

文章编号: 2096-1618(2022)04-0422-07

青藏高原上空平流层水汽的时空演变特征

骆开怡, 陈权亮

(成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要:为研究青藏高原上空平流层水汽的时空演变特征,利用 ERA-Interim 再分析数据,通过气候统计学方法,对青藏高原上空平流层水汽时空演变特征及长期变化趋势进行研究。结果显示,青藏高原上空不同高度平流层水汽分布不同。在平流层低层,夏季和秋季水汽由南向北递减,而冬季水汽由南向北逐渐递增。在平流层中层,夏季水汽含量的分布呈现明显的东西差异。在平流层上层,水汽呈现一致的由南向北方向逐渐增加的分布情况。在垂直方向上随高度增加水汽先迅速地减小后再增加,春季和冬季“<”型结构明显。青藏高原上空水汽含量在不同时段的变化趋势表现不同,1979–1991 年及 1997–2007 年呈递减的趋势,1992–1996 年及 2007 年以后呈增加的趋势。近 10 年以来平流层低层水汽含量显著增加,增长趋势约为每年 $0.4 \sim 0.5$ ppmv。

关键词:大气科学;气候系统与气候变化;青藏高原;平流层水汽;时空演变

中图分类号:P467

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2022.04.010

0 引言

水汽作为一种重要的大气温室气体^[1],由于兼具直接辐射效应和间接的化学反应两方面的作用,直接影响全球的辐射平衡及平流层的化学过程^[2–4],在全球气候变化中起重要作用。Forster 等^[2]的研究结果显示,每增加 0.7 ppmv的平流层水汽,可能导致平流层中大约 0.8 K的降温。Tian 等^[5]发现每增加 2.0 ppmv的平流层水汽就会引起 4.0 K的平流层降温。除此以外,平流层水汽的辐射冷却作用不但影响平流层的温度,也影响平流层臭氧^[6–8]。在平流层中,水汽可以直接参与平流层中的光化学反应从而引起平流层臭氧的损耗,同时又由于其辐射冷却作用导致平流层温度降低,从而减缓臭氧的化学反应速率,对平流层臭氧恢复起到一定的作用。前人的研究结果表明^[5,9],平流层水汽的辐射冷却作用大于其化学效应,因此平流层水汽的增加会导致平流层的臭氧含量显著增加。此外,平流层水汽含量的变化也会引起大气环流的响应。Austin 等^[10]发现,大气中 Brewer-Dobson 环流的强度会因平流层水汽含量的变化而发生变化。

近年来,随着地基观测、卫星探测等技术的发展,学者们已经对平流层水汽的变化趋势做了大量研究。研究发现,自 1981 年以来,平流层水汽含量呈显著增加趋势^[11–12]。但又有研究发现在 2000–2005 年平流层水汽

含量开始减少^[13–15],而 Hurst 等^[16]研究结果显示 2006–2010 年平流层水汽含量呈增加趋势。显然平流层水汽产生的这些变化趋势仍然是一个具有争议性的问题。

以往对全球平流层水汽的研究主要针对热带地区和季风区,但近年来研究结果表明青藏高原地区也是平流层水汽的一个重要源区。Gettelman 等^[17]的研究定量分析了夏季亚洲季风区及青藏高原地区的水汽输送贡献,该地区向全球热带平流层输送大约 75% 的水汽。已有研究表明,亚洲季风区是对流层向平流层水汽输送的关键区^[18–20]。Fu 等^[18]利用卫星数据对青藏高原区域的对流进行研究,结果显示由于夏季青藏高原为一巨大热源,受热源驱动的影响,高原的对流发展更为深厚,它可以直接将更多的水汽通过对流层顶输送到平流层,由高原深对流系统输送的水汽总量大于热带低纬度地区。田红瑛等^[7]分析了高原地区 UTLS 区域水汽的分布和变化特征,结果表明 7–8 月高原上空水汽受高原上空反气旋环流的影响,存在明显的向上输送。Dong 等^[21]探索了高原西南部降水和印度中东部夏季降水变化之间的密切联系,表明这种关系主要是通过“向上”的水汽输送维持。Xu 等^[22]研究发现夏季高原独特的热力结构造成高原低层辐合高层辐散,使水汽可以输送到平流层,因此高原上空表现出明显的湿池结构特征。冯冬蕾等^[23]指出由于夏季青藏高原低层低压高层高压的作用,对流层的水汽不断地输送到平流层。青藏高原上空水汽的分布和变化对高原及周边地区的能量平衡和水份循环过程有极大影响^[22,24]。因此研究青藏高原上空平流层水汽的时空

收稿日期:2021-03-31

基金项目:国家重大自然灾害监测预警与防治发展规划重点专项基金资助项目(2018YFC1506006)

演变及其长期变化趋势具有非常重要的意义。

1 数据与资料

研究区域为青藏高原及周边地区(25 °N ~ 40 °N, 73 °E ~ 105 °E)。所用数据为欧洲中期天气预报中心提供的 1979–2018 年 ERA-Interim 月平均再分析数据。该资料水平分辨率为0.5°×0.5°,垂直方向上从150 ~ 1 hPa分13层,在对流层顶附近有较高的垂直分辨率。本文利用 1979–2018 年 ERA-Interim 的水汽数据探讨青藏高原地区上空平流层水汽的时空演变特征及其长期变化趋势。

2 结果分析

2.1 青藏高原地区平流层水汽的水平分布特征

利用 ERA-Interim 再分析资料分析青藏高原地区上空平流层水汽的水平分布特征。由图 1 所示的平流层低层100 hPa水汽分布可以看出,高原上空的水汽分布表现明显的季节差异。夏季和秋季水汽含量呈现高原北部偏低,高原南部偏高,由南向北逐渐递减的分布形态。夏季水汽含量相对较高,在高原南侧存在一个明显的“湿池”——水汽含量大值区,水汽含量最大值约为5.2 ppmv。秋季同样存在一个“湿池”,但位置相对夏季往东偏移,“湿池”的范围减小,水汽含量也相对夏季减少,约为4.3 ppmv。春季,高原相对于周边地区水汽含量较低,在高原西侧出现一个水汽低值中心,水汽含量约为3.2 ppmv。冬季,青藏高原地区水汽由南向北逐渐增多。

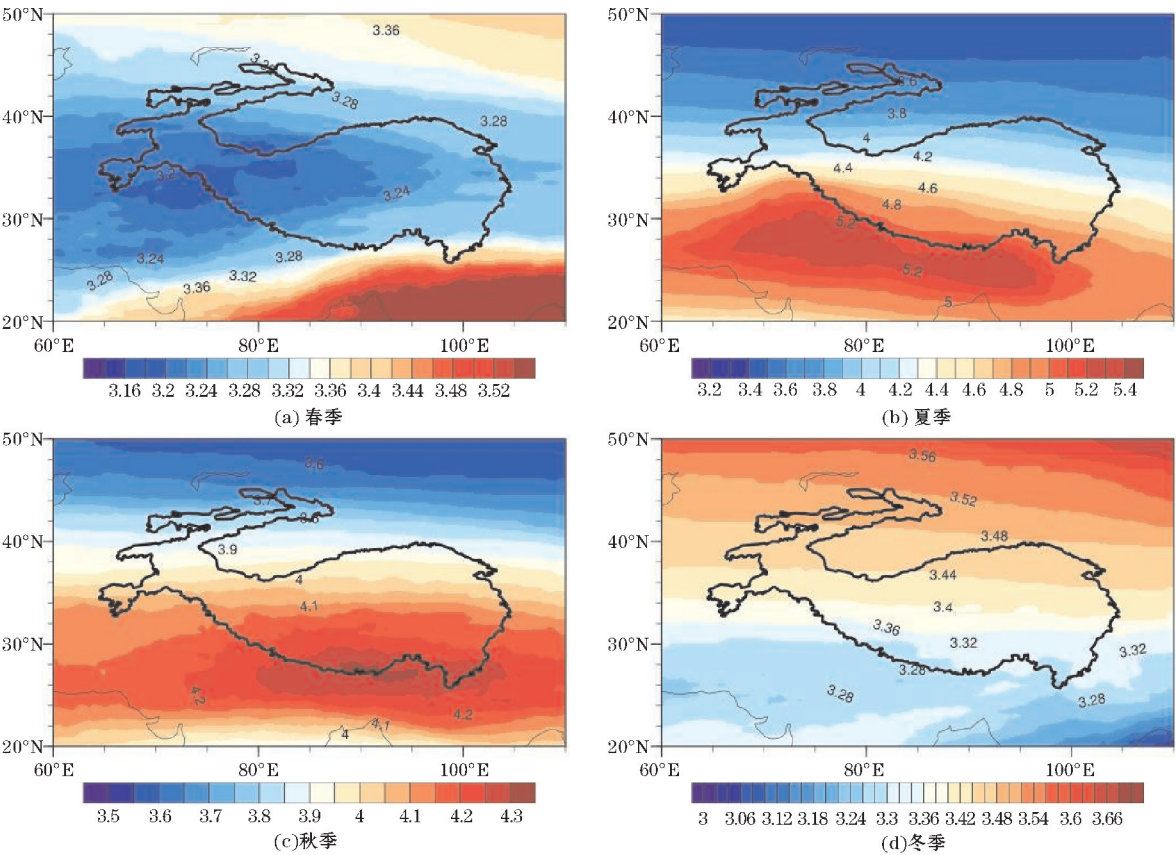


图1 100 hPa 四季的水汽分布图

平流层中层70 hPa与平流层低层100 hPa水汽分布特征完全不同。图2为平流层中层70 hPa水汽的水平分布,存在明显的季节差异。夏季水汽分布呈现明显的东西差异,高原西南部水汽含量较高,高原东部水汽含量较低,在高原西南侧表现出一个水汽的大值中心。秋季,水汽由南向北逐渐减少。春季和冬季,水汽表现出和秋季完全相反的分布形态,由南向北水汽含

量逐渐增加。同时,从四季的水汽含量来看,高原主体秋季的水汽含量最高,最大值约为3.74 ppmv,春季最低,最大值约为3.34 ppmv。

图3显示了平流层上层1 hPa水汽的水平分布。平流层上层1 hPa水汽呈现由南向北逐渐增加的分布形态。从四季的水汽含量来看,高原主体冬季和春季的水汽含量较高,达5.84 ppmv,夏季次之,约为

5.77 ppmv,秋季最低,最大值约为5.7 ppmv。对比平流层低层、中层及上层的水汽含量,平流层低层

(100 hPa)和平流层上层(1 hPa)的水汽含量相对较高,而平流层中层(70 hPa)的水汽含量相对较低。

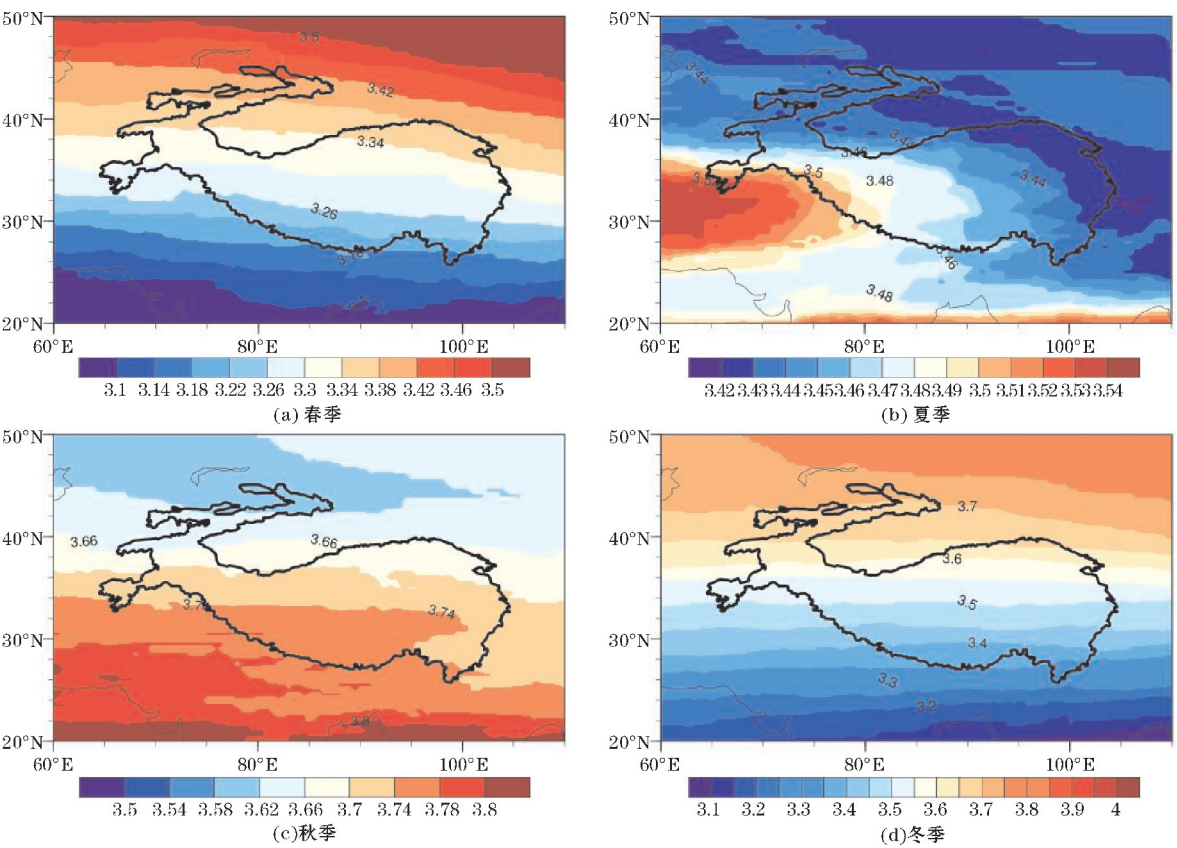


图 2 70 hPa 四季的水汽分布图

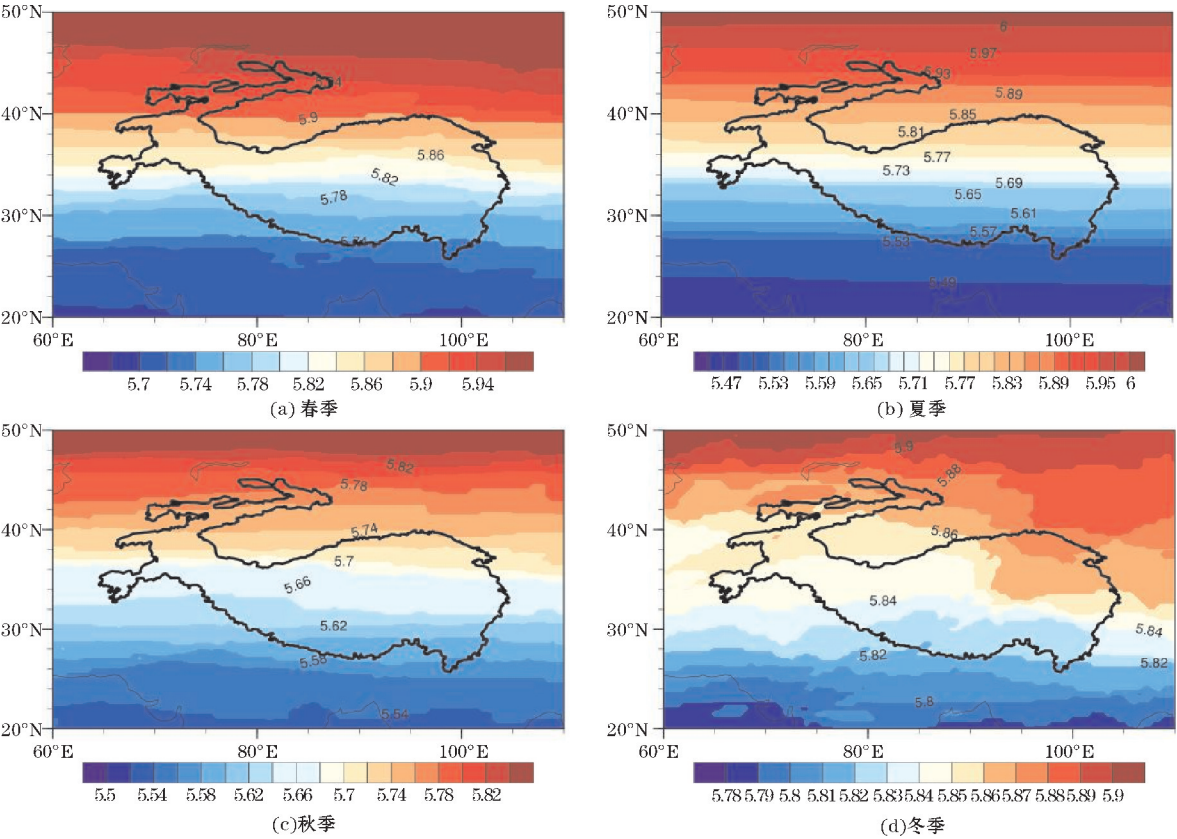


图 3 1 hPa 四季的水汽分布图

2.2 青藏高原地区平流层水汽的垂直分布特征

图4为青藏高原地区1979–2018年ERA-Interim再分析资料的平流层水汽的纬度–高度剖面图。结果显示,水汽具有非常明显的垂直梯度,在平流层的下层(100 hPa)、中层(10 hPa)和上层(1 hPa)水汽含量差异较大。150~100 hPa,随着高度升高,水汽含量逐渐降低,并且在对流层顶到平流层底部70 hPa附近存在一个明显的水汽低值区——称之为“湿层顶”^[25]。从湿层顶往上,随着高度增加,水汽含量也逐渐增加,在平流层1 hPa附近水汽含量达到最大值。研究^[25]指出,平流层水汽的一个重要来源是甲烷的氧化分解。

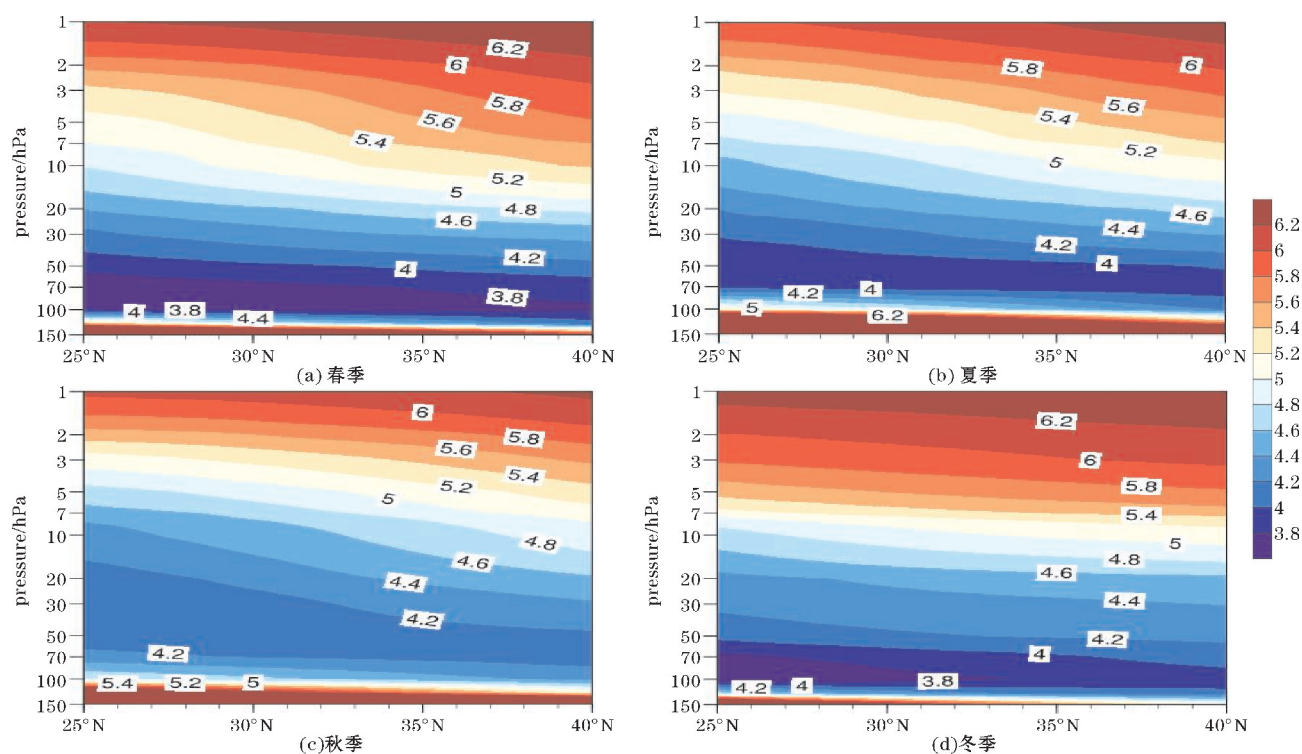


图4 平流层水汽在不同季节的纬度–高度分布图

图5显示了青藏高原地区不同季节平流层水汽的垂直廓线,可以看出,随着高度升高,水汽含量先减少再增加,但不同季节的平流层水汽在不同高度上有所差异。图5(a)显示春季平流层水汽的垂直分布,可以看到,在青藏高原地区的对流层上层至对流层顶附近,水汽随高度增加迅速减小,并在100 hPa附近达到极小值,然后再向上到1 hPa附近,水汽随高度增加而增加,表现为一个“<”字型结构。冬季(图5d)和春季的表现大体相同,100 hPa附近为水汽混合比的极小值区,水汽混合比约为3.8 ppmv,同样表现出明显的“<”型结构。图5(b)和图5(c)为夏季和秋季水汽的垂直分

布,夏季和秋季的水汽垂直变化与春冬季节水汽垂直变化基本一致,都是先迅速减小后增加,但是增加不明显,极小值区位于70 hPa附近,约为3.9 ppmv。

随着高度增加甲烷的浓度也随之增加,导致氧化分解产生的水汽含量也不断增多^[25]。同时,青藏高原上空的水汽也表现出明显的南北差异,25°N~45°N,水汽含量逐渐降低,这与前面的结果相符。从季节变化来看,不同季节水汽含量垂直变化表现基本相同,只是不同季节的水汽低值区所处高度不同。春季和冬季的水汽低值区表现更为明显,水汽低值区位于100~70 hPa附近。夏季和秋季水汽低值区的位置更高,位于70~30 hPa附近。这是由于不同季节对流层顶所处的高度不同,夏、秋季的对流层顶所处的位置相对更高,因此平流层的水汽低值区位置也随之升高。

图6为高原地区平流层水汽的时间–高度分布。由图6可见在平流层上层和低层水汽的季节变化比较明显,而平流层中层的水汽季节变化较弱。80 hPa附近为水汽含量最小值,而水汽含量最大值出现在1 hPa附近。在高原地区平流层下部,水汽含量从11月开始下降,1–4月达到最小值,然后开始增加。在青藏高原地区平流层上部,水汽从2月开始增加,9月达到最大值,然后逐渐减少。

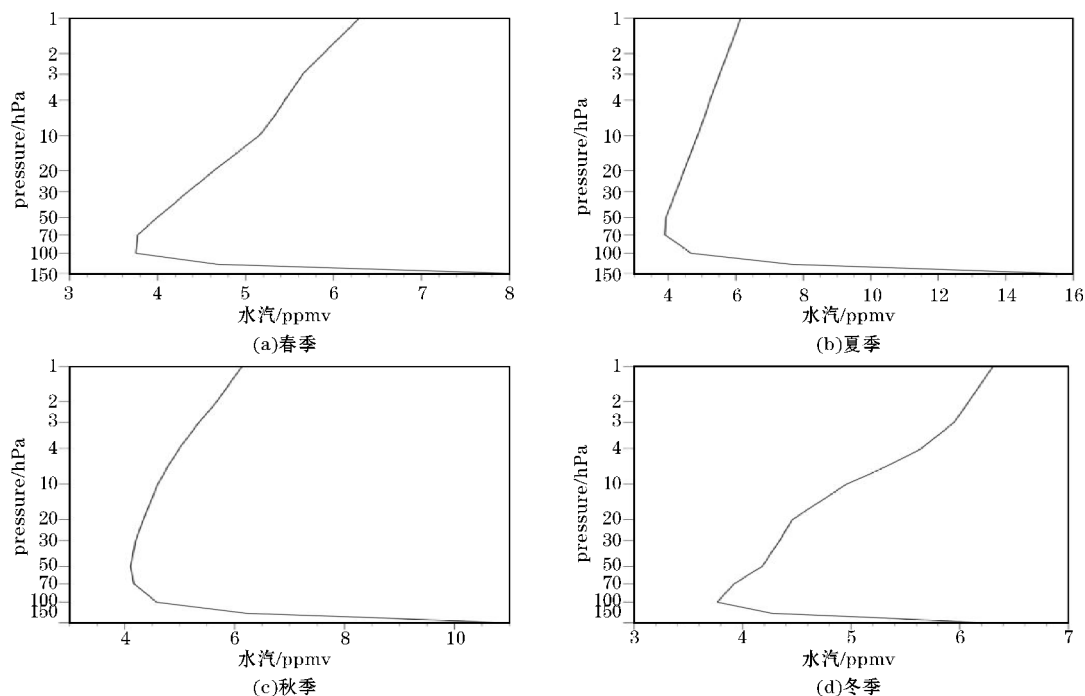


图5 青藏高原地区平流层水汽不同季节的垂直廓线图

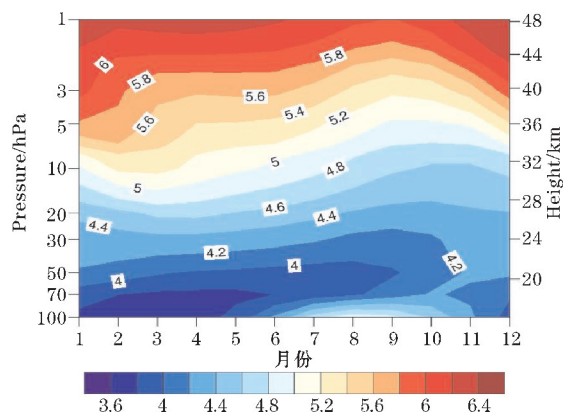


图6 青藏高原地区平流层水汽的时间-高度分布

2.3 青藏高原地区平流层水汽的变化趋势

图7为1979–2018年高原地区平流层水汽的年际变化特征。在平流层中低层水汽具有明显的年际变化。结合青藏高原地区平流层水汽的季节变化(图6)可知,低层水汽含量的低值区出现在每年的冬春季,随后随着大尺度环流的上升传到平流层中层10 hPa附近,表现出随着高度增加逐渐向右倾斜的特征。这种

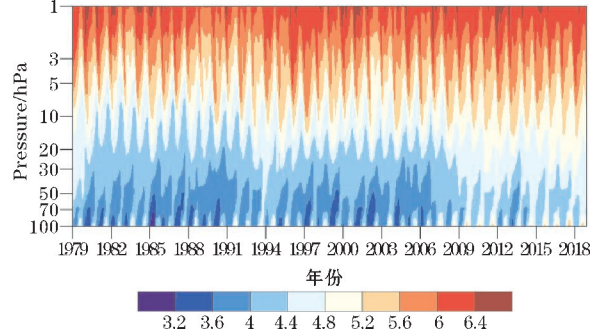


图7 青藏高原地区平流层水汽的年际变化图

上传滞后的现象被称之为“Tape Recorder”^[26–27],由Mote^[26]研究水汽时首次发现。在平流层中上层,水汽的年际变化以半年震荡为主。

从水汽含量的变化来看,100~1 hPa附近都有显著的水汽向上传输,并且表现出水汽含量随着高度不断增加的特征。水汽的低值中心位于100~70 hPa高度,仅接近3 ppmv。同时,从图7还可以看出,水汽低值区的水汽含量存在逐年增加的趋势,平流层下层增湿现象明显。平流层低层100 hPa水汽含量约为3.2 ppmv,平流层中上层10 hPa附近,水汽含量约为4.8 ppmv,平流层上层1 hPa附近,水汽含量达到了6.4 ppmv。

图8为1979–2018年高原地区平流层水汽异常(剔除水汽的季节平均得出的矩平变化)的时间-高度分布。1991年之前平流层水汽呈现明显的负异常,即1991年之前水汽相较于气候平均状态是减少的。1992–1996年水汽呈现正异常,即水汽开始增加,1997年水汽又开始减少,直到2007年以后,水汽呈现明显的增长趋势。特别是在平流层低层,近10年来平流层水汽含量显著增加,增长趋势约为0.4~0.5 ppmv/年。

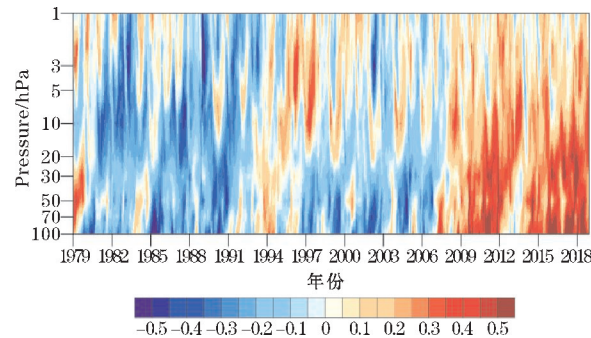


图8 平流层水汽异常的时间-高度分布

3 结论

利用1979–2018年ERA-Interim再分析数据分析青藏高原地区上空平流层水汽的时空演变特征及其长期变化趋势,得出以下结论:

(1)青藏高原上空平流层水汽具有明显的季节性差异,不同高度水汽的分布特征不同。在平流层低层,夏季和秋季水汽呈由南向北逐渐递减的分布形态,并且在高原南坡存在水汽大值区域,而冬季水汽分布由南向北逐渐增加。在平流层中层,夏季水汽分布表现出明显的东西差异,秋季水汽分布由南向北逐渐增加,春季和冬季水汽分布与秋季完全相反。在平流层上层,水汽分布由南向北逐渐增加,平流层低层和上层的水汽含量较高,而中层的水汽含量较低。

(2)青藏高原上空平流层水汽具有明显的垂直梯度。在春季和冬季,高原地区上空的水汽随着高度增加先迅速减小,在对流层顶附近达到极小值,然后再迅速上升呈现出一个“<”型结构。夏季和秋季的水汽同样随着高度增加先迅速减小后增加,但是增加得不明显。

(3)青藏高原上空平流层水汽的季节变化在平流层上层和下层表现较为明显,而中层的变化较弱。平流层下层水汽具有明显的增湿现象。在1979–1991年及1997–2007年青藏高原地区平流层水汽呈减少趋势。在1992–1996年及2007年以后,水汽呈现明显的增长趋势。平流层低层,近10年来平流层水汽含量显著增加,增长趋势约为0.4~0.5 ppmv/年。

参考文献:

- [1] Bengtsson L. The global atmospheric water cycle [J]. *Environmental Research Letters*, 2010, 5(2): 025202.
- [2] Forster, Piers M D F. Assessing the climate impact of trends in stratospheric water vapor [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(6).
- [3] 张健恺, 刘玮, 韩元元, 等. 平流层臭氧变化对对流层气候影响的研究进展 [J]. *干旱气象*, 2014(5): 685–693.
- [4] Sinha A, Harries J E. Water vapour and greenhouse trapping: The role of far infrared absorption [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 22(16): 2147–2150.
- [5] Tian W, Chipperfield M P, Lü D. Impact of increasing stratospheric water vapor on ozone depletion and temperature change [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(3).
- [6] 韩元元. 平流层大气成分的时空变化特征及其影响因子 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [7] 田红瑛, 田文寿, 雒佳丽, 等. 青藏高原地区上对流层—下平流层区域水汽分布和变化特征 [J]. *高原气象*, 2014, 33(1): 1–13.
- [8] 张岱乐. 上对流层/下平流层水汽分布特征及夏季亚洲季风区水汽输送与脱水机制的探讨 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [9] Tabazadeh A. Quantifying Denitrification and Its Effect on Ozone Recovery [J]. *Science*, 2000.
- [10] Austin J, Shindell D, Beagley S R, et al. Uncertainties and assessments of chemistry-climate models of the stratosphere [J]. *Atmos. chem. phys.*, 2002, 3(1): 1–27.
- [11] Nedoluha G E, Bevilacqua R M, Gomez R M, et al. Increases in middle atmospheric water vapor as observed by the Halogen Occultation Experiment and the ground-based Water Vapor Millimeter-Wave Spectrometer from 1991 to 1997 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1998, 103(D3): 3531–3543.
- [12] Rosenlof K H, Oltmans S J, Kley D, et al. Stratospheric water vapor increases over the past half-century [J]. *Geophys. res. letters*, 2001, 28(7): 1195–1198.
- [13] Randel W J, Wu F, Oltmans S J, et al. Interannual Changes of Stratospheric Water Vapor and Correlations with Tropical Tropopause Temperatures [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, 61(17): 2133–2148.
- [14] Griggs D J, Noguier M. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J]. *Weather*, 2010, 57(8): 267–269.
- [15] Dhomse S, Weber M, Burrows J. The relationship between tropospheric wave forcing and tropical lower stratospheric water vapor [J]. *ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS*, 2008, 8(3): 471–480.
- [16] Hurst D F, Oltmans S J, Vmel H, et al. Stratospheric water vapor trends over Boulder, Colorado

- o: Analysis of the 30 year Boulder record [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011;116.
- [17] Gettelman A, Salby M L, Sassi F. Distribution and influence of convection in the tropical tropopause region [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2002, 107 (D10).
- [18] Fu R, Hu Y, Wright J S, et al. Short circuit of water vapor and polluted air to the global stratosphere by convective transport over the Tibetan Plateau [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103 (15): 5664–5669.
- [19] 卞建春, 严仁嫦, 陈洪滨. 亚洲夏季风是低层污染物进入平流层的重要途径 [J]. 大气科学, 2011 (5): 109–114.
- [20] 陈斌, 徐祥德, 卞建春, 等. 夏季亚洲季风区对流层向平流层输送的源区、路径及其时间尺度的模拟研究 [J]. 大气科学, 2010 (3): 29–39.
- [21] Dong W, Lin Y, Wright J S, et al. Summer rainfall over the southwestern Tibetan Plateau controlled by deep convection over the Indian subcontinent [J]. Science Foundation in China, 2016, 7: 19.
- [22] Xu X, Lu C, Shi X, et al. World water tower: An atmospheric perspective [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35 (20): L20815.
- [23] 冯冬蕾, 朱津辉, 曲骅倩, 等. 青藏高原 UTLS 区域水汽输送特征分析 [J]. 农业灾害研究, 2017, 7 (8): 5–7.
- [24] DONG H P. A study of influencing systems and moisture budget in a heavy rainfall in low latitude plateau in China during early summer [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2007 (2).
- [25] Kley D, Stone E J, Henderson W R, et al. In Situ Measurements of the Mixing Ratio of Water Vapor in the Stratosphere [J]. J. atmos. sci, 1979, 36 (12): 2513.
- [26] Mote P W, Rosenlof K H, McIntyre M E, et al. An atmospheric tape recorder: The imprint of tropical tropopause temperatures on stratospheric water vapor [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1996, 101 (D2).
- [27] 杨健, 吕达仁. 平流层—对流层交换研究进展 [J]. 地球科学进展, 2003 (3): 380–385.

Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Stratospheric Water Vapor over the Tibetan Plateau

LUO Kaiyi, CHEN Quanliang

(College of Atmospheric Sciences, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to study the characteristics of the temporal and spatial evolution of stratospheric water vapor over the Tibetan Plateau, the ERA-Interim reanalysis data is used and the method of climate statistics is used to discuss the characteristics of the temporal and spatial evolution of stratospheric water vapor over the Tibetan Plateau and the long-term change trend were studied. The results show that the stratospheric water vapor distribution over the Tibetan Plateau is different at different altitudes. In the lower stratosphere, the water vapor decreases from south to north in summer and autumn; while in winter, the water vapor gradually increases from south to north. In the middle stratosphere, the distribution of water vapor content in summer shows obvious differences between east and west. In the upper stratosphere, water vapor presents a uniform distribution that gradually increases from south to north. In the vertical direction, with the increase of height, the water vapor first decreases rapidly and then increases, and the “<” structure is obvious in spring and winter. The variation trend of water vapor content over the Tibetan Plateau is different in different periods, showing a decreasing trend in 1979–1991 and 1997–2007, and an increasing trend in 1992–1996 and after 2007. In recent ten years, the water vapor content in the lower stratosphere has increased significantly, and the growth trend is about 0.4 ~ 0.5 ppmv per year.

Keywords: atmospheric science; climate system and climate change; the Tibetan Plateau; stratospheric water vapor; temporal and spatial distribution