

青藏高原上空臭氧时空分布特征

薛志航¹, 邓 创², 孙 一³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2. 国网四川省电力公司电力应急中心, 四川 成都 610000; 3. 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:平流层臭氧对全球的气候变化具有十分重要的影响。为了研究青藏高原地区上对流层下平流层(UTLS)区域臭氧的时空分布特征,利用ECMWF臭氧再分析资料,通过经验正交函数 EOF 和回归分析的方法,分析了1979–2015年青藏高原 UTLS 区域臭氧在时间和空间上的变化特征。结果表明:整体上青藏高原 UTLS 区域的臭氧含量呈现南部低、北部高的空间分布特征,但南亚高压的顺时针环流也会将高纬度高浓度臭氧输送到低纬地区;青藏高原 UTLS 区域的臭氧含量在冬、春较高,夏、秋偏低,其中200 hPa和150 hPa上的臭氧变化基本一致。200 hPa上的臭氧在高原33°N以南区域臭氧呈显著减少趋势,100 hPa上整个高原地区的臭氧都呈现出显著性减少趋势;青藏高原地区夏季100 hPa上的臭氧变化存在两个主要的模态,第一和第二模态的解释方差分别为59%和14.8%,第一主模态在空间上表现为全区一致性,第二主模态则表现出南–北反向特征。

关键词:青藏高原;UTLS;臭氧;时空分布

中图分类号:P421.33

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2018.04.017

0 引言

平流层臭氧是地球大气中十分重要的痕量气体之一,大约90%的臭氧都集中在平流层,能够阻挡来自太阳的紫外线辐射,因此有“地球的保护伞”之称。平流层臭氧也可以改变平流层的热力和动力结构^[1],对地球系统和全球气候变化有着重要意义。由于人类活动引起的臭氧层损耗,高层和低层大气对太阳辐射的吸收量相应发生变化,而太阳辐射能又是大气运动的主要能源,因此臭氧层中的臭氧含量变化对气候也会产生扰动。除此之外,平流层臭氧的减少会导致其吸收紫外线辐射的能力降低,将会对人类的健康和生态环境带来严重的危害,因此对于臭氧研究更加引起了学术界的广泛关注^[2]。

由于青藏高原的特殊的地形和海拔高度,国内外有众多学者对高原上空的臭氧总量进行了许多研究。早在20世纪80年代,就有研究发现当南亚高压向青藏高原移动并稳定维持在高原上空时,高原上空就会出现臭氧总量的低值区^[3]。Hingane等^[4]也发现在青藏高原南麓及印度北部区域存在一个准定常的臭氧低值区。周秀骥等^[5]分析TOMS卫星数据时指出,在4–9月高原上空的臭氧总量同纬度的中国东部地区要低,形成一个臭氧总量低值区,并被称为青藏高原臭氧谷,随后的研究^[6]也证实了青藏高原夏季臭氧谷的存在。Bian等^[7]指出,在冬季青藏高原也存在一个臭氧

低值区。青藏高原臭氧谷最强中心主要位于上对流层下平流层(UTLS)区域,很多研究工作也基本集中在该区域。但Guo等^[8]通过SAGEII分析南亚高压对UTLS臭氧谷的作用时,发现平流层上层也存在一个次强的臭氧低值中心。随后Guo等^[9]利用MLS卫星观测资料确认了青藏高原夏季臭氧谷的双心结构,并推测可能是化学过程起到了重要作用^[10]。李书博等^[11–12]通过BCC-AGCM模式模拟全球臭氧分布时,发现对流层中低层与对流层中高层的臭氧季节变化峰值对应并不一致。万凌峰等^[13]则利用WACCM3模式模拟了青藏高原夏季臭氧谷的双心结构。苏昱丞等^[14]通过WACCM3模式分析了青藏高原地区臭氧总量未来百年的变化趋势,指出高原地区的臭氧谷将会加深。

作为“第三极”的青藏高原上空的臭氧变化势必会对中国气候甚至整个东亚的气候造成影响。基于此,有必要对近几十年青藏高原上空的臭氧进行研究,因此文中利用再分析数据对青藏高原地区上对流层下平流层的臭氧混合比的时空变化特征进行分析。

1 资料和方法

使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的最新的全球大气数值预报再分析资料(ERA-interim),其中臭氧混合比的水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,时间长度为1979–2015年。采用经验正交函数分解 EOF 方法分析研究区域上对流层下平流层臭氧分布的主要模态^[15],并对臭氧进行一元线性回归分析,得到青藏高原上空臭氧的变化趋势。文中的研究范围取为(25°N

~45 °N,60 °E~110 °E),为叙述方便,文中冬季代表当年 12 月与翌年 1 月、2 月。另外,文中取 UTLS 区域内 3 个典型高度 200 hPa、150 hPa 和 100 hPa 分别代表上对流层,对流层顶附近和下平流层。

2 青藏高原 UTLS 区域臭氧时空分布特征

2.1 青藏高原 UTLS 区域臭氧空间特征

图 1~图 3 给出了 1979~2015 年青藏高原上空

UTLS 区域不同季节的臭氧空间分布状况。由图可知,整体上青藏高原 UTLS 区域的臭氧混合比呈现南部低、北部高的空间分布特征。其中,在代表上对流层的 200 hPa(图 1)高度上,以 33 °N 为界,青藏高原北部地区臭氧混合比大于 2×10^{-7} kg/kg,在 33 °N 以南地区,臭氧混合比分布在 1.2×10^{-7} kg/kg 至 2×10^{-7} kg/kg 之间,总体上是高原上空的臭氧混合比偏低。代表对流层顶附近和平流层下层的 150 hPa(图 2)和 100 hPa(图 3)上的臭氧分布状况和 200 hPa 基本一致,由于高度更高,因此臭氧含量更多。

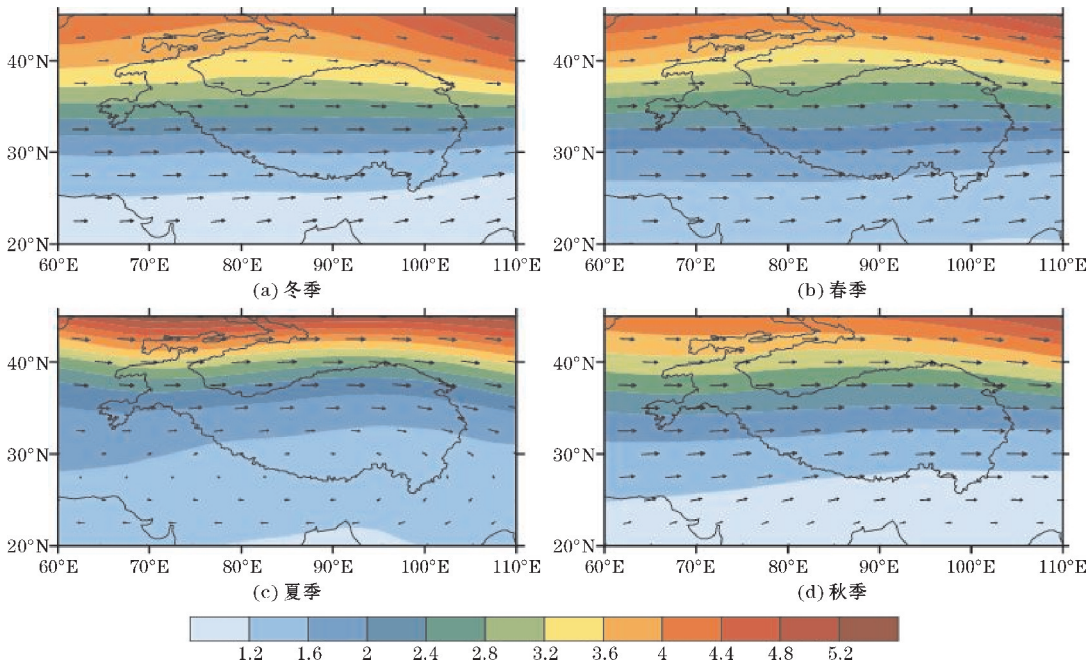


图 1 1979~2015 年青藏高原地区 200 hPa 臭氧混合比四季空间分布

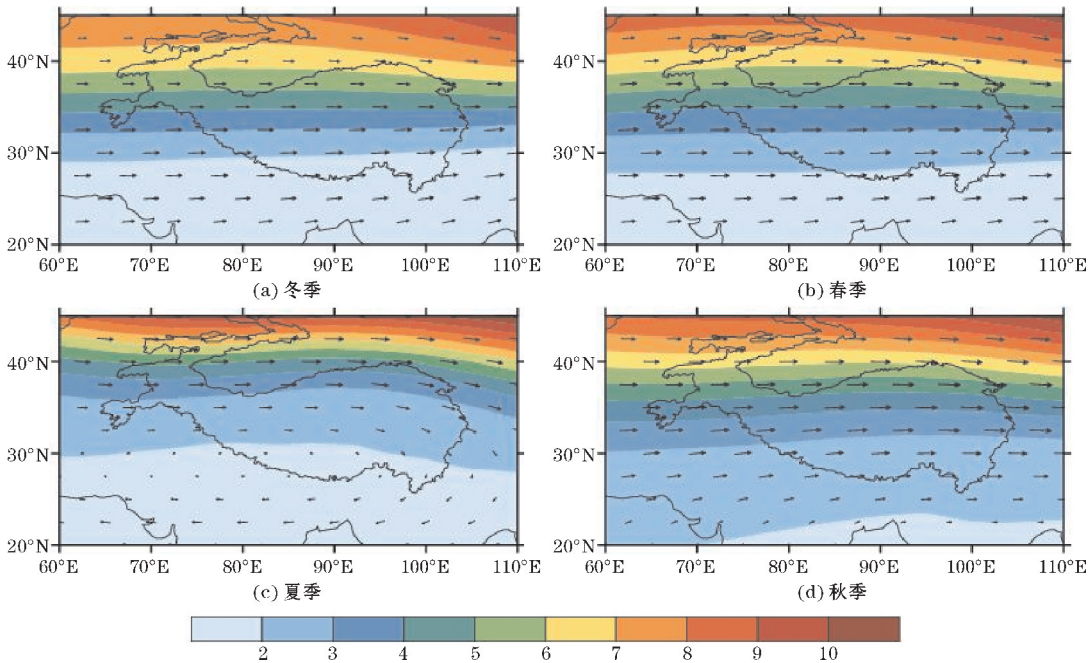


图 2 1979~2015 年青藏高原地区 150 hPa 臭氧混合比四季空间分布

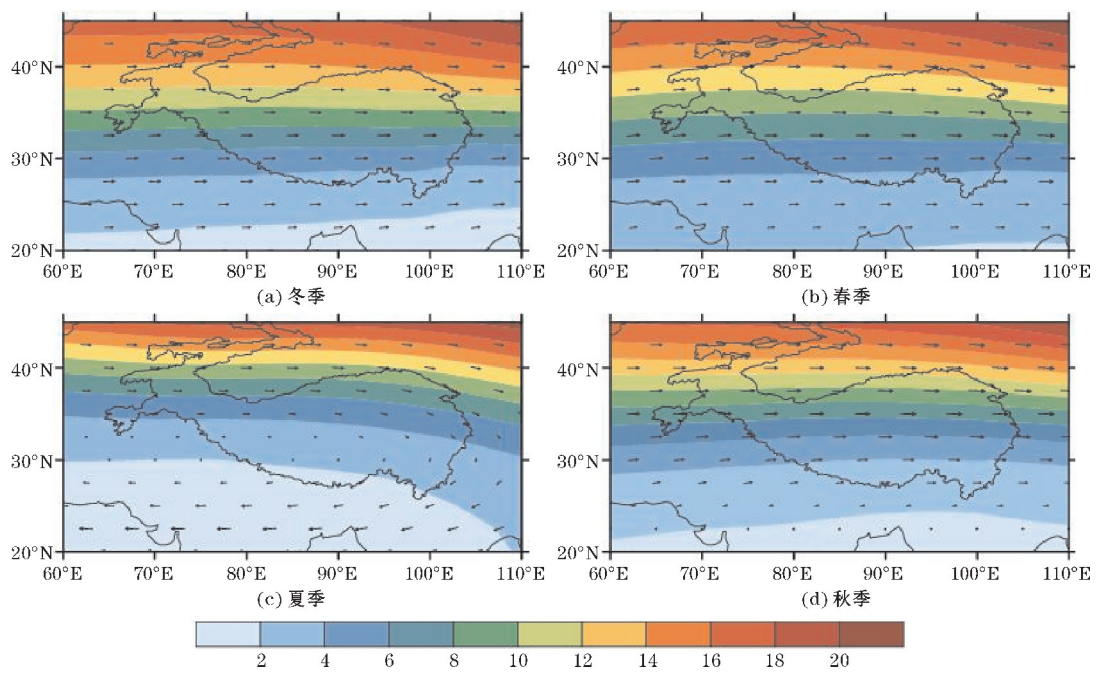


图 3 1979–2015 年青藏高原地区 100 hPa 臭氧混合比四季空间分布

青藏高原夏、秋季节臭氧浓度不仅在四季中处于低值，而且在同纬度地区中也处于低值，青藏高原此时存在显著的臭氧损耗现象，其损耗虽不如南极“臭氧洞”，但在北半球是非常异常的现象，称之为“低值中心”^[5]。已有研究表明，北半球的 Hadley 环流对东亚地区臭氧的影响至关重要^[16]，并且青藏高原臭氧低谷的形成亦与亚洲夏季风输送和青藏高原大地形造成的空气柱缺失有关^[17]。另外，由 3 个气压高度上的风场分布可知，在夏季青藏高原上空由于南亚高压的存在，青藏高原南侧正好是高空西风急流和副热带急流的汇合处，并且在高原的东南部是南亚反气旋的顺时针环流，这会使得高纬度地区浓度较高的臭氧输送到低纬度地区。

2.2 青藏高原 UTLS 区域臭氧时间变化特征

图 4 给出青藏高原地区不同季节 UTLS 区域内臭氧混合比的逐年变化曲线，在青藏高原地区 3 个典型高度层上，臭氧混合比总体表现为在冬、春季节含量较高，在夏、秋季节偏低。由图 4(a)可以看出在青藏高原对流层上部，冬季与春季时的臭氧混合比变化基本一致，夏季和秋季的变化相同，每个季节的臭氧混合比逐年变化呈现出不规则的波动，且并没有表现出明显的增加或减少趋势。这是由于臭氧主要来自于平流层，在对流层上部的臭氧含量很少，使得 200 hPa 上的臭氧含量变化相应较小，从而冬季和春季，夏季和秋季的臭氧混合比更接近。150 hPa 上，臭氧混合比的变化和 200 hPa 高度上的变化比较相似。在冬季两个高度上的臭氧均在 2006 年出现极小值，随后逐渐上升。因

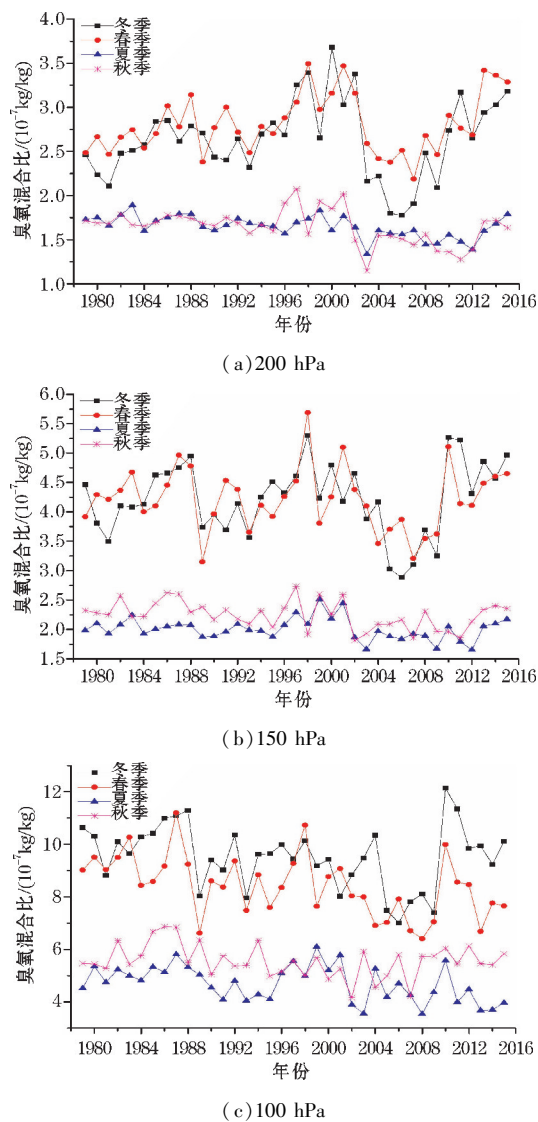


图 4 1979–2015 年青藏高原 UTLS 区域臭氧混合比季节变化曲线

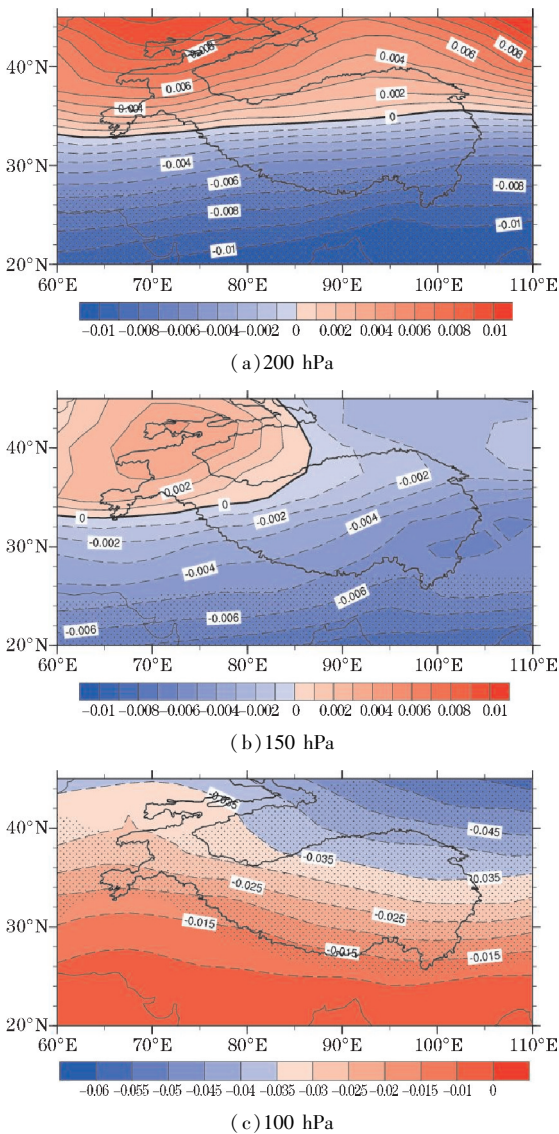


图5 青藏高原 UTLS 区域臭氧变化趋势
(打点区域为通过 95% 的显著性检验)

为150 hPa高度是上对流层和下平流层的大气混合区,也就是平流层和对流层物质交换过程发生的主要区域,所以夏季和秋季的臭氧混合比开始出现差异。与此同时,通过图 4(b)也可以看到,夏季的臭氧比秋季略低,这是因为夏季也是青藏高原地区对流活动频发的季节,当出现较强的对流活动时,强烈的上升运动会将底层低臭氧含量的空气往上输送,使得这一高度层甚至更高层的臭氧含量偏低,从而导致夏季的臭氧含量比秋季偏低。100 hPa(图 4c)与平流层下层相对应,这一高度层上的臭氧变化相比200 hPa和150 hPa高度比较明显。在冬季、春季臭氧出现较弱的下降趋势,但是在 2011 年出现极大值。

进一步使用 1979–2015 年逐年臭氧混合比资料进行青藏高原 UTLS 区域臭氧随时间的回归分析,回归系数为正表示臭氧随时间增加,为负表示减少,并且值越大表示变化幅度越大。青藏高原 UTLS 区域逐点臭氧混合比的变化趋势如图 5 所示。可以看出,1979–2015 年青藏高原地区对流层上层200 hPa(图 5a)臭氧同样以33°N为界,以南区域臭氧呈显著减少趋势,以北区域呈现增加趋势,但没有通过95%的显著性检验。在150 hPa上臭氧的变化趋势减弱,在高原东北部表现为较弱的增加趋势,高原中、东部为较弱的减少趋势,但都没有通过显著性检验,仅在高原外南麓地区的减少趋势通过了检验。而在100 hPa上,臭氧的变化趋势与其余两个高度层的表现完全不同,具体来说是在整个青藏高原地区臭氧都呈现为减少趋势,高原主体上的臭氧回归系数为-0.045,且高原主体基本都通过了95%的显著性检验。

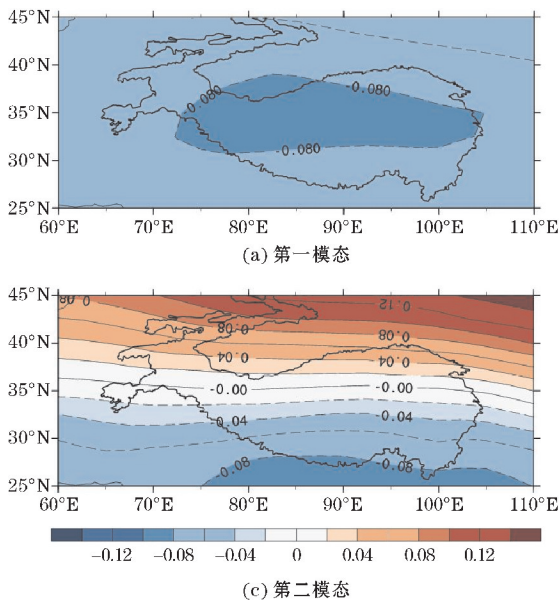
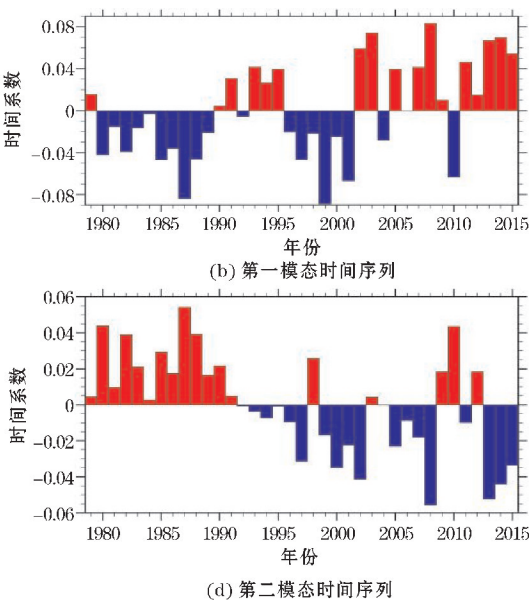


图6 青藏高原地区夏季 100 hPa 臭氧第一和第二主模态



2.3 青藏高原 UTLS 区域臭氧时空分布 EOF 分解

通过对 1979–2015 年逐年平均臭氧混合比进行 EOF 分解,进一步对青藏高原 UTLS 区域臭氧分布形态进行分析。由于臭氧主要存在于平流层且夏季青藏高原地区存在“臭氧谷”,并且可能有进一步加深的趋势^[14],故此处重点仅对夏季 100 hPa 高度上的臭氧进行 EOF 分析。EOF 分解前两个特征向量空间分布和相应的时间系数如图 6 所示,前两个特征向量的解释方差分别为 59% 和 14.8%。

从夏季 100 hPa 臭氧混合比的第一特征向量场(图 6a)可以看出整个青藏高原地区表现出全区一致性的特征,反映出夏季平流层下层的臭氧分布一致偏低或偏高。其对应的时间系数序列(图 6b)的变化具有两个不同的阶段特征,在 2002 年前负值占多数,表示青藏高原地区夏季臭氧含量偏多,在 2002 年后正值占多数,表示该地区夏季臭氧含量偏低。

青藏高原地区夏季 100 hPa 臭氧第二特征向量(图 6c)空间分布图可以看出,第二主模态在空间上呈现出南–北反向型,零等值线基本沿着 36°N。当其对应的时间系数为正值时,反映出臭氧变化为高原北部地区的夏季臭氧含量偏多,高原南部地区偏少;当其对应的时间系数为负时,则相反。从时间系数序列(图 6d)变化看,在 20 世纪 90 年代以前都为正值,表明在这段时期内青藏高原南部地区对流层下层的臭氧含量偏低,北部偏高;在 90 年代后多为负值,则臭氧变化相反。

3 结论

利用 1979–2015 年欧洲中心(ECMWF)臭氧混合比再分析资料,通过经验正交函数(EOF)分解和回归分析的方法,分析了青藏高原上对流层下平流层区域臭氧分布特征和变化规律。主要结论如下:

(1)整体上,青藏高原 UTLS 区域的臭氧呈现南部低、北部高的空间分布特征。200 hPa 高度上,33°N 以北部地区臭氧混合比大于 2×10^{-7} kg/kg,以南地区,臭氧混合比分布在 1.2×10^{-7} kg/kg 至 2×10^{-7} kg/kg 之间。150 hPa 和 100 hPa 高度上的臭氧分布状况和 200 hPa 基本一致。夏季南亚高压的顺时针环流使得高纬度地区浓度较高的臭氧输送到低纬度地区。

(2)青藏高原 UTLS 区域的臭氧混合比总体表现为在冬、春季节含量较高,在夏、秋季节偏低。200 hPa 和 150 hPa 上的臭氧变化基本一致。200 hPa 高度上臭氧以 33°N 为界,以南区域臭氧呈显著减少趋势。

150 hPa 上在高原外南麓地区臭氧显著减少。而 100 hPa 高度上高原地区的臭氧都呈现为减少趋势,且高原主体基本都通过了 95% 的显著性检验。

(3)青藏高原地区夏季 100 hPa 上的臭氧变化存在两个主要的模态,它们的解释方差分别为 59% 和 14.8%。第一主模态在空间上表现为全区一致性,其时间系数序列的变化反映出,在 2002 年之前青藏高原地区夏季臭氧含量偏多,在 2002 年之后该地区臭氧含量偏低。第二主模态表现出南–北反向特征,其对应的时间系数变化反映出,在 20 世纪 90 年代前青藏高原南部地区对流层下层的臭氧含量偏低,北部偏高,在 90 年代之后则相反。

参考文献:

- [1] Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. Middle atmosphere dynamics [M]. San Diego: Academic, 1987.
- [2] 施春华,陈月娟,郑彬,等. 平流层臭氧季节变化的动力和光化学作用之比较[J]. 大气科学, 2010, 34(2): 399–406.
- [3] Reiter E R, Gao D Y. Heating of the Tibet Plateau and movements of the South Asian high during spring [J]. Mon Wea Rev, 1982, 110(11): 1694–1711.
- [4] Hingane L S. Ozone valley in the subtropics [J]. Journal of the atmospheric sciences, 1990, 47(14): 1814–1816.
- [5] 周秀骥,史久恩. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心[J]. 科学通报, 1995, 40(15): 1396–1398.
- [6] Zou H. Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet [J]. Geophys Res Lett, 1996, 23(9): 1029–1032.
- [7] Bian J, Wang G, Chen H, et al. Ozone mini-hole occurring over the Tibetan Plateau in December 2003 [J]. Chin Sci Bull, 2006, 51(7): 885–888.
- [8] Guo D, Wang P, Zhou X, et al. Dynamic effects of the South Asian High on the ozone valley over the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorol Sin, 2012, 26(2): 216–228.
- [9] Guo D, Su Y, Shi C, et al. Double core of ozone valley over the Tibetan Plateau and its possible mechanisms [J]. J Atmos Sol-Terrl Phy, 2015, 130/131: 127–131.
- [10] 郭栋,徐建军,苏昱丞,等. 青藏高原和北美夏

- 季臭氧谷垂直结构和形成机制的比较[J]. 大气科学学报,2017,40(3):412-417.
- [11] 李书博,吴统文,张洁,等. BCC-AGCM-Chem0 模式对 20 世纪全球 O_3 气候平均态及季节变化特征的模拟研究[J], 高原气象,2015,34(6):1601-1615.
- [12] 张芳,吴统文,张洁,等. BCC-AGCM-Chem0 模式对 20 世纪对流层臭氧变化趋势的模拟研究[J]. 高原气象,2016,35(1):158-171.
- [13] 万凌峰,郭栋,刘仁强,等. WACCM3 对夏季青藏高原臭氧谷双心结构的模拟性能评估[J]. 高原气象,2017,36(1):57-66.
- [14] 苏昱丞,郭栋,郭胜利,等. 未来百年夏季青藏高原臭氧变化趋势及可能机制[J]. 大气科学学报,2016,39(3):309-317.
- [15] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [16] 郭世昌,戴敏,杨沛琼,等. 北半球 Hadley 环流与臭氧气候演变规律及其相互关系[J]. 云南大学学报(自然科学版),2012,34(2):169-176.
- [17] Bian J, Yan R, Chen H, et al. Formation of the summertime ozone valley over the Tibetan Plateau: The Asian summer monsoon and air column variations [J]. Advance in Atmospheric Sciences,2011,28(6):1318-1325.
- [14] 苏昱丞,郭栋,郭胜利,等. 未来百年夏季青藏高原

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone over the Tibetan Plateau

XUE Zhi-hang¹, DENG Chuang², SUN Yi³

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610072, China; 2. Electric power emergency center, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610000, China; 3. College of Atmospheric, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmospheric and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China)

Abstract: Stratospheric ozone has a very important impact on global climate change. In order to study the temporal and spatial distribution characteristics of ozone in the upper-troposphere and lower-stratosphere (UTLS) region over the Tibetan Plateau. the temporal and spatial distribution characteristics of ozone over the Tibetan Plateau from 1979 to 2015 was analyzed with empirical orthogonal functions (EOF) and regression analysis using ECMWF ozone reanalysis data. The results show that: The ozone content in the UTLS region over the Tibetan Plateau is lower in the South and higher in the North. However, the clockwise circulation of the South Asia High also transports high-concentration ozone from high-latitude to low-latitude regions. The ozone content in the UTLS region is higher in winter and spring, and lower in summer and autumn, and the ozone changes at 200 hPa and 150 hPa are basically the same. The ozone at 200 hPa shows a significant decrease in the area south of 33°N in the plateau. Ozone at 100 hPa also shows a significant decrease. There are two main modes of ozone change in summer at 100 hPa over the Tibetan Plateau. The explanatory variances of the first and second modes are 59% and 14.8%, respectively. The first principal mode is spatially consistency throughout the plateau, and the second principal mode showed a south-north inverse features.

Keywords: The Tibetan Plateau; UTLS; ozone; temporal and spatial distribution