

漠河地区臭氧的观测和计算

白建辉

中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029

摘要 1997年3月上旬, 在黑龙江漠河地区对地面和整层臭氧、太阳辐射等进行了短期观测, 以初步了解该地区臭氧和辐射的变化规律以及它们之间的相互关系。研究发现, 漠河地区近地面臭氧日变化明显, 其峰值出现在每日10:00(北京时间)左右, 并早于紫外辐射(UV)峰值出现时间。整层大气臭氧总量的日变化特征不明显。基于UV能量守恒, 建立了臭氧与其影响因子-光化学、散射、UV等因子之间较好的定量关系和经验模式, 并将其用于计算地面、整层大气臭氧小时值和日平均值。结果表明, 计算值与观测值吻合的都比较好, 它们相对偏差的平均值分别为: 地面臭氧小时值(11.9%)和日平均值(9.0%); 整层大气臭氧小时值和日平均值-7.4%、1.8%。因此, 地面和整层臭氧的经验算法是合理和可行的。利用散射辐射/直接辐射(D/S)和散射辐射/总辐射(D/Q)可以描述大气中的物质如气溶胶、云等的散射作用。采用 D/Q 表示散射作用可以提高地面臭氧和整层大气臭氧计算的准确度, 特别是对云量较大的情况。

关键词 地面臭氧 整层大气臭氧总量 紫外辐射 能量 气溶胶

文章编号 1006-9585 (2006) 02-0221-08 **中图分类号** P412 **文献标识码** A

The Measurement and the Calculation of Atmospheric Ozone in the Mohe Area

BAI Jian-Hui

*Laboratory for Middle Atmosphere Layer and Globe Environment Observation,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract In order to understand the characteristics of ozone and solar radiation and their interrelation at Mohe county, Heilongjiang province, a short-term measurement of surface ozone, total ozone amount and solar radiation was carried out during the first ten days of March 1997. It was found that surface ozone indicated an evident diurnal variation. Its peak usually appeared around 1000 LST (Local Standard Time), which was earlier than the UV peak appearance. The total ozone amount in the whole column was not shown an obvious diurnal variation during the observational period. Based on the UV energy conservation, a good quantitative relation and an empirical model for ozone and its 3 affecting factors, including photochemical, scattering, and UV were determined and built up, and applied for calculating hourly and daily surface ozone and total ozone amount. The calculated surface ozone and total ozone amount of hourly and daily averages were consistent with measurements, the averages of relative bias of hourly and daily averages of surface ozone were 11.9 and 9.0% respectively, and the averages of relative bias of hourly and daily averages of total ozone amount were 7.4% and 1.8% respectively. Thus, this empirical algorithm is reasonable and feasible. The ratio of diffuse radiation to scattering radiation (D/S) and diffuse radiation to global radiation (D/Q) can be used to describe the scattering roles of aerosol and clouds. The accuracy of calculated hourly and daily

收稿日期 2004-12-21 收到, 2005-12-26 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助 40175031。1997年漠河日全食观测得到中华人民共和国科学技术部、中国科学院、国家自然科学基金委等联合资助

作者简介 白建辉, 男, 1964 出生, 博士, 副研究员; 主要从事大气物理和大气化学方面的研究。E-mail: jianhuib@263.sina.com

averages of surface ozone and total ozone amount were improved, when D/Q instated of D/S in the ozone empirical model.

Key words surface ozone, total ozone amount, ultraviolet radiation, energy, aerosol

1 引言

臭氧是大气中一种重要的微量气体和温室气体,其中 90% 的臭氧位于平流层,10% 位于对流层。由于它对紫外辐射 (UV) 具有选择性吸收,因而可以保护地球上的动植物、人类等免受过量 UV 的照射。近地面臭氧浓度过高,将对人体的呼吸系统、健康等带来严重危害,因此,臭氧又被认为是一种污染气体。各种交通工具 (如车辆等) 排放的气体 NO_x 、CO、挥发性有机物 (VOC)、植物排放的 VOC 等在 UV 照射下,并伴之以适宜的温湿度、气象因素等有利条件,可造成局地高浓度臭氧光化学烟雾的产生。臭氧的光化学产生被认为是局地臭氧的重要来源^[1],因此,近地面或对流层臭氧光化学规律的研究倍受国内外科学家的广泛关注^[2~4]。平流层臭氧的减少,将造成对流层和地面 UV 的增强,因而将严重威胁到动植物和人类的健康,所以,平流层臭氧化学、光化学、动力学等方面的研究也是一个重要的研究方向。同时,对流层 UV 的增强,将加快对流层臭氧的光化学过程,有利于臭氧的光化学产生。这样,对对流层和平流层臭氧的长期监测,对流层和平流层臭氧的光化学规律,臭氧与其前体物 NO_x 、VOC、UV、OH 自由基等之间的相互关系,近地面臭氧的预报和污染控制措施等都是臭氧研究中的重要内容。

1997 年 3 月 9 日在我国北部边疆地区漠河发生了 20 世纪末最后一次日食现象,利用此次机会,对黑龙江省漠河地区的地面和整层臭氧、太阳辐射等进行了为期 13 天的短期观测,以初步了解该地区臭氧和辐射的变化规律以及它们之间的相互关系。

2 观测概述

观测地点选在漠河县中心苗圃 ($52^{\circ}59'N$, $122^{\circ}33'E$),海拔高度 430 m。观测项目有:太阳分

光辐射 (主要有总辐射、紫外辐射、可见光辐射等),地面臭氧浓度,整层大气臭氧总量等;并且对云、天气状况、气象要素等进行了记录。观测分光辐射的仪器为国产 TBQ 型分光辐射表,它由两部分组成:1) 3 个感应辐射表头,感应波段分别为 270~3 200、400~3 200 和 700~3 200 nm。紫外总辐射 Q_{uv} (270~400 nm) 的数据由前两个通道的差值得到。3 个辐射表的灵敏度为 5~10 mV/(kW·m²),时间响应 ≤ 1 s (1/e),稳定性 $\leq \pm 2\%$ 。2) RYJ-2 型日射记录仪,并配有 PC-1500 微机及接口,测量精度为 $\pm 0.5\%$,分辨率为:瞬时值 1 W·m⁻²,累计值 0.01 MJ·m⁻²,所用仪器在观测后与新进口的辐射表 (美国 Eppley 公司生产的 PSP 型辐射表,31461F3 号) 进行了详细的标定,以确保观测资料的可靠。辐射表安放于中心苗圃办公楼楼顶,周围无遮蔽物影响。观测期间,周围地面基本上为薄雪覆盖。漠河冬天的气温很低,中心苗圃的年最低气温可达 -53.3 °C,为避免辐射表头结霜,每天观测结束时,都要加盖,并用塑料袋密封。观测时间为 8:00~16:00 (北京时间,下同)。大气臭氧总量的观测使用前苏联制造的 M124 型臭氧仪,此仪器在使用前后与中国科学院大气物理研究所的 Dobson 臭氧仪进行了比对,以确保观测数据的可靠。3 天 8:00~17:00 的比对结果表明, M124 直射光的测量值与 Dobson 臭氧仪的测量值非常接近和一致,个别值略大,相对偏差一般小于 3%,最小的相对偏差约为 0.7%。M124 散射光的测量与直射光测量相比略差一些, M124 散射光的测量值比 Dobson 臭氧仪的测量值普遍低 10 Du 左右,其测量值的相对偏差小于 5%。地面臭氧的观测使用美国 Thermo Electron 公司的 Model 49 紫外吸收式臭氧仪,其测量精度 (体积分数) 为 2×10^{-9} ,此仪器在使用前后均在实验室做了标定。观测期间的气象资料取自漠河县气象观测站。

观测日期为 2 月 28 日至 3 月 12 日,此期间共获得了 10 天辐射和气体的观测资料。

3 结果和讨论

观测期间得到的观测资料包括: 太阳总辐射 (Q)、水平面直接辐射 (S)、散射辐射 (D)、紫外辐射 (Q_{uv})、整层大气臭氧总量 (O_{3T})、地面臭氧浓度 (O_{3S})、地面水汽压 (E) 等。

3.1 地面臭氧和紫外辐射、整层大气臭氧

观测表明, 漠河地区地面臭氧有明显的日变化和逐日变化特征, 其变化规律与 UV 大致类似。但是, 地面臭氧与 UV 之间的关系并不都是同步变化的, 这一点与广东鼎湖山森林地区地面臭氧与 UV 之间的变化特征有相似之处^[4] (图 1)。因而, 地面臭氧与 UV 之间的相互关系是比较复杂的, 对其研究就不应仅限于二者之间的相关分析, 更重要的是它们之间影响机制和影响因子的探讨。臭氧每日的最大值一般出现在上午 10:00 左右, 与国内其他地点 (黑龙江龙凤山、浙江临安、青岛、广东鼎湖山) 的观测结果—臭氧最大值出现在中

午前后或 14:00 左右显著不同^[2~4]。漠河 UV 的日变化规律比较明显, 这与其他地区 UV 的变化特征类似。漠河 UV 每日的最大值一般在 14:00 左右。仔细对比臭氧和 UV 之间的关系, 发现一个新的现象—所有日期臭氧最大值都出现在 UV 最大值之前, 这可能是该地区臭氧日变化的典型特征或 1997 年 3 月特有的特征。根据目前有限的观测资料来分析, 其可能原因包括: 1) 局地氮氧化物 (NO_x) 的排放源不是很强, 据观察, 当地各种交通工具的流量不是很大; 2) 局地大气中挥发性有机物 (VOC) 浓度非常低, 因为当地冬季的气温和光合有效辐射 (PAR) 都非常低, 而气温和 PAR 是植物 VOC 排放的重要因子^[5,6]。这样, 随着早晨不断增强的 UV 照射, 夜间积聚加上早晨排放到大气中的 NO_x 等物质便可通过光化学反应逐渐产生臭氧, 然而由于局地 NO_x 等浓度比较低以及在光化学反应中的消耗又没有充足的补充, 从而造成 10:00 左右 NO_x 基本消耗殆尽以及臭氧的峰值。其后, 由于大气中没有足够的 NO_x , 因而

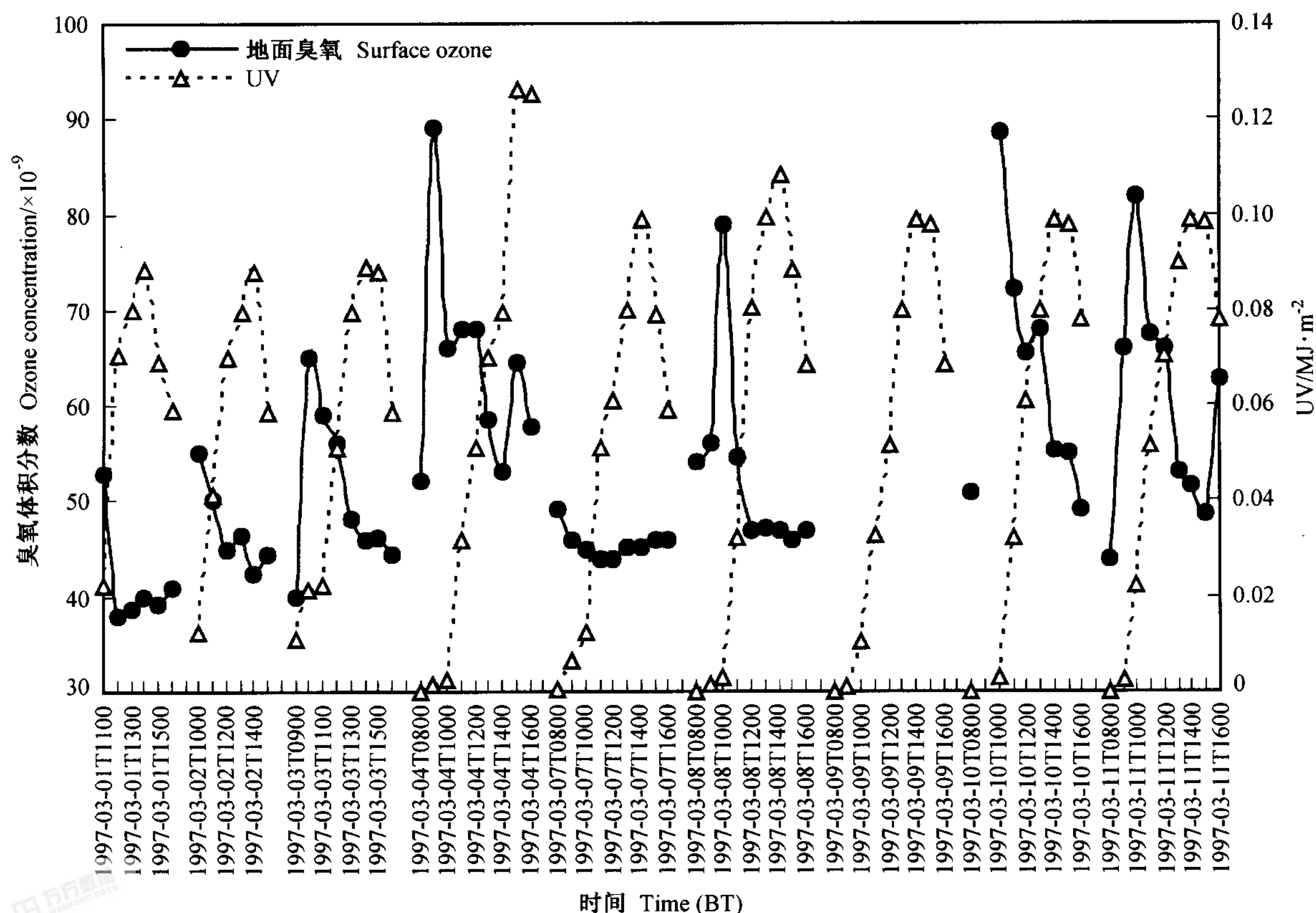


图 1 漠河地面臭氧和紫外辐射的观测值

Fig. 1 The measured surface ozone and solar ultraviolet radiation at Mohe county

不足以产生中午或下午臭氧的峰值,虽然 UV 在 14:00 左右为一天的最大值。为配合日食观测,当地政府在日食前 1、2 天采取措施以控制污染物的排放,使得日食当天大气能见度很好,空气质量也有明显提高,它可能影响臭氧日变化约 2~3 天,但不可能影响到整个观测期间臭氧的日变化特征。

观测期间,整层大气臭氧的日变化特征不很明显,或没有典型的规律性。

3.2 臭氧与其影响因子之间的相互关系

在观测的基础上,依据 UV 能量守恒建立了近地面臭氧和整层臭氧的经验算法,均取得了比较好的计算结果^[7~9],这里简要介绍一下该经验算法。

UV 能量经大气传输到达地面,影响其能量传输的主要因子有:1) 臭氧因子:大气中臭氧对 UV 的选择性吸收,用 $e^{-k_1 O_{3S}m}$ 表示,其中 k_1 为臭氧对 UV 的平均吸收系数, $k_1 = 3.30 \times 10^5 \text{ Pa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, Q_{3S} 为近地面臭氧浓度, m 为大气质量,此项简称臭氧项。2) 光化学因子:大气中的物质对 UV 的吸收,用 $e^{-k_2 \omega m}$ 表示, k_2 为水汽对太阳总辐射的平均吸收系数, ω 为整层大气水汽含量,其值通过地面水汽压 E 用经验公式计算得到,此项简称光化学项。3) 气溶胶因子:空气分子、气溶胶等的散射,以及地表反照率等对 UV 的影响,用 $e^{-D/S}$ 表示,此项简称气溶胶项。地面 UV 来源于这三方面的贡献,因此,通过对 UV 和其 3 个影响因子的统计分析,得到并确定了 UV 和其 3 个影响因子之间很好的能量关系^[7~9]。为了便于计算臭氧和研究臭氧与其影响因子间的相互关系,可以进一步得到臭氧项与光化学项、散射项、 Q_{UV} 之间的定量关系:

$$e^{-k_1 O_{3S}m} = A_1 e^{-k_2 \omega m} + A_2 e^{-D/S} + A_3 Q_{UV} + A_0. \quad (1)$$

根据对实测数据的统计分析便可确定经验关系式 (1) 中的系数和常数,并可应用于臭氧浓度的计算。需要说明的一点是,地面臭氧和整层大气臭氧在大气中的物理、化学过程存在很大的差别,如臭氧与其他各种物质的反应过程、反应物的浓度、反应速率等,但它们都涉及与 UV、光化学因子、散射因子等共同的能量作用,只不过是程度不同而已,即关系式 (1) 中的系数和常数

不同,而这些恰可以由实测数据客观确定。因此,可以将此方法用于地面臭氧和整层大气臭氧的计算以及臭氧与其影响因子之间相互关系的研究^[7~9]。

首先看地面臭氧逐时值。计算中,各辐射量均为小时累计值,其他量均为小时平均值。对 1997 年 3 月 1~11 日共 8 日 (3 月 5 日因全天云量 $N \geq 8$, 舍去; 3 月 6 日没有观测; 3 月 9 日为日全食,为排除日全食对地面臭氧可能带来的影响,9 日资料舍去) 每日逐时的地面臭氧浓度、太阳辐射、气象资料等 64 组数据进行统计分析,得到了 $e^{-k_1 O_{3S}m}$ 与 $e^{-k_2 \omega m}$ 、 $e^{-D/S}$ 、 Q_{UV} 的相关系数 R 为 0.855。图 2 给出 1997 年 3 月 1~11 日,漠河每日逐时地面臭氧的计算值 1 以及观测值。观测发现,云量较大、云较厚时,直接辐射接近零或等于零,这使得对气溶胶项的描述失去意义。为较好地表示此种情况下的散射状况,计算中同时考虑了将 D/S 换为 D/Q 时每日逐时的地面臭氧,得到 $e^{-k_1 O_{3S}m}$ 与 $e^{-k_2 \omega m}$ 、 $e^{-D/Q}$ 、 Q_{UV} 的 R 为 0.856。图 2 中同时给此种情况下每日逐时地面臭氧的计算值 2。

地面臭氧浓度的计算结果比较好,两种方法的计算值与观测值逐时和逐日的变化规律均比较一致,它们与观测值的最大相对偏差分别为 29.76%、29.99%,均小于 30%,相对偏差的平均值分别为 11.91%、11.86%。计算还表明,总的计算结果以用 D/Q 的方法略好。因而利用 D/Q 可以较好、客观地表示气溶胶、云等的综合散射作用,特别是在云量比较大的条件下。

其次,将上述方法用于整层大气臭氧总量逐时值 (即小时正点值)。对 3 月 1~11 日共 9 日 (3 月 5 日全天云量 $N \geq 8$, 舍去; 3 月 6 日没有观测) 每日逐时的整层大气臭氧、辐射、气象资料等 68 组数据进行了与前面类似的分析,得到了 $e^{-k_1 O_{3T}m}$ 与 $e^{-k_2 \omega m}$ 、 $e^{-D/S}$ 、 Q_{UV} 的 R 为 0.9204。在图 3 中给出了 1997 年 3 月 1~11 日,漠河每日逐时的整层大气臭氧总量的计算值 1 以及观测值。

同样,为改善云量较大、云较厚情况下的计算结果,在计算整层大气臭氧总量逐时变化时,研究了将 D/S 换为 D/Q 的情况。对 9 日 68 组逐时的数据进行了同样的分析,得到 $e^{-k_1 O_{3T}m}$ 与 $e^{-k_2 \omega m}$ 、 $e^{-D/Q}$ 、 Q_{UV} 的 R 为 0.9207。在图 3 中同样

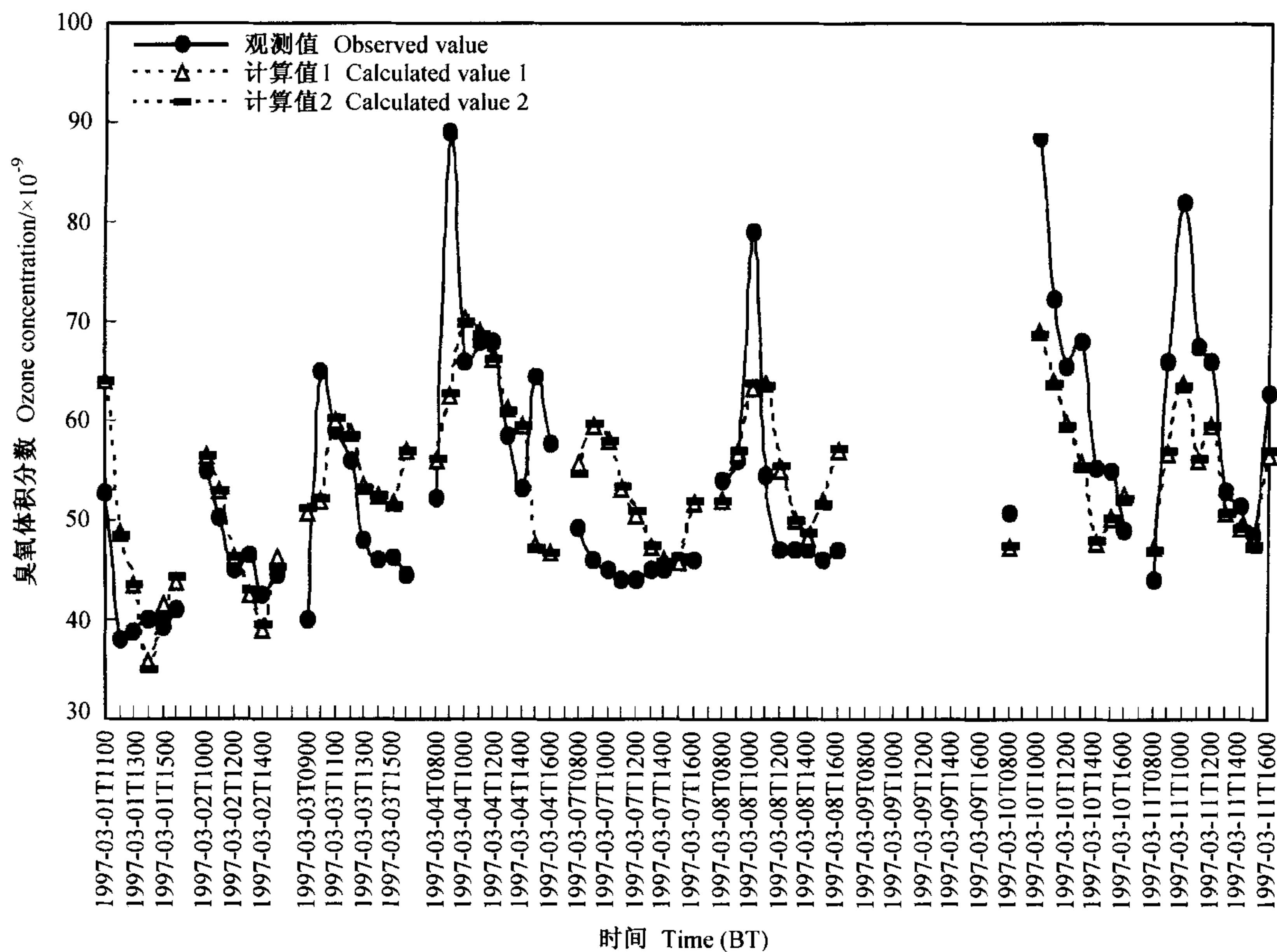


图 2 漠河地面臭氧的观测值和计算值

Fig. 2 The measured and calculated surface ozone at Mohe county

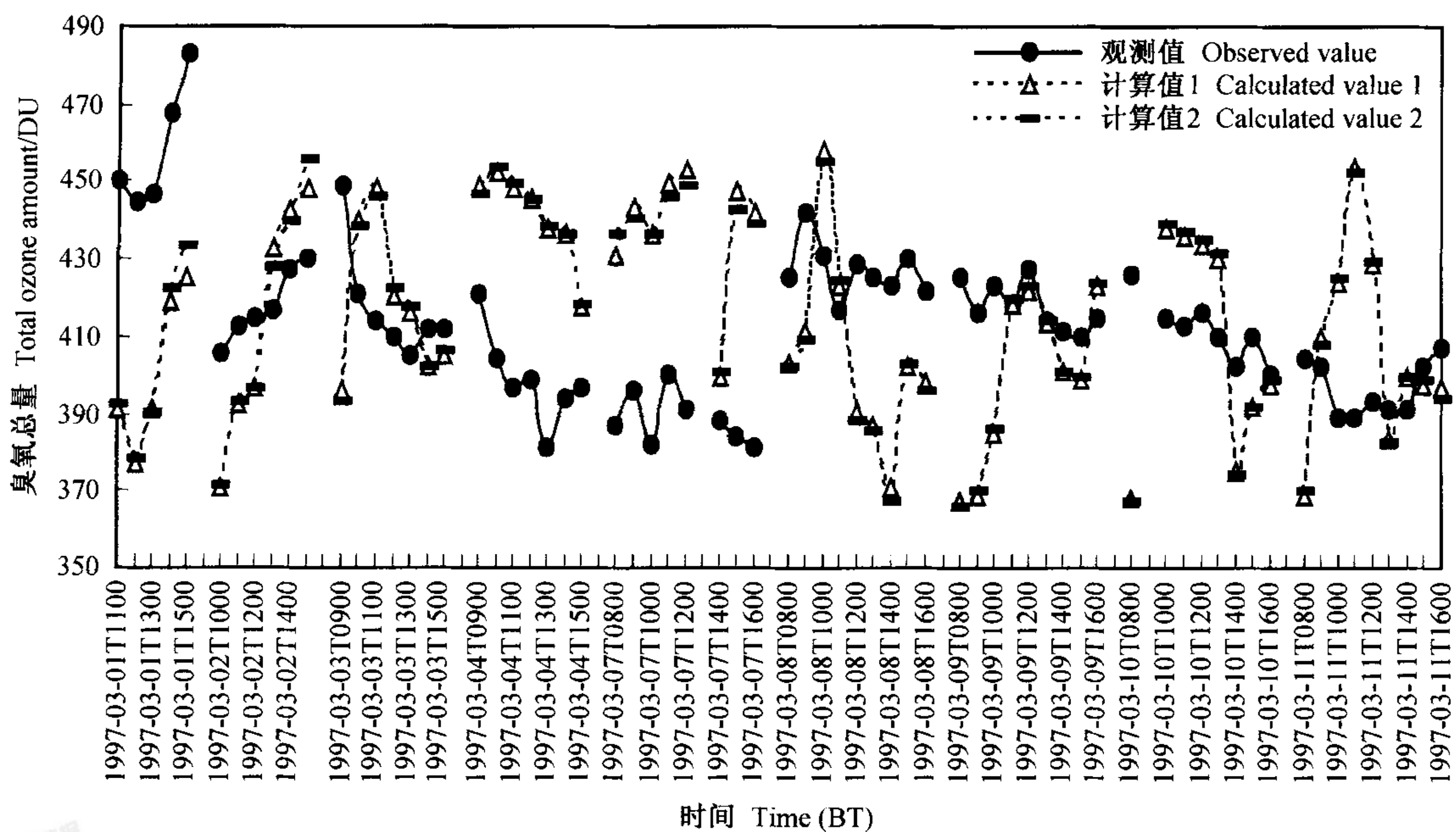


图 3 漠河整层大气臭氧总量的观测值和计算值

Fig. 3 The measured and calculated total ozone amount at Mohe county

给出此期间每日逐时整层大气臭氧总量的计算值 2。

可以看到, 计算值 1 和计算值 2 与观测值均比较接近, 它们与观测值相对偏差的平均值分别为 7.44%、7.41%。将 D/S 换为 D/Q 后, 计算结果变化不是很大, 但相关系数、计算值与观测值的相对偏差均略微提高, 相对偏差的最大值减小, 由 3 月 11 日 11 时的 16.58% 减小为 16.27%。所以, 在计算地面和整层臭氧逐时值时, 将 D/S 换为 D/Q 可以更好地反映气溶胶的作用, 并改善计算结果。

将研究臭氧逐时值的方法用于日平均值, 此时, 辐射量为日总量的平均值, 臭氧量为日平均值。首先看地面臭氧。对 10 天资料的统计分析表明, $e^{-k_1 O_{3Sm}}$ 与 $e^{-k_2 um}$ 、 $e^{-D/S}$ 、 Q_{UV} 之间仍然存在着较好的相关关系, $R=0.843$, 并确定了经验公式中的各个系数。利用新的系数计算了 3 月 1~11 日漠河地面臭氧浓度, 表 1 给出其计算值、观测值以及它们的相对偏差。

可见, 计算值与观测值相对偏差的平均值为 9.00%, 其最大值为 15.59%, 计算结果同样比较好。虽然计算值与观测值的最大相对偏差为 15.59%, 但其绝对偏差很小, 仅为 5×10^{-9} , 而且表 1 中绝对偏差的最大值也仅为 7×10^{-9} 。因此, 计算结果的准确度还是比较好的。

对于 10 个整天整层大气臭氧总量日平均值而言, 通过对数据的统计分析, 同样得到了 $e^{-k_1 O_{3Tm}}$ 与 $e^{-k_2 um}$ 、 $e^{-D/S}$ 、 Q_{UV} 之间的 R 为 0.886 以及公式中的新的系数。表 2 给出 3 月 1~11 日漠河整层大气臭氧总量的观测值、计算值以及它们的相对偏差。

计算值与观测值的最大相对偏差为 3.83%, 其相对偏差的平均值为 1.83%。计算结果令人比较满意。可见, 经验方法用于计算日平均值时也取得了比较好的结果, 相对偏差的最大值和平均值都比逐时值情况都有了明显改善。

臭氧经验公式一旦建立, 便可由简单、易得的观测资料来获得地面或整层大气的臭氧, 特别是对整层大气臭氧而言, 其优点是经济、简单、实用。对实验数据的分析表明, 此计算方法在计算地面臭氧和整层大气臭氧总量小时值、日平均值等方面都是可行的。另外, 臭氧经验公式还可以用来分析不同因子的变化对臭氧的影响, 并可

得到与观测事实一致的结果^[4,8]。相对而言, 地面臭氧的计算结果不如整层大气臭氧的好, 这可能是由于影响地面臭氧的因素远比整层大气臭氧复杂得多, 例如近地面层内大气湍流的变化、测点附近污染源排放的变化 (如臭氧的各种前体物氮氧化物 NO_x 、CO、VOC 等)、污染物近距离的快速输送过程、气象条件变化等都将对近地面臭氧造成不同程度的影响。另外, 地面臭氧浓度在量值上也远小于整层大气臭氧, 这使得其受外界因素影响变化的幅度要远大于整层大气臭氧。

虽然根据能量守恒原理建立了臭氧及其影响因子之间的经验公式, 并在广东鼎湖山森林、北京等地区得到了较长时间序列的资料验证^[7~9], 而且本研究也得到了较好的初步结果, 但相对而言本研究测量得到的实测资料还比较有限, 因而还需要更多实验数据的验证, 以使该方法得到进一步的完善。从另一方面来讲, 利用 UV 能量守恒原理来宏观地处理臭氧及其光化学过程有关的问题, 应该是一种值得研究的方法, 其优点是简单、省时、客观、可靠。

虽然对流层臭氧只占整层臭氧的约 10%, 但有研究表明, 对流层臭氧比平流层臭氧更能吸收 UV^[10]。由于低层大气密度远比高层大, 因此它们对太阳辐射的多次散射作用将增强, 同时对太阳直接辐射的衰减也将会增强, 这将影响到臭氧以及大气中的其它物质对 UV 总能量的吸收和利用, 从而影响到臭氧的光化学产生和消耗过程, 这一影响可能通过增加光程或大气质量而产生。所以, 就臭氧以及大气中的其他物质对 UV 总能量的吸收和大气质量变化之间的关系做一试验。

在对 3 月 1~11 日共 8 天每日逐时的地面臭氧浓度、太阳辐射、气象资料等 64 组数据进行分析时, 对于臭氧项和光化学项中大气质量的处理方法为: 1) $2m$ 、 $3m$ 、 $4m$; 2) m^2 、 m^3 。其余各项取值均与前面相同。经过与前面类似的计算, 得到了 $e^{-k_1 O_{3Sm}}$ 与 $e^{-k_2 um}$ 、 $e^{-D/Q}$ 、 Q_{UV} 之间的 R 、相对偏差的最大值 δ_{max} 、相对偏差的平均值 δ (64 组数据) (表 3)。

对比后发现, 两种方法中, 虽然以 m^2 方法的相关系数为最大, 但其计算结果并不是最好的, 这说明只从 R 值的大小来判断计算结果是不行的。因此, 在研究臭氧与其影响因子之间的相互关系

表 1 漠河地面臭氧浓度（日平均值）的观测值、计算值及相对偏差
Table 1 The measured and calculated surface ozone concentrations And their relative biases at Mohe county

日期 Date	观测值 Observed value/ $\times 10^{-9}$	计算值 Calculated value/ $\times 10^{-9}$	相对偏差 Relative bias/%
1	37	42	-15.59
2	48	41	14.66
3	52	55	-4.73
4	62	65	-3.57
5	57	52	9.80
7	45	49	-9.35
8	53	59	-11.74
9	66	59	11.02
10	65	60	7.97
11	60	58	3.53
平均 Average			9.00

表 2 漠河整层大气臭氧总量的观测值、计算值及相对偏差
Table 2 The measured and calculated total ozone amount and their relative biases at Mohe county

日期 Date	观测值 Observed value/DU	计算值 Calculated value/DU	相对偏差 Relative bias/%
1	459	443	3.29
2	418	421	-0.82
3	412	428	-3.83
4	395	387	2.11
5	402	397	1.13
7	388	396	-2.26
8	427	417	2.32
9	417	421	-1.10
10	409	412	-0.81
11	396	394	0.69
平均 Average			1.83

表 3 不同大气质量试验条件下地面臭氧的计算结果
Table 3 The test results of surface ozone at different air mass

项目 Item	2m	3m	4m	m^2	m^3
R	0.8586	0.8594	0.8587	0.941	0.934
$\delta_{\max}/\%$	29.67	29.93	31.06	40.05	71.19
$\delta/\%$	11.74	11.69	11.78	12.98	21.67

时，应该以一定的物理原理为基础，但 R 值可以做为一个参考条件。采用 $2m$ 、 $3m$ 、 $4m$ 的方法中，计算结果以 $3m$ 的方法为最好，总体来说，比使用 m 的略好一些。这可能表明近地层大气由于密度的差别可能对辐射传输过程、臭氧光化学过程产生一定影响。由于对流层中的各种过程非常复杂，这方面还有很多过程需深入探索。

4 结论

漠河地区近地面臭氧有明显的日变化特征，

其峰值出现时间均在每日上午10:00左右，并明显早于 UV 峰值出现时间，这一典型特征与国内其它地区显著不同。观测期间，整层大气臭氧总量的日变化特征不明显，即没有明显的规律性。对漠河地区地面臭氧和整层大气臭氧总量与其影响因子相互关系的研究表明，以 UV 能量守恒为基础建立的臭氧（包括近地面臭氧和整层大气臭氧）与其影响因子的定量关系在漠河地区同样是存在的，其经验算法在漠河地区是适用和可行的，并且适于近地面臭氧和整层大气臭氧。对于近地面和整层大气臭氧小时值和日平均值而言，利用该方法得到的计算值与观测值吻合较好，它们在变化规律上也基本一致。对于地面臭氧小时值和日平均值而言，计算值与观测值相对偏差的平均值分别小于 11.9%、9.0%；对于整层大气臭氧小时值和日平均值而言，计算值与观测值相对偏差的平均值分别小于 7.4%、1.8%。因而，UV 能量

是臭氧光化学反应的能量源泉,是影响近地面臭氧和整层大气臭氧重要和关键的因子。对大气中的物质如气溶胶、云等的散射作用可以利用散射辐射/直接辐射 (D/S) 和散射辐射/总辐射 (D/Q) 来描述,在云量较大和云较厚的情况下,利用 D/Q 表示散射作用可以改善云和气溶胶散射作用的客观表达,并提高臭氧(包括近地面和整层大气臭氧)计算的准确度。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所孔琴心和王庚辰研究员、刘广仁同志的帮助和观测工作,感谢黑龙江漠河县中心苗圃对观测工作提供的有力保证,感谢漠河气象局刘景福同志提供的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Crutzen P J. Tropospheric ozone: An overview. In: *Tropospheric Ozone Regional and Global Scale Interactions*, NATO ASI Series, Series C, 227. Isaksen I S A, Ed. D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, 1988. 3~32
- [2] 颜鹏, 李兴生, 罗超, 等. 中国清洁地区地面 O_3 、 NO_x 、 SO_2 的分布特征. 周秀骥主编, 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响 (一). 北京: 气象出版社, 1996. 1~9
Yan Peng, Li Xingsheng, Luo Chao, et al. The distribution characteristics of O_3 , NO_x , SO_2 in a clean area of China. In: *The Change of Atmospheric Ozone and Its Effect to Climate Change in China* (I) (in Chinese), Zhou Xiuji, Ed. Beijing: China Meteorological Press, 1996. 1~9
- [3] 李金龙, 梁宝生, 徐新华等. 青岛市沙子口站地面大气臭氧、气溶胶及其前体物的观测研究. 周秀骥主编, 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响 (一). 北京: 气象出版社, 1996. 10~18
Li Jinlong, Liang Baosheng, Xu Xinhua, et al. Monitoring and research of ground atmospheric ozone, particle and its precursor at Shazikou station in Qingdao city. In: *The Change of Atmospheric Ozone and Its Effect to Climate Change in China* (I) (in Chinese), Zhou Xiuji, Ed. Beijing: China Meteorological Press, 1996. 10~18
- [4] 白建辉, 徐永福, 陈辉, 等. 鼎湖山森林地区臭氧及其前体物的变化特征和分析. 气候与环境研究, 2003, 8 (3): 370~380
Bai Jianhui, Xu Yongfu, Chen Hui, et al. The variation characteristics and analysis of ozone and its precursors in the Dinghushan Mountain forest area. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, 8 (3): 370~380
- [5] Guenther A, Hewitt C, Erickson D, et al. A global model of natural volatile organic compound emissions. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100 (D5): 8873~8892
- [6] 白建辉, 王庚辰, 任丽新, 等. 内蒙古草原挥发性有机物排放通量的研究. 环境科学, 2003, 24 (6): 16~22
Bai Jianhui, Wang Gengchen, Ren Lixin, et al. The emission flux of volatile organic compounds in the Inner Mongolia Grassland. *Environmental Science* (in Chinese), 2003, 24 (6): 16~22
- [7] 白建辉, 王明星, 陈辉, 等. 地面臭氧的变化规律和计算方法的初步研究 I. 紫外波段, 气候与环境研究, 2002, 7 (1): 49~60
Bai Jianhui, Wang Mingxing, Chen Hui, et al. A primary study on the variational regularity and calculating method of surface ozone. Part I: UV band. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, 7 (1): 49~60
- [8] Bai Jianhui, Wang Gengchen, Wang Mingxing. An empirical correlation between surface O_3 and its factors, *Atmospheric Environment*. 2005, 39: 4419-4423.
- [9] 白建辉, 王庚辰. 大气臭氧总量的一个统计计算方法. 环境科学学报, 1994, 14 (4): 397~402
Bai Jianhui, Wang Gengchen. A statistical calculation method for the total ozone amount. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 1994, 14 (4): 397~402
- [10] Bruhl C, Crutzen P L. On the disproportionate role of tropospheric ozone as a filter against solar UV-B radiation. *Geophys. Res. Lett.*, 1989, 16: 703~706