

刘朝茹, 韩永翔, 王瑾, 等. 我国冻雨统计及发生机制研究[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 219-222. [Liu Chaoru, Han Yongxiang, Wang Jin, et al. Studies on Statistics and Formation Mechanism of Freezing Rain[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 219-222.]

我国冻雨统计及发生机制研究*

刘朝茹¹, 韩永翔¹, 王瑾², 张智¹

(1. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044; 2. 贵州省山地环境气候研究所, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 利用2008-2013年冬季低温期间全国常规地面观测站资料, 统计了冻雨多发站点的1月份年平均冻雨发生日数, 结合探空资料对冻雨进行分类并讨论其发生机制。结果表明: ①不同站点间发生冻雨的机制有明显差异, 冻雨发生机制与海拔高度有关; ②含有暖层冻雨两个例中过冷暖雨过程达到了67%以上, 高海拔地区易发生过冷暖雨过程的冻雨, 而低海拔地区易发生融化过程的冻雨; ③用有无暖层来划分是融化过程还是过冷暖雨过程误判的概率极大, 高海拔地区误判的概率最大, 如威宁为97%, 低海拔地区如南昌误判率也在20%以上。这一研究结果表明必须用新的分类方法来划分冻雨, 用传统的有无暖层来划分冻雨机制存在误差。

关键词: 冻雨统计; 过冷暖雨过程; 融化过程

中图分类号: P426.6; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)03-0219-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.03.040

冻雨是中高纬度地区常见的灾害性天气现象, 是一种由过冷水滴组成的、与低于0℃的物体碰撞立即冻结的降水, 它能形成毛玻璃状或透明的坚硬冰层^[1], 在地物上冻结并积累后能压断电线, 造成供电和通讯中断, 严重的冻雨甚至会压塌房屋、压断树木、冻死农作物和蔬菜, 对农业、林业、电力、环境、通讯网络危害巨大。同时, 因其具有外表光滑的坚硬冰层, 交通运输也会因其受到巨大的损失。2008年初, 我国南方受到暴雪和冻雨灾害天气的袭击, 时值春节前夕, 给交通运输、电力供应、林业和农业以及人民正常的生活和生产造成了严重的影响^[2], 发生了较严重的人员伤亡与财产损失。

由于冻雨的特殊性质会给人们的生产和生活带来严重危害, 所以国内外学者对冻雨有较为广泛的关注。Stewart^[3]总结了发生在美国东南部的冻雨和降雪, 发现它们与美国东南部的暖锋相关。当暖锋到来时, 爬升的暖空气在近地面形成了逆温层, 逆温层中温度不断升高, 出现大于0℃的暖层。接下来随着暖锋的不断侵入, 暖层加厚, 落进暖层的雪花被更多地融化, 并且地面冷层也会不断变浅, 使得融化的液滴再被冻结的概率变低。

当变厚的暖层能将雪花完全融化, 液滴在落到低层冷层中冷却但未被再次冻结时, 在低于0℃的地表上将很有可能观测到冻雨。这种冻雨的形成理论被普遍接受, 并常被称为融化过程或“冰相融化机制”理论(图1a)^[4]。David^[5]等研究了美国东南部冻雨发生的次数、时间以及其探空结构, 支持了融化过程理论。Zerr^[6]探讨了暖层和其以下的冻结层的厚度、温度对降落物相态的影响, 认为暖层太薄或者温度太低会使得冰晶不能完全融化成水滴, 另外, 再次冻结层太厚或者温度太低也会使得下落的水滴再次冻结。国内也有大量研究从天气学角度分析了冻雨的形成原因^[2, 7-13], 提出冻雨主要发生在准静止锋附近^[7-8], 并将冷暖锋相交的天气系统与融化过程相对应, 较多地强调逆温层中暖层的融化作用对冻雨形成的影响。

然而, 也有大量的冻雨个例研究中没有出现高于0℃的融化层, 如Bocchieri^[14]发现在一些冻毛毛雨天气中, 大气探空数据表明整层大气都在0℃以下, 其比例为44%, 故而过冷暖雨过程被提出(图1b)^[15], 认为在过冷却状态下, 液滴会通过碰并过程保持增长并产生冻雨天气, 并用是否存在暖层这一特征来区分过冷暖雨过程和融化过程。

* 收稿日期: 2015-01-19 修回日期: 2015-03-11

基金项目: 公益性行业专项(GYHY201306051); 国家自然科学基金资助项目(41375158, 41030962)

作者简介: 刘朝茹(1989年-), 女, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事云降水物理研究。E-mail: liucr19@sina.com

通讯作者: 韩永翔(1966年-), 男, 甘肃民勤人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为沙尘气溶胶与气候变化。

E-mail: han-yx66@126.com

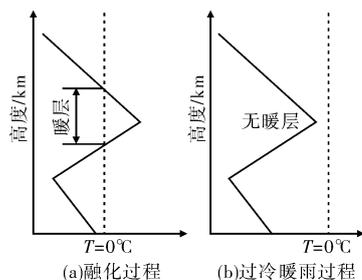


图1 两种不同的冻雨机制

我国学者对气象站探空资料进行了统计分析,发现贵州省有大量的冻雨个例不存在暖层,冻雨形成机制更可能是过冷暖雨过程,与低海拔地区的冻雨发生机制有很大不同,如湖南的冻雨常由“冰相融化过程”形成^[16-18]。

在对我国冻雨的研究过程中,我们发现的确存在两种冻雨机制,但这两种机制的划分过于简单,即使出现暖层,也有大量的个例属于过冷暖雨过程,说明用有无暖层来划分冻雨发生机制存在非常大的误差。针对此问题,本文利用2008-2013年全国常规地面观测资料和探空资料,在冻雨多发地带的长江以南地区,分析冻雨发生时大气层结温度、湿度、暖层厚度和云高等要素,通过统计学的宏观分析,对两种冻雨机制出现的概率以及对有暖层的冻雨进行初步研究,探讨冻雨大气层结特征和形成的物理机制。

1 资料与方法

本文选取了2008-2013年低温期间的地面观测资料和常规探空资料,因1月的资料最全且冻雨在1月出现的次数最多,所以着重对1月冻雨做出统计。地面观测资料用于确定冻雨天气的出现,探空资料分析冻雨出现时的大气层结特征。1月年平均冻雨发生次数使用地面观测资料,1d内多次记录的冻雨天气合算为一次。探空资料每日只有两次,分别在08时和20时,通过地面观测资料判断这两个时间是否发生冻雨筛选出有冻雨的时次,每次记为一个个例。另外,云高数据根据探空数据中的相对湿度数据取得,以大于等于84%的相对湿度作为判断云顶的阈值^[19]。

融化过程和过冷暖雨过程根据探空图中有无暖层来划分,但是对冰核的观测发现很少有冰核在 $> -10^{\circ}\text{C}$ 时核化,所以当有暖层而云顶温度 $> -10^{\circ}\text{C}$ 时,冻雨发生机制也有可能是过冷暖雨过程^[18]。因此,对有暖层的冻雨个例,本文参考Rauber的冻雨类型^[20]并将其简化为四类(表1)。

暖层强度为暖层厚度(以压强为单位)与暖层最大温度的乘积,其表征了暖层融化冰晶的能力。第一类冻雨的暖层在云顶以上,无暖层强度;第

二类冻雨暖层厚度只取暖层底部到云顶的厚度;第三、四类冻雨暖层厚度取整层。

表1 有暖层冻雨的分类

分类	第一类	第二类	第三类	第四类
有无暖层	有	有	有	有
暖层与云关系	云顶位于暖层下	云顶位于暖层中	云顶位于暖层上	云顶位于暖层上
云顶温度(CTT)	$0^{\circ}\text{C} > \text{CTT} > -10^{\circ}\text{C}$		$-10^{\circ}\text{C} > \text{CTT}$	

2 冻雨日数、暖层出现概率与海拔高度关系

$25^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{N}$ 的长江以南地区是我国冻雨主要的发生地带,多发区域呈带状分布,大致对应了位于江南地区的准静止锋(图2)。从图2可清楚地看到西部冻雨发生较多,而东部较少,同时山地地区如庐山、峨眉山等较周围地区有较多的冻雨发生,这可能同海拔高度有关。

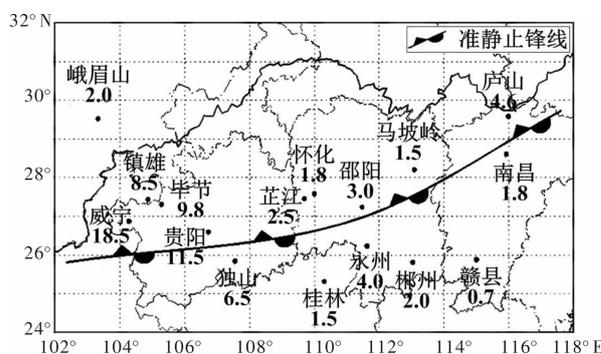


图2 冻雨多发地带1月份年平均发生冻雨日数

注:图中数值为冻雨天数

图3a为海拔高度与1月年平均冻雨日数关系图,除了不在静止锋区的峨眉山站外,其他各站的海拔高度与1月年平均冻雨日数之间有正相关关系(相关系数 $r = 0.94$,通过 $\alpha = 0.01$ 显著性水平),海拔高度越高,1月年平均冻雨日数越多。

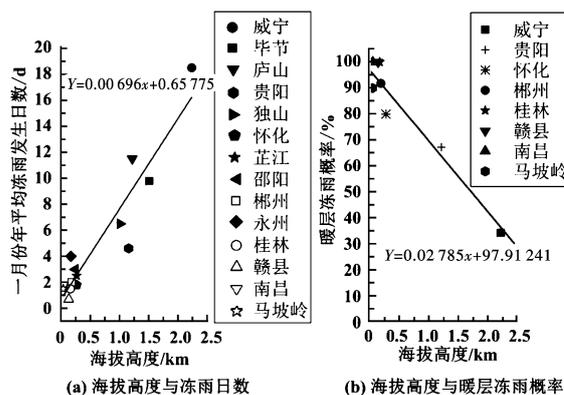


图3 海拔高度与冻雨日数、暖层冻雨概率关系图

冻雨有无暖层是判断融化过程还是过冷暖雨过程的重要指标,计算出2008-2013年各个探空

站暖层出现的次数占总冻雨数的 52.6%，不存在暖层的冻雨占总冻雨数的 47.4%。暖层出现的概率占了将近一半以上，其概率与海拔高度呈现显著的负相关，如图 3b 所示，相关系数 $r = -0.96$ ，通过 $\alpha = 0.01$ 显著性水平)，海拔高度较低地区的冻雨天气更容易存在暖层，而海拔高度较高的地区不易出现暖层。

3 暖层冻雨分类及其形成机制

剔除了个别层结过于稀疏的探空数据，筛选了 2008 - 2013 年 8 个探空站中含有暖层的冻雨个例 124 例并将其分类。第一类探空曲线如图 4a 所示，云顶高度(虚线)在暖层以下且温度大于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，暖层不可能加热融化云中形成的冰晶，即降水过程中，从云滴形成到雨水降落地面不会发生相态变化，冻雨发生机制应为过冷暖雨过程；第二类如图 4b 所示，云顶高度处于暖层之中，云滴形成于大于零度的层结中，经过低层冷层冷却，形成过冷却水滴降落地面冻结。在这种情况下，冻雨降水下落过程中不会发生相态转变，冻雨发生机制也为过冷暖雨过程。另外由于其云滴形成于暖层之中，暖层加热云滴的温度只要能使其不会被低层冷层冻结就可以，不需要融化冰晶，所以需要的平均暖层强度也最低(表 2)；第三类如图 4c 所示，云顶高度处于暖层之上，云顶温度为 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，因为很少有冰核在 $> -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时核化^[20]，云中产生冰晶的可能性较小，其冻雨的发生机制有可能是过冷暖雨过程，也有可能是融化过程。而其云顶温度较第二类低一些，有可能需要融化云顶形成的冰晶，需要的平均暖层强度大于第二类；第四类如图 4d 所示，云顶高度处于暖层之上，云顶温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，这种情况下，云中产生的冰晶在降落地面的过程中，经过暖层加热，融化为水滴，再由低层冷层冷却形成过冷水滴，降落地表冻结，其发生机制为融化过程，因云顶温度较低，也需要更大的平均暖层强度融化冰晶。

表 2 四类冻雨云顶高度、温度及平均暖层强度

	云顶高度/hPa	云顶温度/ $^{\circ}\text{C}$	平均暖层强度
第一类	698.62	-2.52	/
第二类	720.96	1.94	224.19
第三类	634.75	-4.69	488.83
第四类	507.20	-13.00	647.40

本文计算了各个类型冻雨占含有暖层冻雨总数的比例，发现 124 个有暖层的冻雨个例中过冷暖雨过程达到了 66.94%，如果将第三类也归为过冷暖雨过程时，则过冷暖雨过程达到了 95.97%，而融化过程只占到 4.03% (图 5)。这一统计结果与前面定义的暖层冻雨发生机制为融化过程^[15] 相矛盾，由此可见，融化过程这种较为经典、认可度

较高的冻雨机制可能并不是绝大部分冻雨发生的原因。

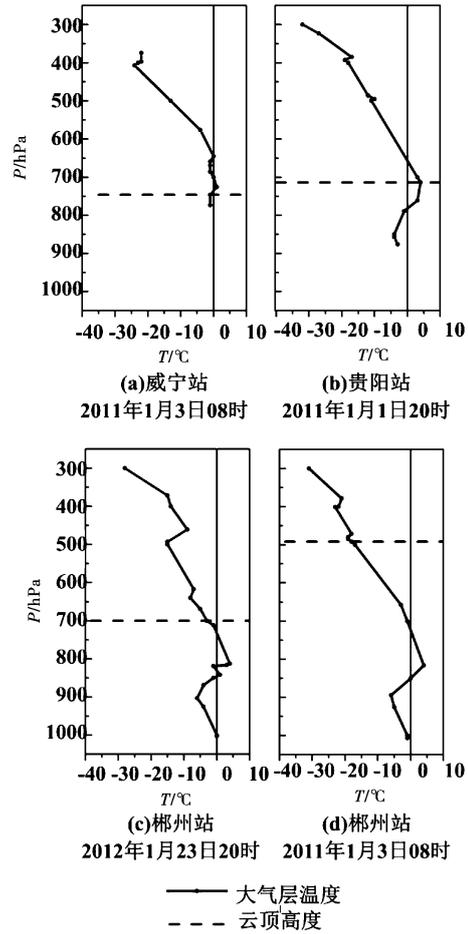


图 4 四类有暖层的冻雨示意图

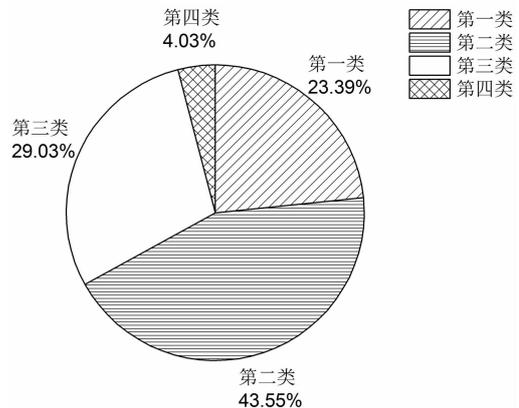


图 5 各个类型冻雨占含有暖层冻雨总数比例

为了更进一步了解有暖层冻雨的发生机制，本文又分别讨论了各类型与各站关系。

各个站点与冻雨类型关系如图 6 所示，图 6 中第一类冻雨(图 6a，过冷暖雨过程)主要出现在海拔最高的威宁站，贵阳和马坡岭有很少的个例，其他站未发生此类冻雨；第二类冻雨(图 6b，过冷暖雨过程)多在海拔高度中等地区发生，大部分站点均有发生，其中贵阳站比例最大；第三类冻雨

(图 6c) 各个气象站均占有一定比例, 它们既有可能是过冷暖雨过程, 也有可能是融化过程, 发生此类冻雨的气象站较为广泛。第四类冻雨(图 6d, 融化过程)全部发生在低海拔地区, 说明低海拔地区更容易发生融化过程的冻雨。

本文选择威宁代表高海拔地区、南昌代表低海拔地区与含有暖层冻雨类型进行分析, 结果表明威宁过冷暖雨过程出现的概率为 97%, 只有不到 3% 为第三类冻雨, 它既有可能是过冷暖雨过程, 也有可能是融化过程(图 6e); 南昌过冷暖雨过程出现的概率为 20%, 融化过程出现的概率也为 20%, 60% 为第三类冻雨(图 6f)。

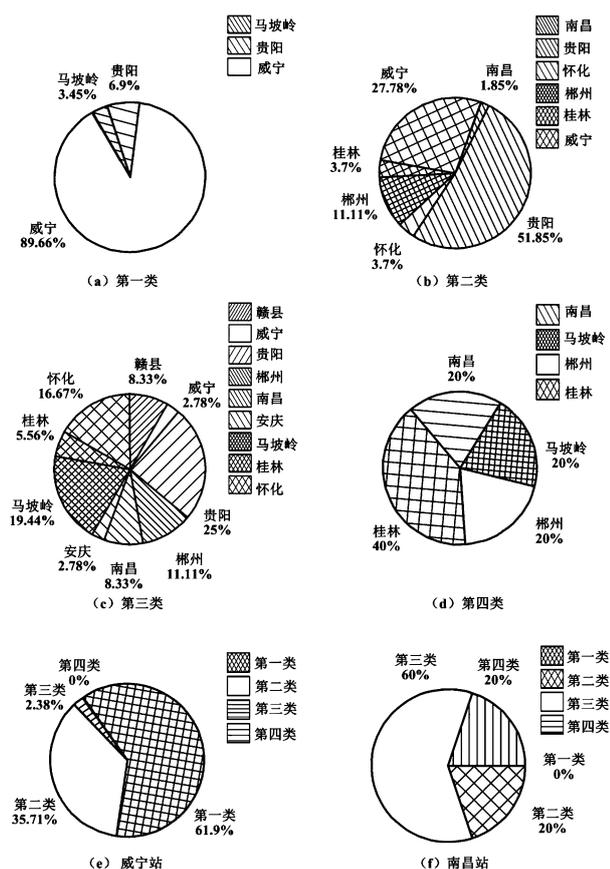


图 6 各个站点与含有暖层冻雨类型关系
(未标出比例的站点为此站没有发生这一类冻雨)

综上所述, 用有无暖层来划分是融化过程还是过冷暖雨过程误判的概率极大, 即使有暖层出现, 大部分个例仍不是融化过程。高海拔地区误判的概率最大, 如威宁为 97%, 即使更容易发生融化过程的低海拔地区如南昌误判率也在 20% 以上。

4 结论

本文利用 2008 - 2013 年冬季低温期间地面观测站资料和探空资料对我国冻雨进行统计分析, 得到如下结论。

(1) 我国冻雨多发地带呈带状分布, 处于 25°

~29°N, 对应了准静止锋的位置。西部冻雨较多, 东部冻雨较少, 山地地区较平原地区更容易发生冻雨。海拔高度与 1 月份年平均冻雨日数成正比, 与探空站出现暖层冻雨概率成反比。

(2) 含有暖层冻雨个例中过冷暖雨过程达到了 67% 以上, 高海拔地区易发生过冷暖雨过程的冻雨, 而低海拔地区易发生融化过程的冻雨。

(3) 用有无暖层来划分是融化过程还是过冷暖雨过程误判的概率极大, 高海拔地区误判的概率最大, 如威宁为 97%, 低海拔地区如南昌误判率也在 20% 以上。

参考文献:

- [1] 孟蕾. 雨淞雾凇形成机制的观测和冻雨模式初步研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2010: 1-2.
- [2] 赵思雄, 孙建华. 2008 年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 351-367.
- [3] Stewart R E. Precipitation types in winter storms[J]. Pure appl. Geophys, 1985, 123: 597-609.
- [4] 陶玥, 李宏宇, 刘卫国. 南方不同类型冰冻天气的大气层结和云物理特征研究[J]. 高原气象, 2013, 32(2): 501-518.
- [5] David A. Gaym, Robert E. Davis. Freezing rain and sleet climatology of the southeastern USA[J]. Climate Research, 1993, 3: 209-220.
- [6] Zerr R J. Freezing Rain: An observational and theoretical study[J]. Journal Of Applied Meteor, 1977, 36: 1647-1661.
- [7] 孙建华, 赵思雄. 2008 年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结结构分析[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 368-384.
- [8] 陶祖钰, 郑永光, 张小玲. 2008 年初冰雪灾害和华南准静止锋[J]. 气象学报, 2008, 66(5): 850-854.
- [9] 周后福, 张苏, 张美根. 江淮地区雨凇天气形势及其垂直结构特征[J]. 气象, 2004, 30(Supp. 1): 34-38.
- [10] 吕胜辉, 王积国, 邱菊. 天津机场地区冻雨天气分析[J]. 气象科技, 2004, 32(6): 456-460.
- [11] 杜小玲, 彭芳, 武文辉. 贵州冻雨频发地带分布特征及成因分析[J]. 气象, 2010, 36(5): 92-97.
- [12] 晏红明, 王灵, 朱勇. 2008 年初云南低温雨雪冰冻天气的气候成因分析[J]. 高原气象, 2009, 28(4): 870-879.
- [13] 赵培娟, 邵宇翔, 李周, 等. 冻雨形成的天气条件分析[J]. 气象与环境科学, 2008, 31(4): 36-39.
- [14] Bocchieri J R. The objective use of upper air sounding to specify precipitation type[J]. Mon Wea Rev, 1980, 108(5): 596-603.
- [15] Huffman G J, Norman G A. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation[J]. Mon. Wea. Rev, 1988, 116: 2172-2182.
- [16] 陶玥, 史月琴, 刘卫国. 2008 年 1 月南方一次冰冻天气中冻雨区的层结和云物理特征[J]. 大气科学, 2012, 36(3): 507-522.
- [17] 李小龙, 付翔, 金山. 南方雨雪冰冻灾害过程的冻雨天气及积雪监测[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(5): 88-94.
- [18] 欧建军, 周毓荃, 杨棋. 我国冻雨时空分布及温湿结构特征分析[J]. 高原气象, 2011, 30(3): 692-699.
- [19] 周毓荃, 欧建军. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其研究[J]. 气象, 2010, 36(11): 50-58.
- [20] Rauber R M, Larry S Olthoff, Mohan K Ramamurthy, et al. The relative importance of warm rain and melting processes in freezing precipitation events[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39: 1185-1195.

(下转第 234 页)

数量不断增加,其造成的损失也不断增加。通过对1900-2013年重大突发事件的事件类型、分布区域以及年度变化等进行综合分析,得出如下结论。

(1)自然灾害是重大突发事件的主要类型,且比另外三个类型产生的后果更为严重,波及范围更广。需要注意的是虽然公共卫生事件发生数量较少,但其造成的死亡人数仅次于自然灾害,因此需要特别加强对疾病、食品安全等卫生事件的控制及监督。

(2)在五大洲中,亚洲地区的四种事件类型不论在事故数量还是死亡人数上都占有最高比例。中国是亚洲地区面积最大、人口最多的国家,通过数据统计知,中国重大突发事件的发生次数与死亡人数分别占亚洲总量的33.8%和69.2%。因此,对于中国来说,更需加强对重大突发事件的预防、监督及控制。

(3)亿元GDP死亡率反映出经济与重大突发事件死亡人数之间的关系。随着世界经济的不断发展,亿元GDP死亡率呈现下降趋势。

参考文献:

- [1] 袁艺, 马玉玲. 近30年我国自然灾害灾情时间分布特征分析[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 65-68.
- [2] 赵飞, 汪洋, 刘南江, 等. 2000-2012年我国自然灾害人口损失情况特征分析[J]. 灾害学, 2013, 28(4): 139-142.
- [3] 艾恒雨, 刘同威. 2000-2011年国内重大突发性水污染事件统计分析[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(4): 284-288.
- [4] 朱月敏. 煤矿安全事故统计分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011.
- [5] 陈娟, 赵耀江. 近十年我国煤矿事故统计分析及其启示[J]. 煤炭工程, 2012, 44(3): 137-139.
- [6] Nataliya V Malyskin, Fred L Mannering, Andrew P Tarko. Markovswitching negative binomial models: An application to vehicle accident frequencies[J]. Accident Analysis and Prevention, 2009, 41: 217-226.
- [7] 吕海燕. 生产安全事故统计分析及预测理论方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2004.
- [8] 张国凤. 基于重大突发事件的即兴决策研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2011.
- [9] Jeanne M. Managing disasters: The role of local government[J]. Public Administration Review, 2007, 67: 114-124.
- [10] 蒋卫国, 李京, 王琳. 全球1950-2004年重大洪水灾害综合分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2006, 42(5): 530-533.
- [11] 龚道溢, 王绍武. 近百年ENSO对全球陆地及中国降水的影响[J]. 科学通报, 1999, 44(3): 315-320.
- [12] ALCIRAK, MARGARETA, ANNEC. Building safer cities: the future of disaster risk[M]. Washington DC, 2003: 91-98.

Research on Types and Distribution Regions of Global Serious Emergencies

Zhang Xia¹ and Xue Yaowen²

(1. School of Economics and Management, Taiyuan University of Scientific and Technology, Taiyuan 030024, China;
2. School of Economics and Management, Shanxi Normal University, Linfen 041000, China)

Abstract: According to the analysis of the types, total number, death toll and regional distribution of the serious emergencies around the world based on the EM-DAT from 1900-2013, it gets that natural disasters account for highest proportion and show decline tendency, otherwise the number of technical disasters and social security increases; Asia has suffered more occurrence and fatalities than other regions, and emergencies is led by natural and technical disasters in every region; serious emergencies death rate is nearly equal in every region; death rate per hundred million GDP in Africa and Asia is almost 10 times than other regions.

Key words: serious emergencies; event types; natural disasters; regional distribution; trend

(上接第222页)

Studies on Statistics and Formation Mechanism of Freezing Rain

Liu Chaoru¹, Han Yongxiang¹, Wang Jin² and Zhang Zhi¹

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Guizhou institute of Mountain Climate and Environment, Guiyang 550005, China)

Abstract: The annual mean days of freezing rain in January on meteorological stations where freezing rain frequently occurs was analyzed by using the surface observation data during the winter cold in 2008-2013. And then, the sounding data combined with surface observation data is used to classify freezing rain and discuss the formation mechanism. The results showed that: ① There are obvious differences of mechanism between different sites, and the formation mechanism of freezing rain has a correlation with altitudes; ② Over 67% of the freezing rain with warm layer were formed by Supercooled Warm Rain Process, high altitudes tend to occur Supercooled Warm Rain Process, and low altitudes tend to occur Melting Ice Process; ③ There is a significant misjudgment of distinguishing Supercooled Warm Rain Processes and Melting Ice Process by using the judgment of whether there is a warm layer, the possibility of misjudgment at high altitudes is much higher than that at low altitudes, for example, it can be 97% in Weining. But the possibility still can be over 20% at low altitudes like Nanchang. The study suggests that we should use new category to determine the formation mechanism of freezing rain rather than the traditional one.

Key words: freezing rain statistics; supercooled warm rain process; melting ice process