

中国大陆降水时空变异规律

——II. 现代变化趋势

任国玉^{1,2}, 任玉玉^{1,2}, 战云健³, 孙秀宝^{2,4}, 柳艳菊^{1,2}, 陈 峪^{1,2}, 王 涛^{2,4}

(1. 国家气候中心, 北京 100081; 2. 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081;
3. 中国气象局国家气象信息中心, 北京 100081; 4. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 为改进、完善对中国现代降水长期变化规律的理解, 利用 2 300 个国家级气象站网观测资料, 更新分析了全国 1956—2013 年基本降水指标的趋势变化特征。主要结果: ① 全国平均年和季节降水量、降水量距平百分率未表现出显著趋势变化, 但秋、冬季降水量距平百分率分别表现出较明显的下降和上升; ② 年和夏季降水减少主要发生在东北中南部、华北、华中和西南地区, 而东南沿海、长江下游、青藏高原和西北等地区年降水增加较明显; ③ 降水趋势变化的空间结构相对稳定, 北方降水减少范围有由黄土高原、华北平原向东北和西南扩散趋向, 东北北部和长江中下游的降水增加范围变小, 总体看东部降水减少和增加的区域均在萎缩, “南涝北旱”现象趋向缓解; ④ 全国年平均暴雨量、日数呈现出较显著的增加, 但暴雨强度没有明显变化, 暴雨量和日数增加主要发生在珠江和东南诸河流域, 而海河和西南诸河流域暴雨量、日数和强度呈较明显减少趋势; ⑤ 东部季风区 1 日、连续 3 日和连续 5 日最大降水量均有一定程度增加, 1 日最大降水量增加最明显, 连续 5 日最大降水量增加最弱, 极端强降水事件持续时间呈现出短历时性倾向。

关键词: 降水; 强降水; 暴雨; 时空变异; 气候变化; 中国

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2015)04-0451-15

大气降水是表征陆地气候干湿程度的重要变量, 也是地表和地下水资源量时空变异性的主要控制因子, 在陆地水循环、生态系统和自然环境的形成、演化中起到至关重要的作用^[1-5]。因此, 在中国大陆区域水循环、水资源、水灾害以及气候变化的影响研究中, 大气降水的时空变异性得到了充分关注^[6-11]。

在气候变化对中国水循环和水资源影响研究方面, 最近 20 年特别近 10 余年, 已开展了很多研究, 获得了若干新的认识。例如, 观测研究发现, 近半个世纪全国平均年降水量呈现出比较明显的年代和多年代尺度波动^[12-16], 降水日数特别是小雨发生频数显著减少^[17-20], 强降水事件发生频数在多数地区出现一定程度增加^[21-26]; 尽管全国降水总体上看趋势变化不明显, 但空间差异显著, 东北中南部、华北、华中和西南地区降水减少, 而东南沿海、长江下游以及青藏高原、西北地区降水增加^[27-31]; 全国多数区域冬季和春季降水量表现出一定程度的增加, 中东部大范围地区秋季降水量则显著减少^[25, 29-33]; 从更长观测记录和树轮宽度等代用资料序列研究看, 大部分地区最近几十年的降水年代以上尺度变化似乎仍处于正常波动范围之内^[34-36], 但西部个别区域表现出一定程度异常^[34, 37-39]; 对于年代到多年代降水波动的原因, 一般认为主要和海洋-大气的耦合模态变异以及东亚季风系统变异有关^[40-42]; 而对部分地区降水长期趋势变化的原因, 有研究认为可能与全球气候变暖有一定联系^[43-44], 但总体上看目前还没有共识性结论。

上述研究结论具有重要理论和实际意义, 不仅有助于对中国和东亚区域气候变化规律和机理了解, 而且

收稿日期: 2014-11-18; 网络出版时间: 2015-07-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20150714.1748.014.html>

基金项目: 公益性行业科研专项经费资助项目(GYHY201206012)

作者简介: 任国玉(1958—), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 主要从事气候变化方面研究。E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

为全国和流域水资源综合规划、国家和地区气候变化适应策略和措施的制定提供了科学依据。

但是, 早先的研究仍有若干不足。就现代降水变化的观测研究来看, 包括: ① 针对近几十年的分析, 观测资料分布密度还较稀疏, 资料空间覆盖度和代表性尚需提高; ② 对降水长期变化趋势及其空间分布型的时间演进规律分析不足; ③ 用于研究的降水观测资料系统偏差未做评价和订正。

本文采用更新到 2013 年的中国大陆地区 2 300 多个地面观测站的日降水资料, 对全国和主要流域近现代降水长期变化的时空特点, 进行综合分析, 特别是加强了对近几十年降水变化趋势及其空间分布型随时间演进规律的分析。本文研究所获得的结论, 或将有助于更新、加深对中国现代大气降水变化规律的认识。

1 资料、分区和方法

1.1 资料

采用中国气象局国家气象信息中心提供的全国高密度降水资料, 这套资料来自经过多重质量控制和初步均一化处理, 但尚未进行雨量计“低捕获”影响误差订正。由于站点分布在 1955 年以前比较稀疏, 同时为了与第二次全国水资源综合规划使用的起始时间一致, 研究时段定为 1956—2013 年。降水的空间变异性很高, 站点分布不稳定可能会影响分析结果的准确性^[45]。因此, 对站点资料的长度和完整性作如下规定: 研究时段的资料长度 ≥ 30 年, 且 1981—2010 年内至少有 25 年有效记录。最终选用 2 325 个站相对完整观测资料序列用于统计分析。全国十大流域的划分采用第二次全国水资源综合规划推荐的方案。近 60 年气象站点分布情况以及十大流域界线和名称见文献 [46]。

按照地面气候资料统计整编方法, 降水日数是指 24 h 内累计降水量达到或超过 0.1 mm 的天数; 小雨、中雨和大雨日数分别是指 24 h 内累计降水量在 0.1~10.0 mm、10.0~25.0 mm 和 25.0~50.0 mm 的天数; 暴雨日数是指 24 h 内累计降水量达到或超过 50.0 mm 的天数。各级别降水量是指本级降水日中降水量的累计值, 而降水强度则为本级降水量累计值与降水日数的比值。

1.2 方法

除降水量外, 还使用了降水量距平、距平百分率和标准化距平等指标。降水量距平是相对整个分析时期 (1956—2013 年) 平均值的差值; 降水量距平百分率是降水量距平与平均降水量的百分比值; 降水量标准化距平则是降水量距平与序列标准差的比值。降水量距平百分率和标准化距平值均为相对指标, 与绝对指标同时使用有助于全面了解大尺度降水变化的时空规律性。

为避免站点分布不均和观测资料缺失对大尺度平均降水变化分析造成的影响, 采用网格化和面积加权平均方法^[47]计算全国近 60 年各类降水指标的平均序列。即取 $2^\circ \times 2^\circ$ 的经纬度网格, 逐年计算单站降水指标的算术平均值作为网格值, 然后使用面积加权方法计算所有网格的平均值, 得到区域平均序列。无资料网格不参与计算。1 日、连续 3 日和连续 5 日最大降水量全国平均序列的计算也是先统计各站点和网格值, 再求全国平均。十大流域的平均序列, 利用站点值直接算术平均获得。

为描述长期变化特征, 分别对长序列逐年降水指标值进行 9 年滑动平均处理和线性趋势拟合。此外, 计算分析了 40 年滑动趋势时间序列, 以及具有同一起始年、不同终止年的降水量线性趋势特定等值线空间分布范围, 以表现相当于不同研究阶段所揭示出的降水线性变化趋势差异。采用 Mann-Kendall 方法^[48]检验单站和区域平均降水指标序列线性趋势的显著性。

采用气象季节划分方法, 即上年 12 月至当年 2 月为冬季, 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季。

2 降水长期变化

1956—2013年, 中国年降水量变化趋势呈现较明显的由东南向西北演进的3个地带(图1(a)、图1(b)): 东南沿海地区年降水量变化稳定或增加, 增加速率一般为 $0\sim 5\%/10a$, 鄱阳湖流域以及从长江三角洲到雷州半岛和海南岛的沿岸地带增加较明显; 从东北西南部, 经华北平原和黄土高原、四川盆地到云贵高原, 年降水量减少, 减少速率一般为 $-1\%/10a\sim -5\%/10a$, 减少最明显的区域包括科尔沁沙地、华北平原、黄土高原、四川盆地、云贵高原东部; 呼伦贝尔高原、西北地区 and 青藏高原年降水量增加, 增加速率一般达 $2\%/10a\sim 10\%/10a$, 其中青藏高原北部、塔里木盆地、天山和准格尔盆地相对增加趋势最明显。同截止到2004年的分析结果比较^[12,49], 青藏高原和西北干燥区的降水量增加范围、程度改变不大, 但西南地区 and 黄土高原西部的降水量减少趋势变得更为突出, 并同原来华北和东北的变干区连成明显的“干化”带, 北方降水减少区向西扩展, 南方则向东扩展, 挤压了原来长江中下游和东南地区的降水增加区域范围, 导致沿海岸区出现较明显的雨量相对增加带。

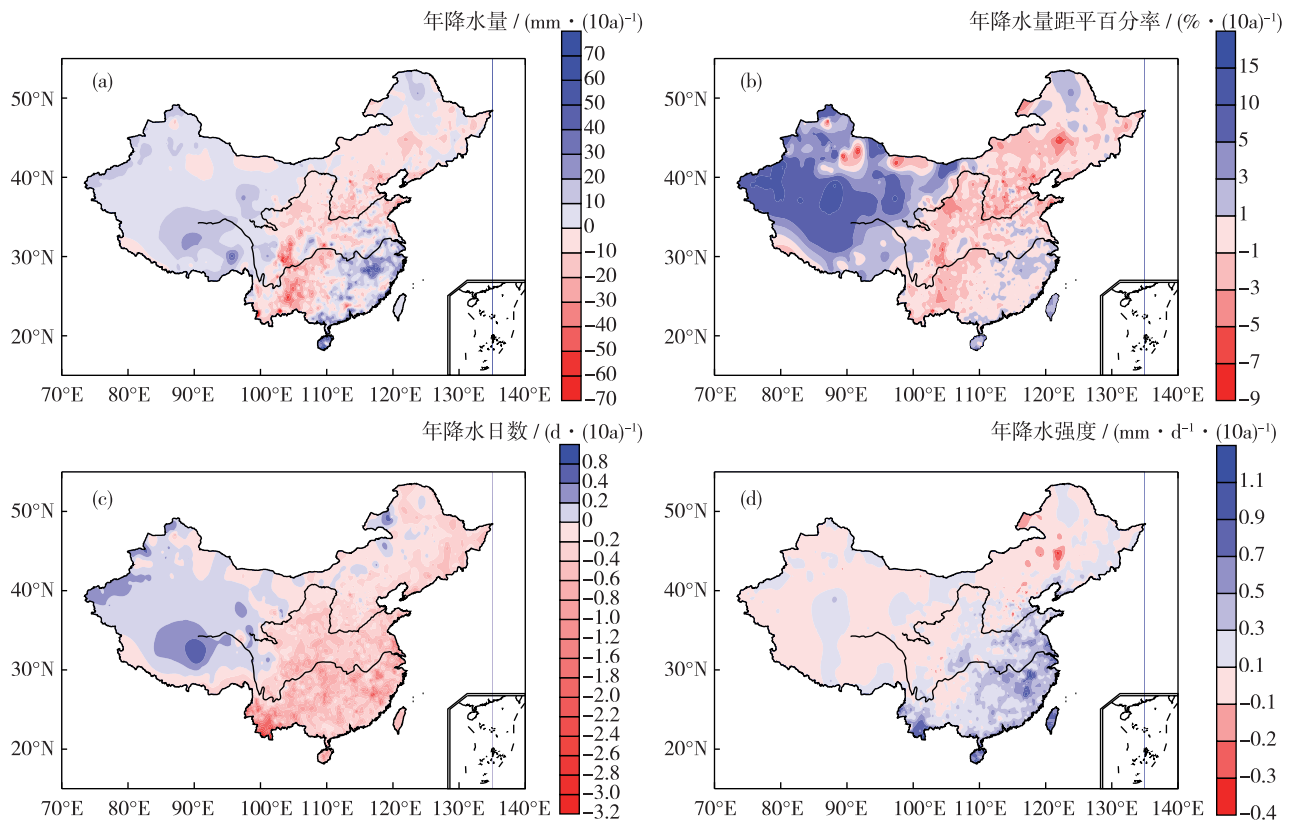


图1 1956—2013年中国降水相关指标趋势分布

Fig. 1 Linear trends in annual precipitation in mainland China over 1956—2013

从各大流域平均来看(表1), 并参照先前分析结果^[12,49], 1956—2013年北方各大河流域年降水量仍维持着减少趋势, 海河流域下降趋势明显, 但所有下降趋势统计上均不再显著; 长江流域年降水量已开始出现下降趋势, 西南诸河流域的减少很显著, 通过了0.01的显著性水平检验; 西北诸河流域降水量的增加变得也很显著。所有流域平均的降水日数均呈十分显著减少趋势。除东北和华北的松花江流域、辽河流域和海河流域外, 所有其他大河流域平均的日降水强度均呈明显增加趋势。

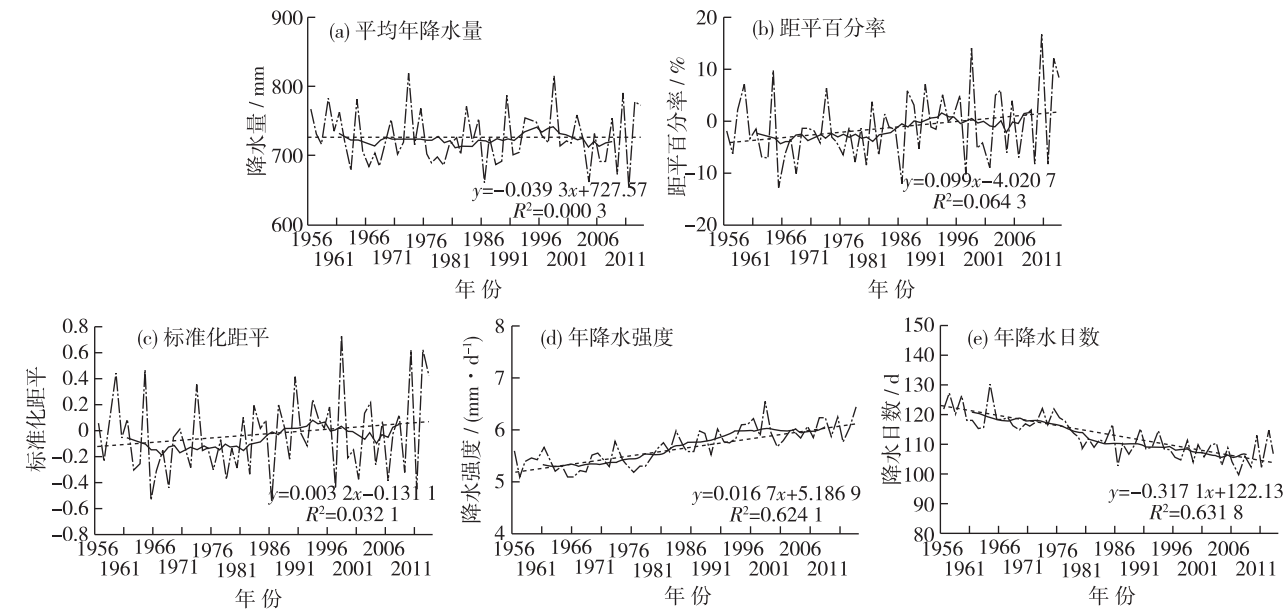
表 1 1956—2013 年中国十大流域降水量、降水日数和降水强度线性趋势

Table 1 Linear trends of annual precipitation, number of precipitation days and precipitation intensity over 1956—2013 for the ten large river basins of mainland China

流域	降水量/ $(\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1})$	降水日数/ $(\text{d} \cdot (10\text{a})^{-1})$	降水强度/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1})$
松花江	-3.53	-2.03 **	0.04
辽河	-7.82	-2.70 **	0.12
海河	-14.51	-2.94 **	0.09
黄河	-7.36	-2.72 **	0.10 **
淮河	-9.47	-5.28 **	0.31 **
长江	-3.02	-5.85 **	0.25 **
东南诸河	19.06	-6.86 **	0.45 **
珠江	6.82	-5.13 **	0.33 **
西南诸河	-30.46 **	-11.85 **	0.23 **
西北诸河	6.27 **	0.84	0.07 **
全国	-0.39	-3.17 **	0.17 **

注：* 表示通过 0.05 显著性水平检验；** 表示通过 0.01 显著性水平检验。

由于中国降水量空间差异很大，采用降水量和降水量距平百分率或降水量标准化距平指标描述全国总体降水变化趋势，均存在一定缺陷，前者不适当地夸大了东部降水丰沛区域降水量变化的贡献，而后者则不适当地夸大了西部干燥地区降水量趋势变化的影响。但是，无论采用哪种指标，1956 年以来中国大陆地区平均降水量变化趋势均不很明显，降水量距平百分率和标准化距平值序列表明了小幅度上升趋势，而降水量值则表现出很弱的下降趋势(图 2(a)—图 2(c))。全国平均降水日数存在十分显著的下降趋势，下降速率达到 3.2 d/10a(图 2(e))；由于降水日数的显著下降，全国平均日降水强度出现非常显著上升趋势(图 2(d))，整个时段上升速率达到 0.17 mm/(d·(10a))。



实线为 9 年滑动平均值；虚线为线性趋势

图 2 1956—2013 年中国降水逐年值和线性趋势

Fig. 2 Changes in annual total precipitation in mainland China during 1956—2013

中国地区降水日数显著下降现象已有很多报道^[17,19,23]。先前的研究^[17-18,50]表明，中国降水日数明显减少，以及由此造成的日降水强度普遍增加，主要是由小雨频率剧烈下降造成的，中雨以上级别降水频率和强度长期变化总体上看并不明显。因此，这里给出的所有级别降水平均日降水强度显著上升现象，还需要慎重对待。

为了解不同时段各降水要素变化趋势的差异, 计算分析了 1956—2013 年中国平均年降水量、距平百分率、标准化距平、降水日数和降水强度的 40 年滑动趋势变化(图 3)。年降水量的上升趋势主要发生在整个时段的早中期。2002 年以前, 全国年降水量的 40 年线性趋势值逐年增长, 此后明显回落, 至 2007 年开始出现负值, 但最近 2 个 40 年趋势又有所回升。年降水量距平百分率和标准化距平滑动趋势始终为正值, 说明在任何 40 年内全国平均降水相对指标都呈现增加趋势, 但增加的速率在 2002 年之前较大, 2007 年之后减缓, 最近 2 年又出现明显回升。全国平均降水日数最明显的下降发生在 2008 年之前, 此后趋势值有所回升, 但仍维持较强负趋势(图 3(e)); 全国平均日降水强度的趋势始终为正值, 但 20 世纪末以来上升趋势呈现一定程度减弱。

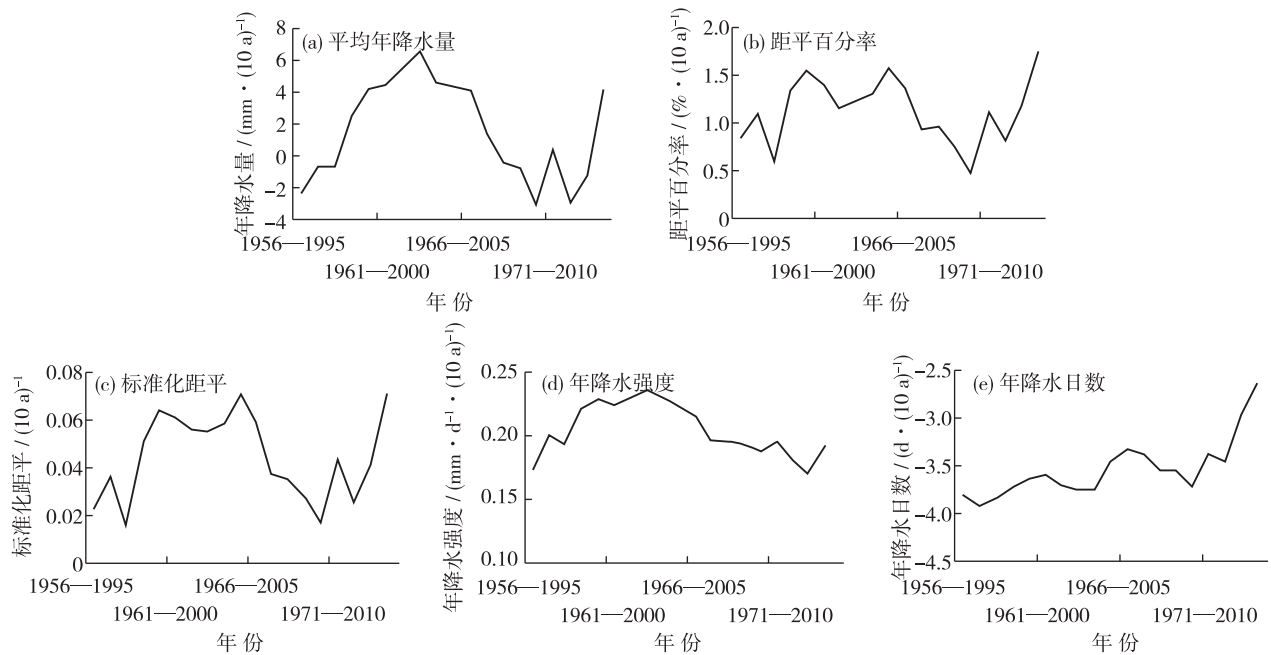


图 3 1956—2013 年中国降水相关指标 40 年滑动趋势

Fig. 3 Curves of 40-year moving trends of annual precipitation in mainland China during 1956—2013

以自 1956 年到任何年的不定时长年降水量距平百分率趋势看, 亦可了解降水量增加或减少趋势的主要阶段性和区域性特点。图 4、图 5 分别表示 1956 年至不同截止年份年降水量距平百分率趋势特征等值线 ($-2.5\%/10a$ 和 $+2.5\%/10a$) 包裹范围变化情况。截止 20 世纪 90 年代, “干化” 区域集中在北方的黄土高原和华北平原, 其他地区仅有零星分布; 至 1999 年, 主要 “干化” 区开始出现向东北和西南拉伸趋势, 与原四川盆地的零星分布区连接起来; 截止 2004 年, 主要 “干化” 区进一步向东北延伸, 同时黄土高原和华北平原原有由集中连片向分散分布的演化趋势, 1956—1999 年在西南方向的连片分布带也出现间断; 截止 2009 年, “干化” 范围进一步向东北方向扩张, 东北南部出现明显 “干化” 区; 截止到 2013 年, 华北平原和黄土高原的 “干化” 区强烈萎缩, 仅残留局部较强负降水趋势 “干岛”, 东北南部的 “干化” 现象也得到明显缓解, 仅西南地区气候变干范围有向云贵高原东部伸展的倾向(图 4)。

从年降水量距平百分率趋势 $+2.5\%/10a$ 等值线包裹范围的变化看, 随着截止年推移, 包括西北和青藏高原的西部地区 “湿化” 区域总体上比较稳定, 在一定程度上存在由分散向集中连片分布的倾向, 表明西部 “湿化” 过程基本稳定, 或略有加强; 但是, 东北北部和长江中下游的 “湿化” 区域面积却经历了由大到小, 以致目前几近消失的过程, 说明这两个地区气候有由偏湿向正常或偏干方向演化的趋势。可以看出, 东部地区降水较明显增加的区域出现在 2004 年之前, 此后主要由于长江流域、西南地区 and 东北北部地区降水减少, 东部整体上年降水量距平百分率呈现增加的区域范围也不断萎缩(图 5)。

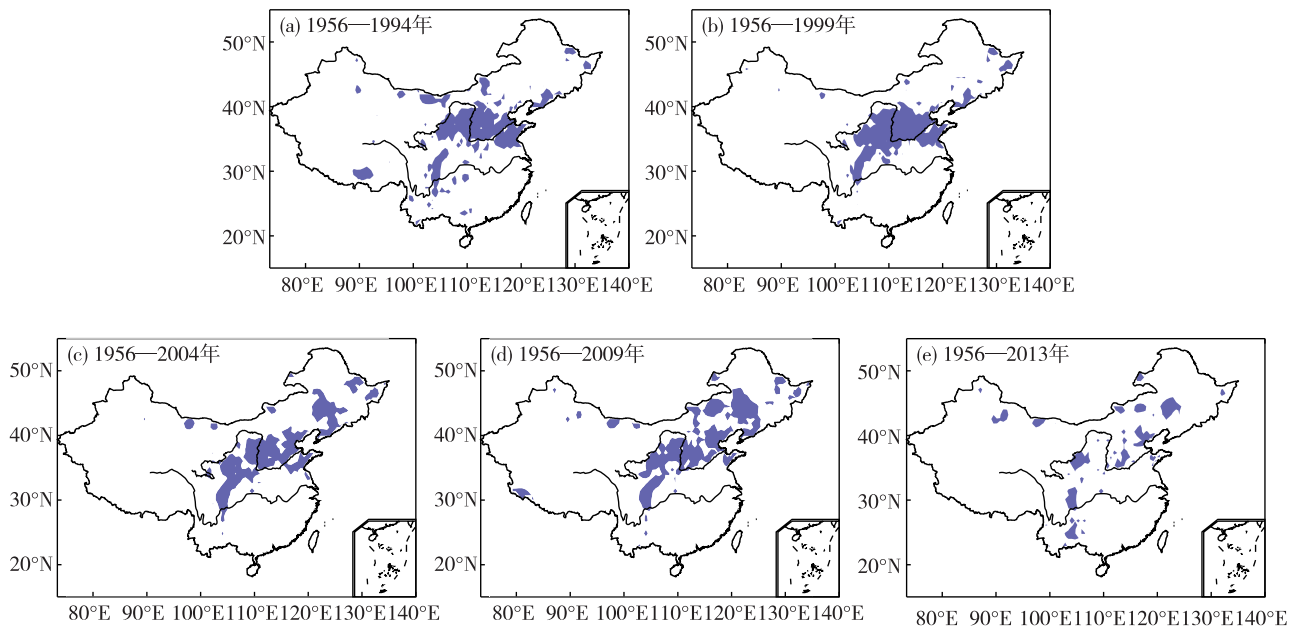


图 4 1956 年以来年降水量距平百分率趋势特征等值线 ($-2.5\%/10a$) 包裹面积变化

Fig. 4 Changes in areas surrounded by specific isolines ($-2.5\%/10a$) of linear trends of annual precipitation percentage anomalies in mainland China

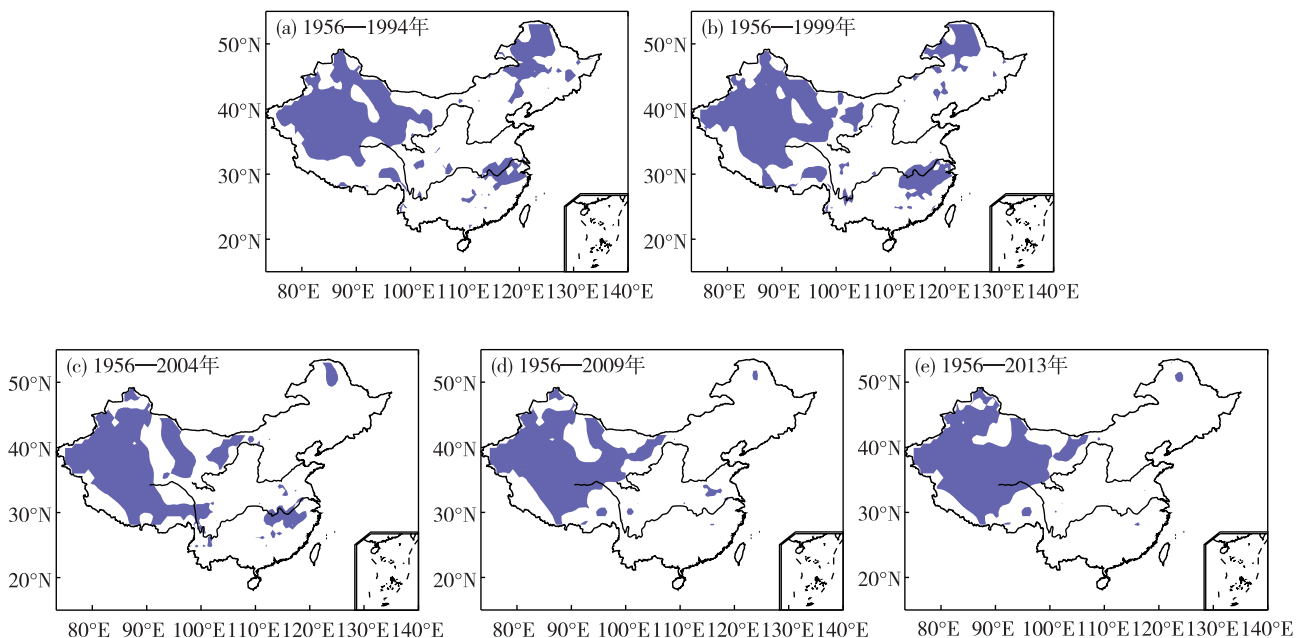


图 5 1956 年以来年降水量距平百分率趋势特征等值线 ($+2.5\%/10a$) 包裹面积变化

Fig. 5 Changes in areas surrounded by specific isolines ($+2.5\%/10a$) of linear trends of annual precipitation percentage anomalies in mainland China

1961—2013 年, 四季降水量距平百分率变化的区域性分异现象相当突出(图 6)。春季, 两个增加区域和一个减少区域分布特征鲜明。一个增加区域是西北地区、青藏高原和云贵高原中西部, 相对增加速率很大, 一般达到 $5\%/10a$ 以上; 另一个是东北全部、内蒙古中东部和华北平原, 增加速率多在 $2\%/10a \sim 10\%/10a$; 减少区域从阿拉善高原向东南呈扇状分布, 包括黄土高原大部、秦岭—淮河一带及其以南的长江流域和江南大部分地

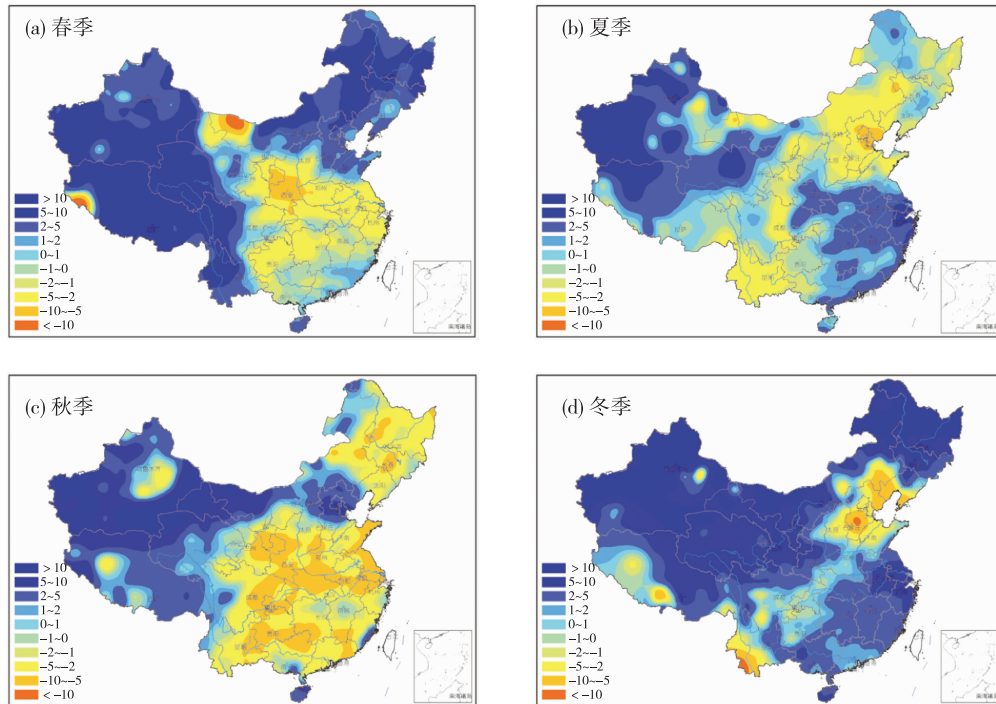


图6 1961—2013年中国四季降水量距平百分率线性趋势分布(单位:%/10a)

Fig. 6 Linear trends of seasonal precipitation percentage anomalies in mainland China, 1956—2013

区,减少速率一般为 $-1\%/10a \sim -5\%/10a$,但华南沿海地区一般略有增加,海南岛和珠江三角洲的增加令人瞩目。全国平均春季降水量距平百分率没有明显变化,年代际波动也很弱,呈微弱上升趋势(图7)。

夏季降水量距平百分率变化趋势也呈现“两增一减”区域分异特征,但增加区域一个在西北地区、青藏高原西北和东北北部的内陆非季风地带,增加速率在 $2\%/10a \sim 10\%/10a$,另一个在秦岭—淮河及其以南的长江中下游、珠江中下游和东南诸河流域,增加速率为 $1\%/10a \sim 5\%/10a$,其中沿岸地带的增加较突出,一些地点达到 $5\%/10a \sim 10\%/10a$;减少区域出现在从东北西南部经内蒙古中部、华北大部、黄土高原西部、四川盆地到云贵高原的宽阔地带,同年降水量距平百分率减少地带分布大体一致,环渤海的京津唐地区减少速率最明显,可达 $-5\%/10a$ (图6)。全国平均夏季降水量距平百分率没有表现出任何明显的趋势性变化,但20世纪90年代的相对多雨特征比较明显,1998年是整个分析时期降水最多的一年(图7)。

秋季降水量距平百分率变化呈现独特的“一增一减”型分布,西北地区和青藏高原增加,除华北北部和海南岛等局部地区以外,东部大范围夏季风影响区域降水减少,黄土高原西部、长江中下游、四川盆地和云贵高原东部等秋雨偏多区域减少速率可达 $-5\%/10a \sim -10\%/10a$ 。华北北部十分独特,表现出较明显的秋季降水增加,而且和该区夏季降水减少形成对照(图6)。全国平均秋季降水量距平百分率反映出较明显的下降趋势,减少主要发生在20世纪80年代中期以后,最后几年有所回升(图7)。

冬季,除环渤海的东南部和华北平原,以及云贵高原等部分地区外,全国大部分降水量距平百分率表现出增加趋势,其中东北中北部、西北大部、青藏高原北部和长江下游等地区增加速率达到 $5\%/10a \sim 10\%/10a$ 。东北南部和华北平原冬季降水量减少较明显,中心区域达到 $-5\%/10a \sim -10\%/10a$,在全国大部分地区降水量呈现增加的总体情景下显得很特殊(图6)。全国平均冬季降水量距平百分率呈现一定程度的上升趋势,增加主要出现在20世纪80年代中期以后(图7)。

可见,1956年以来全国不同地区季节性降水变化展示了不同的组合特征。西北地区和青藏高原,以及东北北部和海南岛,四季降水均呈较明显上升趋势,为全年变湿型区域;东北中北部春、冬季降水增加,夏、秋季减少,为冬春变湿、夏秋变干型区域;华北平原和东南部,一般春、秋季降水增加,夏、冬季减少,成为春

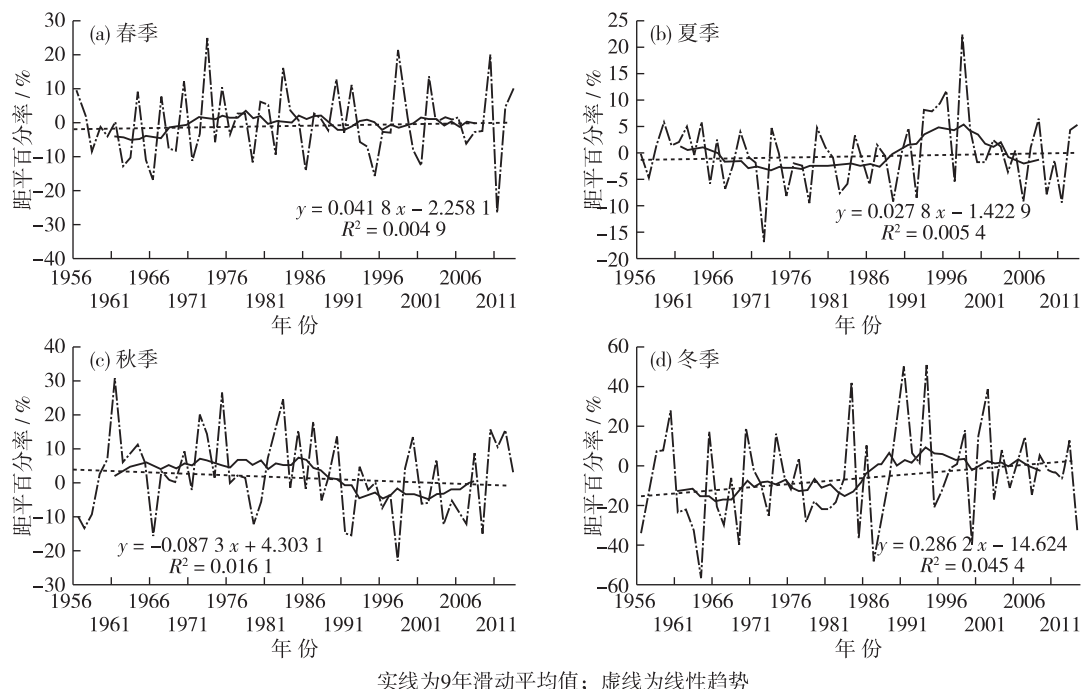


图 7 1956—2013 年中国四季降水量距平百分率逐年值和线性趋势

Fig. 7 Changes in spring, summer, autumn and winter precipitation percentage anomalies in mainland China, 1956—2013

秋变湿、冬夏变干型区域；黄土高原、四川盆地大部到云贵高原中东部，冬季降水增加或变化不大，春、夏、秋季减少，为冬季变湿、春夏秋变干型区域；中国其他广大地区，包括淮河流域、长江中下游流域、珠江中下游流域和东南诸河流域，夏季和冬季降水增加，春季和秋季减少，属于冬夏变湿、春秋变干区域。

值得注意的是，近地面风速已成为影响中国降水观测准确性的主要因子^[51-52]。大量观测分析证实，过去几十年中国近地面平均风速已经显著减弱^[12,53]。气象站周边地区近地面风速变弱，很可能已致使雨量计捕获率上升，在降水观测资料中产生一定的系统偏差^[54-55]。由于风速对捕获率的影响在冬季降雪和夏季阵性降水情况下更为明显，中国冬季大范围降水量增加以及夏季暴雨增加现象可能包含资料系统偏差的影响，需要今后进一步研究证实。

3 极端强降水变化

暴雨主要出现在季风区域的夏半年，其非季风区仅偶尔发生。单站趋势计算作如下规定：如果标准气候期（1981—2010 年）内未出现过暴雨，则该测站不参与暴雨变化趋势计算。从 1956—2013 年暴雨降水量长期变化趋势看，在秦岭—淮河一线以南，大多数站点表现出较显著的上升，其中长江中下游流域上升更加明显（图 8）；北方大部分特别是黄土高原东部和华北平原，以及四川盆地西部和云贵高原东部，多数站点暴雨量显著下降。东北地区暴雨量变化不明显，北部呈增加站点较多，而中南部呈减少的站点比例略高。

从全国范围看，暴雨量呈增加的站点数是 732 个，占全部站点数比例为 62.5%，其中通过显著性检验的站点数占全部站点数比例为 4.1%；减少的站点数为 439 个，占全部站点数比例为 37.5%，其中通过显著性检验的站点数占全部站点数比例为 1.9%（表 2）。暴雨日数和暴雨强度呈显著增加的站点数量及比例有所下降，而呈显著减少的站点数量及比例有所抬升。暴雨日数呈增加的站点数为 708 个，占全部站点数比例为 60.7%，其中通过显著性检验的站点数占全部站点数比例为 3.3%；减少的站点数为 459 个，占全部站点数比例为 39.3%，其中通过显著性检验的站点数占全部站点数比例为 2.2%（表 2）。

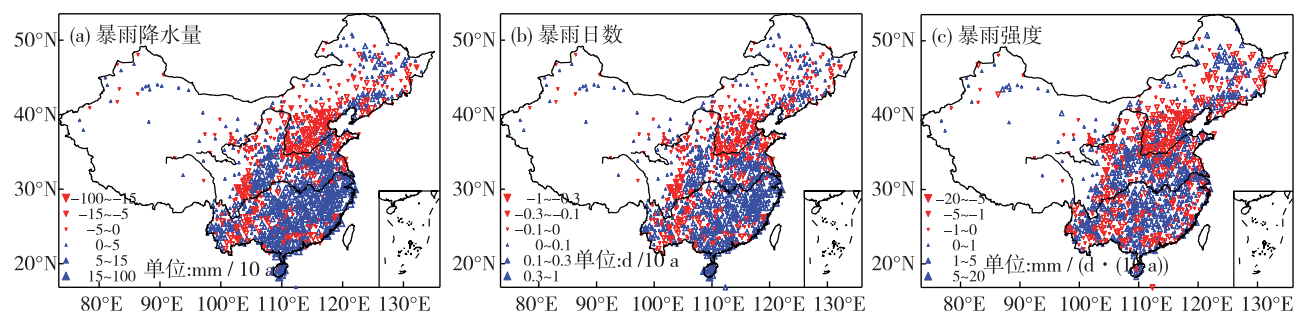


图 8 1956—2013 年中国年暴雨线性趋势空间分布

Fig. 8 Linear trends of accumulated amount, days and intensity of annual rainstorms in mainland China, 1956—2013

对十大流域平均暴雨变化的分析发现, 不同流域之间年暴雨量、暴雨日数和强度的变化有非常大的差异。东南诸河和珠江流域年暴雨日数和强度均呈较明显的上升趋势, 导致暴雨量的显著增加, 线性趋势均超过 13mm/10a; 长江流域暴雨强度的上升迅速, 接近 0.9mm/(d·(10a)), 暴雨量也有较明显增加; 西南诸河和海河流域暴雨强度和暴雨日数均有下降, 年暴雨量则出现明显的减少趋势(表 3)。

1956—2013 年, 全国平均年暴雨量呈现较显著增加趋势, 通过了 0.05 显著性水平检验(图 9, 表 3), 增加速率为 3.18 mm/10a。1980 年之前年暴雨量变化不大, 此后到 20 世纪 90 年代快速增加, 2000 年以来暴雨量略有减少(图 9)。全国平均年暴雨日数的变化趋势和年代特征同年暴雨量十分接近, 总体也呈现显著增加, 增加速率达 0.03 d/10a, 通过了 0.05 显著性水平检验。年暴雨强度尽管也表现出一定增加趋势, 但总体变化趋势不显著, 增加速率为 0.11 mm/(d·(10a))(图 9, 表 3)。

表 2 中国暴雨降水量呈增加(显著增加)和减少(显著减少)的站点数量及其相对比例

Table 2 Number of stations with increasing trends (significant increasing trends) and decreasing trends (significant decreasing trends) of precipitation amount of annual rainstorms and their percentages

趋势	暴雨量		暴雨日数		暴雨强度	
	站数	比例/%	站数	比例/%	站数	比例/%
增加	732	62.5	708	60.7	673	57.6
减少	439	37.5	459	39.3	496	42.4
显著增加	48	4.1	39	3.3	44	3.8
显著减少	22	1.9	26	2.2	19	1.6

注: 显著增加(减少)是指通过了 0.05 的显著性水平检验。

表 3 1956—2013 年中国十大流域年暴雨降水量、暴雨日数和暴雨强度线性趋势

Table 3 Linear trends of accumulated amount, number of days and intensity of annual rainstorms over 1956—2013 for the ten large river basins of mainland China

流域	暴雨量/ (mm·(10a) ⁻¹)	暴雨日数/ (d·(10a) ⁻¹)	暴雨强度/ (mm·d ⁻¹ ·(10a) ⁻¹)
松花江	0.63	0.01	0.13
辽河	-0.85	-0.01	-0.37
海河	-6.73 *	-0.07	-1.10
黄河	-0.73	-0.01	-0.09
淮河	0.22	0.01	0.13
长江	6.61	0.07	0.88 *
东南诸河	13.87 *	0.15	0.37
珠江	13.16 *	0.14 *	0.37
西南诸河	-3.55 *	-0.06 *	-1.10 **
西北诸河	0.15	0	0.15
全国	3.18 *	0.03 *	0.11

注: * 表示通过 0.05 显著性水平检验; ** 表示通过 0.01 显著性水平检验。

1956—2013 年, 中国 1 日、连续 3 日和连续 5 日最大降水量的变化也展示了较大的区域差异性(图 10)。增加较明显的站点主要分布在长江中下游和西北地区, 而减少较明显的站点则主要分布在华北地区、东北南部和西南地区, 连续 3 日、连续 5 日最大降水量显著减少的台站和范围有不断增加倾向, 特别是从华北平原经四川盆地到云贵高原一带, 增加更为普遍。从全国范围看, 1 日、连续 3 日、连续 5 日最大降水量呈增加的站点数分别为 743 个、682 个和 645 个, 占全部站点数比例分别为 59.2%、54.4%和 51.5%, 其中通过显著性检验的站点数占全部站点数比例分别为 5.1 %、4.2%和 3.7%; 减少的站点数分别为 512 个、571 个和

608 个, 占全部站点数比例分别为 40.8 %、45.6%和 48.5%, 其中通过显著性检验的站点数占全部站点数比例分别为 1.2 %、2.5%和 2.8%(表 4)。

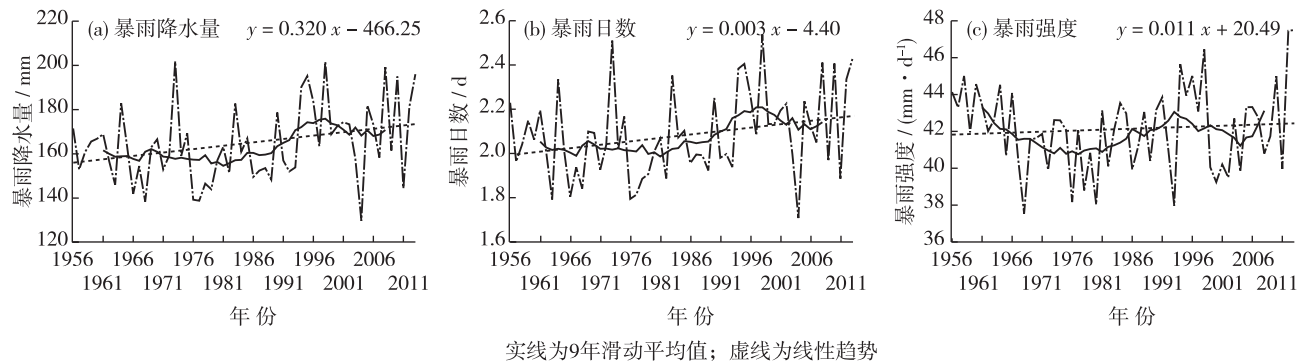


图 9 1956—2013 年中国平均年暴雨降水量、暴雨日数和暴雨强度逐年值及其线性趋势

Fig. 9 Changes in country-averaged accumulated amount, number of days and intensity of annual rainstorms in mainland China, 1956—2013

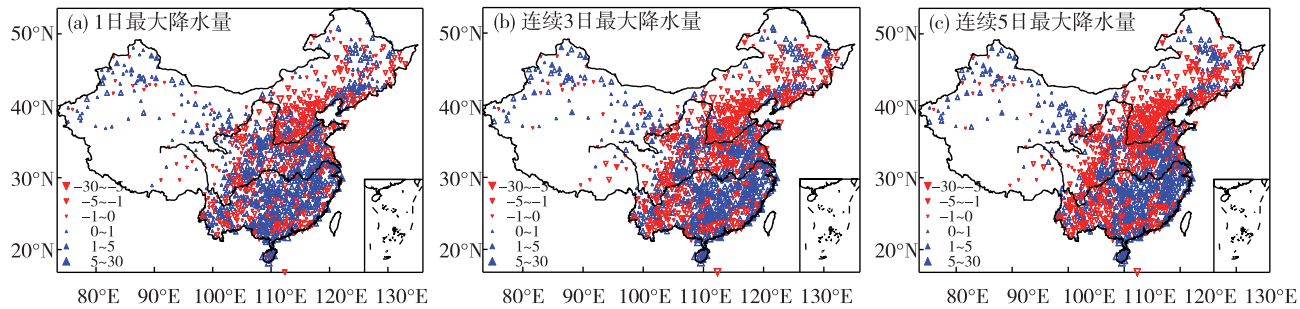


图 10 1956—2013 年中国 1 日、连续 3 日和连续 5 日最大降水量线性趋势空间分布(单位: mm/10a)

Fig. 10 Linear trends of maximum precipitation amount of one day, continuous three days and continuous five days in mainland China, 1956—2013

表 4 1956—2013 年中国 1 日、连续 3 日和连续 5 日最大降水量呈增加(显著增加)和减少(显著减少)的站点数量及其相对比例
Table 4 Number of stations with increasing trends (significant increasing trends) and decreasing trends (significant decreasing trends) of maximum precipitation amount of one day, continuous three days and continuous five days, and their percentages in mainland China, 1956—2013

趋势	1 日		连续 3 日		连续 5 日	
	站数	比例/%	站数	比例/%	站数	比例/%
增加	743	59.2	682	54.4	645	51.5
减少	512	40.8	571	45.6	608	48.5
显著增加	64	5.1	53	4.2	46	3.7
显著减少	15	1.2	31	2.5	35	2.8

注: 显著增加(减少)是指通过了 0.05 显著性水平检验。

因此, 近几十年中国东部季风区极端强降水事件持续时间呈现出短历时性倾向, 极端强降水事件频率趋于增加的站点数比例随着持续天数增加而下降; 这也说明, 中国部分台站强降水事件频率以及降水量增加可能主要是短历时(1 日)极端强降水事件增多造成的, 另一些台站强降水事件频率以及降水量下降可能和连续多日极端强降水事件频率相对减少有关。

中国平均 1 日、连续 3 日和连续 5 日最大降水量都呈现出一定程度增加趋势, 但 1 日最大降水量增加趋势相对略明显(图 11)。由于较大的年际波动, 所有增加趋势均未通过 0.05 显著性检验。3 个指标的增加主要发生在 20 世纪 80 年代初以后, 从 1980 年到 1998 年持续近 20 年呈现不断上升趋势, 1999 年到 2004 年曾

有短暂回落,此后再度上升。

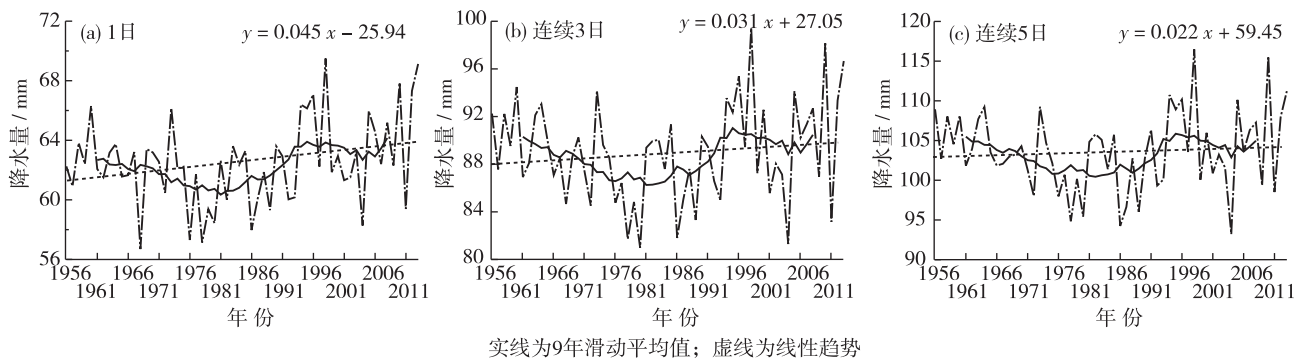


图 11 1956—2013 年中国 1 日、连续 3 日和连续 5 日最大降水量及其线性趋势

Fig. 11 Linear trends of maximum precipitation of one day, continuous three days and continuous five days in mainland China, 1956—2013

5 结 论

(1) 不同于地面气温,在过去的 60 年内,中国大陆作为一个整体,年和季节降水量或降水量距平百分率均未出现统计上显著的长期趋势性变化;但秋、冬季降水量距平百分率分别展现出较明显的下降和上升趋势。

(2) 年和夏季降水呈减少的站点主要分布在东北中南部、华北、华中和西南地区,而东南沿海、长江下游以及青藏高原和西北地区的大部分站点降水呈现较明显上升趋势;尽管年、夏季和秋季降水趋势不明显,全国多数区域冬、春季降水表现出一定程度的增加。

(3) 年和季节降水量距平百分率变化趋势的空间结构尽管较稳定,但也具有渐进演化的特点;降水减少的区域有由黄土高原和华北平原向东北和西南扩散的趋势,但近 10 年“干化”区域开始萎缩;西北和青藏高原西部降水增加的趋势基本稳定,或略有加强,而东北北部和长江中下游的增加区域面积却经历了明显变小过程。总体上看,中国东部季风区降水相对减少和相对增加的区域范围均在逐渐萎缩,“南涝北旱”现象趋于缓解。

(4) 全国平均暴雨量和暴雨日数均呈现出较显著的上升趋势,分别增加 3.18mm/10a 和 0.03d/10a;暴雨强度尽管也表现出一定增加趋势,但总体变化不显著;暴雨量和日数增加主要发生在南方各大河流域,珠江和东南诸河流域增加明显;海河和西南诸河流域暴雨量、暴雨日数和暴雨强度均呈较明显的下降趋势。

(5) 东部季风区 1 日、连续 3 日和连续 5 日最大降水量增加(减少)的站点数百分比依次为 59.2%(40.8%)、54.4%(45.6%)和 51.5%(48.5%),显著增加(减少)的站点数百分比依次为 5.1%(1.2%)、4.2%(2.5%)和 3.7%(2.8%),表明极端强降水事件频数和强度确有增加趋势,同时极端强降水事件持续时间呈现出短历时性倾向。

参考文献:

- [1] 张建云,章四龙.气候变化或异常对水文极端事件的影响[J].水科学进展,2000,11(增刊1):98-103. (ZHANG Jianyun, ZHANG Silong. The impact of climate change or exception to hydrological extreme events [J]. Advances in Water Science, 2000, 11 (Suppl 1): 98-103. (in Chinese))
- [2] 夏军,谈戈.全球变化与水文科学新的进展与挑战[J].资源科学,2002,24(3):1-7. (XIA Jun, TAN Ge. Hydrological science towards global change: Progress and challenge[J]. Resources Scienc, 2002, 24(3): 1-7. (in Chinese))
- [3] 刘昌明.黄河流域水循环演变若干问题的研究[J].水科学进展,2004,15(5):608-614. (LIU Changming. Study of some prob-

- lems in water cycle changes of the Yellow River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(5):608-614. (in Chinese))
- [4] 刘春蓁.气候变化对陆地水循环影响研究的问题[J]. *地球科学进展*. 2004, 19(1):115-119.(LIU Chunzhen. The issues in the impact study of climate change on the terrestrial hydrological cycle[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(1):115-119. (in Chinese))
- [5] 符淙斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 752-760. (FU Congbin, MA Zhuguo. Global change and regional aridification[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 752-760. (in Chinese))
- [6] 黄荣辉, 周连童. 我国重大气候灾害特征形成机理和预测研究[J]. *自然灾害学报*, 2002, 11(1): 1-9. (HUANG Ronghui, ZHOU Liantong. Research on the characteristics, formation mechanism and prediction of severe climatic disasters in China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2002, 11(1): 1-9. (in Chinese))
- [7] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 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*, 2003, 23(2):152-164. (SHI Yafeng, SHEN Yongping, LI Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm wet in north-west china[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2):152-164. (in Chinese))
- [8] TRENBERTH K E, DAI A, RASMUSSEN R M, et al. The changing character of precipitation[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2003, 84: 1205-1217.
- [9] 符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究: I: 主要研究成果 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(11):1157-1167. (FU Congbin, AN Zhisheng, GUO Weidong. Evolution of life-supporting environment in our nation and the predictive study of aridification in Northern China: I: Main scientific issues and achievements [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(11): 1157-1167. (in Chinese))
- [10] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis[C]//Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York:Cambridge University Press, 2013.
- [11] 姚惠明, 吴永祥, 关铁生. 中国降水演变趋势诊断及新事实[J]. *水科学进展*, 2013, 24(1): 1-10. (YAO Huiming, WU Yongxiang, GUAN Tiesheng. Diagnose of precipitation evolution trend in China and new facts[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(1): 1-10. (in Chinese))
- [12] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. *气象学报*, 2005, 63(6): 942-956. (REN Guoyu, GUO Jun, XU Mingzhi, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 942-956. (in Chinese))
- [13] LIU B, XU M, HENDERSON M, et al. Observed trends of precipitation amount, frequency, and intensity in China, 1960—2000 [J]. *Geophys Res*, 2005, 110, D08103.[doi:10.1029/2004JD004864]
- [14] DING Y H, WANG Z Y, SUN Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon: Part I: Observed evidences[J]. *Int J Climatol*, 2008, 28: 1139-1161.
- [15] 陈冬冬, 戴永久. 五十年我国西北地区降水强度变化特征[J]. *大气科学*, 2009, 33(5):923-935. (CHEN Dongdong, DAI Yongjiu. Characteristics of Northwest China rainfall intensity in recent 50 years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(5): 923-935. (in Chinese))
- [16] 袁喆, 严登华, 杨志勇, 等. 1961—2010 年中国 400 mm 和 800 mm 等雨量线时空变化[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4):494-502. (YUAN Zhe, YAN Denghua, YANG Zhiyong, et al. Research on temporal and spatial change of 400 mm and 800 mm rainfall contours of China in 1961—2000[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 494-502. (in Chinese))
- [17] QIAN W H, LIN X. Regional trends in recent precipitation indices in China[J]. *Meteorol Atmos Phys*, 2005. [doi 10.1007/s00703-004-0101-z]
- [18] 王小玲, 翟盘茂. 1957—2004 年中国不同强度级别降水的变化趋势特征[J]. *热带气象学报*, 2008, 24(5): 459-466. (WANG Xiaoling, ZHAI Panmao. Changes in China's precipitation in various categories during 1957—2004 [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2008, 24(5): 459-466. (in Chinese))
- [19] 林云萍, 赵春生. 中国地区不同强度降水的变化趋势[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2009(6):995-1002. (LIN Yunping, ZHAO Chunsheng. Trends of precipitation of different intensity in China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009(6):995-1002. (in Chinese))
- [20] YANG P, REN G Y, HOU W, et al. Spatial and diurnal characteristics of summer rainfall over Beijing municipality based on a high-density AWS dataset[J]. *Int J Climatol*, 2013, 33(13): 2769-2780.
- [21] ZHAI P M, ZHANG X B, WAN H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J].

- Journal of Climate, 2005, 18:1096-1108.
- [22] YAO C, YANG S, QIAN W, et al. Regional summer precipitation events in Asia and their changes in the past decades[J]. J Geophys Res, 2008, 113: D17107.[doi: 10.1029/2007JD009603]
- [23] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4):337-353. (REN Guoyu, FENG Guolin, YAN Zhongwei. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China[J]. Climatic And Environmental Research, 2010, 15(4): 337-353. (in Chinese))
- [24] 邹用昌, 杨修群, 孙旭光, 等. 我国极端降水过程频数时空变化的季节差异[J]. 南京大学学报:自然科学, 2009, 45(1): 98-109. (ZHOU Yongchang, YANG Xiuqun, SUN Xuguang, et al. Seasonal difference of the spatio-temporal variation of the number of the extreme precipitation processes in China[J]. Journal of Nanjing University:Natural Sciences, 2009, 45(1): 98-109. (in Chinese))
- [25] 陈峪, 陈鲜艳, 任国玉. 中国主要河流域极端降水变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(4):265-269. (CHEN Yu, CHEN Xianyan, REN Guoyu. Variation of extreme precipitation over large river basins in China[J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(4): 265-269. (in Chinese))
- [26] 陈少勇, 任燕, 乔立, 等. 中国西北地区大雨以上降水日数的时空分布特征[J]. 资源科学, 2011, 33(5):958-965. (CHEN Shaoyong, REN Yan, QIAO Li, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of days with above heavy rainfall over North-western China[J]. Resources Science, 2011, 33(5): 958-965. (in Chinese))
- [27] 王绍武, 蔡静宁, 慕巧珍, 等. 中国西部年降水量的气候变化[J]. 自然资源学报, 2002, 17(4): 415-422. (WANG Shaowu, CAI Jingning, MU Qiaozhen, et al. Climate change of annual precipitations in western China[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(4): 415-422. (in Chinese))
- [28] ZHANG Q, XU C Y, ZHANG Z, et al. Spatial and temporal variability of precipitation over China, 1951—2005[J]. Theor Appl Climatol, 2009, 95: 53-68.
- [29] 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等. 1951—2009年中国不同区域气温和降水量变化特征[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(4):1-10. (YU Haiyan, LIU Shuhua, ZHAO Na, et al. Characteristics of air temperature and precipitation in different regions of China from 1951 to 2009[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2011, 27(4): 1-10. (in Chinese))
- [30] YOU Q L, KANG S C, REN G Y, et al. Observed changes in snow depth and number of snow days in the eastern and central Tibetan Plateau[J]. Climate Research, 2011, 46: 171-183.
- [31] 李聪, 肖子牛, 张晓玲. 近60年中国不同区域降水的气候变化特征[J]. 气象, 2012, 38(4):419-424. (LI Cong, XIAO Ziniu, ZHANG Xiaoling. Climatic characteristics of regions of China for precipitation in various the past 60 years [J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(4): 419-424. (in Chinese))
- [32] 任国玉, 吴虹, 陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征[J]. 应用气象学报, 2000, 11(3): 322-330. (REN Guoyu, WU Hong, CHEN Zhenghong. Spatial patterns of change trend in rainfall of China[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2000, 11(3): 322-330. (in Chinese))
- [33] 章大全, 张璐, 杨杰, 等. 近50年中国降水及温度变化在干旱形成中的影响[J]. 物理学报, 2010, 59(1): 655-663. (ZHANG Daquan, ZHANG Lu, YANG Jie, et al. The impact of temperature and precipitation variation on drought in China in last 50 years[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(1): 655-663. (in Chinese))
- [34] 邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨, 等. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化[J]. 中国科学:地球科学, 2004, 32(2): 145-153. (SHAO Xuemei, HUANG Lei, LIU Hongbin, et al. Precipitation change of the last 1000 years in Delingha area, Qinghai province, based on tree-ring records[J]. Sciences in China: Earth Science, 2004, 32(2): 145-153. (in Chinese))
- [35] 黄磊, 邵雪梅. 青海德令哈地区近400年来的降水量变化与太阳活动[J]. 第四纪研究, 2005, 25(2):184-192. (HUANG Lei, SHAO Xuemei. Precipitation variation in Delingha, Qinghai and solar activity over the last 400 years[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(2): 184-192. (in Chinese))
- [36] 刘禹, 安芷生, 马海州, 等. 青海都兰地区公元850年以来树轮记录的降水变化及其与北半球气温的联系[J]. 中国科学:地球科学, 2006, 36: 461-471. (LIU Yu, AN Zhisheng, MA Haizhou, et al. Tree-ring based precipitation change since AD 850 in Dulan area of Qinghai province and its association with northern Hemispheric temperature[J]. Sciences in China: Earth Science, 2006, 36: 461-471. (in Chinese))
- [37] 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 等. 中国天山山区235a气候变化及降水趋势预测[J]. 中国沙漠, 2008, 28(5):803-808. (WEI

- Wenshou, YUAN Yujiang, YU Shulong, et al. Climate change in recent 235 years and trend prediction in Tianshan Mountainous Area[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(5): 803-808. (in Chinese))
- [38] 尹红, 袁玉江, 刘洪滨, 等. 1543—2001 年北疆区域年降水量变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(4): 605-612. (YIN Hong, YUAN Yujiang, LIU Hongbin, et al. Characteristics of the annual precipitation variation in North Xinjiang region, China in 1543—2001[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(4): 605-612. (in Chinese))
- [39] 万金红, 吕娟, 刘和平, 等. 1470—2008 年中国西北干旱地区旱涝变化特征分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 625-631. (WAN Jinhong, LYU Juan, LIU Heping, et al. Drought-flood variation characteristics and trends in arid Northwestern China during 1470—2008[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 625-631. (in Chinese))
- [40] QIAN W, FU J, YAN Z. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961—2005[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34.[doi:10.1029/2007GL029631]
- [41] 郝立生, 丁一汇. 华北降水变化研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(5): 593-601. (HAO Lisheng, DING Yihui. Progress of precipitation research in North China[J]. Progress in Geography, 2012, 31(5): 593-601. (in Chinese))
- [42] MAO J Y, WU G X. Diurnal variations of summer precipitation over the Asian monsoon region as revealed by TRMM satellite data[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(4): 554-566.
- [43] LI T, LUO J J. Projection of future precipitation change over China with a high-resolution global atmospheric model[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(2): 464-476.
- [44] 吴福婷, 符淙斌. 全球变暖背景下不同空间尺度降水谱的变化[J]. 科学通报, 2013(8): 664-673. (WU Futing, FU Congbin. Change of precipitation intensity spectra at different spatial scales under warming conditions[J]. Chin Sci Bull, 2013(8): 664-673. (in Chinese))
- [45] REN Y Y, REN G Y. Representativeness of four precipitation observational networks of China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 26(4): 454-466.
- [46] 任国玉, 战云健, 任玉玉, 等. 中国大陆降水时空变异规律性: I: 气候学特征[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 299-311. (REN Guoyu, ZHAN Yunjian, REN Yuyu, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: I: Climatology[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 299-311. (in Chinese))
- [47] JONES P D. Hemispheric surface air temperature variations: A reanalysis and an update to 1993[J]. Journal of Climate, 1994, 7(11): 1794-1802.
- [48] von STORCH H, ZWIERS F W. Statistical analysis in climate research[M]. New York: Cambridge University Press, 2003: 504.
- [49] 任国玉, 姜彤, 李维京, 等. 气候变化对中国水资源情势影响的综合分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 772-779. (REN Guoyu, JIANG Tong, LI Weijing, et al. An integrated assessment of climate change impacts on China's water resources[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6): 772-779. (in Chinese))
- [50] 孙凤华, 杨素英, 任国玉. 东北地区降水日数、强度和持续时间的年代际变化[J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 610-618. (SUN Fenghua, YANG Suying, REN Guoyu. Decade variations of precipitation event frequency, intensity and duration in the Northeast China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2007, 18(5): 610-618. (in Chinese))
- [51] 任芝花, 王改利, 邹凤玲, 等. 中国降水测量误差的研究[J]. 气象学报, 2003, 61(5): 621-627. (REN Zhihua, WANG Gaili, ZOU Fengling, et al. The research of precipitation measurement errors in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(5): 621-627. (in Chinese))
- [52] 叶柏生, 杨大庆, 丁永健, 等. 中国降水观测误差分析及其修正[J]. 地理学报, 2007, 62(1): 1-13. (YE Baisheng, YANG Daqing, DING Yongjian, et al. A bias-corrected precipitation climatology for China[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(1): 1-13. (in Chinese))
- [53] JIANG Y, LUO Y, ZHAO Z, et al. Changes in wind speed over China during 1956—2004[J]. Theor Appl Climatol, 2010, 99: 421-430.
- [54] DING Y J, YANG D Q, YE B S, et al. Effects of bias correction on precipitation trend over China[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D13). [doi: 10.1029/2006JD007938]
- [55] 孙秀宝, 任国玉, 任芝花, 等. 风场变形误差对冬季降雪测量及其趋势估算的影响[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(2): 178-186. (SUN Xiubao, REN Guoyu, REN Zhihua, et al. Effects of wind-induced errors on winter snowfall and its trends[J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(2): 178-186. (in Chinese))

Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: II: Recent trends *

REN Guoyu^{1,2}, REN Yuyu^{1,2}, ZHAN Yunjian³, SUN Xiubao^{2,4}, LIU Yanju^{1,2}, CHEN Yu^{1,2}, WANG Tao^{2,4}

(1. National Climate Center, Beijing 100081, China; 2. Laboratory for Climate Studies, CMA, Beijing 100081, China;

3. National Meteorological Information Center, CMA, Beijing 100081, China;

4. College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Applying precipitation indices series of quality-controlled daily data from over 2 300 stations, the characteristics of long-term precipitation variations over the past 60 years for mainland China are analyzed. The main conclusions are as follows: ① No significant long-term trends of annual and seasonal precipitation percentage anomalies have been found for mainland China as a whole, though a relatively significant decrease and increase have been seen for the seasonal precipitation percentage anomalies for autumn and winter respectively; ② Decrease in annual and summer precipitation mainly occurred in central and southern Northeast China, North China, western Central China and Southwest China. Increase mainly occurred in southeastern coastal region, the mid and lower reaches of the Yangtze River, the Qinghai-Tibetan Plateau and Northwest China; ③ The spatial patterns of the annual and seasonal precipitation trends were relatively stable. The decrease areas migrated from the Loess Plateau and North China toward northeast and southwest after 1990s, the increase areas in Northwest China and the Qinghai-Tibetan Plateau did not change much or marginally expanded, and the increase areas in northern Northeast China and the mid and lower reaches of the Yangtze River obviously shrank. In the eastern monsoon region, the areas with either increasing or decreasing trends reduced for the last two decades; ④ Significant increases in annual amount and frequency of rainstorms, 3.18 mm/10 a and 0.03 d/10 a respectively, have been observed for the past 60 years, though the intensity of rainstorms remained unchanged. The increase mostly appeared in the Pearl River basin and the rivers of southeastern region. The Haihe River and the rivers of Southwest China witnessed a remarkable decrease in annual amount, frequency and intensity of rainstorms; ⑤ Proportions of the stations with increase (decrease) annual maximum 1 d, continuous maximum 3 d and continuous maximum 5 d precipitation were 59.2% (40.8%), 54.4% (45.6%) and 51.5% (48.5%) respectively, and those with statistically significant increase (decrease) are 5.1% (1.2%), 4.2% (2.5%) and 3.7% (2.8%) respectively, indicating an increasing frequency and intensity of extreme intense precipitation events, and a tendency toward shorter duration for single extreme intense precipitation events.

Key words: precipitation; intense precipitation; rainstorm; trend; climate change; mainland China

* The study is financially supported by the National Non-Profit Research Program of China (No. GYHY201206012).