

塔克拉玛干沙漠沙尘暴过境时近地层廓线特征

何清, 李祥余, 艾力·买买提明, 李帅, 李红军

(中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要

利用塔中最新安装的 80 m 梯度观测塔探测系统采集的资料, 详细分析了 2006 年 4 月 10 日沙尘暴过境时, 塔克拉玛干沙漠腹地近地层风速、温度和湿度廓线演变特征。分析结果表明: 风速廓线满足风速值随高度增高而增大, 风速梯度随高度增高而减小的对数律关系; 沙尘暴由爆发前到过境时, 温度廓线的温度值由随高度增高而增大转变为温度值随高度增高而减小, 同时在贴地层 2 m 处存在一微弱拐点; 沙尘暴过境时, 近地层大气出现微弱逆湿现象, 并在不同高度上存在多处拐点, 比湿增减在时间上与风速的增减呈负相关性, 且整个沙尘暴天气是一个降温增湿的过程。

关键词: 塔克拉玛干沙漠; 沙尘暴; 近地层; 廓线; 逆温; 逆湿

沙尘暴是指由于强风将地面大量尘沙吹起, 使空气相当浑浊, 水平能见度小于 1.0 km 的天气现象, 它是干旱和半干旱地区常出现的一种灾害性天气。我国众多学者对沙尘暴的发生源地、形成发展的机制与原因、时空分布、发展变化趋势、遥感监测、环境影响与气候效应、危害、防治措施以及对沙尘暴个例进行了地面气象要素场演变、天气学分析、卫星云图分析和数值模拟等研究。但是, 由于常规气象站观测手段的限制, 缺乏地面气象要素梯度探测资料, 因而对沙尘暴爆发、过境时地面气象要素的廓线研究很少, 只有极少数文献略有提及, 但没有做详细的分析。

塔克拉玛干沙漠是我国沙尘暴的主要起源地之一, 它位于我国新疆南部塔里木盆地的中心, 地处东经 $77^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 、北纬 $37^{\circ} \sim 41^{\circ}$ 之间, 东西长约 1070 km, 南北宽 410 km, 面积 $33.76 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中流动沙丘面积占 82.2%, 是我国最大的沙漠, 也是世界上面积仅次于阿拉伯半岛鲁卜哈利沙漠 ($56 \times 10^4 \text{ km}^2$) 的第二大流动沙漠。那里年平均出现沙尘暴 30 d 以上、扬沙天气多达 70 d, 浮尘天气高达 200 d, 发生期可跨越整个春夏季节; 因而对我国西北干旱区的气候变化和生态环境有着重要影响。

本文就是利用目前世界上唯一深入流动沙漠腹地 200 km 以上的塔克拉玛干沙漠腹地大气环境观测实验站——塔中气象站(位于 $39^{\circ} 00' \text{ N}$, $83^{\circ} 40' \text{ E}$, 海拔高度 1 099.3 m) 80 m 观测塔梯度探测系统最新探测的资料, 分析了 2006 年 4 月 10 日塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴过境时近地层风速、温度和湿度廓线分布特征, 这有益于对沙尘暴爆发机制的进一步了解。

1 资料和方法

1.1 资料来源和 80 m 梯度探测系统简介

塔中 80 m 观测塔梯度探测系统装有 0.5, 1, 2, 4, 10, 20, 32, 47, 63 和 80 m 十层风速、风向、温度和湿度传感器。但风速风向探头感应部分的实际高度高出安装平台 46 cm; 因此, 在 1 m 高度上的风速风向探头的实际高度为 1.46 m, 其它层次依次类推。温湿度探头感应部分的实际高度高出安装平台 24 cm (即安装在 1 m 高度上的温湿度探头的实际安装

基金项目: 中国沙漠气象科学研究基金项目“塔克拉玛干沙漠近地层大气垂直结构特征分析”(sqj2005001); 江苏省气象灾害重点实验室基金项目(KLME050103)和干旱气象科学研究基金项目(IAM200601)联合资助。

作者简介: 何清(1965-), 研究员, 主要从事气象沙漠气象研究. E-mail: qinghe@idm.cn

高度为 1.24 m, 其它层次也依次类推)。在 0.5 m 高度上的风速探头感应部分(没有安装风向传感器)实际高度为 0.75 m, 温湿度探头感应部分为 0.53 m。另外在 9.5 m 高度上安装有一套三维超声风速仪和 CO₂/H₂O 分析仪。

80 m 观测塔梯度探测系统的探测仪器均采用国际公认的先进探测传感器。风速风向及温、湿度传感器都产自芬兰 VAISALA 公司, 型号分别为 WAA151、WAV151、QMH102(HMP45D)、QMH102(HMP45D)。安装之前所有仪器都经过校准, 达到厂家提供的如下精度: 风速在 0.4~60 m/s 时精度为 ± 0.17 m/s (标准偏差)、风向在 0~360° 范围内时, 精度优于 $\pm 3^\circ$ 、温度在量程为 -40~+60 °C 内精度为 ± 0.2 °C (20 °C)、湿度传感器在 20 °C 时为 $\pm 2\%$ (0~90%RH 范围内) 和 $\pm 3\%$ (90~100%RH 范围内)。大气中温度和湿度传感器都采用了防辐射和通风措施。

三维超声风速仪产自英国 GILL 公司, 型号为 R3-50, 探测 u、v、w 三维风速和声速。风速量程为 0~45 m/s, 最高分辨率为 0.01 m/s, 测量精度为小于 $\pm 1\%$ 实际风速; 风向测量范围 0~360°, 最高分辨率为 1°, 测量精度为小于 $\pm 1^\circ$; CO₂/H₂O 分析仪产于英国 ADC 公司, 开路系统, 同步 CO₂/H₂O 快速绝对测量。采样频率为 3 000 RPM (50 Hz)。

风、温、湿梯度探测数据有瞬时数据、分钟平均数据和小时(整点)平均数据。瞬时数据采样频率为风速、风向每 3 秒一组; 温度和湿度为每 10 秒一组; 三维超声风速和 CO₂/H₂O 的瞬时数据采样频率为 20 Hz。为了更准确的反映天气变化的平均状态, 文中采用小时平均数据。但由于探测系统发生故障, 08:08~09:47 (北京时间, 下同) 这一个半小时内的数据缺失。

1.2 天气实况

2006 年 4 月 10 日, 笔者当时正在塔中调研实习, 有幸亲身经历了这场沙尘暴。当天, 整个天空上下一片昏黄, 狂沙肆虐, 漫天飞舞, 风沙吹过板房及附近柽柳丛时发出咝咝声响; 人行走在路上, 风沙扑面而来, 如海浪一般, 浑身上下被沙粒裹得严严实实, 脸上胳膊上被沙粒吹打得隐隐作疼, 双眼无法睁开; 从地窝(住所)走到距离不到 30 m 路程的数据采集机房, 头发里、嘴里、鼻孔和耳窝都积有沙粒。

根据塔中气象站地面气象观测记录, 该日天气过程如下。扬沙发生时段: 0:40~1:08、3:45~5:20、21:16~22:24; 沙尘暴发生时段: 01:08~03:45、05:20~21:16、22:24~23:10, 最小能见度达 40 m; 大风发生时段: 6:42~6:44、8:42~8:59~9:06、9:39、10:23~10:32、11:31、12:06~12:15、12:48~13:14、13:38~13:54、14:12、15:00~15:10、16:49~17:02、18:12。地面基本气象要素值分别如下: 2 分钟平均风速 8.1 m/s, 10 分钟平均风速 8.0 m/s, 最大风速 12.3 m/s, 瞬时极大风速 21.1 m/s (风向 ESE); 日平均气温 13.4 °C, 最高 26.7 °C, 最低 6.7 °C; 日平均相对湿度 18%, 最低 5%。这次沙尘暴是自 1996 年 6 月塔中气象站建站以来持续时间最长、强度最大的一次。

2 沙尘暴过境时近地层风速廓线特征

图 1(a) 给出了塔克拉玛干沙漠腹地(以下简称塔中)春季沙尘暴过境时近地层平均风速廓线曲线。图 1(a') 是近地层 10 m 内风速廓线放大图。如图所示, 总体上风速廓线分布规律是风速值随高度的增高而增大, 风速梯度随着高度的增高而减小, 满足对数律关系。同时风速廓线分布规律根据沙尘暴的发生、发展和消亡可分为三个阶段: 爆发前(00:00~01:00)、过境时(02:00~21:00)、间歇过渡时(22:00~24:00)。沙尘暴过境时的风速值变化幅度比爆发前及间歇过渡的时段都要大。

沙尘暴爆发前的 00 时风速较小, 约在 3 m/s (测量高度为 10.46 m, 下同) 左右, 01 时风速已经增加到了 6 m/s; 但还没有达到塔克拉玛干沙漠的起沙风速 8 m/s。这两个小时的平均风速廓线基本上是满足风速值随高度的增高而增大, 风速梯度随着高度的增高而减小的对数律关系。

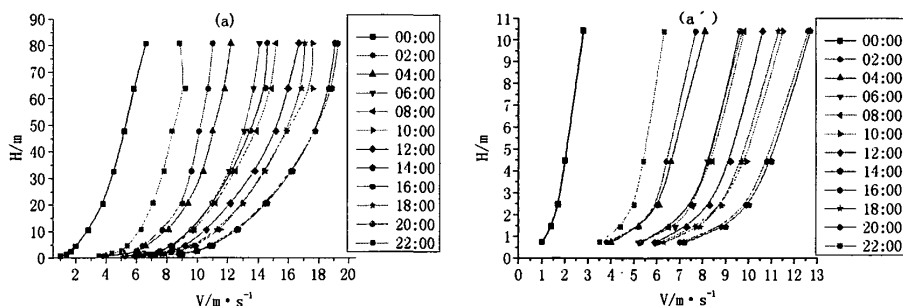


图1 2006年4月10日沙尘暴过境时塔中近地层风速廓线

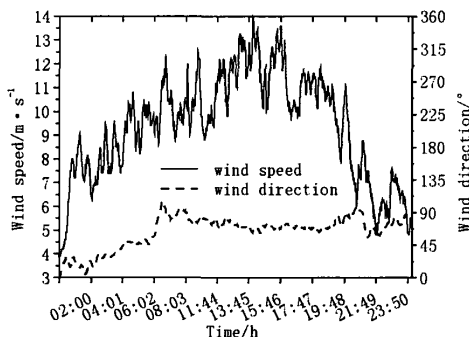


图2 2006年4月10日沙尘暴过境时塔中近地层水平风场(10.46 m)时间演变实况

沙尘暴过境时, 风速显著增大, 从图2的水平风场演变实况可以看出, 风速是呈折角式上升的。在01时以前风速在8 m/s以下, 风向主要是东北偏北; 在1:20左右沙尘暴已经来临时, 风速跃然增至9 m/s, 风向也转变为北风; 04~07时, 风速依次出现两个峰值10.8 m/s、12.2 m/s, 此时风向也迅速由东北偏北转变为东北偏东至东风; 08时风速有所下降, 09~10时风速继续上升, 10时风速又增至11.4 m/s, 风向一直维持在东北偏东; 之后11时风速又下降, 12~14时, 风速呈直线上升, 在14时风速达到一天中的最大风速13.8 m/s, 15时风速下降至10.0 m/s左右, 在15:45风速又回升到14时的水平; 16:30风速又急剧下降到10.0 m/s; 17:20~18:30风速维持在11.0 m/s左右; 然后一直下降到19:30的8.0 m/s; 19:50略有回升, 然后风速虽然有所波动, 但是一直在下降并持续到沙尘暴结束, 风向也在东北偏东和东风之间摆动。可见, 风向在每次调整之后风速都有所增减。但尽管这段时间内风速值时升时降, 但每个时段的风速廓线分布都满足风速值随高度的增高而增大, 风速梯度随着高度的增高而减小的对数律。

沙尘暴在顶峰时期过去后, 进入一段过渡时期(22:00~24:00), 尽管在中间有近50分钟的沙尘暴时期, 但此时平均风速已经下降到了6 m/s左右, 沙尘暴基本上结束。整体上这一时期的廓线分布规律仍然满足对数律; 但22时的风速廓线在63 m处存在一拐点。

3 沙尘暴过境时近地层温度廓线特征

图3(a)给出了塔中春季沙尘暴过境时近地层平均温度廓线曲线。图3(a')是近地层10 m内温度廓线放大图。

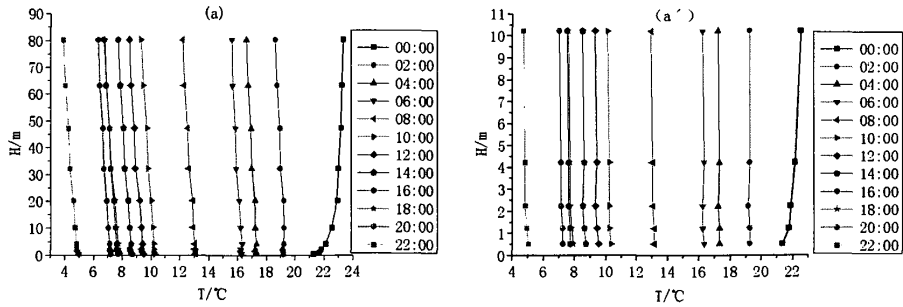


图3 2006年4月10日沙尘暴过境时塔中近地层温度廓线

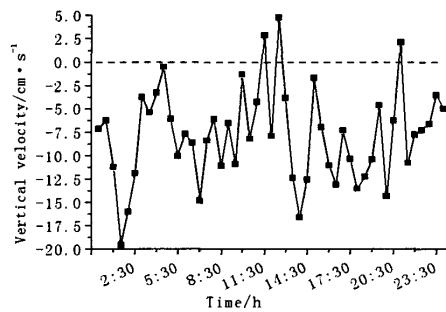


图4 2006年4月10日沙尘暴过境时塔中近地层超声风速仪（离地面9.5 m）记录的地面垂直风速日变化

如图所示，在沙尘暴爆发之前，温度廓线分布规律是温度值随高度的增高而增大，大气呈逆温状态；沙尘暴过境时，廓线转变为温度随着高度的增高而减小。大气层结在沙尘暴爆发前后发生了由稳定到不稳定的转变。

沙尘暴爆发前的00时，整个近地层的大气层结还处于弱稳定的逆温状态，近地面20 m高度以内温度递减率约为 $-0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ，20 m以上温度梯度较小。01时，沙尘暴即将来临，这时近地层上层大气开始冷却，只有近地面32 m以内的大气还处于弱逆温状态；此时在32 m处存在一微弱拐点，32 m以上廓线温度由32 m下的随着高度的增高而缓慢增大转变为随着高度的增高而缓慢减小。整个大气温度较前一小时下降了 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

在沙尘暴过境时段内，大气温度持续快速下降，是一个降温^[27~28]的过程。在沙尘暴刚刚过境时，一小时内平均气温就下降了将近 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在02~07时，气温稳定下降，维持在每小时约降低 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而各个时段的廓线都是温度随着高度的增高而缓慢减小，并且它们之间几乎保持相互平行的状态。但是在贴地层2 m处存在一微弱拐点（如图3（a'）所示）。在清晨日出后的08~10时，气温不但没有随太阳辐射的增强而升温，反而是连续两个小时跳跃性的下降了 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右；但是廓线的形状变化不大，与前面几个时段的廓线几乎保持相互平行的状态。此时从沙尘暴刚爆发到日出后10时，气温约下降了 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之多。10时以后，随着太阳辐射的进一步加强，温度进入一个稳定下降时期。一直到日落后21时的近11个小时里，气温才下降了 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。这段时期内温度廓线的形状和变化趋势与前面时段一样，仍然是温度随着高度的增高而缓慢减小；但在11~14时及21时的贴地层2 m处存在微弱拐点。在沙尘暴过境的整个连续时期内（07~21时），近地层80 m的温度梯度在 $-1.4\sim-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 之间。处于中性状态^[37]，而事实上大气是处于不稳定状态的，这从三维超声风速仪

测定的地面垂直风速（见图 4）的脉动可以证实。所以单纯用温差法来判断大气稳定度对于不稳定层结时是不适用的^[36]。同时，从图 3 可以得知，沙尘暴过境时，除了在 11:30、12:30 和 21:00 气流有微弱的上升运动外，其余大部分时间气流的运动都是下沉的；这似乎与沙尘暴爆发时是大量地面沙尘被上升气流带入空中相矛盾^[28]；因此，这其中的原因需要进一步深入研究。

在沙尘暴的过渡停息时期（22:00~24:00）内，廓线依然保持过境时的状态，但是温度较过境时又下降了 1.5℃ 左右，这与傍晚太阳落后地面辐射平衡由正转为负相关。同样，22 时和 23 时这两个时段，廓线在贴地层 2 m 处微弱拐点仍然存在。此时温度到达一日中的最低气温，并得知，沙尘暴过境前后的温差高达 20℃。

4 沙尘暴过境时湿度廓线特征

图 5 (a) 给出了塔中春季沙尘暴过境时近地层平均比湿廓线曲线。图 5 (a') 是近地层 10 m 的比湿廓线放大图。比湿由相对湿度和温度求得。

如图所示，比湿廓线分布规律与沙尘暴过境时风速增减波动时间上有很好的 consistency。整体上，风速在增大时，比湿在减小；风速变小时，比湿在增大。各时段廓线的分布形状略有差异，但整个沙尘暴过程是一个增湿^[27-28, 39]过程（相对湿度变化趋势尤为显著）。

在沙尘暴来临前的 00 和 01 时，在近地面 2 m 处存在一拐点（极小值），极小值出现高度以上比湿随高度增加而增加，廓线呈逆湿^[40-43]特征，极小值出现高度以下比湿随高度减小而增加。从图中可以看出在贴地层 2 m 内的比湿差达 0.17 g/kg。

沙尘暴刚来临的 02 时，随着较冷气团的到来，比湿由 1.2 g/kg 急速增大到 2.2 g/kg；比沙尘暴来临前一小时增加了 1.0 g/kg。在夜间沙尘暴停息的 04~06 时，比湿一直在减小；并且在 4 m 和 32 m 高度处存在拐点。07~08 比湿又突然增大，与清晨日出前风速有所下降、大气温度突然降低一致，08 时 32 m 处有一微弱拐点，该时段内整体上比湿随高度增加变化不大。

清晨日出后 09 时至午后 16 时这段时间内比湿一直在减小，与日出后太阳高度上升辐射增强及该段时间内风速一直在持续增大相对应。这段时间内多处出现拐点，如 12 时 2 m 的拐点，13 时 32 m 的拐点，14、15、16、17 时 47 m 的拐点。可知，拐点出现高度逐渐在上升，同时也得知这段时间内地面沙层不断向大气输送水汽。

午后 18 时至沙尘暴第二停息阶段 22 时，随地面辐射平衡慢慢由正转为负及风速逐渐变小，比湿也在变大，并在 22 时骤然增大到一天中的最大湿度（约 2.95 g/kg，相对湿度为 50%），比前一小时约增加了 1.1 g/kg；与晴天（最大湿度出现在清晨 08 时）的规律截然相反^[44]。22 时后，沙尘暴颠峰时期已过，比湿又逐渐减小，到 23 时降到了 2.46 g/kg。21~23 时这段时间内在 32 m 处也存在微弱拐点，22 时在 10 m 处也有一微弱拐点。

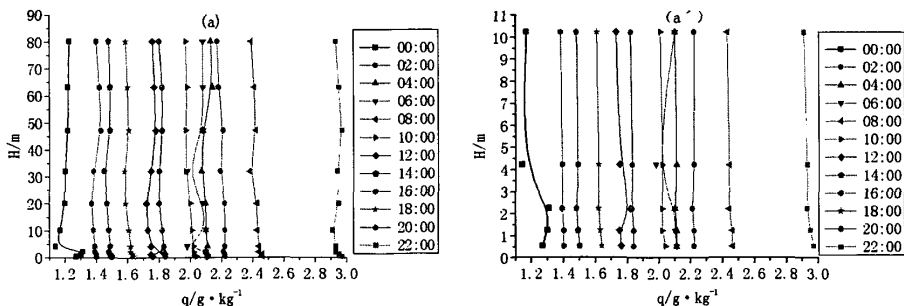


图 5 2006 年 4 月 10 日沙尘暴过境时塔中近地层比湿廓线

5 结论

从上述对塔中春季沙尘暴过境时近地层风速、温度和湿度廓线特征的分析,可得到如下一些初步结论:

5.1 根据沙尘暴爆发前后、过境和离境的时间顺序,地面水平风速呈折角式升降;风向调整时,风速也随着增减;气流在垂直方向上大部分时间是向下运动的;尽管风速廓线的形状有一些微小变化,但其分布规律都满足风速值随着高度的增高而增大,风速梯度随着高度的增高而减小的对数律关系。

5.2 沙尘暴爆发前,大气呈逆温状态;过境时,廓线温度值随高度增高而增大转变为温度值随高度增高而减小,并在贴地层 2 m 处存在一微弱拐点。沙尘暴爆发前后大气层结发生了由稳定到弱不稳定转变;用温度梯度法判断大气稳定度对于不稳定天气是不妥当的。

5.3 沙尘暴过境时,近地层大气比湿在不同高度上存在多处拐点(极小值),并出现微弱逆湿现象。比湿廓线的分布规律与沙尘暴爆发、过境、离境时风速的增减在时间上有很好的同步性,并且整体上是一个增湿的过程。

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. 21—27.
- [2] 石广玉,赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题[J]. 大气科学, 2003, 27(4):591-606.
- [3] 张仁健,韩志伟,王明星,等. 中国沙尘暴天气的新特征及成因分析[J]. 第四纪研究, 2002, 22(4):374-380.
- [4] 史培军,严平,高尚玉,等. 我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(3): 71—77.
- [5] 康杜娟,王会军. 中国北方沙尘暴气候形势的年代际变化[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2005, 35(11): 1096-1102.
- [6] 周自江,章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954~2002 年)[J]. 科学通报, 2003, 48(11): 1124—1128.
- [7] 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.
- [8] 王旭,马禹,陈洪武,等. 南疆沙尘暴气候特征分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(2):147-151.
- [9] 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.
- [10] 郑新江,徐喆,罗敬宁,等. 2002 年 3 月 18~21 日强沙尘暴天气过程的监测[J]. 气象, 2005, 31(4): 39—44.
- [11] 刘树华,刘新民,李金贵. 我国西北地区一次特大沙尘暴的初步分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1994, 30(5):583-588.
- [12] 何清,向鸣,唐淑娟. 塔克拉玛干沙漠腹地两次强沙尘暴天气分析[J]. 中国沙漠, 1998, 18(4):320-327.
- [13] 胡泽勇,黄荣辉,卫国安,等. 2000 年 6 月 4 日沙尘暴过境时敦煌地面气象素及地表能量平衡特征的变化[J]. 大气科学, 2002, 26(1):1-8.
- [14] 康凤琴,李耀辉,吕世华. 2001 年 4 月 8 日强沙尘暴天气的数值模拟研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(6):681-685.
- [15] 肖贤俊,刘还珠,宋振鑫,等. 2002 年 3 月 19 日沙尘暴爆发条件分析[J]. 应用气象报, 2004, 15(1):1-9.
- [16] 胡隐樵,光田宁. 强沙尘暴发展与干绳线——黑风暴形成的一个机理分析[J]. 高原气象, 1996, 15(2): 178—185.
- [17] 胡隐樵,光田宁. 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.
- [18] He Qing, Zhao Jinfeng, Nagashima Hideki. The Distribution of Sandstorms in Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Land Studies, Japan, 1996, vol. 5:185-193.
- [19] 袁素珍,雷孝恩. 320 米塔上测定的大气稳定度类和风速廓线[J]. 中国环境科学, 1982, 2(3): 29-34.
- [20] 胡隐樵,王俊勒,左洪超. 邻近绿洲的沙漠上空近地层内水汽输送特征[J]. 高原气象, 1993, 13(2): 125—132.