

东亚、北非干旱半干旱区 边界层高度变化及其影响因素*

赵艳茹, 毛文茜, 张珂铨, 牛笑应, 李佳芸, 张文煜
(兰州大学大气科学学院//甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用欧洲中期天气预报中心 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasting) 20 世纪第一代再分析资料 ERA-20C (the ECMWF twentieth century reanalysis) 对东亚、北非 2 个典型干旱半干旱区 1900 - 2010 年边界层高度变化及其与气象要素变化之间联系进行了研究, 结果表明: ① 两个地区的边界层高度在整体变化、年际变化以及年代际变化中基本呈现出相反的变化趋势, 整体趋势中东亚为显著上升趋势, 气候倾向率为 1.87 m/10a, 北非为显著下降趋势, 气候倾向率为 -2.13 m/10a; 在 11 个年代里, 有 8 个年代的变化呈相反趋势。② 干旱半干旱区边界层高度的变化均与地气温差、相对湿度、风速的变化有一定联系, 其中相对湿度与边界层高度的变化最为紧密, 在两个地区均为显著性的负相关, 相关系数分别为 -0.778 4、-0.618 4。

关键词: 干旱半干旱区; 边界层高度; 变化; 气象因素

中图分类号: P433 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579 (2017) 05-0093-08

The boundary layer height variation and influence factors over arid and semiarid areas of East Asia and North Africa

ZHAO Yanru, MAO Wenqian, ZHANG Kequan, NIU Xiaoying, LI Jiayun, ZHANG Wenyu
(College of Atmospheric Sciences//Key Laboratory of Arid Climatic Change and
Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the ECMWF's first atmospheric reanalysis data of the 20th Century, ERA-20C, the variation of the boundary-layer height (BLH) and its relationship with the meteorological factors over arid and semiarid areas of East Asia and North Africa spanning 1900-2010 were analyzed. The BLHs in the two areas showed an opposite trend in the overall, interannual and interdecadal variation. The BLH of East Asia overall showed a rising trend with a climate tendency rate of 1.87 m/10a, while the BLH of North Africa showed a decreasing trend with a climate tendency rate of -2.13 m/10a. In the 11 decades, there were 8 decades having opposite trend. The BLH was related to the change of land air temperature gradient, relative humidity and wind speed. The change of relative humidity had a good correlation with the BLH, with significant negative correlation coefficients of -0.778 4 and -0.618 4, respectively, in East Asia and North Africa.

Key words: arid and semiarid areas; boundary layer height; variation characteristics; meteorological factors

* 收稿日期: 2016-07-23

基金项目: 国家重大科学研究计划项目 (2012CB956200); 国家自然科学基金 (41225018); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金 (lzujbky-2016-193)

作者简介: 赵艳茹 (1992 年生), 女; 研究方向: 大气物理学与大气环境; E-mail: zhaoyr15@lzu.edu.cn

通信作者: 张文煜 (1964 年生), 男; 研究方向: 大气物理学与大气环境; E-mail: yuzhang@lzu.edu.cn

随着气候变暖,过去的几十年干旱和干旱化的发生、发展呈增强的趋势^[1]。全球范围内有多个干旱带,其中亚非干旱带覆盖面积最大,其西起非洲撒哈拉沙漠,东至中蒙干旱区。东亚干旱半干旱区位于亚非干旱带东段,下垫面较为复杂,受季风气候明显,覆盖了东亚绝大部分面积,包括中国北方大部、蒙古高原和中亚部分地区,人口密度也较其他干旱区密集^[2-4]。北非干旱半干旱区位于亚非干旱带西段,地形以高原为主,地势较平坦,深受副热带高压带控制,以气流下沉为主,为典型的热带沙漠气候和地中海气候。

大气边界层是直接受地球表面影响最大的低层大气,其变化直接影响着地圈、水圈、冰雪圈、生物圈与大气圈之间的能量物质交换,对天气和气候有重要的影响^[5]。干旱半干旱区的地表植被通常较为稀疏、反射率较高、加热较强,形成较为独特的有别于其他下垫面的大气边界层^[6]。1992年, Garratt^[7]指出低纬度干旱荒漠区在盛夏白天加热较强的条件下边界层厚度能达到 5 km; 1999年, Takemi^[8]利用探空资料推测出中国西北河西走廊干旱区能够出现超过 4 km 的对流边界层; 2005年, 张强等^[9]通过 2000 年的实际观测发现西北极端干旱区在夏季晴天能够形成超过 4 km 的对流边界层; 2008年, Marsham 等^[10]在非洲撒哈拉沙漠观测到高达 5.5 km 的深厚对流边界层。这些研究揭示了干旱半干旱区大气边界层的独特性。但由于边界层外场观测成本高、难度大、周期长^[11],目前关于边界层高度的研究在空间上多局限于站点,时间尺度也较短,对大尺度时空范围的边界层高度变化需要进一步的研究。

在全球变暖的背景下,东亚、北非干旱半干旱区作为全球典型的干旱半干旱区域,大气边界层又具有着独特性,其边界层高度在近 110 a 的长时间尺度上是否发生了变化? 两个地区的变化是否一

致? 已有的研究^[12-15]指出,边界层高度与温、风、湿等气象要素之间可能存在一些联系,那么东亚、北非干旱半干旱区边界层高度的变化与这些气象要素之间存在着怎样的联系? 都是值得探讨的。欧洲中期天气预报中心 ECMWF 在 2015 年发布了一套新的再分析资料——ERA-20C,时间范围为 1900 - 2010 年,为分析研究大尺度时空范围的边界层高度变化提供了数据基础。文章利用 ERA-20C 再分析资料中的边界层高度、地面气温、地表温度、露点温度、地面风速等物理量对东亚、北非干旱半干旱区 1900 - 2010 年边界层高度变化及其与气象要素变化的联系进行了研究,比较了 2 个地区异同点,对干旱半干旱区大气边界层高度特征进行了初步研究。

1 数据与方法介绍

1.1 数据介绍与处理

文章选用 ERA-20C 中的边界层高度 (BLH)、地面温度 (T_a)、地表温度 (T_s)、露点温度 (T_d)、地面风速 (WS) 等物理量的月均资料,时间为 1900 - 2010 年,空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。在 ERA-20C 中,边界层高度的计算主要采用两种方法^[16],对流条件采用气块法^[17-18],中性和稳定条件下采用整体理查森数方法^[19]。

为验证 ERA-20C 再分析资料中边界层高度,利用 2006 年 04 月 - 2010 年 12 月我国榆中、张掖的探空数据,采用 Liu 等^[20]的方法计算了边界层高度,并与 ERA-20C 中的边界层高度进行了比较,两者在数值上存在一定的差异性,这可能是由于探空数据的观测始于北京时 07:15 和 19:15,而 ERA-20C 可提供的数据时间为北京 08:00 和 20:00,但从图 1 中可以看出,两者的变化趋势大体是一致的,说明 ERA-20C 是可以表征边界层高度变化特征的。

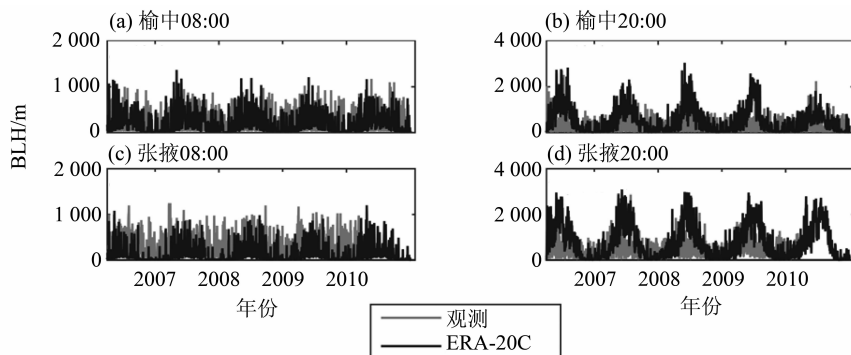


图 1 ERA-20C 再分析资料与探空观测资料的比较

Fig. 1 Comparison of ERA-20C reanalysis data with sounding observational data

研究中，计算了地气温差 ($T_s - T_a$)、相对湿度 (U)，方法如下：

$$T_s - T_a = T_s - T_a \quad (1)$$

其中 T_s 为地表温度， T_a 为地面气温， $T_s - T_a$ 为地气温差，单位均为 $^{\circ}\text{C}$ 。

$$U = e/e_s \quad (2)$$

$$e = e_0 \exp\left(\frac{aT_d}{273.16 + T_d - b}\right) \quad (3)$$

$$e_s = e_0 \exp\left(\frac{aT}{273.16 + T - b}\right) \quad (4)$$

其中 e 为实际水汽压， e_s 为饱和水汽压，单位均为 hPa， $e_0 = 6.1078$ hPa，为 $T = 0^{\circ}\text{C}$ 时的饱和水汽压， a 、 b 为常数， $a = 17.269$ ， $b = 35.86$ 。

1.2 分析方法

研究中使用了距平、气候倾向率两个常用的统计量。距平为一组数据的某一个数 x_i 与均值之间的差，是最常用的表示气候变量偏离正常情况的量，计算方法如下：

x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示样本量为 n 的某一气候变量， t_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示对应的时间：

$$Ax_i = x_i - \bar{x}_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

其中 Ax_i 为气候变量的距平。

气候倾向率表示变量随时间的趋势倾向，利用最小二乘法建立 x_i 和 t_i 之间的一元线性回归：

$$x_i = a + bt_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

其中 a 为回归常数， b 为回归系数， $b \times 10$ 即气候倾向率，单位为 $/10\text{a}$ 。 $b > 0$ 时，表明随时间 t 的增加 x 呈上升趋势；反之 $b < 0$ 时， x 呈下降趋势。

2 结果与讨论

2.1 边界层高度的年际变化及其影响因素

东亚干旱半干旱区的边界层高度表现出年际震荡的变化特征，1965 年之前主要表现为负距平，之后主要表现为正距平，说明 1965 年之后东亚的边界层高度有明显的抬升趋势。结合图 2 中各要素的变化，可以发现边界层高度的变化特征及其与各气象因素之间的关系，大致可以分为 7 个阶段：1900 - 1906 年，边界层高度表现为持续的负距平，该阶段地面气温、地表温度、地气温差的距平均为先正后负，相对湿度为正距平、风速为负距平，由于相对湿度偏高时，到达地面的太阳辐射分配给潜热的部分会偏大，导致分配给边界层发展的能量偏小，使得边界层高度偏低，而风速偏小时，边界层发展的动力部分相应偏小，使得边界层高度偏低，因此该阶段边界层高度的持续负距平，主要由相对湿度和风速起主导作用；1906 - 1930 年，边界层高度呈现接近于 0 的距平，地面气温、地表温度距平接近于 0，地气温差为持续正距平，相对湿度主要为正距平，风速基本为负距平，由于地气温差偏

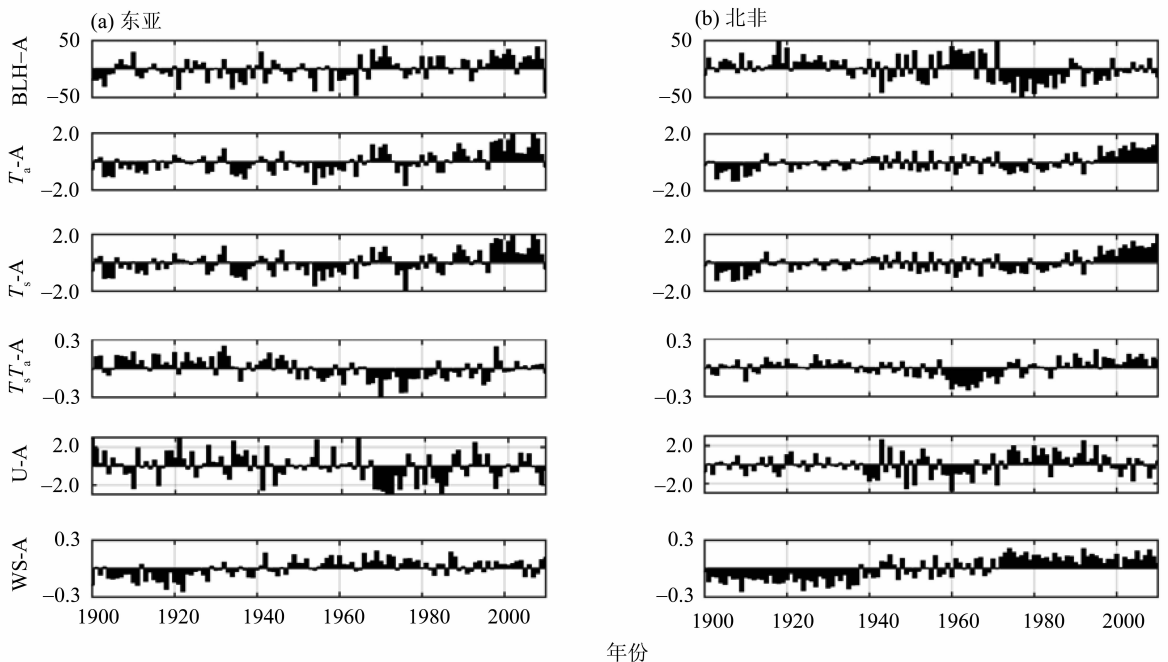


图 2 东亚、北非干旱半干旱区边界层高度及各气象因素的距平分布图

Fig. 2 The anomaly of BLH and the meteorological factors of arid and semiarid area over East Asia and North Africa

大时,感热通量就会偏大,使得边界层高度偏高,而相对湿度偏大、风速偏小使得边界层高度偏低,这两种作用相互抵消,使得该阶段的边界层高度距平接近于 0; 1930 - 1950 年,边界层高度表现为负距平,其中正距平的地气温差会导致边界层高度偏高,正距平的相对湿度、负距平的风速会导致边界层高度偏低,说明该阶段相对湿度和风速为主要影响因素,使得边界层高度为负距平; 1950 - 1965 年,边界层高度表现为负距平,其中地气温差为负距平、相对湿度为正距平,会导致边界层高度偏低,风速为正距平,会导致边界层高度偏高,说明该阶段地气温差和相对湿度为主要影响因素; 1965 - 1975 年,边界层高度表现为正距平,其中地气温差为负距平,会导致边界层高度偏低; 相对湿度为负距平、风速为正距平会导致边界层偏高,可见该阶段相对湿度和风速为主要影响因素; 1975 - 1995 年,边界层高度表现为接近于 0 的距平,其中地气温差为持续正距平,相对湿度距平先负后正,风速为正距平但接近于 0,说明三者的作用相互基本相互抵消; 1995 - 2010 年,边界层高度呈现为正距平,地气温差距平接近于 0,相对湿度为负距平、风速为正距平,会导致边界层高度偏高,可见该阶段相对湿度和风速为主要影响因素。

北非干旱半干旱区的边界层高度也表现出年际震荡的变化特征,1940 年之前、1960 - 1970 年间主要表现为正距平,1970 年之后主要表现为负距平,1940 - 1960 年间年际震荡幅度较大。结合图 2 中各要素的变化,可以发现边界层高度的变化特征及其与各气象因素之间的关系,大致也分为 7 个阶段: 1900 - 1915 年,边界层高度表现为正距平,其中正距平的地气温差、负距平的相对湿度会导致边界层偏高,而负距平的风速会导致边界层偏低,可见该阶段地气温差和相对湿度为主要影响因素; 1915 - 1940 年,边界层高度表现为正距平,地气温差为正距平,相对湿度距平表现为正负交替,风速为负距平,说明该阶段地气温差为主要影响因素; 1940 - 1960 年,边界层高度距平的正负表现出较大幅度的年际震荡,各气象要素中只有相对湿度距平的正负表现为明显的年际震荡,其他均接近于 0,可见该阶段相对湿度为主要影响因素; 1960 - 1970 年,边界层高度表现为正距平,地面气温、地表温度距平表现为年际震荡,但地气温差表现为明显的负距平,相对湿度表现为明显的负距平,风速主要为正距平,说明该阶段相对湿度和风速为主要影响因素; 1970 - 1990 年,边界层高度

表现为负距平,地气温差表现为年际震荡,相对湿度为正距平,风速为正距平,说明该阶段相对湿度为主要影响因素; 1990 - 2000 年,边界层高度表现为负距平,各气象因素均为正距平,说明该阶段相对湿度为主要影响因素; 2000 - 2010 年,边界层高度距平的正负表现为小幅度的年际震荡,各气象因素中只有相对湿度距平的正负表现为明显的年际震荡,其他气象要素均为正距平,说明该阶段相对湿度为主要影响因素。

2.2 边界层高度的年代际变化及其影响因素

从东亚各个年代的变化来看,如图 3 和表 1 所示,1900 - 1910 年,边界层高度呈明显的上升趋势,变化率为 $46.07 \text{ m}/10\text{a}$,其中地面气温、地表温度均为升高趋势,变化率分别为 $0.04 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.15 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$,地表温度的上升趋势大于地面气温的上升趋势,导致地气温差为升高趋势,变化率为 $0.11 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$,相对湿度为降低趋势,变化率为 $-3.75\%/10\text{a}$,风速为变小趋势,变化率为 $-0.02 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})^{-1}$,其中升高的地气温差和降低的相对湿度为该阶段边界层高度上升的主要影响因素; 同理分析,可以得出,1910 - 1920 年,升高的相对湿度 ($1.55\%/10\text{a}$) 和降低的风速 ($-0.03 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$) 为主要影响因素,使得边界层高度呈下降趋势 ($-9.26 \text{ m}/10\text{a}$); 1920 - 1930 年,降低的相对湿度 ($-0.92\%/10\text{a}$) 和增大的风速 ($0.15 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$) 为主要影响因素,使边界层高度呈上升趋势 ($5.26 \text{ m}/10\text{a}$); 1930 - 1940 年,降低的地气温差 ($-0.11 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$)、升高的相对湿度 ($0.30\%/10\text{a}$) 和降低的风速 ($-0.05 \text{ m} \cdot (\text{s} \cdot 10\text{a})^{-1}$) 共同作用导致边界层高度呈下降趋势 ($-3.30 \text{ m}/10\text{a}$); 1940 - 1950 年,降低的地气温差 ($-0.10 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$) 和升高的相对湿度 ($0.63\%/10\text{a}$) 为主要影响因素,使得边界层高度呈较明显的下降趋势 ($-14.46 \text{ m}/10\text{a}$); 1950 - 1960 年,升高的相对湿度 ($0.09\%/10\text{a}$) 为主要影响因素,使得边界层高度呈较明显的下降趋势 ($-15.85 \text{ m}/10\text{a}$); 1960 - 1970 年,降低的相对湿度 ($-3.08\%/10\text{a}$) 和增大的风速 ($0.05 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$) 为主要影响因素,使得边界层高度呈明显的上升趋势 ($43.43 \text{ m}/10\text{a}$); 1970 - 1980 年,升高的相对湿度 ($2.57\%/10\text{a}$) 和降低的风速 ($-0.03 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})^{-1}$) 为主要影响因素,使得边界层高度呈较明显的下降趋势 ($-26.12 \text{ m}/10\text{a}$); 1980 - 1990 年,升高的相对湿度 ($1.39\%/10\text{a}$) 为主要影响因素,使得边界层高度呈下降趋

势 ($-5.50 \text{ m}/10\text{a}$); 1990 - 2000 年, 升高的地气温差 ($0.08 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$) 和下降的相对湿度 ($-1.23\%/10\text{a}$) 和升高的风速 ($0.05 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$) 共同作用导致边界层高度呈较明显的上升趋势 ($22.74 \text{ m}/10\text{a}$); 2000 - 2010 年, 升高的相对湿度 ($0.81\%/10\text{a}$) 为主要影响因素, 使得边界层高度呈较明显的下降趋势 ($-26.43 \text{ m}/10\text{a}$)。

整体趋势来看, 近 110 年东亚边界层高度的气候倾向率为 $1.87 \text{ m}/10\text{a}$, 呈显著上升趋势, 地面气温、地表温度均为显著升高趋势, 变化率分别为 0.11 和 $0.09 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$, 地表温度的上升趋势小于地面气温的上升趋势, 导致地气温差为显著降低趋势, 变化率为 $-0.01 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$, 相对湿度为显著降低趋势, 变化率为 $-0.09\%/10\text{a}$, 风速为显著变

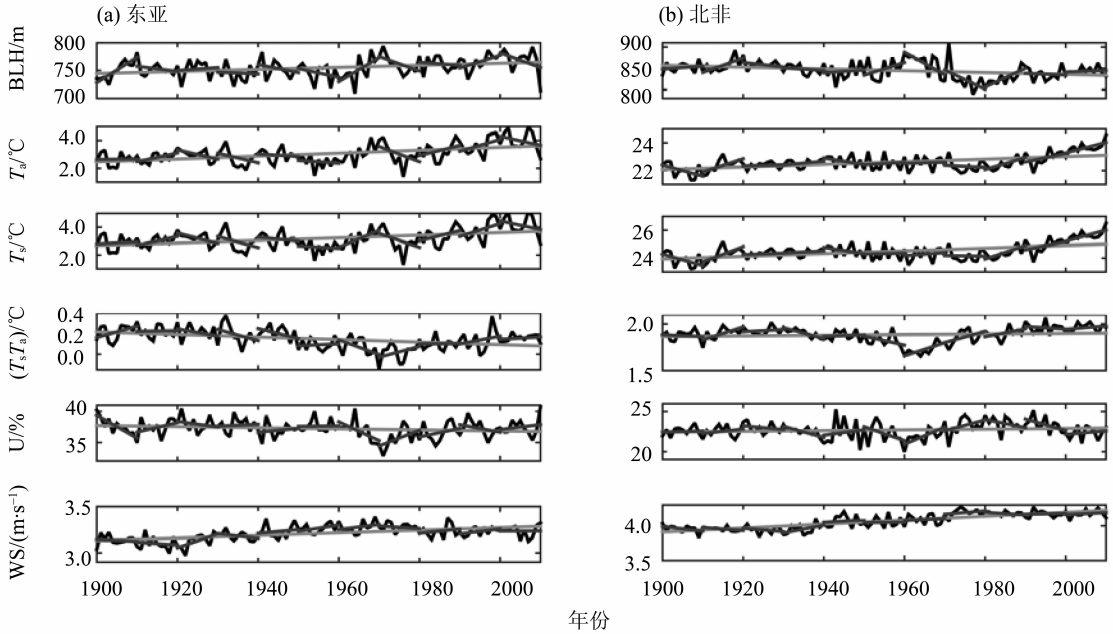


图 3 东亚、北非干旱半干旱区边界层高度及各气象因素的变化趋势

Fig. 3 The trend of BLH and the meteorological factors of arid and semiarid area over East Asia and North Africa

表 1 东亚干旱半干旱区边界层高度、各气象因素的气候倾向率¹⁾

Table 1 The climate trend rates of BLH and the meteorological factors of arid and semiarid area over East Asia 10a

年代	BLH/m	Ta/°C	Ts/°C	(Ts_ Ta) /°C	U/%	WS/(m · s ⁻¹)
1900 - 1910	46.07 **	0.04	0.15	0.11	-3.75 **	-0.02
1910 - 1920	-9.26	0.63	0.64	0.01	1.55	-0.03
1920 - 1930	5.26	-0.67	-0.74	-0.07	-0.92	0.15
1930 - 1940	-3.30	-0.69	-0.80	-0.11	0.30	-0.05 *
1940 - 1950	-14.46	-0.18	-0.28	-0.10	0.63	0.04
1950 - 1960	-15.85	-0.19	-0.17	0.02	0.09	0.07
1960 - 1970	43.43 *	1.37 *	1.22 *	-0.15	-3.08	0.05
1970 - 1980	-26.12	-1.10	-0.99	0.11	2.57	-0.03
1980 - 1990	-5.50	0.73	0.74	0.003	1.39	0.05
1990 - 2000	22.74	0.84	0.92	0.08	-1.23	0.05
2000 - 2010	-26.43	-0.65	-0.62	0.02	0.81	0.001
1900 - 2010	1.87 **	0.11 **	0.09 **	-0.01 **	-0.09 *	0.01 **

1) ** 表示通过了 99 % 的显著性检验; * 表示通过了 95 % 的显著性检验

大趋势,变化率为 $0.01\text{m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$,其中降低的地气温差会导致边界层高度降低,而降低的相对湿度和变大的风速会导致边界层高度上升,从结果来看,东亚干旱半干旱区降低的相对湿度和变大的风速成为主要影响因素,使得边界层高度呈现出上升的趋势。

从北非各个年代的变化来看,如图 3、表 2 所示,1900-1910 年,地气温差为下降趋势,相对湿度为升高趋势,风速为变小趋势,理论上会导致边界层高度下降,可能是因为该阶段各变量的变化都比较小,且未通过显著性检验,存在一些误差,导致结果的不合理;1910-1920 年,上升的地气温差 ($0.14\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$) 为主要影响因素,使边界层高度呈明显的上升趋势 ($33.72\text{ m}/10\text{a}$);1920-1930 年,变小的风速 ($-0.05\text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$) 为主要影响因素,使边界层高度为下降趋势 ($-10.58\text{ m}/10\text{a}$);1930-1940 年,降低的地气温差 ($-0.12\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$) 为主要影响因素,使边界层高度呈下降趋势 ($-6.09\text{ m}/10\text{a}$);1940-1950 年,升高的地气温差 ($0.02\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$) 和增大的风速 ($0.03\text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$) 为主要影响因素,使边界层高度呈上升趋势 ($6.42\text{ m}/10\text{a}$);1950-1960 年,降低的相对湿度 ($-1.77\%/10\text{a}$) 和增大的风速 ($0.004\text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$) 为主要影响因素,使边界层高度呈较明显的上升趋势 ($29.85\text{ m}/10\text{a}$);1960-1970 年,升高的相对湿度 ($2.18\%/10\text{a}$) 为主要影响因素,使边界层高度呈明显的下降趋势 ($-53.08\text{ m}/10\text{a}$);1970-1980 年,升高的相对湿度 ($1.35\%/10\text{a}$) 为主要影响因素,使边界层高

度呈明显的下降趋势 ($-45.21\text{ m}/10\text{a}$);1980-1990 年,上升的地气温差 ($0.08\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$) 和降低的相对湿度 ($-1.04\%/10\text{a}$) 为主要影响因素,使边界层高度呈明显的上升趋势 ($43.70\text{ m}/10\text{a}$);1990-2000 年,降低的地气温差 ($-0.03\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$) 为主要影响因素,使边界层高度呈下降趋势 ($-3.91\text{ m}/10\text{a}$);2000-2010 年,升高的地气温差 ($0.04\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$) 和增大的风速 ($0.03\text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$) 为主要影响因素,使边界层高度呈上升趋势 ($3.74\text{ m}/10\text{a}$)。

整体趋势来看,近 110 年北非边界层高度的气候倾向率为 $-2.13\text{ m}/10\text{a}$,呈显著下降趋势,地面气温、地表温度均为显著上升趋势,变化率分别为 0.09 、 $0.10\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$,地表温度的上升趋势略大于地面气温的上升趋势,导致地气温差为升高趋势,变化率为 $0.003\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$,相对湿度为升高趋势,变化率为 $0.04\%/10\text{a}$,风速为显著变大趋势,变化率为 $0.03\text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$,其中升高的地气温差和变大的风速会导致边界层高度上升,而升高的相对湿度会导致边界层高度降低,从结果来看,北非干旱半干旱区升高的相对湿度成为主要影响因素,使得边界层高度呈现出下降的趋势。

2.3 东亚与北非的比较

在东亚、北非干旱半干旱区边界层高度距平近 110 a 的年际变化中地气温差、湿度、风速三者相互作用导致边界层高度的变化,其中在东亚干旱半干旱区,相对湿度和风速为边界层高度距平年际变化的主要影响因素,而在北非干旱半干旱区,1940 年之前地气温差和相对湿度为主要影响因素,1940 年

表 2 北非干旱半干旱区边界层高度、各气象因素的每 10 a 气候倾向率¹⁾

Table 2 The climate trend rates of BLH and the meteorological factors of arid and semiarid area over North Africa

年代	BLH/m	$T_a/^\circ\text{C}$	$T_s/^\circ\text{C}$	$(T_s - T_a)/^\circ\text{C}$	$U/\%$	$WS/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1900-1910	7.39	-0.80	-0.82	-0.02	0.13	-0.07
1910-1920	33.72*	0.95*	1.09*	0.14*	0.55	-0.04
1920-1930	-10.58	0.08	0.11	0.02	-0.49	-0.05
1930-1940	-6.09	0.26	0.14	-0.12**	-1.41*	0.11
1940-1950	6.42	-0.46	-0.44	0.02	0.67	0.03
1950-1960	29.85	0.17	0.07	-0.10	-1.77	0.004
1960-1970	-53.08*	0.08	0.22	0.14**	2.18*	0.02
1970-1980	-45.21	-0.17	-0.04	0.12	1.35	0.05
1980-1990	43.70**	0.87*	0.95*	0.08	-1.04	-0.04
1990-2000	-3.91	0.61	0.58	-0.03	-1.46	0.01
2000-2010	3.74	0.76*	0.79*	0.04	0.43	0.03
1900-2010	-2.13**	0.09**	0.10**	0.003	0.04	0.03**

1) **表示通过了 99% 的显著性检验; *表示通过了 95% 的显著性检验

之后相对湿度为主要影响因素。在年代际的变化中，两个地区边界层高度的年代变化与地气温差、湿度、风速均有一定的联系，其中在东亚干旱半干旱区，相对湿度几乎在每一次变化中都占据着主导地位，与边界层高度的变化紧密联系，风速也发挥着重要的作用，在北非干旱半干旱区，地气温差与边界层高度的变化更为紧密，风速、相对湿度在不同的年代中也扮演着重要的角色。对比东亚、北非干旱半干旱区边界层高度的年代际变化，可以发现近 110 a 的整体趋势中，两个地区的边界层高度呈现出相反的变化趋势，且北非变化率比东亚要快。比较表 1、2 中各个年代变化趋势，发现在 11 个年代里，有 8 个年代两个区域的变化呈相反趋势，只有 1900 - 1910、1930 - 1940、1970 - 1980 三个年代，两个区域的变化呈相同趋势，说明在大多数情况下，东亚、北非干旱半干旱区边界层高度的变化呈相反的变化趋势。

进一步，文章计算了两个地区边界层高度与各气象因素之间的相关性，如表 3 所示，发现东亚干旱半干旱区边界层高度与地面气温、地表温度呈显著性正相关，相关系数分别为 0.618 1、0.614 2，均通过了 99% 的显著性检验，与地气温差呈正相关，相关系数为 0.101 4；与相对湿度呈显著性负相关，相关系数为 -0.778 4，通过了 99% 的显著性检验；与风速成正相关，相关系数为 0.048 7。

北非干旱半干旱区边界层高度地面气温、地表温度呈正相关，相关系数分别为 0.181 9、0.146 2，与地气温差呈负相关，相关系数为 -0.209 7，通过了 95% 的显著性检验；与相对湿度呈显著性负相关，相关系数分别为 -0.618 4，通过了 99% 的显著性检验；与风速呈负相关，相关系数为 -0.520 1，通过了 99% 的显著性检验。理论上，地气温差通过对感热通量的改变来影响边界层的发展，地气温差越大，感热通量越大，边界层越高，反之边界层越低；相对湿度通过改变潜热通量来影响边界层的发展，相对湿度越大，更多能量进入潜热，使得边界层越低，反之边界层越高；而风速是影响边界层发展的重要动力因素，风速越大，湍流动力作用越强，边界层越高，反之边界层越低。显然，在东亚干旱半干旱区，地气温差、相对湿度、风速与边界层高度的相关是合理的，说明在东亚边界层高度的变化中，三者的变化是正的贡献作用，而从相关程度来看，相对湿度的贡献更为明显。在北非干旱半干旱区，地气温差和风速与边界层高度的相关是不合理的，说明在边界层高度的变化中，两者的变化是负的贡献作用，而相对湿度与边界层高度的相关是合理的，说明在边界层高度的变化中，相对湿度的变化是正的贡献作用，相关程度来看，三者的贡献均通过显著性检验，而相对湿度的贡献最大。

表 3 边界层高度与各气象因素之间的相关系数¹⁾

Table 3 The correlations between BLH and the meteorological factors

区域	T_a	T_s	$T_s - T_a$	U	WS
东亚 BLH	0.618 1**	0.614 2**	0.101 4	-0.778 4**	0.048 7
北非 BLH	0.181 9	0.146 2	-0.209 7*	-0.618 4**	-0.520 1**

1) ** 表示通过了 99% 的显著性检验；* 表示通过了 95% 的显著性检验

3 结 论

通过对东亚、北非 1900 - 2010 年边界层高度变化及其与基本气象因素变化之间联系的研究分析，主要得到以下结论：

1) 1900 - 2010 年，东亚干旱半干旱区边界层高度与北非干旱半干旱区边界层高度，在整体趋势以及大多数年代中的变化，呈现出相反的变化趋势。近 110 a 来，东亚干旱半干旱区边界层高度为显著上升趋势，气候倾向率为 1.87 m/10a，1965 年之前主要表现为负距平，1965 年之后主要表现为正距平；北非干旱半干旱区边界层高度为显著下

降趋势，气候倾向率为 -2.13 m/10a，1940 年之前、1960 - 1970 年间主要表现为正距平，1970 年之后主要表现为正负距平，1940 - 1960 年间表现出明显的年际变化特征。

2) 东亚、北非干旱半干旱区边界层高度的变化均与地气温差、湿度、风速的距平变化有一定联系。在年际变化中，东亚边界层高度的变化主要由相对湿度和风速所主导，北非边界层高度的变化主要由相对湿度所主导；在年代变化中，东亚边界层高度与相对湿度的关系更为密切，北非边界层高度与地气温差的关系更为紧密；从相关性来看，东亚、北非边界层高度的变化中，相对湿度占据着主

导地位, 相关系数分别为 -0.7784 、 -0.6184 。

综合来看, 在干旱半干旱地区, 边界层高度的变化与相对湿度的变化是最为紧密的, 这为研究大气边界层与气候干湿之间的关系提供了事实基础。

参考文献:

- [1] ZHANG L X, ZHOU T J. Drought over East Asia: a review[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(8): 3375 – 3399.
- [2] HUA T, WANG X M. Research progresses on the interaction between desertification and climate change in arid and semiarid East Asia[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(6): 841 – 852.
- [3] WANG X M, CHEN F H, HASIC E, et al. Desertification in China: an assessment[J]. *Earth – Science Reviews*, 2008, 88(3): 188 – 206.
- [4] WANG X M, CHEN F H, ZHANG J W, et al. Climate, desertification, and the rise and collapse of China's historical dynasties[J]. *Human Ecology*, 2010, 38(1): 157 – 172.
- [5] 刘辉志, 冯健武, 王雷, 等. 大气边界层物理研究进展[J]. *大气科学*, 2013, 37(2): 467 – 476.
LIU H Z, FEND J W, WANG L, et al. Overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics at LAPC [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(2): 467 – 476.
- [6] 崔洋, 常倬林, 王澄海, 等. 河套干旱区夏季晴天与阴雨天大气边界层特征对比分析[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(2): 309 – 316.
CUI Y, CHANG Z L, WANG C H, et al. Atmospheric boundary layer characteristics of the different weather in summer over Hetao Arid Region[J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(2): 309 – 316.
- [7] GARRATT J R. *The atmospheric boundary layer* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 316pp.
- [8] TAKEMI T. Structure and evolution of a severe squall line over the arid region in northwest China[J]. *Monthly weather review*, 1999, 127(6): 1301 – 1309.
- [9] 张强, 黄荣辉, 王胜, 等. 西北干旱区陆 – 气相互作用试验(NWC – ALIEX)及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 427 – 441.
ZHANG Q, HUANG R H, WANG S, et al. NWC – ALIEX and its research advances[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4): 427 – 441.
- [10] MARSHAM J H, PARKER D J, GRAMS C M, et al. Observations of mesoscale and boundary – layer scale circulations affecting dust transport and uplift over the Sahara[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(23): 6979 – 6993.
- [11] 洪莹莹, 刘一鸣, 张舒婷, 等. 珠三角城市化对大气边界层特征影响的数值模拟[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2015, 54(1): 116 – 123.
HONG Y Y, LIU Y M, ZHANG S T, et al. Numerical simulation of the urbanization impact on atmospheric boundary layer characteristics over the Pearl River Delta, China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2015, 54(1): 116 – 123.
- [12] ZHANG Y H, SEIDEL D J, ZHANG S D. Trends in planetary boundary layer height over Europe[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(24): 10071 – 10076.
- [13] 蔡新玲, 吴素良, 王繁强, 等. 西安市近 10 年大气稳定度和边界层厚度特征[J]. *气象科技*, 2007, 35(6): 814 – 817.
CAI X L, WU S L, WANG F Q, et al. Characteristics of atmospheric stabilities and ABL thickness in recent 10 years in Xi'an[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2007, 35(6): 814 – 817.
- [14] 张杰, 张强, 唐从国. 极端干旱区大气边界层厚度时间演变及其与地表能量平衡的关系[J]. *生态学报*, 2013, 33(8): 2545 – 2555.
ZHANG J, ZHANG Q, TANG C G, et al. Temporal variety of boundary layer height over deep arid region and the relations with energy balance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(8): 254 – 2555.
- [15] 李岩瑛, 张强, 张爱萍, 等. 干旱半干旱区边界层变化特征及其影响因子分析[J]. *高原气象*, 2016, 35(2): 385 – 396.
LI Y Y, ZHANG Q, ZHANG A P, et al. Analysis on atmosphere boundary layer variation characteristics and their impact factors in arid region and semi-arid region over northwest China[J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(2): 385 – 396.
- [16] ECMWF:IFS Documentation—Cy40r1, Part IV: Physical processes [R/OL]. <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2014/9204-part-iv-physical-processes.pdf>.
- [17] 张歌. 基于微波辐射观测的大气边界层结构特征及其对大气质量的影响研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
- [18] 徐桂荣, 崔春光, 周志敏, 等. 利用探空资料估算青藏高原及下游地区大气边界层高度[J]. *暴雨灾害*, 2014, 33(3): 217 – 227.
XU G R, CUI C G, ZHOU Z M, et al. Atmospheric boundary layer heights estimated from radiosonde observations over the Qinghai – Tibet Plateau and its downstream area [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2014, 33(3): 217 – 227.
- [19] SEIDEL D J, ZHANG Y H, BELJAARS A, et al. Climatology of the planetary boundary layer over the continental United States and Europe[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(D17106): 1 – 15.
- [20] LIU S Y, LIANG X Z. Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(21): 5790 – 5809.