0577-6619/2008/66(4)-0599-08 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

西北干旱区夏季大气边界层结构及其陆面过程特征*

张 强 王 胜
ZHANG Qiang WANG Sheng

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，中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室，兰州，730020
Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, *China*
2007-07-12 收稿，2008-03-03 改回.

Zhang Qiang, Wang Sheng. 2008. A study on atmospheric boundary layer structure on a clear day in the arid region in northwest China. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(4):599－608

Abstract The climate environment and atmospheric circulation background affecting the formation and development of atmospheric boundary layer are relatively particular in Northwest China. Vertical structural characters of main physical factors in the arid desert of Northwest China in summer are analyzed based on the field intensive observation data in Dunhuang during May－June 2000. Whether the convection boundary layer(CBL) in the daytime or the stable boundary layer (SBL) in the nighttime in this area are thicker than those in other areas. In the nighttime of a summer clear sky day, the depth of SBL generally exceeds 900 m and its maximum may reach 1750 m. The top of the residual layer (RL) atop the SBL can touch a height of about 4000 m. In the daytime, the CBL develops rapidly after entering into the RL, and its depth exceeds 4000 m. The results show that a deep CBL in the daytime is a precondition for maintaining a deep RL in the nighttime. Meanwhile, a deep RL in the nighttime provides a favorable thermal condition for the development of the CBL in the daytime. The frequent continuous clear days in this area make it possible for the accumulated effect of RL to build up persistently, which creates a favorable thermal condition for the development of atmospheric CBL. At the same time, the characteristics of land surface processes and atmospheric motion in the surface layer in this area also provide positive support for the particularly deep structure of atmospheric thermal boundary layer. In regard to formation mechanism for the deep CBL, the dramatic increase in surface temperature in the daytime is a powerful external thermal forcing, the strong sensible heat flux in surface layer is a sufficient energy source, larger convection and turbulent motion velocities are a necessary kinetic condition, and the accumulation effect of RL provides a favorable thermal environment.
Key words Arid region in Northwest China, Clear sky day in summer, Atmospheric boundary layer depth, Vertical structure, Land surface process

摘 要 在中国西北干旱区影响大气边界层形成和发展的气候环境和大气环流背景都具有一定特殊性。文中用外场观测试验资料，分析了位于西北干旱区的敦煌荒漠夏季大气边界层气象要素结构特征，发现该地区无论白天的对流边界层还是夜间的稳定边界层均比一般地区更深厚。在夏季晴天，夜间稳定边界层厚度超过 900 m，最厚可以达到 1750 m，其上的残余层一般能达到 4000 m 左右的高度；白天混合层最高达 3700 m，混合层顶的逆温层顶盖的厚度大约 450 m，甚至更厚，对流边界层厚度能够超过 4000 m，对流边界层进入残余层后发展十分迅速。研究表明，白天深厚的对流边界层是夜间保持清晰而深厚的残余混合层的先决条件，夜间深厚的残余混合层又为白天对流边界层的发展提供了一个非常有利的热力环境条件。该地区经常性出现连续性晴天使得大气残余层的累积效应得以较长时间持续发展，创造了比较有利于大气对流边界层发展的大气热

* 资助课题：国家自然科学基金项目(40575006)和国家重点基础研究发展规划项目(G1998040906)。
作者简介：张强，主要从事大气边界层、陆面过程、绿洲气象学、干旱区气候和城市大气环境等领域的研究。E-mail: zhangqiang@cma.gov.cn

力环境条件。同时,该地区陆面过程和近地层大气运动特征也为这种独特的大气热力边界层结构提供了较好的支持。就该地区发展超厚大气对流边界层的物理机理而言,地表显著增温是强有力的外部热力强迫条件,近地层强感热通量提供了较充足的能量条件,较大的对流运动和湍流运动的速度是必要的运动学条件,大气残余层的累积效应提供了有利的热力环境条件。

关键词 西北干旱区,夏季晴天,大气边界层厚度,垂直结构,陆面过程

中图法分类号 P404

1 引 言

对于地球系统而言,大气热力边界层一般分为白天对流边界层和夜间稳定边界层,这两种状态的大气边界层物理性质有十分明显的差异。目前,普遍认为对流边界层厚度应该低于2000—3000 m,稳定边界层的最大厚度一般不超过400—500 m(Garratt,1992)。在实际大气中,边界层厚度和结构总是随时间和空间不断变化,其厚度变化幅度可以达到几百米甚至数千米(蒋维楣等,1994)。大气边界层结构既有明显的日变化和年变化,又有随经纬度和地表特征分布不均匀引起的空间变化。在中低纬度地区,由于太阳辐射对地表加热比较强,大气热力边界层特征更加明显,热力边界层结构随时间变化更加显著。特别在低纬度干旱荒漠地区,盛夏白天加热较强时对流大气边界层往往会表现得特别旺盛,其厚度有时可能达到5000 m,甚至还要更高(Garratt,1992)。另外,Raman等(1990)的研究也表明,特殊大气环流背景对大气边界层的影响也十分明显,处在印度西南季风爆发前的新德里地区对流大气边界层厚度达到了4700 m,而季风发生地班加罗尔地区的大气对流边界层厚度却要薄得多,仅仅900 m左右。这说明在一些特殊的气候环境和大气环流背景下大气边界层结构可能会与一般地区很不相同。

中国西北干旱区地表白天受太阳辐射加热很强,从理论上讲应该比较容易发展较深厚的对流大气边界层。并且,它既在西风带控制区,又是夏季风影响的边缘区域,影响大气边界层形成和发展的气候环境和大气环流背景都具有一定特殊性。一些研究(张强,2004,Zhang Qiang,2006)已经对西北极端干旱地区敦煌的一次大气边界层观测试验资料做了初步分析,发现西北干旱区敦煌荒漠在夏季晴天地表加热较强时能够出现厚度超过4000 m的对流边界层。这一结论虽然与国际上对典型大气边界层结构的普遍认识存在明显差异,却与国际上在特殊气候环境和大气环流背景下的一些大气边界层观测结果(蒋维楣等,1994;Raman, et al,1990)有很好的一致性。不过,目前的研究仅对敦煌荒漠大气热力边界层的厚度有了一些比较宏观的认识,并没有深入去分析大气热力边界层各种物理要素的空间结构和演变特征,也缺乏对这种深厚大气热力边界层形成和发展过程的认识和理解。本研究试图利用在敦煌荒漠地区开展的大气边界层观测试验资料,专门对夏季典型晴天大气热力边界层的物理结构进行系统而细致地分析,以便深入了解干旱荒漠地区大气热力边界层的结构特征及其形成和发展的特殊机制。

2 资料和气候背景

本文资料来源于2000年5—6月在中国西北地区甘肃敦煌进行的陆气相互作用外场加强观测试验(Zhang Qiang,et al,2004a,2004b)。该观测试验,除了设有微气象塔的风、温、湿梯度观测和超声仪器的近地层动量、感热、潜热观测外,还设有由59-701型二次测风雷达和59型机械式探空仪组成的大气边界层气象要素观测。大气边界层观测包括风速、风向、温度、相对湿度和气压等多个气象要素,要求探空高度为6000 m,在1000 m以下每50 m记录一次探空观测数据,在1000 m以上每150 m记录一次。59-701型二次测风雷达和59型探空仪是中国国产的标准气象探空设备,经过了严格的标定和鉴定。

对探空仪器的地面检定结果表明:对各种误差经过补偿订正后,59型探空仪携带的观测仪器的气压观测误差为0.1 hPa,温度观测误差为0.5 ℃,相对湿度观测误差为3%;地面59-701型二次测风雷达对风速的观测误差为1 m/s,对风向的观测误差为0.6°。探空气球的平均升速大约在410 m/min,一次边界层探空观测大约需要1 h左右的时间。观测时段为2000年5月29日—6月9日,其中观测资料比较完整的共有9个观测日。每日观测8次,

分别在地方时 01、05、08、10、12、14、17、21 时。所以,本文实际共分析了 72 个大气边界层探测样本资料。根据资料分析的需要,将观测的气压、温度和相对湿度分别转化成高度、位温和比湿。本文所用时间全为敦煌地方时(比北京时晚 1 小时 42 分)。

探空观测场地在敦煌气象站内(40°9′N,94°41′E,海拔高度 1140 m),地表年平均大气压为 873 hPa,观测场为裸地,周围几十米以外为农田。就敦煌地区的环境背景而言以典型荒漠下垫面为主,所以探空观测获得的资料从科学上讲基本代表了干旱荒漠大气的垂直廓线分布特征。

敦煌是典型的干旱地区,日照充足,干旱少雨,年降水在 30 mm 左右,年平均蒸发潜力高达 3400 mm。该地区植被覆盖度十分低,大部分地方植被覆盖不足 10%,是沙尘暴的多发区之一。其盛行风向为东风,占到总频数的 49%。地面年平均风速大约 3 m/s,最大风速达 20.9 m/s。年平均气温为10.2 ℃;全年日最高地表温度高达 65.1 ℃,最低达−21.8 ℃,气候的极端性尤为明显;全年日最高地表温度变幅达 55 ℃,最低地表温度变幅接近 30 ℃,温度起伏十分剧烈;全年地表温度日较差平均为45 ℃,最大达 61.2 ℃,日较差特别突出。

在观测期间,遇到了 2 次较明显的天气过程,一次为 6 月 4—5 日,强沙尘暴伴弱降水;一次为 6 月 12 日,出现 1.8 mm 降水。其他时间基本为无云晴空天气。比较能够代表典型晴天的日期是既距离降水过程较远又是晴天的 5 月 29 日。所以本研究主要以这一天为个例来开展深入地分析和探讨。

3　大气热力边界层物理结构

3.1　位温垂直分布特征和边界层厚度

热力特性是判断和区分大气边界层性质的主要指标之一,位温是大气最具表现力的热力属性之一。所以,分析大气位温垂直分布状态对认识大气热力边界层的物理结构极其重要。图 1 是敦煌荒漠夏季晴天大气边界层位温廓线特征。很清楚,白天,地表加热最强时即 14 时,位温廓线在大约 400 m 以下从地表随高度向上递减,这就是所谓的超绝热递减层;再往上至 3700 m 高度范围内位温基本保持不变,这就是所谓的混合层(ML);在混合层上面是大约 450 m 厚的逆温层,它就是大气对流边界层的逆温层顶盖(CIL)即夹卷层,是大气对流边界层上限的标志性特征;逆温层顶盖以上就是自由大气(RL)。超绝热递减层和混合层整体上构成了白天热力边界层的范围,该范围大气处于热力对流不稳定状态,所以称为对流边界层(CBL)。许多时候,也会把逆温层顶盖作为大气对流边界层的组成部分。白天其他时间大气位温垂直分布基本保持了与之类似的形态,而且表现为产生、发展和消亡这样一个连续演化的过程。不过,在地面加热初期,对流层发展还比较弱,并没有明显的混合层存在,在超绝热递减层之上直接就是逆温层顶。

夜间,大气位温随高度从地表向上增加即就是所谓的逆温层,逆温层从傍晚开始由地面向上发展,在凌晨达到最厚(1750 m),这种逆温层的厚度实际上就是夜间大气边界层(SBL)的范围。在逆温层上面大致与白天混合层相当的范围大气位温结构基本保持了白天的形态,这就是所谓的残余混合层(RML);在残余混合层上面是白天残留下来的逆温层顶盖(RCIL);再往上才是真正的自由大气。可见,敦煌荒漠地区不仅白天大气对流边界层极端深厚,而且夜间大气稳定边界层也扩展得很高。特别值得注意的是,由于白天大气边界层对流发展旺盛,夜间大气残余层的特征也就十分明显,清晰地保留着白天混合层和逆温层顶盖的位温形态(张强等,2004)。这与文献中(Stull,1988)概括出的典型夏季晴天大气热力边界层理想位温廓线演化的示意图非常相似。

当然,我们也发现图 1 中给出的实际大气位温廓线不如理想的位温廓线光滑,这主要是由于在实际边界层探测过程中探空仪器在空中的空间漂移范围较大,探测会受到大气中局部小云团的影响。所以,几乎所有野外实际观测的大气边界层位温廓线都表现为在垂直空间上有一定扰动的非光滑曲线形态(Crum,et al,1987; Angevine, et al,1994)。

为了说明出现这种深厚大气边界层特征的普遍性,还分析了整个观测时期对流边界层和稳定边界层厚度的演变特征,并在图 2 中给出了它们日最大值的变化曲线。很清楚,在总共 9 个有效观测日中,除 6 月 4 日比较强的一次天气过程影响了热力边界层的发展外,其他日期的对流边界层的最大厚度都超过了 2000 m;日最大厚度超过 3000 m 的有 5 d,出现频率达到了 56%;甚至有 2 d 的日最大厚度超过了 4000 m。日最大稳定边界层厚度比较稳定地维持

在1000—1501 m。对流边界层厚度日际变化剧烈，明显与天气过程或云的影响有关，比较厚的对流边界层出现在晴天，比较薄的对流边界层厚度则出现在阴天或降水天气。

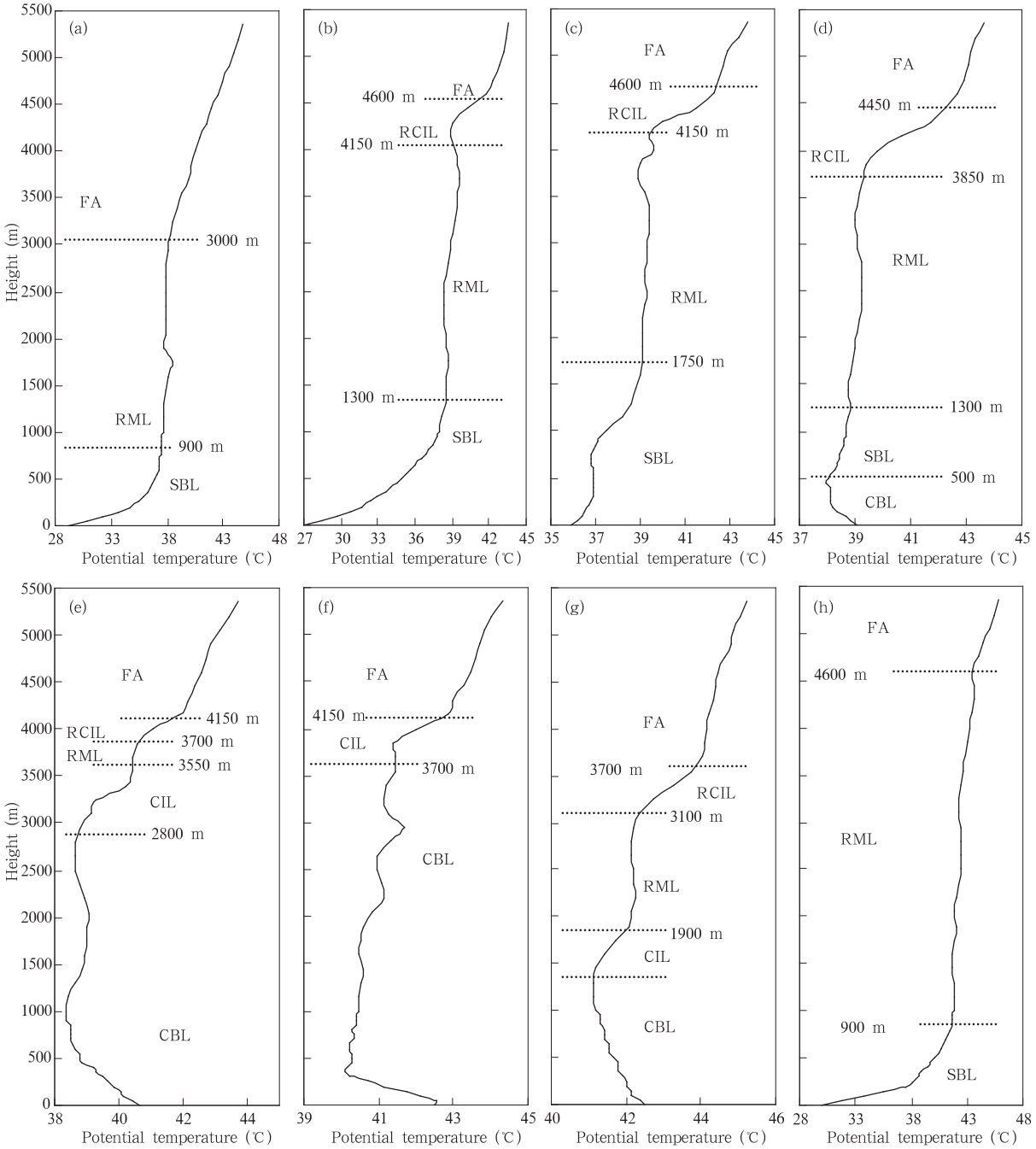

图1 敦煌荒漠夏季晴天大气边界层位温廓线

（FA：自由大气，RML：残余混合层，CBL：对流边界层，SBL：稳定边界层，CIL：逆温层顶盖，RCIL：残余逆温层顶盖）

Fig. 1 Diurnal variation of potential temperature profile in the atmospheric boundary layer in Dunhuang desert under a typical sunny day in summer

（FA: Free Atmosphere, RML: Residual Mixed Layer, CBL: Convective Boundary Layer, SBL: Stable Boundary Layer, CIL: Capping Inversion Layer, RCIL: Residual Capping Inversion Layer）

（a. 01:00, b. 05:00, c. 08:00, d. 10:00, e. 12:00, f. 14:00, g. 17:00, h. 21:00）

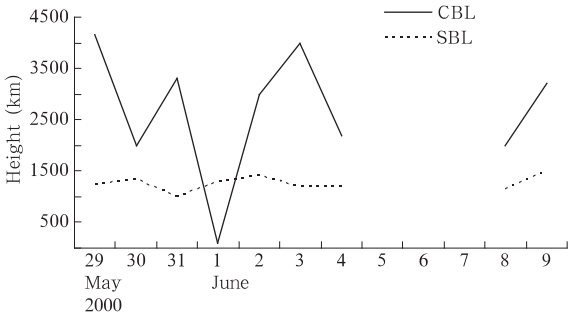

图 2　5 月 29 日—6 月 9 日对流边界层厚度和稳定边界层日最大厚度的日际变化

Fig. 2　Daily variations of the maximum depth of convective boundary layer(CBL) and stable boundary layer (SBL) from May 29 to June 6, 2000

通过对图 1 中位温廓线结构特征的分析,可以确定出敦煌荒漠夏季晴天大气边界层结构日变化(图 3),夜间深厚的大气残余层为白天对流边界层的发展提供了一个非常有利的热力背景条件。每当白天对流边界层发展到足以突破夜间形成的逆温层而进入残余层后,对流边界层的发展会十分畅通。从 10 时到 12 时的对流边界层发展很迅速就充分反映出了这一点。这说明在残余层中对流边界层发展的对抗力因素比较弱,地表加热提供的能量可以支持对流边界层发展得更高、更深。所以比较深厚的残余层是白天发展深厚对流边界层的重要大气热力环境条件之一。因此,在干旱荒漠地区对流边界层之所以能够发展得极其深厚,除了特殊的地表加热

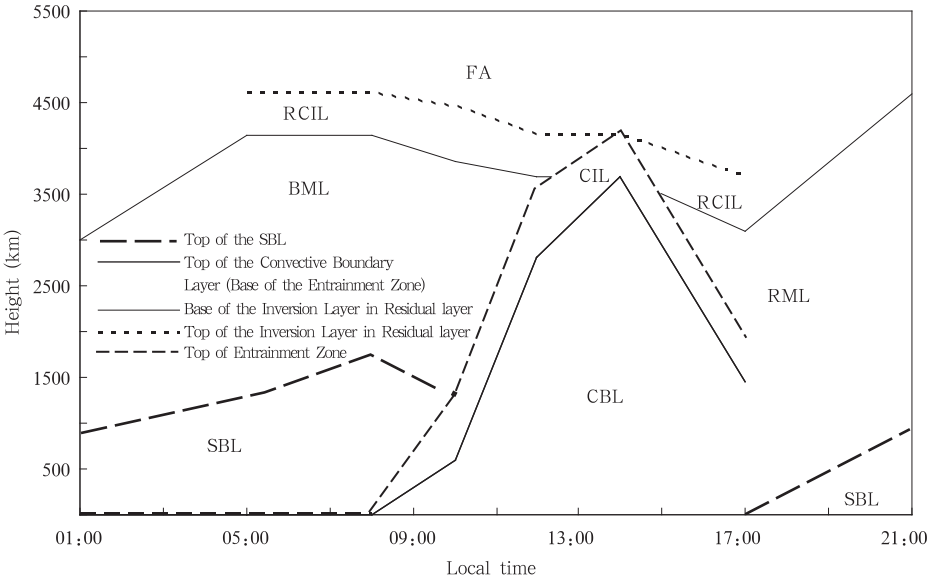

图 3　敦煌荒漠夏季晴天大气边界层位温结构日变化(表示符号同图 1)

Fig. 3　Diurnal variation of atmospheric boundary layer structure in Dunhuang desert under a typical sunny day in summer (Acronyms are the same with Fig. 1)

和大气动力因素外,也与该地区经常出现连续晴天使残余层的累积效应得到了持续发挥有相当大的关系。

3.2　风速和比湿垂直分布特征

大气边界层往往还具有比较显著的大气动力特征,并且这些动力特征也在很大程度上影响着边界层内的大气运动规律。一般,白天对流边界层和夜间稳定边界层的大气会表现出明显不同的运动状态。图 4 是敦煌荒漠夏季晴天大气边界层水平风速垂直结构特征。该图给出的风速垂直分布特征进一步支持了由位温廓线确定的边界层结构。夜间,在稳定边界层顶有低空急流发展,并且急流高度随稳定边界层高度的抬升逐步向上抬升,到 08 时左右抬升到了 1300 m 左右,与稳定边界层厚度相对应。白天大气边界层风速垂直变化主要发生在近地面层,而混合层内风速逐步变得比较均一,到了对流边界层顶以后风速才会又开始明显随高度增加。由风速廓线结构可以确定出,在夜间稳定边界层条件下,该地区地转风强度为 11 m/s,地空急流要超过地转风27%左右;在白天对流边界层条件下,该地区地

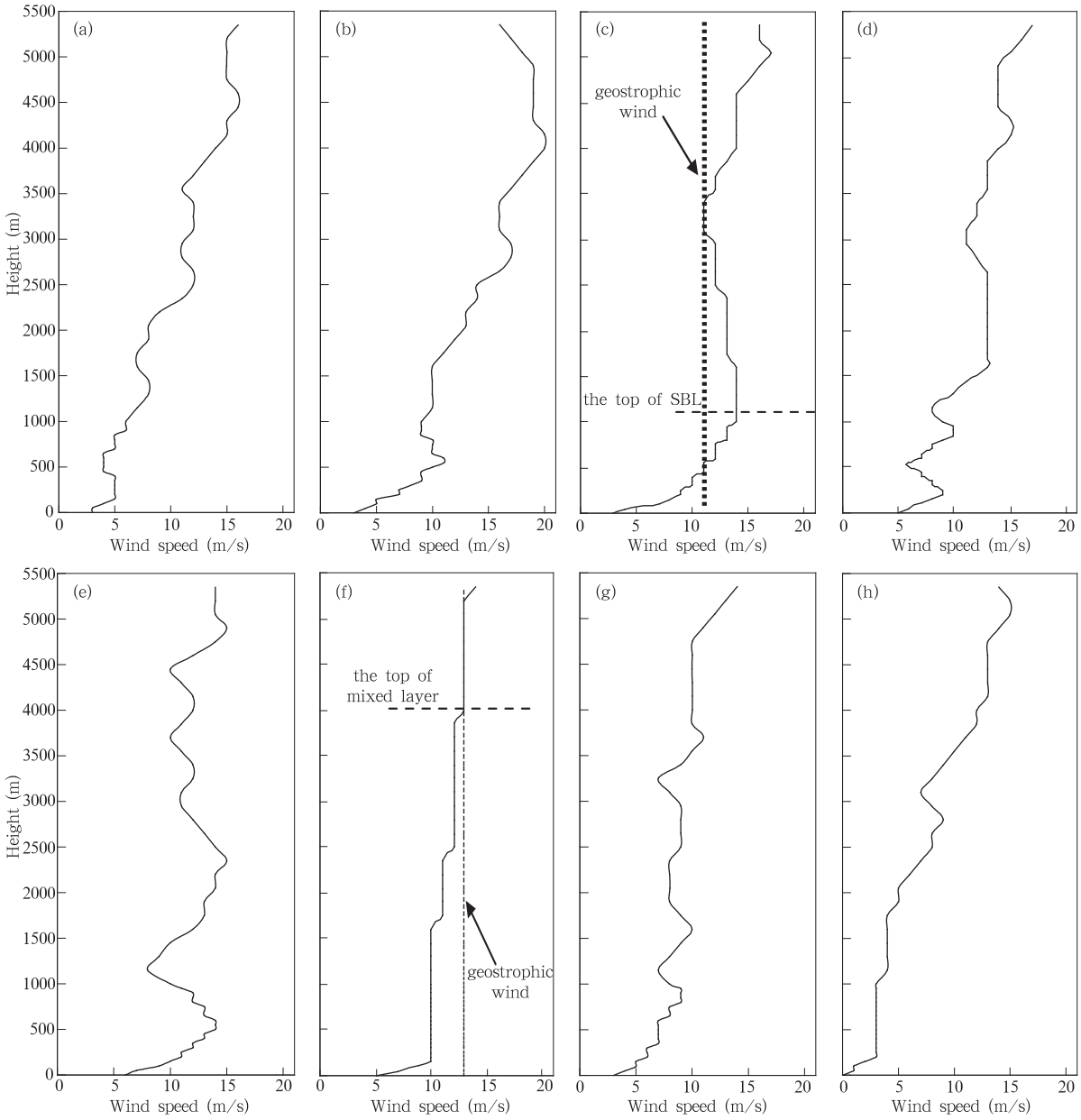

图 4 敦煌荒漠夏季晴天大气边界层水平风速垂直结构

Fig. 4 Diurnal evolution of the vertical profile of wind speed in the atmospheric boundary layer in Dunhuang desert under a typical sunny day in summer

(a. 01:00, b. 05:00, c. 08:00, d. 10:00, e. 12:00, f. 14:00, g. 17:00, h. 21:00)

转风强度为13 m/s,基本不出现超地转风。

一般情况下,夜间,由于超地转作用,风速较大;白天风速则较小。在敦煌荒漠地区,由于白天比较充分的混合使动量下传,白天近地层风速增大,导致其风速日变化特征正好与一般地区相反。另外,在夜间,大气边界层上面还有高空急流存在,但其规律不是很明显。这可能与夜间逆温层发展比较快,致使自由大气下传的动量在逆温层顶部堆积有关。

与 Stull(1988)概括的典型夏季晴天夜间稳定边界层和白天对流边界层风速廓线示意图相比,敦煌荒漠大气边界层风速廓线特征与理想的风速廓线特征基本一致,特别是稳定边界层发展最深厚的 08 时和对流边界层发展最旺盛的 14 时的风速廓线特征分别与稳定大气边界层和对流大气边界层的理想风速廓线形态相当一致。当然,由于敦煌荒漠地区大气边界层对流发展得更旺盛,风速廓线在近地层

变化非常剧烈,而在对流层顶的跃变幅度则相对较小。

大气边界层的热力和动力特性的垂直结构对其内物质输送和分布影响也十分显著,往往在稳定大气边界层和对流大气边界层内大气成分会表现出不同的分布状态。从敦煌荒漠夏季晴天大气边界层湿度垂直分布(图 5)可见,在夜间稳定边界层条件下,比湿从地表向上递增,在边界层顶部达到最大;在残余混合层内比湿大致保持相对均一或轻微向上递减的分布状态;到残余混合层上面的残余逆温层顶盖内,比湿突然跃减;出了逆温层顶盖以后比湿已经变得十分小,这说明残余层对大气比湿分布的影响也十分明显。在白天对流大气边界层条件下,大气比湿在近地面层内从地表开始向上递减;到混合层以后比湿廓线基本保持相对均一状态;在逆温层顶盖内大气比湿迅速减弱;进入自由大气后与夜间同高度大气基本相近。可见,在夜间稳定边界层上面的残余层内大气还不能算真正的自由大气,位温和比

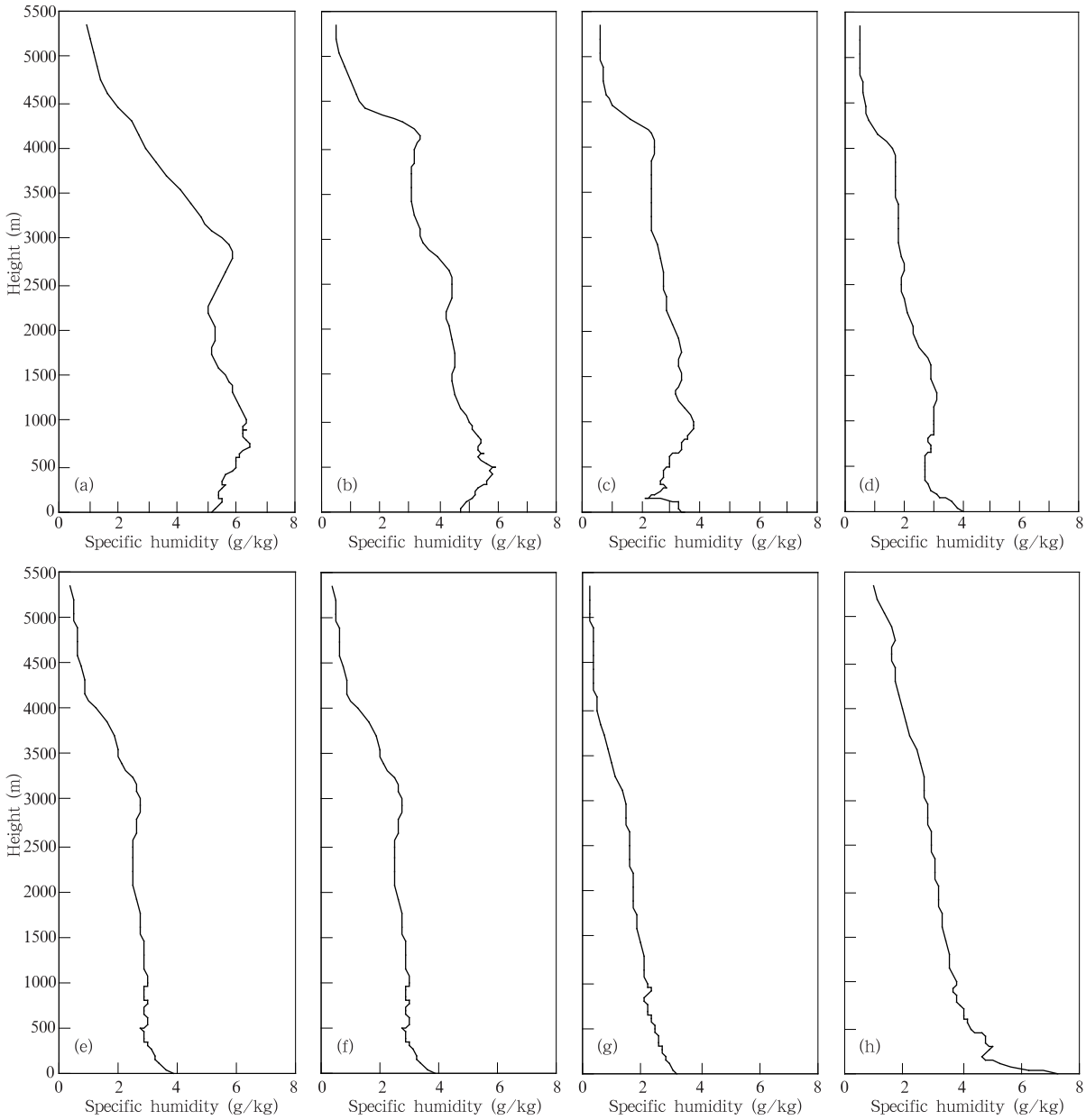

图 5　敦煌荒漠夏季晴天大气边界层比湿垂直分布

Fig. 5　Same Fig. 4 but for specific humidity profile

(a. 01:00, b. 05:00, c. 08:00, d. 10:00, e. 12:00, f. 14:00, g. 17:00, h. 21:00)

湿等大气标量物理属性在残余范围内仍然明显保持着受地气相互作用影响的特征。这意味着在白天热对流比较强的情况下夜间大气只有在残余层以上才属于完全的自由大气。同时,由于夜间大气处于比较稳定的保守状态,其边界层大气的比湿要比白天的高一些。

图 5 给出的大气比湿垂直分布特征完全遵从了大气边界层比湿分布规律,与许多研究(Stull,1988)给出的大气成分在边界层内的理想分布形态也十分一致。它与风速廓线特征一样更进一步印证了位温廓线确定的大气热力边界层结构的可靠性。

通过对大气边界层位温、风速、比湿垂直廓线的综合分析表明,大气边界层位温、风速、比湿这些主要物理特性的分布特征和演化规律相互支持,并且它们比较一致地为敦煌荒漠夏季晴天超厚大气边界层结构特征提供了比较有力的观测依据。

4 陆面过程特征及其作用

大气热力边界层主要反映的是地表的热力影响,所以陆地的大气热力边界层特征在很大程度上是由陆面热力过程决定的。净辐射是地表辐射收支平衡后用来加热大气和地表的主要能量来源,是控制边界层形成和发展的主要能量来源。一般,近地面层感热通量反映的是净辐射中用于加热大气和支持对流发展的能量。地表温度变化则反映的是净辐射对地表的加热效果,它也是激发大气热对流产生的重要外部强迫条件之一(Hu Yinqiao,1994)。所以净辐射、感热通量、地表温度均是影响大气热力边界层形成和发展的关键物理量。图 6 是敦煌荒漠夏季晴天地表能量和地表温度的日变化。图 6a 表明,净辐射的日峰值接近 500 W/m^2,明显高于其他一些比较湿润的地区。这与该地区总辐射很强有密切关系(Liu Shuhua,et al,2007),可以使其在比较大的地表反照率条件下仍然能够保持比较强的净辐射强度(张强等,2003)。特别是感热通量的峰值高达 450 W/m^2,它与其他地区相比显得更高。这说明在敦煌这样的极端干旱地区不仅由于强烈的太阳辐射造成净辐射比较大,而且由于其地表土壤干燥和植被稀少造成感热通量的转化率也十分高,大约有 90% 左右的净辐射转化成了感热通量。所以,在极端干旱地区敦煌具有比较充足的能够支持大气边界层热对流发展的能量条件。而在夜间负的净辐射通量和负的感热通量也很大,最强时分别超过 −100 W/m^2 和 −80 W/m^2,这也比其他地区强得多,这说明极端干旱地区敦煌夜间辐射冷却也很强,容易形成比较强辐射逆温,产生深厚的夜间稳定边界层。

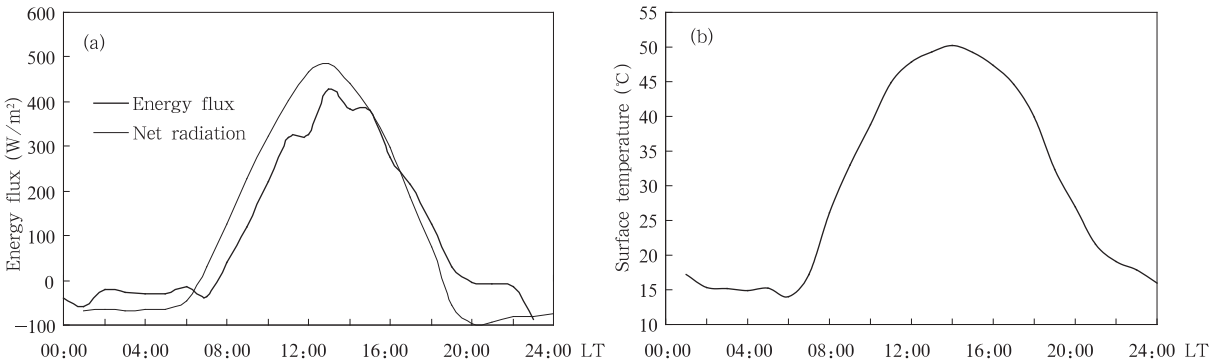

图 6 敦煌荒漠夏季晴天地表能量(a)和地表温度(b)的日变化

Fig. 6 Diurnal variations of ground surface (a) energy flux and (b) temperature over Dunhuang desert under a typical sunny day in summer

王俊勤等(1994)也曾对同在西北干旱区的张掖市荒漠大气边界层资料做过初步分析,发现敦煌荒漠的大气边界层厚度与张掖地区的相比相差较大。张掖市荒漠夏季典型白天对流大气边界层在发展最旺盛时也才 2000 多米;夜间稳定大气边界层厚度也不超过 750 m。那么同在西北干旱区的敦煌和张掖之间为何会出现相差如此大的大气边界层厚度?通过对它们的气候特征和地表热状况的比较分析,可以初步找到一些解释:就气候而言张掖地区的年平均降水量一般在 150 mm 左右,而敦煌地区年平均降

水量一般在 30 mm 左右,张掖年降水量是敦煌的 5 倍。就地表热量通量而言,在敦煌地区,晴天感热通量最大能达到 400 W/m^2,夜间极值为－50 W/m^{2}左右(张强等,2003);而在张掖地区,感热通量最大只能达到 300 W/m^2,夜间极值为－30 W/m^2 左右(Hu Yinqiao,et al,1992)。两个地区的 Bowen 比也相差一个量级左右。这说明敦煌作为西北干旱区的极端干旱区域有着比同地区其他区域更强的白天地表辐射加热能力和夜间辐射冷却能力。Randal 等(2004)的研究也表明,干旱地区存在类似于大洋暖池对厄尔尼诺一样的贡献,它是陆地上的"热岛",这些地区的地表能量过程和大气对流的发展对土壤湿度十分敏感,即空间上较小的土壤湿度差异也许会造成地表能量和大气对流特征较明显的差异。所以,在极端干旱地区形成比其他地区甚至一般干旱地区更深厚的对流大气边界层就比较容易理解了。

图 6b 表明,敦煌荒漠地表温度变化十分剧烈,白天最高达 50.1 ℃,夜间最低达 14 ℃,地表温度日较差高达 36 ℃左右。这种温度日变化特征表明,在极端干旱的敦煌地区,地表受太阳加热增温和辐射冷却降温均很迅速(Zhang Qiang,et al,2003)。白天地表强烈加热造成的显著增温为激发大气边界层对流提供了强有力的外部热力强迫条件,它与支持边界层对流发展的充足的感热通量一起容易在敦煌形成极端深厚的白天大气对流边界层。

在大气边界层中,大气运动比较复杂。除了我们能够看得见的大气宏观运动外,大气边界层运动实际上是以不容易察觉的湍流运动为主要特征。湍流运动又由于运动性质和形式不同分为一般湍流运动和对流运动两种湍流运动形式。宏观运动的速度尺度一般用平均风速可以表示;而一般湍流运动的速度尺度用摩擦速度 u_* 来表示,它可以表示为(Deardorff,1970)

$$u_* = ((\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2)^{1/4} \tag{1}$$

这里,u'、v'、w'分别是纵向脉动风速、横向脉动风速和垂直脉动风速,它们能够由超声仪器观测获得;对流运动的速度尺度可以用对流速度 w_* 来表示,用公式表示为(Redelsperger,et al,1998)

$$w_* = (-\frac{gZ_i}{T_v}\overline{w'T'_v})^{1/3} \tag{2}$$

这里,T_v 是表面大气虚位温,Z_i 是对流边界层厚度,$\overline{w'T'_v}$是近地面感热通量,它们都可以由观测资料确定;g 是地球重力加速度。一般情况下,近地层平均风速的量级大约为 4 m/s,对流速度的量级大约为 1 m/s(Redelsperger,et al,1998),摩擦速度的量级为 0.2 m/s,它们基本分别属于不同速度量级的运动形式。近地层平均风速主要表现的是以平流为特征的水平输送能力,摩擦速度表现了湍流向空间各向的扩散能力,而对流速度表现的是垂直方向的对流输送能力。

图 7 是敦煌荒漠夏季晴天近地面层平均风速、对流速度、摩擦速度的日变化比较。该图清楚地表明,极端干旱地区敦煌的近地面层平均风速、对流速度、摩擦速度均有一定程度的日变化,其中对流速度的日变化最明显,可以在白天从 0 m/s 发展到加热最强时的 3.21 m/s。摩擦速度也有一定程度的日变化,白天比较大,最大能够达到 0.42 m/s;夜间较小,最小为 0.01 m/s。风速平均在 5.5 m/s 左右,但白天的风速要略大于夜间的。与其他地区相比,极端干旱地区敦煌的对流速度值显得尤其大,近地面层摩擦速度也较大一些,而近地面层平均风速则大得不明显。这种白天极其强的对流运动和较强的湍流运动特征使大气对流边界层发展同时获得了十分充足的热力对流的爆发力和十分有利的动力环境条件,在较大程度上决定了极端干旱地区敦煌发展深厚对流边界层的运动学基础。

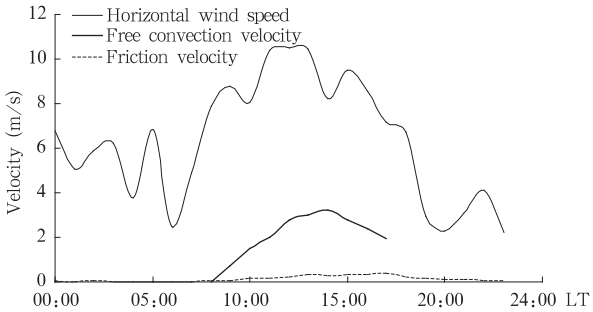

图 7　敦煌荒漠夏季晴天近地面层平均风速、对流速度、摩擦速度的日变化

Fig. 7　Diurnal variations of the mean wind speed, convective velocity and friction velocity of surface layer in Dunhuang desert under a typical sunny day in summer

5　结论和讨论

敦煌荒漠地区是西北干旱区内气候极端干旱的区域,大气热力边界层结构十分特殊。依据大气风、

温、湿等主要气象要素垂直分布的综合特征可以比较成功地确定出白天对流大气边界层的超绝热递减层、混合层、逆温层顶盖以及夜间稳定边界层的逆温层和残余层结构。深厚的白天混合层和夜间逆温层以及清晰而深厚的夜间残余层是极端荒漠地区大气热力边界层的主要特征。

白天深厚的对流边界层是夜间保持清晰而深厚的残余混合层的先决条件,夜间深厚的残余混合层又为白天对流边界层的发展提供了一个非常有利的热力环境条件,对流边界层在残余层的发展十分迅速。

就极端干旱地区敦煌发展超厚大气对流边界层的物理机理而言,地表显著增温是强有力的外部热力强迫条件,近地层强感热通量是充足的能量条件,较大的对流运动和湍流运动的速度是十分有利的运动学条件。另外,该地区经常性出现连续性晴天使得大气残余层的累积效应得以较长时间持续发展,创造了比较有利于大气对流边界层发展的大气热力环境条件。

当然,本文研究缺乏更加广泛空间上西北干旱区大气边界层的观测资料,还不能系统探讨不同环流背景和不同干旱程度下大气热力边界层的结构特征,所以对极端干旱地区敦煌出现的这种超厚大气热力边界层的分析和论述还不够十分系统。目前,既需要更多的野外试验资料和高精度的卫星遥感反演资料对西北干旱区大气热力边界层的空间特征和变化规律做更系统地分析,也更加需要比较先进的大气数值模式来模拟分析大气热力边界层的形成和发展机理。

References

Angevine W M, White A B, Avery S K. 1994. Boundary layer depth and entrainment zone characterization with a boundary-layer profiler. Bound Layer Meteor, 68: 375-385

Crum T D, Stull R B, Eloranta E W. 1987. Coincident lidar and aircraft observations of entrainment into thermals and mixed layer. J Climate Appl Meteor, 26:774-788

Deardorff J W. 1970. Convective velocity and temperature scale for the unstable planetary boundary layer and for Rayleigh convection. J Atmos Sci, 27: 1211-1213

Garratt J R. 1992. The atmospheric boundary layer. Combridge: Cambridge University Press,1-3

Hu Yinqiao, Yang Xuanli, Zhang Qiang, et al. 1992. The characters of energy budget on the Gobi and desert surface in Hexi region. Acta Meteor Sinica, 6(1): 82-91

Hu Yinqiao, Gao Youxi. 1994. Some new knowledge to land surface processes in arid region. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 52(3):285-296

Jiang Weimei, Xu Yumao, Yu Hongbing. 1994. Base of Boundary Layer Meteorology (in Chinese). Nanjing: Nanjing University Press, 42-44

Liu Shuhua, Jiang Haoyu, Hu Fei, et al. 2007. Applicability research in the simulation of radiation and ground layer air temperature in HEIFE region. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 65(6):928-937

Raman S, Templeman B, Holt T, et al. 1990. Structure of the Indian southwesterly pre-monsoon and monsoon boundary layers: Observations and numerical simulation. Atmos Environt, 24a(4): 723-734

Randal D K, Paul A D, Guo Zhichang. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipation. Science, 305: 1139-1140

Redelsperger J L, Mondon S, Guichard F. 1998. Parameterization of mesoscale enhancement of surface fluxes in general circulation model. Bull Ame Meteor Soc, 79(3): 89-102

Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 649pp

Wang Junqin, Hu Yinqiao, Chen Jiayi, et al. 1994. Some characteristics of structure of planetary boundary layer over HEIFE area. Plateau Meteor(in Chinese), 13(3):299-306

Zhang Qiang, Cao Xiaoyan. 2003. The influence of synoptic conditions on the averaged surface heat and radiation budget energy over desert or Gobi. Chinese J Atmos Sci(in Chinese), 27(2): 247-254

Zhang Qiang, Cao Xiaoyan, Wei Guoan, et al. 2002. Observation and study of some key parameters of land surface process of Gobi in arid region. Adv Atmos Sci, 19(1):1-14

Zhang Qiang, Wang Sheng, Li Yanying. 2006. The depth of atmospheric boundary layer in arid region of Northwest China. Acta Meteor Sinica, 20(Suppl): 1-12

Zhang Qiang, Huang Ronghui. 2004a. Water vapor exchange between soil and atmosphere over a Gobi surface near an oasis in summer. J Appl Meteor, 43(12): 1917-1928

Zhang Qiang, Huang Ronghui. 2004b. Parameters of land surface processes on Gobi in Northwest China. Bound Layer Meteoro, 110(3): 471-478

Zhang Qiang, Wei Guoan, Hou Ping, 2004. Observation studies of atmosphere boundary layer characteristic over Dunhuang Gobi in early summer. Plateau Meteor(in Chinese), 23(5):587-597

附中文参考文献

胡隐樵,高由禧. 1994. 对于干旱地区陆面过程的一些新认识. 气象学报,52(3):285-296

刘树华,蒋浩宇,胡非等. 2007. 黑河地区近地面层辐射和温度的适用性模拟研究. 气象学报,65(6):928-937

蒋维楣,徐玉貌,于洪彬. 1994. 边界层气象学基础. 南京:南京大气出版社,42-44

王俊勤,胡隐樵,陈家宜等. 1994. HEIFE 区边界层某些结构特征. 高原气象,13(3):299-306

张强,曾晓彦. 2003. 荒漠戈壁地区地表热量和辐射平衡特征,大气科学,27(2),247-254

张强,卫国安,侯平. 2004. 初夏敦煌戈壁大气边界结构特征的一次观测试. 高原气象,23(5):587-597