

# 降水定量分析规范体系及应用研究

李小凡<sup>1</sup> 高守亭<sup>2</sup> 翟国庆<sup>1</sup>

(1 浙江大学地球科学学院, 杭州 310027; 2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 简明介绍降水定量分析规范体系及其成功应用于研究降水系统结构、发展新的对流层状降水分解方案、合理定义最大降水和降水效率、解释热带降水日变化和降水对辐射及冰云响应的物理机制和分析降水模拟时空上限。结果表明, 以地面降水方程为核心的降水定量分析规范体系, 为定量降水分析研究提供了动力、热力和云微物理过程统一的物理框架。

**关键词:** 定量降水分析, 规范体系

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.008

## A Framework for Quantitative Precipitation Analysis and Applications

Li Xiaofan<sup>1</sup>, Gao Shouting<sup>2</sup>, Zhai Guoqing<sup>1</sup>

(1 School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027 2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract:** A system for quantitative precipitation analysis and applications are briefly introduced. A successful application includes the structure analysis of a precipitation system, the development of a new convective-stratiform precipitation separation, the physical definitions of maximum precipitation and precipitation efficiency, the physical mechanisms of diurnal cycle of tropical rainfall and rainfall responses to radiation and ice clouds, and temporal and spatial constraints for accurate precipitation modeling. The system provides an unified physical framework for studying dynamic, thermodynamic and cloud microphysical processes associated with precipitation.

**Keywords:** quantitative precipitation analysis, framework

### 0 引言

降水可以带来丰沛的水, 是我国最重要的水资源获得方式; 同时, 降水可能引起洪涝, 对国民经济和人民生活造成重大损失。据统计, 我国每年因洪涝可损失数千亿元人民币。暴雨的数值模拟成为政府应对暴雨洪涝灾害决策的重要科学依据, 因此, 暴雨预报成为大气科学研究的重要课题。

自1999年以来, 数个“973项目”都是围绕暴雨的机理研究和预报改进, 说明国家对于强降水科学研究极其重视。降水是气象学中最早定量测量的几个要素之一, 它和大气动力、热力和云微物理过程有复杂的非线性关系。从科学的层面上看, 降水具有以下几个特点: (1) 降水时空不连续; (2) 降水是通过

云和大尺度过程联系在一起, 云微物理过程在模式中是用参数化表述的, 而参数化具有很大的不确定性;

(3) 降水率在模式物理关系中仅是一个诊断量, 大尺度环境和云过程不是降水的充分条件。降水这些特点给研究分析造成很大的困难, 其定量分析需要动力、热力和云微物理有关的基本框架, 才能建立降水定量分析的规范体系。2011年降水物理空间的概念被提出<sup>[1]</sup>, 该空间有三个基本分量: 温度、比湿和云混合比。与之伴随有热量、水汽和云收支。质量积分的热量、水汽和云收支可写成:

$$S_{HT}+S_{HF}+S_{HS}+S_{LHLF}+S_{RAD}=Q_{WVS} \quad (1a)$$

$$Q_{WVT}+Q_{WVF}+Q_{WVE}=Q_{WVS} \quad (1b)$$

$$P_S-Q_{CM}=Q_{WVS} \quad (1c)$$

在热量收支中, 热量局地变化 ( $S_{HT}$ ) 由热量辐合 ( $S_{HF}$ )、地面感热 ( $S_{HS}$ )、潜热 ( $S_{LHLF}+Q_{WVS}$ ) 和辐射 ( $S_{RAD}$ ) 决定。在水汽收支中, 水汽局地变化 ( $Q_{WVT}$ ) 由水汽辐合 ( $Q_{WVF}$ )、地面蒸发 ( $Q_{WVE}$ ) 和净凝结 ( $Q_{WVS}$ ) 决定。在云收支中, 云凝物混合比局地变化和辐合 ( $Q_{CM}$ ) 与净凝结 ( $Q_{WVS}$ ) 和降水

收稿日期: 2014年9月15日; 修回日期: 2015年4月1日  
第一作者: 李小凡 (1960—), Email: xiaofanli@zju.edu.cn  
资助信息: 国家自然科学基金项目 (41475039, 41075043, 41175047);  
国家重点基础研究发展计划 (2015CB953601, 2012CB417201, 2013CB430100)

率 ( $P_s$ ) 之差有关。这三组收支的链接点是净凝结 ( $Q_{wvs}$ )。Gao等<sup>[2-3]</sup>开展的一些研究在此基础上以水汽 (式1b) 和云 (式1c) 收支结合及以热量 (式1a) 和云 (式1c) 收支结合推导得到地面降水方程组:

$$P_s = Q_{wvt} + Q_{wvf} + Q_{wve} + Q_{cm} \quad (2a)$$

$$P_s = S_{ht} + S_{hf} + S_{hs} + S_{lhlf} + S_{rad} + Q_{cm} \quad (2b)$$

注意式2a中的 $Q_{wvt}$ 和式2b中的 $S_{ht}$ 分别为负的局地水汽和热量变化项。在与水汽过程有关的地面降水收支 (式2a) 中, 降水率 ( $P_s$ ) 与大气增湿 ( $Q_{wvt} < 0$ ) / 减湿 ( $Q_{wvt} > 0$ )、水汽辐合 ( $Q_{wvf} > 0$ ) / 辐散 ( $Q_{wvf} < 0$ )、地面蒸发 ( $Q_{wve}$ ) 和云凝物减少/辐合 ( $Q_{cm} > 0$ ) 或云凝物增加/辐散 ( $Q_{cm} < 0$ ) 有关。而在与热量过程有关的地面降水收支中, 降水率 ( $P_s$ ) 与大气增温 ( $S_{ht} < 0$ ) / 降温 ( $S_{ht} > 0$ )、热量辐合 ( $S_{hf} > 0$ ) / 辐散 ( $S_{hf} < 0$ )、地面感热 ( $S_{hs}$ )、与冰云有关潜热释放 ( $S_{lhlf}$ ) 和云凝物减少/辐合 ( $Q_{cm} > 0$ ) 或云凝物增加/辐散 ( $Q_{cm} < 0$ ) 有关。这样, 以地面降水方程为核心建立起定量降水分析规范体系。与降水形成、发展和消亡密切相关的动力、热力和云微物理过程可以在地面降水方程这个基本框架下进行系统性定量分析研究。自从此体系建立以来, 地面降水方程广泛应用于降水过程的定量研究中。本文研究结果都是用二维云分辨模式<sup>[1]</sup>模拟分析得到。云模式是非静力和滞弹性的, 模式具有位温、比湿、云凝物混合比及扰动动量方程。模式包括显式云微物理和辐射参数化方案。水平区域长768km, 水平网格距为1.5km, 垂直不等距33层, 时间步长为12s。由于水平区域小, 不能模拟大尺度环流场, 因此, 用实际观测到的资料计算得到的大尺度强迫来驱动云模式。本文结果大多是用1992年12月19日—1993年1月9日的云模拟, 大尺度强迫通过1.75°S、156°E的热带试验 (TOGA COARE) 观测得到。强迫包括垂直速度、水平风和海温等。

## 1 降水系统基本结构

对与水汽有关的地面降水方程分析<sup>[4]</sup>表明非降水区地面蒸发大部分用来支持水汽从非降水区到降水区的输送, 同时也使非降水区局地大气增湿。在降水区, 输送的水汽为降水所平衡。进一步用降水率大小划分对流层状降水方案分析发现, 在对流降水区中, 降水源主要来自非降水区的水汽输送。水汽辐合除支持降水外, 还造成对流降水区增湿和云凝物的辐散。在层状降水区中, 降水过程都是降水源, 其中局地水汽减湿和云凝物辐合是层状降水的主要来源。这样, 云凝物从对流降水区到层状降水区的输送是两个降水区的主要链接。在两个降水区, 地面蒸发基本可忽略。

与热量有关的地面降水方程分析<sup>[5]</sup>表明非降水区存在明显的红外辐射冷却, 辐射冷却主要由热量辐合所平衡。热量从降水区到非降水区的输送在降水区主要由与降水有关的潜热释放抵消。热量辐散主要发生在对流降水区。强热量辐散不足以潜热释放所平衡而在对流降水区产生局地降温。而在层状降水区, 潜热释放足以抵消热量辐散而产生局地增温。在降水区, 辐射作用基本可以忽略。

## 2 划分对流层状降水的新方案: 最大降水率的物理定义

对流降水和层状降水是降水系统中两个重要的降水量, 两者之间有很大的差别。首先, 对流降水所对应的垂直运动在整个对流层呈上升运动, 其最大上升运动出现在对流层低层。而层状降水所对应的垂直运动仅在对流层中上层呈上升运动, 对流层低层出现弱的下沉运动。其次, 对流降水比层状降水大, 而所占面积小。第三, 对流降水源主要是水汽辐合和雨滴收集云滴, 而层状降水源主要是云凝物从对流降水区到层状降水区的输送和霰的融化。

由于资料的限制, 一般用对流信号的强弱来划分对流层状降水。但是此类降水划分不能用来了解对流层状降水区的详细结构, 如在对流降水区, 云凝物辐散, 而此辐散造成对流降水的减弱。最大降水出现在对流降水区, 而云凝物辐散与最大降水相悖。因此, 需要更细致的降水划分方案才能了解进一步了解降水分区结构。Li等<sup>[6]</sup>用与水汽过程有关的地面降水方程来划分降水。由于大气增湿/减湿、水汽辐合/辐散和云凝物辐合/辐散, 降水可分为八型。进一步用垂直速度的垂直分布和云微物理过程把降水八型又合并为对流层状降水二型。和水汽辐合有关的降水三型合并为对流降水型, 其对应的垂直运动在整个对流层均为上升运动, 最大值在对流层低层。其主要降水源为雨滴收集云滴。层状降水以水汽辐散三型为主, 其对应的垂直运动在对流层低层为弱的下沉运动, 主要降水源为霰的融化。

进一步分析属于对流降水的三型, 了解对流降水区的详细结构。首先, 计算雨强, 得到最大降水型为大气减湿、水汽辐合和云凝物辐合, 其雨强比其他降水型的雨强大一个量级。此降水型的降水效率为100%。水汽辐合和云凝物辐合均占降水的40%, 说明云凝物辐合对最大降水有重要的影响。忽略云凝物辐合将严重低估最大降水雨强。分析表明在对流降水区, 云凝物辐散是主要的, 但有些区域, 云凝物是辐合的, 这样的区域, 正是最大降水发生的区域。其

次, 和最大降水有关的水汽辐合不是最大的。最大水汽辐合出现在大气增湿和云凝物辐散的降水型中。这表示最大水汽辐合主要用来增加局地大气的湿度和支持云凝物的辐散。仅有一部分水汽辐合用于降水, 故此型的雨强不大。从对流层状降水划分出对流降水区的分析得到的最大降水物理定义给最大降水强度和落区定量分析研究提供了一个规范性的物理框架。

### 3 热带降水日变化: 辐射、凝结和局地水汽变化

由于白天太阳辐射加热和夜间红外辐射降冷形成辐射的日变化。这样的辐射日变化直接造成温度的日变化。而决定凝结的饱和比湿仅和气温有关。气温降低, 饱和比湿也降低。饱和比湿低, 容易产生凝结和降水, 这就是热带海洋降水夜间达到最大的可能原因。由于辐射的日变化是可能的主因, 必须分析与热量有关的地面降水方程。Li等<sup>[1]</sup>用一个没有大尺度强迫的平衡态模拟试验进行分析, 分析与热量有关的地面降水方程发现红外辐射冷却的日变化和降水的日变化是反位相的, 说明热带降水凌晨最大值是红外辐射冷却造成的。由于在与热量有关的地面降水方程推导中, 云收支和热量收支的链接是净凝结和相关的潜热。因此, 夜间红外辐射冷却通过减小饱和比湿增加凝结而使夜间降水达到最大。同时, 红外辐射冷却的日变化和局地热量的日变化是同位相的, 说明红外辐射冷却一方面增加夜间降水, 另一方面减少局地大气热量, 造成局地气温下降。分析与水汽有关的地面降水方程看到降水日变化和局地水汽日变化同位相的。夜间地面降水最大值和局地大气减湿有关。局地大气减湿是凝结消耗水汽的结果。所以, 局地水汽变化这一项对降水来说是个源, 在地面降水收支中定义的降水效率必须包括在降水源中。用地面降水方程来研究热带降水日变化, 清楚地看到辐射、降水和局地热量水汽之间的位相关系, 同时得到降水日变化的控制方程。

### 4 降水效率: 定义、时空关系和与物理过程的关系

降水效率是对流降水系统中一个重要的物理参数, 已广泛应用于降水业务预报来估算雨强, 也是大尺度对流参数化方案中一个重要参数。我们在2002—2014年这12年中用云分辨模拟作为工具深入地研究了降水效率及其相关的物理问题<sup>[7-11]</sup>。降水效率研究从1952年定义为地面降水率对水汽辐合辐散与地面蒸发和之比开始。这样的定义会出现以下两类结果。降水效率超过100%, 其原因是这样的计算没有把降水源全部包括进去。比如, 局地大气减湿过

程, 一般被认为是局地水汽变化趋势而摒弃在降水源之外, 而降水日变化过程分析研究表明, 夜间红外辐射冷却减小饱和比湿, 容易产生凝结潜热, 这样的热力过程在水汽过程中表现为局地大气减湿。所以, 局地减湿是一个降水源, 降水效率可能小于零, 这样的情况在层状降水区经常发生。水汽辐散, 但有降水。把水汽辐散这样的降水汇作为降水源是造成降水效率负值的主要原因。避免这样不合理降水效率计算的出现, 需要做到以下两点: 降水效率的定义是降水率和所有降水源和之比, 且必须定义在包含地面降水率的收支中。

这样, 降水效率定义不是唯一的。在雨滴收支中定义雨微物理降水效率, 在云收支中定义云微物理降水效率, 在地面降水方程中定义水汽降水效率。理论上可以证明, 雨微物理降水效率大于云微物理降水效率, 而云微物理降水效率大于水汽降水效率。三种降水效率之间的不等关系在物理上也很好理解。如水汽降水效率可以等于云微物理降水效率和云收支降水源与地面降水收支降水源之比的乘积。而云收支降水源与地面降水收支降水源之比总小于1。所以, 云微物理降水效率大于水汽降水效率。

由于在降水效率计算中, 只包括降水源而剔除降水汇。这样使得降水效率的计算非常依赖于降水资料的时空尺度。一般来说, 平均前的资料计算的降水效率总比平均后的资料计算的降水效率要小。在我们最新发展的对流层状降水分解方案中得到的最大降水量物理定义中, 水汽降水效率为100%的降水率即为最大降水率。在这样的定义下, 云凝物和水汽辐合对最大降水有同等重要的贡献。这说明, 精确模拟云凝物辐合对估算最大降水非常重要。

降水效率一般来说都是指在云水过程中的定义。然而, 热量在降水过程中扮演重要角色。因此, 从热量收支和云收支结合为热量收支框架下的地面降水方程可以定义热量降水效率<sup>[12]</sup>。由于热量辐散率一般大于水汽辐合率, 热量收支中得到的降水源一般大于水汽收支中得到的降水源。这样, 热量降水效率小于水汽降水效率。

降水效率和一些基本物理量与物理过程可能存在一定的关系<sup>[13]</sup>。基本物理量包括对流有效位能、水汽辐合、垂直风切变、云液相路径与冰相路径之比、海温、气温和大气可降水量。结果发现降水效率和海温、气温及大气可降水量关系不大。降水效率随水汽辐合增加和垂直风切变减弱而增加。当对流有效位能释放而减少和冰云发展时, 降水效率会减小。

## 5 降水模拟的时空上限

降水数值模拟依赖于初始条件和物理参数化方案。初始条件来自于观测资料，而观测资料存在误差。如温度误差一般小于1K，可降水量误差可达1mm。数值模式所用的物理参数化方案具有更大的不确定性。问题是：1) 这些不确定性是否对降水模拟有影响？2) 什么物理过程会造成影响？3) 影响程度是否和大尺度环流变化有关？4) 降水模拟的时空上限是什么？2006—2014年，我们进行了一系列降水云模拟试验<sup>[14-18]</sup>，系统地研究了初始条件和辐射计算的不确定性对降水模拟准确性的影响，得到降水模拟的时空上限。在研究中，以基准和敏感性试验物理量均方差和标准差之比（差比）作为判定这些不确定性是否对降水模拟有影响的依据。差比大于1，表示不确定性造成的变量模拟误差比变量本身变化还要大，不确定性对模拟有大的影响。差比小于1，表示不确定性对模拟有较小的影响。首先分析了一个发生在热带赤道地区弱环流变化（弱环流）的例子，最大垂直速度仅 $0.02\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。初始温度和可降水量误差分别为 $0.5^\circ\text{C}$ 和1mm。降水模拟的时空上限分别为4h和350km，也就是说，大于4h和350km的平均降水率才能使差比小于1。而云凝物变化的差比总是大于1，说明在弱环流条件下，云凝物没有可预报性。从地面降水方程分析看到降水在大于4h和350km的可预报性由水汽辐合决定。即使对于较准确的水汽辐合模拟，如云模拟中给定的垂直速度廓线的水汽辐合模拟，由于云凝物的不可预报性，降水的可预报性的时间尺度也受到限制。通过分析云收支发现，降水模拟时空上限由水汽凝结决定，而水汽凝结取决于水汽过饱和，即实际比湿和饱和比湿之差。饱和比湿仅是气温的函数。方差分析结果表明，水汽过饱和的方差比实际比湿或饱和比湿方差小5个量级。这说明，在这样的物理框架下需要精确的温度和水汽资料才能获得精确的水汽凝结和降水计算。

最近，我们分析一个我国华南地区强环流变化（强环流）的例子，和弱环流例子进行比较。最大垂直速度为 $0.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，是弱环流的10倍。进行有1%的辐射计算误差的敏感性试验。比较结果发现，降水模拟的时空上限在强环流条件下比弱环流条件下明显短而小。分析证明，基准和敏感性试验物理量均方差在强和弱环流条件下差距不大，而降水标准差在强环流条件下比弱环流条件下来得大。其结果是差比在强环流条件下比弱环流条件下小。另外，在强环流条件下，云凝物变化的差比在长时间和大空间中可以小于1。

这说明云凝物的可预报性也和环流的强弱有关。

我们的研究表明，降水数值可预报性在于大尺度水汽过程，而可预报性在很大程度上受制于云过程模拟的不确定性。因此，准确的降水预报要求大尺度水汽过程模拟准确，而降水预报的改进依赖于云可预报性的改进。而对初始温度和比湿及参数化方案精确度要求在强环流条件下比弱环流条件下要小得多。

## 6 降水对辐射的响应

从降水日变化的分析中看到辐射的变化影响热量平衡，导致潜热和降水的变化。从没有大尺度强迫的平衡态云模拟敏感性试验比较<sup>[1,19]</sup>中发现，去除水云和冰云辐射会增加降水，去除冰云造成的降水增加比去除水云辐射造成的降水增加明显要大。在同样去除水（冰）云辐射条件下，降水的增加在有冰（水）云辐射下比没有冰（水）云辐射下要多一些。这是因为净凝结增加在有冰（水）云辐射下比没有冰（水）云辐射下要大。

当大尺度背景场存在时，会产生热量辐合，影响热量平衡，从而影响辐射对潜热和降水的效应。2008年6月的华南暴雨云模拟敏感性试验<sup>[20]</sup>比较发现，在降水系统发展期，去除冰云辐射会减弱热量辐射和增强大气局地降冷，反而造成降水减少。在降水系统成熟和衰弱期，去除冰云辐射会增强大气局地变暖而造成降水增加。这说明大尺度环流影响降水辐射效应。

## 7 降水对冰云的响应

冰云是降水系统重要组成部分。从没有大尺度强迫的平衡态云模拟敏感性试验比较中发现，去除冰云通过增强云凝物辐散而减弱降水。冰云对降水系统有两大作用。冰云辐射效应改变降水系统的热量平衡，而冰云微物理过程既通过潜热改变热量平衡，又通过云凝物发生发展改变水汽平衡。去除冰云辐射效应增加降水，而去除冰云微物理效应减弱降水，两者基本抵消，去除冰云效应造成的弱降水减小过程由去除冰云微物理效应引起的。去除冰云效应会明显加强云滴的增长。

2008年6月的华南暴雨云模拟敏感性试验比较<sup>[20]</sup>发现，在降水系统从发生到成熟期间去除冰云效应减弱降水，而在降水系统衰弱期，去除冰云效应加强降水。在降水系统发生期，去除冰云效应减弱降水主要由去除冰云辐射效应造成的，而在发展成熟期，去除冰云效应减弱降水主要由去除冰云微物理效应造成的。在发展期，去除冰云微物理效应通过局地水汽从减湿到增湿而减弱降水。在成熟期，去除冰云微物理效应通过局地水汽减湿过程的变弱和

云凝物从减少到增加的局地变化而减弱降水。在降水系统衰弱期，去除冰云效应加强降水主要由去除冰云辐射效应造成的。这说明大尺度环流影响降水冰云效应及其物理过程。

## 8 结果讨论

本文简明介绍以地面降水收支为核心的降水定量分析规范体系及其应用<sup>[1]</sup>。其应用包括降水系统结构分析研究、新对流层状降水分解方案开发、最大降水的物理定义和降水效率正确计算、热带降水日变化以及降水对辐射及冰云响应的机理分析和降水模拟时空上限确定等。由以上七种降水定量分析规范体系的应用研究结果表明，这个体系对于定量深入了解降水物理过程有很大的潜力。这是由于这个体系完全基于物理定律，而且每个物理过程和降水呈线性关系，应用结果分析显而易见。我们相信随着这个体系的进一步深入应用，降水和大尺度背景场及云的关系会被我们所理解。如果想详细了解这个降水定量分析规范体系和应用，请参见参考文献[1]。

### 参考文献

- [1] Li X F, Gao S T. Precipitation modeling and quantitative analysis. Dordrecht: Springer. 2011.
- [2] Gao S T, Cui X P, Zhou Y S, et al. Surface rainfall processes as simulated in a cloud resolving model. *J Geophys Res*, 2005, 110(D10202). DOI:10.1029/2004JD005467.
- [3] Gao S T, Li X F. Precipitation equations and their applications to the analysis of diurnal variation of tropical oceanic rainfall. *J Geophys Res*, 2010, 115(D08204). DOI:10.1029/2009JD012452.
- [4] Zhou Y S, Li X F. Sensitivity of convective and stratiform rainfall to sea surface temperature. *Atmos Res*, 2009, 92:212-219.
- [5] Zhou Y S, Li X F. An analysis of thermally-related surface rainfall budgets associated with convective and stratiform rainfall. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28:1099-1108.
- [6] Li X F, Zhai G Q, Gao S T, et al. A new convective-stratiform rainfall separation scheme. *Atmos Sci Lett*, 2014, 15:245-251.
- [7] Li X F, Sui C H, Lau K M. Precipitation efficiency in the tropical deep convective regime: A 2-D cloud resolving modeling study. *J Meteor Soc Japan*, 2002, 80:205-212.
- [8] Sui C H, Li X F, Yang M J, Huang H L. Estimation of oceanic precipitation efficiency in cloud models. *J Atmos Sci*, 2005, 62:4358-4370.
- [9] Sui C H., Li X F, Yang M J. On the definition of precipitation efficiency. *J Atmos Sci*, 2007, 64:4506-4513.
- [10] Gao S T, Li X F. Can water vapor process data be used to estimate precipitation efficiency? *QJ Roy Meteor Soc*, 2011, 137:969-978.
- [11] Gao S T, Li X F. The dependence of precipitation efficiency on rainfall type in a cloud-resolving model. *J Geophys Res*, 2011, 116(D21207). DOI: 10.1029/2011JD016117.
- [12] Shen X Y, Li X F. Thermodynamic aspects of precipitation efficiency. //Juan Carlos Moreno Piraján. *Thermodynamics-Interaction Studies-Solids, Liquids and Gases*. 2011.
- [13] Zhou Y, Li X F, Gao S T. Precipitation efficiency and its relationship with physical factors. *Chin Phys B*, 2014, 23(6): 064210.
- [14] Li X F, Zhang S L, Zhang D L. Thermodynamic, cloud microphysics and rainfall responses to initial moisture perturbations in the tropical deep convective regime. *J Geophys Res*, 2006, 111(D14207). DOI:10.1029/2005JD006968.
- [15] Gao S T, Li X F. Impacts of initial conditions on cloud-resolving simulations. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25:737-747.
- [16] Gao S T, Li X F. Dependence of the accuracy of precipitation and cloud simulation on time and spatial scales. *Adv Atmos Sci*, 2009, 26:1108-1114.
- [17] Li X F, Shen X Y. Sensitivity of cloud-resolving precipitation simulations to uncertainty of vertical structures of initial conditions. *QJ Roy Meteor Soc*, 2010, 136:201-212.
- [18] Ran L K, Li X F. Sensitivity of cloud-resolving precipitation simulations to uncertainty of radiation calculation: effects of large-scale forcing. *QJ Roy Meteor Soc*, 2014, 140: 838-845.
- [19] Ping F, Luo Z X, Li X F. Microphysical and radiative effects of ice microphysics on tropical equilibrium states: a two-dimensional cloud-resolving modeling study. *Mon Wea Rev*, 2007, 135:2794-2802.
- [20] Wang Y, Shen X Y, Li X F. Microphysical and radiative effects of ice clouds on responses of rainfall to the large-scale forcing during pre-summer heavy rainfall over southern China. *Atmos Res*, 2010, 97:35-46.