doi:10.7515/JEE201502008

云滴谱离散度对气溶胶间接效应影响的研究进展

解小宁, 刘晓东, 王昭生

(中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室,西安710061)

摘 要: 气溶胶作为云凝结核 (CCN)或者冰核 (IN), 通过改变云微物理属性可以间接地影 响地气系统的辐射平衡及区域乃至全球水循环。最新研究结果表明, 云滴谱离散度对气溶胶间 接效应 (包括第一及第二间接效应)有着重要的影响 (简称为云滴谱离散度效应)。然而, 在 目前绝大多数天气、气候数值模式中并没有考虑云滴谱离散度效应。因此, 本文主要从云滴谱 离散度对气溶胶第一间接效应和第二间接效应影响的两方面入手, 系统地回顾了国内外相关研 究工作,并讨论了云滴谱离散度效应的不确定性, 进一步指出减少该效应不确定性是未来需要 关注的研究方向。

关键词:云滴谱离散度效应;气溶胶第一间接效应;气溶胶第二间接效应 中图分类号: P426.5 文献标志码:A 文章编号: 1674-9901(2015)02-0127-08

Review of influence of cloud droplet spectral dispersion on aerosol indirect effects

XIE Xiao-ning, LIU Xiao-dong, WANG Zhao-sheng (State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: Atmospheric aerosols, serving as cloud condensation nuclei (CCN) or ice nuclei (IN), can indirectly impact the radiative balance of Earth-Atmosphere system, hydrological cycle and climate change at regional and global scales. Recent studies show that the spectral dispersion of cloud droplet size distribution has an important influence on the first aerosol indirect effect and the second aerosol indirect effect (dispersion effects). However, the dispersion effects related to aerosols have not been included in most numerical weather or climate models up to now. In this paper, we systematically review the dispersion effects on the first aerosol indirect effect and the second aerosol indirect effect, discuss the uncertainties induced by the spectral dispersion effect, and propose future research directions in this field.

Key words: dispersion effect; first aerosol indirect effect; second aerosol indirect effect

作为大气中重要微量成分的气溶胶,对区域 乃至全球气候都有着重要的影响,被称为气溶胶 的气候效应。近几十年来,随着全球经济的飞速 发展以及人类活动的明显加剧,气溶胶的气候效 应越来越受到大家的关注。气溶胶的气候效应通 常可以分为气溶胶的直接效应和间接效应。大气 气溶胶通过直接和间接的气候效应共同影响地气 系统的辐射平衡以及水循环。

气溶胶的直接效应(Aerosol direct effect)是 指气溶胶可以通过吸收和散射太阳辐射而直接影 响地气系统的辐射平衡(Charlson et al, 1992; Schwartz, 1996;张小曳, 2007)。气溶胶间接效 应(Aerosol indirect effect)是指大气溶胶可作为 云凝结核(CCN)或者冰核(IN),增加云滴数浓

收稿日期: 2014-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41105071, 41405093); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05110101); 国家重 点基础研究发展规划项目(2011CB403406)

度,进而改变云的光学性质和云的生命期,间接 对气候系统产生辐射强迫作用。气溶胶间接效应 包括气溶胶第一间接效应和第二间接效应。气溶 胶第一间接效应是指在液态水含量一定的情况下, 气溶胶可以增加云滴数浓度,减少云滴有效半径, 从而导致云反照率的增加,也可称为云反照率效 应(Twomey, 1974)。气溶胶第二间接效应是指 气溶胶的增加使得云滴体积半径减小,降低云滴 碰撞合并形成雨滴的微物理过程效率,进而增加 了液态水含量及云的生命史,因此也被称为云生 命史效应(Albrecht, 1989)。

目前关于气溶胶直接效应的研究远比气溶胶 间接效应研究成熟得多(IPCC, 2007).为此, 本文主要讨论气溶胶间接效应的相关问题。由于气 溶胶粒子与云的光学特性之间关系的复杂性, 使得 气溶胶间接辐射强迫的研究存在很大的困难,因此 气溶胶第一间接效应目前还存在比较大的不确定 性。IPCC 关于全球气候变化的第四次评估报告指 出,相对于温室气体、臭氧、以及气溶胶直接效 应, 气溶胶第一间接辐射强迫(云反照率效应)存 在最大的不确定性,其平均值为-0.7 W·m⁻²,存在 一个从-1.8 W·m⁻²到-0.3 W·m⁻²的不确定性区间 (IPCC, 2007)。也有一些研究者利用卫星观测 数据校正的全球气候模式(GCM)指出(Lohmann and Lesins, 2002; Quaas et al, 2006), IPCC (2007) 或许高估了气溶胶间接辐射强迫。进一步, Quaas et al (2008)利用卫星数据估计出的结果也验证了 该结论。

相对于气溶胶第一间接效应,由于气溶胶、 云和降水之间高度非线性的相互作用使得气溶胶 对地表降水的影响(气溶胶第二间接效应)则表 现得更为复杂(Hobbs, 1993)。不管是从观测 还是模拟的角度,气溶胶引起地表降水的增加或 者减少的现象都是存在的(Tao et al, 2012)。观 测研究显示,针对浅的或者暖云降水,气溶胶可 以减少地表累积降水(Radke, 1989; Rosenfeld, 1999,2000,2006; Ackerman et al, 2003)。在 中国的西北地区(Rosenfeld et al, 2007;戴进等, 2008)和华北地区(段婧和毛节泰,2008),气 象观测资料都显示气溶胶污染使得区域降水有明 显减少。另外,气溶胶也可以通过加强对流,加 速云水到雨水的转化,进而增加地表累积降水 (Shepherd and Burian, 2003; Koren, 2005)。数 值模式研究也证实了气溶胶可以抑制降水,也可以增加地表降水(Tao et al, 2012)。

此外,最新研究还发现,气溶胶对降水的影响并不是简单的线性变化,而是一种非线性的响应(Li et al, 2008)。地表累积降水随着 CCN 浓度的增加是非线性变化的,在 CCN 浓度较低时,随着 CCN 浓度的增加降水增加;而在 CCN 浓度较高时,地表累积降水随着 CCN 浓度的增加反而减少。地表累积降水对气溶胶浓度变化的这种非线性响应,也被其他研究所证实(Lim and Hong, 2010;Xie and Liu, 2015)。由此可见,有关气溶胶对降水的影响,目前的认识仍然是非常初步的,甚至气溶胶对降水的影响是正效应、负效应,还是非线性效应,都不得而知。

另一方面,云滴有效半径直接决定着云反照率 等与辐射有关的物理量,由于气溶胶间接辐射强 迫的不确定性,研究云滴有效半径的参数化也是 非常热门的话题。另外,云水自动转化过程是云 微物理过程中最重要的过程之一,是连接气溶胶、 云和降水的重要桥梁。云水自动转化过程一般是 指云滴碰撞合并成小雨滴的过程,它决定着暖云 性降水的开始,影响降水总量以及全球水循环。 合适的云水自动转化过程的参数化表述有助于提 高我们对云的宏观、微观性质以及云和气溶胶气 候效应的科学认识(Boucher et al, 1995; Rotstayn and Liu, 2005; Xie and Liu, 2015)。

为了减少气溶胶间接效应(包括气溶胶第一 和第二间接效应)的不确定性,改进气候模式中 云反馈过程的云滴有效半径和云水自动转化率参 数化方案是非常关键的。而最新的研究结果表明, 云滴谱离散度(衡量云滴的尺度分布离散程度的 参数)是云滴有效半径和云水自动转化过程参数 化中不可忽视的重要参数,因此云滴谱离散度对 气溶胶第一间接效应和第二间接效应都有着重要 的影响(简称为云滴谱离散度效应)。然而,在 目前绝大多数天气、气候数值模式中并没有考虑 云滴谱离散度效应。因此,本文主要是从云滴谱 离散度对气溶胶第一间接效应和第二间接效应影 响的两个方面入手,对国内外相关研究工作做了 详细和全面的回顾。同时讨论了云滴谱离散度效 应的不确定性,以及未来为减少该效应不确定性 值得研究的方向,以期望能得到更多研究工作者 对该问题的关注。

1 云滴谱离散度

云滴尺度谱分布函数通常可以采用 gamma 分 布函数来描述,

$$n(r) = \frac{N_c \lambda^{\mu+1}}{\Gamma(\mu+1)} r^{\mu} \exp(-\lambda r)$$
(1)

在这里, r 表示云滴的半径, n(r) 是具有半径 为 r 的云滴数浓度, N_c 是总的云滴数浓度, 云滴 谱型参数 μ 是云滴谱离散度 ε 的函数。

云滴谱离散度 *ε* 是指云滴尺度谱的相对离散

度,它可以用来衡量云滴的尺度分布的离散程度。 云滴谱离散度 ε 被定义为云滴尺度分布的标准偏差 σ 和平均半径 $\overline{r_c}$ 的比值。从方程(1)云滴尺度谱 的 gamma 分布函数,我们可以得到云滴谱离散度 ε ,

$$\mathcal{E} = \frac{\sigma}{\overline{r_c}} = \sqrt{\frac{\int (r - \overline{r_c})^2 n(r) \mathrm{d}r}{N_c} \frac{1}{\overline{r_c}}} = \left(\frac{1}{\mu + 1}\right)^{1/2}}$$
(2)

当云滴谱离散度为零时,表示所有云滴都在 同一个尺度上;而当云滴谱离散度比较大时,表 示大云滴和小云滴有着比较高的混合度。

	表 1 不同 $\varepsilon - N_c$ 关系式,对应的数学表达式和关系式类型
Table 1	Different relationships between spectral dispersion and cloud droplet number concentration,
	their corresponding mathematical expressions, and the types of relationships

$\varepsilon - N_c$ 关系式	数学表达式	关系式类型
Martin 关系式	$\varepsilon = 0.0005714 N_c + 0.271$	递增函数
Rotstayn-Liu 关系式	$\varepsilon = 1 - 0.7 \exp(-0.003 N_c)$	递增函数
Grabowski 关系式	$\varepsilon = 0.146 - 5.964 \times 10^{-2} \ln(-0.003 N_c/2000)$	递减函数
Daum 关系式	$\varepsilon = 0.82 - 0.00134 N_c$	递减函数
Ma 关系式	$\varepsilon = 0.694 - 0.0004231 N_c$	递减函数
Xie 关系式	$\varepsilon = 0.579 - 7.42 N_c \times 10^{-4} N_c + 4.2 \times 10^{-4} N_c^2$	递减函数

注: Martin 关系式是基于暖的层积云,海洋型层积云 ε=0.33,而大陆型层积云 ε=0.43; Rotstayn-Liu 关系式数据来源于多 个不同地区清洁和污染背景下的海洋型层状云及浅积云的飞机观测;Grabowski 关系式是通过两个关系式拟合而来,对于 海洋型积云 N_e=50 cm⁻³, ε=0.366,大陆型积云 N_e=2000 cm⁻³, ε=0.146; Daum 关系式在 2005 年 7 月针对东太平洋低纬度 海洋型层状云和层积云的飞机观测数据拟合而来;Ma 关系式是基于华北地区的非降水层状云的飞机观测数据而来;Xie 关系式来源于延安地区 2003 年 9 月 17 号一次降水层状云过程的飞机观测资料的拟合结果。

很多的观测结果表明云滴谱离散度 ε 并不是一 个自由的参数,该参数与云滴数浓度 N_c有着直接 的关系 (Martin et al, 1994; Grabowski, 1998; Rotstayn and Liu, 2003; Daum et al, 2007; Ma et al, 2010; Xie and Liu, 2013)。然而, 目前 观测给出的 ε -N, 关系式存在很大的不确定性。 表1总结给出目前观测得到的几种不同 ε-N_e关 系式。从表1可以看出, Martin 关系式 (Martin et al, 1994) 和 Rotstayn-Liu 关 系 式 (Rotstayn and Liu, 2003) 显示 ε -N。具有正关系式, 即随 着云滴数浓度 N 的增加,云滴谱离散度 ε 增加; Grabowski (Grabowski, 1998), Daum (Daum et al, 2007), Ma (Ma et al, 2010) 和 Xie (Xie and Liu, 2013) 关系式表明 ε -N_e具有反关系式, 随着 N_{c} 的增加, ε 是减少的。这是因为, 云滴谱离散 度的变化是非常复杂的, 它可能依赖于众多的因 子,例如气溶胶的物理性质,化学组成,动力过 程以及其他的环境因子 (Khain et al, 2000; Yum and Hudson, 2005; Lu and Seinfeld, 2006; Peng et al, 2007)。最近的理论分析表明, $\varepsilon - N_c$ 关系式 依赖于云的向上速度 w, $\varepsilon = w$ 成反比,因此可以 导致 $\varepsilon - N_c$ 反关系式的出现(Liu et al, 2006)。

另外,有研究表明,云滴谱离散度与云滴数浓 度存在更为复杂的关系。Zhao et al (2006)通过分 析大量的亚洲地区不同区域云滴尺度谱的飞机观测 资料,指出云滴谱离散度很难能用云滴数浓度的简 单数学表达式来表述。当在云滴数浓度比较低的时 候(大约 50 cm⁻³),云滴谱离散度存在较大的变化 范围(0.2~0.8),而在云滴数浓度较多时,云滴谱 离散度汇聚成一个很小的范围(0.4~0.5)。还有一 些观测结果表明,相对于云滴数浓度 N_c ,利用单一 的云水含量 γ (定义为流体水含量 L_c 与云滴数浓度 的比值 N_c ,即 $\gamma=L_cN_c$)可以更好地对云滴谱离散 度进行参数化(Wood, 2000; Liu et al, 2008)。

2 云滴谱离散度对气溶胶第一间接效应的 影响

云滴谱离散度通过改变云滴有效半径,进而

影响气溶胶的间接辐射强迫。根据云滴谱离散度与 云滴数浓度的正关系, 解析和模拟的研究都表明云 滴谱离散度效应对于气溶胶的间接辐射强迫有一个 附加效应,会减少气溶胶的间接辐射强迫(Liu and Daum, 2002; Peng and Lohmann, 2003; Rotstayn and Liu, 2003; Chen and Penner, 2005) . Liu and Daum (2002) 通过解析的方法估计考虑云滴谱离 散度效应, 使得气溶胶的间接辐射强迫可以被有效 地减少10%~80%。利用全球气候模式(GCM), 数值试验结果显示云滴谱离散度效应使得气溶胶 第一间接辐射强迫减少15% (Peng and Lohmann, 2003), 12%~35% (Rotstayn and Liu, 2003), 18% (Chen and Penner, 2005)。下面我们给出云 滴谱离散度影响气溶胶间接辐射强迫的理论基础, 以及利用目前发现不同 ϵ -N_e关系式(表1),给 出相应的气溶胶间接辐射强迫的不确定性范围。

云滴的有效半径 R_e 被定义为下述表达式,

$$R_{e} = \frac{\int r^{3} n(r) dr}{\int r^{2} n(r) dr}$$
(3)

式中, *n*(*r*) 是具有半径为 *r* 的云滴数浓度, 采用的是方程(1) 描述的 gamma 分布函数。因 此在整个云滴尺度范围内积分可以得到(Liu and Daum, 2002; Xie and Liu, 2013),

$$R_{e} = \frac{(1+2\varepsilon^{2})^{2/3}}{(1+\varepsilon^{2})}, R_{v} = \frac{(1+2\varepsilon^{2})^{2/3}}{(1+\varepsilon^{2})^{1/3}} \left[\left(\frac{3}{4\pi\rho_{w}}\right)^{1/3} \left(\frac{L_{c}}{N_{c}}\right)^{1/3} \right]$$
(4)
R_是云滴体积半径, $R = \left(\frac{3}{2}\right)^{1/3} \left(\frac{L_{c}}{N_{c}}\right)^{1/3}$

ステレントロ, $A_{\pi}\rho_{w}$ N_{c} N_{c

云光学厚度(Peng and Lohmann, 2003), 云反照率 α (Lacis and Hansen, 1974; Meador and Weaver, 1980; Bohren, 1987),以及云反照率 扰动引起的全球平均短波辐射强迫 d*F*_e(Charlson et al, 1992) 被定义为,

$$\tau = \frac{3H_c}{2\rho_w} \frac{L_c}{R_c} \tag{5}$$

$$a = \frac{b(1-g)\tau}{a+b(1-g)\tau} \tag{6}$$

$$\mathrm{d}F_{\mathrm{s}} = -0.2F_{\mathrm{T}}A_{\mathrm{s}}\mathrm{d}\alpha \tag{7}$$

 H_c 表示云厚; *a*和*b*都是常数, *a*=2, *b*= $\sqrt{3}$ (Lacis and Hansen, 1974), *a*=1, *b*=1 (Meador and Weaver, 1980), *a*=2, *b*=1 (Bohren, 1987); F_T 是太阳常数, *A*_c是云量参数。

从方程(4)、(5)、(6)、(7),我们 可以得到云滴数浓度扰动引起的全球平均短波辐 射强迫 ΔF_{ϵ} (Xie and Liu, 2013),

$$\Delta F_{e} = -0.2F_{T}A_{c}\frac{\alpha(1-\alpha)}{3N_{c}}\left[1-\frac{2\varepsilon N_{c}\left(3+2\varepsilon^{2}\right)}{(1+\varepsilon^{2})(1+2\varepsilon^{2})}\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}N_{c}}\right]\Delta N_{c}\left(8\right)$$

利用上式(8), 文献(Xie and Liu, 2013) 给出了气溶胶的间接辐射强迫 ΔF_{ε} , 以及不考虑云 滴谱离散度(ε =0)时的辐射强迫 ΔF_0 (图2)。 图2显示不考虑云滴谱离散度的气溶胶间接辐射 强迫是 -1.03 W·m⁻², 对于不同 ε -N_c关系式给出 的气溶胶间接辐射强迫 ΔF_{ε} 存在 -0.73 W·m⁻²到 -1.29 W·m⁻²的变化范围。相对于 ΔF_0 , 不同 ε -N_c 关系式对应 ΔF_{ε} 变化率从 -29.1% 到 25.2%。







从上边的结论,我们可以看到云滴谱离散度 对气溶胶的间接辐射强迫有着重要的影响。因此, 精确描述云滴谱离散度与云滴数浓度的关系,将 可以有效的减少气溶胶第一间接效应的不确定度, 提高区域及全球气候模式的可信度。

3 云滴谱离散度对气溶胶第二间接效应的 影响

云滴谱离散度通过改变云水自动转化过程,进 而影响气溶胶 — 云 — 降水的相互作用。云水自动 转化过程是指云微物理过程中云滴碰撞合并成小雨 滴的过程,是连接气溶胶、云和降水的重要桥梁; 它决定着暖云性降水的开始,影响降水的时空分布 和降水总量,以及全球的水循环。精确的云水自动 转化过程参数化有助于提高我们对云的宏观、微观 性质以及气溶胶气候效应的科学认识 (Boucher et al, 1995; Rotstayn and Liu, 2005; Xie and Liu, 2015)。近些年来新发展的云水自动转化过程参数 化方案 Seifert-Beheng 方案 (Seifert and Beheng, 2001)和 Khairoutdinov-Kogan 方案(Khairoutdinov and Kogan, 2000)可以较好地模拟云微物理变量 的时空分布,以及地表的降水分布,因此被广泛应 用于现代天气气候模式(e.g.,新一代中尺度天气 预报模式 WRFV3, 以及美国 NCAR 最新公布的全 球公用大气模式 CAM5)。然而,这些参数化方案 并没有考虑云滴谱离散度效应,这将可能在高估气 溶胶间接辐射强迫(Rotstavn and Liu, 2005)。

最新的研究结果表明,与人类排放的气溶胶 有着密切关系的云滴谱离散度能改变云水的自动转 化过程,进而可能影响气溶胶 — 云 — 降水的相 互作用 (Liu and Daum, 2004; Liu et al, 2007; Xie and Liu, 2009)。Liu and Daum (2004) 从第 一性原理出发,利用积分平均值理论,解析得到 gamma分布函数的云水含量的自动转化率表达式, 该表达式可以考虑云滴谱离散度效应。进一步, Liu et al (2007) 把上述方法进行推广,并得到了 云滴数浓度以及云水含量的双参数云水自动转化过 程的参数化方案。最近, Xie and Liu (2009) 解析 得到考虑云滴谱离散度的三参数云水自动转化率的 理论表达式(包括云水的质量浓度、数浓度以及雷 达反射率的自动转化率)。该表达式是针对一般化 的 gamma 分布函数,因此从该数学表达式,可以 直接得到 gamma 分布函数和 weibull 分布函数的多 参数云水自动转化率。这类参数化方案可以用来研

究气溶胶的间接效应,更为重要的是可以考虑云滴 谱离散度效应。另外,这类考虑云滴谱离散度的云 水自动转化过程参数化方案也被成功地应用于数值 模式中(Xie and Liu, 2011; Xie et al, 2013)。

云滴总动量 Y 对应的云水自动转化率 P_y ,率函数 P_0 以及阈值函数 T,可以表示为 (Liu et al, 2007; Xie and Liu, 2009),

 $P_{Y}=P_{Y0}T_{Y},$

$$P_{y_0} = \alpha \int n(R) dR \int K(R, r) r^p n(r) dr$$

$$T_{Y} = \frac{P_{Y}}{P_{Y0}} = \left[\frac{\int_{r_{c}}^{\infty} r^{6} n(r) dr}{\int_{0}^{\infty} r^{6} n(r) dr}\right] \left[\frac{\int_{r_{c}}^{\infty} r^{p} n(r) dr}{\int_{0}^{\infty} r^{p} n(r) dr}\right]$$
(9)

α 是代表云滴总动量 Y 的参数, p 是总动量 阶数。当 α=1, p=0 时, 云滴总动量 Y 对应总云 滴数浓度 N_c ; 当 $\alpha = \frac{4}{3}\pi\rho_w$, p=3 时, 总动量 Y 表 示云水含量 L_c ; 而当 α=64, p=6, 总动量 Y 对应 云雷达反射率 Z_c 。 R 是收集云滴的半径, r 是被 收集云滴的半径, K(R, r) 是碰撞核函数, 积分区 域是所有云滴的尺度范围。Long 在 1974 年给出 当 $R < 50 \ \mu m$, 碰撞核函数 K(R, r) 可以被近似地表 述为 $K(R, r) = k_2 R^6$, 系数 $k \approx 1.9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

应用云滴尺度谱分布函数采用 gamma 分布函数(1),可以得到考虑云滴谱离散度的双参数云水自动转化过程参数化表达式,

$$P_{N} = \left(\frac{3}{4\pi\rho_{w}}\right)^{2} k_{2} \frac{\Gamma(\varepsilon^{-2}, x_{cq})(\varepsilon^{-2}+6, x_{cq})}{\Gamma^{2}(\varepsilon^{-2}+3)} L_{c}^{2}$$

$$P_{L} = \left(\frac{3}{4\pi\rho_{w}}\right)^{2} k_{2} \frac{\Gamma(\varepsilon^{-2})\Gamma(\varepsilon^{-2}+3, x_{cq})\Gamma(\varepsilon^{-2}+6, x_{cq})}{\Gamma^{3}(\varepsilon^{-2}+3)} N_{c}^{-1} L_{c}^{3}$$
(10)

 P_N 、 P_L 分别代表云滴数浓度的自动转化 率(cm⁻³·s⁻¹) 和云滴质量浓度的自动转化率 (g·cm⁻³·s⁻¹)。在这里,gamma 函数可以表述为 $\Gamma(n)=\int_0^{\infty} x^{n-1}\exp(-x)dx$,不完全gamma 函数定义为 $\Gamma(n,a)=\int_0^{\infty} x^{n-1}\exp(-x)dx$ 。 $x_{eq}=[\frac{(1+2\varepsilon^2)(1+\varepsilon^2)}{\varepsilon^4}]^{1/3}x_e^{1/3}$, $x_c \gtrsim r_c$ 的对应的临界质量和平均质量的比值(Liu et al, 2007)。 N_c 的单位是cm⁻³, L_c 的单位g·cm⁻³。

简单地考虑云滴谱离散度的单参数云水自动转化过程参数化方案,云滴质量浓度的自动转化率 P_L 可以表示为(Liu and Daum, 2004),

$$P_{L} = P_{L0} T_{L}$$

$$P_{L0} = 1.1 \times 10^{10} \left[\frac{(1+3\varepsilon^{2})(1+4\varepsilon^{2})(1+5\varepsilon^{2})}{(1+\varepsilon^{2})(1+2\varepsilon^{2})} N_{c}^{-1} L_{c}^{3} \right] \qquad (11)$$

$$T_{L} = \frac{1}{2} (x_{c}^{2} + 2x_{c} + 2)(1+x_{c}) e^{-2x_{c}}$$

图 3 指出云滴质量浓度的自动转化率与云滴 谱离散度有着很强的依赖关系,云水自动转化率 会随着云滴谱离散度的增加而增加。比较大的云 滴谱离散度表示,半径大的云滴和小的云滴有很 好的混合度,进而使得云滴碰撞合并的效率比较 高。因此,云滴谱离散度则通过改变云水自动转 化率,进而改变地表降水,影响气溶胶—云— 降水的相互作用。

简单地考虑云滴谱离散度的单参数云水自动转 化过程参数化方案(11)已经被应用于中尺度模式 WRF 中,进行天气气候方面的研究工作(Xie and Liu, 2011; Xie et al, 2013) . Xie and Liu (2011) 通过云滴谱离散度的敏感性试验,结果表明云滴谱 离散度对地表累积降水有着明显的改变,且在不同 的气溶胶背景下,降水对云滴谱离散度的响应是不 同的。另外, 通过在数值模式中耦合不同类型云滴 谱离散度 ε 与云滴数浓度 N_c 关系式 (ε-N_c 正关系 式; *ε-N* 反关系式),研究了中尺度对流系统中气 溶胶对降水的影响(Xie et al, 2013)。数值试验的 结果表明, 气溶胶对地表累计降水影响强烈依赖于 $\varepsilon - N_c$ 关系式。当 $\varepsilon - N_c$ 为正关系式时,降水量随着 气溶胶的增加而增加; 而对于 ε-N_c 为反关系式时, 累计降水量随着气溶胶的增加而减少。该结果建议, ε-N_c的精确表达式或许可以进一步加深对气溶胶— 云 — 降水相互作用过程的理解。



图 3 云水自动转化率与云滴谱离散度的关系 N_c =50 cm⁻³, L_c =1 g·m⁻³

Fig.3 Relationships between autoconversion rate and cloud droplet spectral dispersion, with N_c =50 cm⁻³, L_c =1 g·m⁻³

4 结语与展望

气溶胶作为云凝结核(CCN)或者冰核(IN), 可以间接地影响地气系统的辐射平衡(气溶胶第 一间接效应),以及区域和全球水循环(气溶胶 第二间接效应)。由于缺乏对外部强迫引起云反 馈的全面认识,因而气溶胶—云—辐射—降水 相互作用仍然是气候模拟和气候预测中最大的不 确定性之一(Tao et al, 2012)。本文主要是从云 滴谱离散度对气溶胶第一间接效应和第二间接效 应影响的两个方面入手,指出云滴谱离散度在气 溶胶—云—辐射—降水相互作用过程中的重要 性,并讨论了云滴谱离散度效应的不确定性。

从已有的研究结果来看,云滴谱离散度通过 影响云滴有效半径和云水自动转化过程,进而在 气溶胶 — 云 — 辐射 — 降水相互作用过程中起着 非常重要的作用。相对于不考虑云滴谱离散度的 气溶胶间接辐射强迫,不同 ε-N。关系式给出气溶 胶间接辐射强迫变化率从-29.1%到25.2%的范围; 而不同类型 ε-N。关系式甚至会引起气溶胶增加或 者减少地表降水。因此,精确描述云滴谱离散度 与云微物理量(例如,云滴数浓度)的关系,对 于我们加深理解气溶胶 — 云 — 辐射 — 降水的相 互作用有很大的帮助。

今后可以从以下的两个方面进一步加强理解 云滴谱离散度变化规律的研究,以减少气溶胶间 接效应的不确定性:(1)根据不同气溶胶背景(清 洁背景,污染背景)、不同地区(海洋地区,大 陆地区)、不同云类型(层云,积云)、以及不 同的气象环境(不同相对湿度,不同大气稳定度) 等的飞机观测资料,进行分析和讨论,期望能得 到更为信服的云滴谱离散度变化规律,以提供更 好的云滴谱离散度的参数化描述。(2)利用分档 云微物理参数化方案研究云滴谱离散度的变化规 律。和体积水方案相比,分档参数化方案有它自 身的独特的性质,该方案可以完全预报云滴尺度 谱分布,不需要对云滴谱离散度进行参数化。因 此利用分档参数化方案可以对云滴谱离散度进行 预报,进而可以研究云滴谱离散度的变化规律。

另外,在模式中耦合考虑云滴谱离散度的云 滴有效半径参数化(4)和双参数云水自动转化过 程参数化(10),形成完全自洽的云微物理参数 化方案。将会帮助我们更加全面地认识气溶胶— 云—辐射—降水的相互作用。

参考文献

戴 进,余 兴, Rosenfeld Daniel,等. 2008. 秦岭地区 气溶胶对地形云降水的抑制作用 [J]. *大气科学*, 32: 1319-1332. [Dai J, Yu X, Rosenfeld D, et al. 2008. The suppression of aerosols to the orographic precipitation in the Qin ling Mountains [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 32 (6) : 1319–1332.]

- 段 婧, 毛节泰. 2008. 华北地区气溶胶对区域降水的影 响 [J]. *科学通报*, 53(23): 2947–2955. [Duan J, Mao J T. 2009. Influence of aerosol on regional precipitation in North China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(3): 474–483.]
- 张小曳. 2007. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究 [J]. 地 球科学进展, 22(1): 12–16. [Zhang X Y. 2007. Aerosol over China and their climate effect [J]. Advances in Earth Science, 22(1): 12–16.]
- Ackerman A S, Toon O B, Stevens D E, et al. 2003. Enhancement of cloud and suppression of nocturnal drizzle in stratocumulus polluted haze [J]. *Geophysical Research Letters*, 30(7): 1381, doi:10.1029/2002GL016634.
- Albrecht B A. 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. *Science*, 245: 1227–1230.
- Bohren C F. 1987. Multiple-scattering of light and some of its observable consequences [J]. American Journal of Physics, 55: 524–533.
- Boucher O, Le Treut H, Baker M B. 1995. Precipitation and radiation modeling in a general circulation model: Introduction of cloud microphysical processes [J]. *Journal* of Geophysical Research, 100: 16395–16414.
- Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. 1992. Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. *Science*, 255: 423–430.
- Chen Y, Penner J E. 2005. Uncertainty analysis for estimates of the first indirect effect [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5: 2935–2948.
- Daum P H, Liu Y, McGraw R, et al. 2007. Microphysical properties of stratus/stratocumulus clouds during the 2005 marine stratus/stratocumulus experiment (MASE) [R]. Rep. BNL-77935-2007-JA, Brookhaven Natl. Lab., Upton, N. Y.
- Grabowski W W. 1998. Toward cloud resolving modeling of large-scale tropical circulations: A simple cloud microphysics parameterization [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 55: 3283-3298.
- Hobbs P V. 1993. Aerosol-Cloud Interaction [M]. Academic, San Diego, Calif.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press.

Khain A, Ovtchinnikov M, Pinsky M, et al. 2000. Notes

on the state-of-the-art numerical modeling of cloud microphysics [J]. *Atmospheric Research*, 55: 159–224.

- Khairoutdinov M, Kogan Y. 2000. A new cloud physics parameterization in a large-eddy simulation model of marine stratocumulus [J]. *Monthly Weather Review*, 128: 229–243.
- Koren I. 2005. Aerosol invigoration and restructuring of Atlantic convective clouds [J]. *Geophysical Research Letters*, 32: L14828, doi:10.1029/2005GL023187.
- Lacis A A, Hansen J E. 1974. A parameterization for the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 31:118–133.
- Li G, Wang Y, Zhang R. 2008. Implementation of a twomoment bulk microphysics scheme to the WRF model to investigate aerosol-cloud interaction [J]. *Journal of Geophysical Research*, 113:D15211.
- Lim K S S, Hong S Y. 2010. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models [J]. *Monthly Weather Review*, 138: 1587–1612.
- Liu Y, Daum P H, Guo H, et al. 2008. Dispersion bias, dispersion effect and aerosol-cloud conundrum [J]. *Environmental Research Letters*, 3: 045021.
- Liu Y, Daum P H, McGraw R, et al. 2007. Theoretical expression for the autoconversion rate of the cloud droplet number concentration [J]. *Geophysical Research Letters*, 34: L16821.
- Liu Y, Daum P H, Yum S S. 2006. Analytical expression for the relative dispersion of the cloud droplet size distribution [J]. *Geophysical Research Letters*, 33: L02810
- Liu Y, Daum P H. 2002. Indirect warming effect from dispersion forcing [J]. *Nature*, 419: 580-581.
- Liu Y, Daum P H. 2004. Parameterization of the autoconversion process. Part I: Analytical formulation of the Kessler-type parameterizations [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 61: 1539–1548.
- Lohmann U, Lesins G. 2002. Stronger constraints on the anthropogenic indirect aerosol effect [J]. *Science*, 298: 1012-1015.
- Lu M L, Seinfeld J H. 2006. Effect of aerosol number concentration on cloud droplet dispersion: A large-eddy simulation study and implications for aerosol indirect forcing [J]. *Journal of Geophysical Research*, 111: D02207.
- Ma J, Chen Y, Wang W, et al. 2010. Strong air pollution causes widespread haze-clouds over China [J]. *Journal of*

Geophysical Research, 115: D18204.

- Martin G M, Johnson D W, Spice A. 1994. The measurement and parameterization of effective radius of droplets in warm stratocumulus clouds [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 51: 1823–1842.
- Meador W E, Weaver W R. 1980. Two-stream approximations to radiative transfer in planetary atmospheres: A unified description of existing methods and new improvements [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 37: 630–643.
- Peng Y, Lohmann U, Leaitch R, et al. 2007. An investigation into the aerosol dispersion effect through the activation process in marine stratus clouds [J]. *Journal of Geophysical Research*,112: D11117.
- Peng Y, Lohmann U. 2003. Sensitivity study of the spectral dispersion of the cloud droplet size distribution on the indirect aerosol effect [J]. *Geophysical Research Letters*, 30(10): 1507.
- Quaas J, Boucher O, Bellouin N, et al. 2008. Satellite-based estimate of the direct and indirect aerosol climate forcing [J]. *Journal of Geophysical Research*, 113: D05204.
- Quaas J, Boucher O, Lohmann, U. 2006. Constraining the total aerosol indirect effect in the LMDZ and ECHAM4 GCMs using MODIS satellite data [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6: 947–955.
- Radke L F. 1989. Direct and remote-sensing observations of the effects of ships on clouds [J]. *Science*, 246: 1146–1149.
- Rosenfeld D. 1999. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall [J]. *Geophysical Research Letters*, 26: 3105–3108.
- Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. *Science*, 287: 1793–1796.
- Rosenfeld D. 2006. Aerosols, clouds, and climate [J]. *Science*, 312: 1323–1324.
- Rosenfeld D, Dai J, Yu X, et al. 2007. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation [J]. *Science*, 315: 1396–1398.
- Rotstayn L D, Liu Y. 2003. Sensitivity of the first indirect aerosol effect to an increase of cloud droplet spectral dispersion with droplet number concentration [J]. *Journal of Climate*, 16: 3476–3481.
- Rotstayn L D, Liu Y. 2005. A smaller global estimate of the second indirect aerosol effect [J]. *Geophysical Research Letters*, 32: L05708.
- Schwartz S E. 1996. The white house effect shortwave

radiative forcing of climate by anthropogenic aerosols: An overview [J]. *Journal of Aerosol Science*, 27: 359-382.

- Seifert A, Beheng K D. 2001. A double-moment parameterization for simulating autoconversion, accretion and selfcollection [J]. *Atmospheric Research*, 59–60: 265–281.
- Shepherd J M, Burian S J. 2003. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city [J]. *Earth Interactions*, 7: 1–14.
- Tao W K, Chen J P, Li Z, et al. 2012. Impact of aerosols on convective clouds and precipitation [J]. *Reviews of Geophysics*, 50: RG2001.
- Twomey S. 1974. Pollution and the planetary albedo [J]. *Atmospheric Environment*, 8: 1251–1256.
- Wood R. 2000. Parametrization of the effect of drizzle upon the droplet effective radius in stratocumulus clouds [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126: 3309–3324.
- Xie X N, Liu X D. 2009. Analytical three-moment autoconversion parameterization based on generalized gamma distribution [J]. *Journal of Geophysical Research*, 114: D17201.
- Xie X N, Liu X D. 2011. Effects of spectral dispersion on clouds and precipitation in mesoscale convective systems [J]. *Journal of Geophysical Research*, 116: D06202.
- Xie X N, Liu X D. 2013. Analytical studies of the cloud droplet spectral dispersion influence on the first indirect aerosol effect [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 30(5):1313-1319.
- Xie X N, Liu X D. 2015. Aerosol-cloud-precipitation Interactions in WRF Model: Sensitivity to Autoconversion Parameterization [J]. Journal of Meteorological Research, 29(1): 72–81.
- Xie X N, Liu X D, Peng Y, et al. 2013. Numerical simulation of clouds and precipitation depending on different relationships between aerosol and cloud droplet spectral dispersion [J]. *Tellus B*, 65: 19054.
- Yum S S, Hudson J G. 2005. Adiabatic predictions and observations of cloud droplet spectral broadness [J]. *Atmospheric Research*, 73: 203-223.
- Zhao C, Tie X, Brasseur G, et al. 2006. Aircraft measurements of cloud droplet spectral dispersion and implications for indirect aerosol radiative forcing [J]. *Geophysical Research Letters*, 33: L16809.