

利用遥感监测青藏高原上空臭氧总量 30 a 的变化

肖钟湧¹, 江洪^{1,2*}

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093; 2. 浙江林学院国际空间生态与生态系统生态研究中心, 杭州 311300)

摘要:利用多源卫星遥感数据, 分析了自 1979 年以来青藏高原上空臭氧总量的时空动态特征. 结果表明, 青藏高原上空的臭氧还在持续下降, 而且下降速度高于全球和北半球平均水平, 青藏高原、全球和北半球每年大约平均减少 0.23%、0.19%、0.12%. 但是自 2000 年后, 下降的速度有所减缓, 1979~1989、1990~1999 和 2000~2008 年 3 个时期每年减少大约分别为 0.51%、0.49%、0.31%. 30 a 来青藏高原上空臭氧总量低于 240 DU 的天数有 34 d. 在 2005 年后, 没有出现大面积的臭氧总量低值区(低于 240 DU); 臭氧总量的季节变化呈正弦曲线变化, 最大和最小值分别出现在 3 和 10 月, 平均值分别大约为 304.59 和 265.45 DU. 但是每年的极小值常出现在 11 月或 12 月. 臭氧总量波动最大和最小分别出现在 2 月和 9 月, 标准差为 17.28 和 5.88 DU; 臭氧总量与海拔高度呈反相关, 低值区出现在高海拔的上空, 特别是在青藏高原区, 与同纬度圈的平均值相比, 青藏高原臭氧总量大约低了 19 DU, 形成臭氧低谷.

关键词:卫星遥感; 臭氧总量; 青藏高原; 臭氧低谷; 小波分析

中图分类号:X515; X87 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2010)11-2569-06

Variation of Total Ozone over Tibetain Plateau During 30 Years Monitored by Remotely Sensed Data

XIAO Zhong-yong¹, JIANG Hong^{1,2}

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. International Research Center of Spatial Ecology and Ecosystem Ecology, Zhejiang Forestry University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: This paper is study on the temporal and spatial dynamics characteristics of total ozone over Tibetain Plateau from 1979 using multi-resource remote sensing. The findings indicate that the total ozone over Tibetain Plateau is continuously decreasing. The decreasing rate is larger than the global and northern hemisphere average, and the average annual decreasing rates are about 0.23%, 0.19% and 0.12% for Tibetain Plateau, global and northern hemisphere average respectively. However, the decreasing rate is lessening after 2000. The decreasing rates each year are about 0.51%, 0.49% and 0.31% during the 3 stages of 1979-1989, 1990-1999 and 2000-2008. The days of total ozone over Tibetain Plateau lower than 240 DU is up to 34 d, and there is not largely lower ozone (lower than 240 DU) area after 2005; the seasonal variation of total ozone present sinusoidal, the largest and smallest value appear in March and October, the average values are about 304.59 and 265.45 DU respectively. But the smallest of daily value are often appears in November or December. The largest and smallest fluctuation of total ozone appear in February and September with the standard deviation of 17.28 and 5.88 DU respectively; the total ozone and altitude is inversely relationship, lower ozone appear over higher altitude areas, especially, over Tibetain Plateau region. Compare with the average total ozone over the same latitude, the total ozone over Tibetain Plateau is lower with about 19 DU, and give birth to an ozone valley.

Key words: satellite remote sensing; total ozone; Tibetain Plateau; ozone valley; wavelet analysis

臭氧是大气中的重要微量成分之一, 臭氧能吸收太阳紫外辐射, 起到保护地球生物圈的作用; 同时在 9.6 μm 处有一个很强的吸收带, 成为平流层的主要热源. 臭氧含量的变化会改变大气辐射平衡, 在全球气候变化中扮演着重要角色^[1]. 由于人类活动的影响, 在平流层臭氧减小的同时, 对流层臭氧却有持续增加的趋势^[2~6]. 平流层臭氧浓度在 1750~2000 年间明显减少, 对流层臭氧浓度却增加了 (35 $\pm$ 15)%^[7]. 就全球而言, 20 世纪 90 年代的 10 a 间, 全球大气臭氧量平均减少 2.7%, 而最近 10 a, 世界各地臭氧总量仍在持续减少. 以臭氧减少率来看, 一

般高纬度地区比低纬度区高, 而南半球也非常明显地高于北半球^[1,8]. 全球平均臭氧柱浓度 2002~2005 年下降了 3.5%, 北半球和南半球 35°~60° 之间, 2002~2005 北半球减少了 3%, 低于 1964~1980 年的平均

收稿日期: 2009-12-15; 修订日期: 2010-05-31

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2005CB422207, 2005CB422208, 2010CB428503); 国家自然科学基金项目 (4067113); 科技部重大国际合作项目 (2008DFA31810); 科技部数据共享平台建设项目 (2006DKA32300-08); 科技部重大基础性项目 (2007FY110300-8); 浙江省重大科技专项 (2008C13042)

作者简介: 肖钟湧 (1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向大气环境遥感, E-mail: xiaozhongyong@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: hongjiang.china@gmail.com

值. 低纬度 25°S ~ 25°N 之间基本没有变化^[9]. 平流层大气臭氧层耗损以及南极地区上空臭氧洞的出现, 给人类本身的生存环境带来严重的威胁.

1995 年, 周秀骥等^[10]指出, 青藏高原上空存在臭氧低值中心. 这一发现引起了国际科学界的关注, 随后进行了大量有关青藏高原臭氧的研究. 邹捍等^[11]发现青藏高原上空臭氧亏损的季节变化与该地区地表加热造成的物质抬升过程密切相关. 卞建春等^[12]分析了青藏高原夏季的环流场, 指出夏季高原四周的辐合和爬升气流产生高原周围低空物质向高原上空输送的重要原因. 青藏高原特殊的地理位置, 作为地球的第三极, 在全球气候扮演重要角色. 了解青藏高原臭氧总量的变化特征有重要意义.

利用遥感监测大气臭氧的变化, 已经有多年的历史, 在揭示南极臭氧空洞时空变化等重大科学问题上发挥了非常重要的作用^[1]. 应用在臭氧研究的遥感数据, 主要包括有 TOMS-N7、NOAA/SBUV、TOMS-EP、SCIAMACHY、OMI 等臭氧总量产品. 然而, 利用多源的、连续的遥感数据研究青藏高原臭氧 $\pm$ 时空动态还是一个空白. 本研究利用多种遥感传感器反演的臭氧总量数据, 分析 30 a 来青藏高原上空臭氧总量的变化特征. 首先介绍了所运用的数据和处理方法, 其次从 3 个方面来研究青藏高原上空臭氧总量的变化.

1 材料与方

本研究的资料主要是卫星遥感反演的臭氧总量数据, 包括 TOMS-N7 (1979 年 1 月 ~ 1993 年 3 月)、NOAA/SBUV (1993 年 4 月 ~ 1996 年 7 月)、TOMS-EP (1996 年 8 月 ~ 2002 年 7 月)、SCIAMACHY (2002 年 8 月 ~ 2004 年 9 月)、OMI (2004 年 10 月 ~ 2008 年 12 月). 这些资料已被广泛应用于分析全球大气臭氧时空分布, 所取得的结论已获国际公认^[10]. 虽然 SCIAMACHY 和 OMI 资料的应用较少, 但是与之前的传感器相比, 精度更高. 在本研究中,

利用从世界臭氧和紫外辐射中心 (WOUDC) 获取的亚洲地区 8 个地面站点数据对 SCIAMACHY 和 OMI 数据进行了验证, 见表 1. TOMS-N7、TOMS-EP 和 OMI 是主要的研究数据, 由于 TOMS-N7、TOMS-EP 和 OMI 这 3 个数据集在时间上不连续, 所以利用 NOAA/SBUV 和 SCIAMACHY 的数据补充, 使其时间序列连续. 数据总共有 10 503 d, 存储格式为 HDF 格式, 空间分辨率为经度 (1.5°) × 纬度 (1°). 利用 MATLAB 读取 HDF 数据, 然后处理成 ArcGIS 可以读写的 Shapefile 文件格式. 为了方便数据分析和, 利用反距离权重 (inverse distance weighted, IDW) 插值法对数据进行插值, 生成的数据空间分辨率为经度 (1°) × 纬度 (1°). 本研究的青藏高原区是指高程在 4 000 m 以上区域, 面积大约为 296 万 km². 通过计算区域平均值来分析青藏高原 30 a 来臭氧总量的时空变化特征.

2 结果与讨论

2.1 30 a 来青藏高原臭氧总量的变化

为了研究臭氧总量的变化特征, 对青藏高原上空臭氧总量做区域平均, 并与全球平均和北半球平均臭氧总量进行比较. 图 1 是 30 a 来青藏高原平均臭氧总量、全球平均臭氧总量和北半球平均臭氧总量的变化. 从 1979 ~ 2008 年, 30 a 青藏高原上空的臭氧总量减少了 6.61%, 大约为 19.39 DU. 每年平均减少 0.23%, 大约为 0.67 DU; 全球平均臭氧总量减少了 5.43%, 大约为 16.66 DU. 每年平均减少 0.19%, 大约为 0.57 DU; 北半球平均臭氧总量减少了 3.46%, 大约为 11.09 DU. 每年平均减少 0.12%, 大约为 0.38 DU. 分析结果表明了青藏高原臭氧总量减少的速度大于全球和北半球. 全球臭氧 $\pm$ 减少的量和速度从低纬度向高纬度增大^[1], 青藏高原所处的纬度较低, 臭氧总量相对高纬度较小, 减少的量和速度大于全球平均和北半球, 所以更显得青藏高原臭氧总量的减少比其它地区严重.

表 1 SCIAMACHY 和 OMI 遥感数据与地面数据 (WOUDC) 的比较验证
Table 1 Validation of SCIAMACHY and OMI with ground-based (WOUDC)

数据源	平均值/DU	标准差	变异系数	相关系数	标准误	斜率	截距	时间
WOUDC	298.4	42.3	0.141 9	0.930 2	16.259 8	0.973 6	10.344 9	2002-07 ~ 2004-09
SCIAMACHY	300.8	44.3	0.147 3					
WOUDC	301.5	46.5	0.154 2	0.967 4	11.626 3	0.955 9	12.974 3	2004-10 ~ 2007-06
OMI	301.2	45.9	0.152 5					

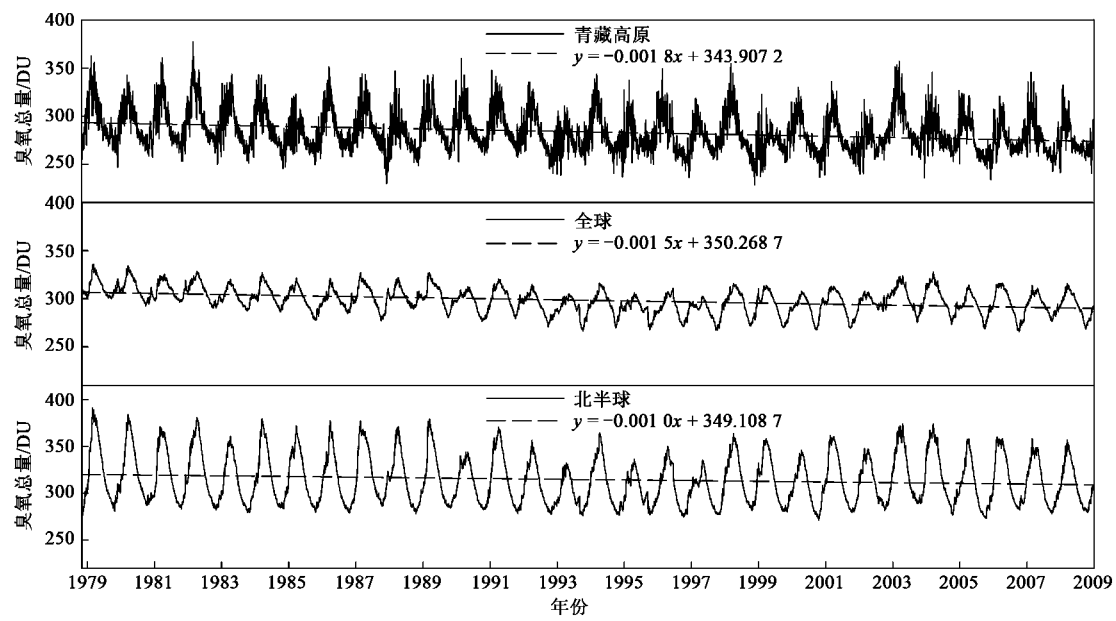


图 1 30 a 来青藏高原平均臭氧总量、全球平均臭氧总量和北半球平均臭氧总量的变化
Fig. 1 Variation of average total ozone of Tibetain Plateau, global and north hemisphere for 30 years

为了更好地了解青藏高原臭氧总量的变化特征,本研究分为 3 个时段来分析,分别是 1979 ~ 1989、1990 ~ 1999、2000 ~ 2008 年,同时与全球和北半球的变化特征进行了比较.表 2 总结了 3 个时段青藏高原上空臭氧总量减少的情况.青藏高原 3 个时段的减少量都高于全球和北半球,臭氧总量减少量分别为 5.47%、4.79%、2.80%,大约为 16.30、13.78、7.90DU;平均每年减少量为 0.51%、0.49%、0.31%,大约为 1.52、1.41、0.89 DU.3 个时段臭氧总量减少的速度逐渐变缓;从不同尺度来看,青藏高原臭氧总量的变化和全球的变化存在一致性,在 3 个时间段里,1979 ~ 1989 年减少的量最多,速度最快,1990 ~ 1999 年次之,2000 ~ 2008 年最小.但是与北半球稍有差别.在 1990 ~ 1999 年期间,北半球臭氧总量减少的速度和量都最小,大约分别为 1.9% 和 5.93DU,每年减少大约分

别为 0.19% 和 0.6 DU.在 2000 ~ 2008 年期间,北半球臭氧总量减少的速度和量反而有所上升,大约分别为 2.45% 和 7.78 DU,每年减少大约分别为 0.28% 和 0.87 DU.而在同个时段里青藏高原仍然处于下降的趋势.

2.2 区域平均臭氧总量的月变化

图 2 显示了 30 a 来臭氧总量月平均的变化,从中可以看出臭氧总量呈明显的季节变化.月平均臭氧总量呈现正弦曲线变化.在 3 和 10 月分别出现峰值和谷值,平均值大约分别为 304.59 和 265.45 DU.这个变化模式与文献[13,14]对东亚地区臭氧总量变化的研究相似.1 a 中 3 和 10 月的最大差值可达 65 DU,30 a 来的平均差值为 39 DU.11 月到下一年的 5 月臭氧总量的波动较大,特别在 2 月,标准差为 17.28 DU;9 月的波动最小,标准差为 5.88 DU.

表 2 3 个时段青藏高原平均臭氧总量 (TP)、全球平均臭氧总量 (G)、北半球平均臭氧总量 (NH) 的变化

Table 2 Three time periods' variation of average total ozone of Tibetain Plateau, global and northern hemisphere

时间/年	总减少量/DU			总减少量百分比/%			每年减少量/DU			每年减少量百分比/%		
	TP	G	NH	TP	G	NH	TP	G	NH	TP	G	NH
1979 ~ 1989	16.3	14.02	14.31	5.47	4.49	4.37	1.52	1.3	1.33	0.51	0.42	0.41
1990 ~ 1999	13.78	8.19	5.93	4.79	2.75	1.9	1.41	0.83	0.6	0.49	0.28	0.19
2000 ~ 2008	7.9	4.35	7.78	2.8	1.46	2.45	0.89	0.49	0.87	0.31	0.16	0.28

为了研究青藏高原地区臭氧总量的周期分布特征,利用 Morlet 小波对 30 a 来月平均的臭氧总量进行了分析.结果如图 3 所示,小波系数显示了臭氧总

量的变化存在着 1 a 周期和准 2 a 周期变化,这个结果与其它学者的研究一致^[15].

2.3 青藏高原臭氧总量低值中心

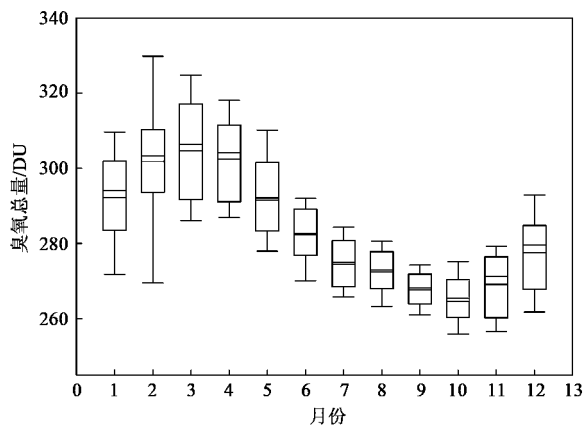


图 2 月平均臭氧总量的变化
Fig.2 Variation of monthly average total ozone

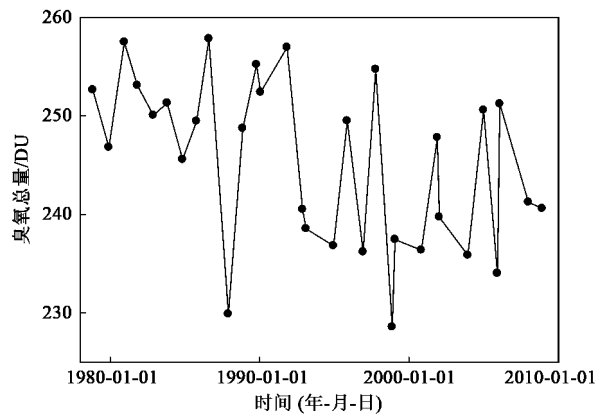


图 4 青藏高原每年最低臭氧总量的变化
Fig.4 Variation of smallest total ozone among one year over Tibetain Plateau

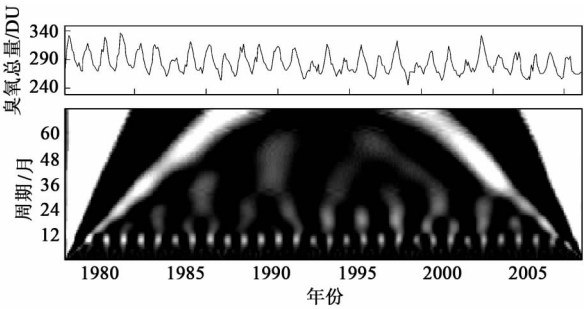


图 3 青藏高原月平均臭氧总量变化的小波分析
Fig.3 Wavelet analysis of the variation of monthly mean total ozone over Tibetain Plateau

2.3.1 每年最小臭氧总量的变化

图 4 显示了 30 a 来每年青藏高原上空出现最小臭氧总量的变化. 可以看出青藏高原每年出现最低臭氧总量的值在逐渐变少, 并且在 2005 年后臭氧 — 呈现逐渐增大的趋势, 这反映了近年来全球保护臭氧层的努力起到了一定的成效. 其间出现了 2 次极小值, 分别是 1987 年 11 月 29 日和 1998 年 11 月 19 日, 臭氧总量分别为 229.9 DU 和 228.7 DU. 本研究数据显示青藏高原上空每年臭氧总量最低值常出现在 11、12 月, 见表 3. 30 a 来青藏高原上空臭氧总量低于 260 DU 的天数为 872 d, 占了 8.7%, 低于 240 DU 的天数为 34 d. 自从 2005 年后, 青藏高原上空没有大面积出现低于 240 DU 的臭氧低谷. 2.2 节的分析表明了青藏高原月平均最小值常出现在 10 月. 然而, 其它学者研究结果表明了青藏高原在夏季存在着低值中心, 如周秀骥等^[10] 利用 TOMS 数据研究结果认为, 青藏高原夏季(6~9 月)形成了大气臭氧总量低值中心^[8,16]. 这与本研究的结果不一致, 产生的原因需要进一步分析.

表 3 臭氧总量低于 240 DU 出现的次数和时间

Table 3 Times and date of the total ozone value lower than 240 DU

年份	最小值/DU	天数/d	月份
1987	229.9	7	11、12
1993	238.5	3	1
1994	236.8	1	1、2
1996	236.2	2	12
1998	228.6	11	11、12
1999	237.4	1	1
2000	236.4	4	10、12
2002	239.7	2	1
2003	235.8	1	12
2005	234	2	12

2.3.2 青藏高原臭氧总量低值中心

图 5 显示了 30 a 来每年青藏高原臭氧总量区域平均值最低 4 d 臭氧总量的空间分布, 分别是 1987 年 11 月 29 日、1998 年 11 月 19 日、2003 年 12 月 14 日和 2005 年 12 月 3 日, 臭氧总量的区域平均值分别为 229.88、228.56、235.84、234.00 DU. 图 5 中黑色曲线围起来的区域为本研究的青藏高原区, 从中可以看出, 该地区的臭氧总量比周围偏低, 而且几乎覆盖整个青藏高原区. 由于青藏高原臭氧总量低值中心的存在, 隔断了臭氧总量的纬度地带性分布. 在东北亚地区存在着高值的中心, 臭氧总量大约为 450 DU, 比同纬度地区高出可达 150 DU. 卞建春等^[12] 的研究指出: 2003 年 12 月 14~17 日青藏高原上空出现了大面积臭氧极低值区域. 发现臭氧总量低于 220 DU 的面积超过 250 万 km², 中心极低值仅为 190 DU. 最小值出现在 12 月 16 日. 在这次臭氧低值事件中, 12 月 14 日的臭氧总量低值中心为 201 DU, 与本研究的结果相同, 但是本研

究的结果是 12 月 14 日为 1 a 中最低值. 这其中的原因主要是本研究中以整个青藏高原做了区域平均,这可能把青藏高原上出现较小区域臭氧总量低值的信息掩盖掉,而且两者所用的数据源不同,卞建

春等用的研究数据是 TOMS 版本 8 所得臭氧总量,并利用周围的地面观测资料进行了校正. 本研究用的臭氧总量资料是来自 SCIAMACHY 传感器,这可能是产生这种差别的另一个原因.

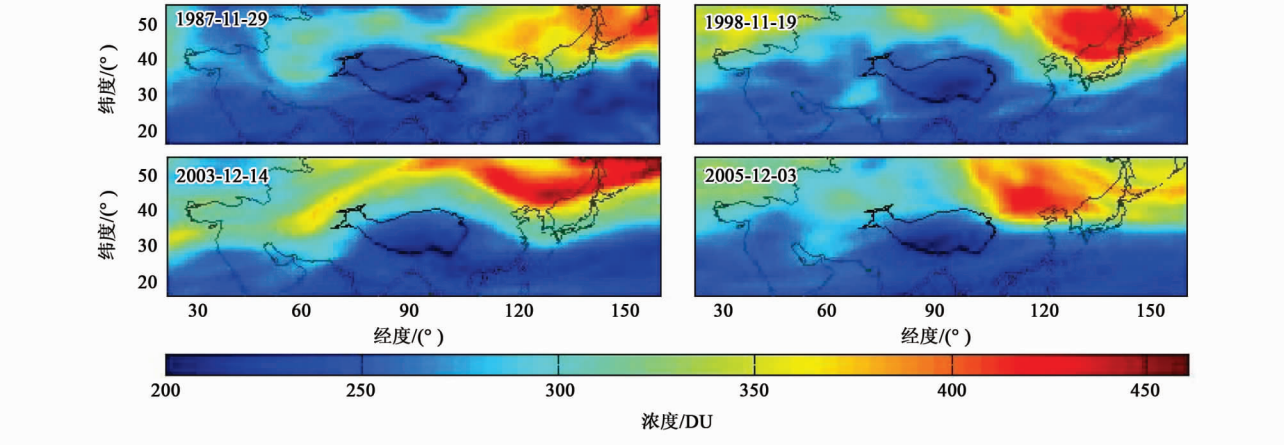


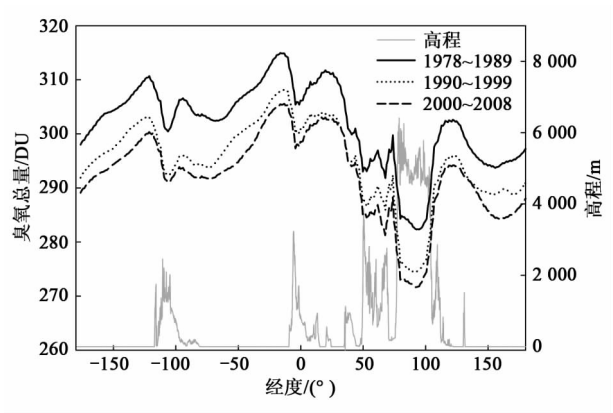
图 5 青藏高原臭氧低谷
Fig. 5 Ozone valley over Tibetain Plateau

为了更好地分析青藏高原臭氧总量与同纬度其它地方的差异,沿着北纬 32°N 做剖面. 图 6 为 32°N 的高程和上空臭氧总量的变化分布,其中显示了臭氧总量随着高程起伏变化而变化. 在平原地区,臭氧 — 出现较大的峰值,在山脊的上空,臭氧总量较低,而到了山谷的上空,臭氧总量又增大,臭氧总量和地面高程存在着反相关的关系. 如在青藏高原、伊朗高原、阿特拉斯山脉和落基山脉出现臭氧总量低值区^[17,18]. 特别是在青藏高原地区,形成了一个臭氧低谷. 青藏高原上空臭氧总量比同纬度圈的平均值大约少了 19 DU,表 4 总结了 3 个时段 32°N 青藏高原上空臭氧总量比同纬度圈平均值的比较结果,表明了青藏高原臭氧低谷呈加深的趋势^[13].

表 4 32°N 剖线上青藏高原上空与同纬圈平均臭氧总量的比较/DU
Table 4 Comparison of the total ozone over Tibetain Plateau and the same whole latitude over 32°N profile/DU

年份	32°N 纬度圈 平均值	32°N 青藏高原 区平均值	差值
1979 ~ 1989	301. 7	283. 4	18. 3
1990 ~ 1999	294. 8	275. 3	19. 5
2000 ~ 2008	292. 2	272. 6	19. 6

青藏高原臭氧低谷产生的原因,除了向大气排放的各种臭氧前体物破坏了臭氧层外,本研究认为产生这现象的主要原因是地形. 青藏高原区的平均高程在 4 000 m 以上,缩短了臭氧气柱,减少了臭氧 — . 邹捍等^[11]认为热力和动力作用也是导致高原



横坐标负值表示西经
图 6 32°N 剖线上空臭氧总量的变化
Fig. 6 Variation of total ozone over 32°N profile

上空出现臭氧低谷的重要原因. 夏季青藏高原地面对大气加热最强,18 km 以下大气中,垂直向上的物质输送作用很强,而将臭氧含量较少的低层空气带向高空,冲淡高空臭氧含量,可以造成整层气柱中臭氧含量下降^[19]. 王喜红等^[20]认为夏季青藏高原中低空存在很强的辐合气流,使周边臭氧向高原辐合,造成高原中低空臭氧浓度比周围高;然而,高原高空受南亚高压控制存在很强的反气旋环流,臭氧由高原向四周辐散,从而又使整个青藏高原的臭氧浓度比周围低,同时,夏季这种独特的环流形势有利于青藏高原维持稳定的上升气流,这种较强的上升气流将底层低浓度的臭氧向对流层中上部输送,从而稀

释了对流层上部的臭氧浓度. 这些研究结果认为动力-热力是夏季青藏高原区出现低值中心的原因, 但是本研究表明 1 a 中臭氧总量最低值常出现在 11、12 月, 很难用动力-热力原理解释这个现象, 这个原因还待进一步分析.

3 结论

(1) 本研究利用多源遥感数据, 分析了 30 a 来青藏高原上空臭氧总量的变化特征. 结果表明, 青藏高原上空臭氧总量还在减少, 然而, 自 2000 年后, 臭氧总量减少的速度变缓. 1979 ~ 1989、1990 ~ 1999 和 2000 ~ 2008 年 3 个时段每年减少大约分别为 0.51%、0.49%、0.31%; 青藏高原臭氧总量减少的速度大于全球和北半球的平均水平. 青藏高原、全球和北半球每年平均减少大约分别为 0.23%、0.19%、0.12%.

(2) 臭氧总量的月变化呈正弦曲线. 最大值出现在 3 月, 最小值出现在 10 月, 平均差值为 39.14 DU. 臭氧总量波动最大的是在 2 月, 最小的是在 9 月, 标准差分别为 17.28 和 5.88 DU. 尽管 10 月的平均值最小, 然而青藏高原的臭氧低谷事件常出现在 11、12 月.

(3) 臭氧总量与海拔高度呈反相关, 低值区出现在高海拔的上空, 特别是在青藏高原区, 与同纬度圈的平均值相比, 青藏高原臭氧总量大约低了 19 DU, 形成臭氧低谷. 30 a 来青藏高原上空臭氧总量低于 260 DU 的天数为 872 d, 占了 8.7%, 低于 240 DU 的天数有 34 d. 但是出现臭氧低值区的频率越来越小. 自 2005 年后, 臭氧总量没有出现低于 240 DU 大面积的低值区.

致谢: 本研究数据来自美国戈达地球科学数据和信息服务中心 (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center)、欧空局 (European Space Agency) 和世界臭氧与紫外线辐射数据中心 (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre), 作者在此表示感谢.

参考文献:

[1] WMO. Scientific assessment of ozone depletion: 2006, global ozone research and monitoring project-report No. 50 [R]. Geneva, Switzerland: WMO, 2007.

[2] Bojkov R D. Ozone changes at the surface and in the free troposphere [A]. In: Isaksen I S A. Tropospheric ozone: regional and global scale interactions [C]. Reidel, Dordrecht, Netherlands, 1988. 83-96.

[3] Gregory C R, George C T, Donald J W, *et al.* Seasonal trend analysis of published ground-based and TOMS total ozone data through 1991 [J]. J Geophys Res, 1994, **99**(D3): 5449-5464.

[4] William J R, Janel B C. Coherent variations of monthly mean total ozone and lower stratospheric temperature [J]. J Geophys Res, 1994, **99**(D3): 5433-5447.

[5] Schneider N, Lezeaux O, De La Noe, *et al.* Validation of ground-based observation of stratospheric ozone [J]. J Geophys Res, 2003, **108**(D17) ACH 7-1.

[6] 王振亚, 李海洋, 周士康. 平流层中臭氧耗减化学研究进展 [J]. 科学通报, 2001, **46**(8): 619-625.

[7] Houghton J T, Ding Y, Gringgs, *et al.* Climate change 2001: The scientific basis [R]. New York: Cambridge University Press, 2001.

[8] 周秀骥, 李维亮, 陈隆勋, 等. 青藏高原地区大气臭氧变化的研究 [J]. 气象学报, 2004, **62**(5): 531-527.

[9] WMO. Scientific assessment of ozone depletion: 2002, global ozone research and monitoring project-report No. 47 [R]. Geneva, Switzerland: WMO, 2003.

[10] 周秀骥, 罗超, 李维亮, 等. 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.

[11] 邹捍, 郜永祺, 周立波. 大尺度山地上空的臭氧低值及地面加热 [J]. 气候与环境研究, 1998, **3**(3): 209-217.

[12] 卞建春, 王庚辰, 陈洪滨, 等. 2003 年 12 月青藏高原上空出现微型臭氧洞 [J]. 科学通报, 2006, **51**(5): 606-609.

[13] 刘煜, 李维亮. 青藏高原臭氧低谷的加深及其可能的影响 [J]. 气象学报, 2001, **59**(1): 97-106.

[14] 李燕, 蔡旭晖, 谢飞钦. 近年东亚地区臭氧总量的变化趋势 [J]. 环境科学, 2002, **23**(增刊): 103-105.

[15] 季崇萍, 邹捍, 周立波. 青藏高原臭氧的准两年振荡 [J]. 气候与环境研究, 2001, **6**(4): 416-424.

[16] 张人禾, 周顺武. 青藏高原气温变化趋势与同纬度带其他地区的差异以及臭氧的可能作用 [J]. 气象学报, 2008, **66**(6): 916-925.

[17] 周任君, 陈月娟. 青藏高原和伊朗高原上空臭氧变化特征及其与南亚高压的关系 [J]. 中国科学技术大学学报, 2005, **35**(6): 889-908.

[18] 仇永炎, 魏民, 江爱良, 等. 青藏高原臭氧总量低中心与落基山臭氧低槽的基本特征——兼论高山静力亏损的成因 [J]. 气候与环境研究, 2008, **13**(5): 617-628.

[19] 刘煜, 李维亮, 周秀骥. 青藏高原臭氧变化趋势的预测 [J]. 中国科学 (D 辑), 2001, **31**: 308-311.

[20] 王喜红, 李兴生. 中国地区对流层臭氧变化和分布的数值研究 [J]. 气象学报, 1998, **56**(3): 333-348.