特定地形、地貌条件下必然的产物^[69]。由于天气条件及年际气候背景的复杂,使得沙尘暴的强度、影响范围、持续时间有所差异,也造成每年沙尘暴发生日数的不同。在第四章中我们就沙尘暴发生过程中的稳定度因子进行了分析,本章将重点从形成沙尘暴的动力条件入手,研究大气环流等对沙尘暴的影响。

5.1 与春季沙尘暴频次年代际特征相关的大气环流等异常特征

通过第三章的分析可知,自60年代以来宁夏春季平均沙尘暴日数总体上呈下降趋势,且具有明显的阶段性特征,80年代中期以前为沙尘暴高发期,其后沙尘暴发生日数明显减少,80年代中期为沙尘暴发生突变的时期。王涛等^[54]、邹旭恺等^[60]对中国北方沙尘暴研究也得出:自20世纪50年代以来,我国沙尘暴呈波动减少之势。众所周知,沙尘暴发生的最主要的两个条件是足够强劲持久的风力和地表丰富的松散干燥的沙尘^[61],亦即风和沙尘是形成沙尘暴的两个主要因素。研究成果还表明,我国沙化土地面积20世纪50~60年代中期开始平均每年扩展1560km²,90年代每年扩展达2460 km²^[44]。宁夏现有3/4的土地受沙漠化的影响,沙化面积已达总面积的38.3%,盐池县近10年中平均每年都有1.15万hm²土地沙化^[1]。随着国家退耕还林政策的实行,近年来西北地区林地面积有所增加,但新增林地的生态调控作用近期难以发挥,加之干旱区水资源短缺等其它不利因素仍将长期存在,因此,生态环境总体呈退化态势不易改变。这意味着我国地表覆被整体在恶化,沙尘暴的物质源越来越丰富,沙尘暴发生次数理应呈增多趋势^[8]。这显然与沙尘暴普遍减少的天气事实不吻合,甚至是矛盾。在这种情况下,沙尘暴的减少意味着风的因素即动力因子可能起了主导作用,我们认为在同一生态背景下,冷空气活动次数是影响沙尘暴发生频率的主要因素。

杨建玲等^[59]曾对与宁夏春季沙尘暴年代际变化相联系的偏多、偏少阶段的大气环流背景场差异进行研究,发现:偏多(少)阶段,在影响宁夏天气的上游关键区蒙古、贝加尔湖、西西伯利亚一带,500hpa、850hpa高度场偏低(偏高),风场有明显的气旋(反气旋)环流,宁夏至新疆一带,有大片显著西风加强。说明沙尘暴偏多(少)阶段,关键区极地南下的冷空气、气旋活动次数偏多(少),这种大气环流的异常是造成沙尘暴年代际异常的背景。

本文一方面为了避免重复杨建玲等的工作,同时考虑到方便业务工作,从天气、气候

学角度出发, 对影响冷空气活动频次的 500hpa 大气环流特征量的年代际异常特征进行分析。

5.1.1 北半球极涡的年代际气候变化

极涡是极地上空最强大的环流系统, 其变化对中高纬乃至整个北半球天气系统的活动和天气气候有着直接的影响。极涡的扩张和收缩反映了极地冷空气的活动^[82], 对春季冷空气活动次数及强度会起到关键作用。图 5.1.1 (a) 为北半球极涡面积距平累积曲线, 从

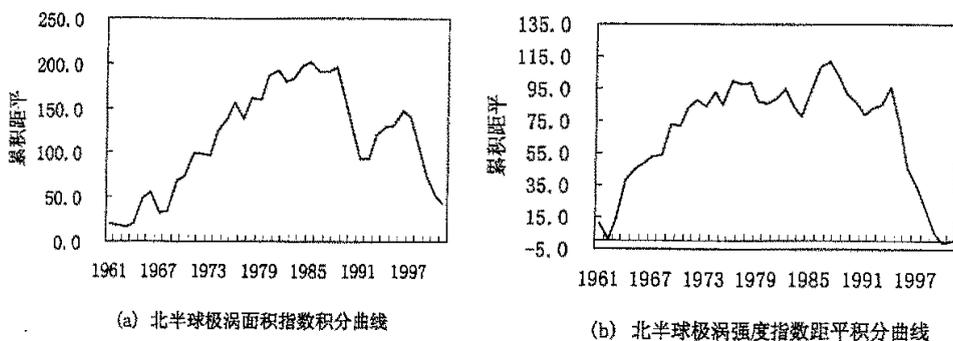


图 5.1.1 春季北半球极涡指数变化曲线

图中可清晰看到北半球极涡面积的长期变化, 自 20 世纪 60 年代初期至 80 年代中期, 极涡面积指数距平值以正为主, 处于扩张期; 80 年代中期以后, 曲线呈下降趋势, 面积指数距平值以负为主, 虽期间有一次明显的波动, 但总体上处于收缩期。图 5.1.1 (b) 则反映了北半球极涡强度的长期变化, 自 60 年代至 80 年代中期, 北半球极涡强度总体上处于增强期, 强度指数距平值以正为主; 而 80 年代中期以后, 极涡强度处于减弱时期, 强度指数距平值以负为主, 尤其 1994 年至 1999 年曲线明显下降。以上分析可以看出, 80 年代中期是极涡变化的突变时期, 由于 80 年代以前极涡的向南扩张及强度的增强, 极地冷空气活动较活跃, 造成春季冷空气活动频繁, 因而形成沙尘暴天气过程的高发。80 年代中期以后极涡向北收缩, 强度减弱, 极地冷空气较弱, 因此春季冷空气势力相对也较弱, 造成沙尘暴天气的明显减少, 1994—1999 年宁夏经历了持续沙尘暴异常偏少时段 (见图 3.1.1)。同时分析自 60 年代以来逐年春季极涡指数值发现, 极涡面积最大值为 734, 出现在 1969 年, 该年的极涡强度指数为 235, 是除 1964 年以外的第二高值年, 与之对应, 这一年春季宁夏 18 个站平均沙尘暴日数 7.8 天, 为自 1961 年以来最高值 (见图 3.1.2)。

5.1.2 亚洲西风环流指数的年代际气候变化

西风环流指数是对西风带环流形势的定量描述指标,说明了西风带环流的经纬向两个基本分量的特征。图 5.1.2 给出东亚冬春季西风环流指数距平积分曲线,由图可见自 20 世纪 60 年代初期至 80 年代中期,曲线呈下降趋势,西风环流指数以负值为主,表明西风带经向环流占优势,造成冬春季冷空

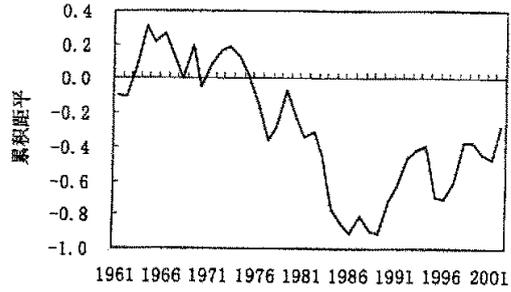


图 5.1.2 冬春季西风环流指数积分曲线

气势力强盛,冷空气活动频繁,因此大风天气较多,导致沙尘暴天气频繁发生。80 年代中期以后,曲线在波动中上升,西风带纬向环流占优势,冷空气势力较弱,活动次数较少,因此沙尘暴次数也偏少。

5.1.3 东亚大槽的年代际气候特征

东亚大槽系海陆分布及青藏高原大地形对大气运动产生热力和动力影响的综合结果。在槽后冷平流的诱导下,蒙古反气旋频频南下,冷空气向南爆发常形成寒潮天气,因此东亚大槽位置不同也就造成寒潮影响区域的差异。图 5.1.3 给出了冬春季东亚大槽位置距平积分曲线图,由图可见,东亚大槽位置年代际变化特征也

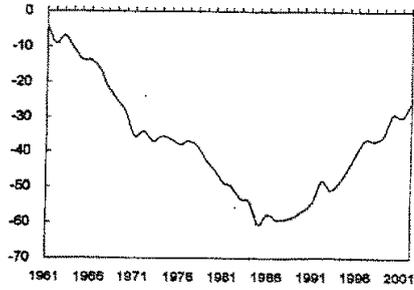


图 5.1.3 冬春季东亚大槽位置距平积分曲线

很明显,20 世纪 80 年代中期以前,东亚大槽位置表现为负距平,总体特征为位置偏西,影响宁夏的冷空气活动较为频繁,导致沙尘暴的频发。其后环流形势调整,东亚大槽位置表现为正距平,总体上以偏东为主,致使宁夏冷空气活动较少,沙尘暴发生次数也较少。

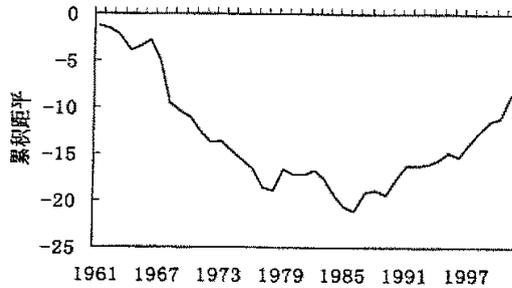


图 5.1.4 冬季气温距平积分曲线

5.1.4 冬季平均气温的年代际气候变化

图 5.1.4 给出宁夏 18 个主要站冬季平均气温距平积分曲线图, 其趋势与沙尘暴日数的积分曲线呈反位相分布, 20 世纪 80 年代中期以前, 曲线基本呈下降的趋势, 气温距平以负值为主, 70 年代末期有一次波动。80 年代中期以后, 曲线呈上升趋势, 气温距平基本为正值。由此看出 80 年代中期以前, 宁夏冬季处于相对冷期, 也是沙尘暴的频发期, 期间的波动也对应着沙尘暴高发期间的相对平缓期 (图 3.1.3), 即说明了亚洲中高纬地区经向环流偏强, 冷空气活动频繁, 大风日数多; 同时冬季气温偏低, 土壤结层厚, 春季升温解冻后松土层也偏厚, 沙源条件具备^[60]。80 年代中期以后, 宁夏处于相对暖期, 说明冷空气势力较弱, 活动不频繁, 对应着沙尘暴的偏少时期。

5.1.5 春季大风日数的年代际气候变化

研究表明大风日数的增减是气候年代际和年际变化的反映。每年冬春季寒潮大风的出现与冬季风的强度有关。冬季风势力强的年代大风寒潮天气频繁, 反之亦然^[62]。

图 5.1.5 给出了宁夏春季大风日数的距平积分曲线分布情况, 与沙尘暴日数的分布趋势基本一致, 其突变时期也在 20 世纪 80 年代中期, 在此之

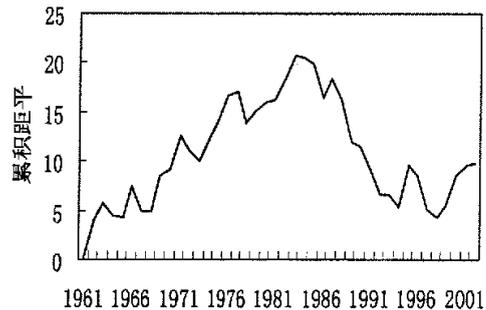


图 5.1.5 大风日数距平积分曲线

前, 宁夏处于多大风时期, 而后宁夏处于大风日数偏少时期, 90 年代末期大风日数出现回升的趋势。由此也说明, 风作为沙尘暴的动力因子, 在其发生过程中起的重要作用。

5.1.6 冬春季温差的年代际气候变化

众所周知, 大气的不稳定性是沙尘暴形成的必不可少的因子^[59], 这也是形成春季沙尘暴高发的主要原因之一。正是由于春季迅速升温, 导致大气强烈不稳定, 在这种条件下, 配合沙源及动力因子, 引起沙尘暴过程的发生。因此可以说在大气不稳定性增强期间, 沙尘暴的出现频率会增加,

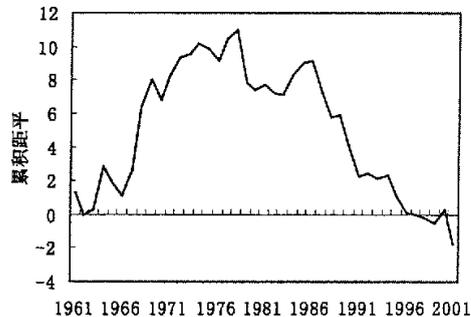


图5.1.6 冬春季平均气温差值距平积分曲线

同时也容易引发强沙尘暴天气。图 5.1.6 为自 20 世纪 60 年代以来宁夏冬春季平均气温差值距平积分曲线，由此可见，自 60 年代初到 70 年代末期，曲线呈上升趋势，其距平值以正为主，冬春季温差处于高值阶段，表明春季升温幅度较大，大气的不稳定性较强，因此有利于沙尘暴天气频繁发生，其后经历波动阶段，80 年代中期以后曲线呈下降趋势，其距平值以负为主，该时段内冬春季温差处于相对低值，表明春季升温幅度较小，大气不稳定性也随之减小，因而不利于沙尘暴天气的发生。

5.2 宁夏春季沙尘暴多、少年环流特征量等的特征分析

上一节中，我们对影响春季沙尘暴活动的诸因子的年代际特征进行了分析，对于沙尘暴短期预测而言，我们既要关心所处的大的年代际气候背景，同时更应该深入地研究前期影响因子的异常特征。

研究表明^[63]，大气环流的变化存在着一定的周期及韵律，同时大气环流形势与气象要素之间存在着“隔季相关”^[64]，也就是说特定的大气环流形势的配置，通过某种机制会对未来气候产生确定的影响。杨建玲^[59]等研究还发现，秋季格陵兰海冰异常变化通过影响其后一段时间的大气环流背景场，从而对宁夏沙尘暴产生影响。本文旨在通过研究典型沙尘暴多、少年前期气象要素、环流特征量的特征及影响机制，提供一套可应用于日常业务的、具有明显物理意

义的宁夏春季沙尘暴短期气候预测概念模型。

5.2.1 降水特征分析

表 5.2.1 给出了典型年份宁夏中北部各站降水量，沙尘暴多发年及少发年前一年夏季降水量及前一年夏季至当年春季累计降水量存在明显差异，沙

表 5.2.1 中北部各站降水距平百分率 (%)

	沙尘暴多发年		沙尘暴少发年	
	前一年夏	前夏至当春	前一年夏	前夏至当春
惠农	-16	-15	16	2
平罗	-27	-21	14	6
陶乐	-21	-18	21	7
贺兰	-36	-23	-1	-4
银川	-31	-20	3	-6
永宁	-33	-18	21	7
灵武	-39	-20	7	1
吴忠	-34	-16	21	7
青铜峡	-32	-15	29	11
中卫	-19	-10	12	9
中宁	-16	-8	15	6
盐池	-21	-8	18	12
同心	-14	-8	34	17
海原	-12	-9	26	16

沙尘多发年无论是前一年夏季还是前一年夏季到当年春季累积降水均偏少，少发年则基本与之相反，降水以偏多为主。同时相关分析发现，各站春季沙尘暴日数与前一年夏季以来的各季降水量及累计降水量以负相关为主，相关系数虽大都未通过检验，但前一年夏季降水量及夏季到春季累计降水与沙尘暴相关系数较其他季节偏大，且高发区沙尘暴日数与降水的相关性明显大于其他地区，中卫、盐池、同心春季沙尘暴日数与前一年夏季降水量相关系数达到-0.289—-0.370，超过 0.05 的信度。陶乐、盐池、同心、海原等地春季沙尘暴日数与前一年夏季到春季累计降水量相关系数也均通过检验，盐池相关系数高达-0.412，超过 0.01 的信度。由此可见，前期及同期降水量对沙尘暴会起到抑制作用，其中前一年夏季降水量及前一年夏季到春季的累计降水量对沙尘暴的影响较为明显，这种关系在具有本地沙源的地区亦即沙尘暴高发区表现更为显著，而其他地区沙源多来自上游，所以降水的影响不如高发区。以上关系表明，夏季降水及夏季以后的累计降水对次年沙尘天气具有一定的预测意义。

5.2.2 冷空气活动

冷空气活动的次数及强度会对沙尘暴次数及强度产生重要的影响，而冬季风的强弱直接影响冬春季

冷空气活动次数及强度，冬季风势力强的年代大风寒潮天气频繁，反之亦然^[82]。分析沙尘暴多发年及少发年冷空气活动情况发现（表 5.2.2），沙尘暴多发年冬春季冷空气活动次数偏多，而少发年冷空气活动也少，且少发年冷空气活动次数偏少的幅度要比多发年冷空气活动偏多的幅度明显偏大。由此可以看出，同一生态环境下，冷空气活动的减少对沙尘天气发生所起到的作用，要比冷空气活动偏多造成沙尘暴偏多所起的作用更明显，这其中下垫面状况会产生重要影响。相关分析发现（图 5.2.1）宁夏各地春季沙尘暴日数与冬春季冷空气活动次数均为正相关，相关性较高的分布在大武口、陶乐以及宁夏中南部大部分地区，同心

表 5.2.2 冬春季冷空气活动次数

	冬季	春季	冬春季
平均	8.1	8.5	16.5
沙尘暴多年	9.0	8.8	17.8
沙尘暴少年	6.8	7.0	13.8

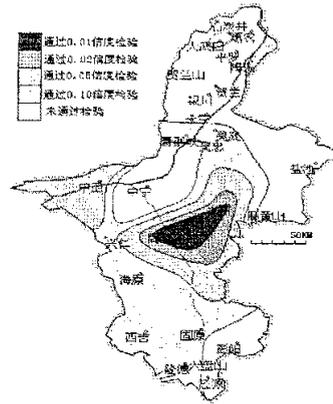


图 5.2.1 冬春季冷空气活动次数与春季沙尘暴日数相关系数

相关系数达到 0.445，沙尘暴出现频率最高的盐池，相关系数仅为 0.133，由此可见，该地区沙尘暴过程的频发与生态恶化有着直接关系，即使无冷空气活动(或有弱的冷空气活动)，也会导致沙尘暴(或强沙尘暴)的发生。

5.2.3 北半球极涡

图 5.2.2 给出了沙尘暴多发年及少发年北半球极涡面积指数、强度指数的合成曲线，由图可清楚的看出，多、少年曲线呈反位相分布，多发年极涡强度(图 5.2.2 (a))在前期 6 月到 12 月基本以偏强为主，而在当年 1-2 月转为偏弱，春季再度转强；而少发年与之完全相反，在前期 6 月到 12 月持续明显偏弱，而在当年 1-2 月转为偏强，春季再度偏弱。多发

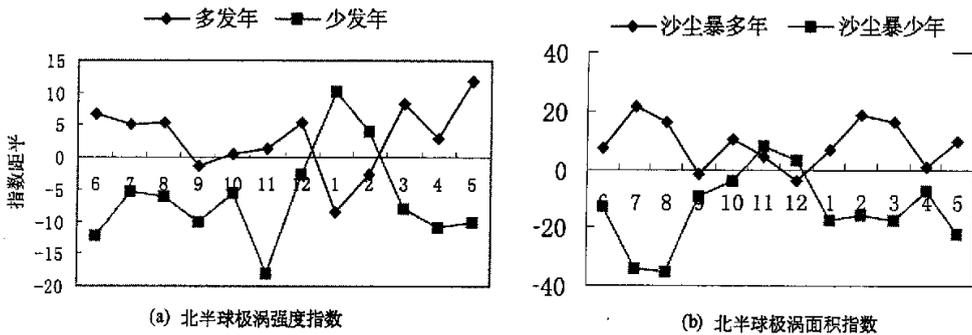


图 5.2.2 沙尘暴多发年及少发年极涡状况

年前期 6 月到同期 5 月极涡面积(图 5.2.2 (b))基本以偏大为主，而少发年前期 6 月到同期 5 月极涡面积基本以偏小为主，差异最为明显是前期夏季、同期 1~3 月份及 5 月份，而初冬差异相对较小。同时相关分析发现，春季沙尘暴日数与前一年夏季极涡强度指数相关系数达 0.538，超过 0.001 的信度；与当年春季极涡强度指数相关系数为 0.350，通过 0.02 的显著性检验，尤其与当年 5 月极涡强度指数相关系数达 0.500，远远超过 0.001 的信度。春季沙尘暴日数与前一年 7—8 月平均极涡面积指数相关系数达 0.445，与当年 1-5 月平均极涡面积指数相关系数也达 0.448，均远远超过 0.01 信度。由此可见，春季极涡不仅对同期冷空气活动有至关重要的影响，而且夏秋季极涡状况对来年春季气候产生隔季影响。

同时为探讨极涡隔季相关的可能机制，进行相关分析发现，夏季极涡面积指数与来年春季极涡面积指数显著正相关，相关系数达到 0.500，远远超过 0.001 的信度，而其强度指数也存在弱的正相关。这种相关关系表明，当夏季极涡面积偏大强度偏强时，有利于来年春季极涡偏大，强度偏强。而春季极涡面积偏大、强度偏强时，冷空气活动也较活跃，因此容易造成沙尘暴过程的发生。

5.2.4 东亚大槽

研究宁夏沙尘暴多发年和少发年东亚大槽特征发现(图 5.2.3), 多发年及少发年的前冬及当年春季东亚大槽平均位置存在明显的差别, 多发年东亚大槽位置明显偏西, 而少发年则偏东。同时相关分析得出, 春季沙尘暴日数与前冬东亚大槽位置显著相关, 相关系数达到-0.481,

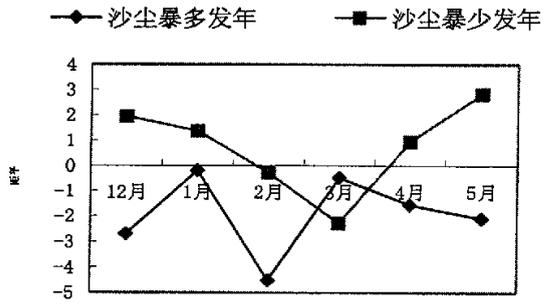


图 5.2.3 沙尘暴多、少年东亚大槽位置

几乎达到 0.001 的信度。少发年秋末至前冬东亚大槽的强度表现出明显偏弱的特征(表 5.2.3), 表明 500hpa 以纬向环流占优势^[65], 而多发年前冬东亚大槽虽也显示出偏弱特征, 但强度要比少发

表 5.2.3 东亚大槽强度指数距平

	11月	12月	1月	2月	11-2月均
多发年	2.333	0.286	-5.643	1.714	-0.327
少发年	-10.3	-1.581	0.390	-5.319	-4.202

年明显偏强, 这与文献^[65]所出的结论相同。同时文献^[65]通过将沙尘

暴典型多、少年 500hpa 高度场合成分析得出: 沙尘暴偏少年及偏多年前冬 500hpa 平均环流场已在一定程度上表现出春季环流形势的征兆。由此可见冬季的环流形势对春季沙尘暴预测有一定的预测指示意义。

5.3 本章小结

通过以上分析, 得出如下结论

(1) 与沙尘暴年代际变化相对应, 大气环流及与之密切相关的局地气候条件也发生了明显突变: 80年代中期以前春季北半球极涡面积偏大, 强度偏强, 亚洲西风带经向环流占优势, 春季大风日数明显偏多, 冬季平均气温以偏低为主, 冬春季平均气温差值偏高, 80年代中期以后极涡收缩偏弱, 亚洲西风带纬向环流占优势, 春季大风日数偏少, 冬季平均气温明显偏高, 冬春季平均气温差值明显减小, 表明春季大气不稳定性有减弱的趋势;

(2) 沙尘暴发生的频次与前一年夏季及前一年夏季到当年春季累积降水量有较好的对应关系, 沙尘暴多发年降水偏少, 而少发年降水偏多; 冬春季冷空气活动与沙尘暴过程密切相关, 冷空气活动次数多, 沙尘暴过程也多, 反之亦然; 北半球极涡状况与沙尘暴日数

密切相关，前期及同期北半球极涡面积偏小、强度偏弱，春季沙尘暴偏多，反之沙尘暴偏少；沙尘暴少发年冬季东亚大槽位置偏东、强度偏弱，反之亦然。

第六章 宁夏春季沙尘暴与北太平洋海温异常的遥相关关系

近年来,海气相互作用已公认为气候问题的一个核心内容。大量事实和理论研究表明,海洋在几乎所有时间尺度的气候变化中起重要作用。热带海洋是全球大气运动的主要能源区。海洋面积占全球面积的70%以上,热带海洋的变化对大气环流和气候的年际变化具有突出贡献。黄荣辉^[60]指出,西太平洋暖池海温异常可以引起大气环流异常的遥相关波列;准定常行星波在三维空间中的传播使得某区域大气环流异常会引起另一些地区的大气环流异常;朱乾根等^[61]也指出,北极海冰覆盖面积的异常可以引起大气环流异常遥相关波列,并且这种遥相关波列可以持续维持影响后期中国气候;李崇银^[62]等研究发现了大气环流和气候异常对北太平洋海温年代际变化的响应;刘宣飞^[63]的研究揭示中国气候年际变异与海温异常的关系;李耀辉等^[70]研究也发现了西北地区春季降水与太平洋秋季海温异常的空间遥相关分布特征。

钱正安等^[9]、叶笃正等^[71]、周自江等^[62]的研究指出,作为大气环流外强迫条件的海温,也是引起沙尘暴活动的遥远处的间接的外强迫因子,其对沙尘暴活动的影响是非常重要的。

6.1 宁夏春季沙尘暴与北太平洋海温异常的相关分布

用宁夏春季43年(1961~2003年)沙尘暴序列,与前一年1月到当年5月北太平洋范围逐月SST求相关。这里把宁夏春季18个站逐年平均沙尘暴日数作为一个点与海温求相关,北太平洋海温资料长度为1960~2003年。分析发现(图6.1.1~图6.1.5),各月相关分布虽存在差异,但加利福尼亚海区在大部分月份都为相对高相关区,尤其自上年10月到当年5月该区为一稳定的高的负相关带,高相关中心值大都超过-0.4(当年2月略小,也超过-0.3)。彭公炳^[33]在研究西北地区春季沙尘暴与海温场的关系时,发现春季沙尘暴日数与加利福尼亚海温明显负相关,我们的研究结果与之基本一致。因此我们将该区域海温进行平均,将宁夏春季沙尘暴日数与初选区海温从前一年10月到当年5月逐月滑动组合求相关,结果见表6.1.1。表中I行J列的数值表示宁夏春季沙尘暴日数与初选区从I行对应的月到J列对应的月时段内平均海温的相关系数。从表可以看出,宁夏春季沙尘暴日数与初选取海温相关系数最大的是前一年10月到当年5月,达-0.513,因此我们将加利福尼亚海区确定为影响宁夏春季沙尘暴的关键区域,而将上年10月到当年5月作为关键时段。其它相关相对较高的区域分散零星而不稳定或维持时间较短,再此不作为关键区。相关相对较高的区域分散零星而不稳定或维持时间较短,再此不作为关键区。

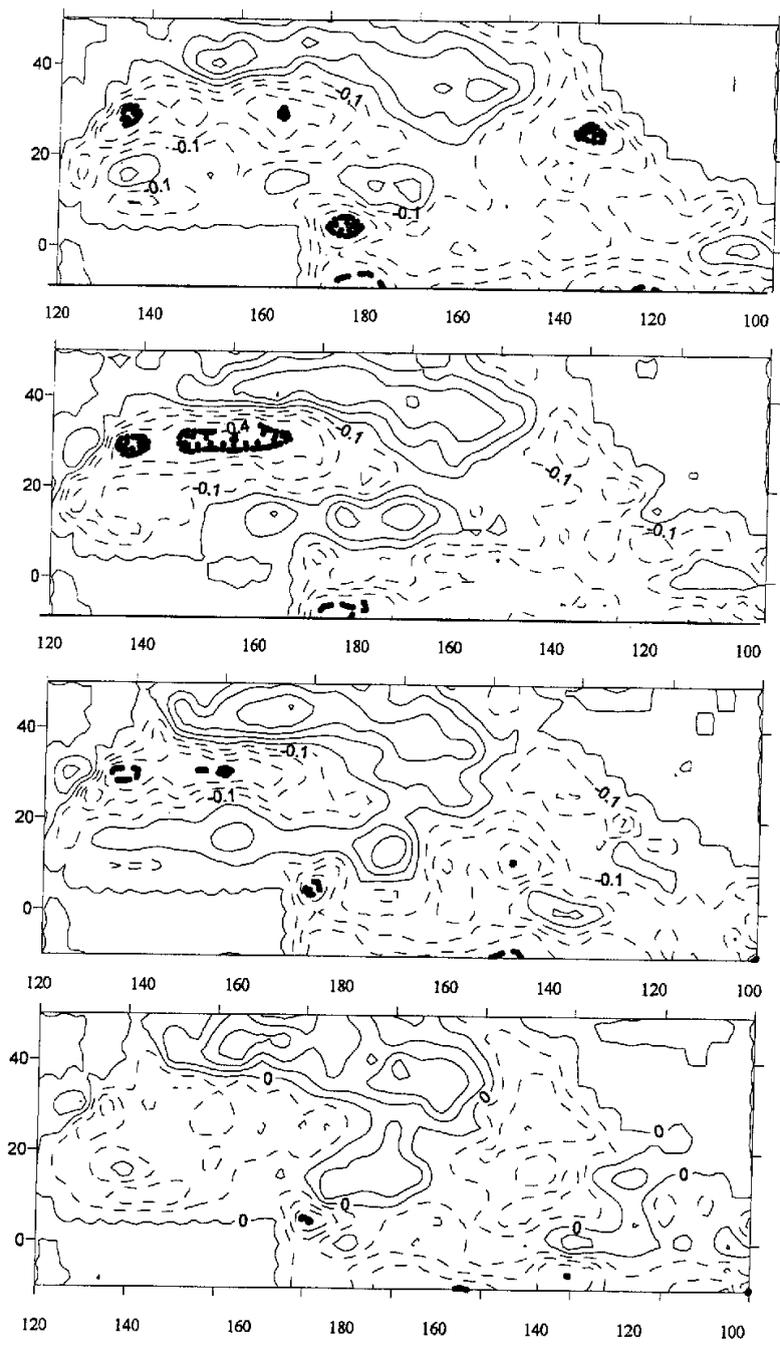


图 6.1.1 宁夏春季沙尘暴日数与上年 1~4 月北太平洋海温相关系数

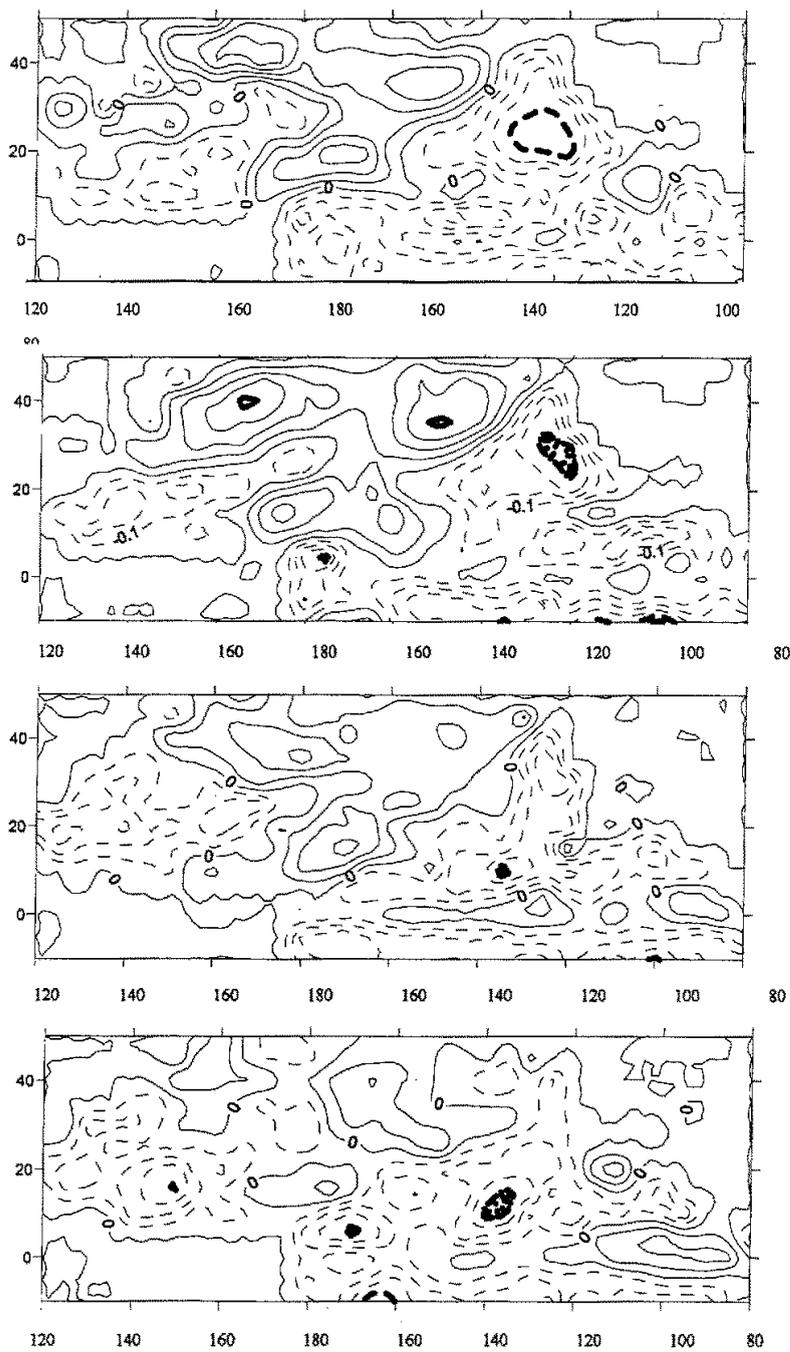


图 6.1.2 宁夏春季沙尘暴日数与上年 5~8 月北太平洋海温相关系数

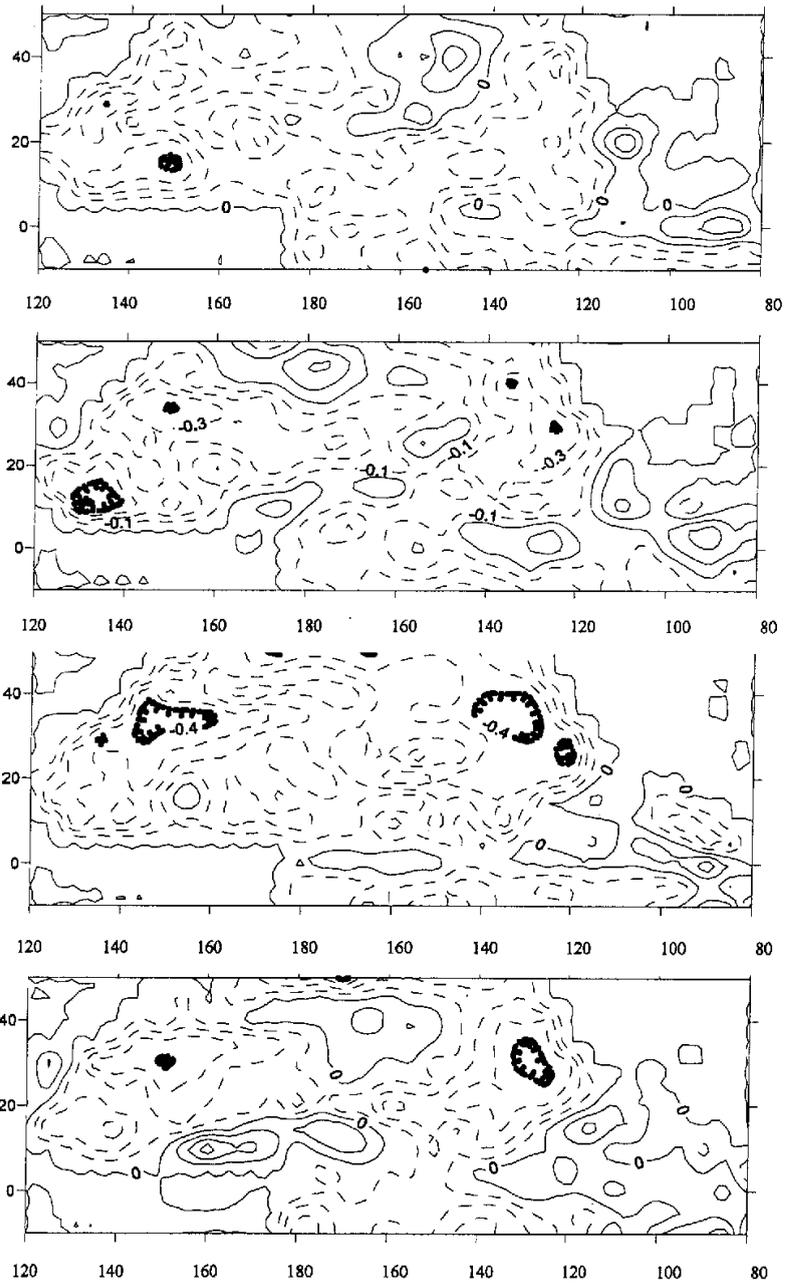


图 6.1.3 宁夏春季沙尘暴日数与上年 9~12 月北太平洋海温相关系数

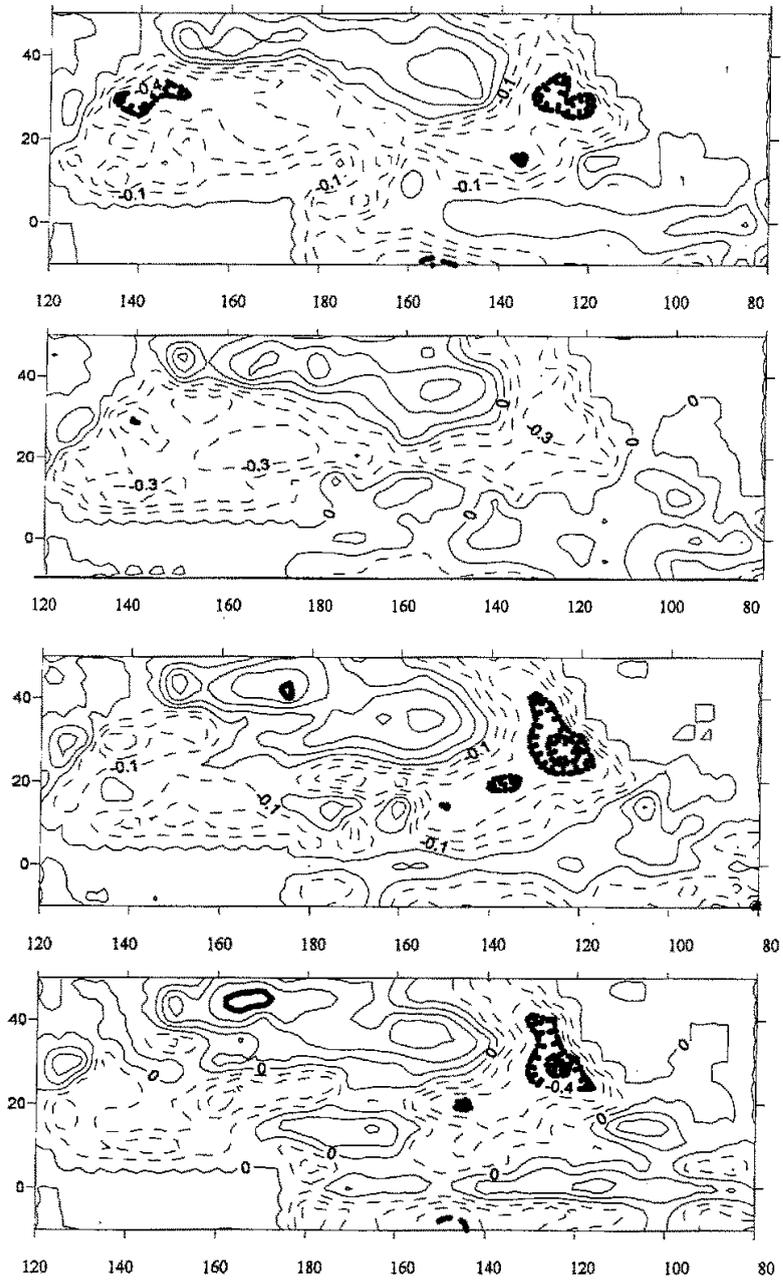


图 6.1.4 宁夏春季沙尘暴日数与当年 1~4 月北太平洋海温相关系数

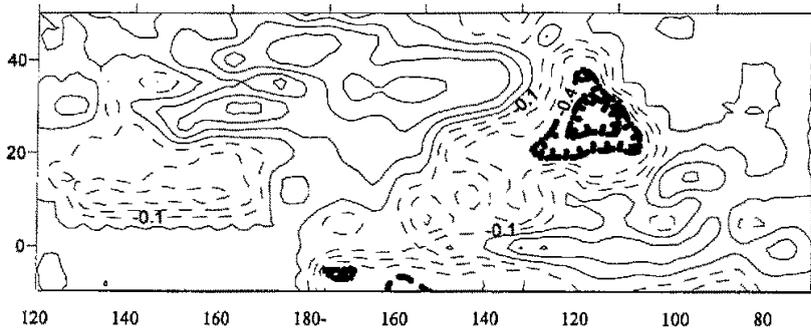


图 6.1.5 宁夏春季沙尘暴日数与当年 5 月北太平洋海温相关系数

6.2 冷、暖水年的选取

表 6.2.1 关键区海温冷、暖水年份及对应的沙尘暴日数距平(沙尘暴日数平均为 3.4 天)

冷水年	1961	1962	1971	1972	1973	1974	1975	1976	2000	2001
沙尘暴日数	1.6	2.0	2.6	1.7	0.5	1.1	2.3	3.0	-0.6	-0.6
暖水年	1968	1980	1986	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
沙尘暴日数	0.3	-1.4	-2.6	-1.8	-0.2	-2.3	-1.3	-2.5	-3.2	-1.8

根据海温关键区、关键时段海温与宁夏春季沙尘暴的标准化距平曲线(图 6.2.1), 可以看出二者有很好的反位相变化关系。以关键区海温标准差为 ± 0.8 为标准, 选取冷水年、暖水年各 10 年, 列于表 6.2.1, 如表中冷水年份 1962 年表示自 1961 年 10 月到 1962 年 5 月时段。

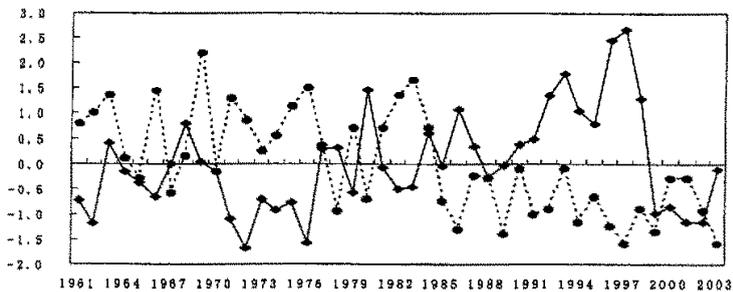


图 6.2.1 关键区海温与宁夏春季沙尘暴日数标准化距平
(图中实线为关键区海温, 虚线为沙尘暴日数)

6.3 冷、暖水年与多、少沙尘暴年的时间对应关系

6.3.1 年际尺度的对应关系

宁夏春季平均沙尘暴日数为 3.4 天 (1961~2003 年平均), 冷、暖水年沙尘暴距平见表 6.2.1。由表可见, 在 10 个冷水年中, 有 8 个多沙尘暴年, 另外 2000、2001 年冷水年对应着沙尘暴虽为偏少, 但由图 6.2.1 中可见这两年为沙尘暴明显回升年份, 也是沙尘暴突变后为数不多的几个多沙尘暴年; 10 个暖水年中, 有 8 个少沙尘暴年, 1968 年、1993 年的暖水年, 则对应着沙尘暴正常年。

综上所述, 冷、暖水年预示多少沙尘暴年分别为 8/10, 其它大部分年份在正常尺度变化, 也就是说关键区海温异常可以较好地预示宁夏春季沙尘暴频次异常。

6.3.2 年代际尺度的对应关系

图 6.3.1 关键区关键时段海温与宁夏春季沙尘暴日数的距平累积曲线, 由图可见, 两者的年代际变化有较好的对应关系, 关键区海温在 60 年代初到 80 年代初期以下降趋势为主要特征, 以冷水位相占优势, 1983 年为转折点, 其后上升趋势占优势, 暖水位相是其主要特征; 而沙尘暴转折点比海温晚一年, 1984 年以前沙尘暴以正距平占优势, 其后以负距平为主。期间 60~70 年代的波动、80 年代的波动两者均有较好的对应, 但 90 年代末期以后对应不太好。

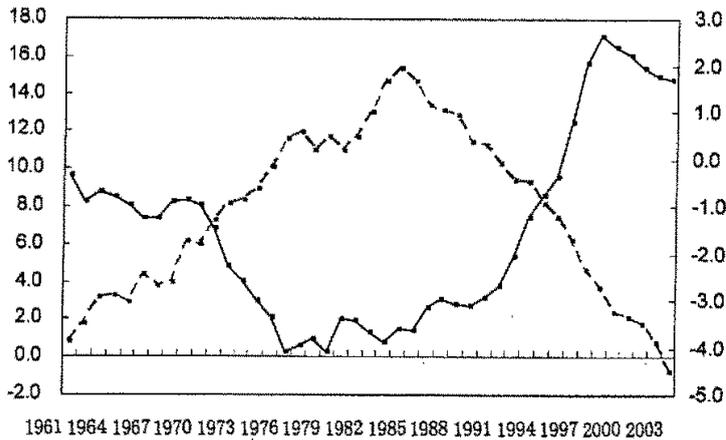


图 6.3.1 关键区海温及春季沙尘暴日数距平累积曲线
(图中实线为关键区海温, 虚线为沙尘暴日数)

6.3.3 关键区海温与沙尘暴时频多尺度对应关系

小波变换方法是一种时频分析方法，运用小波变换的方法既可以了解时间序列不同时间的频率（周期）特征，又可以了解不同频率的时间分布特征。因此我们采用 Mexihat 小波变换分析关键区海温与沙尘暴的时频多尺度对应关系。

图 6.3.2、图 6.3.3 分别为加利福尼亚海区海温和宁夏春季沙尘暴日数的 Mexihat 小波

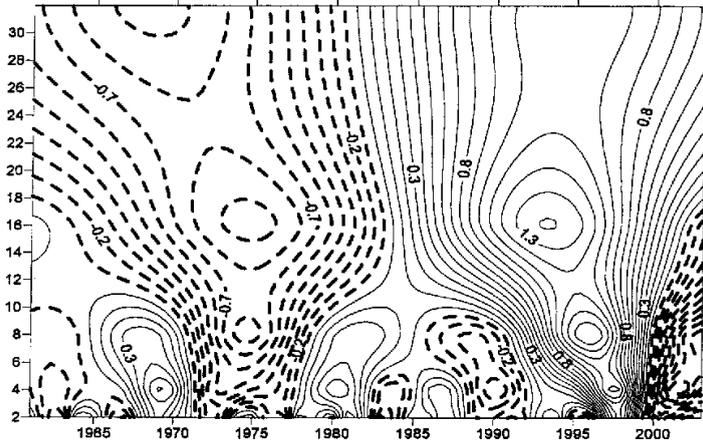


图 6.3.2 加利福尼亚海区海温 Morlet 小波分析图

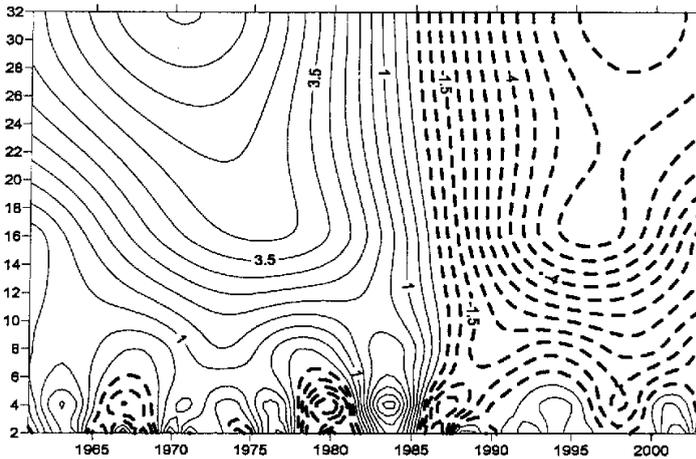


图 6.3.3 宁夏春季沙尘暴日数 Morlet 小波分析图

分析时频分布图，由图可见，加利福尼亚海区海温具有时频多尺度特征，在各时域上（1961-2003 年）4 年、8 年、16 年左右的时间尺度上的周期都较明显，另外还存在 2 年左

右的弱周期变化；与之相对应宁夏春季沙尘暴日数的小波变化与加利福尼亚海区海温基本反位相分布，这种关系在大部分时域、频域上对应较好，由图可以看出，宁夏春季沙尘暴日数也存在4年左右的周期变化及相对较弱的2年左右的周期变化，这种周期变化在1985年以前更为明显；同时从图6.3.2、图6.3.3不难看出，加利福尼亚海区海温10年以上各时间尺度上突变年在1980~1984年间，宁夏春季沙尘暴日数各时间尺度上突变特征都较明显，突变年在1985年前后，比关键区海温突变晚，由此也可看出海温对沙尘暴的滞后影响。

6.4 多、少沙尘暴年关键区关键时期海温分布特征

以宁夏春季沙尘暴日数距平±2天为标准，选取多、少沙尘暴年各9年，列于表6.4.1。

表 6.4.1 宁夏春季沙尘暴多、少年关键区海温距平(°C)

多沙尘暴年	1962	1963	1966	1969	1971	1975	1976	1982	1983
关键区海温	-0.6	0.2	-0.3	0.0	-0.5	-0.4	-0.7	-0.2	-0.2
少沙尘暴年	1978	1986	1989	1991	1994	1996	1997	1999	2003
关键区海温	0.1	0.5	0.0	0.2	0.5	1.2	1.3	-0.5	-0.1

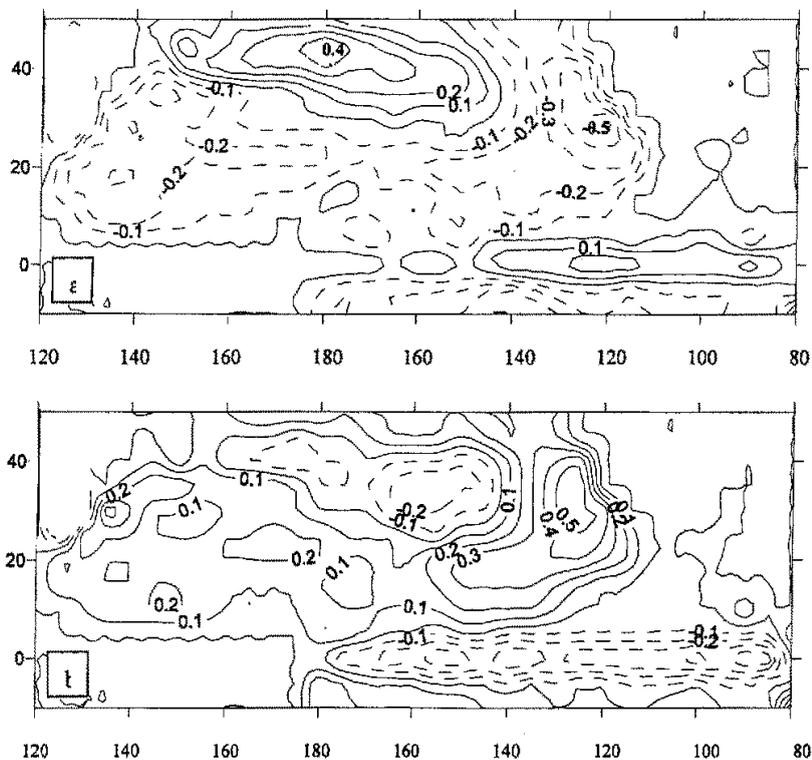


图 6.4.1 沙尘暴多(a)、少(b)年北太平洋海温场异常分布

由表可见, 在沙尘暴明显偏多的 9 年中, 有 7 年关键区为冷水年, 1 年为正常年份, 1 年为暖水年份; 在沙尘暴明显偏少的 9 年中, 6 年关键区为暖水年, 其中有 2 年偏高 1℃ 以上, 1 年正常年份, 2 年为冷水年。同时图 6.4.1 给出了沙尘暴多、少年北太平洋海温距平分布合成图。由图可见, 宁夏春季多、少沙尘暴年, 北太平洋海温场分布型相反, 多沙尘暴年北太平洋范围以冷水为主, 关键区中心距平值小于 -0.5℃, 为偏冷程度最明显的地区, 阿留申区及北温带地区、黑潮区、赤道地区为暖水区; 少沙尘暴年北太平洋海水的冷暖位相分布区域与多沙尘暴年相反, 关键区为明显暖水年, 中心距平值大于 0.5℃, 是偏暖程度最高的区域。

以上分析可见, 关键区海温与宁夏春季沙尘暴频次有较好的对应关系, 两者存在内在联系。

6.5 宁夏春季沙尘暴与关键区海温异常耦合相关的 SVD 分析

由前面 6.1 节分析可知, 宁夏春季沙尘暴日数与加里福尼亚有较好的负相关, 为进一步了解北太平洋海区通过海气相互作用影响宁夏春季沙尘暴相对应海温的分布型, 分别以宁夏 18 个站春季沙尘暴日数标准化距平为左场, 1960~2003 年北太平洋范围 (10° S-50° N, 125° E-80° W) 5° × 5° 共 286 个网格点的逐月海表温度标准化距平 (10~5 月) 为右场, 做 SVD 分析, 分析宁夏春季沙尘暴与关键区海温异常的耦合相关关系。

计算结果(表 6.5.1)可知, 两个场前 4 对模态累积方差贡献达 86.63%, 前 4 个模态的

表 6.5.1 春季沙尘暴频数与海温场 SVD 分析的前 4 个模态相关系数及方差贡献

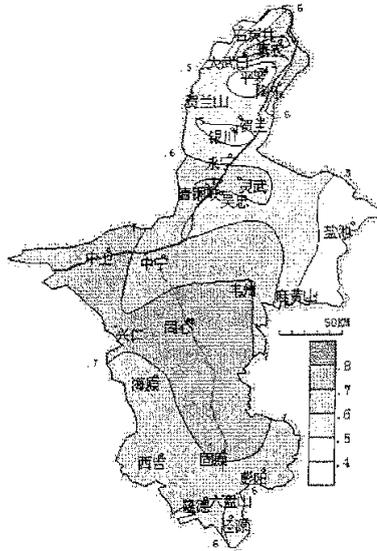
	各 对 模 态			
	1	2	3	4
累积方差贡献(%)	61.23	74.59	82.54	86.63
模态相关系数	0.67	0.60	0.47	0.59

关系系数超过 0.47, 第一、二、四模态相关系数超过 0.001 信度(0.4747) 检验, 第三模态超过 0.01 信度

(0.3805) 检验, 其中第一模态解释方差贡献达 61.23%, 相关系数达 0.67, 第二模态解释方差贡献达 13.36%, 相关系数达 0.60, 前两个模态能反映两场相关的主要特征。因此我们就第一、第二模态进行重点分析。

由图 6.5.1a 可以看出, 宁夏春季沙尘暴频次为一致的正相关, 它反映了宁夏春季沙尘暴频次与关键时段北太平洋海温场第一对耦合分布状况, 相关敏感区位于大武口、惠农、青铜峡、中卫、兴仁、同心、固原等地, 相关系数超过 0.7。北太平洋海温场上, 千岛阿留申区及北温带区为正相关, 中心区相关系数超过 0.7, 其它海域为负相关, 显著相关区位于

加利福尼亚海区，中心相关系数小于-0.7。可见当宁夏春季敏感区沙尘暴偏多（少）时，北太平洋会出现千岛阿留申区及北温带区偏暖（冷）而加利福尼亚海区偏冷（暖）的“跷跷板”型分布。



a. 第一模态春季沙尘暴频次与其时间系数同性相关分布

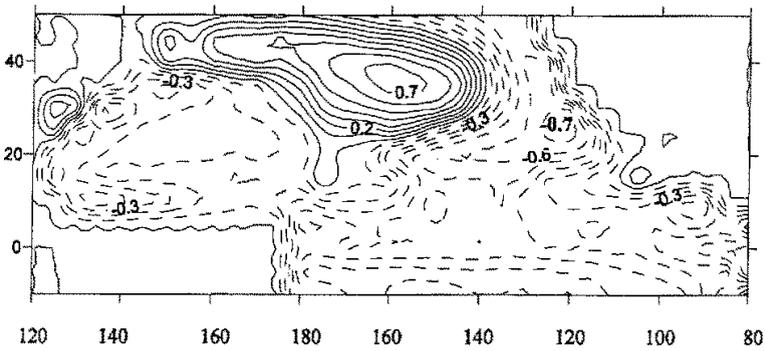


图6.5.1 第一模态春季沙尘暴频次与海温场SVD分析的同性相关系数

曲线与两场的时间系数有着较为一致的变化趋势，从年代际看80年代中期为转折期，同时年际对应关系也较好。对比时间系数曲线与两场的空间分布特征，也说明了近40多年来宁夏春季沙尘暴频次总体下降的趋势。

“跷跷板”型分布。

图6.5.2为第一模态两场的时间系数的变化曲线，由图可知，两场的时间系数有着较为一致的变化趋势，从年代际看80年代中期为转折期，同时年际对应关系也较好。对比时间系数

如果将春季沙尘暴场作为预报对象场，关键时段海温场视为预报因子场，分析第一模态与北太平洋海温场的异性相关系数场，即可了解海温场对于沙尘暴场起影响作用的关键区，从而找出其对应的短期气候预测的关键区。

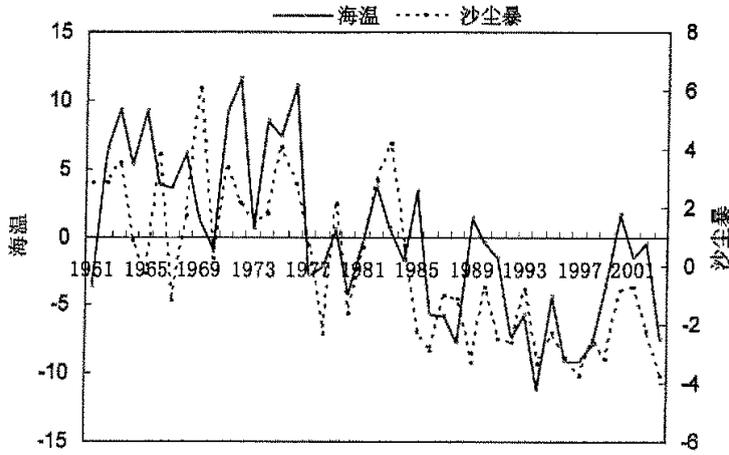
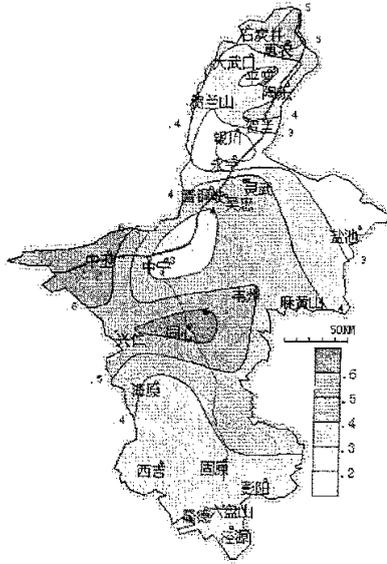
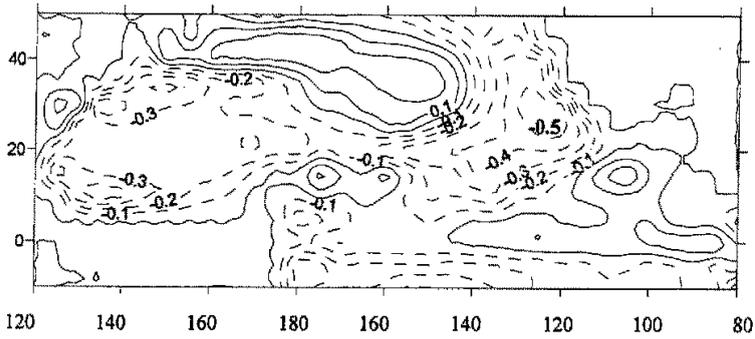


图6.5.2 第一模态时间系数变化曲线

图6.5.3为第一模态春季沙尘暴与海温场SVD分析的异性相关系数，第一模态左场异性相关系数（图6.5.3a）表明，宁夏春季沙尘暴日数具有同位相分布的特征，高值区位于沙尘暴高发的宁夏北部地区和中部地区，中卫、同心相关系数超过0.6，但值得一提的是，沙尘暴发生频次最高的的盐池，与海温场时间系数的异性相关系数并不很高，仅为0.24，这里再次说明该地区沙尘暴过程的频发主要与本地生态恶化有着直接关系，而与外强迫因子的关系并不十分敏感。图6.5.3b可见，第一模态北太平洋海温场与宁夏春季沙尘暴日数时间系数相关场表现为，千岛阿留申及北温带、赤道东太平洋及北热带东部地区正相关，其它海域负相关，相关最显著的区域为加利福尼亚海区，相关系数超过0.5，其它大部分海域相关不显著。



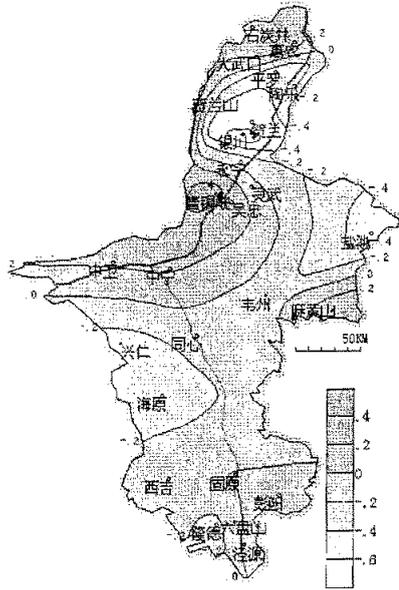
a. 第一模态沙尘暴频次与海温场时间系数的异性相关分布



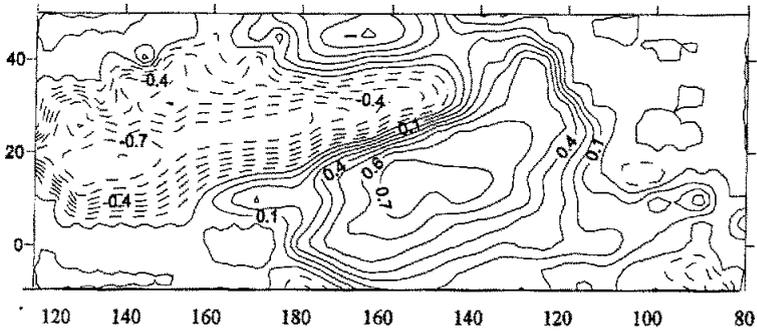
b. 第一模态海温场与春季沙尘暴频次时间系数的异性相关分布

图6.5.3 第一模态春季沙尘暴频次与海温场SVD分析的异性相关系数

图 6.5.4a 为第二模态春季沙尘暴频次与其时间系数同性相关分布, 宁夏大部分地区为负相关, 只在引黄灌区的北部、中部以及南部阴湿区零星分布正相关区, 显著负相关区位于银川及贺兰、盐池, 青铜峡为显著正相关区。对应北太平洋海温场上 (图 6.5.4b), 呈



a. 第二模态春季沙尘暴频次与其时间系数同性相关分布



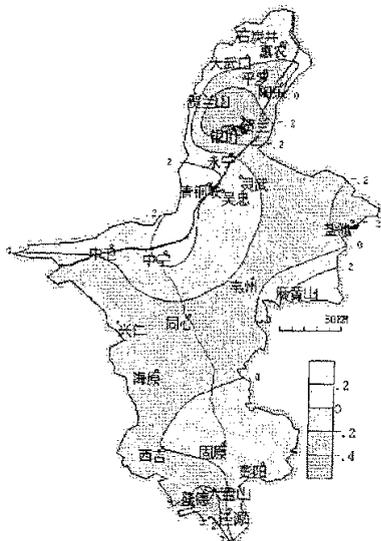
b. 第二模态海温场与其时间系数同性相关分布

图6.5.4 第二模态春季沙尘暴频次与海温场SVD分析的同性相关系数

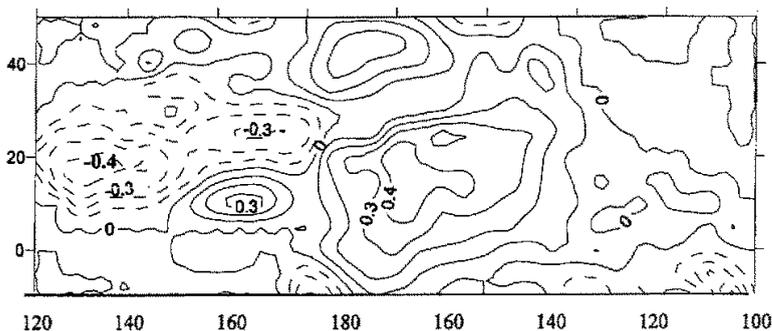
西北负东南正
的分布形势, 赤道东太平洋及热带大部分地区为大范围的正相关区, 中心相关系数超过 0.7, 而黑潮区及西风漂流区则为大范围负相关区, 这种北太平洋海温北负南正的分布型, 正好

为厄尔尼诺型分布,也就是说,宁夏沙尘暴的这种分布型与 ENSO 事件有关。该模态的分布型说明,当北太平洋海温场呈厄尔尼诺型分布时,宁夏各地沙尘暴日数以偏少为主,而当北太平洋海温场呈拉尼娜型分布时,宁夏各地沙尘暴日数以偏多为主。

钱正安等^[9]、叶笃正等^[71]、周自江等^[62]的研究指出若赤道中、东太平洋海温变暖(厄尔尼诺事件),则冬春季东亚大槽偏东、偏弱,东亚冬季风强度弱,由寒潮大风引起的沙尘天气出现较少,而赤道中、东太平洋海温偏冷时(反厄尔尼诺事件)东亚冬季风势力强,我国北方由寒潮大风所引起的沙尘天气出现也频繁。我们所得到的结论与之基本吻合。



a. 第二模态春季沙尘暴频与海温场时间系数的异性相关分布



b. 第二模态海温场与春季沙尘暴频次时间系数的异性相关分布

图6.5.5 第二模态春季沙尘暴频次与海温场SVD分析的异性相关系数

由图
6.5.5 第二

模态春季沙尘暴频次与海温场 SVD 分析的异性相关系数分布, 可以寻找北太平洋海温场上第二型分布的关键区。由图 6.5.5a 可见, 第二模态春季沙尘暴次数与北太平洋海温场时间系数大部分为负相关, 敏感区在银川、贺兰一带; 对应北太平洋海温场与春季沙尘暴时间系数的异性相关分布 (图 6.5.5b) 可知, 北太平洋海温场呈东正西负分布形态, 负相关中心区位于 $15^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ (A 区), 相关系数小于 -0.4, 正相关中心区在 $5^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{W}\sim 150^{\circ}\text{W}$ (B 区), 相关系数超过 0.4。由此可知, 当北太平洋海温场 A 区偏冷而 B 区偏暖时, 有利于敏感区春季沙尘暴的偏少, 反之亦然。

由此可见, 前文中我们用相关法所找的关键区正是处于一种范围更大的海温分布型的关键部位; 另外宁夏春季沙尘暴频次分布形态还与 ENSO 事件有关。

6.6 北太平洋海温异常影响宁夏春季沙尘暴的可能途径

由前面的分析可知, 宁夏春季沙尘暴频次与加利福尼亚海区海温存在密切关系, 同时前面我们还分析了大气环流、气象要素对宁夏春季沙尘暴的影响, 这里我们将通过研究海温与大气环流的遥相关关系, 探讨北太平洋海温通过影响大气环流异常再影响宁夏春季沙尘暴异常的可能途径。

6.6.1 关键区海温与春季高度场的相关关系

为探讨关键区海温与大气环流的关系, 我们合成了关键海区冷、暖年春季 500hpa (图 6.6.1)、1000hpa (图 6.6.2) 高度距平场。

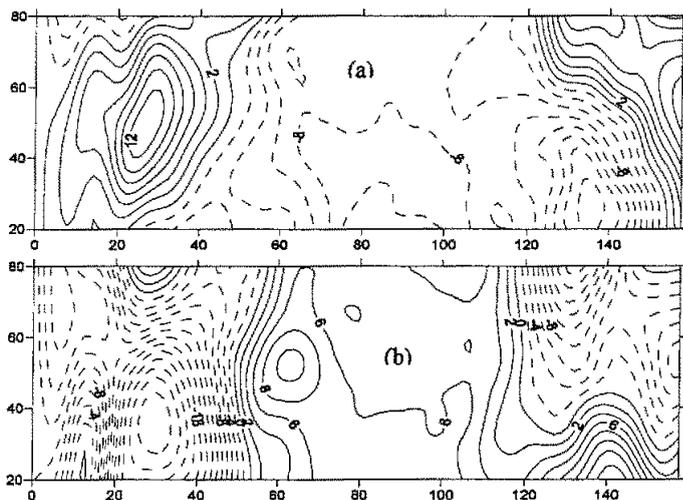


图 6.6.1 春季 (3-5 月) 500hpa 高度距平场 (a 冷年合成, b 暖年合成)

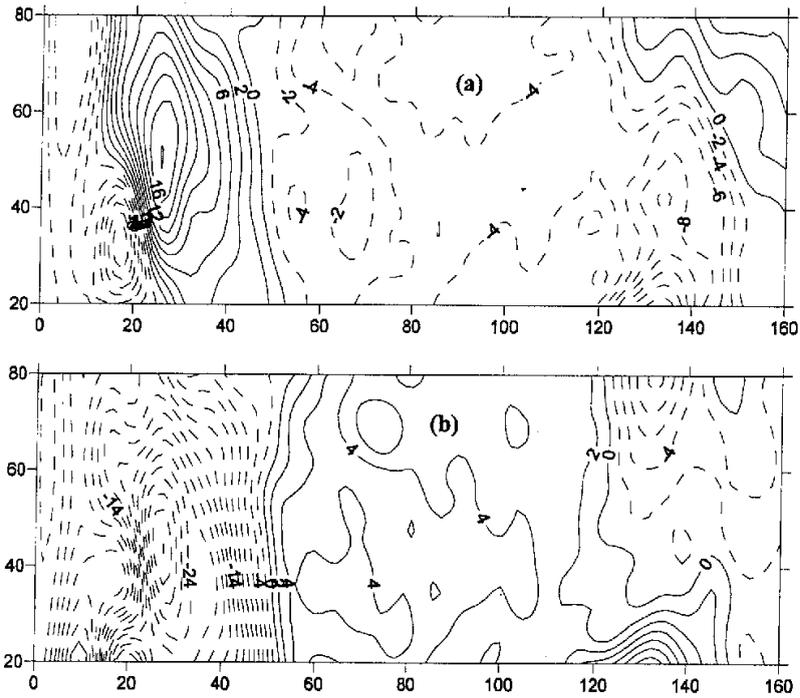


图 6.6.2 春季（3-5 月）1000hpa 高度距平场（a 冷水年合成，b 暖水年合成）

在冷水年春季（3-5 月），从高低空环流形式来看，范围呈“西高东低”形势，从低层到高层欧洲乌拉尔山高压脊较常年偏强（最大正距平区），经向度加大，容易引导极地冷空气南下，锋区大致位于 50° E，东亚大槽位于 140° E 附近（最大负距平区），也较常年明显增强。500hpa 上，贺兰山以西至蒙古国中西部一带为次大负距平区，多受高空低值系统（高空冷槽或低涡）控制，对应地面蒙古气旋呈加深趋势，说明该区域在冷水分春季冷空气活动比较频繁，又是我国的巴丹吉林和腾格里两大沙漠所在地，春季白天近地面增温又快，为沙尘暴的出现创造了非常有利的环流形势和物质条件。

在暖年春季（3-5 月），欧亚大陆高低空环流形势变化与冷水年呈反位相分布，乌拉尔山为低压槽区，弱的高压脊位于里海到巴湖附近，不利于极地冷空气的南下，加之我国西北东部至蒙古国一带也为正距平区，说明冷空气活动较少，增温较快，高度场呈增高趋势，蒙古气旋强度偏弱，大风天气难以形成，不利于沙尘暴天气的形成和发展。

综上所述，关键海区冷水年春季（3-5 月）与暖年春季（3-5 月）相比，欧亚大陆高

空系统较强，环流经向度加大，蒙古气旋加深，有利于极地冷空气南下，为西北沙尘暴的发生发展创造了有利气候条件。

6.6.2 关键海区冷、暖水年大气环流特征量分析

由前面分析可知，与冷空气活动密切相关的 500hpa 环流特征量如北半球极涡、西风环流指数、东亚大槽等的异常对沙尘暴活动有重要影响，因此，本文将探讨关键区海温与以上逐因子的对应关系。

表 6.6.1 给出了关键海区冷、暖水年 500hpa 大气环流特征量的距平特征，由表可见，冷水年冬春季东亚大槽位置以偏西为主，极涡强度偏强的年份占优势，西风环流指数负距平的年份偏多，经向环流偏强，冷锋活动频繁，大部分冬季平均气温偏低，表明冬季风偏强的年份为主；而暖水年基本相反，东亚大槽位置以偏东为主，极涡偏弱的年份居多，西风带以纬向环流占优势，而冬季则以暖冬为主，即冬季风偏弱的年份较多。

表 6.6.1 关键海区冷、暖水年环流特征量距平

冷	年份	1961	1962	1971	1972	1973	1974	1975	1976	2000	2001
	水	东亚大槽位置	-2.8	-2.8	-2.8	-5.8	2.2	-2.1	-2.2	-0.1	2.7
年	极涡强度	10.9	-9.5	10.9	4.5	-3.8	8.9	8.1	14.9	-14.5	-6.5
	西风环流指数	-0.01	-0.1	0.18	0.13	-0.14	-0.01	0.01	-0.16	0.03	-0.13
	冬季气温	-1.4	-0.5	-1.7	-1.2	-0.1	-1.1	-1.1	-1.1	0.1	2.5
暖	年份	1968	1980	1986	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
	水	东亚大槽位置	-1.7	-3.0	-5.7	3.3	6.7	-1.7	3.3	5.0	5.0
年	极涡强度	-10.8	-11.3	9.2	11.2	8.2	7.5	-16.5	-15.6	-4.6	-6.3
	西风环流指数	0.17	-0.06	0.11	0.13	-0.16	0.1	-0.45	0.03	-0.13	0.35
	冬季气温	-4.6	-0.6	1.9	0.2	0.3	0.6	-0.5	1.3	1.0	1.4

6.7 本章小结

(1) 宁夏春季沙尘暴频次与前一年10月到当年5月加利福尼亚海温有显著的负相关关系，关键区海温冷、暖异常与宁夏春季沙尘暴日数多、少有较好的时频对应关系，从而为沙尘暴预测提供了一定的依据；与宁夏春季沙尘暴异常耦合相关的北太平洋最主要分布型是千岛阿留申及北温带、赤道东太平洋及北热带东部区正相关，其它海域为负相关，相关最显著的区域为加利福尼亚海区了；另外发生在北太平洋的ENSO事件对宁夏春季沙尘暴有重要影响，当北太平洋海温场呈厄尔尼诺型分布时，宁夏各地沙尘暴日数以偏少为主，而当北太平洋海温场呈拉尼娜型分布时，宁夏各地沙尘暴日数以偏多为主。

(2) 加利福尼亚海温通过影响大气环流，进而影响宁夏沙尘暴的发生，关键海区冷水年春季（3-5月）与暖水年春季（3-5月）相比，欧亚大陆高空系统较强，环流经向度加大，

蒙古气旋加深，有利于极地冷空气南下，为西北沙尘暴的发生发展创造了有利气候条件。另外，分析 500hpa 环流特征量的特征发现，冷水年冬春季东亚大槽位置以偏西为主，极涡强度偏强的年份占优势，西风环流指数负距平的年份偏多，经向环流偏强，冷锋活动频繁，大部分冬季平均气温偏低，表明冬季风偏强的年份为主；而暖水年基本相反。

第七章 总结与讨论

7.1 基本结论

本文对宁夏春季沙尘暴气候特征、不稳定条件、大气环流背景进行了系统的分析,研究了北太平洋海温场与宁夏春季沙尘暴频次之间的遥相关关系以及加利福尼亚海区海温异常变化对沙尘暴的可能影响途径,得出如下结论:

1. 宁夏春季沙尘暴具有明显的区域性、连续性、阶段性特征,沙尘暴主要集中在两个区域,一个位于中部盐池、同心、海原一带,最大中心位于盐池,另一个位于北部引黄灌区,陶乐、平罗一带,而固原以南地区基本无沙尘暴天气出现;由于宁夏地域较小,春季各月沙尘暴发生日数具有很强的持续性,即全区一致的沙尘暴偏多或偏少是其主要分布特征,这种持续性尤以4月份最为明显;自60年代以来宁夏春季平均沙尘暴日数总体上呈下降趋势,且具有明显的阶段性特征,80年代中期以前为沙尘暴高发期,其后沙尘暴发生日数明显减少,80年代中期为沙尘暴发生突变的时期。

2. 宁夏特强沙尘暴多发生在春季的午后;强风是特强沙尘暴形成的关键动力因子;宁夏特强沙尘暴发生的气候背景:a 前期连年干旱,土壤缺水严重.b 前冬严寒,冻土深厚,冻融后地表层松软. C 春季东亚环流经向度大,冷空气南下强,形成大风。

3. 通过对近年来宁夏中北部沙尘暴发生过程中不稳定条件分析发现:大部分沙尘暴天气发生过程中,清晨及傍晚大气具备不稳定条件;沙尘暴发生过程中的大气不稳定性主要发生在700hPa以下,以850hPa表现最为明显;沙尘暴发生之前(至少前一日)大气不稳定性已出现,持续时间长的强沙尘暴发生前存在较长时间的不稳定能量的积累过程;突发性强沙尘暴在其发生前不稳定能量急剧积累;强沙尘暴发生时低层存在强动力、强静力不稳定;不稳定能量最强时(Richardson数最小),也就是沙尘暴发生时。

4. 北半球极涡强度指数、极涡面积指数、亚洲西风环流指数、及宁夏春季大风日数、冬季平均气温、冬春季平均气温温差与春季沙尘暴存在较为一致的年代际变化特征,80年代中期以前春季北半球极涡面积偏大,强度偏强,亚洲西风带经向环流占优势,春季大风日数偏多,冬季平均气温偏低,冬春季平均气温差值偏大,其后基本呈反位相分布;分析沙尘暴频次与影响因子的年际对应关系发现:沙尘暴少(多)发年前一年夏季及前一年夏季到当年春季累积降水量偏多(少);冬春季冷空气活动次数偏少(多);前期及同期北半球极涡面积偏小(大)、强度偏弱(强);冬季东亚大槽位置偏东(西)、强度偏弱(强)。

5. 宁夏春季沙尘暴频次与前一年10月到当年5月加利福尼亚海温有显著的负相关关系,关键区海温冷、暖异常与宁夏春季沙尘暴日数多、少有较好的时频对应关系,从而为沙尘

暴预测提供了一定的依据；与宁夏春季沙尘暴异常耦合相关的北太平洋最主要分布型是千岛阿留申及北温带、赤道东太平洋及北热带东部区正相关，其它海域为负相关，相关最显著的区域为加利福尼亚海区了；另外发生在北太平洋的ENSO事件对宁夏春季沙尘暴有重要影响，当北太平洋海温场呈厄尔尼诺型分布时，宁夏各地沙尘暴日数以偏少为主，而当北太平洋海温场呈拉尼娜型分布时，宁夏各地沙尘暴日数以偏多为主。

6. 加利福尼亚海温通过影响大气环流，进而影响宁夏沙尘暴的发生，关键海区冷水年春季（3-5月）与暖水年春季（3-5月）相比，欧亚大陆高空系统较强，环流经向度加大，蒙古气旋加深，有利于极地冷空气南下，为西北沙尘暴的发生发展创造了有利气候条件。另外，分析500hpa环流特征量的特征发现，冷水年冬春季东亚大槽位置以偏西为主，极涡强度偏强的年份占优势，西风环流指数负距平的年份偏多，经向环流偏强，冷锋活动频繁，大部分冬季平均气温偏低，表明冬季风偏强的年份为主；而暖水年基本相反。

7.2 存在问题和研究展望

1、本文只通过统计关系，对宁夏春季沙尘暴和北太平洋海温之间的关系进行了粗浅的研究，而未深入探讨它们之间的物理过程和动力机制，这有待进一步深入研究。

2、另外北太平洋海温场对其它季节沙尘暴的发生也会产生影响，在以后的研究中应加以关注。

参考文献

- [1] 赵光平, 王连喜, 杨淑萍. 宁夏强沙尘暴生态调控对策的初步研究[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 448-450
- [2] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 349-356
- [3] 彭维耿, 陈楠. 宁夏多、少沙尘暴年4月平均环流特征对比分析[J]. 高原气象, 2002, 21(6): 599-603
- [4] 孙军, 李泽春. 西北地区沙尘暴预测方法初步研究[J]. 气象, 2001, 27(1): 19-24
- [5] 颜宏. 全国沙尘暴天气研讨会会议总结[J]. 甘肃气象, 1993, 11(3): 6-11.
- [6] 贺慧霞, 钱正安, 瞿章. 我国西北地区部分沙尘暴个例谱[J]. 大气情报, 1993, 30(4): 14-18.]
- [7] 杨建玲. 宁夏春季沙尘暴变化规律、环流背景及其与北极海冰的遥相关关系: [学位论文][D]. 南京: 南京气象学院大气科学系, 2003
- [8] 周自江, 王锡稳, 牛若芸. 近47年中国沙尘暴气候特征研究[J]. 应用气象学报. 2002, 13(2): 193—200.
- [9] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠. 2002, 22(2): 106—111.
- [10] 王式功, 董光荣, 杨德保, 等. 中国北方地区沙尘暴变化趋势初探[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(2): 86-94
- [11] 刘景涛, 郑明倩. 华北北部黑风暴的气候学特征[J]. 气象, 1998, 24(2): 39-44.]
- [12] Jauregui E. The dust storms of Mexico City [J]. Inter.J. Climatol, 1989, 9(2): 169-180.
- [13] 王式功, 杨德保, 周玉素, 等. 我国西北地区“94.4”沙尘暴成因探讨[J]. 中国沙漠, 1995, 15(4): 332-338.]
- [14] 付有智, 刘坤训, 丁荣, 等. 甘肃河西黑风成因及预报[J]. 气象, 1994, 20(12): 50-53.
- [15] 徐国昌. 甘肃“4.22”特大沙暴分析[J]. 气象学报, 1979, 37(4): 26-35
- [16] 陈敏连, 郭清台, 徐建芬, 等. 黑风暴天气的研究和探讨[J]. 甘肃气象, 1993, 11(3): 16-27.]
- [17] Joseph P V, Raipal D K, Deka S N. "Andhi", The convective dust storms of Northwest India[J]. Mausam, 1980, 31: 431-442.
- [18] Mc Naughton D L. Possible connection between anomalous anticyclones and sandstorms[J]. Weather, 1987, 42(1): 8-13.
- [19] 郑新江, 刘诚, 崔小平, 等. 沙暴天气的云图特征分析[J]. 气象, 1995, 21(2): 27-31.
- [20] Yang Dongzhen. A case study on sandstorm [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1991, 5(2): 150-155.

- [21] 江吉喜.一次特大沙尘暴成因的卫星云图分析[J].应用气象学报,1995,6(2):177-184.
- [22] 江吉喜,项续康,等.以卫星云图资料为主的强沙尘暴超短期预报方法初探[A].中国沙尘暴研究[C].北京:气象出版社,1997.98-102
- [23] 邱金桓,孙金辉.沙尘暴的光学遥感及分析[J].大气科学,1994,18(1):1-10.]
- [24] Legrand M.Satellite detection of Saharan dust:optimized imaging during nighttime[J].Journal of Climate,1988,1(3):256-264
- [25] 申绍华,陈受钧.沙尘辐射强迫锋生过程的数值模拟[J].气象学报,1993,5(3):283-294.]
- [26] 申绍华,陈受钧.沙尘辐射强迫的锋生过程分析[J].气象学报,1993,51(4):425-433
- [27] Steven A Ackermab,Hyosang Chung.Radiative effects of airborne dust on regional energy budgets at the top of the atmosphere.[J].Appl.Meteor.,1992,223-233
- [28] 牛生杰,孙继明,陈跃.贺兰山地区沙尘气溶胶质量浓度的观测分析[J].高原气象,2001,20(1):82-67
- [29] 牛生杰,章澄昌,孙继明.贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究[J].大气科学,2001,25(2):243-252
- [30] 钱正安,贺慧霞,瞿章,等.我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征[A].中国沙尘暴研究[C].北京:气象出版社,1997. 1-10
- [31] 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
- [32] 尚可政,孙黎辉,王式功,等.甘肃河西走廊沙尘暴与赤道中、东太平洋海温之间的遥相关分析[J].中国沙漠,1998,18(3):239-243.
- [33] 彭公炳, 钱玫, 钱步东等.北太平洋海温场与我国春季西北地区沙尘暴的关系[J], 气候与环境研究, 2004, 9 (1): 174-181
- [34] Cautenet G.Thermal impact of Saharan dust over land.Part I :Simulation[J].J.Appl.Meteor, 1992:166-180
- [35] Gnthon C.Simulations of desert dust and sea-salt aerosols in Antarctica with a general circulation model of the atmosphere[J]. Tellus, 1992,44 B, 4:371-389.
- [36] Swap R.Saharan dust in the Amazon Basin[J].Tellus, 1992, 44 B, 2:133-149.
- [37] Ellis JR,WG,Merrill J T. Trajectories for Saharan dust transported to Barbados using Stokes's law to describe gravitational settling[J]. Journal of Applied

Meteorology,1995,34:1716-1726

- [38] Franzen LG.The Saharand dust episode of southern and central Eueope,and northern Scandinativia March, 1991[J].Weather, 1995,50(9):313-318.
- [39] 田中丰显.云の冰晶化过程—冰晶核[J].气象研究,1974, (122):689-737.
- [40] 瞿章,徐宝玉,贺慧霞,等. “930505” 沙尘暴的若干启示[J].干旱区地理,1994,17(1):63-67
- [41] 程麟生,马艳. “93.5” 黑风暴发展结构和不同模式分辨率的数值试验[J].应用气象学报,1996,7(4):386-395.
- [42] 陈伟民,王强,牛志敏,等.中国西北部“4.5” 沙尘暴过程中尺度低压的数值模拟[J].中国沙漠,1996,16(2): 140-144
- [43] 牛生杰, 孙继明, 桑建仁.贺兰山地区沙尘暴发生次数的变化趋势[J].中国沙漠,2000,20(1):55-58.
- [44] 董光荣, 吴波, 慈龙俊等.我国荒漠化现状、成因与防治对策[J].中国沙漠, 1999, 19 (4): 318-332
- [45] 赵光平, 陈楠, 杨建玲等.宁夏中部干旱带生态变化与沙尘暴发生的关系研究[J].应用气象学报,2004,15(4):477-484
- [46] 孙军, 李泽春. 西北地区沙尘暴预测方法初步研究.气象,2001,27(1):19:24
- [47] 保广裕,高顺年,戴升等.西宁地区沙尘暴天气的环流特征及其预报[J].气象,2002,28(5):27:31
- [48] 朱乾根,林锦瑞.天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社.1981:452:453
- [49] 魏凤英, 现代气候统计诊断与预测技术[M].北京: 气象出版社, 1999.
- [50] 施能. 气象场的奇异值分解(SVD). 气象科研与预报中的多元分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 2002. 2.
- [51] 江志红, 丁国裕. 我国夏半年降水距平与北太平洋海温异常的奇异值分解法分析 E]. 热带气象学报, 1995, (2): I33 138.
- [52] 赵振国, 中国夏季旱涝及环境场[M]. 北京:气象出版社, 1999, 68-72
- [53] 王涛, 西部大开发中的沙漠化研究及其灾害防治[J].中国沙漠,2000,20(4):345-348.
- [54] 王涛,陈广庭, 钱正安, 等.中国北方沙尘暴现状及对策[J].中国沙漠,2001(4):322-327.
- [55] 钱正安.关于甘宁部分地区“93.5.5” 特强沙尘暴灾害的调查报告[J].大气情报,1993,30(4):1:13
- [56] 胡隐樵,田光宁.强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J].大气科学,1997,21(5):581:589

- [57] 赵光平,王凡,杨淑萍等.宁夏强沙尘暴天气形成机制和预报方法的研究[J].宁夏气象, 1995 (1.2) :17:26
- [58] 李宗恺,潘云仙,孙润桥.空气污染气象学[M]北京,气象出版社,1985,242:246
- [59] 杨建玲,何金海,赵光平.宁夏春季沙尘暴与北极海冰之间遥相关关系[J].南京气象学院学报,2003,26(3):296-307
- [60] 邹旭恺,王守荣,陆均天.气候异常对我国北方地区沙尘暴的影响[J].地理学报,2000,55(增刊):169-176.
- [61] 钱正安,贺慧霞,瞿章等.我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征[C].中国沙尘暴研究,北京:气象出版社,1997
- [62] 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
- [63] 林纾.500hpa准150天韵律在过程预报中的应用研究[C].新世纪气象科技创新与大气科学发展—气候系统与气候变化.北京:气象出版社2003:134-138;259-264
- [64] 陈兴芳,赵振国.中国汛期降水预测研究及应用[M].北京:气象出版社,2000,:15-20
- [65] 翟盘茂,李晓燕,李威.中国北方沙尘天气的气候条件及其年际变化[C].气候预测评论,2003,19-26
- [66] 黄荣辉,孙凤英.热带西太平洋暖池的热状况及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响[J].大气科学,1991,18(2):141-151
- [67] 朱乾根,田利庆.北极海冰异常空间分布与大气遥相关型及中国气温的关系[C].见:中国科学院大气物理研究所编.东亚季风和中国暴雨.北京:气象出版社,1998.201-209
- [68] 李崇银、咸鹏,北太平洋海温年代际变化与大气环流和气候异常[J],气候与环境研究,2003,18(3):258-273
- [69] 刘宣飞.中国气候年际变异与亚洲季风及海温异常的关系:[学位论文][D].南京:南京气象学院大气科学系,1998
- [70] 李耀辉,李栋梁,赵庆云.中国西北春季降水与太平洋秋季海温的异常特征及其相关分析[J].高原气象,2000,19(1):100-110
- [71] 叶笃正、丑纪范、刘纪远等,关于我国华北地区沙尘天气的成因与治理对策[J],地理学报,2000,55(5):513-521
- [72] 王遂缠.西北地区及其青藏高原东北侧净水的气候特征与影响因子分析:[学位论文][D].南京:南京气象学院大气科学系,2003

致 谢

本文是在牛生杰教授及赵光平正研级高工两位导师的悉心指导下完成的。在硕士论文完成之际，首先谨向辛勤指导和培养我的导师牛生杰教授致以最衷心的感谢！老师严谨求实的治学态度、精深渊博的学术造诣、淡泊名利、平易近人的作风，使我受益匪浅，并将是我今后人生的楷模。

感谢我的导师宁夏气象台正研级高工赵光平台长，无论是作为师长还是领导，他都给予了我最大的支持和帮助，提供给我优越的学习条件，使我的学业得以顺利进行。

非常感谢南京信息工程大学研究生部的老师们几年来对我的诸多帮助，感谢王咏青老师给予我的支持和指导；同时特别要感谢宁夏气象局党组给了我学习深造的机会，感谢宁夏气象台领导及气候科全体同仁在我学习期间给予的关照；感谢胡文东、姚宗国、赵红岩、王遂缠、陈颖等同学及宁夏气象台陈楠高工在我完成论文过程中给予的指导和帮助。

特别要感谢我的母亲，在我学习期间，她承担起了照顾我家庭的全部重任，解除了我的后顾之忧；感谢我的先生家维杰及我们亲爱的女儿家嘉给予我理解和支持；感谢我的公婆及弟妹给予我的多方关照。正是家人无微不至的关怀和默默的奉献，帮助我顺利完成学业。同时我要将这篇论文作为礼物献给我九泉之下的父亲。