

塔里木盆地中的大气环流及沙尘暴成因探讨 ——根据沙漠风积地貌和气象观测重建的风场

韩永翔^{1, 2} 方小敏² 宋连春¹ 张 强¹ 杨胜利²

1 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020

2 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 地理科学系, 兰州 730000

摘 要 沙漠风积地貌的形态可反映风向的长期变化, 作者通过对塔克拉玛干沙漠风积地貌形态所揭示的风向及盆地边缘气象站 40 年的风况分析和合并, 重建了盆地中沙尘暴形成时的风场。在分析冷空气入侵塔里木盆地的路径、盆地中不同时期热力状况的基础上, 从大气环流的角度探讨了盆地中沙尘暴的成因。结果表明, 在暖季(春、夏), 由于地面对大气感热加热作用强烈, 形成了浅薄的热低压。当不同强度的冷空气入侵时, 尽管风场有所不同, 但都会分别在和田—于田—民丰一带、柯坪一带形成强大的辐合上升区, 使这两个地区成为中国沙尘暴发生频率最高的地区。

关键词 塔克拉玛干沙漠 风积地貌 大气环流 沙尘暴 辐合上升区

文章编号 1006-9895(2005)04-0627-09

中图分类号 P445

文献标识码 A

A Study of Atmospheric Circulation and Dust Storm Causes of Formation in the Tarim Basin —The Restructured Wind Field by Shapes of Dune and Observed Prevailing Wind

HAN Yong-Xiang^{1, 2}, FANG Xiao-Min², SONG Lian-Chun¹,
ZHANG Qiang¹, and YANG Sheng-Li²

1 Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020

2 Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Lanzhou University), China Ministry of Education, and College of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract Because the weather and climate differ distinctly from the plains and mountainous areas in the Tarim Basin, and the meteorologic data could be only observed around the margin of the Taklimakan Desert, the detailed pattern of atmospheric circulation is not known in the Tarim Basin. The wind field is restructured according to the 25 surface stations observed data of prevailing wind direction for about 40 years from 1961 to 2000 and the Taklimakan Desert's shapes of dune which can show the prevailing wind direction in the Tarim Basin. In addition, based on the analysis of the pathway of cold air entering the Tarim Basin and the different thermodynamic conditions for different seasons, the causes of the dust storm formation from the view of atmospheric circulation are discussed. The results show that: 1) because the deduced wind field by Desert's dune of shapes is in good agreement with that of the observed prevailing wind direction for about 40 years, which proves that the desert wind-accumulated relief is formed by the long-term strong cold air invading the Tarim Basin; 2) in winter months, the atmosphere in the Tarim Basin is very steady due to the existence of cold air lake, so the winter is the season of the smallest wind speed and the

收稿日期 2004-03-01, 2004-07-21 收修定稿

基金项目 国家自然科学基金资助项目 40475031 和国家重点基础研究发展规划项目 G2000048703

作者简介 韩永翔, 男, 1966 出生, 博士, 副研究员, 从事全球气候变化研究。E-mail: hyxlhx@public.lz.gs.cn

dust storm cannot be triggered. Even if the strong cold air invades the Tarim Basin, it is difficult to trigger the dust storms for disturbing the steady atmosphere; 3) the flimsy heat low is formed in the center of Taklimakan Desert in the warming season due to surface heat being transferred via the sensible heat to the atmosphere. When the cold air invades the Tarim Basin, it can trigger the development of heat low and form the dust storm; 4) the pathways of cold air invading the Tarim Basin depend mostly on the cold air intensity. When the wind intensity is strong, it not only has the eastern and western pathways, but also the third pathway (i. e., the middle pathway) which the cold air gets across the middle part of Tian Shan. When the wind intensity is weak, it only has the eastern and/or western pathways. Though the wind field is not uniform in the Tarim Basin because of the different wind intensity, the strong air convergence areas are formed at Hotan-Yutian-Minfeng in the south of the basin and Kalpin in the north-west of the basin, respectively. The cold gale with the sands and dust supplies continually the convergence areas and the dust storm forms, so the Hotan-Yutian-Minfeng and Kalpin regions hold the high frequency of dust storm in China. In addition, it is suggested that the center of dust storm should be in the hinterland of Taklimakan Desert according to the wind speed shear line sway, which is approved by the desert shapes in the center of the Taklimakan Desert.

Key words Taklimakan Desert, wind-accumulated relief, atmospheric circulation, dust storm, air convergence area

1 引言

塔里木盆地深居欧亚大陆的中心,同时由于青藏高原的存在,水汽很难到达,形成了亚洲大陆最大的极端干旱区,境内拥有亚洲最大、世界第二大流动沙漠——塔克拉玛干沙漠,其干旱化及其产物——沙尘暴的形成机制不但是一个地区性的科学问题,而且沙尘暴扬起的粉尘被西风急流带到沙漠外围地区,如黄土高原、北太平洋乃至北极地区^[1~3],并通过“阳伞效应”、“冰核效应”和“铁肥料效应”影响全球的气候^[4~6],成为全球海-陆-气耦合变化中关键连接纽带区域,并成为了研究全球变化的热点区域之一^[2]。

然而,由于死亡之海——面积达 $33.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的塔克拉玛干沙漠的存在,气候变化研究最基础的气象观测也仅限于沙漠的边缘绿洲,除了因勘探石油而在沙漠腹地所设的两三个气象站如塔中、满参等外(位置见图2),整个沙漠中的气象资料近乎空白。而作为一个海拔约 1000~1500 m 的下陷盆地,塔里木的南、西、北面分别被海拔 3000~5000 m 的昆仑山、帕米尔高原、天山所包围。其特殊的地形使当地的气候明显不同于平原以及山区气候,在天气、气候学上独具一格,具有独特性^[1, 8, 9]。这种独特性使气象学中常规的通过气象要素内插的方法失效,因而也就使试图通过常规气象学探讨此地区沙尘暴、降水等形成机制变得非常困难。所以,以前的一些研究工作集中在揭示某种现象或阐明它们的统计关

系^[8~13]。

沙漠地貌是大自然经过千百年常年风力搬运沙物质而形成的风积地貌,在极端干旱的塔克拉玛干沙漠,沙漠地貌几乎完全由风营力所控制,其形态可反映风向的长期变化,如垂直于风向的新月形沙丘及沙丘链、平行于风向的纵向沙丘、多风向的金字塔沙丘等^[9, 14]。通过分析这些巨型沙漠地貌所反映的主要风向的状况,也就相当于重建了塔克拉玛干沙漠中的风场,因其风积地貌是千百年来形成的,其反映出的风场在气候学上的稳定性与沙漠边缘绿洲 40 年观测的长期风场具有良好的可比性。因为风沙起动临界风速与沙颗粒大小、沙层湿度、植被条件等因素有密切的关系,塔克拉玛干沙漠地面以流动风成沙为主,细沙与极细沙含量占 70%~80% 左右,平均粒径为 0.87 mm,地面裸露,沙层含水率非常低,决定沙粒起动临界风速的主要因素是流体起动风速。研究表明能够改变沙漠地貌所要求的临界流体起动风速为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[15],而只有较大的天气过程才有这种能力,因此,重建的沙漠中的风场不但可以进行气候学分析,而且对天气学分析也有重要的实用价值。

本文通过分析塔克拉玛干沙漠的风积地貌,结合沙漠边缘绿洲气象站 1961~2000 年 40 年的风况观测资料及沙漠腹地如塔中等短期气象观测资料,重建了塔里木盆地中的风场,在此基础上,探讨了塔里木盆地沙尘暴形成的大气环流特征。

2 塔克拉玛干沙漠中的风积地貌及其揭示的风场

为了对塔克拉玛干沙漠中的风积地貌做一个全面的了解，我们大体将塔里木盆地分为东南西北中五个区域(图 1)。罗布泊地区虽然不属于塔里木盆地，但因其风蚀地貌与盆地东部地区的沙漠所反映的风向紧密相连，所以本文将它划归东部区域。

在东部区域，罗布泊地区的地貌主要是由定向风蚀而成的基本平行的条条深壑(即雅当地貌)组成，其方向为 NE—SW 走向，该区地面风系受北方或西北方冷空气南下的影响，气流绕东天山山口而形成偏东气流进入塔里木盆地，风向单一，多为 NE、NNE 风向。当北方冷空气南下时，气流沿 NE—SW 的深壑由罗布泊吹向塔克拉玛干东部^[15]。而实际上其地貌也正是这种 NE—SW 定常风长期作用的结果。在塔克拉玛干沙漠的东部，主要风积地貌为东北—西南方向的大型纵向沙丘^[9, 14]，暗示此区域盛行东北风或西南风。另外，从此区的大沙垅、复合沙丘链所反映的沙丘的移动方向来看，沙丘由东北向西南迁移，表明东部区域主要盛行东北风；北部区域主要为南北向的大型横向型新月形沙丘及沙丘链，新月形沙丘的背风坡在南

部^[9, 14]，表明此区域盛行北风；西部区域主要有两种类型的沙漠，北部沙丘主要为南北向的大型横向型新月形沙丘及沙丘链，暗示此区域盛行北风，南部几乎均为新月形沙丘，背风坡在东南部，表明此区域盛行西北风^[9, 14]；南部区域的风积地貌比较复杂，其中在中部如于田一带有大面积的金字塔沙丘，也是盆地中最显著的连片金字塔沙丘，表明此区域盛行多风向。西面如和田—于田以西的沙漠为西北向排列的新月形沙丘、沙链和沙垅或其复合型，其新月形沙丘的背风坡在东南部，表明此区盛行西北风。和田—于田以东为东北方向的大型纵向沙丘^[2, 16]，暗示此区盛行东北风；沙漠的中部，风积地貌比较复杂，主要有 3 个大的风沙地貌类型。(1)以肖塘为起点，向南延伸大约 55 km 的区域为新月形沙丘及复合型新月形沙丘链区，沙丘链中沙丘单体的走向为 NW—SE。(2)满参北部的穹状沙丘区，沙丘走向为 NW—SE。(3)沙漠腹地综合型线形沙丘区，该区的线形沙丘面积占盆地中线形沙丘总面积的 70% 以上，形态特征也最为复杂，暗示此区风系非常复杂，但整个综合型线形沙丘长度一般在 4~10 km，大致平行分布，且带有一定的弯曲度，背风侧主要在西南、南部，主要以东北风和北风为主^[9, 17]。

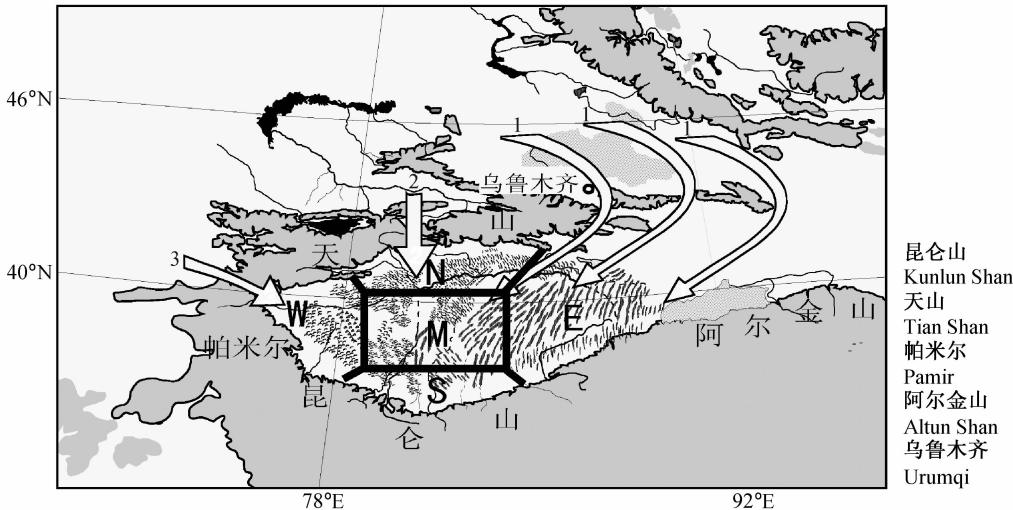


图 1 塔里木盆地中沙漠风积地貌及强冷空气入侵路径。箭头为冷空气入侵路径，其中 1：东部路径，2：中部路径，3：西部路径；E、W、S、N、M 分别表示东南西北中五个区域

Fig. 1 The desert wind-accumulated relief and the pathway of cold air in the Tarim Basin. The arrows express the pathway of cold air entering the Tarim Basin, and 1, 2, 3 shows the eastern, middle and western pathway, respectively. E, W, S, N, M denote the regions of east, south, west, north and center in the Tarim Basin, respectively

3 气象观测资料及风积地貌反映的风场

为了更准确地反映盆地中的风场,分析了沙漠周边地区的代表站点 1961~2000 年 40 年的各月平均最多风向及频率(表 1),结果表明,除个别站点如于田外,其余站点的年最多风向同文献[18]所绘制的大于 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 起沙风向玫瑰图中的年合成风向基本一致(图 2),因此,可以用起沙风向玫瑰图来反映盆地中的风场。从图 2 可以清楚地看到,塔里木盆地中各站点年风向变化非常大,特别是在沙漠腹地,但其合成风向所反映的风场与沙漠风积地

貌所反映的风场对应得非常好,没有发现大的逻辑矛盾,表明可以将二者进行合并。特别是塔克拉玛干沙漠腹地中的塔中、肖塘和满参等短期风向观测资料对沙漠腹地中复杂的风积地貌的走向判断提供了重要的参考依据。通过风积地貌及其揭示的风场(图 1)与气象观测站的风场合并,整个塔里木盆地的风场就基本被重建出来(图 2)。值得强调的是,这主要是根据风积地貌而重建的风场,而能够改变沙漠地貌所要求的临界流体起动风速为 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [15],只有较大的天气过程才有这种能力,所以,它主要反映了盆地中沙尘暴形成时的风场。

表 1 塔里木盆地代表站点 1961~2000 年 40 年平均各月最多风向及频率
Table 1 The most averaged monthly wind direction and frequency of representative stations during 1961 - 2000 in the Tarim Basin

站点 Stations	月份 Month												全年 Annual
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
于田 Yutian	S	S	NE	NE	W	W	W	W	NE	NE	S	S	S
	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
且末 Qiemmo	8, 33	7, 28	10, 18	10, 21	8, 24	10, 24	10, 30	10, 33	7, 37	8, 39	11, 32	9, 35	7, 30
	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
安德河 Andehe	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
	14, 39	17, 32	19, 26	19, 25	18, 26	15, 29	16, 31	20, 34	21, 35	20, 39	15, 42	11, 45	17, 34
民丰 Minfeng	NE	NE	ENE	ENE	NE	NE	NE	NE	ENE	ENE	NE	NE	NE
	C	C			C	C	C	C	C	C	C	C	C
和田 Hotan	13, 34	18, 25	20	19	15, 19	12, 20	14, 21	17, 21	18, 24	19, 29	14, 34	11, 40	15, 25
	W	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	W	NE
柯坪 Kalpin	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
	9, 43	11, 38	16, 30	19, 29	15, 31	10, 32	12, 37	14, 41	16, 46	13, 49	9, 47	9, 47	12, 39
巴楚 Bachu	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SSW	SSW	SSW	SW	SW
	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
喀什 Kashi	9, 31	10, 25	10, 16	9, 16	10, 15	12, 15	9, 20	10, 21	11, 23	14, 25	12, 25	10, 31	10, 22
	SW	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	NE	E
库车 Kuqa	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
	8, 40	10, 36	12, 30	12, 24	12, 21	10, 19	11, 20	11, 24	10, 28	9, 35	10, 37	9, 41	10, 30
阿克苏 Aksu	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
	C	C			C	C	C	C	C	C	C	C	C
喀什 Kashi	11, 55	18, 42	28	25	24, 25	20, 27	22, 28	24, 33	22, 39	18, 49	15, 50	11, 61	20, 38
	NW	NW	NW	NW	W	NW	NW	NW	NW	NW	NW	NW	NW
库车 Kuqa	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
	11, 39	11, 31	9, 20	10, 18	10, 17	11, 14	9, 17	8, 22	8, 30	11, 36	9, 40	10, 45	10, 28
阿克苏 Aksu	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	C									C	C	C	
阿克苏 Aksu	20, 24	21	16	16	15	15	16	16	18	19, 20	14, 25	14, 31	17
	N	NNW	N	N	NW	NW	NW	NW	N	N	N	N	N
阿克苏 Aksu	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
	14, 33	15, 25	11, 23	8, 22	10, 23	12, 24	10, 28	10, 30	9, 36	11, 42	14, 38	13, 38	10, 30

注: C 表示静风;“数字,数字”分别为最多风向频率和静风频率。
Note: The letter C denotes the motionless wind; “number, number” show the frequency of the most wind direction and motionless wind

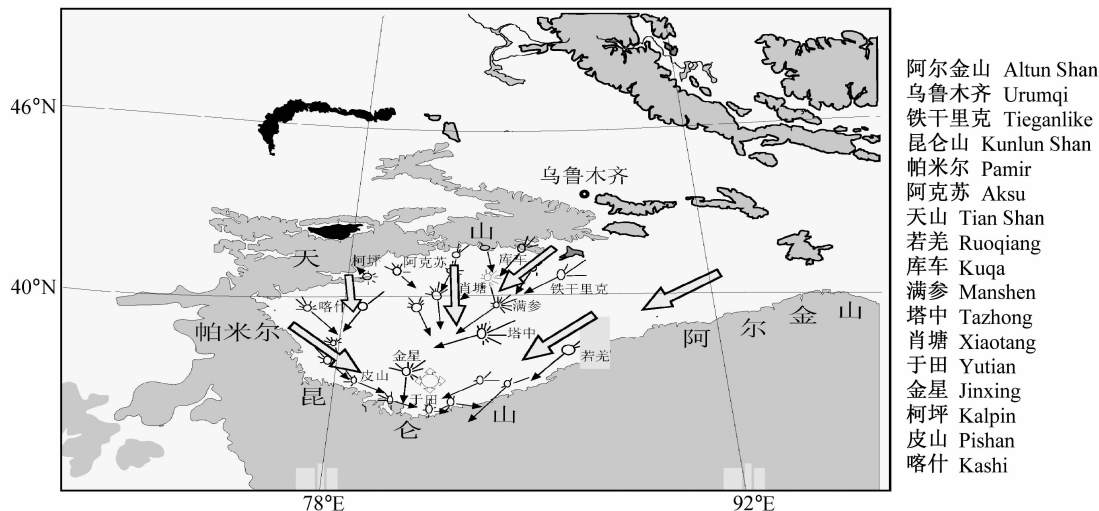


图 2 塔里木盆地中的风场。空心箭头为沙漠地貌揭示的风向，风向玫瑰图(源自文献[18])中的实线箭头代表大于 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的合成风向
Fig. 2 The wind field in the Tarim Basin. The empty arrows express the wind direction opened out by the desert wind-accumulated relief; the solid arrows show the complex wind direction more than $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in the wind direction rose graph, which comes from the reference [18]

4 盆地中沙尘暴路径分析

塔里木盆地南、西、北面分别被海拔 3000~5000 m 的昆仑山、帕米尔高原、天山所包围，只有东面地势较低。文献[13]计算了 1961~2001 年盆地区域性强沙尘暴共发生 545 天，并根据它普查了地面冷高压的移动路径，认为存在北支(从西北部进入新疆)和南支(从西部进入新疆)路径。但我们认为由于帕米尔高原和天山的阻挡，当气流较弱时，无论是北支和南支均无法翻越帕米尔高原和天山，气流只能绕天山东部(称东部路径)或通过一些山口如吐尔尕特山口(称西部路径)等进入盆地；当气流强大时，无论是北支和南支，不但有绕流后的东部和西部路径的气流，而且还有越山气流，如经巴音布鲁克翻越天山(称中部路径)的气流。值得注意的是，翻越帕米尔高原的气流，不但加强了西部路径气流的强度，而且范围也随之加大。因此，对塔里木盆地来讲，北支和南支路径的划分没有实质性的意义，应该将注意力放在分析气流的强弱上面。根据这个思路，我们重新计算了文献[13]中西部和中部路径引发沙尘暴的比例。除去 80 天热低压形成的沙尘暴外，由西部和中部路径形成沙尘暴的天数分别为 339 天和 130 天，分别占总天数 465 天的 73% 和 28%。同时从地形分析可知，气流可通过一些山口如吐尔尕特山口等从帕米尔高原进入

塔里木盆地，而天山因无大的山口存在，所以，由西部路径形成沙尘暴的天数远大于由中部路径形成沙尘暴的天数。因此，如果中部路径存在，则必定有强大的系统入侵塔里木盆地，而且必然伴随着东部和西部路径的气流。

因此，我们根据气流的强弱，绘制了能够引发沙尘暴天气的路径(见图 1、图 3)。在图 1 中我们绘出了气流强大时东部、西部和中部三条路径的示意图。当气流较弱时，仅有东部和西部路径两条路径，无中部路径(图 3)。

5 塔里木盆地中的大气环流及沙尘暴成因探讨

沙尘暴形成需要三个基本的条件：大风、沙源和不稳定的空气层结。盆地中的沙漠为沙尘暴的形成提供了充足的沙源，而路径分析也仅是沙尘暴出现以后的地面冷高压移动路径的统计，它所反映的是风要素，仅仅两个要素难以全面讨论沙尘暴的形成原因。实际上，并不是冷空气越过塔里木盆地就会发生沙尘暴，如冬季和秋季虽有大量的天气系统横扫塔里木，但却很少有沙尘暴的发生。同时，盆地中四季温度不同，其热力状况使得盆地中气团的性质也完全不同，形成沙尘暴的机制也有所不同。因此，欲探讨沙尘暴的成因就必须对不稳定的空气层结进行分析。

重建出的风场虽然反映了盆地中沙尘暴形成时的长期平均状况,但无法区分季节。有关研究表明:塔里木盆地区域性沙尘暴主要出现在春季4~6月,约占全年的76%,其中4月和5月分别占30.3%和28.8%,冬季和秋季很少有沙尘暴的发生^[13]。

如何从重建的风场中提取季节要素,我们试图通过天气学原理和塔里木盆地特殊地形的分析,从大气环流的角度来探讨盆地内沙尘暴的形成原因。

5.1 冬季盆地中近地面的风场

在冬季(10~2月),由于塔里木盆地封闭度很高,地面辐射冷却,使得盆地中的气温非常低,如盆地中部的肖塘,1995年实测1月平均气温为 -11.3°C ,极端最低气温为 -23.7°C ,温度明显低于盆地周围海拔高的地区^[19],冷空气在盆地堆积,形成“冷空气湖”,冷空气在暖空气下面,大气的稳定度非常高,并在盆地约600 hPa上空就形成了稳定而强烈的近地面逆温层,它被探空曲线所证实^[1, 9]。即使有冷锋入侵,对盆地中的稳定气团扰动也很小,所以地面风力相应也小,平时风力更小,近乎无风,这使冬季成为盆地风力最弱的季节^[8],发生沙尘暴的概率很小,而且也不是沙漠风积地貌形成的主要成因。另外,有关研究表明沙尘暴的发生与西风急流的移动密切相关,秋季急流较弱且北移到巴尔喀什湖一带,冷空气南下的强度较弱,加上盆地中雨季刚过,沙层板结,沙尘暴发生受到抑制^[1, 8, 20]。

5.2 暖季盆地中近地面的风场

5.2.1 静风和弱冷空气入侵的风场

在暖季(春、夏)的晴日,盆地中常常是风平浪静,下垫面收到的辐射加热会使近地面空气温度升得很高,但由于盆地阻碍空气流动而使得盆地中的低处空气温度特别高,如沙漠腹地肖塘1995年最高气温大于 30°C 的热日达120天^[19]。由于地面对大气感热加热作用强烈,使盆地中的空气密度变小,湍流加强,自由大气变得非常不稳定,形成了垂直厚度不足1000 m的浅薄热低压^[1]。这种热低压一般不会形成区域性沙尘暴过程,但它是扬沙和沙尘暴天气形成的必要条件。

当从西方或西北方来的气流较弱时,因它不能翻越帕米尔高原和天山,因而气流的主要路径是东部路径,同时也有小股如经吐尔尕特、乌恰山口等

从西北进入盆地的气流。弱冷空气入侵暖气团占据盆地时,盆地东部和西北部的暖空气被迫抬升或向空气密度较小的盆地西部和南部流动,从而在东部和西北部形成稳定的空气层结。同时,冷气团和暖气团之间形成温度梯度,也使得气流向西南部流动。动力和热力作用使得暖空气在盆地西南部积聚,加上盆地的地形作用,暖空气只能向上运动,在西南部形成了呈逆时针旋转的弱低压性质的上升区,形成扬沙天气。根据天气学原理和风的自然流向,本文做出了弱冷空气入侵风场示意图(图3)。

从图3中可以清楚地看见在克里雅河($81.30^{\circ}\text{E}\sim 81.39^{\circ}\text{E}$; $36.51^{\circ}\text{N}\sim 39.00^{\circ}\text{N}$)和柯坪分别有风速辐合线的存在,前者是主气流所形成,强度和区域远大于后者。这是因为从盆地东端吹向于田附近的东北风为主气流,它与此东北风逆时针旋转经喀什一和田的西北风相遇,在克里雅河附近形成风速辐合线,其合成风为北风,将扬沙吹向昆仑山北坡。此区域扬沙天气远高于其他地区,而且其附近有盆地中最显著的连片金字塔沙漠^[2],反映此区为多风向的辐合区。大量研究^[1, 9, 16]也证明了这条风速辐合线的存在。柯坪一带则主要是从吐尔尕特、乌恰山口等进入的西北气流与盆地西南部呈逆时针旋转的东南气流在柯坪一带相遇而形成风速辐合线,从而使柯坪也成为沙尘暴发生最高的区域之一。文献^[13]虽然注意到并纠正了柯坪和克里雅河流域沙尘暴高值中心没有相互断裂的错误,但认为柯坪的沙尘暴高值中心可能是局地天气系统所造成。本文的研究清楚地表明,它可能并不是局地天气系统所造成,而是同一个天气系统在塔里木盆地这个特殊地形下气流合理走向的反映。由于是弱冷空气入侵,在常规气象分析中很少被人注意,但就是这种对其他区域影响非常弱的弱冷空气入侵,因塔里木盆地的特殊地形和暖季强大的热低压,在盆地中发生了沙尘暴过程。我们认为这种过程同文献^[13]定义的热低压性质的沙尘暴非常接近,它在1961~2001年41年中共发生80天,约占盆地中区域性沙尘暴545天的14.7%。

5.2.2 强冷空气入侵的风场

当强冷空气入侵时,气流从东部、西部和中部路径均可入侵塔里木盆地。这三股强冷空气分别从西部、北部、东部进入盆地后下沉,形成高压性质的顺时针旋转的风场。锋前盆地的暖空气被迫向南

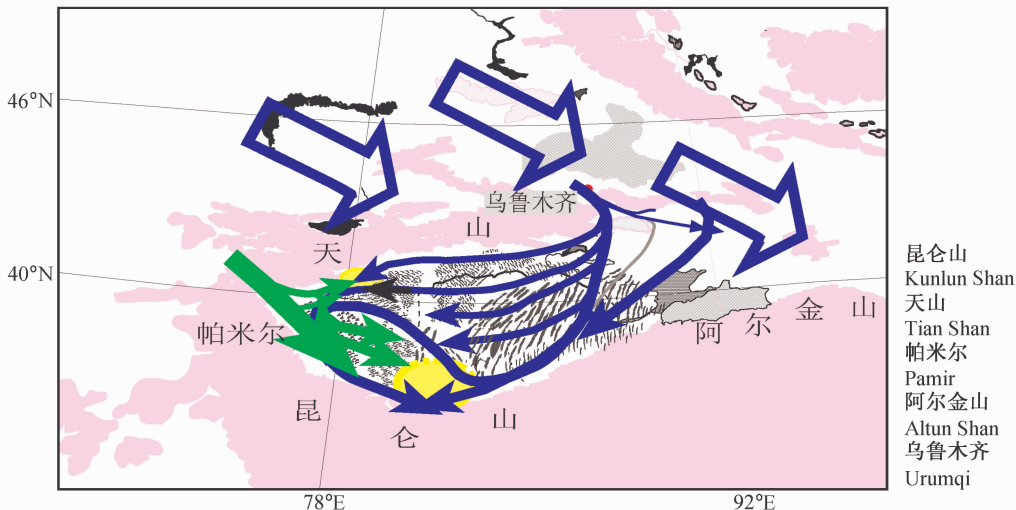


图 3 弱冷空气入侵塔里木盆地风场示意图。黄色圆代表辐合区

Fig. 3 The sketch map of the wind field when the weak cold air enters the Tarim Basin. The yellow circles represent the air convergence areas

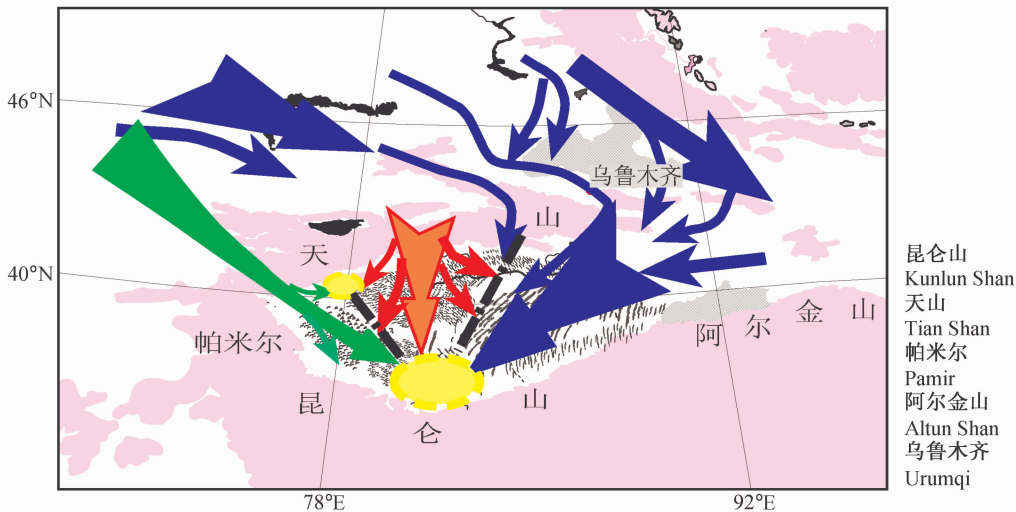


图 4 强冷空气入侵塔里木盆地风场示意图。黑色断线为风切变线，黄色圆圈代表辐合区

Fig. 4 The sketch map of the wind field when the gale enters the Tarim Basin. The black dash-dotted lines represent the wind shear lines, and the yellow circles represent the air convergence areas

激烈抬升^[1]，由于北部昆仑山的存在，各个方向的风将携带沙尘的气流压向以于田为中心的区域，暖空气最终在和田—于田—民丰一带辐合，形成椭圆形的辐合上升区，此区域中的风必然携带沙尘呈强烈的上升状态。法国关于撒哈拉沙漠的研究者认为，金字塔形的沙丘为上升气流所引起，而此区域的金字塔形沙丘为此辐合上升区提供了有力的证据^[9, 14]。另外，对 1998 年 3 月 16~17 日一次个例的分析表明，在沙尘暴发生期间，此区域存在强烈的上升运动，最大上升速度层在 7000 m，甚至在 16000 m 的高空还存在上升运动^[21]。当盆地外围

的冷空气减弱时，翻越帕米尔高原和天山的气流首先减弱，于是椭圆形的上升区的气流向东、向北方向退去，这可解释这一带南风频率较高的原因。

另外，三股强冷空气分别从西部、北部、东部进入盆地形成高压性质的顺时针旋转的风场，它们在沙漠腹地相遇，形成倒“人”字型的风速切变线。由于它们的强弱随过程、时间不同，这条“人”字型的风速切变线将在沙漠中西部摆动(图 4)。在切变线附近因多种携带沙尘的气流交汇，常年有较大的风速和上升运动，所以此区域应该有非常高的沙尘暴发生频率。据塔中的 1998 年观测资料表明，塔

中沙尘暴无论是历时时间,还是出现日数均远大沙漠南部边缘的和田和民丰。同时,沙漠中部非常复杂的风积地貌可以反映这条风速辐合线的摆动情况。

由于西部和中部的气流进入盆地后,均形成高压性质的顺时针旋转的风场,它们在柯坪一带也形成了强大的辐合上升区,但范围和强度要小的多。

综合上面的分析,塔里木盆地沙尘暴发生中心应该在沙漠腹地,倒“人”字型的风速切变线附近应有最大的频率。另外,二个中心分别在沙漠南缘的和田—于田—民丰一带及西北部的柯坪一带。这种分布同许多统计事实^[1, 10~13, 22]完全一致。

6 结语和讨论

(1) 根据沙漠周边地区气象观测的风场与沙漠风积地貌所反映的风场可重建盆地中的风场,它证明沙漠中的风积地貌是由强冷空气长期入侵而形成的。

(2) 冬季,盆地被冷空气所堆积,形成“冷空气湖”,大气的稳定度非常高,所以地面风力很小,近乎无风,这使冬季成为盆地风力最弱的季节,发生沙尘暴的概率很小。

(3) 暖季中盆地的热低压的存在是沙尘暴形成的主要因素之一,冷空气入侵塔里木,将加强热低压的发展,从而形成沙尘暴天气。

(4) 冷空气入侵塔里木的路径取决于其强度。弱冷空气仅有东部和西部路径,而且强度较弱;强冷空气不仅有东部和西部路径,而且还有翻越天山中部的中部路径。尽管它们的风场并不相同,但无论是强冷空气还是弱冷空气入侵塔里木,都分别在沙漠南缘的和田—于田—民丰一带和沙漠西北部的柯坪一带形成辐合上升区,使它们成为被观测到沙尘暴最多的地区。由于倒“人”字型的风速切变线在沙漠腹地摆动,我们推测此区域有非常高的沙尘暴发生频率。

尽管我们利用沙漠风积地貌和气象风况观测资料推测出沙尘暴发生时的风场,同时推测出的沙尘暴高发中心也得到了有关研究的证实,但目前我们还无法根据现有的研究回答如沙尘的起沙量、扬升高度等科学问题,尤其缺少进行沙尘暴数值模拟^[23]所需关键的粉尘物理化学特征,这些问题有待于更深入的研究。

参考文献(References)

- [1] 张家宝, 邓子凤. 新疆降水概论. 北京: 气象出版社, 1987. 149~255
Zhang Jiabao, Deng Zifeng. *Introduction of Xinjiang Precipitation* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1987. 149~255
- [2] Fang Xiaomin, Lü Lianqing, Yang Shenli, et al. Loess in Kunlun mountains and its implications on desert development and Tibetan Plateau uplift in West China. *Science in China* (Series D), 2002, **45**(4): 289~299
- [3] Fang Xiaomin, Shi Zhentao, Yang Shenli, et al. Loess in the Tian Shan and its implications for the development of the Gurbantunggut Desert and drying of northern Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(16): 1381~1387
- [4] Martin J H. Glacial-interglacial CO₂ change: The iron hypothesis. *Paleoceanography*, 1990, **5**: 1~13
- [5] Boyd P W, Watson A J, Law C S, et al. A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. *Nature*, 2000, **407**: 695~702
- [6] Ridgwell A J, Maslin M A, Watson A J. Reduced effectiveness of terrestrial carbon sequestration due to an antagonistic response of ocean productivity. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**, doi: 10.1029/2001GL014304
- [7] 石广玉, 赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题, 大气科学, 2003, **27**(4): 591~606
Shi Guangyu, Zhao Sixiong. Several scientific issues of studies on the dust storms. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27**(4): 591~606
- [8] 李江风. 新疆气候. 北京: 气象出版社, 1991. 1~8
Li Jiangfeng. *Xinjiang Climate* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 1~8
- [9] 李江风. 沙漠气候. 北京: 气象出版社, 2001. 44~79
Li Jiangfeng. *Desert Climate* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 44~79
- [10] 沙拉买提. 塔里木盆地沙尘暴的历时分布特征. 干旱区研究, 1996, **13**(3): 23~27
Shalamaiti. The characteristic of distribution of sandstorm in a period of time in the Tarim Basin. *Arid Zone Research* (in Chinese), 1996, **13**(3): 23~27
- [11] 何清, 赵景峰. 塔里木盆地浮尘时空分布及对环境的影响研究. 中国沙漠, 1997, **17**(2): 119~126
He Qing, Zhao Jingfeng. The study on distribution of floating dusts in Tarim Basin and its effects on environment. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 1997, **17**(2): 119~126
- [12] 陈勇航, 向鸣, 吕新生, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地盛夏十场沙尘暴综合分析 with 预报探讨. 新疆气象, 1999, **22**(1): 9~12
Chen Yonghang, Xiang Ming, Lu Xinsheng, et al. The anal-

- ysis and forecast of ten dust storm processes in midsummer in Taklimakan Desert. *Xinjiang Meteorology* (in Chinese), 1999, **22**(1): 9~12
- [13] 陈洪武, 王旭, 马禹. 塔里木盆地局地 and 区域性强沙尘暴天气过程研究. *中国沙漠*, 2003, **23**(5): 533~538
- Chen Hongwu, Wang Xu, Ma Yu. A study on the local and regional strong sandstorm process in Tarim Basin. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2003, **23**(5): 533~538
- [14] 杨景春, 李有利. 地貌学原理. 北京: 北京大学出版社, 2001. 110~125
- Yang Jinchun, Li Youli. *Physiognomy theory* (in Chinese). Beijing: Beijing University Press, 2001. 110~125
- [15] 陈渭南, 董治宝, 杨佐涛, 等. 塔克拉玛干沙漠的起沙风速. *地理学报*, 1995, **50**(4): 360~368
- Chen weinan, Dong Zhibao, Yang Zuotao, et al. Threshold velocities of sand-driving wind in the Taklimakan Desert. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1995, **50**(4): 360~368
- [16] 李江风. 塔里木盆地地面风系与沙漠区域环境. *新疆环境保护*, 1994, **16**(4): 152~157
- Li Jiangfeng. The surface wind system and local desert environment in Tarim Basin. *Environmental Protection of Xinjiang* (in Chinese), 1994, **16**(4): 152~157
- [17] 王训明, 董治宝, 陈广庭. 塔克拉玛干沙漠中部部分地区风沙环境特征. *中国沙漠*, 2001, **21**(1): 56~61
- Wang Xunming, Dong Zhibao, Chen Guangting. Characteristics of blown sand environment in middle Taklimakan Desert. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2001, **21**(1): 56~61
- [18] 李振山, 陈广庭. 塔克拉玛干沙漠起沙风况. *中国沙漠*, 1999, **19**(1): 43~45
- Li Zhenshan, Chen Guangting. Effective wind regime in the Taklimakan Desert. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 1999, **19**(1): 43~45
- [19] 何清, 蔡承侠, 黎跃东, 等. 塔克拉玛干沙漠肖塘地区 1995 年气候及其影响评价. *干旱区研究*, 1996, **13**(3): 13~19
- He Qing, Cai Chengxia, Li Yuedong, et al. Assessment on synoptic climate and impact estimation at Xiaotang region in the Taklimakan Desert in 1995. *Arid Zone Research* (in Chinese), 1996, **13**(3): 13~19
- [20] 方小敏, 韩永翔, 马金辉, 等. 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积——以 2003—3—4 拉萨沙尘天气过程为例. *科学通报*, 2004, **49**(11): 1084~1090
- Fang Xiaomin, Han Yongxiang, Ma Jinghui, et al. Dust storms and loess accumulation on the Tibetan Plateau: A case study of dust event on 4 March 2003 in Lhasa. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(9): 953~960
- [21] 冀兰芝, 孙兰东, 杨民, 等. 1998 年 3 月 17~18 日南疆东大风沙尘暴诊断分析. *甘肃气象*, 1999, **17**(2): 10~12
- Ji Lanzhi, Song Landong, Yang Ming, et al. The diagnose of the gale and dust storm on 17 to 18 in March 1998. *Gansu Meteorology* (in Chinese), 1999, **17**(2): 10~12
- [22] 周自江. 近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气. *第四纪研究*, 2001, **21**(1): 9~17
- Zhou Zijiang. Blowing-sand and sandstorm in China in recent 45 years. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2001, **21**(1): 9~17
- [23] 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘(暴)天气起沙机制的数值模拟研究. *气候与环境研究*, 2002, **7**(3): 279~294
- Zhao Linna, Sun Jianhua, Zhao Sixiong. Numerical simulation of dust emission in North China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7**(3): 279~294