

深对流云输送对于对流层 O_3 、 NO_x 再分布的作用*

李 冰 刘小红 洪钟祥 肖 辉

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 利用一个冰雹云模式与云化学输送模块耦合而成的三维对流云化学/输送模式, 研究对流云对重要的大气污染物臭氧 (O_3)、氮氧化物 (NO_x , 包括 NO 和 NO_2) 的输送作用。模式较好地体现了一个单体积云的发展过程及其特征。云化学/输送模式的结果表明, 云内强烈的垂直输送能在 30 min 左右, 把低层低体积分数的 O_3 和高体积分数的 NO_2 快速、有效地输送到对流层的上部, 造成化学物种的再分布。而在云顶附近, 由于对流穿透了对流层的顶部, 造成了上层高体积分数 O_3 的向下侵入, 说明云的对流活动除了能把边界层内的污染物向上输送, 其夹卷作用还可以造成平流层和对流层化学物质的交换。

关键词 云输送 对流层 臭氧 氮氧化物

1 引言

云对大气化学物种的垂直再分布、化学转化、物种迁移起着重要作用。对流层内存在各种生物源和人为源, 它们排放出大量的化学物质, 如二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_x)、碳氢化合物 (HC) 和其它一些还原性气体。这些化学物质在对流层这个大的化学反应发生器中进行各种复杂的光化学、化学反应, 生成自由基和二次污染物如 HO_x 、 O_3 、PAN 等。对流层中化学反应物和产物的空间分布不是均一的, 其输送时间由风速、湍流、行星波和慢余差环流来决定。一般来说, 对流层上部与下部垂直混合的时间平均为 1 个月, 然而, 当有活跃的深对流云存在时, 垂直输送可在 1 个小时内把边界层内的空气抬升到对流层顶^[1], 从而对对流层内的大气化学组成产生显著影响, 使得地面附近短寿命的污染物能够迅速地输送到对流层上部, 并在那里维持更长的时间, 尤其是深对流云和强的局地风暴, 还可进一步引起对流层和平流层之间化学物质的交换。Dickerson 等^[2]分析了一次雷暴对不易溶痕量气体的对流输送的直接观测, 指出雷暴中的上升气流把 NO_x 带到高处, 造成云内 NO_x 的高体积分数。在 NASA/STRAT 项目中, 飞机的观测表明云对流输送引起的丙酮、 CH_3OOH 、 H_2O_2 等 HO_x 储库的注入, 可造成热带对流层上部 HO_x 的大量增加, 从而显著影响对流层上部的大气化学^[3]。

模式研究也表明了云的垂直输送对化学物种垂直再分布的显著影响^[4~6]。Wang 和 Chang^[7]发展了一个迄今较为完善的包括动力学、微物理和化学的三维云模式, 其二维

1999-05-10 收到

* 中国科学院“九五”重大A项目KZ951-A1-403-01-02专题资助和中国科学院“百人计划”(大气化学方向)的资助

版本被用来模拟局地强风暴对 SO_2 再分布的影响^[8]及热带深对流云对 O_3 和 DMS 的输送作用^[9]。孔凡铀等^[10]用一个二维的非化学对流云输送模式研究了云对化学物种的垂直输送作用。

本文利用我们建立的一个三维冰雹云化学/输送模式, 研究云输送对重要的大气污染物 O_3 、 NO_2 的再分布作用。

2 模式描述

本模式是由云模式和化学物种的输送模块耦合而成的三维对流云化学/输送模式。

2.1 云模式

云动力学及微物理采用一个三维冰雹云数值模式^[10], 模式采用 K-W 模式体系的完全弹性原始方程组为模式动力结构, 包括 5 种水成物: 水汽、云、雨、冰晶(雪)和霰(雹), 21 个详细的微物理过程, 其中暖云微物理过程有 4 个, 使用 Kessler 参数化方法; 冰相微物理过程主要有 17 个, 使用体积水参数化方案。

化学输送模块由云动力学模式提供气象场, 计算化学物种的体积分数分布。本文的模拟主要考虑一些溶解度较低的气相物种的输送, 把它们视为被动的示踪物 (passive tracers), 因此, 略去了气、液相互作用及化学转化过程。化学物种的输送方程为

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} - v \frac{\partial c}{\partial y} - w \frac{\partial c}{\partial z} + K_h \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial c}{\partial z} \right), \quad (1)$$

其中, c 表示物种体积分数, 其它符号为气象上常用的^[10]。

2.2 模拟区域及初始条件

模拟的水平尺度 X 方向为 36 km, Y 方向为 36 km, 高度为 19 km, 水平格距为 1 km, 垂直格距为 0.5 km。云动力学模式的时间步长为 10 s, 化学输送模块的时间步长为 30 s, 也就是说, 云动力学模式每计算 3 个时步, 其输出的气象场就驱动一次化学输送模块。

云模式的初始场是 1997 年 7 月 9 日 12:55 在陕西旬邑一次雹天气过程发生前的实际探空资料。图 1 是温度、露点、环境风场的初始廓线。

图 2 给出了 O_3 、 NO_2 的初始体积分数廓线, 其中 O_3 初始值用的是中纬度地区的观测值, 其体积分数是随高度增加的; NO_2 体积分数设为随高度呈负指数递减:

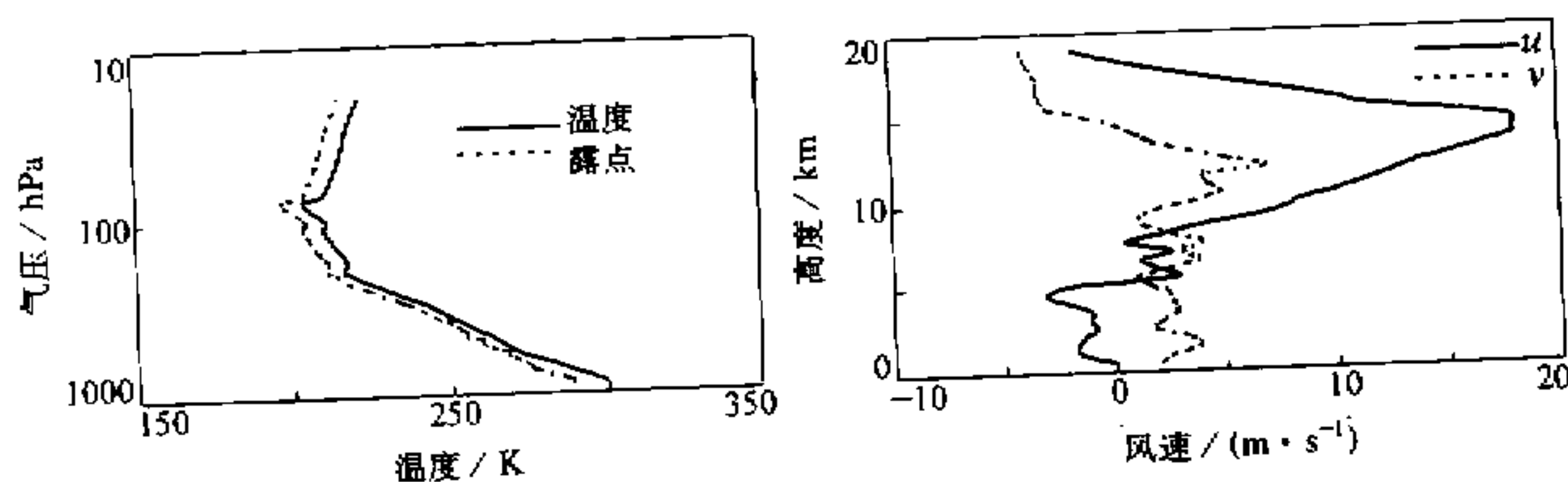
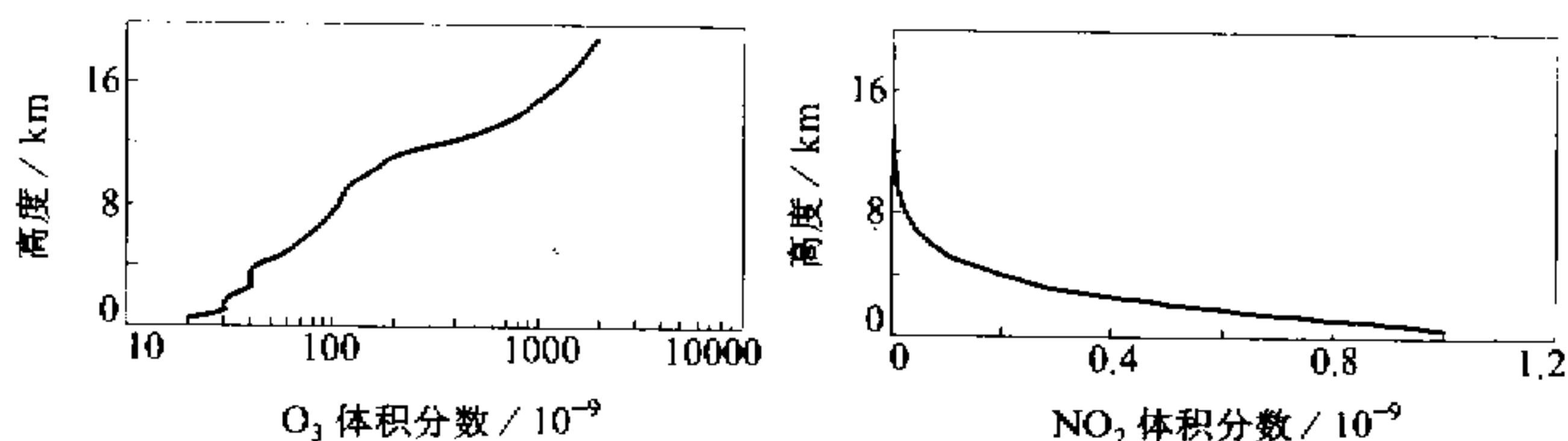


图 1 温度、露点温度、环境风场的初始廓线

图2 O_3 、 NO_2 的初始体积分数廓线

$$c(z) = c_0 \exp(-z/H_i), \quad (2)$$

c_0 为 NO_2 的地面体积分数初值, H_i 是标高, 这里取为 2000 m。

3 结果与讨论

3.1 云动力学模式的模拟结果

该雹云个例的生命史约为 1 h, 模式进行了 56 min 的模拟。模拟结果较好地体现了深对流云从发生、发展、成熟到消亡的过程。云在第 8 分钟左右形成, 随后迅速长大; 第 16 分钟时最大云水含量为 2.6 g/kg , 云的伸展宽度约为 24 km, 伸展高度达 8 km, 同时有雨水及少量冰晶和霰存在, 但均悬浮在空中未降至地面; 第 32 分钟时云的发展最为旺盛 (见图 3), 云中最大上升气流速度达到峰值 24 m/s , 此时云体体积庞大, 垂直伸展高度超过 10 km, 水平伸展达 30 km, 在云的顶部出现云砧, 地面出现较强的降雨, 最大雨水含量达到 8 g/kg , 并且伴随着降雹, 雹的峰值含量 7 g/kg 出现在云体中部上升气流最强处, 同时, 在云体上部冰晶含量也显著增加。云底以下出现下沉气流, 这是降水拖曳造成的; 以后, 云逐渐减弱, 到第 56 分钟时, 垂直气流速度变得很小, 云已经基本消散, 雨水、雹的含量也都大大下降, 但由冰晶组成的云砧仍然维持着。

由图 4 可见, 云内强烈的上升气流把近地层大气低体积分数的 O_3 抬升到云顶 12 km 的高处, 形成强的 O_3 体积分数梯度, 在那里气流向两边拉伸形成云砧, 低体积分数的 O_3 被气流带入云砧。在云顶的两侧, 斜向下伸向两侧的气流与其上的空气形成两个空气涡旋, 把高层高体积分数 O_3 夹卷下来, 形成两个高体积分数的辐合区。 NO_2 的分布与 O_3 相反, 高体积分数的 NO_2 被输送上去, 在云砧内形成一个 NO_2 的高值区 (图 5)。由此可见, 云的输送作用能在很短的时间内, 把对流层内人为排放的污染物如 NO_x 迅速输送到对流层顶甚至平流层的下部。为了更清楚地了解云内上下空气交换对化学物种的对流输送作用, 我们给出第 32 分钟三个高度 (8、14 和 17 km) O_3 体积分数与该高度 O_3 初始体积分数之差的水平剖面图 (图 6)。在 8 km 处, 可以看到体积分数差值的等值线大部分为负值, 输送后的 O_3 体积分数与初始时相比, 可减少 80×10^{-9} 以上, 只在左侧有微弱、狭长的正值区, 说明在此高度处, 上升气流很强, 来自低层的低体积分数 O_3 的向上输送对体积分数的分布起主要作用。在 14 km 处, 由于处于对

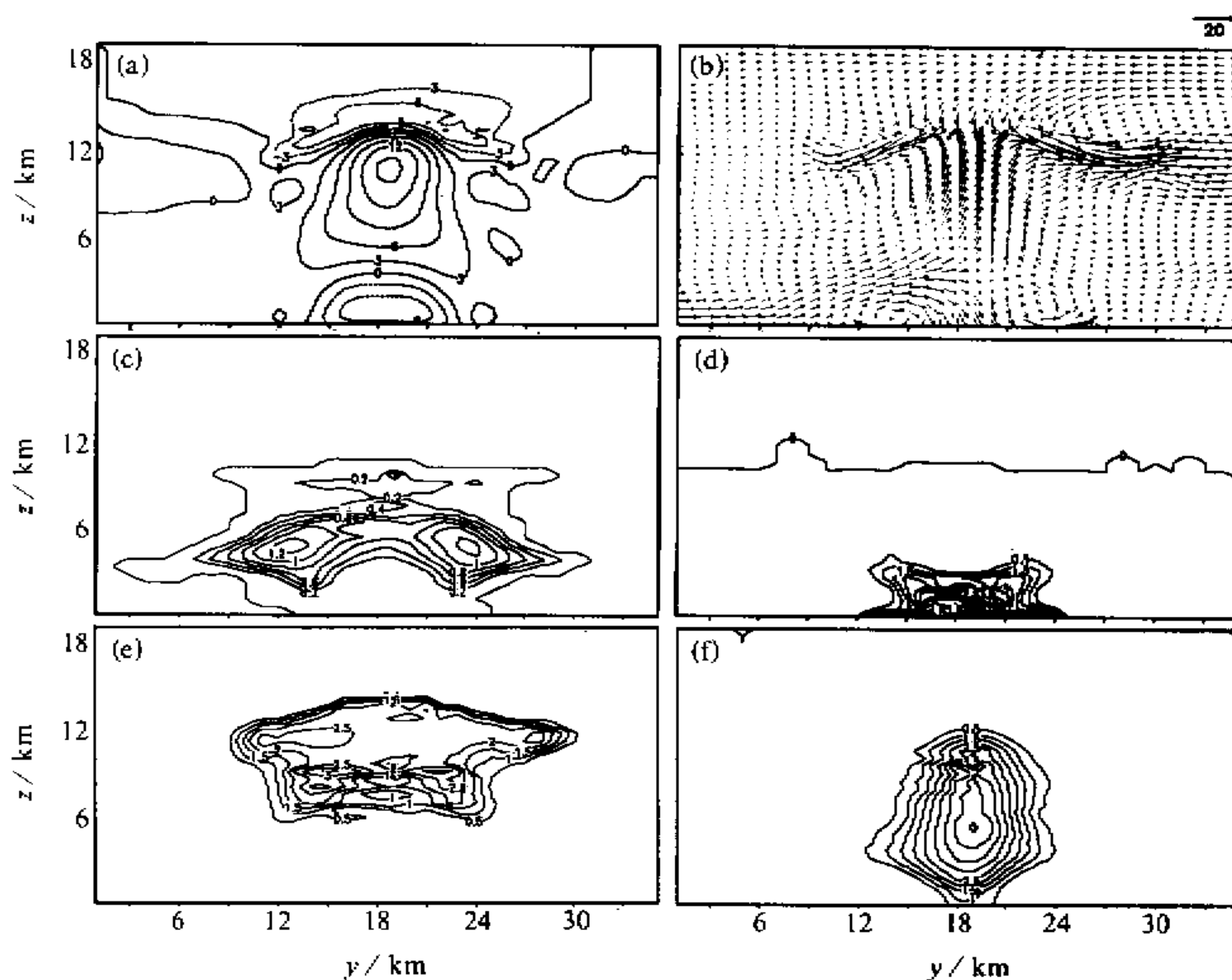


图3 模拟第32分钟时垂直风速 (a, m/s)、 $v-w$ 风矢量 (b, m/s)、云水 (c, g/kg)、雨水 (d, g/kg)、冰晶 (e, g/kg)、霰 (f, g/kg) 的垂直剖面图($x=18$ km)

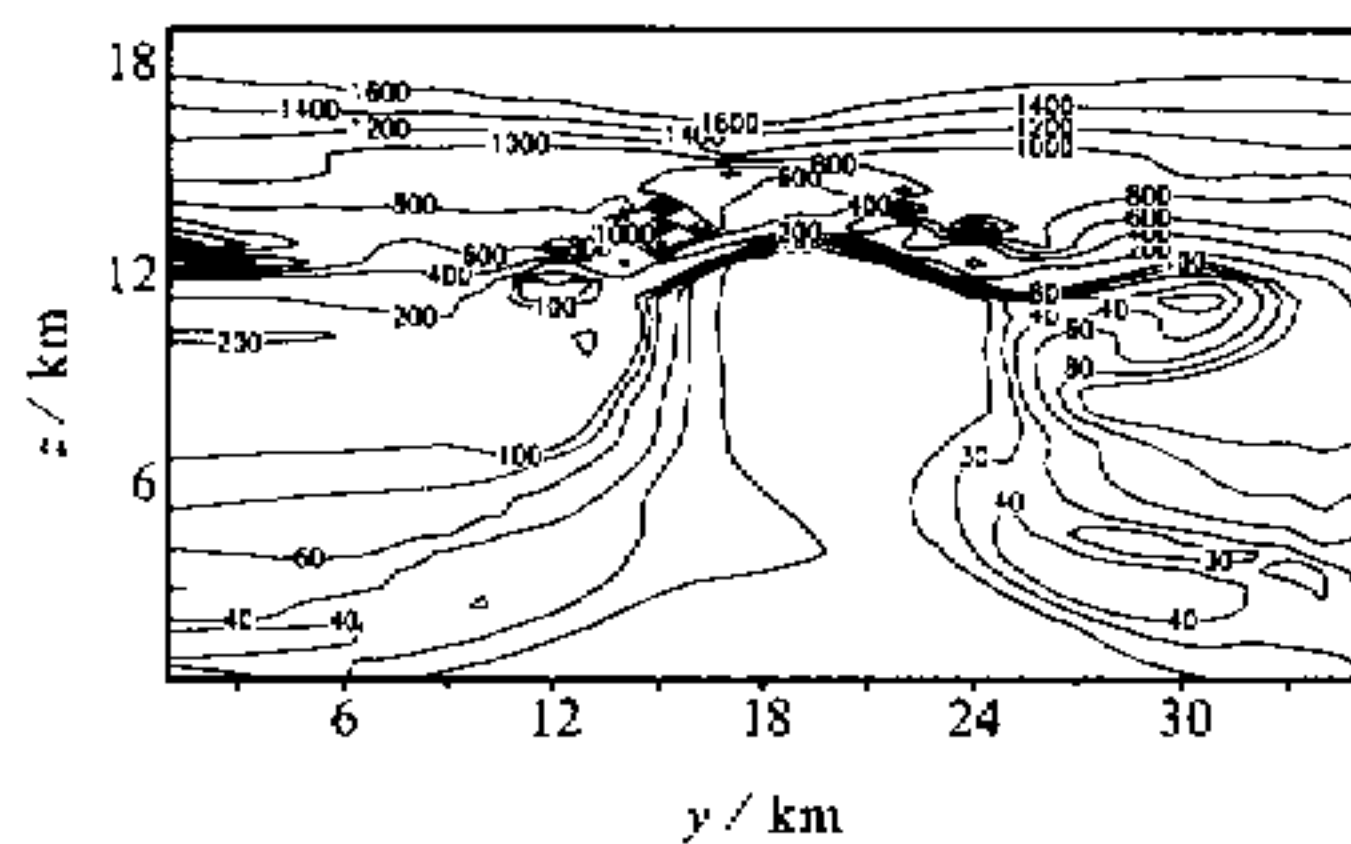


图4 第32分钟时 O_3 体积分数垂直剖面图
 $x=18$ km, 单位: 10^{-9}

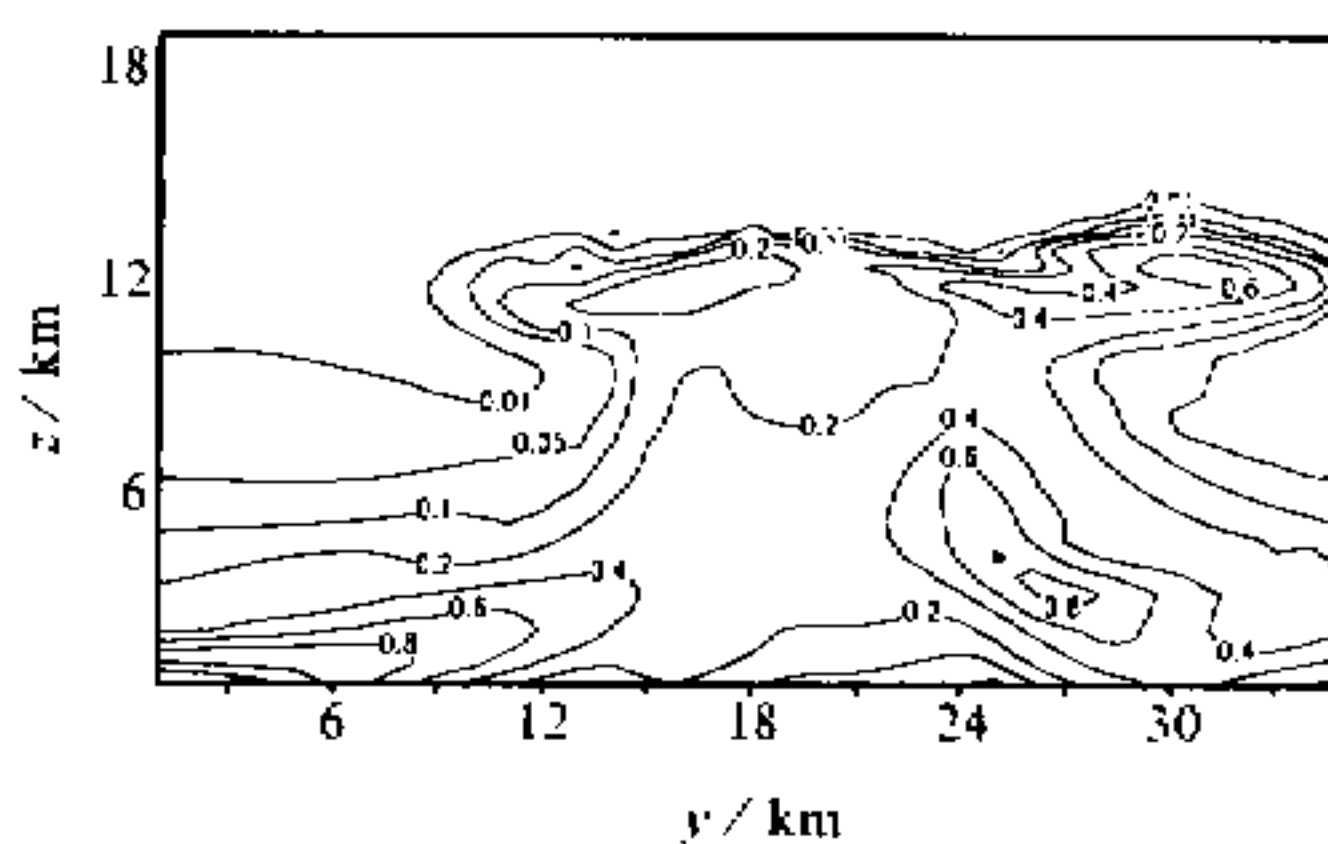


图5 第32分钟时 NO_2 体积分数垂直剖面图
 $x=18$ km, 单位: 10^{-9}

流层和平流层的分界区, 向上的气流输送与平流层空气的向下渗透同时影响了该高度 O_3 的体积分数分布, 图中的负值代表了上升气流的影响, 正值代表了上层高体积分数 O_3 向下的侵入, 它使得该层 O_3 体积分数的增加达 700×10^{-9} 。再向上至 17 km, 已无法看到上升气流的影响, 图中的正值区由微弱的下沉气流造成。

3.2 云化学/输送模式的模拟结果

云内强烈的对流输送对化学物种再分布的作用非常显著, 尤其是在云发展的旺盛期。图 4、5 给出了第 32 分钟时 O_3 和 NO_2 体积分数的垂直剖面图。

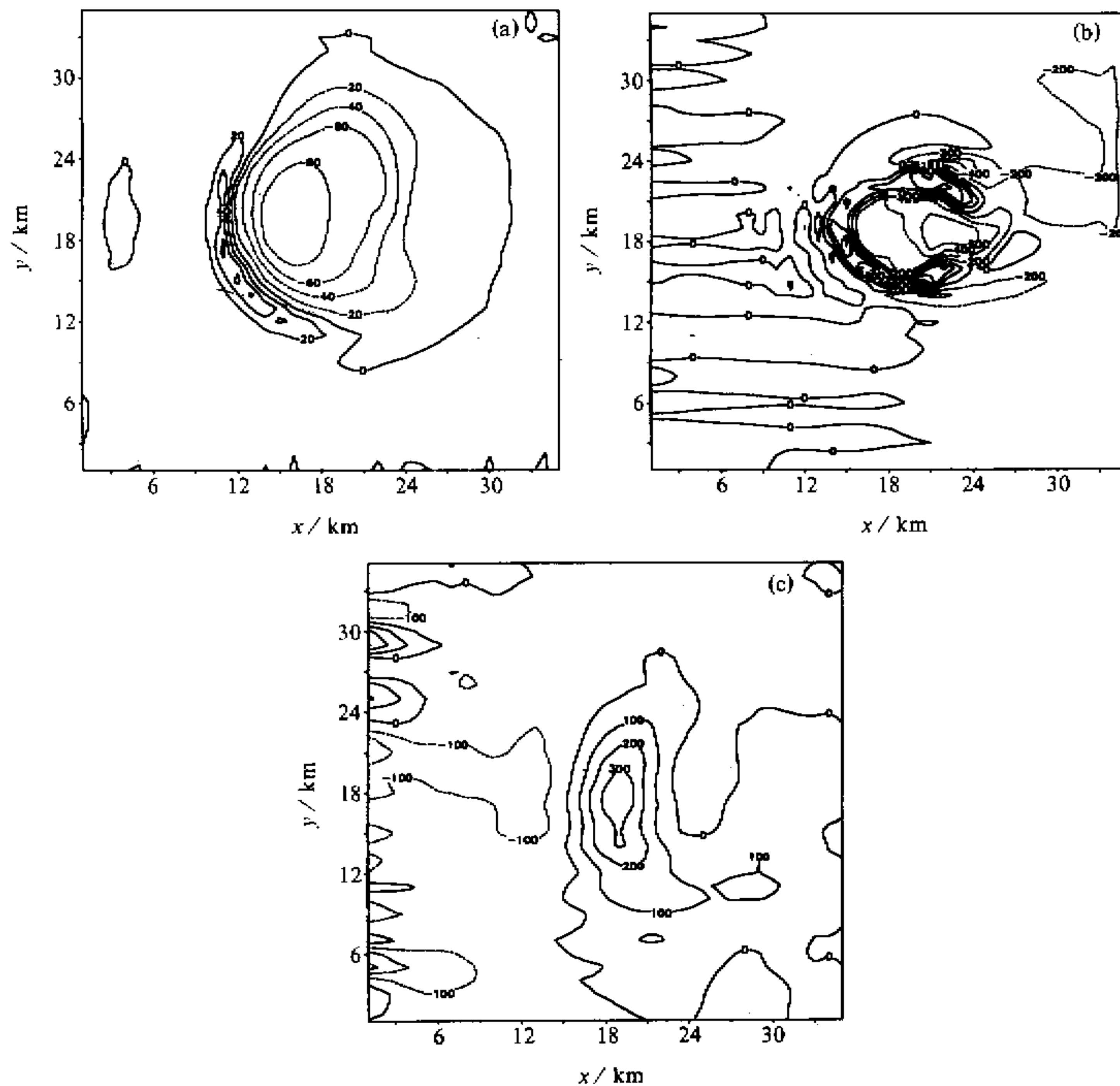


图6 第32分钟时 O_3 在不同高度的体积分数与初始体积分数差值的水平剖面图
(a) 8 km; (b) 14 km; (c) 17 km. 单位: 10^{-9}

4 小结

云内强烈的对流输送对不易溶的化学物种如 O_3 、 NO_x 再分布的作用非常显著。在云发展到第32分钟的旺盛期时, 强烈的上升气流把下层低体积分数 O_3 和高体积分数 NO_2 输送到对流层上部的云顶及云砧内。对 O_3 来说, 在云顶附近, 由于对流穿透了对流层的顶部, 使平流层空气夹卷下来, 造成上层高体积分数的 O_3 向下的侵入, 使得这里的体积分数增大, 从而影响 O_3 的收支。以上的研究结果表明, 云的对流活动是一种快速、有效的输送污染物的途径, 它除了能把边界层内的污染物迅速输送到对流层的上部, 其夹卷作用还可以把平流层下部的 O_3 夹卷下来, 造成平流层和对流层化学物质的交换。

参 考 文 献

- 1 Dieter Kley, 1997, Tropospheric chemistry and transport, *Science*, **276**, 1043~1045.
- 2 Dickerson, R.R., G. J. Huffman, W. T. Luke, L. J. Nunnermacker, K. E. Pickering, A. C. D. Leslie, C. G. Lindsey, W. G. N. Slinn, T. J. Kelly, P. H. Daum, A. C. Delany, J. P. Greenberg, P. R. Zimmerman, J. F. Boatman, J. D. Ray and D. H. Stedman, 1987, Thunderstorms: an important mechanism in the transport of air pollutants, *Science*, **235**, 460~465.
- 3 Prather, M.J. and D. J. Jacob, 1997, A persistent imbalance in HO_x and NO_x photochemistry of the upper troposphere driven by deep tropical convection, *Geophys. Res. Lett.*, **24**(24), 3189~3192.
- 4 Gidel, L.T., 1993, Cumulus cloud transport of transient tracers, *J. Geophys. Res.*, **88**, 6587~6599.
- 5 Liu, S. C., J. R. McAfee and R. J. Cicerone, 1984, Radon 222 and tropospheric vertical transport, *J. Geophys. Res.*, **89**, 7291~7297.
- 6 Liu Xiaohong, Mauersberger G. and Moeller D., 1997, The effects of cloud processes on the tropospheric photochemistry: an improvement of the EURAD model with a coupled gaseous and aqueous chemical mechanism, *Atmospheric Environment*, **31**(19), 3119~3135.
- 7 Wang Chien and Chang J. S., 1993, A three-dimensional numerical model of cloud dynamics, microphysics, and chemistry 3. redistribution of pollutants, *J. Geophys. Res.*, **98**(D9), 16787~16798.
- 8 Wang Chien and P. J. Crutzen, 1995, Impact of a simulated severe local storm on the redistribution of sulfur dioxide, *J. Geophys. Res.*, **100**(D6), 11357~11367.
- 9 Wang Chien, P.J. Crutzen and V. Ramanathan, 1995, The role of a deep convective storm over the tropical Pacific ocean in the redistribution of atmospheric chemical species, *J. Geophys. Res.*, **100**(D6), 11509~11516.
- 10 孔凡铀, 黄美元, 徐华英, 1990, 对流云中冰相过程的三维数值模拟 I: 模式建立及冷云参数化, *大气科学*, **14**(4), 441~453.
- 11 Kong, F. and Qin Yu, 1993, The vertical transport of air pollutants by convective clouds. Part I: A non-reactive cloud transport model, *Adv. Atmos. Sci.*, **10**, 415~427.

The Role of Deep-Convective Cloud Transport in the Redistribution of Tropospheric Chemical Species

Li Bing, Liu Xiaohong, Hong Zhongxiang and Xiao Hui

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Physics and Atmospheric Chemistry,
Chinese Academy of Science, Institute of Atmospheric Physics, Beijing 100029)

Abstract A three-dimensional model of hailstorms coupled with chemistry transport module was used to study the role of deep-convective transport in the redistribution of chemical species of low soluble gases such as O₃ and NO₂. The model simulates the process and character of a single-cell cumulus cloud. The results of cloud transport model show that the strong vertical transport in the cloud could bring low O₃ and high NO₂ in the lower troposphere to the upper troposphere rapidly and efficiently, and cause the redistribution of chemical species. Near the cloud top, high O₃ of stratosphere intrudes into the troposphere when convection penetrates into the stratosphere. It shows that convective activity of cloud could not only transport the pollutants in the boundary layer to the upper level, but turn over the chemical species between the troposphere and the stratosphere for the entrainment of cloud.

Key words cloud transport troposphere ozone NO_x