

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序 ..... 陈卫平 (4069)

再生水灌溉利用的生态风险研究进展 ..... 陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)

绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究 ..... 潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)

绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析 ..... 潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)

再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响 ..... 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)

模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响 ..... 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)

模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响 ..... 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)

再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究 ..... 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)

再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟 ..... 王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)

城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究 ..... 王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)

北京市再生水的公众认知度评估 ..... 张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究 ..... 陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)

世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染来源研究 ..... 王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)

贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究 ..... 张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)

区域大气环境风险源识别与危险性评估 ..... 张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)

稻草烟尘中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素 ..... 刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)

汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性 ..... 胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)

城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应 ..... 隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)

闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征 ..... 杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)

模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响 ..... 刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)

广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异 ..... 孔祥胜, 祁士华, 孙寿, 黄保健 (4212)

松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究 ..... 马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 刘吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)

温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源 ..... 周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)

温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源 ..... 周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)

辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估 ..... 武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)

某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究 ..... 裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)

某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征 ..... 刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)

太原市市灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析 ..... 廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)

上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价 ..... 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)

近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价 ..... 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)

北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究 ..... 张伟, 张洪, 单保庆 (4284)

太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征 ..... 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)

典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征 ..... 朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 孔建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)

螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究 ..... 周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)

固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究 ..... 沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)

采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为 ..... 肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)

水体中甲基汞光化学降解特征研究 ..... 孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)

土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究 ..... 李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)

酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究 ..... 陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)

利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究 ..... 王夏琳, 李睿华 (4346)

地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究 ..... 郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)

表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究 ..... 谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)

抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测 ..... 季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)

废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究 ..... 王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)

基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氨水处理 ..... 庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)

硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究 ..... 钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)

水平电场作用下活性污泥的脱水研究 ..... 季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)

多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中的降解的影响 ..... 宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)

碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究 ..... 陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)

含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为 ..... 王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)

国家大气污染物排放标准体系研究 ..... 江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)

环境基准向环境标准转化的机制探讨 ..... 毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)

对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析 ..... 傅国伟 (4428)

《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录 ..... (4434)

《环境科学》征订启事(4099) 《环境科学》征稿简则(4166) 信息(4180, 4219, 4225, 4275) 专辑征稿通知(4172)

# 北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究

陈鹏飞<sup>1,2</sup>, 张蔷<sup>1\*</sup>, 权建农<sup>1</sup>, 高扬<sup>1</sup>, 黄梦宇<sup>1</sup>

(1. 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089; 2. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

**摘要:** 利用2007~2010年北京地区上空(0~3.5 km)飞机探测的臭氧(O<sub>3</sub>)及氮氧化物(NO、NO<sub>2</sub>)等数据资料,分析O<sub>3</sub>的时空分布特征. 结果表明:①O<sub>3</sub>月平均体积分数随高度变化趋势有较好的一致性,随高度增加,均出现先增大后减小,然后稳定不变的趋势,且高空有一个比较明显的分界线(约1.5 km). 1.5 km以下是O<sub>3</sub>体积分数垂直梯度变化较大的层次,均存在一个O<sub>3</sub>体积分数高值区,说明其受近地面人为活动的影响较大;在1.5 km以上,O<sub>3</sub>体积分数的垂直梯度变化明显减小,此空间处于混合层以上,气团运动受下垫面影响较小,输送作用可能对污染物体积分数的影响更加显著. ②O<sub>3</sub>体积分数变化具有明显的季节特征,春秋季节O<sub>3</sub>体积分数较低,夏季O<sub>3</sub>体积分数较高. 统计的月份中,只有7~9月之间O<sub>3</sub>均值变化最不明显,差异未达显著水平( $P > 0.05$ ),其他月份之间均在0.01水平上差异显著. ③在夏季一天(白天)当中,每小时O<sub>3</sub>体积分数垂直廓线与月平均统计的变化趋势一致. 低空1.5 km以下O<sub>3</sub>体积分数的低值出现在上午(09:00~10:00)时段,高值出现在下午(15:00~16:00)时段,同高度内O<sub>3</sub>体积分数不同时段相差最大约为 $60 \times 10^{-9}$ ;高空1.5~3.5 km内,O<sub>3</sub>体积分数相差不大,一般在 $70 \times 10^{-9} \sim 80 \times 10^{-9}$ 之间波动. ④O<sub>3</sub>体积分数水平区域分布,0~2 km内城区四环O<sub>3</sub>体积分数较高,周边地区也出现较多明显的高值区,源强汇低造成北京市区周边近地层O<sub>3</sub>体积分数较高;高空2~4 km内,除了北京城区O<sub>3</sub>体积分数较高外,城区正北面、东南面(北京-天津方向)、西南面(北京-保定方向)的O<sub>3</sub>体积分数较高. ⑤在0~3.5 km内,O<sub>3</sub>与NO、NO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>/NO值之间都存在着显著的相关关系,O<sub>3</sub>与NO、NO<sub>2</sub>皆为负相关,但与NO<sub>2</sub>/NO值为正相关.

**关键词:** 臭氧; 氮氧化物; 大气边界层; 空间分布; 飞机探测

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4141-10

## Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing

CHEN Peng-fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>, QUAN Jian-nong<sup>1</sup>, GAO Yang<sup>1</sup>, HUANG Meng-yu<sup>1</sup>

(1. Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089, China; 2. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China)

**Abstract:** Based on the aircraft sounding volume fraction concentration data of ozone (O<sub>3</sub>), nitrogen oxides (NO, NO<sub>2</sub>) and other data in Beijing from 2007 to 2010, temporal and spatial evolution of ozone concentration from the ground surface to 3.5 km altitude were studied. Results show that: ① Vertical profiles of monthly average O<sub>3</sub> concentration were in good agreement, with increasing altitude, the concentrations were first increased and then decreased, and then remained almost constant, and there was a clear dividing line at 1.5 km altitude, the vertical gradient of the O<sub>3</sub> concentration changed greatly below which, there were O<sub>3</sub> high-value areas, which were influenced by human activities near the ground; the change of vertical gradient of O<sub>3</sub> concentration was significantly reduced above 1.5 km altitude, this space was above the mixing layer, where the air mass movement was less affected by underlying surface, and the advection-diffusion played a crucial role in the local accumulation process of air pollutants. ② Changes of O<sub>3</sub> concentration showed clear seasonal characteristics, O<sub>3</sub> concentration was lower in spring and autumn, but higher in summer. In the months studied, no significant difference in monthly average O<sub>3</sub> concentration from July to September was detected ( $P > 0.05$ ), but there was significant difference in other months ( $P < 0.01$ ). ③ In summer days (daytime), the variations in the vertical profiles of hourly O<sub>3</sub> concentration were consistent with those of the monthly O<sub>3</sub> concentration. The O<sub>3</sub> concentration was lower near the surface within 1.5 km in the morning (09:00-10:00), and higher in the afternoon (15:00-16:00), with the maximum discrepancy of about  $60 \times 10^{-9}$  in the same altitude; there was minor difference in O<sub>3</sub> concentration in altitude range of 1.5-3.5 km, generally fluctuating among  $70 \times 10^{-9} \sim 80 \times 10^{-9}$ . ④ For the regional distribution of O<sub>3</sub> concentration, higher concentration within 0-2 km appeared near the Fourth Ring Road of city center and the surrounding areas, the main reasons for this distribution might be the presence of many strong sources of pollution emissions and low sink flow near the ground; within 2-4 km, in addition to the urban area of Beijing, higher O<sub>3</sub> concentration areas were found in the north, the south-east (Beijing-Tianjin direction), the south-west (Beijing-Baoding direction). ⑤ There were significant correlation between O<sub>3</sub> and NO, NO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub>/NO within 0-3.5 km, O<sub>3</sub> was negatively related with both NO and NO<sub>2</sub>, but positively correlated with the NO<sub>2</sub>/NO ratio.

**Key words:** ozone; nitrogen oxides; atmospheric boundary layer; spatial distribution; aircraft sounding

收稿日期: 2012-02-13; 修订日期: 2012-04-13

基金项目: 北京市博士后工作经费项目(2011ZZ-86); 北京市科技新星项目(2010B029); 国家自然科学基金项目(40905060)

作者简介: 陈鹏飞(1981~),男,博士,主要研究方向为特大城市光化学反应机制、输送过程, E-mail: yueyueniaofei@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: zqxm\_cn@sina.com

人类活动对大气污染的影响备受关注,尤其是特大城市的生态、环境问题已成为关注的焦点<sup>[1-4]</sup>。北京城市的发展和机动车保有量的不断增加,使北京地区的大气污染较为严重,其中光化学污染的臭氧(O<sub>3</sub>)控制问题已是北京污染治理的关键问题之一。O<sub>3</sub>大部分集中在平流层,仅有10%左右的分布在对流层中<sup>[5]</sup>,但它是影响城市大气环境质量的重要污染气体<sup>[6,7]</sup>,人类活动所排放的氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、挥发性有机物(VOCs)等污染物在大气中经光化学过程产生二次污染<sup>[8,9]</sup>,驱动O<sub>3</sub>产生,诱发城市光化学烟雾。目前国内关于O<sub>3</sub>及其前体物的观测分析主要集中在近地面(如地面监测网<sup>[10]</sup>、大气所铁塔观测<sup>[11,12]</sup>)或高空大尺度(如卫星遥感<sup>[13,14]</sup>、探空气球<sup>[15,16]</sup>),由于空间代表性的限制,尚未得到北京地区O<sub>3</sub>的大范围的区域空间分布特征。国内利用大量飞机探测资料,来统计分析研究O<sub>3</sub>及其前体物的垂直分布特征的工作还不多见<sup>[17]</sup>。本研究充分利用北京市人工影响天气办公室连续4 a飞机探测的大气化学资料来研究相关内容,由于所用资料的飞行架次较多,时间上涉及到春、夏、秋这3个季节,空间区域覆盖了北京市城区及周边地区,可得到代表性较好的北京地区O<sub>3</sub>及其前体物(NO、NO<sub>2</sub>)的时空分布特征,使人们对特大城市上空的O<sub>3</sub>状况和演变特征有更深刻的理解,以期为北京市制定O<sub>3</sub>污染的控制对策提供科技支撑和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器设备

飞行探测实验使用的飞机是由中国哈尔滨飞机制造公司研制的轻型双发多用途运输机(Y12II型飞机B-3830),是我国自行设计的优良机种之一。根据大气探测实验的需要,结合飞机的设计特点及系统、结构布局情况,在机上布置安装大气测量设备和实验相关辅助设备。大气测量设备包括:美国热电公司出产的49i型紫外光度法O<sub>3</sub>分析仪,42iTL型化学发光法NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub>分析仪。辅助设备包括:常规气象探头、GPS系统、计算机、无线电数据传输系统、摄像头、蓄电池、UPS、开关控制板等数据采集系统。仪器每年进行定期的维护,在安装到飞机之前都进行必要的校准及标定。O<sub>3</sub>分析仪标定时,用49i-PS型O<sub>3</sub>校准仪和111型零气发生器(热电公司);NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub>分析仪标定时,用146c型动态气体校准器、111型零气发生器(热电公司)

和标准气(国家标准物质中心)。

### 1.2 飞行方案

飞机探测方案主要是针对北京城区及其周边区域(范围114°~118°E,38.5°~41.5°N)非雨天的大气化学探测:①北京城区上空飞行探测:环城路线位于4环和5环之间,垂直盘旋时,最先探测高度为2.1 km,之后向下每隔0.3 km水平探测一圈,最低水平探测高度为0.6 km。②北京近郊和周边地区飞行探测:北京市近郊主要是正北(沙河)、西北(延庆)和西南(良乡)开展垂直探测;北京市周边地区,西北到张家口,西南到保定,东南到天津武清及塘沽开展垂直探测。飞机呈螺旋式上升和下降,最高探测高度为3.6 km,最低0.6 km。2007~2010年飞机大气探测的飞行轨迹详见图1。

### 1.3 数据处理

本研究对2007~2010年4~11月的飞行大气探测资料进行统计,主要借助计算机Fortran 95语言编程,Microsoft Excel 2007、Origin 7.5和IBM SPSS Statistics 19.0数据统计软件,对气体体积分数及GPS等数据资料进行处理和分析。

飞机探测时,气体分析仪每秒存取一组数据,由于所得数据量很大,加之仪器的系统误差、故障及传输记录过程中的某些原因,会出现一些虚假、有误的数据,分析时对数据进行剔除和订正。判定数据有误的依据如下。

(1)没有物理意义:如高度>3.5 km时,气体体积分数出现负值或者异常高值;雨天等特殊天气条件下观测的数据异常。

(2)不满足时空变化的连续性:如连续的观测中突然出现的体积分数高值或低值,与其他临近时刻体积分数值差距悬殊。

(3)由于信号传送或仪器工作发生故障而导致的数据遗失或“僵值”:如飞机颠簸仪器出错等。

根据飞行随时间的轨迹变化,取飞行的上升和下降阶段,得到垂直方向每0.05 km的气体体积分数平均值(文中不特别说明的“体积分数”均指的是“平均体积分数”),然后得出气体体积分数的垂直廓线。4 a一共得O<sub>3</sub>廓线547条,但由于雨天、数据出错等其他原因,最终统计的本研究可用的大气探测资料为409条O<sub>3</sub>廓线,详见表1,有效数据占总观测数据的74.77%。

## 2 结果与分析

### 2.1 O<sub>3</sub>体积分数廓线的逐月变化

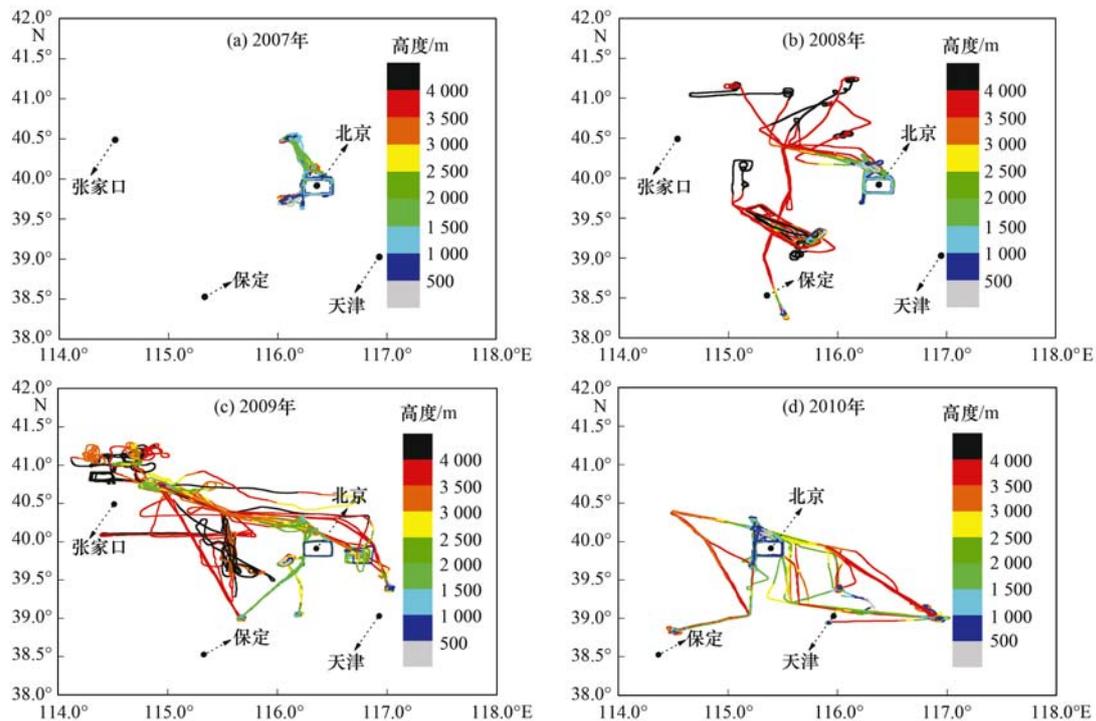


图 1 飞机大气探测飞行轨迹

Fig. 1 Aircraft flight path of atmospheric sounding in 2007-2010

表 1 飞行探测  $O_3$  体积分数廓线数据<sup>1)</sup>

Table 1 Data of vertical profiles of flight measurements for ozone

年份	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	合计
2007 年	7	6	17	8	28	19	—	14	99
2008 年	18	20	10	16	13	12	12	8	109
2009 年	37	20	12	8	14	17	2	—	110
2010 年	—	11	28	10	9	18	10	5	91
合计	62	57	67	42	64	66	24	27	409

1) 表内飞行探测均在非雨天进行

通过对资料的统计分析,一共得到 409 条  $O_3$  体积分数垂直廓线,图 2 给出了 4 a 月平均体积分数廓线. 可知,0 ~ 3.5 km 内月平均  $O_3$  体积分数随高度变化趋势有较好的一致性,随高度增加,均出现先增大后减小,然后稳定不变的趋势,且高空有一个比较明显的分界线(约 1.5 km); 1.5 km 以上,月内的  $O_3$  体积分数几乎稳定不变(图中曲线与 y 轴平行); 1.5 km 以下,  $O_3$  体积分数变化幅度较大(标准偏差值大),每月的  $O_3$  体积分数的极大值与极小值均在此高度范围内出现. 统计的月份中,  $O_3$  体积分数最小值出现在 11 月近地面,约为  $20 \times 10^{-9}$ ,最大值出现在 6 月高空 1 km 左右,达到约  $110 \times 10^{-9}$ ,是最小值的 5.5 倍.

分析  $O_3$  体积分数出现高值现象的原因:太阳辐

射加热了下垫面和低空大气,产生对流并使气团充分混合,形成对流混合层,并在混合层顶(在晴天 1 km 左右)附近形成逆温层. 对流混合把低空包括水汽和  $O_3$  在内的污染物向上输送,但受逆温层阻挡,上升的气团在逆温层附近扩散减弱,  $O_3$  在此富集并导致其体积分数出现高值现象<sup>[16,18]</sup>,其值比其他高度要大  $5 \times 10^{-9} \sim 20 \times 10^{-9}$  左右.

由图 2 分析  $O_3$  体积分数月间变化,可知北京地区 4 月和 5 月以及 9 月和 10 月,  $O_3$  体积分数都出现了比较明显的月变化,且月份之间同一高度的  $O_3$  体积分数变化幅度随高度增加而变小. 5 月体积分数明显比 4 月的增大,  $O_3$  体积分数递增幅度约为  $10 \times 10^{-9} \sim 40 \times 10^{-9}$ ,以 0.5 km 以下增幅最为明显; 10 月体积分数明显比 9 月的减小,  $O_3$  体积分数

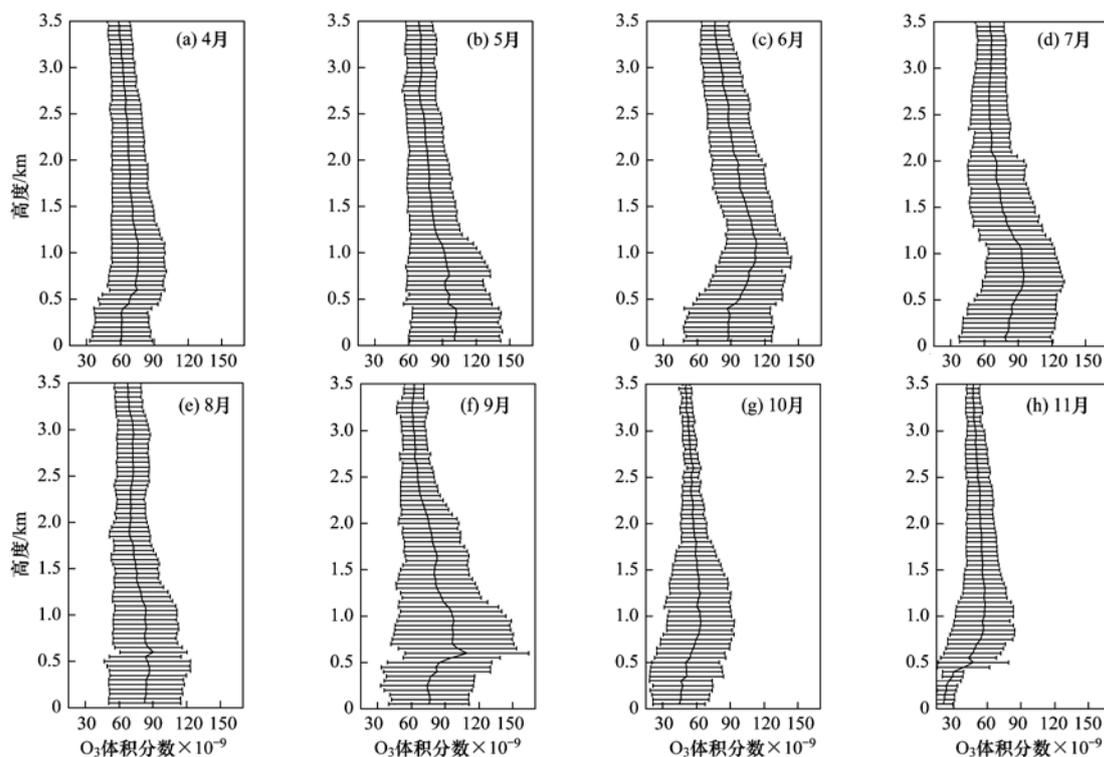
图2 4 a 的  $O_3$  体积分数月平均廓线

Fig. 2 Vertical profiles of mean monthly volume fraction of ozone in 2007-2010

递减幅度较大,约为  $20 \times 10^{-9} \sim 30 \times 10^{-9}$ . 总体来看,气温较高月份(5~9月)的  $O_3$  体积分数都比较高<sup>[19]</sup>,0.5 km 以下,5月的  $O_3$  体积分数最大,但0.5 km 以上是6月的  $O_3$  体积分数最大;7~9月的相同高度的  $O_3$  体积分数相差最小,差值  $< 15 \times 10^{-9}$ .

利用 IBM SPSS Statistics 19.0 软件的单因素方差分析、LSD 多重比较(最小显著性差异)做进一步统计分析,由表2可见,统计的月份中,只有7~9月这3个月之间均值差异未达显著水平( $P > 0.05$ ),且均值相差不到  $1 \times 10^{-9}$ ,说明  $O_3$  值在这3个月变化不明显,其他月份之间均在 0.01 水平上差异显

著;6月均差都为正值,即说明北京地区6月的  $O_3$  均值最大,由表2还可看出,春秋季节4、10、11月均值较小,其中11月最小,10月次之,最小11月和最大6月均值相差  $44.24 \times 10^{-9}$ .  $O_3$  作为一种复杂的光化学产物,其体积分数变化与气象条件(太阳辐射、温度等)之间存在密切的关系<sup>[20]</sup>,夏季由于温度高、日照强,因此,易发生一系列光化学反应而生成  $O_3$ ,而春秋季节的低温和相对较弱的太阳辐射不利于  $O_3$  的生成,造成各层  $O_3$  夏季高于春秋季节.此外,  $NO_x$ 、VOCs 等前体物的垂直分布也是影响各层  $O_3$  体积分数的因子<sup>[21]</sup>.

表2 4 a 的  $O_3$  体积分数月平均值差异比较<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison between different monthly ozone average concentrations

	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
4月	-15.516*	-26.527*	-8.456*	-8.525*	-9.079*	11.641*	17.713*
5月	1	-11.010*	7.060*	6.991*	6.437*	27.157*	33.230*
6月	—	1	18.070*	18.002*	17.447*	38.167*	44.240*
7月	—	—	1	-0.069	-0.623	20.097*	26.169*
8月	—	—	—	1	-0.554	20.166*	26.238*
9月	—	—	—	—	1	20.720*	26.793*
10月	—	—	—	—	—	1	6.073*

1) 单位:体积分数  $\times 10^{-9}$ ; \* 表示均值差的显著性水平为 0.01

## 2.2 夏季 O<sub>3</sub> 体积分数廓线的逐时变化

以上分析表明,北京地区夏季时节(5~9月),O<sub>3</sub>是重要的污染物之一<sup>[22]</sup>.现主要分析北京夏季白天O<sub>3</sub>的小时平均变化情况,详见图3.由垂直空间上来看,每小时O<sub>3</sub>体积分数随高度的变化廓线与月平均统计趋势一致,即随高度先增加后减少,低空(1.5 km以下)O<sub>3</sub>体积分数每小时变化率比高空(1.5~3.5 km)的明显高,可见低空是生成O<sub>3</sub>的光化学反应的主要区域.统计的各时段中,11:00~13:00时段的低空的O<sub>3</sub>廓线变化幅度相对其他时段减小,高值区不明显,主要是中午湍流作用最强,混合层高度较高,大气混合比较均匀<sup>[9]</sup>.

低空1.5 km以下,O<sub>3</sub>体积分数遵循随时间变化先增大后减小的规律,且增加速度先快后慢,即上午

的波动幅度较下午的大,边界层不稳定以前尤为明显,随着湍流作用的减弱,边界层趋于稳定,O<sub>3</sub>体积分数小时变化率也相应变小<sup>[23]</sup>(图3,下午O<sub>3</sub>廓线较集中).统计中,O<sub>3</sub>体积分数的低值出现在上午(09:00~10:00)时段,高值出现在下午(15:00~16:00)时段,同高度内O<sub>3</sub>体积分数不同时段相差最大约为 $60 \times 10^{-9}$ ;高空1.5~3.5 km以内,O<sub>3</sub>体积分数相差不大,一般在 $70 \times 10^{-9} \sim 80 \times 10^{-9}$ 之间波动.太阳辐射强度在09:00~12:00逐渐加强,太阳辐射的最大值出现在中午12:00,12:00以后逐渐减弱,而近地面最高温度一般出现在14:00左右,低空1.5 km以下的O<sub>3</sub>体积分数的日变化规律和太阳辐射及温度的日变化规律比较相似,只是O<sub>3</sub>体积分数最大值比温度最大值出现时间滞后约1 h,这说明O<sub>3</sub>的产生与太阳辐射和温度密切相关.

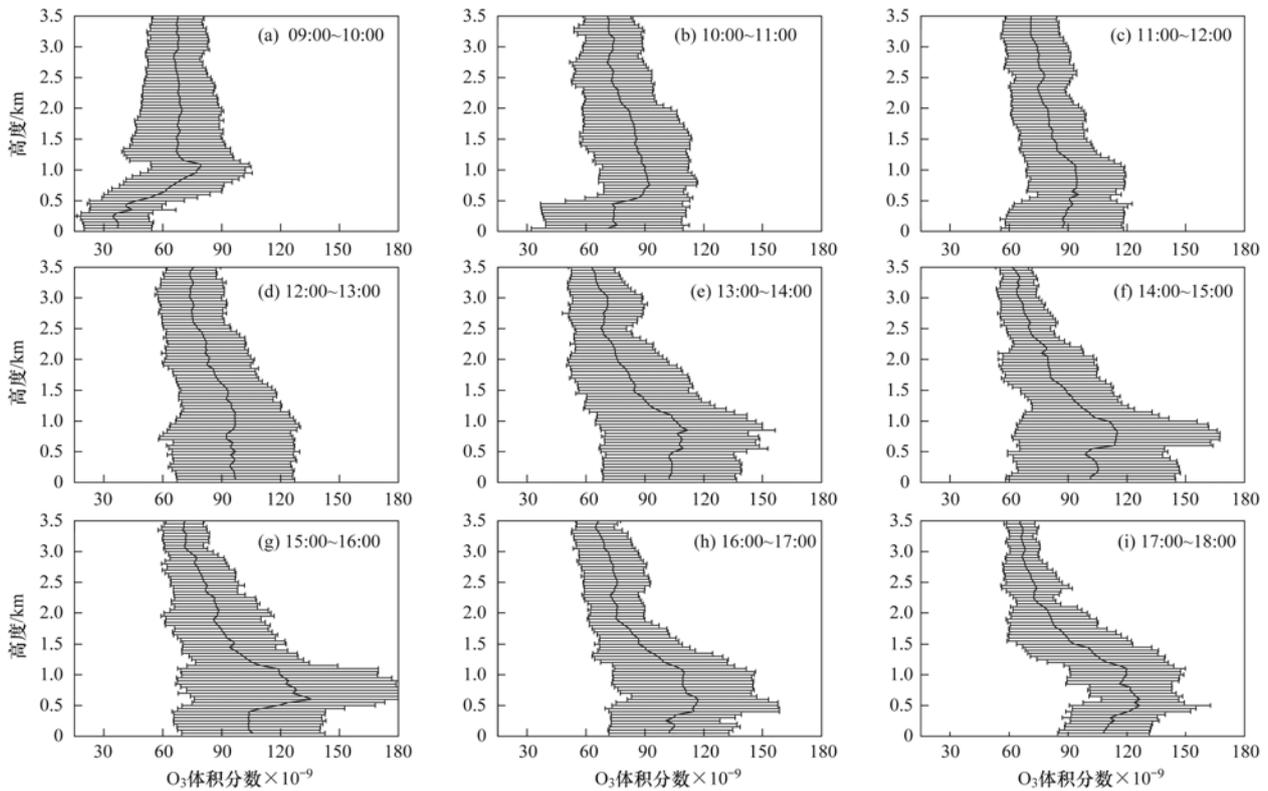


图3 夏季4 a的O<sub>3</sub>体积分数小时平均廓线

Fig. 3 Vertical profile of mean hourly volume fraction of ozone in summer of 2007-2010

## 2.3 O<sub>3</sub> 体积分数水平区域分布

城市大气污染物除了具有明显的垂直分布特征外,还存在区域性的差别,由图1和图4分析知,飞行探测时,在2 km内飞行探测涉及到的面积范围相对集中在北京城区的周边,气体体积分数的低值也集中在高空2 km以内,且变化较大(色标梯度大),

城区四环O<sub>3</sub>体积分数较高,但是由于市区近地层排放较多的NO,使得2 km内四环O<sub>3</sub>体积分数不是最高;而北京市区四环外周边存在较多明显的高值区,可能与周边近地面的大气污染物排放源有关,该区域产生O<sub>3</sub>的产生效率较高,具有较少的机动车保有量,较低的NO体积分数,使对流输送的O<sub>3</sub>被NO

消耗的也较少,源强汇低造成北京市区周边近地层  $O_3$  体积分数出现高值<sup>[24]</sup>. 较高空(2~4 km)的飞行探测涉及的面范围比较大,涉及到北京及周边地市,整体来看, $O_3$  体积分数变化高空的均小于低空的(色标梯度小),除了北京城区  $O_3$  体积分数较高外,北京城正北面、东南面(北京-天津方向)、西

南面(北京-保定方向)的  $O_3$  体积分数较高;西北面(北京-张家口方向)的  $O_3$  体积分数较低,但城内四环西面较高. 此处与以往研究结论<sup>[25,26]</sup>相符,北京及周边外来污染物存在常驻性输送通道,按照风场流场特征分为东风型、西南风型和东南风型输送通道. 这些天然输送通道的存在,经常促成北京及周

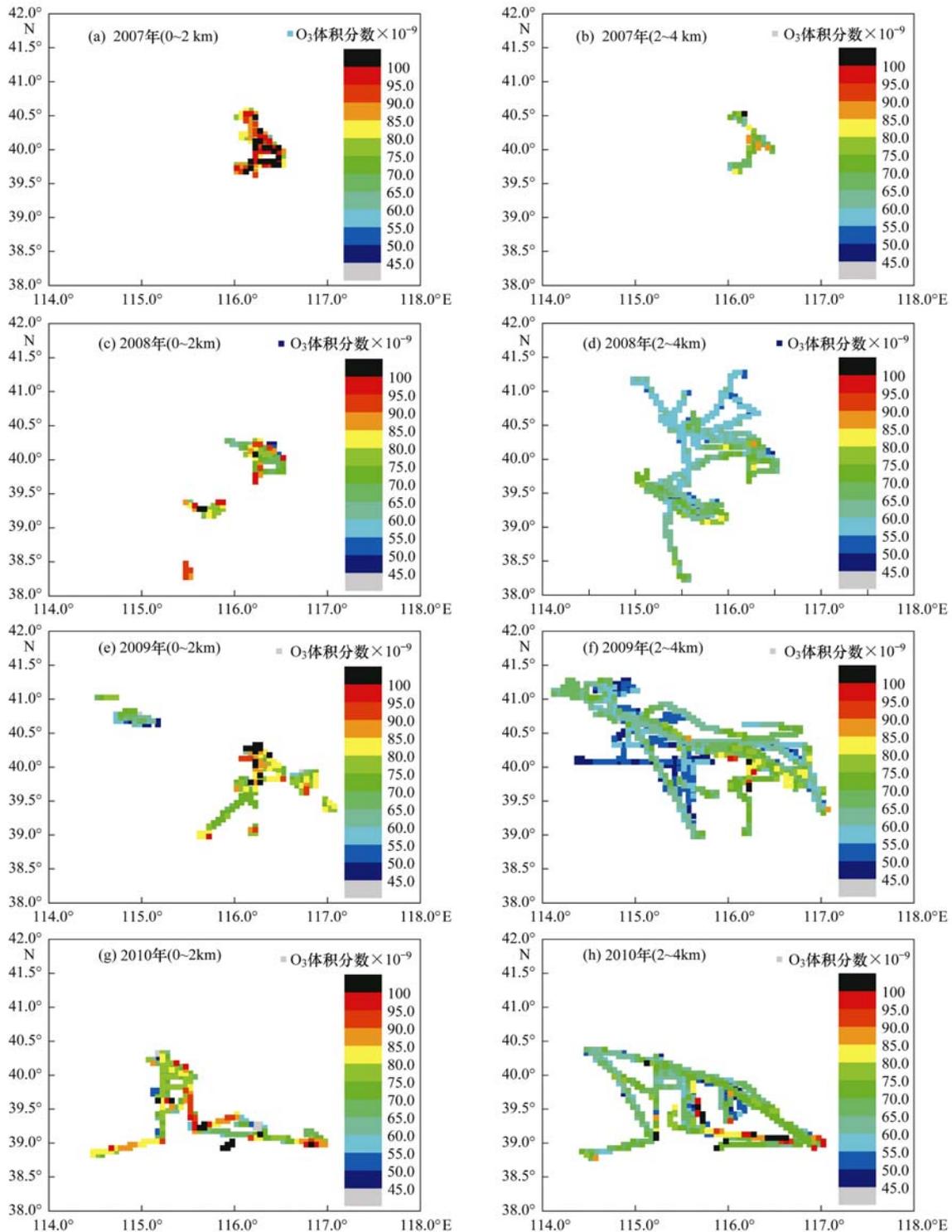


图4 4 a 的  $O_3$  体积分数年均值的水平区域分布

Fig. 4 Horizontal distribution of annual mean volume fraction of ozone in 2007-2010

边区域性光化学污染。

由以上分析可知,北京地区在 0~2 km 内,  $O_3$  体积分数变化较大,应主要受低空或城市地面向上空输送影响,区域水平输送对其影响相对较小,而高空 2~4 km 区域  $O_3$  体积分数分布相对比较均匀,水平输送影响份额增大。 $O_3$  的光化学生成主要发生在城市中心及近周边区域边界层内,人为活动是影响  $O_3$  体积分数区域分布的重要因子。

#### 2.4 $O_3$ 与 $NO$ 、 $NO_2$ 廓线的相互关系

由于 2007 年的  $NO$ - $NO_2$ - $NO_x$  分析仪记录数据缺失,本研究只分析了 2008~2010 年 4~11 月的

数据,详见图 5~图 7,分析  $NO$ 、 $NO_2$  及  $NO_2/NO$  的月均值随高度的变化廓线,可知在 0~3.5 km 内, $NO$ 、 $NO_2$  的值随高度的增加而减小,低空(1.5 km 以下)  $NO$ 、 $NO_2$  的值变化梯度较大,高空(1.5~3.5 km)  $NO$ 、 $NO_2$  的值变化梯度较小,这与  $O_3$  的梯度变化规律一致,从季节上看, $NO$ 、 $NO_2$  的值春秋季节的较高,而夏季的较低,这与  $O_3$  体积分数季节变化规律相反,尤其  $NO$ 、 $NO_2$  的值 11 月近地面明显高于其他月份,这可能与 11 月下旬北京开始采暖,锅炉排放使大气中氮氧化物增加有关<sup>[9]</sup>。

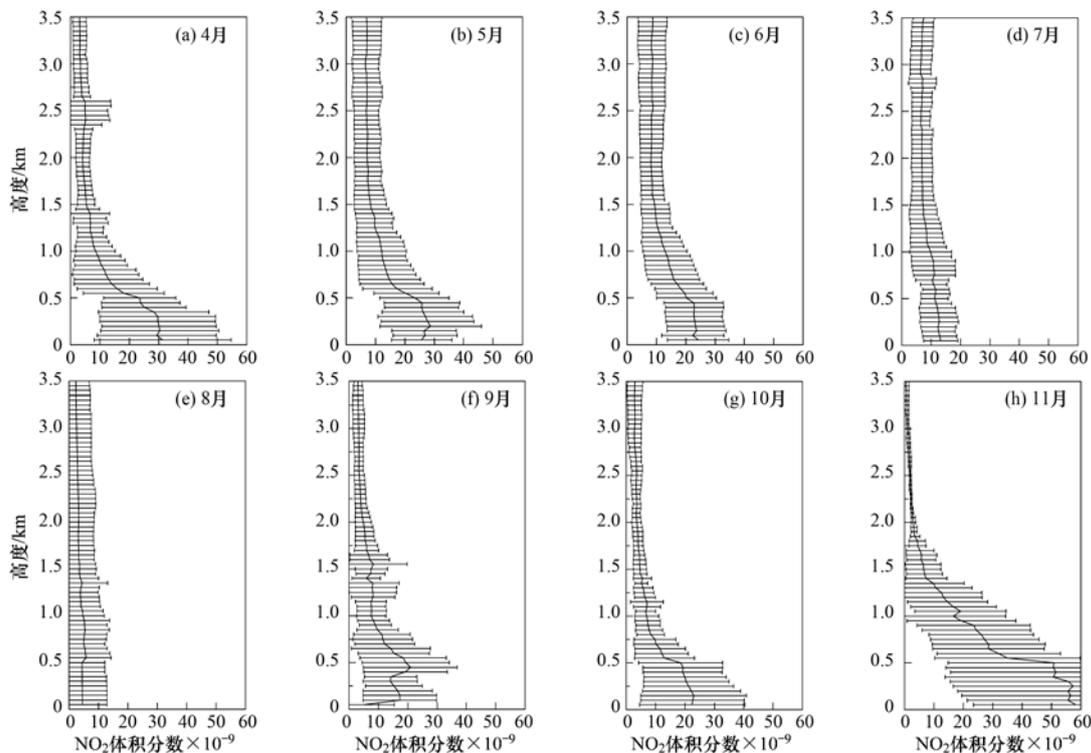
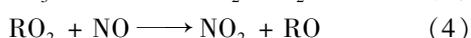
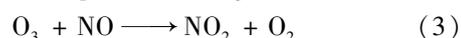
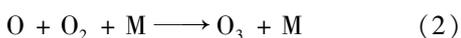
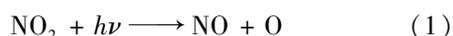


图 5 3 a 的  $NO_2$  体积分数月平均廓线

Fig. 5 Vertical profiles of mean monthly volume fraction of  $NO_2$  in 2008-2010

大气中  $O_3$  与  $NO$ 、 $NO_2$  之间可相互影响,在晴朗的白天,它们之间相互转化的光化学反应过程一般可概括为<sup>[27~29]</sup>:



式中, $h\nu$  为波长  $\lambda < 424$  nm 太阳光,  $M$  是空气中的  $N_2$ 、 $O_2$  或其他分子介质,可以吸收过剩的能量而使生成的  $O_3$  分子稳定,  $RO_2$  代表由非甲烷烃产生的各种烷基过氧自由基和  $HO_2$ <sup>[27]</sup>。事实上,反应式(2)是

$O_3$  在大气中唯一的化学反应源,如在大气中无其他反应干预下, $O_3$  体积分数取决于  $NO_2/NO$ 。目前,在一定程度上,可以认为  $NO_2/NO$  的大小基本上反映了光化学反应“效率”的高低,反映了大气氧化能力的强弱,同时也是光化学二次污染物  $O_3$  形成的指标之一<sup>[24,28]</sup>。

表 3 给出了各种污染物之间及与  $NO_2/NO$  值之间的相关系数( $N = 560$ ,皆通过置信度为 0.05 水平上的  $t$  检验),可见,在 0~3.5 km 内, $O_3$  与  $NO$ 、 $NO_2$  和  $NO_2/NO$  之间都存在显著的相关关系, $O_3$  与  $NO$ 、 $NO_2$  皆为负相关,但与  $NO_2/NO$  为正相关<sup>[28]</sup>。

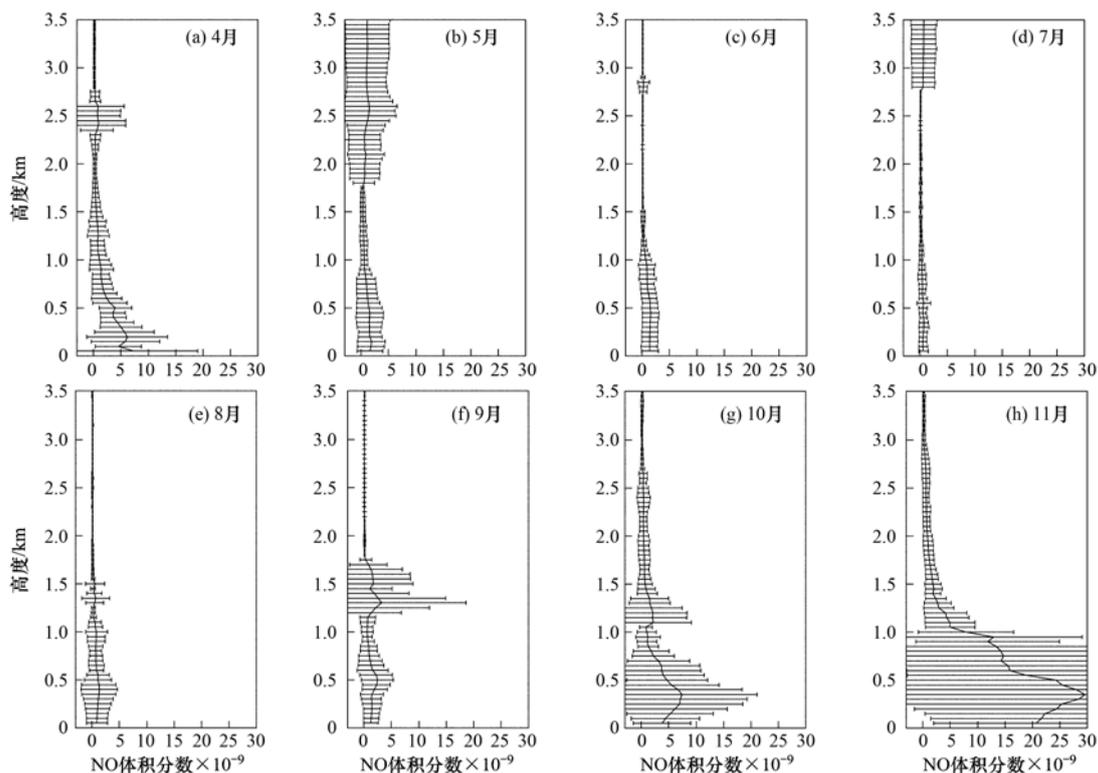


图 6 3 a 的 NO 体积分数月平均廓线

Fig. 6 Vertical profiles of mean monthly volume fraction of NO in 2008-2010

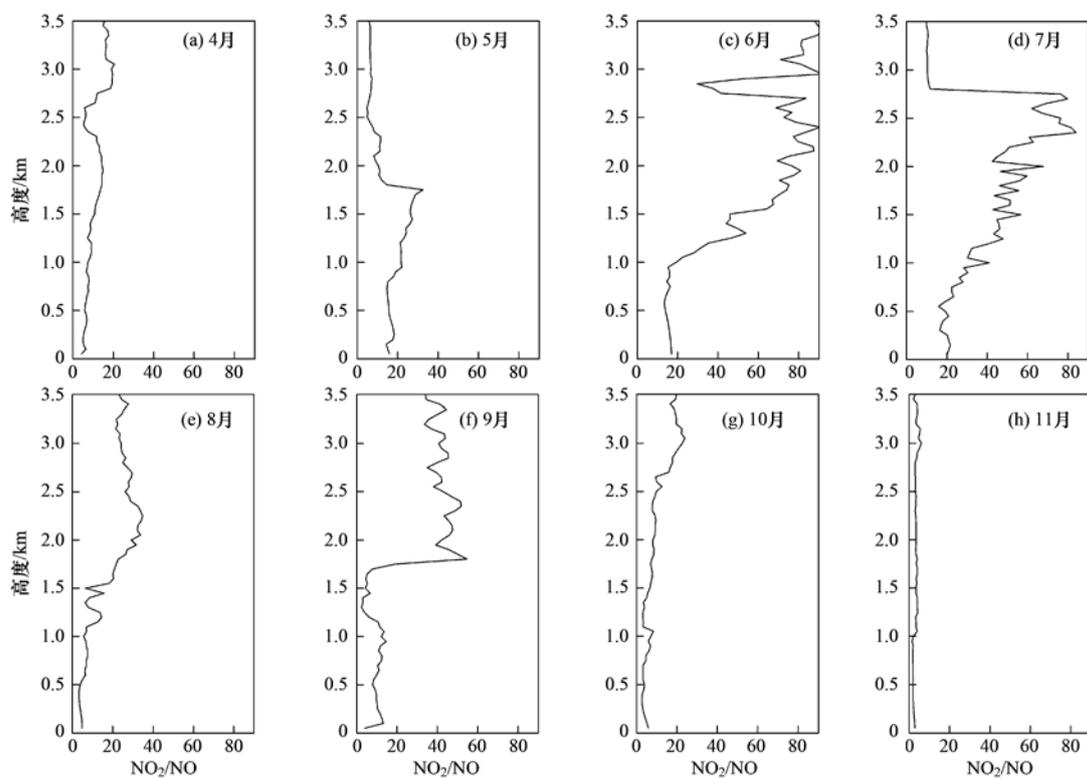
图 7 3 a 的 NO<sub>2</sub>/NO 值月平均值廓线Fig. 7 Vertical profiles of mean monthly volume fraction of NO<sub>2</sub>/NO in 2008-2010

表3 不同污染物体积分数和污染物指标之间的相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation coefficient of different pollutants or pollution indexes

污染物	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> /NO
O <sub>3</sub>	-0.502 **	-0.098 *	0.377 **
NO	1	0.83 **	-0.282 **
NO <sub>2</sub>	—	1	-0.164 **

1) \* 表示相关显著性水平为 0.05, \*\* 表示相关显著性水平为 0.01

### 3 结论

(1)按月份平均统计分析,由空间上看,0~3.5 km内,月平均O<sub>3</sub>体积分数随高度变化趋势有较好的一致性,随高度增加,均出现先增大后减小,然后稳定不变的趋势,且高空有一个比较明显的分界线(约1.5 km)。1.5 km以下是O<sub>3</sub>体积分数垂直梯度变化较大的层次,均存在一个O<sub>3</sub>体积分数高值区,说明其受近地面人为活动的影响较大;在1.5 km以上,O<sub>3</sub>体积分数的垂直梯度变化明显减小,此空间处于混合层以上,气团运动受下垫面影响较小,输送作用可能对污染物体积分数的影响更加显著。从时间上看,统计的月份中,只有7~9月之间O<sub>3</sub>均值变化最不明显,差异未达显著水平( $P > 0.05$ ),其他月份之间均在0.01水平上差异显著。在气温较低和风速较大的春季(4月)和秋季(10~11月)出现相对较小值,约 $20 \times 10^{-9} \sim 60 \times 10^{-9}$ ;在太阳辐射较强,气温较高的夏季(5~9月),出现相对较大值,约 $60 \times 10^{-9} \sim 110 \times 10^{-9}$ ,其中6月的O<sub>3</sub>体积分数均值最大。总体来看,北京地区0~3.5 km内O<sub>3</sub>体积分数季节变化符合夏季最高、春秋季节较低的季节变化规律。

(2)在夏季一天(白天)当中,每小时O<sub>3</sub>体积分数垂直廓线与月平均统计的变化趋势一致,即随高度先增加后减少,低空(1.5 km以下)O<sub>3</sub>体积分数每小时变化率比高空(1.5~3.5 km)的明显高,可见低空是生成O<sub>3</sub>的光化学反应的主要区域,O<sub>3</sub>体积分数遵循随时间变化先增大后减小的规律,且增加速度先快后慢,即上午的波动幅度较下午的大,边界层不稳定以前尤为明显,随着湍流作用的减弱,边界层趋于稳定,O<sub>3</sub>体积分数小时变化率也相应变小。低空1.5 km以下O<sub>3</sub>体积分数的低值出现在上午(09:00~10:00)时段,高值出现在下午(15:00~16:00)时段,同高度内O<sub>3</sub>体积分数不同时段相差最大约为 $60 \times 10^{-9}$ ;高空1.5~3.5 km内,O<sub>3</sub>体积分数相差不大,一般在 $70 \times 10^{-9} \sim 80 \times 10^{-9}$ 之间波动。低空1.5 km以下的O<sub>3</sub>体积分数的日变化规律

和太阳辐射及温度的日变化规律比较相似,时间相对滞后,O<sub>3</sub>的产生与太阳辐射和温度密切相关。

(3)O<sub>3</sub>体积分数水平区域分布,0~2 km内城区四环O<sub>3</sub>体积分数较高,周边地区也出现较多明显的高值区,源强汇低造成北京市区周边近地层O<sub>3</sub>体积分数较高;高空2~4 km内,除了北京城区O<sub>3</sub>体积分数较高外,北京城正北面、东南面(北京-天津方向)、西南面(北京-保定方向)的O<sub>3</sub>体积分数较高。2 km以内的O<sub>3</sub>体积分数区域变化较剧烈,主要受低空或城市地面向上空输送影响,区域水平输送对其影响相对较小,而高空2~4 km区域O<sub>3</sub>体积分数分布相对比较均匀,说明水平输送影响的份额增大。

(4)在0~3.5 km内,O<sub>3</sub>与NO、NO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>/NO之间都存在着显著的相关关系,O<sub>3</sub>与NO、NO<sub>2</sub>皆为负相关,但与NO<sub>2</sub>/NO值为正相关。NO<sub>2</sub>/NO值的季节变化与O<sub>3</sub>体积分数季节变化规律较一致,夏季的NO<sub>2</sub>/NO值也较大,随高度变化比较明显,而春秋季节NO<sub>2</sub>/NO值随高度变化相对较小,NO<sub>2</sub>/NO值均小于10,原因是春秋季节较低的温度会使化学反应速度变慢,太阳辐射较小等因素均不利于NO向NO<sub>2</sub>的转化(所以NO<sub>2</sub>/NO值比较小)及O<sub>3</sub>的光化学生成,夏季则相反。

致谢:本研究所用飞行探测资料是由北京市人工影响天气办公室飞行保障科的人员提供,特此感谢。

#### 参考文献:

- [1] 彭丽,高伟,耿福海,等.上海地区臭氧垂直分布特征分析[J].北京大学学报(自然科学版),2011,47(5):805-811.
- [2] 车汶蔚,郑君瑜,邵英贤,等.珠海市大气污染时空分布特征及成因分析[J].中国环境监测,2008,24(5):82-87.
- [3] Mazzeo N A, Venegas L E, Choren H. Analysis of NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> concentration measured at a green area of Buenos Aires City during wintertime [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(17): 3055-3068.
- [4] Clapp L J, Jenkin M E. Analysis of the relationship between ambient levels of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and NO as a function of NO<sub>x</sub> in UK [J]. Atmospheric Environment, 1995, 29(8): 923-946.
- [5] 唐孝炎,李金龙,栗欣.大气环境化学[M].北京:高等教育出版社,1990.60.
- [6] Jenkin M E. Analysis of sources and portioning of oxidant in the UK-Part 1: the NO<sub>x</sub>-dependence of annual mean concentration of nitrogen dioxide and ozone [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(30): 5117-5129.
- [7] Jenkin M E. Analysis of sources and portioning of oxidant in the UK-Part 2: contributions of nitrogen dioxide emissions and background ozone at a kerbside location in London [J].

- Atmospheric Environment, 2004, **38**(30): 5131-5138.
- [ 8 ] Terje B, Ivar S A, Wei C W, *et al.* Impact of increased anthropogenic emission in Asia on tropospheric ozone and climate[J]. *Tellus*, 1996, **48**(1): 13-32.
- [ 9 ] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 NO、NO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度变化的相关性分析[J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 706-711.
- [ 10 ] 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 北京市区大气污染的时空特征[J]. *应用气象学报*, 2002, **13**(增刊): 92-99.
- [ 11 ] 安俊琳, 李昕, 王跃思, 等. 北京气象塔夏季大气 O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> 和 CO 浓度变化的观测实验[J]. *环境科学*, 2003, **24**(6): 43-47.
- [ 12 ] 朱燕舞, 刘文清, 谢品华, 等. 北京边界层大气污染物的垂直廓线监测与分析[J]. *地球物理学报*, 2010, **53**(6): 1278-1283.
- [ 13 ] 李兵海, 郑圻森. 环境航空测量数据的处理与解释[J]. *物探化探计算技术*, 2002, **24**(3): 250-253.
- [ 14 ] 杨景梅, 邱金桓, 赵延亮. 1990~2002年北京地区大气臭氧垂直分布 Umkehr 观测反演研究[J]. *大气科学*, 2005, **29**(5): 709-716.
- [ 15 ] 丁国安, 孟昭阳, 于海青, 等. 北京城区大气边界层空气污染特征观测研究[J]. *应用气象学报*, 2002, **13**(增刊): 82-91.
- [ 16 ] 郑向东, 陈尊裕, 崔宏, 等. 长江三角洲地区春季低空大气臭氧垂直分布特征[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, **34**(12): 1184-1192.
- [ 17 ] 王玮, 汤大钢, 任丽红, 等. 中国大气污染状况的航空测量研究[A]. 见: 第十三届全国大气环境学术会议. 大气环境科学技术研究进展[C]. 北京: 中国环境科学学会, 2006. 32-38.
- [ 18 ] 王思源, 邵敏, 王玮. 北京市大气中 VOCs 垂直分布的航测研究[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(7): 679-684.
- [ 19 ] 宗雪梅, 王庚辰, 陈洪滨, 等. 北京地区边界层大气臭氧浓度变化特征分析[J]. *环境科学*, 2007, **28**(11): 2615-2619.
- [ 20 ] 任丽红, 胡非, 王玮. 北京夏季 O<sub>3</sub> 垂直分布与气象因子的相关研究[J]. *气候与环境研究*, 2005, **10**(2): 166-174.
- [ 21 ] 黄鹤, 孙玫玲, 刘爱霞, 等. 天津城市大气污染物浓度垂直分布特征[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(12): 2478-2483.
- [ 22 ] 王庚辰, 孔琴心, 陈洪滨, 等. 北京上空大气臭氧垂直分布的特征[J]. *地球科学进展*, 2004, **19**(5): 743-747.
- [ 23 ] 马志强, 王跃思, 孙扬, 等. 北京大气中常规污染物的垂直分布特征[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(5): 1-6.
- [ 24 ] 吴莹, 吉东生, 宋涛, 等. 夏秋季北京及河北三城市的大气污染联合观测研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2741-2748.
- [ 25 ] 苏福庆, 高庆先, 张志刚, 等. 北京边界层外来污染物输送通道[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1): 26-29, 40.
- [ 26 ] 苏福庆, 任阵海, 高庆先, 等. 北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统——边界层输送汇[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1): 21-25, 33.
- [ 27 ] 任丽红, 胡非, 周德刚, 等. 北京夏季近地层臭氧垂直变化及其环境效应的观测研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2005, **22**(4): 429-435.
- [ 28 ] 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[J]. *气候与环境研究*, 2003, **8**(3): 370-380.
- [ 29 ] 姚小红, 何东全, 周中平, 等. 北京城市大气中 NO<sub>x</sub>、CO、O<sub>3</sub> 的变化规律研究[J]. *环境科学*, 1999, **20**(1): 23-26.

## CONTENTS

Preface .....	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review .....	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water .....	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment .....	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal .....	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model .....	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model .....	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water .....	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation .....	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality .....	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing .....	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing .....	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO .....	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station .....	ZHANG Jun-ke, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment .....	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw .....	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car .....	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai .....	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary .....	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation .....	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China .....	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season .....	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City .....	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City .....	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River .....	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site .....	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China .....	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City .....	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai .....	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China .....	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River .....	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake .....	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region; A Case Study of Baishui Glacier No. 1 .....	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification .....	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i> .....	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process .....	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body .....	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent .....	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors .....	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS) .....	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage .....	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites .....	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters .....	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks .....	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation .....	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge .....	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruo-yu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field .....	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils .....	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i> .....	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste .....	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants .....	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China .....	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals .....	FU Guo-wei (4428)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行