第15卷第5期	气 候 与 环 境 研 究	Vol. 15	No. 5
2010 年 9 月	Climatic and Environmental Research	Sept.	2010

苏航,王自发,朱彬,等. 2010. 北京奥运会前后静稳天气条件下 SO₂和 NO₂干沉降模拟 [J]. 气候与环境研究,15 (5): 636-642. Su Hang, Wang Zifa, Zhu Bin, et al. 2010. Numerical simulation of the SO₂ and NO₂ dry deposition in Beijing under stagnant weather conditions during the Beijing Olympic Games period [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 636-642.

北京奥运会前后静稳天气条件下 SO2和 NO2干沉降模拟

苏航^{1,2} 王自发² 朱彬¹ 银燕¹

1 南京信息工程大学大气物理学院,南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所竺可桢一南森国际研究中心,北京 100029

摘 要利用中国科学院大气物理研究所北京 325 m 气象塔气象要素和污染物浓度观测资料,采用气体干沉降阻力模型,对奥运会前后北京行政区内 SO₂和 NO₂的干沉降影响因子、干沉降速率、干沉降通量进行数值模拟。结果表明:1)随着大气稳定度、太阳辐射强度和下垫面类型的改变,北京 SO₂和 NO₂的干沉降速率有明显变化,表面阻力是影响气体干沉降速率变化的主要因子。2) SO₂和 NO₂在白天的干沉降速率及通量普遍大于夜晚。3)静稳天气条件下,奥运会前北京地区一天可清除 24 t SO₂和 55.2 t NO₂,奥运会期间一天可清除 10.8 t SO₂和 50.4 t NO₂,这说明北京及周边地区的减排措施对改善奥运会期间的空气质量效果显著。 关键词 静稳天气 SO₂ NO₂ 干沉降模式 **文章编号** 1006-9585 (2010) 05-0636-07 **中图分类号** P401 **文献标识码** A

Numerical Simulation of the SO₂ and NO₂ Dry Deposition in Beijing under Stagnant Weather Conditions during the Beijing Olympic Games Period

SU Hang^{1,2}, WANG Zifa², ZHU Bin¹, and YIN Yan¹

1 College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract With the meteorological and contaminated information from Beijing 325-m meteorological tower in the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, and the gas dry deposition resistance model, the influencing factors of the dry deposition, the dry deposition rate, and the dry deposition flux in Beijing before and during the Beijing Olympic Games were calculated. The results show: 1) With the variations of the stability, the solar radiation intensity, and the style of the surface, the SO₂ and NO₂ dry deposition rates change obviously, and the apparent resistance is the main factor impacting the dry deposition rate. 2) The dry deposition rate and flux during the daytime are greater than those during the nighttime. 3) The dry deposition can remove 24-t SO₂ and 55. 2-t NO₂ in Beijing Olympic Games. This means that the emission reduction measures taken by the Chinese government during the Olympic Games have had a significant effect.

Key words figure 1000 stagnant weather condition, SO_2 , NO_2 , dry deposition model

作者简介 苏航,男,1984年出生,博士研究生,主要从事大气环境研究。E-mail. charlie_gna@163.com

收稿日期 2010-04-06 收到, 2010-07-21 收到修定稿

资助项目 中国科学院重要方向性项目 KZCX2-YW-205

1 引言

在没有降水的条件下,由于湍流运动的作用, 污染物在大气中输送扩散时,不断被下垫面(包 括陆面、水面和植被等)吸收或吸附,形成持续 向地面迁移的过程,称之为干沉降(张艳等, 2004)。

干沉降是大气中污染物清除的主要过程之一, 它直接影响着空气中污染物浓度和空气质量状况 的时空分布(Bobbink et al., 1998; Zhu and Su, 2008)。干沉降也是生态系统(包括陆地生态系统 和水生生态系统)从大气中获得营养元素(如氮 素和硫素)的重要过程之一(张金良等, 1999; 胡正义等, 2001;肖辉林, 2001; Fenn et al., 2003; Michopoulos et al., 2004),也是各种元素 循环的重要过程之一(徐国良等, 2003;杨龙元 等, 2007)。虽然干沉降没有湿沉降集中,但其地 域广、持续时间长,据估计大部分地区的干沉降 总量与湿沉降总量相当。特别在干旱地区干沉降 过程更是不容忽视(高会旺等, 1997;杨新兴等, 1998)。因此研究干沉降对环境和生态都有着重大 意义。

张冬保等(1992)利用化学洗脱法测量了重 庆地区硫干沉降速率。范思泓等(1993)利用气 象要素梯度法测量计算了成都市郊地区 SO₂的干 沉降速率及其日变化规律。Wesely(1989)提出 了大叶阻力理论,能够应用较详细的表面资料对 下垫面特征进行描述,从而发展了干沉降模式。 王泽杰等(2006)利用干沉降阻力模型计算了青 岛近海地区 SO2气体和硫酸盐气溶胶干沉降速率 的季节变化情况。王体健等(2001)利用大叶干 沉降阻力模型计算了江西红壤地区硫干沉降通量。 石春娥等(2003)利用干沉降阻力模型和 MM5 模型计算了中国东部及附近地区硫化物干沉降速 率的区域分布。沈健林等(2008)利用美国 Hicks 计算模型估算了北京近郊农田地区 NH3 与 NO₂的干沉降通量情况。但目前还没有整个北京 地区干沉降状况的研究。

北京位于太行山和燕山山脉脚下的华北平原 北端,西、北和东北向环山,地形呈簸箕状,大 气流动受到阻挡,大气污染物不易向外输送,大 气自身的干沉降清除机制尤显重要。目前对北京 干沉降情况的分析和讨论相对较少,且奥运会期 间北京的空气质量受到国内外的普遍关注,中国 政府也对奥运会期间 SO₂和 NO₂等主要气体污染 物的排放采取了较大规模的控制措施。因此,模 拟分析奥运会期间北京 SO₂和 NO₂的干沉降情况, 对奥运会期间北京通过干沉降作用清除气体污染 物效果的了解和研究有着重要而深远的意义。

本文利用中国科学院大气物理研究所北京 325 m 气象塔 47 m 处的气象场观测资料及其地面处自 动气象站的气象场观测资料和热电分析仪的污染 场观测资料作为模式输入数据,采用美国 Wesely (1989)的气体干沉降模型,对奥运会前后北京行 政区内 SO₂和 NO₂的干沉降影响因子、干沉降速 率、干沉降通量情况做数值模拟分析,探讨奥运 会前后北京通过干沉降作用清除气体污染物的变 化规律。

2 资料和方法

2.1 资料选取

中国科学院大气物理研究所北京 325 m 气象 塔位于北京市正北的三环路与四环路之间,距三 环约1 km,观测塔东面 200 m 处为南北走向的八 达岭高速公路,北面 50 m 处为东西走向的北土城 西路。气象观测塔共设置 15 个观测平台,每层提 供风速、风向、温度及相对湿度的连续观测(李 昕等,2003)。本文采用气象塔 47 m 处观测的 10 min 一次的风速、温度及其地面处 M520 型自动气 象站观测的 1 min 一次的风速、温度、压强、太 阳辐射通量密度和相对湿度观测数据作为干沉降 模式的气象场输入资料。浓度资料采用架设在气 象塔地 面处的 热电 43i 型 SO₂ 分析仪和热电 42CTL型 NO₂分析仪观测到的 1 min 一次的 SO₂ 和 NO₂浓度观测资料。

研究区域为整个北京行政区,利用 MODIS 遥 感数据对北京地区不同下垫面进行监督分类,其 下垫面大致包括城市、农田、林地和水域4种类 型,面积分别为1451 km²、5447 km²、6834 km² 和374 km²。在奥运会前和奥运会期间分别选取风 速范围在2 m・s⁻¹以内且没有对流性天气过程的 静稳天气日作为研究日期,选择结果分别为2008 年7月9日和8月23日。由于处在静稳天气条件 下,北京行政区内各处气象条件差别较小,故采 用气象塔处的观测数据,并使用北京不同下垫面 加权计算的方法,可以较准确地模拟奥运会前和 奥运会期间北京行政区内的干沉降情况。

2.2 干沉降模式计算方法

干沉降速率 v_d 是描述干沉降过程清除气体能 力大小的一个参数, Chamberlain and Chadwick (1953)将其定义为干沉降通量 F_d 与物质浓度 C 之比:

$$v_{\rm d}(z_{\rm r}) = \frac{F_{\rm d}(z_{\rm r})}{C(z_{\rm r})},\tag{1}$$

这里取向下的沉积通量为正值, z_r为参考高度 (单位: m)。这一定义反映了多种物理机制对于 干沉降贡献的总效应。

气体污染物的干沉降速率受多种因子的制约, 这些因子大致可以分为3类,即大气特性、地表 特性和污染物本身特性,而每一类又包括许多因 子。阻力模型认为气体的干沉降速率与3个阻力 之和成反比:

 $v_{d} = (R_{a} + R_{b} + R_{c})^{-1},$ (2) 其中, R_{a} 是空气动力学阻力(单位: s・m⁻¹), R_{b} 是片流层阻力(单位: s・m⁻¹), R_{c} 是表面阻 力(单位: s・m⁻¹)(Wesely, 1989)。

2.2.1 空气动力学阻力

空气动力学阻力 R。是气体从大气边界层向片 流子层输送时受到的阻力,它主要取决于这层以 上的湍流混合作用,利用大气稳定度、地面风速 和地面粗糙度计算得出。其表达式为

$$R_{\rm a} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \phi_{\rm h}}{ku_*},\tag{3}$$

其中, *z* 是模式最低层的高度(单位: m); *z*₀ 是粗 糙度(单位: m); *s*_h 是稳定度校正函数; *k* 是卡门 常数,取为 0.4; *u*_{*} 是摩擦速度(单位: m • s⁻¹)。 2.2.2 片流层阻力

片流层阻力 R_b 是气体从片流子层向下垫面输送时受到的阻力,它是由地表的分子扩散过程决定的。

在陆面或冰面上(石春娥等,2003)

$$R_{\rm b} = \frac{2}{ku_*} \left(\frac{K}{D_{\rm g}}\right)^{2/3},\tag{4}$$

其中, *K* 是空气的热扩散率 (无量纲), *D*_g 是痕 量成分在大气中的分子扩散率 (无量纲)。

在水面上(石春娥等,2003)

$$R_{\rm b} = \frac{1}{ku_*} \ln \Big(\frac{ku_* z_0}{D_{\rm g}} \Big).$$
 (5)

在雪面上, R_b 取为 2×10^4 s·m⁻¹。

2.2.3 表面阻力

表面阻力 R。与地表类型有关,且随太阳辐射 强度、季节、下垫面类型、物种的变化而变化, 是目前最难确定的量。Wesely(1989)计算 R。的 方法充分考虑了下垫面上植被的生长结构和分布 特征,先总体上将其分为高层覆盖物、低层覆盖 物和地面覆盖物3个部分,对于每个部分又根据其 实际的特征再予以细分,最终得到了与R。有关的7 个阻力因子。具体的计算公式如下:

$$R_{\rm c} = \frac{1}{\frac{1}{r_{\rm s} + r_{\rm m}} + \frac{1}{r_{\rm lu}} + \frac{1}{r_{\rm dc} + r_{\rm cl}} + \frac{1}{r_{\rm ac} + r_{\rm gs}}}, \quad (6)$$

其中, r_s表示植物叶表气孔部分的表面阻力(单 位: s•m⁻¹); r_m表示植物叶肉部分的表面阻力 (单位: s•m⁻¹); r_{lu}表示植物叶片的角质层部分 及高层覆盖物其他表面部分的表面阻力(单位: s•m⁻¹); r_{de}表示覆盖物间由于对流作用引起气 体交换所造成的表面阻力(单位: s•m⁻¹); r_d表 示低层覆盖物中裸露在外的叶片、嫩枝、茎皮等 部分的表面阻力(单位: s•m⁻¹); r_{se}表示受覆盖 物高度和生长分布密度影响气体迁移所引起的表 面阻力(单位: s•m⁻¹); r_{se}表示地面的土壤落叶 层、枯叶层等部分的表面阻力(单位: s•m⁻¹)。

3 干沉降影响因子分析

3.1 大气稳定度对干沉降的影响

大气稳定度类型是空气动力学阻力 R_a 和片流 层阻力 R_b 的主要敏感因子。表1给出了干沉降模 式根据不同风速和温度梯度情况划分的北京不同 大气稳定度级别(A-F表示稳定度逐渐增加)条 件下,SO₂和 NO₂干沉降速率及若干稳定度衡量 参数的变化情况。从表中可以看出,SO₂和 NO₂ 的干沉降速率均随大气稳定度的增加而减小。这 是由于大气稳定度的增强,导致边界层内湍流交 换作用减弱,从而使 SO₂和 NO₂的干沉降速率减

SU Hang, et	al. Numerical Simulation of	f the SO ₂ and NO ₂ Dry	y Deposition in Beijing under Stagnant	639
-------------	-----------------------------	---	--	-----

		参变量						
	稳定度类型	$u_*/\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$	Ri	L/m	$R_{\rm a}/{ m s}$ • m ⁻¹	$R_{ m b}/ m s$ • m ⁻¹	$R_{ m c}/{ m s}$ • m ⁻¹	$v_{ m d}/{ m cm}$ \cdot s ⁻¹
SO_2	А	0.24	-0.37	-10.72	0.13	9.52	264.29	0.365041
	В	0.22	-0.16	-23.90	0.89	10.39	264.29	0.362887
	С	0.21	-0.10	-35.35	1.16	10.74	264.29	0.362075
	D	0.19	0.11	19.37	3.35	11.71	264.29	0.357969
	Е	0.08	0.29	4.91	5.86	28.91	264.29	0.334386
	F	0.01	1.89	0.18	103.50	201.38	264.29	0.175695
NO_2	А	0.24	-0.37	-10.72	0.13	8.49	1360.71	0.073028
	В	0.22	-0.16	-23.90	0.89	9.27	1360.71	0.072947
	С	0.21	-0.10	-35.35	1.16	9.58	1360.71	0.072916
	D	0.19	0.11	19.37	3.35	10.45	1360.71	0.072753
	Е	0.08	0.29	4.91	5.86	25.78	1360.71	0.071821
	F	0.01	1.89	0.18	103.50	179.60	1360.71	0.060834

表 1 不同大气稳定度级别下北京 SO₂和 NO₂的参变量 Table 1 Parameters of SO₂ and NO₂ in different atmospheric stabilized conditions in Beijing

注:摩擦速度 u*、理查森数 Ri、莫宁一奥布霍夫长度 L 是根据 Louis (1979)的边界层参数化方案,利用干沉降模式计算得出。

小。随稳定度的增加, u_{*}逐渐减小,表明近地层机 械湍流交换逐渐减弱; Ri逐渐增大,表明气象场在 从动力促进、热力促进的状态向动力抑制、热力抑 制的状态发展; L 从小于零到近于无穷再到大于零 变化,符合气象条件从不稳定到中性再到稳定的变 化过程。随稳定度的增加, R_a 和 R_b 都逐渐在增大, 而 R_c 没有变化,这说明大气的稳定度主要是影响 R_a 和 R_b 的敏感因子。从 R_a、R_b 和 R_c 的相对大 小可以看出, R_a 和 R_b 对干沉降速率的影响较弱, 而 R_c则是干沉降速率的主要影响因子。

3.2 太阳辐射强度对干沉降的影响

太阳辐射强度影响着植物叶片气孔的开合状 况以及叶表温度和相对湿度,进而影响气体表面 阻力的大小,从而影响气体干沉降速率的大小。 图1给出了干沉降模式模拟出的不同日射条件下 北京农田下垫面上 SO₂和 NO₂的表面阻力和干沉 降速率的变化情况。从图中可以看出,随着太阳 辐射强度的增加, SO₂和 NO₂的表面阻力都在减 小,干沉降速率都在相应逐渐增加,并且与表面 阻力近似成反比变化。这主要是由于太阳辐射越 强,下垫面叶表气孔张开程度就越大,越有利于 对物质的吸附,以致表面阻力越小;而表面阻力 又是影响干沉降速率的主要因子,从而导致了越 大的干沉降速率。

3.3 下垫面类型对干沉降的影响

表2给出了干沉降模式模拟出的 SO₂和 NO₂



图 1 不同日射条件下 SO₂和 NO₂在北京农田下垫面(a)表面阻力和(b)干沉降速率的变化

Fig. 1 (a) Surface resistance and (b) dry deposition rate of SO₂ and NO₂ on Beijing farmland in different solar radiation conditions

在北京的4种基本下垫面条件下表面阻力和干沉 降速率。从表中可以看出,两者的干沉降速率均 随下垫面类型的变化而变化。同一物种在不同下 垫面上的干沉降速率不同,不同物种在同一下垫 面上的干沉降速率也存在着差别。从*R*。与 va 近似 成反比关系变化可知,下垫面条件主要通过影响 *R*。进而影响 va的变化。通过对比不同下垫面上气 体的 va可以看出,SO₂的 va 在水面上最大,在城 市上最小,在农田和林地上的 va 大于城市和水域 上的 va; NO₂在水面上的 va 积于陆面上的 va, 且 NO₂较易吸附于植物表面,所以 NO₂的 va 在农 田和林地上较大。

从以上分析可以看出,气体的干沉降速率较 强地依赖于沉积表面的特性。农田、林地上的 va 值一般大于城市上的 va值;表面潮湿状况通过改 变表面阻力从而对气体沉积速率产生显著的影响,

表 2 北京不同下垫面 SO₂和 NO₂的表面阻力和干沉降速率 Table 2 Surface resistance and dry deposition rate of SO₂ and NO₂ in different surface conditions of Beijing

		参量		
	下垫面类型	$R_{ m c}/{ m s}$ • cm $^{-1}$	$v_{\rm d}/{ m cm}$ • ${ m s}^{-1}$	
SO_2	城市	5.0000	0.1972	
	农田	2.6429	0.3686	
	林地	4.6579	0.2115	
	水域	0.1000	5.8817	
NO_2	城市	31.0000	0.0321	
	农田	13.6071	0.0728	
	林地	17.3545	0.0572	
	水域	99.0000	0.0100	

当表面非常潮湿时,可溶性气体的干沉降速率呈 现迅速增大的趋势,而不可溶性气体的干沉降速 率则呈现相反的变化趋势。

4 静稳天气条件下干沉降速率及通量计算

4.1 干沉降速率的日变化

由于静稳天气条件下,大气输送及对流性天 气的影响较弱, 气体的干沉降成为气体最主要的 汇,同时气体的干沉降也是衡量大气本身沉积去 除气体污染物能力大小的过程。从图 2 可以看出, SO₂和 NO₂在奥运会前后干沉降速率的日变化趋 势大致相同。白天的干沉降速率普遍大于夜晚, 且都在中午出现一天中干沉降速率的最大值,SO2 约为 0.195 cm • s⁻¹, NO₂约为 0.0327 cm • s⁻¹; 都在午夜出现一天中干沉降速率的最小值, SO₂约 为 0. 180 cm • s⁻¹, NO₂约为 0. 0318 cm • s⁻¹。这 主要是由于白天的气温高于夜晚,导致白天的湍 流作用大于夜晚,并且白天的分子布朗运动也会 大于夜晚,从而导致白天的干沉降作用大于夜晚。 SO₂和 NO₂在奥运会前后参考日的日干沉降速率略 有差别,这是由天气状况的差异所引起的,但总体 差别不大,均属于静稳天气下的变化范围。其中 SO。的干沉降速率大小及变化趋势与范思泓等 (1993)对 SO2干沉降速率的计算结果趋势一致。

4.2 干沉降通量的日变化

图 3 利用干沉降模式对北京城市、农田、林 地和水域 4 种下垫面总的干沉降通量进行加权计



图 2 奥运会前后北京城市下垫面静稳天气条件下(a) SO2和(b) NO2的干沉降速率日变化

Fig. 2 The daily change of the dry deposition rate of (a) SO₂ and (b) NO₂ on Beijing urban surface under stagnant weather conditions before and during the Beijing Olympic Games



图 3 奥运会前后北京城市下垫面静稳天气条件下 (a) SO₂和 (b) NO₂的干沉降通量日变化 Fig. 3 The daily change of the dry deposition flux of (a) SO₂ and (b) NO₂ on Beijing urban surface under stagnant weather conditions before and during the Beijing Olympic Games

算,最终得到奥运会前后静稳天气条件下北京行 政区 14106 km² 面积范围内 SO₂和 NO₂干沉降通量 的日变化。从图 3 中可以看出, 奥运会前后 SO₂ 和 NO₂白天的干沉降通量普遍大于夜晚, 这是由 于白天 SO₂和 NO₂的浓度普遍高于夜晚, 且干沉 降速率也存在白天大于夜晚的变化趋势所致。SO2 和NO2在奥运会期间的日干沉降通量普遍小于奥 运会前的日干沉降通量,这是由于奥运会期间中 国政府对 SO2和 NO2等主要气体污染物采取了一 系列减排措施, 使奥运会期间 SO₂和 NO₂的浓度 较奥运会前大幅减少, 而奥运会前后两个静稳天 气日干沉降速率变化不大所致。奥运会前静稳天 气条件下北京行政区 SO₂的日平均干沉降通量约 $1000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, 而奥运会期间 SO₂的日平均干沉 降通量仅约 $450 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$;奥运会前静稳天气条件 下北京行政区 NO2的日平均干沉降通量约为 2300 $kg \cdot h^{-1}$, 而奥运会期间 NO₂的日平均干沉降通量 仅约 2100 kg \cdot h⁻¹,从而可以计算得出奥运会前 静稳天气条件下北京一天可清除 24 t SO₂和 55.2 t NO₂;奥运会期间静稳天气条件下北京一天可清 除 10.8 t SO₂和 50.4 t NO₂。从奥运会前后 SO₂和 NO₂干沉降通量的变化情况,也可以看出奥运会 期间中国政府采取的减排措施起到了显著效果。

5 结果与讨论

(1)大气稳定度类型是影响空气动力学阻力 和片流层阻力的主要敏感因子。随着稳定度的逐 渐增加,干沉降速率逐渐减小。空气动力学阻力 和片流层阻力对干沉降速率影响较弱,而表面阻 力是影响干沉降速率变化的主要因子。

(2) 太阳辐射强度和下垫面类型是表面阻力 的主要敏感因子。随着太阳辐射强度的增加,干 沉降速率逐渐增加。气体干沉降速率随下垫面类 型的变化而变化。SO₂的干沉降速率在水面上最 大,在城市上最小,在农田、森林上的干沉降速 率普遍大于城市上的;NO₂在水面上的干沉降速 率明显小于陆面上的,NO₂在农田和林地上的干 沉降速率较大。

(3) 奥运会前后北京 SO₂ 和 NO₂ 白天的干沉 降速率都普遍大于夜晚,且都在中午出现一天中 的最大值,SO₂ 约为 0.195 cm • s⁻¹, NO₂ 约为 0.0327 cm • s⁻¹;都在午夜出现一天中干沉降速 率的最小值,SO₂ 约为 0.180 cm • s⁻¹, NO₂ 约为 0.0318 cm • s⁻¹。这是由于日夜温差导致湍流作 用和分子布朗运动的变化而造成的。

(4) 奥运会前后 SO₂和 NO₂ 白天的干沉降通 量普遍大于夜晚。SO₂和 NO₂在奥运会期间的日 干沉降通量普遍大于奥运会前的日干沉降通量。 从奥运会前后静稳天气条件下北京干沉降通量大 小可以计算得出,静稳天气条件下奥运会前北京 一天可清除 24 t SO₂和 55.2 t NO₂;奥运会期间 北京一天可清除 10.8 t SO₂和 50.4 t NO₂。从奥 运会前后 SO₂和 NO₂干沉降清除污染物的质量变 化也可以分析得出,奥运会期间中国政府采取的 减排措施起到了显著的效果。

参考文献 (References)

borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi natural European vegetation [J]. Ecology, 86: 717-738.

- Chamberlain A C, Chadwick R C. 1953. Deposition of airborne radio-iodine vapor [J]. Nucleonics, 8 (1): 22-25.
- 范思泓,洪钟祥,周乐义,等. 1993. 二氧化硫干沉降的测量 [J]. 大气科学,17 (1): 106 - 111. Fan Sihong, Hong Zhongxiang, Zhou Leyi, et al. 1993. Measurement of the dry deposition of sulfur dioxide [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 17 (1): 106-111.
- Fenn M E, Baron J S, Allen E B, et al. 2003. Ecological effects of nitrogen deposition in the western United States [J]. BioScience, 53: 404-420.
- 高会旺,黄美元,管玉平,等. 1997. 大气中硫污染物的干沉降 模式 [J]. 环境科学,18(6):1-5. Gao Huiwang, Huang Meiyuan, Guan Yunping, et al. 1997. Dry deposition model of sulfur pollutants in the atmosphere [J]. Environmental Science (in Chinese), 18(6):1-5.
- 胡正义, 王体健, 曹志洪, 等. 2001. 大气干沉降向农田生态系统 输入硫素通量研究 [J]. 土壤学报, 38 (3): 357 - 364. Hu Zhengyi, Wang Tijian, Cao Zhihong, et al. 2001. The study of the flux of sulfur to agro-ecosystem study by atmospheric dry deposition [J]. Acta Pedologica Sinica (in Chinese), 38 (3): 357 - 364.
- Louis J F. 1979. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere [J]. Bound.-Layer Meteor., 17: 187-202.
- 李昕,安俊琳,王跃思,等. 2003. 北京气象塔夏季大气臭氧观 测研究 [J]. 中国环境科学,23 (4):353-357. Li Xin, An Junling, Wang Yuesi, et al. 2003. The observation and study of atmospheric ozone by meteorological tower in Beijing [J]. China Environmental Science (in Chinese),23 (4):353-357.
- Michopoulos P, Baloutsos G, Economou A, et al. 2004. Effects of nitrogen deposition on nitrogen cycling in an Aleppo pine stand in Athens Greece [J]. Science Total Environ., 323: 211–218.
- 沈健林,刘学军,张福锁,等. 2008. 北京近郊农田大气 NH₃与 NO₂干沉降研究 [J]. 土壤学报, 45 (1): 165 - 169. Shen Jianlin, Liu Xuejun, Zhang Fusuo, et al. 2008. The study of dry deposition of NH₃ and NO₂ in Beijing suburban farmland [J]. Acta Pedologica Sinica (in Chinese), 45 (1): 165-169.
- 石春娥, 王水, 黄美元, 等. 2003. 用 MM5 模式和阻力模型计算 硫化物的干沉降速度 [J]. 中国科学技术大学学报, 33 (6): 692 - 700. Shi Chun'e, Wang Shui, Huang Meiyuan, et al. 2003. The calculation of dry deposition velocity by MM5 model and resistance model [J]. Journal of University of Science and Technology of China (in Chinese), 33 (6): 692-700.
- 肖辉林. 2001. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响 [J]. 林业科 学, 37 (4): 111-116. Xiao Huilin. 2001. The impact of atmospheric nitrogen deposition on forest soil acidification [J]. Scientia Silvae Sinica (in Chinese), 37 (4): 111-116.

徐国良,莫江明,周国逸,等. 2003. 土壤动物与 N 素循环及对

N 沉降的响应 [J]. 生态学报, 23 (11); 2453-2463. Xu Guoliang, Mo Jiangming, Zhou Guoyi, et al. 2003. The response from soil fauna to nitrogen cycle and nitrogen deposition [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 23 (11); 2453-2463.

- 王体健,李宗恺,胡正义,等. 2001. 红壤典型地区大气硫输入 的干沉降通量研究 [J]. 应用生态学报,12 (6):923-926. Wang Tijian, Li Zongkai, Hu Zhengyi, et al. 2001. The research of the flux of sulfur from atmospheric dry deposition to typical red soil area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 12 (6):923-926.
- 王泽杰,祁建华,于丽敏. 2006. 青岛近海地区 SO₂和 SO²-干沉 降速率的季节变化 [J]. 海洋湖沼通报,4:86-93. Wang Zejie, Qi Jianhua, Yu Limin. 2006. The dry deposition rate seasonal change of SO₂ and SO²⁻ in Qingdao seacoast [J]. Transactions of Oceanology and Limnology (in Chinese),4:86-93.
- Wesely M L. 1989. Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models [J]. Atmos. Environ., 23 (6): 1293-1304.
- 杨新兴,高庆先,姜振远,等. 1998. 我国硫输送和沉降量规律 的研究 [J]. 环境科学研究,11 (4):27-34. Yang Xinxing, Gao Qingxian, Jiang Zhenyuan, et al. 1998. The study of transportation and deposition of sulfur in China [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 11 (4):27-34.
- 杨龙元,秦伯强,胡维平,等. 2007. 太湖大气氮、磷营养元素 干湿沉降率研究 [J]. 海洋与湖沼, 38 (2): 104-110. Yang Longyuan, Qin Boqiang, Hu Weiping, et al. 2007. The study of the atmospheric dry and wet deposition rate of nutrient element of nitrogen and phosphorus in Taihu [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica (in Chinese), 38 (2): 104-110.
- 张冬保,高世东,赵大为. 1992. 重庆硫干沉降速度的测定 [J]. 四川环境,2:45-52. Zhang Dongbao, Gao Shidong, Zhao Dawei. 1992. Measurement of dry sulphur deposition velocity in Congqing urban area [J]. Sichuan Environment (in Chinese), 2:45-52.
- 张金良,于志刚,张经.1999. 大气的干湿沉降及其对海洋生态 系统的影响 [J].海洋环境科学,18 (1):70-76. Zhang Jinliang, Yu Zhigang, Zhang Jing. 1999. The impact of atmospheric dry and wet deposition on marine ecosystem [J]. Marine Environmental Science (in Chinese), 18 (1):70-76.
- 张艳, 王体健, 胡正义, 等. 2004. 典型大气污染物在不同下垫面上干沉降速率的动态变化及空间分布 [J]. 气候与环境研究, 9 (4): 591-604. Zhang Yan, Wang Tijian, Hu Zhengyi, et al. 2004. The dynamic changes and spatial distribution of dry deposition rates of typical air pollutants at different surface [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (4): 591-604.
- Zhu Bin, Su Hang. 2008. Estimated dry deposition of ammonia and NO₂ over the Jurong agricultural watershed, China [R]. Comparative Study of Nitrogen Cycling and Its Impact on Water Quality in Agricultural Watersheds in Japan and China, 7–12.