氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

极端干旱区边界层高度与干湿的气候变化特征及相互关系分析

郭燕玲 毛文茜 王泓宇 张文煜

Climate Change Characteristics of the Boundary Layer Height with Dryness and Wetness and Their Relationship in Extreme Arid Areas

GUO Yanling MAO Wenqian WANG Hongyu ZHANG Wenyu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20119

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

气溶胶激光雷达和无线电探空观测边界层高度的对比分析

Comparitive Analysis of Planetary-Boundary-Layer Height Based on Aerosol Lidar and Radiosonde

气候与环境研究. 2019, 24(5): 650 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19051

1982~1999年中国地区叶面积指数变化及其与气候变化的关系

Variation of Leaf Area Index in China from 1982 to 1999 and Its Relationship with Climate Change

气候与环境研究. 2017, 22(2): 162 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16061

中国北方干旱半干旱区降水的多年代际变化特征及其与太平洋年代际振荡的关系

Multi-decadal Variability of Precipitation in Arid and Semi-Arid Region of Northern China and Its Relationship with Pacific Decadal Oscillation Index

气候与环境研究. 2017, 22(6): 643 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16036

青藏高原植被指数最新变化特征及其与气候因子的关系

The Latest Change in the Qinghai-Tibetan Plateau Vegetation Index and Its Relationship with Climate Factors

气候与环境研究. 2017, 22(3): 289 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.14247

年中国生态脆弱区气候变化特征分析

Climate Change Characteristics in Ecological Fragile Zones in China during 1980-2014

气候与环境研究. 2019, 24(4): 455 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18058

21世纪气候变化情景下环北极地区植被生长季与活动积温变化

Changes in Vegetation Growing Season and Active Accumulated Temperature in Circum-Arctic Region under 21st Century Climate Change Scenario

气候与环境研究. 2020, 25(5): 543 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20014

关注微信公众号，获得更多资讯信息

郭燕玲, 毛文茜, 王泓宇, 等. 2021. 极端干旱区边界层高度与干湿的气候变化特征及相互关系分析 [J]. 气候与环境研究, 26(5): 532−540. GUO Yanling, MAO Wenqian, WANG Hongyu, et al. 2021. Climate Change Characteristics of the Boundary Layer Height with Dryness and Wetness and Their Relationship in Extreme Arid Areas [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (5): 532−540. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20119

极端干旱区边界层高度与干湿的气候变化特征及相互关系分析

郭燕玲[1] 毛文茜[1] 王泓宇[1] 张文煜[1,2]

1 兰州大学大气科学学院，半干旱气候变化教育部重点实验室，兰州 730000
2 郑州大学地球科学与技术学院，郑州 450001

摘 要 利用 1950～2019 年 ERA5 再分析数据，分析了极端干旱区边界层高度（Boundary Layer Height, BLH）和气候干湿因子（干燥度指数，Aridity Index, AI）的时空变化特征及相互关系。结果表明：BLH 年均值为 695 m，呈现东高西低的分布特点，BLH 在东部升高、西部降低。AI 均值为 0.03，以塔里木盆地、中心戈壁等地为低值中心向四周递增，AI 在东部减小、西部增大。时间变化上，1950～1964 年、1965～1993 年、2010～2019 年，BLH 波动降低，AI 波动增大，1993～2009 年 BLH 抬升、AI 减小。不同下垫面不同时段两者变化 80% 的年份呈反位相；两者基本为负相关，其中西部绿洲下垫面相关性最强，相关系数达到－0.79。随着东部 BLH 的抬升、西部 BLH 的降低，AI 显示 70 年来极端干旱区的范围整体有向东移动的趋势。

关键词 极端干旱区 边界层高度 干燥度指数 气候变化
文章编号 1006-9585(2021)05-0532-09 **中图分类号** P461 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20119

Climate Change Characteristics of the Boundary Layer Height with Dryness and Wetness and Their Relationship in Extreme Arid Areas

GUO Yanling[1], MAO Wenqian[1], WANG Hongyu[1], and ZHANG Wenyu[1,2]

1 *College of Atmospheric Sciences*, *Lanzhou University*, *Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education*, *Lanzhou* 730000
2 *School of Geoscience and Technology*, *Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450001

Abstract The temporal and spatial variation characteristics of the boundary layer height (BLH) and climate dryness and wetness factor (Aridity Index, AI) and their relationship in extremely arid areas are analyzed based on the ERA5 (the fifth generation reanalysis product of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) reanalysis data from 1950 to 2019. Results show that the BLH exhibits an average value of 695 m. The distribution characteristics of BLH are high in the east and low in the west. In addition, the BLH rises in the east and decreases in the west. The AI has an average value of 0.03. AI values increase in all directions, with the Tarim Basin and Central Gobi as the center of the low values. Meanwhile, the AI decreases in the east and increases in the west. In terms of temporal changes, the BLH fluctuates

收稿日期 2020-09-14；**网络预出版日期** 2021-03-15
作者简介 郭燕玲，女，1989 年出生，博士研究生，主要从事大气物理学与大气环境研究。E-mail: guoyl17@lzu.edu.cn
通讯作者 毛文茜，E-mail: maowq16@lzu.edu.cn
资助项目 国家自然科学基金 41875085、41630421
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41875085 and 41630421)

lower, and the AI increases from 1950 to 1964, 1965 to 1993, and 2010 to 2019; whereas, the BLH rises and the AI decreases from 1993 to 2009. The BLH and AI have opposite trends at different times in different substrata, with 80% of the years showing inverse phase changes. These two values are basically negatively correlated, with the strongest correlation in the western oasis subsurface, where the correlation coefficient reaches −0.79. With the rise of the BLH in the east and its decrease in the west, the AI shows that the scope of extreme arid areas has been moving eastward in the recent 70 years.

Keywords Extreme arid region, Boundary layer height, Aridity Index, Climate change

1 引言

东亚极端干旱区下垫面复杂植被稀疏，生态环境脆弱，是全球气候变化响应敏感的地区之一（Huang et al., 2012; Zhang and Zhou, 2015; Li et al., 2019）。极端干旱区占地广阔（赵艳茹，2018），是中国防风固沙生态功能区的重要组成部分（马彬，2017），其干湿的气候变化，关系到区域生态环境平衡以及西北荒漠化防治（陈梦熊，2004；Harris et al., 2010）。施雅风（2003）的研究表明 20 世纪 80 年代以来，中国西北干旱区有从暖干向暖湿变化的趋势。Han et al.（2016）对 1961～2000 年西北地区降水变化的分析发现，60 年代以来极端干旱区降水量有增加趋势。Kumar et al.（2015）研究全球干湿变化趋势的过程中发现，极端干旱区在 1985～2005 年有变湿趋势。马彬（2017）的研究发现极端干旱区在 1961～2015 年间有变湿的趋势。然而，Zhang and Zhou（2015）的研究表明 20 世纪 50 年代以来西北地区干旱事件有增加趋势。Li et al.（2018）的研究也发现 1961～2017 年间该区极端干旱和极端高温天气发生的频率呈上升趋势，加重了区域气候干旱情况。以上研究表明，极端干旱区干湿的气候变化仍需要进一步探讨。

极端干旱区南部毗邻昆仑山脉、北部为阿尔泰山、西部为天山山脉、东部远离海岸，受外部物质能量输送的影响较小。而地表与上覆自由大气之间物质、能量、水汽等的交换过程均发生在边界层内（Feng et al., 2015; McGrath-Spangler, 2016; Ma and Bao, 2016），因此边界层过程在极端干旱区产生的影响不容忽视。边界层高度（Boundary Layer Height，BLH）是综合表征边界层过程的一个重要参数，极端干旱区近地表增温显著，感热通量较强，BLH 较一般地区更为深厚（张强和王胜，2008；乔娟，2009；韦志刚等，2010；张杰等，2013，杨洋等，2016），日变化幅度也高于其他地区（Guo et al., 2016）。李岩瑛等（2016）利用 2006～2012 年逐日探空资料对中国西北干旱区 BLH 变化特征进行了分析，发现干旱区 BLH 变化呈减小趋势。万云霞等（2017）研究发现，1979～2009 年间西北部分地区 BLH 降低显著。而赵艳茹等（2017a，2017b）利用再分析数据分析发现，1900～2010 年间东亚干旱半干旱区 BLH 主要呈增加趋势。前期研究大多基于少数站点的分析，再分析数据的不断更新从空间和时间上弥补了观测数据的不足，为进一步开展这一区域 BLH 的研究提供了更好的基础。

BLH 代表了大气边界层对水汽、有效热容等的容纳能力（Ahlgrimm and Randall, 2006; Davy and Esau, 2015）。BLH 的变化会引起有效热容的改变，进而影响温度的变化（Esau, 2008; Esau and Zilitinkevich, 2010），对气候产生影响。从雨滴损耗的角度来看，BLH 越高，降水过程中的雨滴蒸发率越大，导致降水量越小，使得干旱化越严重（Rosenfeld and Mintz, 1988; Itano, 1997, 1998）。李岩瑛等（2012）的研究也表明西北干旱区的气候干湿变化与最大 BLH 关系密切，BLH 越高，干旱越严重。这些研究说明 BLH 与干湿气候变化之间存在事实联系。

本文利用 ERA5 再分析数据，对极端干旱区 BLH 及气候干湿因子（干燥度指数，Aridity Index, AI）进行系统分析，了解极端干旱区 BLH 与 AI 指数在不同下垫面不同气候时段的变化特征，探究 BLH 与干湿气候变化之间存在的关系。

2 数据与方法

研究区域为（37°N～50°N，77°E～110°E）范围内的极端干旱区，即 AI≤0.05 的区域（Huang et al., 2016）（见图 1），归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）数据由美国亚利桑那大学领导、NASA 资助的多机构合作项目提供的 VIP30（Vegetation Index and Phenology）产品，时间长度为 1981～2014 年。由

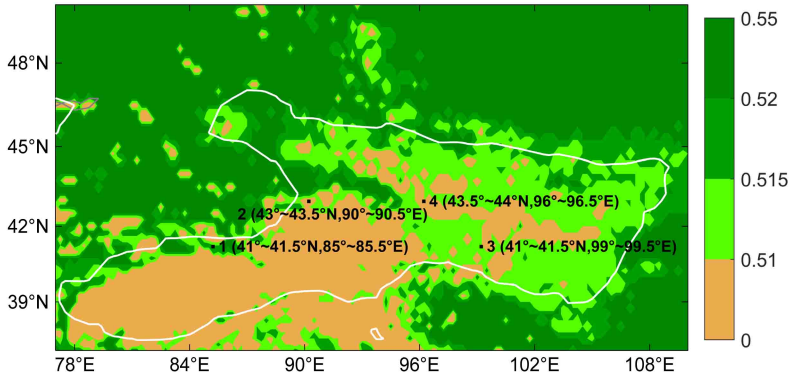

图 1 研究区域及 1981～2010 年 7 月多年平均归一化植被指数（NDVI）空间分布（白线为极端干旱区分界，1 代表绿洲下垫面，2 代表山地，3 代表沙漠，4 代表戈壁）

Fig. 1 Average spatial distribution of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the study area in Jul from 1981 to 2010 (white line corresponds to the boundary of the extreme arid region, AI≤0.05; 1 represents the underlying surface of the oasis, 2 represents the mountain, 3 represents the desert, and 4 represents the Gobi)

图可知，极端干旱区主要由东部的蒙古高原、南部的柴达木盆地、西部塔里木盆地、北部的戈壁阿尔泰山等组成，地形复杂，下垫面以沙漠、戈壁为主，此外还有盆地边缘的绿洲区域，部分山地等。该地植被覆盖在空间上也存在很大差异，综合考虑选取绿洲（41°N～41.5°N，85°E～85.5°E）、山地（43°N～43.5°N，90°E～90.5°E）、沙漠（41°N～41.5°N，99°E～99.5°E）、戈壁（43.5°～44°N，96°E～96.5°E）共 4 个小区域代表不同下垫面。

ECMWF（European Centre for Medium Range Weather Forecasts）提供的 ERA5 再分析数据，时间长度为 1950～2019 年，空间分辨率为 0.25°（纬度）×0.25°（经度）。文章分析的主要变量有 BLH 和 AI 指数，其中 BLH 由 ERA5 直接提供，AI 指数利用 ERA5 提供的数据通过计算得到。

实测数据选取甘肃省敦煌站和酒泉站的 L 波段雷达探空数据，时间长度为 2014～2019 年。

2.1 AI 指数的计算

AI 的计算公式如下：

$$\mathrm{AI}=\frac{P}{\mathrm{PET}}, \qquad (1)$$

其中，降水量 P 由 ERA20C 数据直接给出；潜在蒸发量 PET（为月均值，单位：mm/d）根据 Penman –Monteith 公式计算得出（Allen et al., 1998）：

$$\mathrm{PET}=\frac{0.408\Delta(R_{\mathrm{n}}-G)+\gamma\dfrac{900}{T+273}u_2(e_{\mathrm{s}}-e_{\mathrm{a}})}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)}, \qquad (2)$$

式中，R_{n} 代表净辐射通量（单位：MJ m^{-2} d^{-1}）；G 代表土壤热通量（单位：MJ m^{-2} d^{-1}）；T 代表 2 m 高度处气温（单位：°C）；e_{s}为饱和水汽压（单位：kPa）；e_{a}为实际水汽压（单位：kPa）；Δ为饱和水汽压—气温关系斜率（单位：kPa °C^{-1}）；γ 为干湿计常数（单位：kPa °C^{-1}）；u_2为 2 m 高度的风速（单位：m/s）；0.34（单位：s/m）和 900（单位：K mm s^{-3} Mg^{-1} d^{-1}）分别为参考作物类型和计算时间步长确定的常数。土壤热通量 G 的计算公式如下：

$$G=0.07(T_{i+1}-T_{i-1}), \qquad (3)$$

其中，T_i代表当月的平均温度，T_{i+1}为下个月平均温度，T_{i-1}为前一个月平均温度，单位均为°C。如果T_{i+1}未知，

$$G=0.14(T_i-T_{i-1}). \qquad (4)$$

最后，年潜在蒸发量值由潜在蒸发量月值累加得到。

2.2 气候倾向率

气候要素随时间的变化趋势可用一元线性回归方程表示：

$$x_i=A+B\cdot t_i, \quad (i=1,2,3,\ldots,n), \qquad (5)$$

其中，x_i表示第 i 年该气候要素的值，t_i表示对应的时间，A 为回归常数，B 为回归系数，10B即为气候倾向率，单位为（10 a）$^{-1}$。

3 结果分析

3.1 BLH 再分析数据的适用性分析

从图 2 可知，2014～2019 年敦煌站和酒泉站 BLH 的 ERA5 再分析数据与探空观测数据的时间

变化特征差异不大，趋势基本一致，说明 BLH 的 ERA5 再分析数据适用性较好。

3.2　BLH 和 AI 指数的空间分布特征

从图 3 可知，1950～2019 年极端干旱区 BLH 年均值为 695 m，空间分布呈现东高西低的特点，高值中心位于东部的巴丹吉林沙漠以及戈壁阿尔泰山，基本在 750～800 m 之间；BLH 在西部塔里木盆地相对较低，一般在 600～700 m 之间。从气候倾向率来看，70 年来 BLH 呈现东部升高、西部降低的特点：如东部巴丹吉林沙漠、塔里木盆地东南

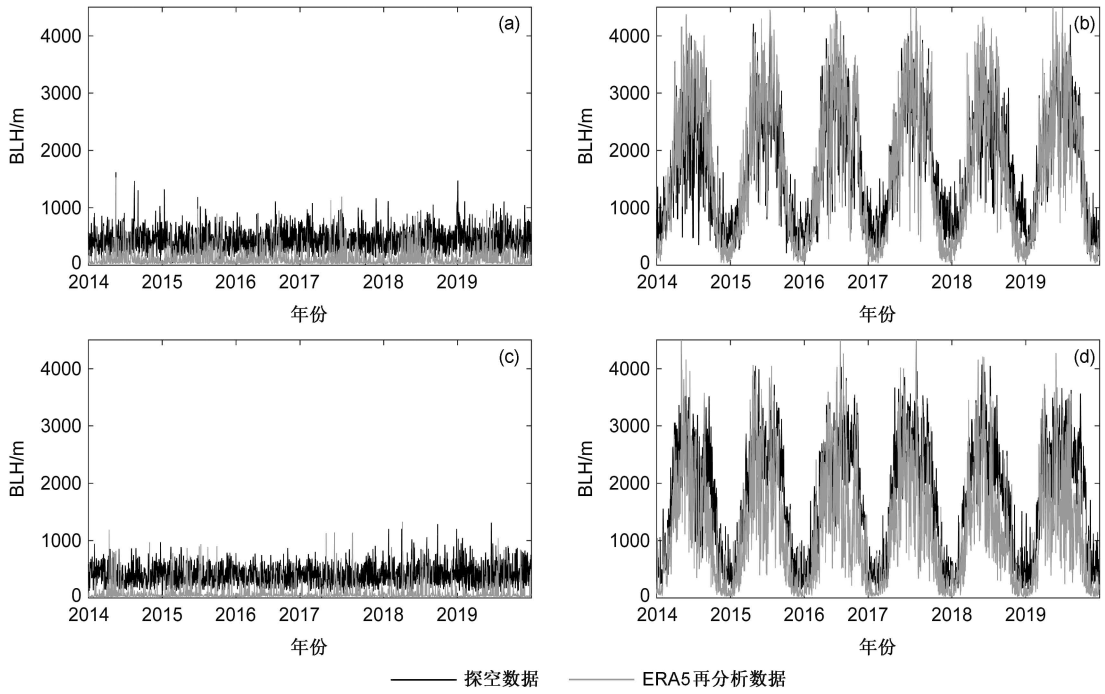

图 2　（a、b）敦煌和（c、d）酒泉 07:00（左列）和 19:00（右列）ERA5 再分析数据与探空观测的边界层高度（Boundary Layer Height, BLH）对比

Fig. 2　Comparison the ERA5 reanalysis Boundary Layer Height (BLH) data and sounding observational BLH data in (a, b) Dunhuang and (c, d) Jiuquan at 07:00 (left column) and 19:00 (right column)(a, b) Dunhuang and (c, d) Jiuquan at 07:00 (left column) and 19:00 (right column)

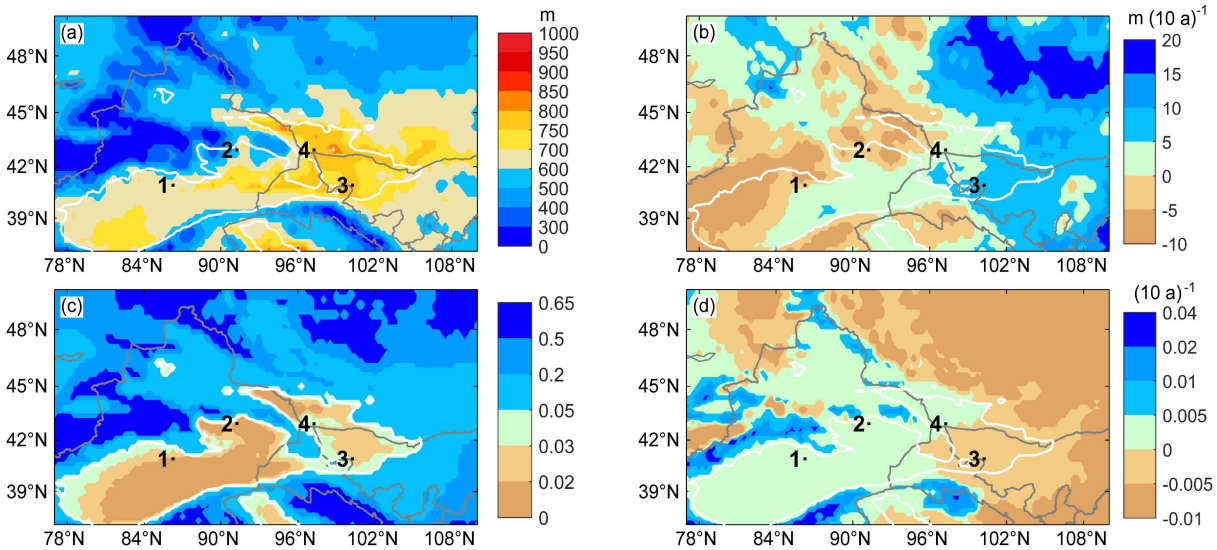

图 3　1950～2019 年极端干旱区（a、b）BLH 和（c、d）AI 指数的年均值（左列）和气候倾向率（右列）空间分布（图例同图 1）

Fig. 3　Spatial distributions of the average annual value (left column) and the climatic trend (right column) of (a, b) BLH and (c, d) AI index in the extreme arid region from 1950 to 2019 (legends are the same as in Fig. 1)

部等大部分区域均呈现抬升趋势，而在塔里木盆地西部边缘 BLH 呈降低趋势。

极端干旱区 AI 指数的年均值约为 0.03，低值中心位于西部塔里木盆地东南部、中心戈壁等区域，气候最为干旱；AI 指数在塔里木盆地西部边缘、巴丹吉林沙漠等区域则相应较大，气候相对湿润。AI 指数的变化趋势呈现东部减小（变干）、西部增大（变湿）的特点：东部巴丹吉林沙漠呈现减小趋势，西部大部分区域则为增大趋势。整体来看，极端干旱区 BLH 与 AI 指数的变化，在空间分布上存在一定联系，如东部 BLH 升高区域，AI 指数减小，西部 BLH 降低区域，AI 指数增大。

3.3 BLH 和 AI 指数的时间变化特征

3.3.1 区域均值的时间变化

图 4 为极端干旱区 BLH 和 AI 指数区域均值进行标准化后的年际变化及距平变化。从图 4 可知，1950～2019 年极端干旱区 BLH 整体呈波动抬升趋势，气候倾向率为 0.7 m/10 a。1950～1964 年 BLH 显著降低，由正距平转为负距平，气候倾向率达到−25.0 m/10 a；1965 年后 BLH 由低谷迅速抬升，1966 年出现峰值 742 m；随后 BLH 波动降低，基本处于负距平，于 1992 年达到最低值 651 m；1993～2009 年 BLH 逐渐抬升，由负距平开始转为正距平，气候倾向率达到 27.1 m/10 a；2010 年后 BLH 波动降低。

极端干旱区 AI 指数整体呈波动增大趋势，气候倾向率为 0.8×10^{-3}/10 a。1950～1969 年间 AI 指数逐渐增大，气候倾向率达到 3.1×10^{-3}/10 a；1970 年后 AI 指数波动增大，由负距平转为正距平，于 1993 年达到峰值 0.049；1994～2009 年 AI 指数逐渐减小，由正距平转为负距平，气候倾向率达到 -8.7×10^{-3}/10 a；2010 年后 AI 指数波动增大。

由以上分析可知，1950～1964 年、2010～2019 年 BLH 逐渐降低，AI 指数逐渐增大；1993～2009 年 BLH 逐渐抬升，AI 指数逐渐减小；60 年代 BLH 变化波动较大，AI 指数变化也较大。此外，BLH 在 1964 年、1966 年、1992 年、2009 年分别达到峰谷、峰值、峰谷、峰值，AI 指数在 1964 年、1965 年、1993 年、2009 年分别达到峰值、峰谷、峰值、峰谷，说明两者在变化过程中呈现一定的反位相变化。距平变化也显示，两者有 80%

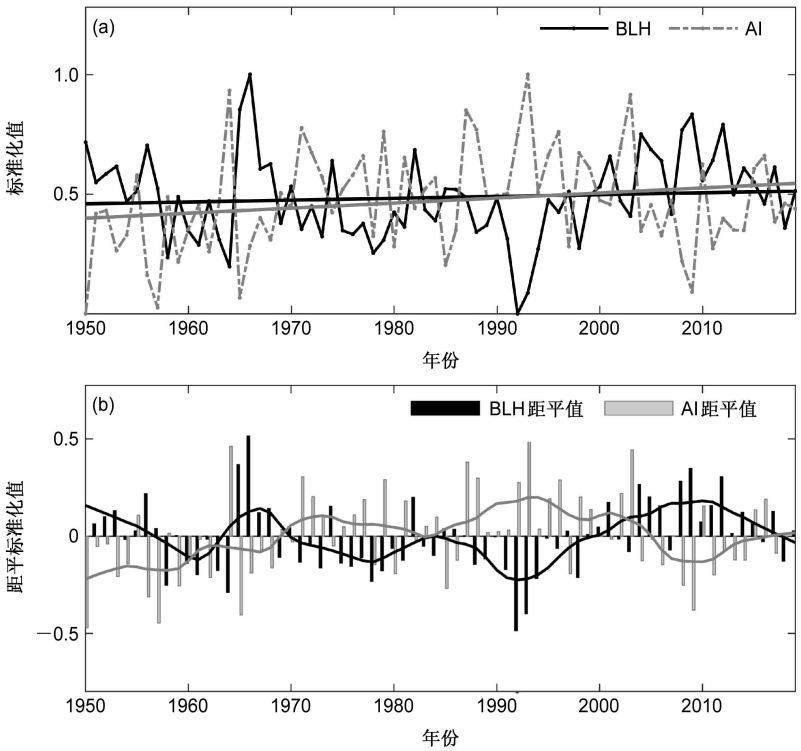

图 4 1950～2019 年极端干旱区（a）区域平均 BLH、AI 指数的年均序列（直线为线性趋势）和（b）区域平均 BLH、AI 指数的距平变化（曲线为 11 年滑动平均）

Fig. 4 (a) Annual series of the average BLH and AI indexes in the extreme arid region (lines are linear trends) and (b) anomaly change of average BLH and AI index in the region (curve are the 11-year moving averages) from 1950 to 2019

的年份呈反位相变化，这意味着 BLH 较高的年份往往是 AI 指数相对较低的年份，气候相对干旱，BLH 较低的年份 AI 指数相对较高，气候相对湿润。相关性分析也发现 BLH 和 AI 指数相关系数为 −0.62，呈显著负相关。

选取 1950～1964 年、2010～2019 年两个气候时段，分析极端干旱区 BLH 和 AI 指数的空间分布（图 5）。对比两个气候时段可以发现，2010～2019 年东部巴丹吉林沙漠和戈壁阿尔泰山的 BLH 明显高于 1950～1964 年，AI 指数显示 2010 年～2019 年间极端干旱区的分界线较 1950～1964 年更偏东，该地更加干旱，极端干旱区向东扩张；2010～

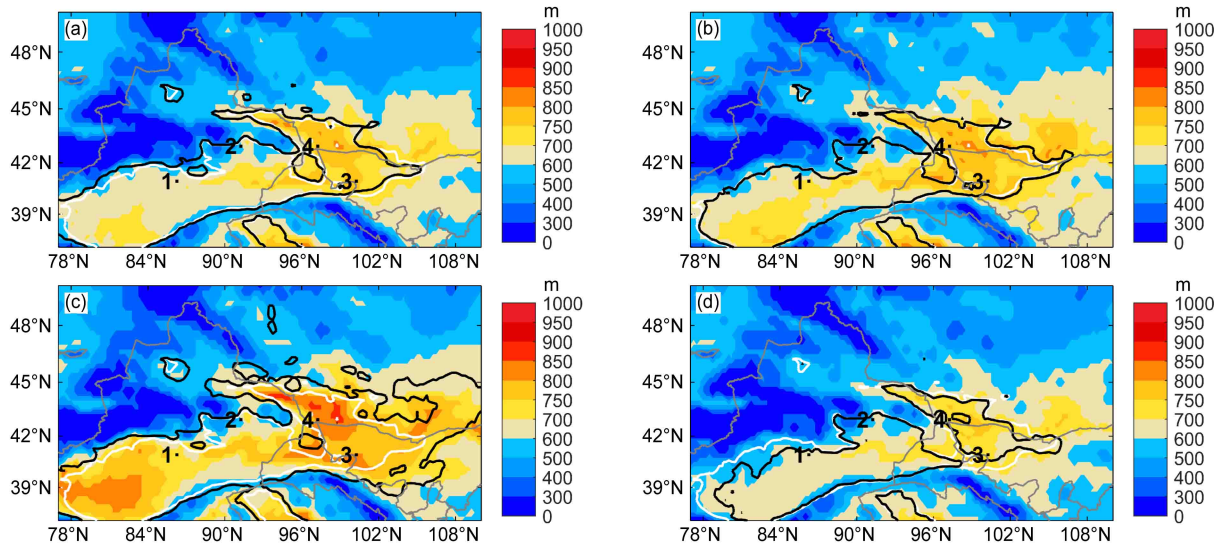

图 5　（a）1950～1959 年、（b）2010～2019 年、（c）1965 年和（d）1992 年极端干旱区 BLH 均值的空间分布和极端干旱区边界（白线为 1950~2019 年极端干旱区分界，黑线为不同气候时段极端干旱区分界，其他同图 1）

Fig. 5　Spatial distribution of the mean values of BLH and the extreme drought area boundaries in different climatic periods (a) 1950−1959 and (b) 2010−2019 and in special years (c) 1965 and (d) 1992 (white line represents the extreme drought area boundaries from 1950 to 2019 and black line represents the extreme drought area boundaries in different climatic periods; others are the same as Fig. 1)

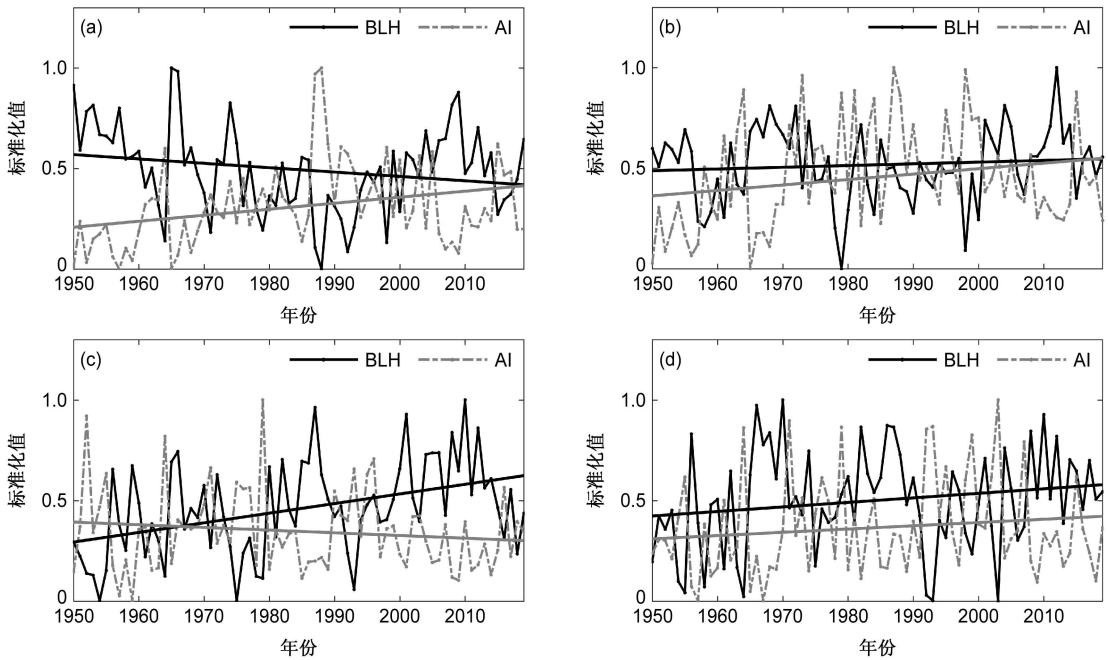

图 6　1950～2019 年（a）绿洲、（b）山地、（c）沙漠、（d）戈壁的年均 BLH 和 AI 指数时间序列

Fig. 6　Time series of the annual average BLH and AI indexes from 1950 to 2019 in (a) oasis, (b) mountain, (c) desert, and (d) the Gobi

表 1 各区域 BLH 与 AI 指数线性趋势和相关系数

Table 1 Linear trend and correlation coefficient between the BLH and AI index in each region

	BLH线性趋势/m (10 a)$^{-1}$					AI指数线性趋势/10^{-3} (10 a)$^{-1}$					相关系数				
	区域均值	A区	B区	C区	D区	区域均值	A区	B区	C区	D区	区域均值	A区	B区	C区	D区
1950～2019年	0.7	−2.7	0.7	5.6	2.2	0.8	2.5	1.1	−1.0	1.1	−0.62	−0.79	−0.53	−0.54	−0.55
1950～1964年	−25.0	−47.5	−13.6	12.4	−3.9	8.5	20.0	18.0	−4.8	8.0	−0.71	−0.85	−0.53	−0.65	−0.74
1965～2009年	0.4	−0.4	−2.0	5.8	5.7	0.4	2.1	1.3	−2.3	3.1	−0.67	−0.76	−0.59	−0.63	−0.69
2010～2019年	27.1	−10.4	−22.4	−67.4	−22.8	−8.7	5.6	5.6	11	−2.1	−0.38	−0.85	−0.69	−0.35	0.28

2019 年西部塔里木盆地的 BLH 则低于 1950～1964 年，极端干旱区的分界向东收缩，塔里木河流域气候由极端干旱变得相对湿润。总体来看 2010～2019 年极端干旱区在东部范围扩张，在西部范围收缩，极端干旱区整体向东移动。此外还可以看出较高（低）的 BLH 对应较大（小）的极端干旱区范围，1966 年和 1992 年两个特殊年份 BLH 和 AI 指数的空间分布同样说明了这种关系，1966 年极端干旱区 BLH 达到峰值，该年极端干旱区边界线向东、向西均有显著的扩张，1992 年 BLH 处于峰谷，极端干旱区范围明显较小，在西部塔里木河流域尤为显著。

3.3.2 不同下垫面的时间变化

极端干旱区四周分布高大山系，内部下垫面复杂。由图 6 和表 1 可知，1950～2019 年绿洲下垫面 BLH 整体呈降低趋势，气候倾向率为−2.7 m/10 a，通过显著性检验；山地、沙漠及戈壁下垫面的 BLH 均呈波动抬升趋势。AI 指数在巴丹吉林沙漠下垫面呈减小趋势，70 年来该区气候变得更干燥，极端干旱区范围逐渐扩大；绿洲、山地和戈壁下垫面 AI 指数则呈增大趋势，气候相对变得湿润，极端干旱区范围有缩小趋势。

4 类区域 BLH 和 AI 指数呈反位相的年份占比分别达到 84.3%、77.1%、67.1%、74.3%，两者相关系数分别为−0.79、−0.53、−0.54、−0.55，均为显著负相关。1950～1964 年间，4 类下垫面的 BLH 和 AI 指数负相关性最强，2010～2019 年间负相关性最弱。不同下垫面 BLH与 AI 指数的变化趋势虽然不同，但在变化过程中两者变化趋势基本相反，即 BLH 抬升（降低），AI 指数减小（增大）。

4 结论

文章利用 ERA5 再分析数据集对 1950 年～2019 年间极端干旱区 BLH 与 AI 指数的时空变化特征进行统计分析，对两个变量的变化特征及相互关系得到了进一步的认识。主要结论如下：

（1）空间分布上：极端干旱区 BLH 年均值为 695 m，呈现东高西低的分布特点；变化趋势呈现东部升高、西部降低的特点。AI 指数均值为 0.03，以塔里木盆地、中心戈壁等区域为低值中心，向四周递增；变化趋势则呈现东部减小、西部增大的特点。

（2）时间变化上：1950～2019 年间，极端干旱区 BLH 整体呈波动抬升趋势，气候倾向率为 0.7 m/10 a，AI 指数整体呈波动增大趋势，气候倾向率为 0.8×10^{-3} /10 a；1950～1964 年 BLH 降低，气候倾向率为−25.0 m/10 a，AI 指数增大，气候倾向率为 3.1×10^{-3} /10 a；1993～2009 年 BLH 显著抬升，气候倾向率达到 27.1 m/10 a，AI 指数显著减小，气候倾向率达到 -8.7×10^{-3} /10 a；2010～2019 年 BLH 波动降低，AI 指数波动增大。

（3）两者变化关系分析：BLH 和 AI 指数的平均值在空间分布上具有较好的对应关系，BLH 越高的区域，AI 指数较小，气候干燥，BLH 越低的区域，AI 指数相对较大，气候相对湿润。极端干旱区东部 BLH 抬升的区域，AI 指数减小，气候变得越加干燥，极端干旱区范围扩大；极端干旱区西部 BLH 降低的区域，AI 指数增大，气候变得相对湿润，极端干旱区范围缩小。不同下垫面不同气候时段 BLH 和 AI 指数基本呈负相关，70 年来区域均值的相关系数为－0.62，呈反位相变化的年份达到 80%。其中，西部塔里木河绿洲区域负相关性最强，相关系数达到－0.79。

参考文献（References）

Ahlgrimm M, Randall D A. 2006. Diagnosing monthly mean boundary layer properties from reanalysis data using a bulk boundary layer

model [J]. J. Atmos. Sci., 63(3): 998−1012. doi:10.1175/JAS3669.1

Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop Evapotranspiration–Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. Rome: FAO.

陈梦熊. 2004. 西北干旱区荒漠化成因分析与防治对策 [J]. 国土资源科技管理, 21(6): 9−13. Chen Mengxiong. 2004. An analysis of the origin of desertification in arid area of Northwest China and corresponding countermeasures [J]. Sci. Technol. Manage. Land Resour. (in Chinese), 21(6): 9−13. doi:10.3969/j.issn.1009-4210.2004.06.004

Davy R, Esau I. 2015. Planetary boundary layer as an essential component of the earth's climate system [J]. Geophys. Res. Abstr., 17: 10029.

Esau I N. 2008. Formulation of the planetary boundary layer feedback in the Earth's climate system [J]. J. Comput. Tech., : 13.

Esau I, Zilitinkevich S. 2010. On the role of the planetary boundary layer depth in the climate system [J]. Adv. Sci. Res., 4: 63−69. doi:10.5194/asr-4-63-2010

Feng X L, Wu B F, Yan N N. 2015. A method for deriving the boundary layer mixing height from MODIS atmospheric profile data [J]. Atmosphere, 6(9): 1346−1361. doi:10.3390/atmos6091346

Guo J P, Miao Y C, Zhang Y, et al. 2016. The climatology of planetary boundary layer height in china derived from radiosonde and reanalysis data [J]. Atmos. Chem. Phys., 16(20): 13309−13319. doi:10.5194/acp-16-13309-2016

Han X Q, Xue H W, Zhao C S, et al. 2016. The roles of convective and stratiform precipitation in the observed precipitation trends in Northwest China during 1961−2000 [J]. Atmos. Res., 169: 139−146. doi:10.1016/j.atmosres.2015.10.001

Harris J A, Hobbs R J, Higgs E, et al. 2010. Ecological restoration and global climate change [J]. Restorat. Ecol., 14(2): 170−176. doi:10.1111/j.1526-100X.2006.00136.x

Huang J, Guan X, Ji F. 2012. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions [J]. Atmos. Chem. Phys., 12(12): 5391−5398. doi:10.5194/acp-12-5391-2012

Huang J P, Ji M X, Xie Y K, et al. 2016. Global semi-arid climate change over last 60 years [J]. Climate Dyn., 46(3-4): 1131−1150. doi:10.1007/s00382-015-2636-8

Itano T. 1997. Rainfall over the arid area in the northwestern China: An analysis during HEIFE [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 75(4): 851−865. doi:10.2151/jmsj1965.75.4_851

Itano T. 1998. Synoptic disturbance and rainfall over the arid area in the northwestern China [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 76(2): 325−333. doi:10.2151/jmsj1965.76.2_325

Kumar S, Allan R P, Zwiers F, et al. 2015. Revisiting trends in wetness and dryness in the presence of internal climate variability and water limitations over land [J]. Geophys. Res. Lett., 42(24): 10867−10875. doi:10.1002/2015GL066858

李岩瑛, 张强, 胡兴才, 等. 2012. 西北干旱区和黄土高原大气边界层特征对比及其对气候干湿变化的响应 [J]. 冰川冻土, 34(5): 1047−1058. Li Yanying, Zhang Qiang, Hu Xingcai, et al. 2012. Atmosphere boundary layer characteristics and their responses to wetness change over arid regions and Loess Plateau in northwest China [J]. J. Glaciol. Geocryol. (in Chinese), 34(5): 1047−1058.

李岩瑛, 张强, 张爱萍, 等. 2016. 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, 35(2): 385−396. Li Yanying, Zhang Qiang, Zhang Aiping, et al. 2016. Analysis on atmosphere boundary layer variation characteristics and their impact factors in arid region and semi-arid region over northwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35(2): 385−396. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00153

Li X, You Q L, Ren G Y, et al. 2018. Concurrent droughts and hot extremes in northwest China from 1961 to 2017 [J]. Int. J. Climatol., 39(4): 2186−2196. doi:10.1002/joc.5944

Li X D, Shao M A, Zhao C L, et al. 2019. Spatial variability of soil water content and related factors across the Hexi Corridor of China [J]. J. Arid Land, 11(1): 123−134. doi:10.1007/s40333-018-0123-x

马彬. 2017. 1960~2015 年中国极端干旱区干湿变化及成因分析 [D]. 西北师范大学硕士学位论文, 70pp. Ma Bin. 2017. Analysis on evolution and causes of aridity–wetness in the hyperarid zone of China from 1960 to 2015 [D]. M. S. thesis (in Chinese), Northwest Normal University, 70pp.

Ma L M, Bao X W. 2016. Parametrization of planetary boundary–layer height with helicity and verification with tropical cyclone prediction [J]. Bound.-Layer Meteor., 160(3): 569−593. doi:10.1007/s10546-016-0156-7

McGrath-Spangler E L. 2016. The impact of a boundary layer height formulation on the GEOS-5 model climate [J]. J. Geophys. Res., 121(7): 3263−3275. doi:10.1002/2015JD024607

乔娟. 2009. 西北干旱区大气边界层时空变化特征及形成机理研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文, 61pp. Qiao Juan. 2009. The temporal and spatial characteristics of atmospheric boundary layer and its formation mechanism over arid region of northwest China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences, 61pp.

Rosenfeld D, Mintz Y. 1988. Evaporation of rain falling from convective clouds as derived from radar measurements [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 27(3): 209−215. doi:10.1175/1520-0450(1988)027<0209:eorffc>2.0.co;2

施雅风. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估 [M]. 北京: 气象出版社, 124pp. Shi Yafeng. 2003. An Assessment of the Issues of Climatic Shift from Warm−Dry to Warm−Wet in Northwest China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 124pp.

万云霞, 张宇, 张瑾文, 等. 2017. 感热变化对东亚地区大气边界层高度的影响 [J]. 高原气象, 36(1): 173−182. Wan Yunxia, Zhang Yu, Zhang Jinwen, et al. 2017. Influence of sensible heat on planetary boundary layer height in East Asia [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 36(1): 173−182. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00001

韦志刚, 陈文, 黄荣辉. 2010. 敦煌夏末大气垂直结构和边界层高度特征 [J]. 大气科学, 34(5): 905−913. Wei Zhigang, Chen Wen, Huang Ronghui. 2010. Vertical atmospheric structure and boundary layer height in the summer clear days over Dunhuang [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(5): 905−913. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.06

杨洋, 刘晓阳, 陆征辉, 等. 2016. 博斯腾湖流域戈壁地区大气边界层高度特征研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 52(5): 829–836. Yang Yang, Liu Xiaoyang, Lu Zhenghui, et al. 2016. Study on depth of atmospheric boundary layer in Gobi desert regions of the Bosten Lake basin [J]. Acta Sci. Nat. Univ. Pekinensis (in Chinese), 52(5): 905–913. doi: 10.13209/j.0479-8023.2015.145

张杰, 张强, 唐从国. 2013. 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, 33(8): 2545−2555. Zhang Jie, Zhang Qiang, Tang Congguo. 2013. Temporal variety of boundary layer height over deep arid region and the relations with energy balance [J]. Acta Ecologica Sinica, 33(8): 2545−2555. doi:10.5846/stxb201201090046

张强, 王胜. 2008. 西北干旱区夏季大气边界层结构及其陆面过程特征 [J]. 气象学报, 66(4): 599−608. Zhang Qiang, Wang Sheng. 2008. A study on atmospheric boundary layer structure on a clear day in the arid region in northwest China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 66(4): 599−608. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.04.013

Zhang L X, Zhou T J. 2015. Drought over East Asia: A review [J]. J. Climate, 28(8): 3375−3399. doi:10.1175/JCLI-D-14-00259.1

赵艳茹. 2018. 东亚干旱半干旱区边界层高度对干湿变化的影响研究 [D]. 兰州大学博士学位论文, 137pp. Zhao Yanru. 2018. The impacts of boundary layer height on dry and wet changes in East Asian arid and semiarid regions [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 137pp.

赵艳茹, 张珂铨, 毛文茜, 等. 2017a. 100 年来东亚和北非干旱半干旱区边界层高度的变化特征研究 [J]. 高原气象, 36(5): 1304−1314. Zhao Yanru, Zhang Kequan, Mao Wenqian, et al. 2017a. Boundary layer height's variation characteristics research of arid and semiarid areas over East Asia and North Africa in recent 100 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 36(5): 1304−1314. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00107

赵艳茹, 毛文茜, 张珂铨, 等. 2017b. 东亚、北非干旱半干旱区边界层高度变化及其影响因素 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 56(5): 93−100. Zhao Yanru, Mao Wenqian, Zhang Kequan, et al. 2017b. The boundary layer height variation and influence factors over arid and semiarid areas of East Asia and North Africa [J]. Acta Sci. Nat. Univ. Sunyatseni (in Chinese), 56(5): 93−100. doi:10.13471/j.cnki.acta.snus.2017.05.013