

陈东辉, 佟晓辉, 郭刚, 等. 2020. 东北地区夏季不同等级降水变化特征及小雨雨量减少成因分析 [J]. 气候与环境研究, 25(5): 531–542. CHEN Donghui, TONG Xiaohui, GUO Gang, et al. 2020. Trends in Summer Precipitation and Causes of Decreasing Light Rain Precipitation in Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (5): 531–542. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19185

东北地区夏季不同等级降水变化特征及小雨雨量减少成因分析

陈东辉¹ 佟晓辉¹ 郭刚¹ 李德帅² 刘达³

¹ 31440 部队, 沈阳 110027

² 93995 部队, 西安 710300

³ 水利部长江水利委员会网络与信息中心, 武汉 430010

摘要 利用 1961~2017 年我国东北地区 96 个站点逐日降水、相对湿度和气温等资料, 运用趋势分析、Mann-Kendall 突变检验等方法, 分析了东北地区夏季小雨、中雨、大雨、暴雨的气候变化特征, 并对东北地区小雨量减少进行了成因分析, 得出主要结论如下: 东北地区夏季总降水量与各量级降水频率和贡献率均呈显著的正相关, 总降水量的多寡受大雨频率及贡献率的影响最为显著。小雨量和中雨量的减少是导致东北地区夏季总降水量减少的主要原因, 暴雨量受暴雨贡献率增加影响呈增加趋势。小雨量和小雨贡献率在 1993 年前后出现了年代际突变, 小雨贡献率的突变是造成小雨量年代际突变的内在因素。东北地区总降水量呈减少趋势的站点有 72 个; 小雨量呈减少趋势的站点有 85 个, 显著减少的站点数达到 25 个; 中雨量呈减少趋势的站点有 70 个, 显著减少的站点只有 9 个; 大雨量呈增加与减少趋势的站点数相当; 而暴雨量呈增加趋势的站点数大于减少的站点数。从云形成机制角度出发, 分别讨论大气水汽、温度、气溶胶浓度变化对东北地区小雨量减少的影响。结果表明, 在全球变暖背景下东北地区气温增加和气溶胶浓度增加是导致该地区小雨量减少的主要原因。

关键词 小雨 气溶胶 降水频率 降水贡献率 突变 气候变暖

文章编号 1006-9585(2020)05-0531-12

中图分类号 P426.6

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19185

Trends in Summer Precipitation and Causes of Decreasing Light Rain Precipitation in Northeast China

CHEN Donghui¹, TONG Xiaohui¹, GUO Gang¹, LI Deshuai², and LIU Da³

¹ PLA 31440 Troop, Shenyang 110027

² PLA 93995 Troop, Xi'an 710300

³ Network and Information Center, Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010

Abstract Based on the daily precipitation, relative humidity, and air temperature data during 1961–2017 from 96 stations in Northeast (NE) China, through trend analysis and the Mann-Kendall test method, the climate change characteristics of light rainfall, moderate rainfall, heavy rainfall, and torrential rainfall in summer and the causes of the decreasing trend of light rainfall frequency over NE China are analyzed. The main results are as follows: A significant

收稿日期 2019-12-12; 网络预出版日期 2020-07-08

作者简介 陈东辉, 男, 1988 年出生, 硕士, 主要从事现代天气预报技术与极端天气气候变化研究。E-mail: chendh13@lzu.edu.cn

资助项目 军内重点科研项目 BB201810023, 湖北自然科学基金 2017CFB138

Funded by Key Scientific Research Projects in the Military (Grant BB201810023), Hubei Natural Science Foundation (Grant 2017CFB138)

positive correlation exists between the total precipitation over NE China and all types of precipitation frequency and contribution, and the total precipitation is mainly influenced by the frequency and contribution of heavy rain. The decrease in light rainfall and moderate rainfall is the main cause of the decrease in total precipitation in summer over NE China, and the torrential rainfall influenced by the increase in the torrential rainfall contribution shows a rising tendency. Furthermore, an interdecadal abrupt change in light rainfall and light rainfall contribution occurred around 1993, and the interdecadal abrupt change in light rainfall contribution has resulted in the interdecadal abrupt change in light rainfall. A certain decreasing trend of the total precipitation at 72 stations over NE China 85 stations showed a certain decreasing trend of the light rainfall, among which 25 stations show a significant decreasing trend; moreover, 70 stations show a certain decreasing trend of moderate rainfall, among which only nine stations show a significant decreasing trend; the number of stations that show an increasing trend of heavy rainfall is comparable to the number of those that show a decreasing trend, and the number of stations that show an increasing trend of the torrential rainfall is greater than the number of those that show a decreasing trend. Regarding cloud formation, the effects of the changes in water vapor, temperature, and aerosol concentration on the reduction in light rainfall in NE China are analyzed. The results show that the global temperatures rising and increased aerosol concentration are the main causes of the decreasing light rainfall in NE China.

Keywords Light rainfall, Aerosol, Precipitation frequency, Precipitation contribution, Abrupt change, Global warming

1 引言

降水是描述天气和气候及其变化的重要参数,我国地处东亚季风区,自然条件复杂,气候变化剧烈,夏季降水类型、降水量的多寡和雨带分布均受到东亚夏季风的控制(竺可桢, 1934)。亚洲和非洲季风由于全球大气环流形势在 20 世纪 70 年代末的跃变而减弱,并一直维持至 2000 年前后(Wang, 2001; 郭其蕴等, 2003)。东亚季风的减弱导致我国长江中下游地区总降水量和极端降水事件均呈现明显增加趋势,北方地区则呈现明显减少趋势(陈隆勋等, 2004; Ding and Sun, 2004; 黄荣辉等, 2006)。此外,我国夏季降水南北方变化趋势的差异还与夏季欧亚大陆高压增强、西太平洋副热带高压减弱及其所导致的夏季风在长江中下游地区停留时间过长,在我国北方停留时间较短等大气环流异常密切相关(Wang and Zhou, 2005)。王绍武(2001)指出,影响我国夏季降水的主要因子(如太平洋海温、青藏高原积雪、东亚季风、阻塞高压和西太平洋副高等),在过去的几十年中呈现出显著的年代际变化。这使得研究上述因子对我国夏季降水的影响成为一项较为困难的事情,目前尚难形成定论。因而利用历史资料分析我国各地区降水对气候变化的响应,是目前的主要研究方法。例如,王颖等(2006)指出我国年降水日已明显减少,且降水日的减少显著多于降水量的减少;符娇兰等(2008)、宁亮和钱永甫(2008)指出我国长江中

下游和西北地区的降水日及雨量均有增加趋势,而华北和四川盆地等地区降水日及雨量有减少趋势。我国东部、华北和西北地区不同量级降水变化特征显著,众多学者也对其进行了相关研究(Gong and Ho, 2002; Gong et al., 2004; Endo et al., 2005; Qian and Lin, 2006),如刘海文和丁一汇(2010)、李红梅等(2008)对我国华北和东部地区降水指标年代际跃变研究的结果,较好地印证了 20 世纪 70 年代末的全球气候跃变;施雅风等(2003)、马柱国和符淙斌(2006)、Wang and Zhou(2005)的研究结果均表明我国西北地区的降水量有明显增加趋势。

与此同时,关于我国小雨的研究也取得了重要进展。Qian et al.(2007)和 Liu et al.(2011)研究发现我国小雨呈显著减少趋势, Fu et al.(2008)和 Huang and Wen(2013)认为气候变暖是小雨频次减少的重要原因。Ramanathan et al.(2001)指出气溶胶可以通过参与云中的微物理过程来改变云的物理特征,从而影响降水,而中雨以上量级降水与对流活动关系密切(杜振彩等, 2011),相比之下强度较小的降水则更多地与云的微物理过程有关,受气溶胶、大气中水汽含量等因素影响显著(Rosenfeld et al., 2007, 2008; Qian et al., 2009)。段婧和毛节泰(2008)、陈思宇等(2012)、李雄和苏志(2014)对我国不同地区高浓度气溶胶明显抑制小雨的观点,进行了合理、有力的论证。

我国东北地区包含辽宁、吉林、黑龙江三省及

内蒙古自治区东部四盟，属干温带大陆性季风气候区，当地夏季降水受副高脊线、东北冷涡活动和北极偶极子异常等影响，呈现出显著的年代际变化特征（沙万英和郭其蕴, 1998; 何金海等, 2006; 武炳义等, 2008）。贾晓龙等（2003）、李邦东等（2013）研究表明，东北地区降水事件有向极端化发展的迹象。综合以上分析可知，探讨区域降水对全球气候变化响应具有重要意义，但上述研究大多是针对全国范围降水日及降水量的特征分析，在论述我国不同量级降水特点时也是分区域介绍，但不够详尽，对部分区域的细致研究也多是针对我国东部、华北、西北等热点地区，而针对我国东北地区的相关研究还未见报道。因而当前亟需探讨我国东北地区各量级降水变化的气候特征及其未来发展演变趋势，深入剖析全球增暖和气溶胶浓度增加对该地区不同量级降水的作用。

2 资料与方法

2.1 资料

本文收集了中国国家气象信息中心发布的我国东北地区（38°N~54°N，115°E~135°E）1961~2017年夏季（6~8月）96个站点逐日降水、相对湿度和气温数据（http://www.nmic.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY.html [2018-06-23]），并剔除了存在数据缺测的部分站点。本文参考中国气象局的标准（http://www.cma.gov.cn/kppd/kppdqxwq/kppdjckp/201211/t20121124_191904.html [2011-02-11]），把24 h降水分为小雨（0.1~9.9 mm/d）、中雨（10.0~24.9 mm/d）、大雨（25.0~49.9 mm/d）、暴雨（大于50 mm/d）4个等级，分别统计各强度降水的变化。

利用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 发布的 Interim Reanalysis (ERA-I) 可降水量月平均资料 (Total column water vapour)，选取 1981~2017 年

（38°N~54°N，115°E~135°E）范围内的再分析资料，空间分辨率 0.703°（纬度）×0.702°（经度），以计算东北地区大气水汽逐年的变化情况。

地面能见度与气溶胶光学厚度有较好的反向对应关系（Qiu and Yang, 2000），被广泛应用于研究气溶胶与降水的关系（段婧和毛节泰, 2008; 陈思宇等, 2012; 李雄和苏志, 2014）。1980年以前能见度以等级为单位，无法准确换算成以 km 为单位的现行记录，因而本文选用中国国家气象信息中心发布的我国东北地区 1981~2010 年能见度资料。为消除相对湿度对能见度影响，将相对湿度在 40%~99% 之间的资料均换算为等效能见度（Rosenfeld et al., 2007），方法如下：

$$VIS/VIS_{dry} = 0.26 + 0.4285 \lg(100 - RH), \quad (1)$$

其中，VIS 为实际能见度（单位：km），VIS_{dry} 为等效能见度（单位：km），RH 为以百分数记录的相对湿度值。

中分辨率成像光谱仪（MODerate resolution Imaging Spectro-radiometer, MODIS）L3 大气标准数据月产品 MOD08-M3（版本 6.1，<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov> [2018-12-24]）中的联合暗像元法和深蓝算法的陆海月均气溶胶光学厚度数据。空间分辨率为 1°（纬度）×1°（经度），时间为 2001~2010 年的夏季。

2.2 主要方法

参考刘海文和丁一汇（2010）、李红梅等（2008）设计的降水特性指标（见表 1），来分析东北地区不同量级降水频率和各类降水贡献率，从定义可知 4 类降水贡献率值 57 年之和等于 1。

本文所用的方法主要有相关性分析、Mann-Kendall 突变分析、趋势分析等，其中趋势分析分别采用世界气象组织推荐并已广泛应用的 Mann-Kendall 趋势检验法（Kendall and Gibbons, 1981; Su et al., 2005）和趋势系数法（施能等, 2003）。文中涉及趋势变化时，用上述两种方法分别进行检验，

表 1 东北地区各类降水特性指标

Table 1 Characteristic indexes of different types of precipitation in Northeast (NE) China

降水特性指标	定义
某站点夏季降水量/mm	该站6~8月（92 d）降水量总和
东北地区夏季降水量/mm	96站夏季降水量的算术平均值
各类降水频率/d ⁻¹	96站对应降水类型发生次数的算术平均值除以夏季天数（92 d）
各类降水贡献率	96站夏季对应类型降水量的和除以96站57年夏季总降水量（1981663 mm）

当两种趋势分析方法均通过 t 检验的 0.05 显著水平时, 才认为该变化存在确定趋势。

3 结果与分析

3.1 降水特性指标的相关性分析

夏季总降水量是由各个级别降水累加组成的, 计算各量级降水频率、贡献率与总降水量的相关系数, 可以了解总降水量与哪一指标关系最为密切。1961~2017 年东北夏季总降水量与 4 类降水频率的相关系数分别为 0.568、0.825、0.930、0.829, 与 4 类降水贡献率相关系数分别为 0.627、0.831、0.910、0.789。由此可见东北夏季总降水量与各量级降水频率、贡献率均呈正相关关系, 且相关系数均通过了 0.01 的显著水平。该结果表明, 贡献率越大, 则对应类别的降水量就越大。因此, 无论哪一等级降水, 其发生次数越多, 贡献率越大, 则东北夏季降水量就越多。从相关系数值来看, 大雨降水频率及贡献率与总降水量相关系数都是最大的, 因此, 东北夏季降水的多寡受大雨频率及贡献率的影响最为显著。暴雨贡献率与总降水量相关系数值小于中雨与总降水量相关系数值, 这与刘海文和丁一汇 (2010) 指出的暴雨贡献率对华北地区夏季降水影响十分显著的结论不同。可见, 不同量级降水变化特征有较为明显的区域气候特点。

3.2 降水特性指标的时间变化特征分析

3.2.1 降水特性指标的长期变化趋势

东北地区夏季总降水量和各量级降水量年代际变化如图 1 所示, 均呈现出明显的年代际变化特征。从长期变化趋势看, 小雨量呈减少趋势, 该减少趋势达到 0.01 显著水平; 中雨量也呈减少趋势, 仅达到了 Mann-Kendall 趋势检验法中的 0.05 显著水平, 大雨、暴雨量无明显增减趋势。对比图 1a、1d 可见, 东北夏季总降水量与大雨降水量时间变化曲线起伏基本一致, 所以东北夏季总降水量的多寡受大雨降水量影响最为显著。

东北地区夏季各量级降水频率变化如图 2 所示, 小雨频率是 4 类降水中最高的, 且远高于其他量级, 可见东北地区夏季降水以小雨日为主。从线性趋势来看, 暴雨频率线性趋势系数为小数点后 5 位无有效数字, 即暴雨频率在 1961~2017 年基本无变化。小雨频率下降幅度最大, 下降趋势通过了 0.01 显著水平, 中雨频率同中雨量下降趋势一致, 达到

了 Mann-Kendall 趋势检验法中的 0.05 显著水平。大雨频率也无显著升降趋势。

对各量级降水贡献率进行同样分析 (图略), 可以发现小雨贡献率下降幅度最大, 下降趋势通过了 0.01 显著水平, 中雨、大雨和暴雨贡献率无明显升降趋势。分别对 1961~2017 年小雨、中雨、大雨和暴雨贡献率求和, 它们的值分别是 22.8%, 32.3%, 26.9%, 18.0%。可见, 东北地区中雨对总降水量的贡献率最大, 几乎占到总降水量的 1/3。

通过以上各降水特性指标的长期变化趋势分析可以看到: 东北地区夏季总降水量呈减少趋势, 而导致总降水量减少的主要原因是小雨量的显著减少和中雨量的减少; 小雨量减少表现为小雨频率和贡献率的显著性减少, 中雨量减少则主要是因为中雨频率的减少。

3.2.2 降水特性指标的年代际突变检验

对东北地区夏季各降水特性指标的时间序列进行 Mann-Kendall 气候突变检验。鉴于目前突变检验方法对长时间序列的突变检验有一定局限性, 本文设定更为严格的条件, 即检验结果中只出现一个交叉点, 且该交叉点又位于 0.05 显著水平范围内, 才认为该交叉点对应的时间是该时间序列的突变时间。按此标准对东北地区各降水特性指标进行突变检验, 只有小雨降水量和小雨贡献率时间序列存在突变现象, 如图 3 所示, 其他各降水特性指标均不存在明显突变时间 (图略)。从图 3a 可见, 东北地区小雨降水量在 1993 年附近出现了突变点, 1993 年之前表现为小幅波动的渐变特征, 而 1993 年以后则表现为显著下降的跃变趋势。在小雨频率没有出现相应突变的情况下, 对小雨贡献率进行分析, 图 3b 所示的小雨贡献率也是在 1993 年附近出现突变点, 且两个突变点均达到 0.05 显著水平。所以我们可以认为小雨贡献率的突变是造成东北地区夏季小雨降水量年代际突变的内在因素, 即东北地区小雨降水量的减少不是小雨日数减少导致的, 而是每次小雨降下的雨量减少导致的。可见东北地区小雨降水量减少的内在因素与王颖等 (2006) 指出我国华北雨日减少比雨量减少明显的多的结论是有不同的。

3.3 总降水量和各量级降水量空间变化特征分析

对东北地区各站点夏季总降水量和各量级降水量 1961~2017 年长期变化趋势进行分析。图 4a 为各站点总降水量趋势系数变化, 可见, 东北地区

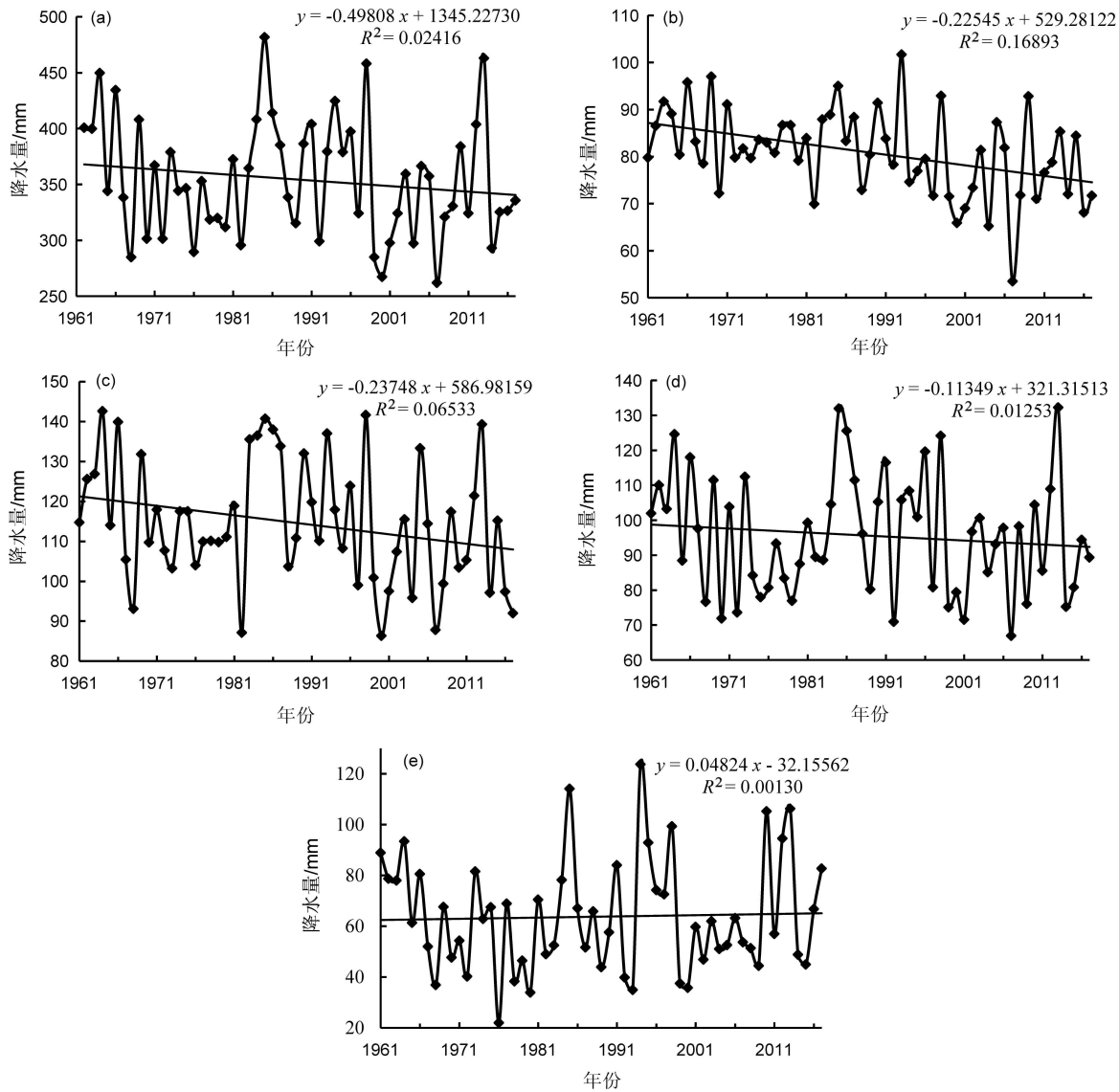


图1 东北地区 1961~2017 年夏季降水特性的时间序列及其趋势 (R 为相关系数): (a) 总降水量; (b) 小雨降水量; (c) 中雨降水量; (d) 大雨降水量; (e) 暴雨降水量

Fig. 1 Time series and trends of summer precipitation in NE China from 1961 to 2017 (R denotes correlation coefficient): (a) Total precipitation; (b) light rain precipitation; (c) moderate rain precipitation; (d) heavy rain precipitation; (e) torrential rain precipitation

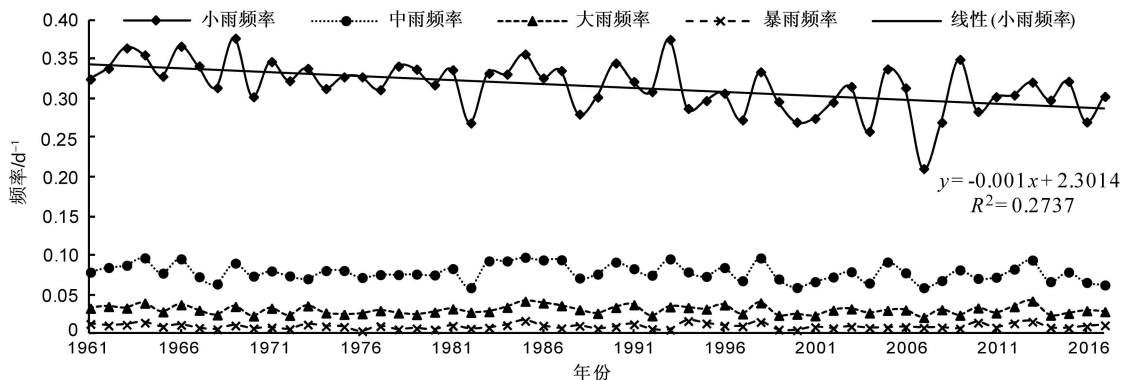


图2 东北地区 1961~2017 年夏季各量级降水频率时间序列及趋势

Fig. 2 Time series and trends of summer precipitation frequency in NE China from 1961 to 2017

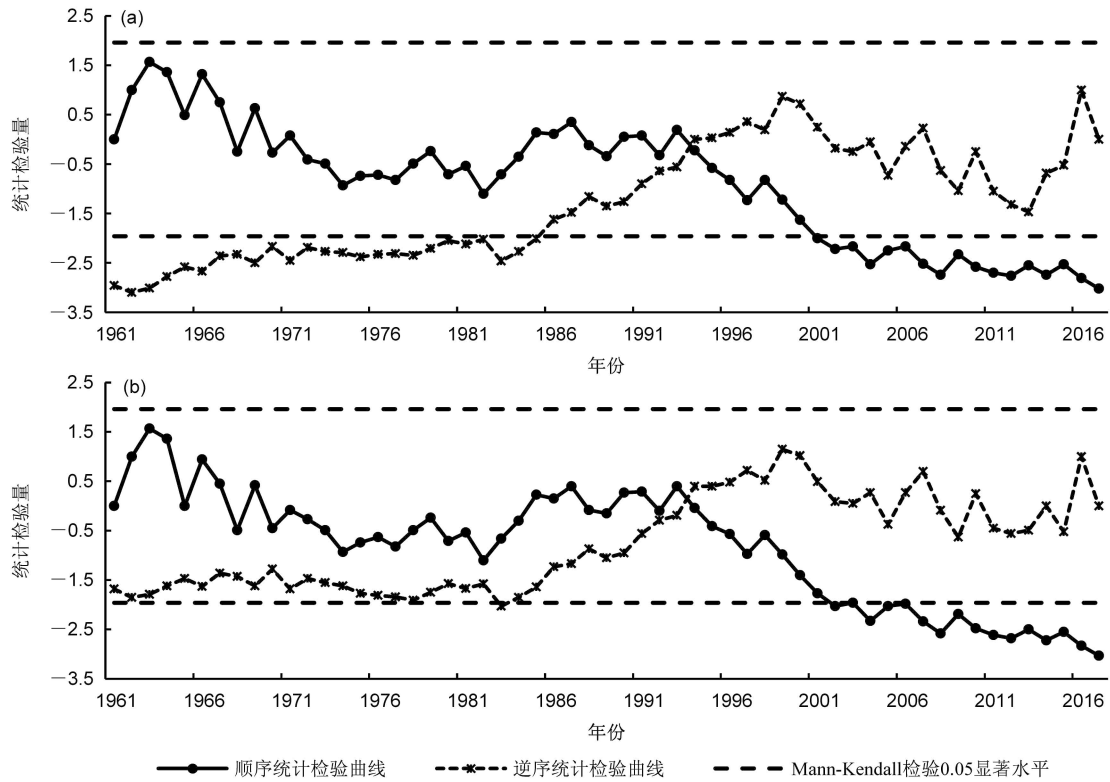


图3 东北地区1961~2017年夏季降水特性指标的突变检验:(a)小雨降水量;(b)小雨贡献率

Fig. 3 Mann-Kendall test results of summer precipitation characteristic indexes in NE China from 1961 to 2017: (a) Light rain precipitation; (b) light rainfall contribution

96个站点中有72个站点总降水量呈下降趋势,占比高达75.00%,即东北地区有3/4的站点总降水量表现为减少趋势。其中5个站点呈显著下降趋势,主要位于吉林省西部,白城、通榆、长岭站总降水量的显著下降是4个量级降水量都呈下降趋势导致的,而翁牛特旗站是大雨量显著下降导致的,长白站则是中雨量显著下降导致的。有24个站点总降水量表现为增加趋势,主要集中在内蒙古与黑龙江交界附近,但只有3个站点呈显著增加趋势,这3个站点的小、中、大雨量也都呈显著增加趋势。小雨降水量长期变化趋势(图4b)中有85个站点呈下降趋势,占比达到88.54%,显著下降的站点有25个。即东北地区大部分站点小雨量呈下降趋势,且有超过1/4的站点呈显著下降趋势。东北地区中雨量呈下降趋势(图4c)的站点有70个,占比为72.92%,显著下降的站点有9个,与小雨量相比大幅减少。大雨量呈增加趋势(图4d)的站点有46个,下降趋势的站点有50个,显著下降和增加的站点各有3个。而暴雨量呈增加趋势(图4e)的站点有55个大于呈下降趋势的站点数,显著增

加的站点有5个,无显著下降的站点。

3.4 东北地区小雨量减少的成因分析

通过上述分析可知东北地区小雨量长期变化呈显著下降趋势,96个站点中1/4以上的站点小雨量呈显著下降趋势,那么究竟是哪些原因导致了东北地区小雨量的显著下降呢?我们从云形成机制角度出发,分别讨论水汽条件、温度变化、气溶胶浓度变化对东北地区小雨量减少的影响。

3.4.1 东北地区大气水汽变化

图5为利用ECMWF发布的Interim Reanalysis (ERA-I)可降水量月平均资料,计算的东北地区夏季大气可降水量平均距平百分率时间序列及趋势。距平百分率=(实际值-同期历史平均值)/同期历史平均值,可见距平百分率是一个标准化的无量纲量,不同变量的距平百分率数值大小和正负可以相互比较。从图5长期变化趋势看,东北地区大气可降水量表现为明显的年代际变化特征。将大气可降水量距平百分率与总降水量、小、中、大、暴雨降水量距平百分率进行相关分析,相关系数分别为0.507、0.075、0.213、0.511、0.621,可见,大气

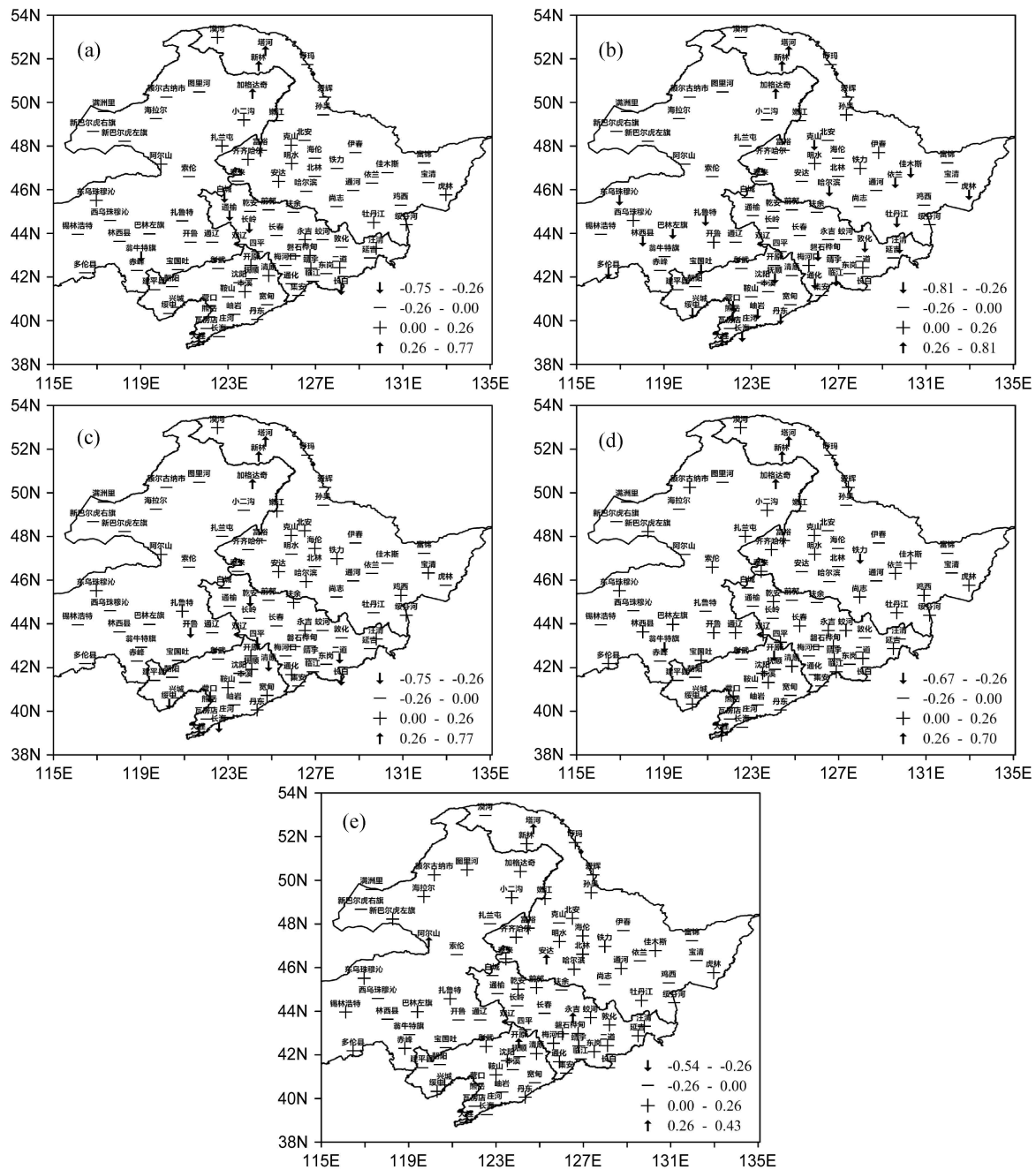


图4 东北地区1961~2017年夏季降水量变化趋势系数空间分布特征：(a) 总降水量；(b) 小雨降水量；(c) 中雨降水量；(d) 大雨降水量；(e) 暴雨降水量。↓表示有显著下降趋势，↑表示有显著增加趋势，-表示有下降趋势但不显著，+表示有增加趋势但不显著

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of summer precipitation trends in NE China from 1961 to 2017: (a) Total precipitation; (b) light rain precipitation; (c) moderate rain precipitation; (d) heavy rain precipitation; (e) torrential rain precipitation. ↓ indicates a significant decreasing trend, ↑ indicates a significant increasing trend, - indicates a nonsignificant decreasing trend, and + indicates a nonsignificant increasing trend

中的水汽与各降水量均呈正相关。其中大气可降水量距平百分率与总降水量、大雨量、暴雨量距平百分率相关系数达到了0.01显著水平，而小雨量和中雨量则未达到信度水平。由此可以看出，大雨、暴雨量受大气中水汽的影响显著，而小雨量则受大气水汽影响较小。且从图5大气水汽线性趋势看，

多年来东北地区大气可降水量基本维持在平均水平，无明显增加和减少趋势，由此说明东北地区夏季小雨量的减少可能并非由大气水汽异常导致，而应该另有原因。

3.4.2 东北地区大气温度变化

温度直接影响水汽凝结，温度升高影响可降水

云的凝结高度，使云量减少从而抑制小雨的形成 (Fu et al., 2008)。图 6 是对东北地区 1961~2017 年夏季平均气温进行突变检验的结果。20 世纪 80 年代中期以前，东北地区气温呈波动变化，增加趋势不明显，而 80 年代中期以后则表现为明显的上升趋势，气温变化由渐变趋势转为跃升趋势，在 1993 年前后发生了年代际突变。这与图 3 中小雨量和小雨贡献率出现突变的时间一致，可见全球气候变暖大背景下，东北地区区域性气温的增加，对东北地区小雨量产生了影响。在东北地区大气可降水量基本维持在平均水平的前提下 (图 5)，根据克拉伯龙-克劳修斯方程可知，温度升高会使大气的持水能力增强 (Trenberth et al., 2003)，因而同样水汽含量的空气在暖环境中比在冷环境中更难

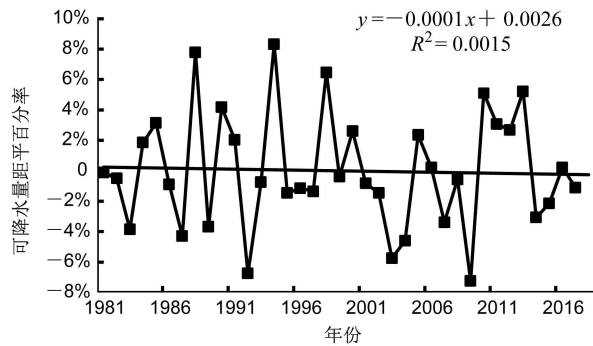


图 5 东北地区 1981~2017 年夏季大气可降水量距平百分率时间序列及趋势线

Fig. 5 Time series and trends of summer precipitable water vapor anomalies in NE China from 1981 to 2017

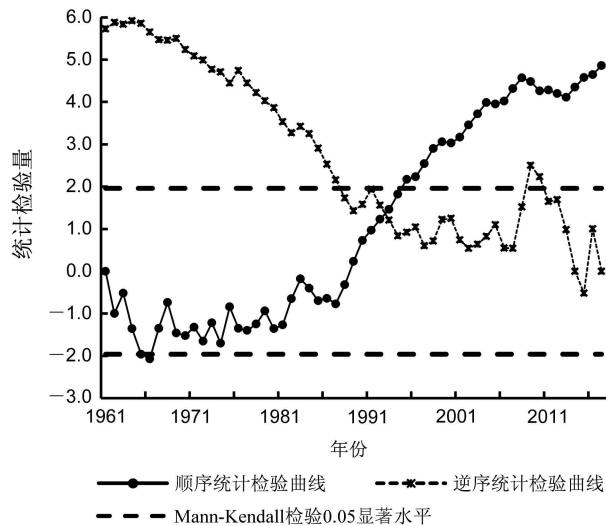


图 6 东北地区 1961~2017 年夏季平均气温的突变检验

Fig. 6 Mann-Kendall test of the average summer temperature in NE China from 1961 to 2017

凝结降水。

3.4.3 东北地区气溶胶浓度变化

有研究认为，气溶胶粒子可以作为云的凝结核或冰核，使大气中云滴数浓度增加从而减小云滴半径，抑制降水的发生 (Rosenfeld et al., 2008; Qian et al., 2009)。近年来，随着东北地区经济的快速发展，人为源气溶胶的排放量显著增加，王明星 (1999) 指出，在全球气溶胶排放中，人为源气溶胶对大气气溶胶光学厚度的贡献占到 50% 左右。图 7a 为东北地区 2001~2010 年夏季多年平均 MODIS 气溶胶光学厚度的空间分布特征，由图可见渤海海域及近岸是气溶胶光学厚度的大值区，海上气溶胶光学厚度在 1.2 以上，而内蒙古东北部气溶胶光学厚度相对较小，在 0.1~0.2 之间。图 7b 为东北地区各站点等效能见度空间分布，辽宁大部分站点等效能见度平均值在 15 km 以下，而内蒙古东北部各站点等效能见度平均值在 20 km 以上，与图 7a 对比，说明气溶胶光学厚度与能见度有很好的反向关系，即能见度可以作为表征气溶胶特性的替代资料。

在探索气溶胶对降水影响的研究中，段婧和毛节泰 (2008)、李雄和苏志 (2014) 采用分区对比的方法，即找到气溶胶光学厚度较低且多年来未出现大幅增加的区域，与气溶胶光学厚度较高、空气污染相对较重的区域进行对比，来分析气溶胶对降水的影响。本文采用类似方法，定义非污染地区 A (图 7b 所示)，其标准为：1) 各站点平均能见度大于 20 km；2) 能见度长期变化中无显著下降趋势；3) 能见度变率小于 0.1 km/a；4) 地理位置相近。为确定没有受人为气溶胶污染区域，定义上述较为严格的标准，符合条件的站点有 10 个。定义污染地区 B (图 7b 所示)，其标准为：1) 各站点平均能见度小于 15 km；2) 能见度长期变化呈显著下降趋势；3) 地理位置相近。符合上述条件的站点有 11 个，其中沈阳、本溪站 1981~2010 年能见度长期变化趋势中呈显著增加趋势，但考虑图 7a 中沈阳地区气溶胶光学厚度较大，且夏季多年平均能见度 10.04 km 较低，所以还是将沈阳站作为受污染地区代表站。而本溪站年平均能见度 14.34 km，其增加趋势变率小于 0.1 km/a，且距离沈阳很近，所以也将其作为受污染地区代表站。

将图 7b 与图 4b 小雨降水量变化趋势对比分析可见，A 区域 10 个站点小雨降水量均呈减少趋势，

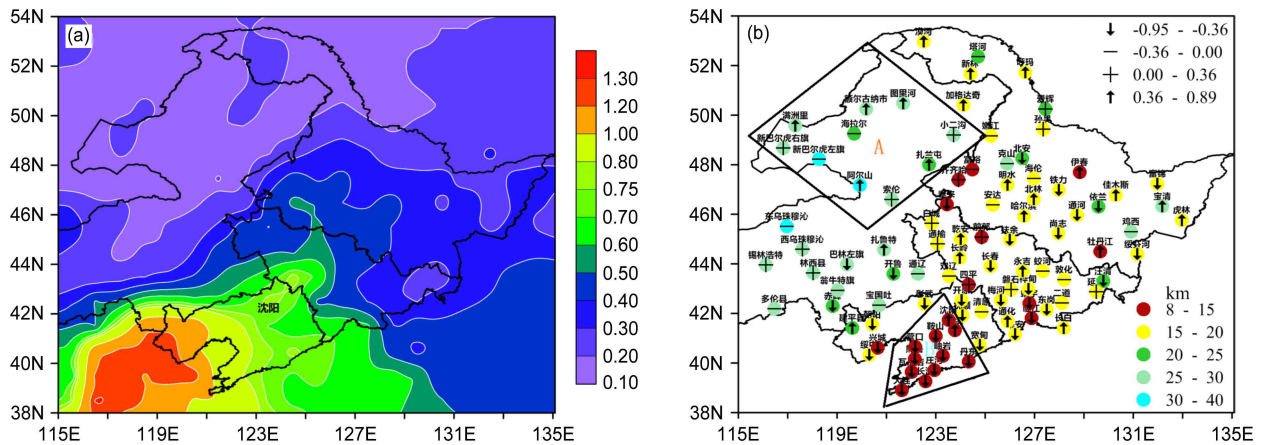


图7 (a) 东北地区 2001~2010 年夏季平均气溶胶光学厚度; (b) 1981~2010 年夏季等效能见度多年平均值及趋势系数空间分布 (↓表示有显著下降趋势, ↑表示有显著增加趋势, -表示有下降趋势但不显著, +表示有增加趋势但不显著)

Fig. 7 (a) Aerosol optical depth averaged in summer in NE China from 2001 to 2010; (b) multiyear average spatial distribution characteristics of visibility after correction and trend in summer in NE China from 1981 to 2010 (↓ indicates a significant decreasing trend, ↑ indicates a significant increasing trend, - indicates a nonsignificant decreasing trend, and + indicates a nonsignificant increasing trend)

但下降趋势均不显著, 该区域小雨降水量无显著增加和减少趋势说明这一地区气候背景较为稳定, 降水受人为气溶胶污染影响较小, 考虑该区域是经过严格限制条件确定的非污染区, 所以也可以认为该区域小雨降水量的整体减少趋势不能归因于气溶胶浓度的改变。B 区域 11 个站点小雨降水量也均呈减少趋势, 其中有 5 个站点小雨降水量呈显著减少趋势, 对应于 B 区域大部分代表站点能见度呈显著下降趋势, 这一变化进一步验证了 Albrecht 效应 (Albrecht, 1989), 即气溶胶增加会抑制降水, 也与李雄和苏志 (2014)、段婧和毛节泰 (2008) 的研究结论吻合。当然, 仅凭小雨量变化趋势与能见度变化趋势的空间分布特征, 不足以证明高浓度气溶胶导致东北地区小雨量的显著减少。下面对各站点能见度与小雨量变化进行相关分析。

由于降雨和气溶胶的影响是相互的, 它们还共同受其他要素影响。我们采用时间分离方法, 即如果当日 20:00 (北京时间, 下同) 至次日 20:00 雨量为小雨量级, 则将当日 20:00 能见度纳入统计范围, 把每年满足条件的样本进行算术平均, 得到 20:00 能见度年平均值作为小雨开始时年平均能见度, 进而对小雨量与小雨开始时能见度进行相关性统计, 如果统计分析表明它们相关, 显然, 更可能的情况是现在的气溶胶影响了未来的雨量。图 4b 中 B 区域的营口、熊岳、岫岩、丹东、长海 5 个站点小雨量呈显著减少趋势, 从表 2 所列相关系数可见, 小雨量显著下降的 5 个站点 20:00 能见度

表 2 B 区域站点 1981~2010 年 20:00 能见度与未来 24 h 小雨雨量相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the visibility at 2000 LST and the light rain precipitation of the following 24 hours in area B from 1981 to 2010

台站	相关系数	台站	相关系数
鞍山	-0.174	丹东	0.381*
沈阳	0.108	瓦房店	0.068
本溪	-0.142	长海	0.463**
营口	0.467**	庄河	-0.199
熊岳	0.317*	大连	-0.105
岫岩	0.151		

*0.05 显著水平; **0.01 显著水平。

与未来 24 h 小雨量呈正相关关系, 除岫岩外, 其他 4 个站点呈显著正相关关系, 即能见度减小 (气溶胶浓度升高) 对应雨量减少。B 区域中小雨量减少趋势不显著的其他站点雨量与能见度相关性有正有负, 相关系数均不显著。用同样方法对 A 区域站点进行相关性分析, 雨量与能见度相关系数更小, 且均不显著。

通过分区域的趋势对比分析和相关性分析, 我们发现能见度显著下降 (气溶胶浓度升高) 的污染地区与非污染地区相比, 污染地区小雨量呈显著减少趋势; 污染地区小雨量减少趋势显著的站点, 雨量与能见度呈显著的正相关关系, 即能见度减小对应雨量减少。这说明气溶胶浓度增加是东北地区小雨量显著减少的原因之一。

4 结论与讨论

本文利用东北地区 96 个站点逐日降水资料,分析了东北地区夏季小雨、中雨、大雨、暴雨雨量、频率及对总降水量贡献率的长期变化,归纳了东北地区夏季降水气候变化的区域特征,并进一步分析了东北地区小雨量减少的可能原因,得到以下主要结论:

(1) 1961~2017 年东北地区夏季总降水量与各量级降水频率、贡献率均呈正相关关系,总降水量的多寡受大雨频率及贡献率影响最为显著。暴雨贡献率与总降水量相关系数值小于中雨与总降水量相关系数值,这与同属我国北方的华北地区不同。

(2) 东北地区夏季总降水量呈减少趋势,小雨量的显著减少和中雨量的减少是导致总降水量减少的主要原因,小雨量减少表现为小雨频率和贡献率均显著减少,中雨量减少则主要是因为中雨频率的减少。暴雨降水量呈增加趋势,主要受暴雨贡献率增加影响。

(3) 东北地区小雨降水量和小雨贡献率在 1993 年前后出现了年代际突变,在小雨频率没有突变的情况下,小雨贡献率的突变是造成小雨降水量年代际突变的内在因素。

(4) 东北地区 96 个站点中有 3/4 的站点总降水量呈减少趋势,85 个站点小雨量呈减少趋势,显著减少的站点超过总站点数的 1/4。70 个站点中雨量呈减少趋势,显著减少的站点只有 9 个。大雨量增加与减少趋势的站点各占一半,而暴雨量呈增加趋势的站点数大于减少的站点数。

(5) 从降水形成机制角度出发,分别讨论了大气水汽、温度、气溶胶浓度变化对东北地区小雨量减少的影响。在大气可降水量基本维持在平均水平的前提下,东北地区区域性气温的增加对小雨量产生了影响。通过分区域的趋势对比分析和相关性分析,发现能见度显著下降(气溶胶浓度升高)的污染地区与非污染地区相比,污染地区小雨量呈显著减少趋势;污染地区小雨量减少趋势显著的站点,雨量与能见度呈显著的正相关关系,即能见度减小对应雨量减少,说明气溶胶浓度增加是东北地区小雨量显著减少的原因之一。

降水受多种气象要素影响,形成机制十分复杂,本文仅通过历史资料统计、趋势分析和相关性分析

给出了东北地区小雨量显著减少的原因是受气温升高和气溶胶浓度增加影响,这样的统计事实和分析结论有助于理解东北地区区域气候变化对全球气候变化的响应。而要全面解释东北地区小雨量显著减少的原因,还要从大气环流、水汽输送、各种尺度天气系统相互作用和人类活动的外强迫等诸多角度进行全面研究,这将是下一步的研究方向。

参考文献 (References)

- Albrecht B A. 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. *Science*, 245(4923): 1227-1230. doi:10.1126/science.245.4923.1227
- 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制 [J]. *气象学报*, 62(5): 634-646. Chen Longxun, Zhou Xiuji, Li Weiliang, et al. 2004. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62(5): 634-646. doi:10.11676/qxxb2004.062
- 陈思宇, 黄建平, 付强, 等. 2012. 气溶胶对我国中东部地区秋季降水的影响 [J]. *热带气象学报*, 28(3): 339-347. Chen Siyu, Huang Jianping, Fu Qiang, et al. 2012. Effects of aerosols on autumn precipitation over Mid-Eastern China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 28(3): 339-347. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2012.03.006
- Ding Y H, Sun Y. 2004. Changes in Asian summer monsoon and possible mechanism [J]. *Newsletter on Climate Change 2003/2004*: 47-49.
- 杜振彩, 黄荣辉, 黄刚, 等. 2011. 亚洲季风区积云降水和层云降水时空分布特征及其可能成因分析 [J]. *大气科学*, 35(6): 993-1008. Du Zhencai, Huang Ronghui, Huang Gang, et al. 2011. The characteristics of spatial and temporal distributions of convective rainfall and stratiform rainfall in the Asian monsoon region and their possible mechanisms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese)*, 35(6): 993-1008. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.01
- 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): 474-483. Duan Jing, Mao Jietai. 2008. Influence of aerosol on regional precipitation in North China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(23): 474-483. doi:10.1007/s11434-008-0447-6
- Endo N, Ailikon B, Yasunari T. 2005. Trends in precipitation amounts and the number of rainy days and heavy rainfall events during summer in China from 1961 to 2000 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83(4): 621-631. doi:10.2151/jmsj.83.621
- 符娇兰, 林祥, 钱维宏. 2008. 中国夏季分级雨日的时空特征 [J]. *热带气象学报*, 24(4): 367-373. Fu Jiaolan, Lin Xiang, Qian Weihong. 2008. The temporal and spatial characteristics of graded summer rain days over China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 24(4): 367-373. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2008.04.009
- Fu J L, Qian W H, Lin X, et al. 2008. Trends in graded precipitation in China from 1961 to 2000 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25(2): 267-278.

- doi:10.1007/s00376-008-0267-2
- Gong D Y, Ho C H. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29(10): 781–784. doi:10.1029/2001GL014523
- Gong D Y, Shi P J, Wang J A. 2004. Daily precipitation changes in the semi-arid region over Northern China [J]. *J. Arid Environ.*, 59(4): 771–784. doi:10.1016/j.jaridenv.2004.02.006
- 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 2003. 东亚夏季风的年代际变率对中国气候的影响 [J]. *地理学报*, 58(4): 569–576. Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei, et al. 2003. Interdecadal variability of East-Asian summer monsoon and its impact on the climate of China [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 58(4): 569–576. doi:10.11821/xb200304011
- 何金海, 吴志伟, 祁莉, 等. 2006. 北半球环状模和东北冷涡与我国东北夏季降水关系分析 [J]. *气象与环境学报*, 22(1): 1–5. He Jinhai, Wu Zhiwei, Qi Li, et al. 2006. Relationships among the Northern Hemisphere annual mode, the Northeast cold vortex and the summer rainfall in Northeast China [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 22(1): 1–5. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2006.01.001
- Huang G, Wen G H. 2013. Spatial and temporal variations of light rain events over China and the mid-high latitudes of the Northern Hemisphere [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 58(12): 1402–1411. doi:10.1007/s11434-012-5593-1
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. *大气科学*, 30(5): 730–743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30(5): 730–743. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.02
- 贾晓龙, 王谦谦, 周宁芳. 2003. 近 50a 东北地区降水异常的气候特征分析 [J]. *南京气象学院学报*, 26(2): 164–171. Jia Xiaolong, Wang Qianqian, Zhou Ningfang. 2003. Analysis of climate features of precipitation anomalies in Northeast China in recent 50 years [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 26(2): 164–171. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2003.02.003
- Kendall M G, Gibbons J D. 1981. Rank Correlation Methods (5th ed.) [M]. London, UK: Edward Arnold, 320pp.
- 李邦东, 周旭, 赵中军, 等. 2013. 近 50 年中国东北地区不同类型和等级降水事件变化特征 [J]. *高原气象*, 32(5): 1414–1424. Li Bangdong, Zhou Xu, Zhao Zhongjun, et al. 2013. Change features of different types and grades of precipitation event in Northeast China in recent 50 years [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 32(5): 1414–1424. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00114
- 李红梅, 周天军, 宇如聪. 2008. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析 [J]. *大气科学*, 32(2): 358–370. Li Hongmei, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2008. Analysis of July–August daily precipitation characteristics variation in Eastern China during 1958–2000 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(2): 358–370. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.14
- 李雄, 苏志. 2014. 空气污染抑制小雨: 华南与青藏高原对比分析 [J]. *气象学报*, 72(3): 596–605. Li Xiong, Su Zhi. 2014. Suppression of light precipitation by air pollution: A comparison between observations in South China and the Tibetan Plateau [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72(3): 596–605. doi:10.11676/qxxb2014.033
- Liu B H, Xu M, Henderson M. 2011. Where have all the showers gone? Regional declines in light precipitation events in China, 1960–2000 [J]. *Int. J. Climatol.*, 31(8): 1177–1191. doi:10.1002/joc.2144
- 刘海文, 丁一汇. 2010. 华北汛期日降水特性的变化分析 [J]. *大气科学*, 34(1): 12–22. Liu Haiwen, Ding Yihui. 2010. Analysis of daily precipitation characteristics over North China during rainy seasons [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34(1): 12–22. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.02
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. *科学通报*, 51(20): 2429–2439. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. The basic facts of northern China from 1951 to 2004 drought [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 51(20): 2429–2439. doi:10.3321/j.issn.0023-074X.2006.20.016
- 宁亮, 钱永甫. 2008. 中国年和季各等级日降水量的变化趋势分析 [J]. *高原气象*, 27(5): 1010–1020. Ning Liang, Qian Yongfu. 2008. Analyses on trends of annual and seasonal four kinds of daily precipitation in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27(5): 1010–1020.
- Qian W H, Lin X. 2006. Regional trends in recent precipitation indices in China [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 90(1–2): 193–207. doi:10.1007/s00703-004-0101-z
- Qian W H, Fu J L, Yan Z W. 2007. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961–2005 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(11): L11705. doi:10.1029/2007GL029631
- Qian Y, Gong D Y, Fan J W, et al. 2009. Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and modeling [J]. *J. Geophys. Res.*, 114(D7): D00K02. doi:10.1029/2008JD011575
- Qiu J H, Yang L Q. 2000. Variation characteristics of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980–1994 [J]. *Atmos. Environ.*, 34(4): 603–609. doi:10.1016/S1352-2310(99)00173-9
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 294(5549): 2119–2124. doi:10.1126/science.1064034
- Rosenfeld D, Dai J, Yu X, et al. 2007. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation [J]. *Science*, 315(5817): 1396–1398. doi:10.1126/science.1137949
- Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al. 2008. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? [J]. *Science*, 321(5894): 1309–1313. doi:10.1126/science.1160606
- 沙万英, 郭其蕴. 1998. 西太平洋副热带高压脊线变化与我国汛期降水的关系 [J]. *应用气象学报*, 9(S1): 31–38. Sha Wanying, Guo Qiyun. 1998. Variations of summer rainfall over China in relation to the geographical locality of subtropical high ridge over West Pacific [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 9(S1): 31–38.

- 施能, 黄先香, 杨杨. 2003. 1948~2000 年全球陆地年降水量场趋势变化的时、空特征 [J]. *大气科学*, 27(6): 971-982. Shi Neng, Huang Xianxiang, Yang Yang. 2003. Spatiotemporal features of the trend variation of global land annual rainfall fields from 1948-2000 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27(6): 971-982. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.06.02
- 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. *第四纪研究*, 23(2): 152-164. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J]. *Quat. Sci. (in Chinese)*, 23(2): 152-164. doi:10.3321/j.issn:1001-7410.2003.02.005
- Su B D, Xiao B, Zhu D M, et al. 2005. Trends in frequency of precipitation extremes in the Yangtze River basin, China: 1960-2003 [J]. *Hydrol. Sci. J.*, 50(3): 472. doi:10.1623/hysj.50.3.479.65022
- Trenberth K E, Dai A G, Rasmussen R M, et al. 2003. The changing character of precipitation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84(9): 1205-1217. doi:10.1175/BAMS-84-9-1205
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18(3): 376-386. doi:10.1007/BF02919316
- 王明星. 1999. 大气化学 (第 2 版) [M]. 北京: 气象出版社, 314pp. Wang Mingxing. 1999. *Atmospheric Chemistry (2nd ed.) (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 314pp.
- 王绍武. 2001. 现代气候学研究进展 [M]. 北京: 气象出版社, 488 pp. Wang Shaowu. 2001. *Advances on Climatology in the Modern Times (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 488pp.
- 王颖, 施能, 顾俊强, 等. 2006. 中国雨日的气候变化 [J]. *大气科学*, 30(1): 162-170. Wang Ying, Shi Neng, Gu Junqiang, et al. 2006. Climatic variations of wet days in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30(1): 162-170. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.01.14
- Wang Y Q, Zhou L. 2005. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32(9): L09707. doi:10.1029/2005GL022574
- 武炳义, 张人禾, Rosanne D A. 2008. 北极偶极子异常与中国东北夏季降水 [J]. *科学通报*, 53(14): 2222-1428. Wu Bingyi, Zhang Renhe, Rosanne D A. 2008. Arctic dipole anomaly and summer rainfall in Northeast China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(14): 2222-1428. doi:10.1007/s11434-008-0229-1
- 竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量 [J]. *地理学报*, 1(1): 1-27, 197. Chu C. 1934. The enigma of southeast monsoon in China [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 1(1): 1-27, 197.