

孙力, 隋波, 王晓明, 等. 2010. 我国东北地区夏季暴雨的气候学特征 [J]. 气候与环境研究, 15 (6): 778-786. Sun Li, Sui Bo, Wang Xiaoming, et al. 2010. Climatic characteristics of the summer hard rain in the northeastern part of China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (6): 778-786.

我国东北地区夏季暴雨的气候学特征

孙力¹ 隋波¹ 王晓明² 刘实¹

1 吉林省气象科学研究所, 长春 130062

2 吉林省气象台, 长春 130062

摘要 利用东北三省和内蒙古东部 200 个测站 1961~2005 年的逐日降水资料, 分析了东北地区夏季暴雨的空间分布特征和时间演变规律, 以及各类暴雨与各种影响天气系统之间的气候统计关系。结果表明, 在空间分布上, 暴雨由东北地区的东南部向西北部递减的地域特征十分明显, 绝大多数大范围 and 区域性暴雨一般都集中在东北地区的南部和中部, 而局地暴雨的分布范围相对较广, 地域差别也较小。在时间分布上, 几十年来东北地区暴雨的阶段性变化特征十分明显, 多暴雨和少暴雨的出现具有 11~12 年左右的低频变化周期。20 世纪 80 年代初以来, 暴雨日出现的年际变率有明显增加的趋势, 特别是 20 世纪 90 年代中期以后, 东北地区暴雨发生的次数虽然明显减少, 但平均每个暴雨日的暴雨量却有所增加。在东北地区出现的局地暴雨中, 以北方天气系统的影响贡献最大, 而在区域性暴雨和大范围暴雨中, 南方天气系统影响的比例明显增加。

关键词 东北地区 暴雨 时空分布 暴雨天气系统 气候分析

文章编号 1006-9585 (2010) 06-0778-09 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Climatic Characteristics of the Summer Hard Rain in the Northeastern Part of China

SUN Li¹, SUI Bo¹, WANG Xiaoming², and LIU Shi¹

1 *Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun* 130062

2 *Meteorological Observatory of Jilin Province, Changchun* 130062

Abstract By using the daily precipitation data at 200 stations in the northeastern part of China from 1961 to 2005, the characteristics of the spatial and temporal distributions of the summer hard rain in the northeastern part of China and the relationship between the different types of the hard rain and the different influencing synoptic systems are studied. The results show that the spatial differences of the hard rain distribution with more rainfall in the southern and eastern parts, and less rainfall in the western and northern parts over the northeastern part of China are very significant. The majority of the regional-scale and widespread hard rains mainly occur in the southern and middle parts of the northeastern part of China generally, whereas the local-scale hard rain is of wide distribution, and its spatial difference is also relatively small. The hard rain over the northeastern part of China has a significant 11-12-year low-frequency variation period. Since the early 1980s, the interannual variability of the hard rain has had the increasing tendency. Especially after the middle 1990s, the frequency of the hard rain has decreased obviously, but the intensity of the hard rain on the average has increased to some extent. The great majority of the local-

收稿日期 2009-11-30 收到, 2010-10-17 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40633016, 科技部社会公益研究项目, 武汉暴雨研究所暴雨开放基金项目 IHR200K05

作者简介 孙力, 男, 1960 年出生, 研究员, 主要从事天气和气候研究。E-mail: sunli@cma.gov.cn

scale hard rain are mainly caused by the northern synoptic systems, however the southern synoptic systems related with the low-latitude and subtropical areas contribute greatly to the regional-scale and widespread heavy rain in the northeastern part of China.

Key words northeastern part of China, hard rain, spatial and temporal distributions, rain storm, climatic analysis

1 引言

我国是个多暴雨的国家，有关暴雨的发生机理及其预报方法研究一直是大气科学领域的重点研究课题之一，陶诗言（1980）曾经对我国暴雨做过全面和详细的分析，得出西风带环流、副热带环流和热带环流是影响我国暴雨的主要大气环流形势。他还特别指出，东北低压和东北冷涡是造成东北暴雨的重要天气系统。东北暴雨具有北方暴雨的一般特点，即虽然暴雨次数少，但季节性突出、强度大、突发性强、局地特征明显，是该地区最主要的灾害性天气之一。1998年松嫩流域发生的超历史记录的大范围暴雨洪涝灾害和2005年在黑龙江省沙兰镇出现的强局地暴雨都造成了严重的人员伤亡并带来巨大的财产损失，从而引起国内外的广泛关注。近些年来，有关东北暴雨的研究逐渐增多，特别是在东北暴雨发生的大气环流背景（孙力和安刚，2001；张庆云等，2001；Zhao and Sun, 2007）、典型暴雨个例的动力诊断研究（姜学恭等，2001；孙力等，2002；乔枫雪等，2007）和暴雨的中尺度分析（许秀红等，2000；寿亦萱和许建民，2007）等方面都做了很多有价值的工作。王东海等（2007）最近对东北暴雨研究进行了全面综述，他回顾了过几十年来有关东北暴雨研究方面的进展，指出了目前亟待于解决的一些科技问题，并认为全面和系统地研究东北暴雨不仅将提高对东北洪涝灾害的认识，而且有利于加深对东北暴雨的全面理解。

相对于暴雨的天气学研究而言，目前关于东北暴雨的气候学分析工作还比较少，郑秀雅等（1992）利用1956~1987年的气象资料曾经对东北暴雨的气候学特征做过全面分析，并得到了很多有意义的结果。但该分析关于东北暴雨的分类标准是以省为基础，并且结果是由东北三省分别进行统计的，在探讨暴雨与天气系统的关系时，

文中也只是给出了吉林省的情况。因此，该研究工作在从全区域角度认识东北暴雨的气候特征上，可能还存在着一定的局限性。况且最近20年来，在全球变暖的背景下，东北地区气温显著升高，气候变化明显（孙力等，2003a；孙凤华等，2006）。因此用更加完备的资料，从东北地区全区域的角度出发，进一步探讨东北暴雨的气候学特征是十分必要的。本文利用东北三省和内蒙古东部均匀分布的200个测站1961~2005年逐日的降水资料，分析了45年来东北暴雨的时空分布特征，以及各类暴雨与各种影响天气系统之间的气候统计关系，这对进一步了解东北暴雨的变化规律，进而探讨其成因和建立有效的预报预测思路和方法也具有重要意义。

2 东北暴雨的空间分布特征

参考了郑秀雅等（1992）对东北暴雨的分类标准，本研究将东北暴雨分为3类：局地暴雨、区域性暴雨和大范围暴雨。划分的标准是：统计整个东北地区日降水量大于等于50 mm的测站数 n ，如果 $n < 5$ ，则为局地暴雨；如果 $5 \leq n < 15$ ，且暴雨区连片，则为区域性暴雨；如果 $n \geq 15$ ，且各出现暴雨的测站基本相近，则为大范围暴雨。另外，按世界气象组织（WMO）关于气候平均的规定，有关东北暴雨的气候平均都是指1961~1990年的30年平均值。

按东北暴雨的分类标准，经统计，45年来东北地区曾出现了2013个暴雨日，其中局地暴雨最多有1643个暴雨日，占总暴雨日的81.6%，平均每年出现36.5 d，区域性暴雨日出现了285 d，占总暴雨日的14.2%，平均每年出现6.3 d，大范围暴雨日有85 d，占总暴雨日的4.2%，平均每年出现1.9 d。

从图1可见，东北暴雨空间分布的特点是自东南向西北迅速递减，表现出较大的空间差异。辽宁和吉林南部平均每年每站暴雨日在1 d以上，

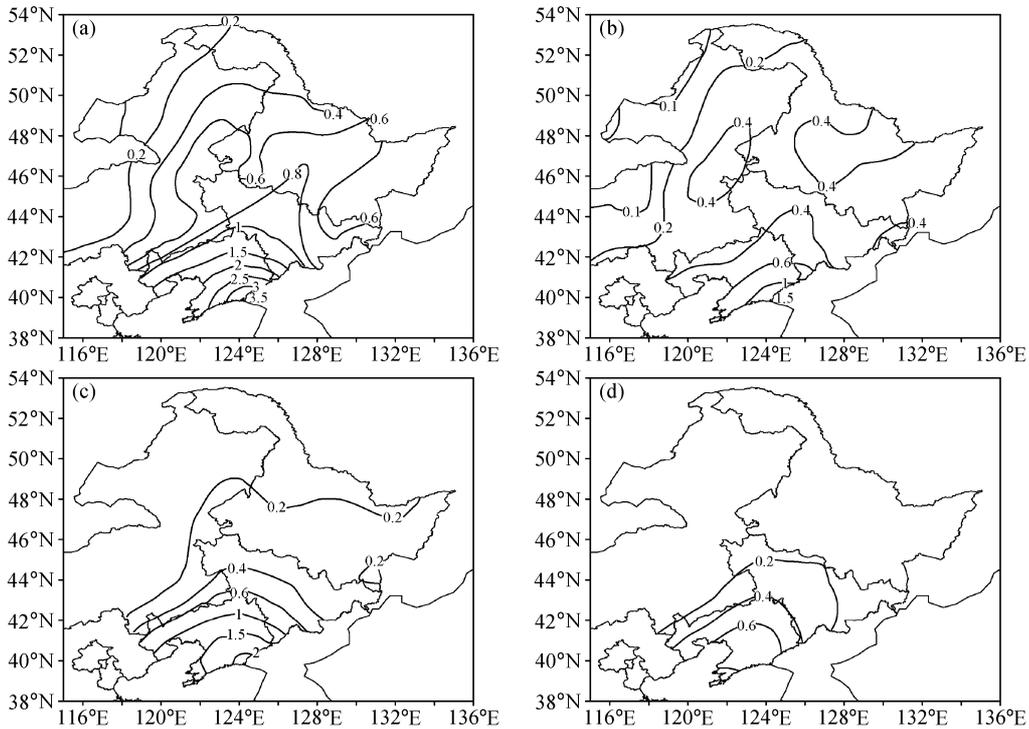


图1 东北地区1961~2005年年平均暴雨日的空间分布(单位:d): (a) 总暴雨日; (b) 局地暴雨日; (c) 区域性暴雨日; (d) 大范围暴雨日

Fig. 1 Spatial distributions of the annual mean hard rain days (d) from 1961 to 2005 over the northeastern part of China; (a) Total hard rain days; (b) local-scale hard rain days; (c) regional-scale hard rain days; (d) widespread hard rain days

辽宁东南部和吉林的集安在2 d以上, 丹东附近可达3~3.5 d, 吉林大部和黑龙江中部超过0.6 d (其中吉林中部和黑龙江中南部在0.8~1 d之间), 而内蒙古东部和黑龙江的西北部和东北部均在0.6 d以下, 东北地区的西北部只有0.2 d左右。这种分布与东北地区夏季对流层中低层累计南风分量的分布(孙力等, 2003b)和季风水汽输送对东北地区影响的范围和强度的分布(Sun et al., 2007)比较吻合, 也与东北地区大的地形分布有关, 当夏季西南季风盛行时, 处于长白山脉迎风坡的东北地区东南部暴雨要比处于大兴安岭背风坡的东北地区西部要明显偏多, 说明东北暴雨出现的位置和发生频率在很大程度上受到东亚夏季风和东北地区大地形分布的影响和制约。区域性暴雨和大范围暴雨同样是自东南向西北迅速递减, 但在地理分布上却更集中, 地域差异更明显。辽宁大部区域性暴雨日可达1~2.2 d, 辽宁北部和西部以及吉林南部在0.6~1 d之间, 吉林北部至黑龙江南部只有0.2~0.4 d, 内蒙古东部和黑龙江北部则在0.2 d以下。大范围暴雨更是

如此, 一般它只出现在辽宁(辽宁南部达0.6~0.8 d, 辽宁北部和西部在0.4~0.6 d之间)和吉林的中南部(0.2~0.4 d), 在东北其他地区出现的概率很小(平均每年每站发生的概率低于20%)。局地暴雨在空间分布上范围较广, 与区域性和大范围暴雨相比, 地域上的差异也相对较小, 除辽宁东南部稍多(0.6~1.2 d)和东北西北部稍少(0.2 d左右)之外, 东北其他各地发生局地性暴雨的可能性均较为接近, 嫩江流域、黑龙江中部、吉林中南部及辽宁的北部和西部都能达到0.4~0.6 d。

从图2和图3可以看出, 夏季暴雨量的空间差别很明显, 辽宁东南部夏季平均暴雨量一般为150~250 mm, 占夏季总降水量的20%~25%, 说明该地区夏季降水在一定程度上是以暴雨形式出现的, 洪涝灾害也主要是由暴雨造成的, 其中区域性、大范围 and 局地暴雨量分别有80~140 mm、40~60 mm和30~50 mm, 说明总暴雨量主要由区域性和大范围暴雨构成。辽宁的其他地区和吉林南部总暴雨量在60~150 mm之间, 占

夏季总降水量的 12%~20%，其中区域性、大范围 and 局地暴雨量分别有 30~80 mm、20~40 mm 和 20~30 mm，即区域性暴雨对总暴雨量的贡献最大，大范围 and 局地暴雨两者相当。吉林北部和黑龙江中部总暴雨量在 40~60 mm，占夏季总降水量的 8%~12%，其中区域性、大范围 and 局地暴雨量分别有 15~30 mm、5~15 mm 和 20~25 mm，区域性暴雨和局地暴雨对总暴雨量的贡献最大，大范围暴雨的贡献较小。东北的其他地区夏季平均暴雨量只有 10~40 mm，仅占总降水量的 2%~8%，其中区域性、大范围 and 局地暴雨量分别有 2~10 mm、1~5 mm 和 7~25 mm，总暴雨量的绝大部分由局地暴雨构成。

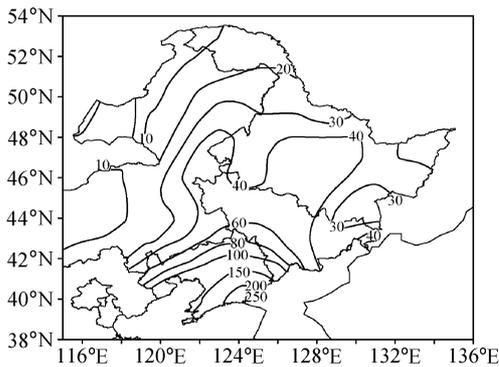


图 2 东北地区 1961~2005 年平均每年夏季暴雨量分布 (单位: mm)

Fig. 2 Spatial distribution of the annual amount of the hard rain (mm) in summer average from 1961 to 2005 over the northeastern part of China

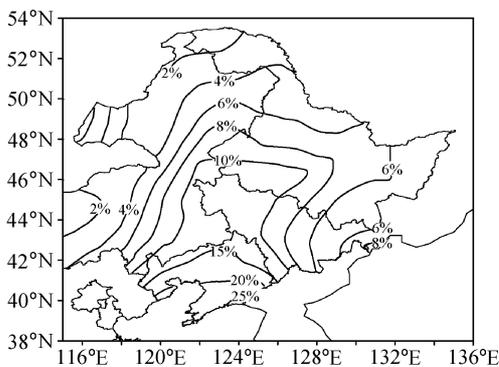


图 3 东北地区 1961~2005 年平均每年夏季暴雨量占夏季总降水量的百分比分布

Fig. 3 Spatial distribution of the percentage of the precipitation amount due to the hard rain to the total precipitation in summer averaged from 1961 to 2005 over the northeastern part of China

3 东北暴雨的时间变化规律

3.1 年际变化特征

从图 4 可以看出如下一些特点: 1) 暴雨的多少具有较大的年际变率。平均来说, 东北地区暴雨日每年可出现 44.7 d, 其中最多可达 62 d, 最少为 32 d, 最大变差为 30 d, 总年际变率可达 6.2 d。2) 暴雨的出现具有明显的阶段性变化特征。1961~1971 年, 暴雨日的多少处于交替变化的波动阶段, 趋势不明显; 1972~1982 年, 是暴雨的偏少阶段, 11 年中有 8 年是负距平; 1983~1994 年是暴雨的偏多阶段, 12 年中有 9 年为正距平; 1995~2005 年又进入了暴雨的偏少阶段, 11 年中有 8 年为负距平。鲍名和黄荣辉 (2006) 和杨金虎等 (2008) 的研究工作也认为, 1990 年代中期以后东北暴雨又进入了偏少阶段。上述分析还表明, 东北地区多暴雨和少暴雨的出现似乎存在着 11~12 a 左右的低频变化周期。3) 从 20 世纪 80 年代初开始, 暴雨出现的年际变率有明显增大的趋势, 即出现极端多暴雨日和少暴雨日的年份都有所增加。1961~1982 年的 22 a 中, 暴雨日的年际变率只有 4.82 d, 而 1983~2005 年的 23 a 中, 暴雨日的年际变率可达 7.43 d, 相差 2.61 d。1980 年代初也正是近百年来东北地区气温明显上升的开始 (孙凤华等, 2006), 这似乎意味着与区域气候变暖相对应的东北暴雨的变化趋势是以暴雨日出现的年际变率明显增大为基本特征的。

局地性、区域性和大范围暴雨日年际变化的阶段性特征与总暴雨日基本一致, 但也略有区别 (图略), 如 1995~2005 年 [这也是东北气温升高最明显的阶段 (孙凤华等, 2006)] 的 11 年中区域性暴雨并没有减少, 反而正距平年份要多于负距平, 总暴雨日的减少主要是局地暴雨明显下降造成的, 且此阶段中平均每个暴雨日的暴雨量 (出现暴雨各测站降水量总和) 也比气候平均值有明显增加, 东北地区每个暴雨日的暴雨量的气候平均值是 298.1 mm, 而 1995~2005 年平均每个暴雨日的暴雨量是 323.7 mm, 增加了 25.6 mm, 即最近十几年来, 东北地区暴雨日数在减少, 但平均每次暴雨的强度却增加了, 这也许是东北暴雨对区域气候变暖的另一个响应特征。

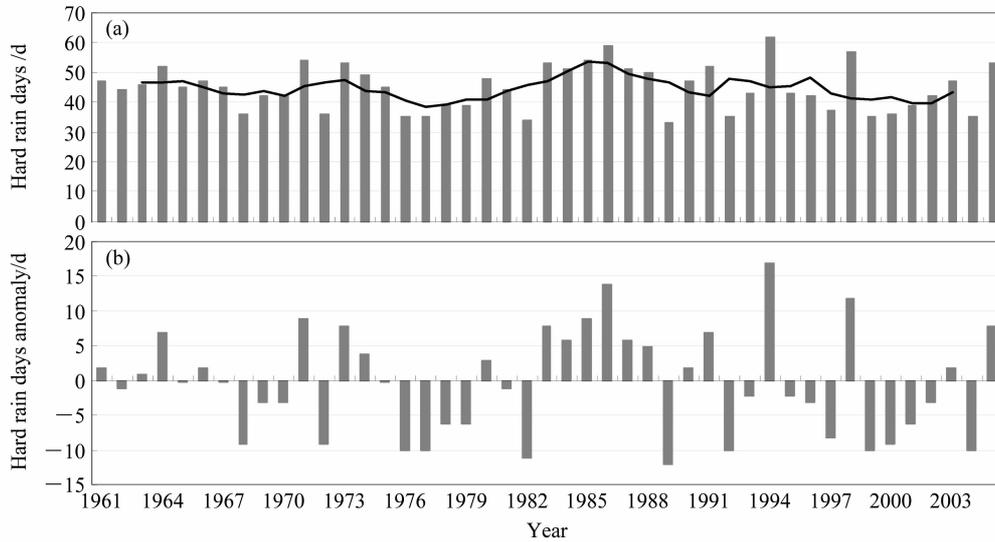


图4 东北地区1961~2005年(a)总暴雨日及其(b)距平的年际变化(曲线表示5年滑动平均)

Fig. 4 Interannual variations of (a) the hard rain days and (b) its anomalies from 1961 to 2005 over the northeastern part of China (curve denotes the 5-year running mean)

3.2 年代际变化特征

东北暴雨的出现还存在着明显的年代际变化特征,且这种特征还具有显著的地域特点(图5),1960年代暴雨整体上偏多,尤其是辽宁平均每年偏多0.2~0.6 d,内蒙古东部和黑龙江的东北部和西北部偏少,对偏多和偏少的贡献以区域性暴雨的变化为最大。1970年代除东北地区西北部等个别地方正常稍多外,东北大部暴雨偏少,尤其是辽宁中东部,吉林和黑龙江中部平均每年可偏少0.2~0.8 d,偏少的原因是区域性暴雨和大范围暴雨明显偏少,而局地暴雨甚至有所增加。1980年代暴雨整体上偏多,但变化幅度不大,其中区域性暴雨对东北中南部暴雨增多贡献最大,而局地暴雨对西北部贡献最大。1990年代东北大部暴雨偏多,辽宁北部和吉林东南部偏多0.2 d以上,主要原因是该区域大范围暴雨增多,但辽东半岛偏少0.2~0.6 d,主要原因是区域性和大范围暴雨均减少。2001~2005年东北大部暴雨偏少,尤其是东北西部,包括内蒙古东部、辽宁、吉林和黑龙江的西部平均每年偏少0.2~0.6 d,吉林东北部和黑龙江东部偏少0.2 d左右,并以局地暴雨的减少贡献最大,只有黑龙江中北部有所增加(也主要是受局地暴雨增加影响)。

仔细分析各类暴雨对东北暴雨年代际变化的影响发现,不同类型暴雨对东北不同地区暴雨年

代际变化的贡献也有所不同,一般来说,影响辽宁、吉林中南部和黑龙江南部暴雨年代际变化的主要因素是区域性和大范围暴雨的变化,而在东北西部、北部和东北部,则是以局地暴雨的年代际变化起主要作用。但从整体上看是以区域性和大范围暴雨的变化对全区域暴雨的年代际变化贡献最大。

4 影响东北暴雨的主要天气系统

按照郑秀雅等(1992)的分析,影响东北暴雨的天气系统可分为4类,即台风、冷涡、气旋和切变。台风按其移动路径又可以分为消失台风、东转台风和北上台风;气旋按其产生源地又可分为蒙古气旋、华北气旋和江淮气旋,前者称为北方气旋,后两者称为南方气旋;冷涡按其出现位置也可分为北涡、中涡和南涡;切变包括切变线、冷锋和副高后部(当西太平洋副高偏北时,受到副高西侧、西北侧或北侧的槽线、切变线或急流锋区的影响而产生暴雨)。根据所得到的东北地区200个测站45年来的暴雨日历,按照影响东北地区暴雨的天气系统分类标准,普查1961~2005年逐日天气图后,总结出东北地区各类暴雨与其影响天气系统之间的关系如表1。

从表1可以分析出如下一些基本结论:1)东

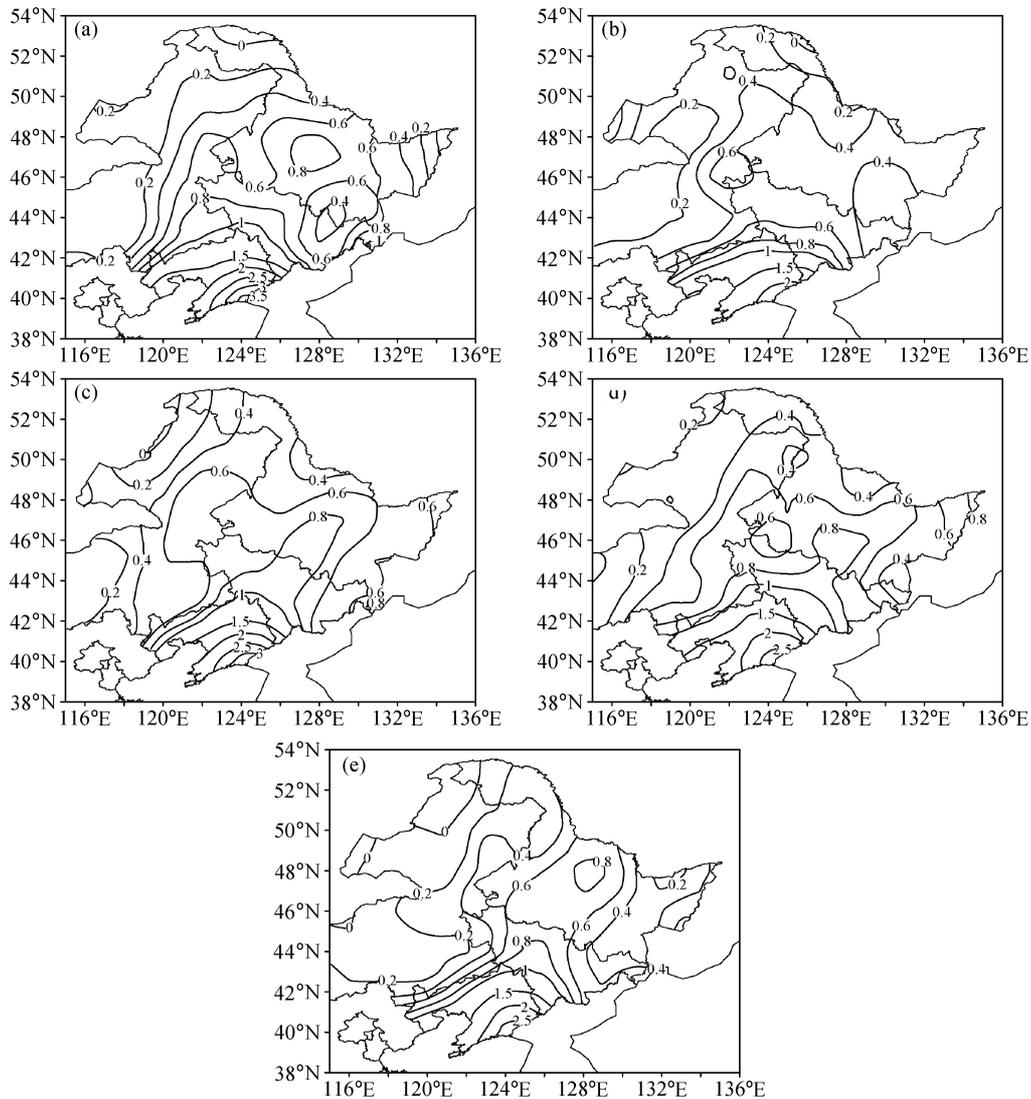


图5 东北地区暴雨日年代际变化的空间分布 (单位: $d \cdot a^{-1}$): (a) 1960年代; (b) 1970年代; (c) 1980年代; (d) 1990年代; (e) 2001~2005年平均

Fig. 5 Spatial distributions of the inter-decadal variation of the hard rain days ($d \cdot a^{-1}$) over the northeastern part of China: (a) The 1960s; (b) the 1970s; (c) the 1980s; (d) the 1990s; (e) annual mean from 2001 to 2005

北地区出现的局地暴雨大多数是由东北冷涡和切变造成的,分别可占局地暴雨的42.8%和39.2%,冷涡局地暴雨中以中涡和北涡居多,切变局地暴雨中以切变线和冷锋暴雨为主。由气旋和台风造成的局地暴雨所占比例不是很高(不到20%),台风局地暴雨更是仅占总数的1.4%,气旋局地暴雨中,以蒙古气旋贡献最大,占气旋局地暴雨的将近2/3,华北气旋次之,江淮气旋所占比例极小。2) 区域性暴雨中,虽然仍以切变暴雨和冷涡暴雨为主(分别可占区域性暴雨的37.2%和35.8%),但两者所占比例与局地暴雨相比均有所下降,切

变区域性暴雨中,副高后部所占比例明显上升,超过了切变线和冷锋。与局地暴雨相比,气旋和台风影响造成的区域性暴雨比例有所上升,两者相加超过总数的1/4,气旋区域性暴雨中,南方气旋(华北气旋和江淮气旋)所占比例明显上升,超过了北方气旋(蒙古气旋),而台风区域性暴雨中则以北上台风为主。3) 大范围暴雨中,台风、气旋、切变和冷涡所占比例大致相当(分别占21.2%、27.1%、24.7%和27.1%),对大范围暴雨的影响均有不可忽视的作用,与区域性暴雨相比,冷涡大范围暴雨和切变大范围暴雨所占比例继

表 1 东北地区各类暴雨与天气系统之间的关系

Table 1 The relationship between the different types of hard rain and synoptic systems over the northeastern part of China

影响系统	类型	大范围暴雨		区域性暴雨		局地性暴雨	
		个例数	百分比	个例数	百分比	个例数	百分比
台风	东转类	0	0	1	5.3%	8	34.8%
	北上类	15	83.3%	17	89.5%	9	39.1%
	消失类	3	16.7%	1	5.3%	6	26.1%
	合计	18	21.2%	19	6.7%	23	1.4%
气旋	蒙古气旋	3	13.0%	28	48.3%	173	63.6%
	华北气旋	14	60.9%	21	36.2%	87	32.0%
	江淮气旋	6	26.1%	9	15.5%	12	4.4%
	合计	23	27.1%	58	20.4%	272	16.6%
切变	副高后部	13	61.9%	40	37.7%	62	9.6%
	切变线	5	23.8%	39	36.8%	303	47.0%
	冷锋	3	14.3%	27	25.5%	279	43.3%
	合计	21	24.7%	106	37.2%	644	39.2%
冷涡	北涡	4	17.4%	39	38.2%	241	34.2%
	中涡	17	73.9%	57	55.9%	412	58.5%
	南涡	2	8.7%	6	5.9%	51	7.2%
	合计	23	27.1%	102	35.8%	704	42.8%

续下降,而台风和气旋的比例明显上升,尤其是台风影响的比例上升最为显著,在台风造成的大范围暴雨中,以北上类台风的影响贡献最大,消失类台风也具有不可忽视的作用,东转类台风一般不会造成大范围暴雨。切变大范围暴雨中,副高后部切变所占比例上升至60%以上。气旋大范围暴雨中,华北气旋所占比例最高,江淮气旋次之,南方气旋对气旋大范围暴雨的贡献超过85%。值得一提的是,虽然45年来东北地区出现的85个大范围暴雨日中只有18个暴雨日是直接受台风的影响,但另有16个其他系统造成的大范围暴雨日与台风水汽的间接影响有密切关联,即有34个大范围暴雨日与台风影响有关,占总数的40%,因此台风的直接和间接影响对东北大范围暴雨来说是至关重要的。

从以上分析可以得出,在东北地区出现的局地暴雨中,北方天气系统的影响贡献最大,包括东北冷涡、切变线、冷锋和蒙古气旋等,而在东北地区出现的区域性和大范围暴雨中,与低纬和副热带地区相联系的南方天气系统影响的比例明显增加,特别是大范围暴雨过程多数是由台风、华北气旋、江淮气旋和副高后部切变等天气系统造成的,即使是东北冷涡影响一般也存在着台风

水汽的输入或地面南方气旋的配合。因此,东北地区出现的区域性和大范围暴雨主要是西风带、副热带和热带环流系统相互作用的结果。

5 结论

本文利用东北三省和内蒙古东部200个测站1961~2005年的逐日降水资料,分析了东北地区夏季暴雨的空间分布特征和时间变化规律,以及各类暴雨与天气系统之间的气候统计关系,并得到如下一些结论:

(1) 在东北地区出现的暴雨中,局地暴雨最多,约占80%,区域性暴雨次之,约占15%,大范围暴雨较少,约占5%,但大范围暴雨和区域性暴雨与洪涝灾害的关系最为密切。

(2) 东北暴雨出现的空间差异十分明显,暴雨分布由东北地区的东南部向西北部递减的地域特征十分明显,辽宁东南部平均每年每站可出现暴雨日数在3d以上,而东北地区的西北部只有0.2d左右。大多数区域性暴雨和大范围暴雨主要集中在东北的南部和中部地区,相比之下,局地暴雨的空间分布范围却比较广,地域差异也相对较小。在暴雨量构成方面,东北的西部、北

部和东北部以局地暴雨为主,而在南部、中部和东南部则以区域性和大范围暴雨的贡献为最大。

(3) 东北暴雨在时间分布上具有较大的年际变率和明显的阶段性变化特征,多暴雨和少暴雨的出现存在着 11~12 a 左右的低频变化周期。1980 年代初东北地区气候开始变暖以来,暴雨出现的年际变率有明显增大的趋势,而 1990 年代中期东北地区气温开始显著上升之后,暴雨发生的次数明显减少,但平均每次暴雨的强度却有所增加,这些似乎是东北暴雨对区域气候变暖的主要响应特征。

(4) 东北地区出现的局地性暴雨中,以北方天气系统的影响贡献最大,包括东北冷涡、切变线、冷锋和蒙古气旋等,而在东北地区出现的区域性和大范围暴雨中,与低纬和副热带地区相联系的南方天气系统影响的比例明显增加,特别是大范围暴雨过程多数是由台风、华北气旋、江淮气旋和副高后部切变等天气系统造成的,即使是东北冷涡影响也存在着台风水汽的输入或地面南方气旋的配合。

参考文献 (References)

鲍名, 黄荣辉. 2006. 近 40 年我国暴雨的年代际变化特征 [J]. 大气科学, 30 (6): 1057-1067. Bao Ming, Huang Ronghui. 2003. Characteristics of the interdecadal variations of heavy rain over China in the last 40 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1057-1067.

姜学恭, 孙永刚, 沈建国. 2001. 一次东北冷涡暴雨过程的数值模拟试验 [J]. 气象, 27 (1): 25-30. Jiang Xuegong, Sun Yonggang, Shen Jianguo. 2001. A numerical simulation and contrast test on a northeast vortex rainstorm [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 27 (1): 25-30.

乔枫雪, 赵思雄, 孙建华. 2007. 一次引发暴雨的东北低涡的涡度和水汽收支分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 397-412. Qiao Fengxue, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2007. Study of the vorticity and moisture budget of a northeast vortex producing heavy rainfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 397-412.

寿亦章, 许建民. 2007. “05.6” 东北暴雨中尺度对流系统研究 I: 常规资料和卫星资料分析 [J]. 气象学报, 65 (2): 160-170. Shou Yixun, Xu Jianmin. 2007. The rainstorm and mesoscale convective systems over northeast China in June 2005 I: A synthetic analysis of MCS by conventional observations and satellite data [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (2): 160-

170.

孙风华, 袁健, 路爽. 2006. 东北地区近百年气候变化及突出检测 [J]. 气候与环境研究, 11 (1): 101-108. The change and test of climate in northeast China over the last 100 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (1): 101-108.

孙力, 安刚. 2001. 1998 年松嫩流域东北冷涡大暴雨过程的诊断分析 [J]. 大气科学, 25 (3): 342-354. Sun Li, An Gang. 2001. A diagnostic study of northeast cold vortex heavy rain over the Songhuajiang-Nenjiang River basin in summer of 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (3): 342-354.

孙力, 安刚, 高枫亭, 等. 2002. 1998 年夏季嫩江和松花江流域东北冷涡暴雨的成因分析 [J]. 应用气象学报, 13 (2): 156-162. Sun Li, An Gang, Gao Zongting, et al. 2002. A composite diagnostic study of heavy rain caused by the northeast cold vortex over Songhuajiang-Nenjiang River basin in summer of 1998 [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (2): 156-162.

孙力, 沈柏竹, 安刚. 2003a. 中国东北地区地表干湿状况的变化及趋势分析 [J]. 应用气象学报, 14 (5): 542-552. Sun Li, Shen Baizhu, An Gang. 2003a. A study of the variation and tendency of surface dry and wet state of northeast area in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14 (5): 542-552.

孙力, 安刚, 唐晓玲. 2003b. 东北亚地区夏季 850 hPa 南风异常与东北旱涝的关系 [J]. 大气科学, 27 (3): 425-434. Sun Li, An Gang, Tang Xiaoling. 2003b. Relationship between the northeast Asian summer south wind anomaly and the precipitation in northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (3): 425-434.

Sun Li, Shen Baizhu, Gao Zhongting, et al. 2007. The impacts of moisture transport of East Asian monsoon on summer precipitation in northeast China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 24 (4): 606-618.

陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225. Tao Shiyun. 1980. Chinese Rainstorm [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 225.

王东海, 钟水新, 刘英, 等. 2007. 东北暴雨的研究 [J]. 地球科学进展, 22 (6): 549-560. Wang Donghai, Zhong Shuixin, Liu Ying, et al. 2007. Advances in the study of rainfall in northeast China [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (6): 549-560.

许秀红, 王承伟, 石定朴, 等. 2000. 1998 年盛夏嫩江、松花江暴雨过程中尺度雨团特征 [J]. 气象, 26 (10): 35-40. Xu Xiuhong, Wang Chengwei, Shi Dingpu, et al. 2000. The features of meso-scale rain clusters over Nenjiang and Songhuajiang in 1998 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 26 (10): 35-40.

杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 2008. 中国年极端降水事件的时

- 空分布特征 [J]. 气候与环境研究, 13 (1): 75 - 83. Yang Jinhua, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (1): 75 - 83.
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2001. 1998 年嫩江、松花江流域持续性暴雨的环流条件 [J]. 大气科学, 25 (4): 567 - 576. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2001. A study of excessively heavy rainfall in Songhuajiang - Nenjiang River valley in 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (4): 567 - 576.
- Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2007. Study on cut-off low pressure systems causing flood in northeast Asia [J]. Meteorology and Atmosphere Physics, 96: 159 - 180.
- 郑秀雅, 张廷治, 白人海. 1992. 东北暴雨 [M]. 北京: 气象出版社, 1 - 7. Zheng Xiuya, Zhang Tingzhi, Bai Renhai. 1992. The Heavy Rain over Northeast China [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1 - 7.