

郑 炜, 杨 军, 刘端阳, 等. 南京冬季辐射雾雾水沉降特征研究[J]. 干旱气象, 2014, 32(1): 52-59, [ZHENG Wei, YANG Jun, LIU Duanyang, et al. The Deposition Characteristics of Radiation Fog Water in Winter of Nanjing[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(1): 52-59], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-01-0052

## 南京冬季辐射雾雾水沉降特征研究

郑 炜, 杨 军, 刘端阳, 滕华超

(南京信息工程大学, 大气物理学院, 江苏 南京 210044)

**摘 要:**利用2007年11月15日至12月29日在南京市郊开展的雾外场观测试验所获取的雾滴谱、三维风资料, 利用涡度协方差法, 主要分析了南京冬季辐射雾过程中的雾水沉降特征, 并探讨了一次辐射雾与辐射—平流雾雾水沉降特征的差异。结果表明: 辐射雾成熟阶段的雾水沉降量占总沉降量的90%以上; 发现20  $\mu\text{m}$ 以上的大雾滴对沉降起主要贡献, 而大雾滴主要受重力沉降机制影响, 重力沉降量约占总沉降量的82%, 而雾水的湍流沉降量相对较小; 直径7  $\mu\text{m}$ 以下与40  $\mu\text{m}$ 以上的雾滴对总沉降量几乎无贡献; 雾的液态水含量与雾水沉降量之间线性相关, 说明雾液态水含量对雾水沉降量有直接的影响, 雾水沉降集中在能见度50 m以下的强浓雾阶段; 辐射雾发展阶段近地面小雾滴在湍流扩散作用下以一定的周期向雾层上方输送, 使得雾水通量谱具有明显的振荡特征, 而辐射—平流雾的雾水通量谱不具有振荡特征。

**关键词:**南京; 雾; 雾水沉降; 雾水通量; 涡动协方差

**文章编号:**1006-7639(2014)-01-0052-08 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-01-0052

**中图分类号:**P426.4

**文献标识码:**A

### 引 言

雾是贴地层空气中悬浮着大量水滴或冰晶微粒而使水平能见度降到1 000 m以下的天气现象<sup>[1]</sup>, 是较为常见的灾害性天气之一, 常给国民经济和社会生活带来重大损失。近年来研究发现, 雾与生态环境关系密切, 故研究雾的理化特征, 对于防止雾灾和保护生态环境具有重要意义<sup>[2]</sup>, 其中雾水沉降作为湿沉降的一种, 受到越来越多的关注。雾水沉降是指雾滴在重力、风或其他动力作用下通过表面接触聚集而移出大气的过程。雾水沉降与生态环境息息相关, 雾水沉降对污染物有湿清除效果, 可以将空气中的污染物转移到地面, 污染严重时可对土壤、植被造成危害。不过在较清洁的地区, 沉降的雾水对植被则具有积极的意义, 例如云南省南部的雾对生产高质量的茶叶及发展橡胶林十分有利<sup>[1]</sup>。此外, 在一些干旱但多雾的地区, 雾水沉降带来的降水量相当可观, 一些雾频发地区的雾过程降水量甚至超

过了雨雪造成的降水量, 起到适当缓解旱情的作用。

自20世纪50年代, 众多学者分别针对雾水沉降机制、沉降雾水的化学成分开展了大量的研究, 指出雾水沉降是生态系统中水、污染物循环的重要环节<sup>[3]</sup>, 雾水中的化学成分通过沉降会对生态、环境和人类健康造成直接影响。此外雾天污染物较易积聚, 工业化城市的雾水中污染物浓度普遍高于雨水<sup>[4-5]</sup>, 且沉降下来的雾水中含有大量的离子化合物<sup>[6-7]</sup>。Beswick等<sup>[8]</sup>研究发现雾水沉降机制可分为2种: 一种是雾滴在重力作用下的沉降, 称为重力沉降; 另一种是在湍流作用下雾滴冲撞吸附到物体表面的过程, 称为湍流沉降。有学者通过计算植物体表面收集雾水的效率或者收集通过树林冠层以及被冠层拦截而流下来的水量对雾水沉降量进行了估算<sup>[9]</sup>。Lovett<sup>[10]</sup>曾建立一维模式, 通过输入各种参数直接模拟计算雾水的沉降。近年来 Beswick<sup>[8]</sup>、Eugster<sup>[11-12]</sup>等根据涡动斜方差法计算了荷兰、波多黎各等地云雾森林的雾水沉降量。

**收稿日期:**2013-06-08; **改回日期:**2013-11-23

**基金项目:**国家公益性行业(气象)科研专项“长江三角洲雾害监测预警及灾情评估研究”(GYHY(QX)2007-6-26)、国家公益性行业(气象)科研专项“长江中上游地区辐射雾的监测及客观预报技术研究”(GYHY200906012)及中国气象局云雾物理环境重点实验室开放科研课题“浓雾过程中气溶胶与雾滴微物理演变及相互作用”(2009006)共同资助

**作者简介:**郑炜(1985.1-), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 研究方向为云雾物理。E-mail: zhengfeidian@sina.com

国内在雾水沉降方面也已开展了一些研究,黄玉生等<sup>[13]</sup>研究西双版纳辐射雾时,发现雾滴重力沉降的起伏引起雾的微结构起伏变化,使得雾中液态水含量和数密度都有周期为20~30 min的明显振荡特征。李子华<sup>[1]</sup>在分析景洪雾时发现1950年代景洪年均降雾量为17.5 mm,到1980年代则不足1 mm,重庆等地区也有类似情况。总的来看,国内在雾水沉降方面的研究工作十分有限,而且由于外场试验条件的限制,已有的研究中没能对湍流沉降机制进行考虑,而在一些森林地区该机制的作用可能大于重力沉降<sup>[14]</sup>。

长江三角洲地区是我国雾的多发地区之一,加之城市化进程的加快,大气环境负荷较重。已观测到雾水中总离子浓度或者电导率远高于世界上其他

地区的平均结果,而这些高浓度雾水通过沉降过程必然造成对当地生态系统的化学强迫。本文利用2007年南京北郊雾外场观测试验的数据,分析了雾过程中的雾水沉降通量日变化、谱分布特征,以及影响雾水沉降的主要因子,探讨了辐射雾与平流雾雾水沉降特征的差异。以期为进一步定量评估雾过程的化学强迫作用、保护生态环境提供科学支持。

## 1 观测分析概况

2007年南京冬季雾外场观测点设于南京北郊(32°12'22"N,118°42'18"E,海拔高度25 m)。观测点周边地势平坦,下垫面为稀疏草地。主要观测仪器包括雾滴谱仪、能见度仪、自动气象站、多普勒声雷达、系留汽艇、开路涡动协方差系统等(表1)。

表1 南京冬季浓雾外场观测仪器概况

Tab. 1 Instrumentation and measurement for winter fog projects in Nanjing

仪器名称	型号	测量项目	分辨率	观测频率
三维超声风速仪器	CSAT3	三维风	u、v 1 mm	10 Hz
		(u、v、w)	w 0.5 mm	
数据采集器	CR5000	数据采集	16 bit	10 Hz
雾滴谱仪	FM-100	雾含水量	0.000001 g·m <sup>-3</sup>	1 Hz
		雾滴谱	2~50 μm	1 Hz
		数密度	1~10 <sup>4</sup> 个	1 Hz
散射式能见度仪	ZQZ-DN	能见度	≤1 000 m ±10%	10 min
			>1 000 m ±20%	
自动气象站	ICT international	温度	±0.1 °C	30 min
		气压	< ±1 hPA	30 min
		湿度	±2%	30 min
		风速	0.1 m·s <sup>-1</sup>	30 min

采用美国DMT公司FM-100型雾滴谱仪探测雾微物理量,该仪器可对雾滴进行分档、计数,并实时记录相应的空气流速、气压、温度等,可以连续测量雾粒子数浓度、谱分布,可测粒径范围为2~50 μm,最大数密度为10<sup>4</sup>个·cm<sup>-3</sup>。开路涡动协方差测量系统由CR5000数据采集器、CSAT3超声风速仪、LI7500 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O分析仪组成<sup>[15]</sup>。CR5000控制测量、运算及数据存储;CSAT3测量三维风速和超声虚温;LI7500测量CO<sub>2</sub>和水汽通量。采集频率为10 Hz,工作时在线计算通量,本文超声资料采用30

min总体平均<sup>[16]</sup>。

涡动原始数据通过平面拟合,其他原始资料经过去野点进行质量控制<sup>[17]</sup>。利用雾滴谱资料可计算出某一尺度雾滴的液态水含量为: $\rho_{L,d}(D)$ ,单位为g·m<sup>-3</sup>,总雾液态水含量则为: $\rho_L = \sum \rho_{L,d}(D)$ 。根据涡动协方差法,湍流通量 $F_{L,t}$ (mg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)根据下式计算:

$$F_{L,t} = \overline{\omega' \rho_L'} \quad (1)$$

(1)式中: $\omega'$ 为垂直风速脉动(m·s<sup>-1</sup>)。  $\rho_L'$ 为液态

水含量脉动。横线表示通量采取 30 min 平均。某一尺度范围雾滴的重力沉降通量  $F_{L,S}$  为:

$$F_{L,S}(D) = -\nu_d(D)\rho_{L,d}(D) \quad (2)$$

(2)式中: $\nu_d(D)$ 为某尺度雾滴的下落末速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $\rho_{L,d}(D)$ 为该尺度雾滴的液态水含量。 $\nu_d(D)$ 通过斯托克斯定律求得: $\nu_d(D) = \frac{2}{9} \frac{r^2 g \rho_w}{\mu} \approx 1.27 \times 10^5 r^2$  ( $g$  为重力加速度,  $\rho_w$  为水的质量密度,  $r$  为雾滴半径,  $\mu$  为空气粘性系数取  $1.71 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

总雾水重力沉降通量:

$$G = \int_{D=0}^{50 \mu\text{m}} F_{L,S}(D) dD \quad (3)$$

雾水通量  $F_L$  为湍流通量与重力沉降通量之和:

$$F_L = F_{L,t} + F_{L,S} = F_{L,t} + \int_{D=0}^{50 \mu\text{m}} F_{L,S}(D) dD \quad (4)$$

若  $F_L$  值为正,代表由下往上传输的雾水通量; $F_L$  值为负,代表向下沉降的雾水通量。

## 2 结果与分析

2007 年 11 月 15 日至 12 月 29 日在南京市郊开展的雾外场观测试验共取得 7 次雾过程的数据(表 2),7 次雾过程均出现在 12 月份,主要以辐射雾为主,第 6 次雾过程为辐射—平流雾。几次雾过程的雾滴尺度相差较小,平均直径介于  $3.2 \sim 4.0 \mu\text{m}$  之间,最大直径除了过程 1 和过程 3,都达到  $40 \mu\text{m}$  以上,其中过程 5 达到了  $48 \mu\text{m}$ 。雾过程平均雾水沉降通量为  $0.30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在  $0.01 \sim 0.63 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  范围之内,雾过程平均累积雾水沉降量为  $0.67 \text{ mm}$ ,在  $0.06 \sim 1.44 \text{ mm}$  范围之内。按年均雾日 26 d<sup>[18]</sup>算,可粗略得出南京年均雾水沉降量约为  $17.4 \text{ mm}$ ,约占雨水<sup>[19]</sup>的 1.6%。此比例与一些地区相比较小,比如法国的 Vosges 山区,年雾水沉降量约为  $55 \text{ mm}$ ,占雨水的 4%<sup>[20]</sup>。而德国 Kleiner Feldberg 地区,年雾水沉降量约为  $180 \text{ mm}$ ,占雨水量的 17%<sup>[21]</sup>。

表 2 2007 年 12 月南京 7 次雾过程累积雾水沉降量

Tab. 2 Total fog water deposition of seven fog processes in December of 2007 in Nanjing

序号	日期	时长/h	液态水含量 /g · m <sup>-3</sup>	数浓度 个 · cm <sup>-3</sup>	平均直径 /μm	能见度 /m	雾水沉降通量 /mg · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup>	累积沉降量 /mm
1	10~11 日	13.5 2 <sup>a</sup>	0.02 0.11 <sup>b</sup>	269 (58~1 092)	3.6	369 (179~15) <sup>c</sup>	0.23	0.35
2	13~14 日	15.5 4 <sup>a</sup>	0.06 0.22 <sup>b</sup>	587 (247~1 190)	3.9	377 (133~15) <sup>c</sup>	0.63	1.15
3	18 日	8.5 1.5 <sup>a</sup>	0.02 0.1 <sup>b</sup>	581 (377~1 033)	3.6	447 (186~22) <sup>c</sup>	0.28	0.16
4	18~19 日	20 4 <sup>a</sup>	0.04 0.11 <sup>b</sup>	616 (177~1 032)	3.9	294 (84~15) <sup>c</sup>	0.46	1.40
5	19~20 日	23 13 <sup>a</sup>	0.04 0.08 <sup>b</sup>	752 (294~1 332)	4.0	216 (88~15) <sup>c</sup>	0.36	1.44
6	20~21 日	25 1.5 <sup>a</sup>	0.002 0.02 <sup>b</sup>	287 (61~830)	3.2	391 (234~71) <sup>c</sup>	0.01	0.13
7	23 日	7 1 <sup>a</sup>	0.03 0.07 <sup>b</sup>	529 (432~695)	4.0	124 (119~29) <sup>c</sup>	0.14	0.06

注:上标 a 表示雾成熟阶段维持时间;b 表示雾成熟阶段平均液态水含量;c 表示雾成熟阶段能见度;括号内数值为变化范围

### 2.1 雾水沉降特征

由图1看到南京冬季辐射雾起雾时间一般在18:00后,期间温度逐渐下降,空气湿度增大,能见度一直持续下降,雾滴数浓度也在缓慢上升,但雾液态水含量、雾滴尺度均维持在很低的水平(图2),这是辐射雾形成阶段的一般特征,这段时间内几乎无雾水沉降。进入下半夜,温度下降幅度增大,能见度继续下降,雾滴数浓度、雾液态水含量、雾滴直径均大幅增大,并且开始出现雾水沉降,雾水沉降集中在05:00~10:00之间。辐射雾成熟阶段的特征一般为平均能见度最低,液水含量最高,雾滴直径最大,雾滴数浓度最大,且液态水含量、数浓度均出现

波动现象,计算发现雾成熟后的沉降量占总雾水沉降量的90%以上,因此雾水沉降主要发生在雾成熟阶段。

由图3可看到直径在15~30 μm之间的雾滴对总雾水沉降起主要贡献,直径23 μm左右的雾滴造成的沉降量最大,直径7 μm以下与40 μm以上的雾滴几乎不造成沉降,直径7 μm以下的雾滴其湍流量均由下往上输送,可能是因仪器下方大量小雾滴凝结增长或大雾滴蒸发所致,此问题还有待进一步研究,另外小雾滴下落末速度小也会导致其重力沉降量较小。而40 μm以上的大雾滴数浓度较低,故该尺度范围的雾滴对总沉降的贡献微弱。

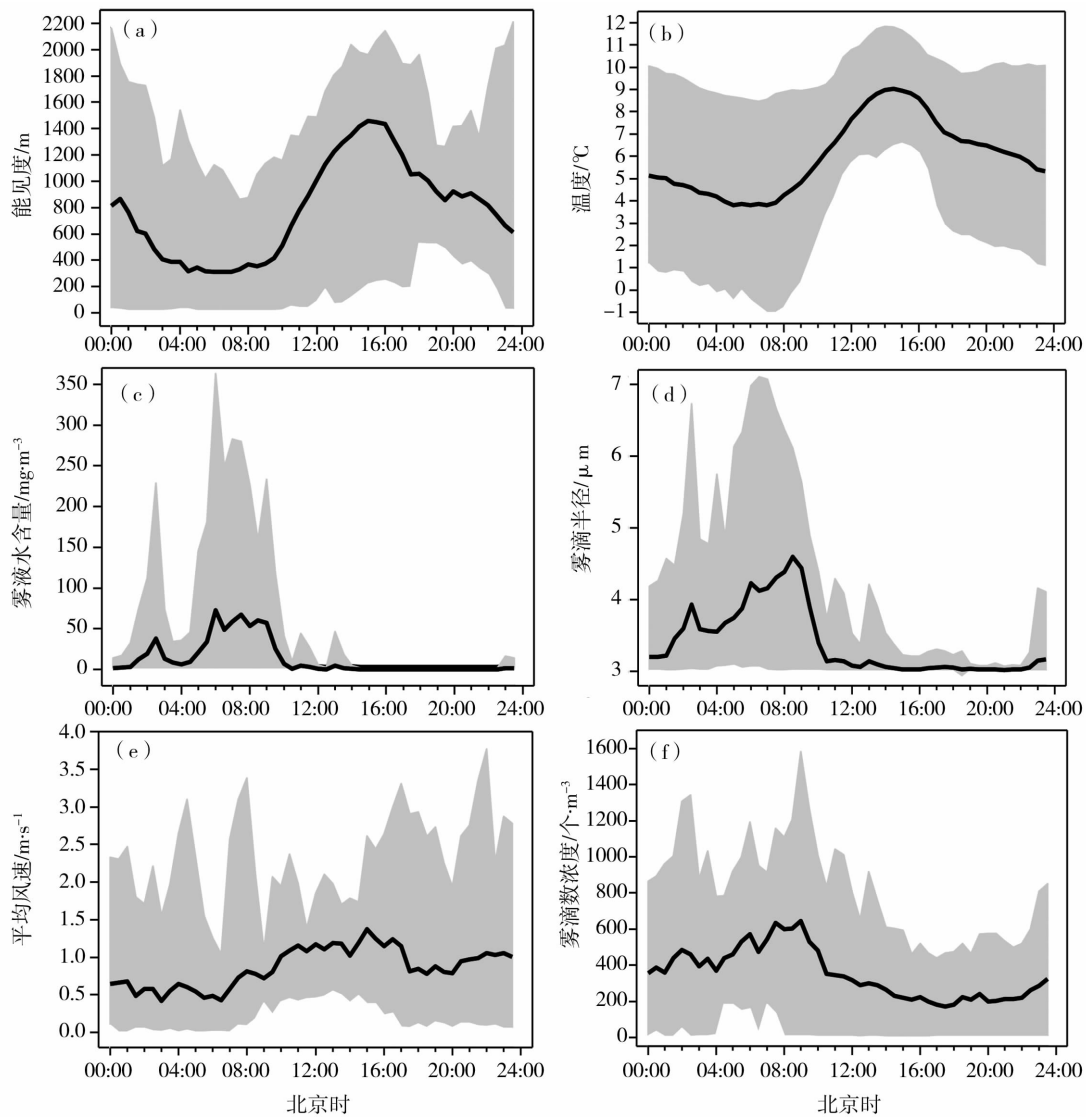


图1 2007年11月15至12月29日各物理量日变化图(数据采用30 min平均,阴影表示浮动区间)

(a)能见度, (b)温度, (c)雾液态水含量, (d)雾滴半径, (e)平均风速, (f)雾滴数浓度

Fig. 1 The diurnal variation of visibility(a), air temperature(b), liquid water content(c), mean droplet semidiameter(d), mean wind speed(e) and number concentration(f) from November 15 to December 29, 2007

(The shaded areas indicated the fluctuation range, and the data are 30 min average values)

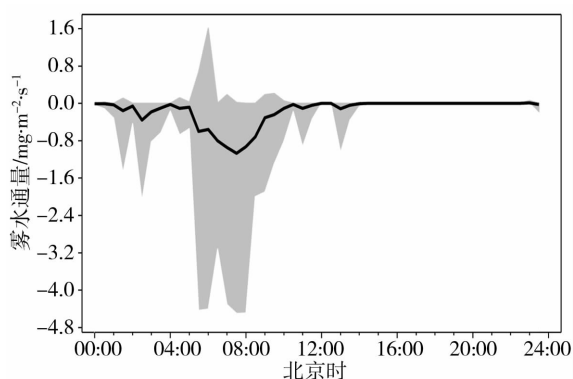


图2 雾水通量日变化图(负值代表沉降通量,数据采用30 min平均,阴影部分表示浮动区间)  
Fig. 2 The diurnal variation of fog water flux (The negative fluxes denote a fog water flux from the air to the canopy, the shaded area shows the fluctuation range, and the data are 30 min average values)

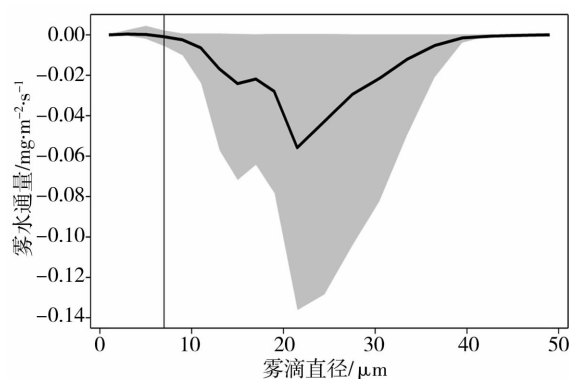


图3 雾水通量谱分布图(竖线为7 μm处,负值代表沉降通量,数据采用30 min平均,阴影表示浮动区间)  
Fig. 3 The spectral distribution of fog water fluxes (The vertical line denote 7 μm, the negative value denotes fog water deposition flux, the shaded area shows the fluctuation range, and the data are 30 min average values)

雾水沉降分重力沉降与湍流沉降2种机制,由图4看到辐射雾雾水重力沉降通量远远大于雾水湍流沉降通量,直径7 μm以上的雾滴主要受重力影响而沉降,湍流沉降量在各个尺度均小于重力沉降量,计算发现雾水重力沉降量约占总沉降量的82%,说明重力沉降是南京冬季辐射雾雾水沉降的主要机制。Eugster等<sup>[11]</sup>在研究瑞士农业地区的雾水沉降特征时也发现在雾滴直径达到25 μm时,雾水的湍流沉降相对于重力沉降量小到可以忽略不计,且该地区也以雾水重力沉降为主。另外下垫面粗糙度对湍流沉降也有一定的影响,下垫面光滑的地区雾滴通过

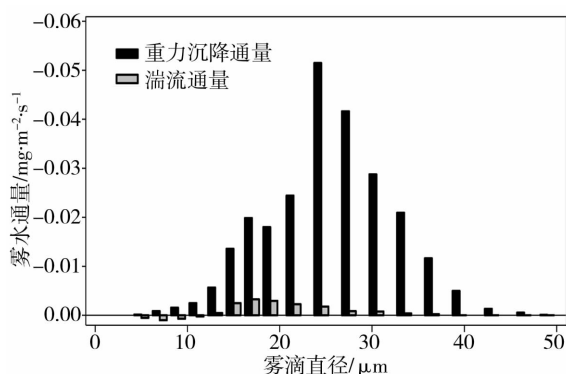


图4 雾水重力沉降通量与湍流通量比重图  
(负值代表沉降,数据采用30 min平均)  
Fig. 4 The proportion of the gravity settling and the turbulent deposition in the total fog water deposition (the negative values denote fog water deposition flux, and the data are 30 min average values)

冲击,吸附到障碍物的几率要远小于下垫面粗糙的地区。南京观测点周围无高大树木,下垫面以草地为主,Eugster等<sup>[11]</sup>研究的瑞士农业地区其下垫面也以低植被为主。而在一些森林地区,如Vermeulen<sup>[13]</sup>在研究荷兰针叶森林的雾水沉降时就发现该地雾水湍流沉降量是重力沉降量的3倍,可见下垫面粗糙程度对雾水湍流沉降有一定的影响。

## 2.2 影响雾水沉降的因子

由表2看到,雾水沉降量较大的第2、4、5次雾过程相对于其它几次雾过程具有显著的特征:雾液态水含量高、都存在强浓雾阶段、雾成熟阶段持续时间长。

雾液态水含量与雾水沉降之间关系密切,液态水含量高一般可以预示着雾水沉降量大。以 $y$ 代表雾水通量( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $x$ 代表液态水含量( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ )建立回归方程: $Y = 8.516(1 - e^{0.00126x})$  ( $R = 0.86$ ,样本量  $N = 211$ ,可通过  $P = 0.001$  的显著性检验)。由图5a可以看出辐射雾的雾液态水含量与雾水沉降通量线性相关,可见雾液态水含量对雾水沉降量有直接的影响。

因能见度的测量相对于雾液态水含量更方便,通过研究发现能见度也可用来间接指示雾水沉降的大小。辐射雾的雾水沉降一般出现在雾的成熟阶段,将能见度数据与雾水通量建立回归方程: $Y = -0.03042 - 12.0109 \times 0.9134^x$  ( $R = 0.69$ ,样本数  $N = 100$ )。结果表明,能见度与雾水沉降量呈指数关系,能见度越低,雾水沉降量增大越迅速。由图5b

看到,能见度 100 m 以下时雾水沉降量显著增大,且雾水沉降集中在能见度 50 m 以下的强浓雾阶段。

雾持续时间越长一般造成的沉降量也越大,由表 2 看到,雾水沉降量最大的 3 次雾过程(第 2、4、5 过程)持续时间均比另外几次雾过程要长。由于雾水沉降主要发生在雾成熟阶段,故雾过程成熟阶段

的维持时间对雾水沉降量的大小有着更直接的影响。比如雾过程 5 成熟阶段的平均液态水含量较雾过程 2、4 都低,但其成熟阶段维持的时间达到了 13 h,其总雾水沉降量反而最大。综上所述,雾液态水含量以及雾成熟阶段持续时间可以直接影响雾水沉降量,由能见度也可以间接判断雾水沉降的大小。

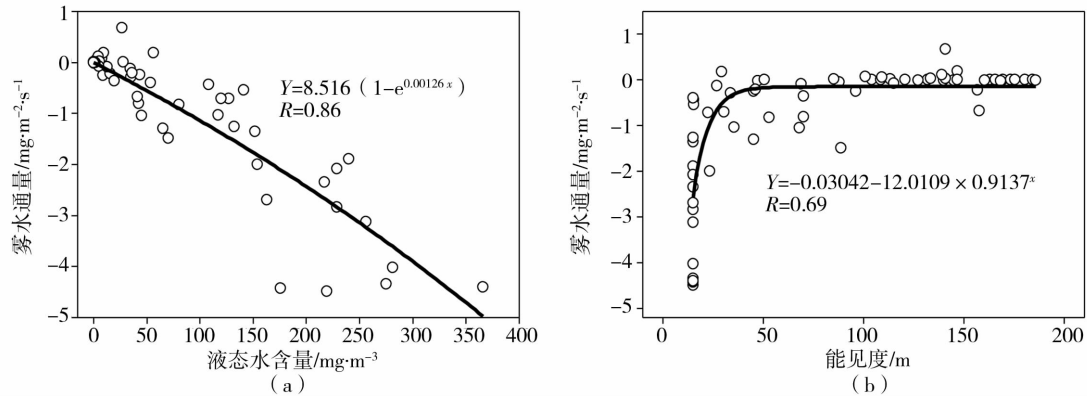


图 5 雾水通量与液水含量(a)及能见度(b)的拟合图

Fig. 5 The relationship between fog water flux and fog liquid water content(a), visibility(b) (the data are 30 min average values)

### 2.3 一次辐射雾与平流雾的雾水沉降特征差异

南京冬季以辐射雾为主,平流雾相对较少。上文分析出辐射雾形成阶段雾液态水含量、雾滴尺度均维持在很低的水平,形成阶段及发展阶段前期雾水沉降量较小,成熟阶段雾水沉降量达到总沉降量的 90%。不过 2007 年 12 月 20 ~ 21 日雾过程是由辐射冷却作用形成的,随后暖湿平流移到冷下垫面发展并维持而形成的辐射—平流雾,其形成与发展阶段的沉降量较小,与辐射雾具有相同的特点。不过由于平流作用在此次雾过程的发展与成熟阶段具有明显的作用,分析发现其雾水通量的变化特征与典型的辐射雾还是有所区别。

选取 2007 年 12 月 13 ~ 14 日雾过程为辐射雾典型,辐射雾在进入成熟阶段 30 min 前经历了一次爆发性发展的阶段,辐射雾爆发性发展的特征一般为湍流混合较强,即动量、热量、水汽垂直交换剧烈。此阶段核化、凝结过程快速进行,雾滴数密度大量增加,在较强的湍流混合作用下,雾滴间相互碰并使得雾滴不断增大,雾水通量谱也逐渐拓宽。由图 6 看到,05:30 辐射雾雾水通量谱的谱宽只有 15 μm,雾水通量接近于 0;10 min 后,雾滴在湍流作用下向上输送,雾水通量谱第一次上抬,谱宽也拓宽到 30 μm 左右,几个高值分别位于 7 μm, 17 μm, 25 μm 处。05:50,雾水通量谱回落;06:00,雾水通量谱再次向上抬升,最大值位于 10 μm 处,说明有大

量小滴向上输送;06:10,雾成熟,此时雾水以重力沉降为主且谱进一步增宽,不过雾水沉降通量最大值始终位于 25 μm 左右处,符合上文的研究结论,辐射雾爆发性发展阶段时湍流扩散运动是雾水通量谱数次上抬的主要原因。李子华等<sup>[22]</sup>指出,湍流混合引起的热量、动量及水汽的垂直输送,对辐射雾爆发性发展起着重要作用。另外刘端阳等<sup>[23]</sup>也研究发现湍流扩散将雾滴向上输送为辐射雾雾滴谱爆发性拓宽准备了条件。进入辐射雾爆发性增强阶段以后,湍流不仅向上输送热量和水汽,使大量凝结核化增长,而且通过湍流作用,发生了雾滴之间

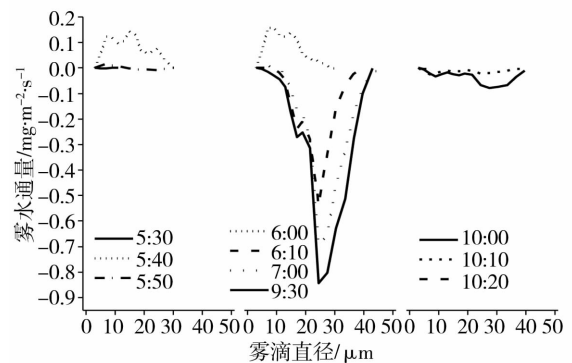


图 6 2007 年 12 月 13 ~ 14 日辐射雾通量谱变化  
Fig. 6 The spectrum distribution of fog water flux during the radiation fog process from 13 to 14 December, 2007

的碰并,从而使大滴显著增长。此次辐射雾爆发性发展阶段湍流扩散以 10 min 为周期将在近地面核化、凝结形成的小雾滴向上输送,使得雾水通量谱呈明显的振荡特征。

由图 7 看到,该辐射—平流雾进入成熟前 30 min 的 12:30 谱宽约 10  $\mu\text{m}$ ,此时无雾水沉降。10 min 后上层暖湿平流对雾产生影响,雾开始发展,上层的雾滴在重力及湍流作用下向下方输送,雾水通量谱迅速拓宽到 40  $\mu\text{m}$  左右,不过此时还是小雾滴对雾水沉降起主要贡献。接着湿平流持续加强,至 13:00 雾成熟,雾水沉降通量谱增宽至 50  $\mu\text{m}$  左右,雾水沉降较明显,且直径 40  $\mu\text{m}$  左右的雾滴对沉降贡献最大。30 min 后雾逐渐消散。

2 次雾过程均为辐射降温生成,其形成阶段几乎都无雾水沉降;辐射雾发展阶段通常具有爆发性发展特征,此阶段湍流扩散运动将近地面核化、凝结形成的雾滴向上输送,并且使雾滴间互相碰并,大雾滴明显增多。此次辐射雾湍流以 10 min 为周期将雾滴向上输送,雾水通量谱具有明显的振荡特征,而辐射—平流雾湿平流是主要水汽来源,其雾水通量谱并无振荡现象,而是直接沉降;成熟阶段辐射雾沉降通量峰值直径在 25  $\mu\text{m}$  左右,而辐射—平流雾中较大的雾滴对沉降起主要作用,峰值直径在 40  $\mu\text{m}$  左右。

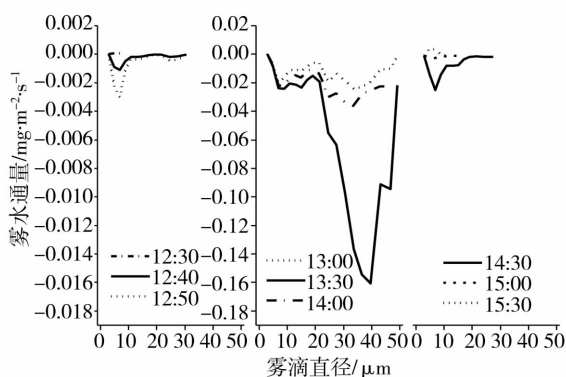


图 7 2007 年 12 月 20 ~ 21 日平流雾通量谱变化

Fig. 7 The spectrum distribution of fog water flux during the advection fog process from 20 to 21 December, 2007

### 3 结 论

(1) 辐射雾雾水沉降主要发生在雾成熟之后,成熟阶段雾水沉降量占总沉降的 90% 以上。

(2) 20  $\mu\text{m}$  以上的大雾滴对辐射雾雾水沉降有主要贡献,直径 23  $\mu\text{m}$  左右的雾滴造成的沉降量最大,大雾滴主要受重力沉降机制影响,雾水的重力沉降量约占总沉降量的 82%,在总沉降量中占主导,

相反雾水的湍流沉降量较小。其原因是较小的雾滴下落末速度小,且在湍流作用下一般向雾层上方输送,而辐射雾中大雾滴数浓度较小,所以直径 7  $\mu\text{m}$  以下与 40  $\mu\text{m}$  以上的雾滴对沉降几乎无贡献。

(3) 辐射雾的液态水含量与雾成熟阶段维持时间可以直接影响雾水沉降量,通过拟合发现雾液态水含量与雾水通量之间呈线性关系。能见度 100 m 以下时雾水沉降量显著增大,且雾水沉降集中在能见度 50 m 以下的强浓雾阶段。

(4) 辐射雾与辐射—平流雾雾水沉降特征的差异主要在发展与成熟阶段。辐射雾发展阶段通常具有爆发性发展特征,此阶段湍流扩散运动将近地面核化、凝结形成的雾滴向上输送,并且使雾滴间互相碰并,大雾滴明显增多。而辐射—平流雾湿平流是主要水汽来源,其雾水通量谱并无振荡现象,而是直接沉降;成熟阶段辐射雾沉降通量峰值直径在 25  $\mu\text{m}$  左右,而辐射—平流雾中较大的雾滴对沉降起主要作用,峰值直径在 40  $\mu\text{m}$  左右。

#### 参考文献:

- [1] 李子华. 中国近四十年来雾的研究[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 616 - 624.
- [2] 黄玉生, 黄玉仁, 李子华, 等. 生态环境变化对雾的影响[J]. 气象科学, 2000, 20(2): 129 - 135.
- [3] Walmsley J L, Schemenauer R S, Bridgman H A. A method for estimating the hydrologic input from fog in mountainous terrain[J]. Journal of Applied Meteorology, 1996 (35): 2237 - 2249.
- [4] Munger W J. Fogwater chemistry in an urban atmosphere[J]. J Geophys Res, 1983, 88 (9): 5109 - 5121.
- [5] 黄玉生, 郭慧光, 刘富兴. 工业区与非工业区辐射雾水的化学组成[J]. 地理学报, 1992, 47(1): 66 - 73.
- [6] Waldman J M, Munger J W, Jacob D J, et al. Chemical composition of acid fog[J]. Science, 1982, 218: 677 - 680.
- [7] Wrzesinsky T, Klemm O. Summertime fog chemistry at a mountainous site in central Europe[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34: 1487 - 1496.
- [8] Beswick K M, Hargreaves K J, Gallagher M W, et al. Size - resolved measurements of cloud droplet deposition velocity to a forest canopy using an eddy correlation technique[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1991, 117: 623 - 645.
- [9] Vogelmann H W, Siccama T, Leedy D C. Precipitation from fog moisture in the green mountains of Vermont[J]. Ecology, 1968, 49: 1205 - 1207.
- [10] Lovett G M. Rates and mechanisms of cloud water deposition to a subalpine balsam fir forest[J]. Atmos Environ, 1984, 18: 361 - 371.
- [11] Eugster W, Burkard R, Klemm O, et al. Fog deposition measurements with the eddy covariance method[A]. In: Proceedings of the Second International Conference on Fog and Fog Collection[C]. St John's, Canada, 2001. 193 - 196.

- [12] Eugster W, Burkard R. Characteristics of fog and fogwater fluxes in a Puerto Rican elfin cloud forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006,139:288 – 306.
- [13] 黄玉生,黄玉仁,李子华,等. 西双版纳冬季雾的微物理结构及其演变过程[J]. *气象学报*, 2000,58(6):715 – 725.
- [14] Vermeulen A T, Wyers G P, Romer F G. Fog deposition on a coniferous forest in the Netherlands[J]. *Atmospheric Environment*, 1997,31(3):375 – 386.
- [15] Siebert H, Teichmann U. Behaviour Of An Ultrasonic Anemometer Under Cloudy Conditions [J]. *Boundary – Layer Meteorology*, 2000,94(1): 165 – 169.
- [16] 孙晓敏,朱治林,许金萍,等. 涡度相关测定中平均周期参数的确定及其影响分析[J]. *地球科学*,2004,34(增刊II):30 – 36.
- [17] 王介民,王维真,奥银焕,等. 复杂条件下湍流通量的观测与分析[J]. *地球科学进展*,2007,22(8):791 – 797.
- [18] 董尧青,银燕,徐萌柳,等. 南京地区雾的气候特征[J]. *南京气象学院学报*,2009,32(1):115 – 120.
- [19] 周健康,唐运忆,徐志侠,等. 南京站降水量的统计分析[J]. *水文*,2003,23(6):35 – 46.
- [20] Herckes P, Mirabel P, Wortham H. Cloud water deposition at high – elevation site in the Vosges Mountains [J]. *The Science of the Total Environment*, 2002,296:59 – 75.
- [21] Pahl S, Winkler P, Shneider T. Deposition of trace substances via cloud interception on a coniferous forest at Kleiner Feldberg [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1994,19:231 – 252.
- [22] 李子华,黄建平,周毓荃,等. 1996年南京连续5天浓雾的物理结构特征[J]. *气象学报*,1999,57(5):622 – 631.
- [23] 刘端阳,李子华,杨军. 辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件[J]. *大气科学*,2011,35(1):41 – 54.

## The Deposition Characteristics of Radiation Fog Water in Winter of Nanjing

ZHENG Wei, YANG Jun, LIU Duanyang, TENG Huachao

(College of Atmospheric Physics, NUIST, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** The intensive field observation experiments were conducted in the northern suburb of Nanjing from November 15 to December 29 in 2007. We used an ultrasonic anemometer – thermometer in combination with a size – resolving cloud droplet spectrometer capable of providing number counts in 20 droplet size classes. Our study focuses on the physical characteristics of fog and quantifying the fog deposition flux by using direct eddy covariance flux measurements, as well as the fog water deposition differences between radiation and advection fog. The results are as follows: The fog water deposition flux during the mature stage of radiation fog could be 90% of the total deposition flux. Droplet sizes above 20  $\mu\text{m}$  contributed mostly to the fog deposition, which was mainly gravity settling and it was 82% of the total deposition flux, while the turbulent deposition was relatively small. Droplet sizes below 7  $\mu\text{m}$  and above 40  $\mu\text{m}$  contributed little to the overall deposition flux. The fog water deposition flux depended linearly on liquid water content of the fog, which indicated that the liquid water content of the fog influenced directly on the deposition flux. In the development stage of radiation fog, there was obvious fluctuation of fog water flux due to intensive turbulence, while for advection fog there wasn't this phenomenon.

**Key words:** Nanjing; fog; fog water deposition; fogwater flux; eddy covariance