

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.03.001

中国大陆降水时空变异规律

——Ⅲ. 趋势变化原因

任国玉^{1,2}, 柳艳菊¹, 孙秀宝^{2,3}, 张 莉¹, 任玉玉^{1,2}, 徐 影¹,
张 华¹, 战云健^{4,5}, 王 涛^{2,6}, 郭艳君¹, 陈 峪¹, 唐国利⁴, 郭 军⁷

(1. 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081; 2. 中国地质大学(武汉)环境学院大气科学系, 湖北 武汉 430074;
3. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044; 4. 中国气象局国家气象信息中心, 北京 100081;
5. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 6. 安徽省气象局公共气象服务中心, 安徽 合肥 230031; 7. 天津气候中心, 天津 300074)

摘要: 中国大陆现代降水表现出若干长期变化特征, 对现代降水趋势性变化的原因, 目前还没有很好了解。结合多种资料分析以及前人研究成果, 对中国大陆近几十年降水变化趋势的原因进行了探讨, 得到以下初步认识: ① 现代降水量变化趋势具有明显的地域性差异, 全国平均没有表现出显著增加或减少的长期变化, 但强降水事件频率和降水量出现明显增多, 而小雨事件特别是痕量降水事件显著减少。② 再分析资料表明, 最近几十年全国水汽净收支量在一定程度上增加了, 实际观测资料显示近地面和对流层中下层空气比湿或大气可降水量出现较明显上升趋势。③ 代用资料序列分析显示, 全国大部地区近几十年降水变化仍处于晚近历史时期正常自然波动范围内; 近百年观测的降水量序列也表明, 黄淮海地区降水具有多重时间尺度相互叠加作用特点, 低频自然气候变异的影响信号有清晰表现。④ 人类活动引起的大气中温室气体浓度增加对全国或东部季风区现代降水变化影响的信号, 目前仍难以识别; 区域性近地面风速减弱导致的雨量观测系统偏差以及大范围气溶胶浓度增加, 可能是东部季风区大多数台站观测到的强降水事件频率增加和小雨频率显著减少的两个重要原因。⑤ 主要与城市化影响相关的地面观测资料系统偏差, 可以部分解释现有分析表明的短历时强降水事件频率和累计降水量增加现象, 同时也很可能是城市台站小雨和痕量降水事件频率明显下降的另一重要原因。

关键词: 降水量; 强降水; 气候变化; 趋势; 人类活动; 自然变异; 中国大陆

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2016)03-0327-22

气候和水文学界目前十分关注的一个科学问题是, 在近 100 年特别近半个世纪全球气候明显变暖背景下, 全球和次大陆尺度大气降水是否也发生了显著的趋势性变化。如果存在明显变化, 其原因是什么? 目前能否准确预测未来十几到几十年的降水变化?

在理论上, 由于大尺度气候变暖, 大气容纳水汽能力提高, 海表和陆面蒸发速率加强, 大气中绝对水汽含量或比湿增加, 陆地降水量和强降水事件频率将上升^[1-2]。从全球尺度观测研究来看, 目前长序列资料覆盖度和质量还不够理想, 但现有分析表明, 最近 100 年北半球中高纬度地带年降水量或降水量距平百分率在多数地区有所增加, 冬季增加更为明显, 极端强降水事件频率和强度也存在一定程度上升, 似与理论预期一致^[2-5]。有研究认为, 至少北半球高纬度地区的降水量增加可以归因于人为引起的全球气候变暖^[6]。也有研究提出, 人为气候变暖不仅使湿润区变湿, 而且还使相对干燥区干旱出现更为频繁^[7-8]。

在中国大陆地区, 近百余年观测资料集中分布在东部, 该地区平均年降水量和降水量距平百分率未见明显趋势性变化。最近 60 年具有更好的观测资料, 这个时期全国平均年降水量变化趋势也很弱, 但年降水量距平百分率或标准化距平值呈现出一定程度上升趋势, 北方地区冬季和春季增加略为明显, 东部季风区暴雨量

收稿日期: 2015-12-23; 网络出版时间: 2016-04-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20160428.2235.014.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41575003); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB430202)

作者简介: 任国玉(1958—), 辽宁康平人, 研究员, 博士, 主要从事气候变化和古气候研究。

E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

或短历时强降水事件频数和强度也表现出一定程度上升^[9-13],而小雨频数和痕量降水频数呈现大范围明显下降趋势^[14-15]。近60年中国大陆降水量变化还存在突出的区域和季节特征,如降水量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、青藏高原和西北地区年降水量增多;暴雨降水量、日数的增加在珠江流域和东南诸河流域较为突出;进入21世纪以来,东部季风区降水相对减少和相对增加的区域范围均在萎缩,长期存在的所谓“南涝北旱”现象趋向缓解^[16]。

对于中国或东亚地区降水变化原因的探讨,主要侧重在对年代到多年代尺度气候自然变异性机理研究上^[17-20],对过去100年或60年长期趋势性变化原因的分析很少^[21]。近来有研究对这个问题进行了探讨。Zhou等^[22-23]提出最近几十年东亚和全球季风区降水趋势变化同热带西印度洋和中东太平洋海表温度(SST)上升及其夏季环流减弱有密切联系,而SST的明显变化可能是对全球大气温室气体浓度增加的响应;Liu等^[24]主要通过比较城市与乡村站小雨和强降水事件频率、降水量变化趋势,认为城乡之间没有明显差别,小雨减少和强降水事件频率增加是对全球气候变暖的响应,和气溶胶浓度增加无关;但Qian等^[15]、Chio等^[25]、Wang等^[26]和Li等^[27]认为,气溶胶浓度增加可能是中国东部小雨减少的主要原因,也可能是引起部分地区强降水事件频率增加的一个因素;张冬峰等^[28]通过比较观测分析和模式模拟结果指出,西部地区模拟和观测的降水表现出一致增加,东部季风区无法明确检测出长期降水变化的人为信号,说明季风区降水变化原因的复杂性。

显然,解释中国大陆地区现代降水长期趋势性变化的原因和机理,还需要开展深入研究。这里尝试根据代用资料和大气水汽通量变化分析,结合前人相关研究结果,包括笔者研究的主要结论^[9, 16, 21, 29-34],对近100年特别是近60年中国大陆降水包括极端强降水和弱降水长期变化趋势的可能原因,进行初步讨论。

1 分区和方法

1.1 分区

将全国或中国大陆划分为三大区域,分别是东部季风区、西北干燥区和青藏高原区。在进行水气通量和收支分析时,为计算方便,三大区域的界线均作简化处理,其分布和边界表示在图1中,全国则为三大区域的集合。

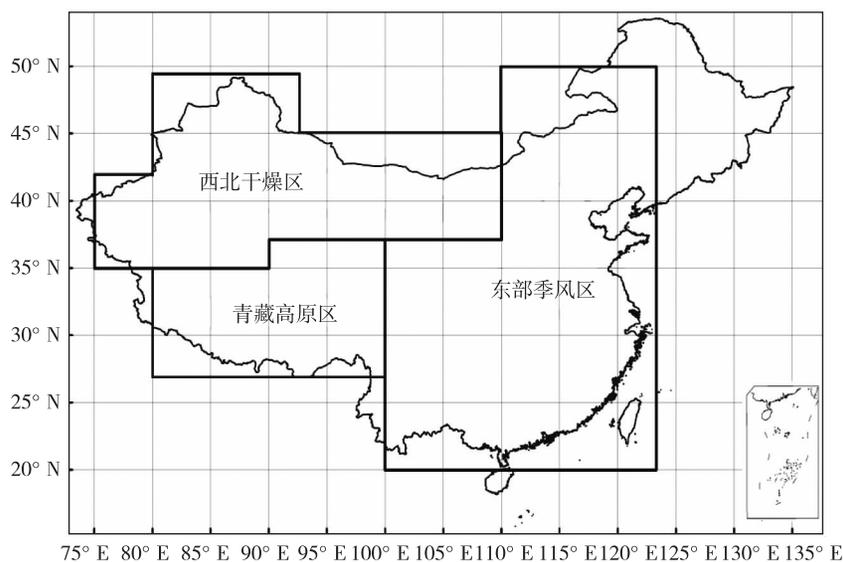


图1 水汽通量计算所依据的三大区域界线

Fig. 1 Boundaries of three regions used for calculating moisture flux and precipitable water

本文的黄淮海地区相当于淮河主河道以北的华北平原或者黄淮海平原; 海河流域以及其他大河流域界线取自第二次全国水资源综合规划的划分方法; 东北地区特指黑龙江、吉林和辽宁三省。

1.2 资料

1956年以来降水变化分析采用中国气象局国家气象信息中心提供的全国2 300个站的高密度日观测资料。资料选取、资料质量及其处理方法见文献[16]。对于不同级别降水, 小雨是指24 h内累计降水量在0.1~10.0 mm的降水, 暴雨是指24 h内累计降水量达到或超过50.0 mm的降水, 各级别降水量是指降水日中降水量的累计值, 而降水强度则为降水量累计值与降水日数的比值。

中国近100年降水量标准化距平序列是根据已发表的全国或东部地区年降水序列资料重新计算获得的, 其均值和标准差在整个序列时期内计算, 资料或序列来源分别为王绍武等^[35]、丁一汇和任国玉^[36]、章名立^[37]、闻新宇等^[38]。

海河流域近280年降水是根据“中国近500年旱涝分布图集”中12个站点旱涝等级指数^[39-40]和“雨雪分寸”记录重建的4个单点年降水量资料^[41-42]重建的, 方法见文献[31]。西北地区11条树轮重建的近百年降水量(干旱指数)标准化距平序列重建方法见文献[33]。

水汽通量和收支分析采用美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)(1948—2013年)和欧洲中期数值预报中心(ECMWF)(1979—2013年)的月平均再分析格点资料^[43], 分别简称NCEP和ERA-Interim。NCEP再分析资料在20世纪70年代末以前可能存在系统偏差^[44], 因此, 基于再分析资料的计算时段选取1979—2013年。探空观测的水汽资料来自国家气象信息中心的“中国高空月平均温度均一化数据集”和“中国地面站均一化相对湿度月值数据集”。高空露点温度和温度资料均进行了均一化处理。

1.3 方法

降水量距平是相对整个分析时期降水量平均值的差值; 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。全国平均序列构建采用网格化和面积加权平均方法计算, 1956年以来经纬度网格尺寸为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。海河流域近100年平均序列利用站点值直接算术平均获得。

采用Mann-Kendall方法^[45]检验单站和区域平均降水指标序列线性趋势的显著性。黄淮海地区降水序列的集成经验模态分解(EEMD)方法参照文献[46]。采用气象季节划分方法, 即12—2月为冬季, 3—5月为春季, 6—8月为夏季, 9—11月为秋季。

水汽通量是表示单位时间内流经整个区域或分区不同经纬度剖面上单位面积的水汽输送量, 反映出水汽输送的量值和方向。再分析资料整层垂直积分的水汽通量和大气可降水量计算采用丁一汇^[47]介绍的方法, 探空资料大气可降水量计算参考翟盘茂和周琴芳^[48]的方法。大气水汽分析垂直范围均为地面到300 hPa位势高度。全国和三大区域水汽收支主要反映各自区域内大气水汽源汇强度, 它取决于流经各经纬度剖面的水汽通量的总和或净收支情况。格点水汽资料处理和分析方法同降水资料, 但采用 t 检验方法检验长期趋势的显著性。

2 降水变化事实

自20世纪50年代中期以来, 中国大陆平均年降水量距平百分率或标准化距平值没有出现明显趋势性变化, 仅略有增加, 70年代末以后的增加较为明显(图2)。这种情况发生在西部大范围地区降水量普遍增加的情况下, 说明东部季风区年降水总体上呈现出轻微下降态势。

过去100余年, 年降水量同样没有出现明显的长期趋势性变化。全国或东部地区年降水量标准化距平序列之间存在着相似的年际和年代际波动特点, 仅20世纪40年代差异较大, 这和当时观测资料严重缺乏有关, 但与北半球中高纬度其他地区不同^[2], 均未展示出长期趋势性增加变化(图3)。已有降水序列在年降水量变幅上存在一定程度不同, 这种差异一方面可能来自所用原始资料信息的差别, 另一方面也和计算方法不同有

关。闻新宇等^[38]使用了 CRU (Climate Research Unit) 的网格化资料, 后者在网格化过程中采用了较少的站点资料, 这可能是其年际变异性比其他序列大的主要原因。

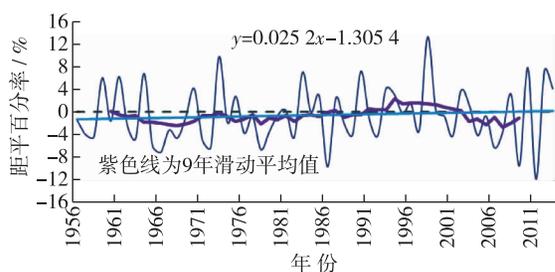


图2 1956—2013年中国大陆平均年降水量距平百分率变化^[16]

Fig. 2 Annual precipitation anomaly percentages of mainland China during 1956—2013^[16]

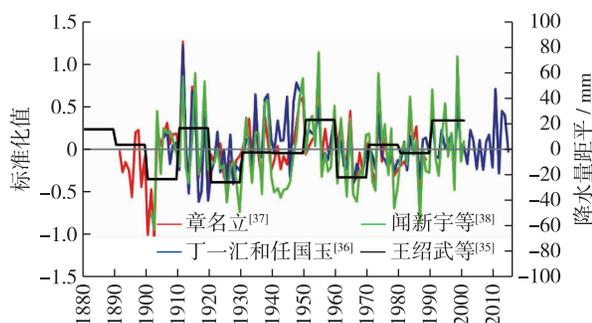


图3 1890—2005年中国大陆(东部)平均年降水量标准化距平(左Y轴)和降水量距平(右Y轴)值变化

Fig. 3 Standardized annual precipitation (left) and annual precipitation anomalies (right) over China (eastern China) in 1890—2005

中国近几十年极端强降水变化的事实, 已在文献[31]进行了介绍, 主要结论是: 1956年以来全国平均暴雨量、日数均呈现较显著上升趋势, 但暴雨强度总体变化不明显; 暴雨量、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、日数和强度均呈较明显的下降趋势; 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)或显著增加(显著减少)的站点数, 一般具有比减少(增加)或显著减少(增加)更高的百分比, 且随降水历时减小这种现象愈发明显, 说明全国极端强降水事件频数和强度有上升趋势, 同时极端强降水事件持续时间呈现出短历时性倾向。

对于极端弱降水事件的变化, 已有若干研究^[10, 15, 30, 49-50]。这些研究表明, 近几十年全国特别是东部小雨频率明显下降了^[12-13, 15, 51]。表1给出根据全国2300个高密度观测站的分析结果。可以看到, 1956—2013年期间中国大陆小雨降水量和小雨频率增加的站点比例分别只有19.1%和8.5%, 大部分站点二者均明显减少, 其中小雨日数减少的站点比例达到91.5%, 显著减少的站点比例也达到75.9%。分区分析表明, 小雨降水量、日数减少主要发生在东部季风区。

表1 1956—2013年全国年小雨降水量、日数呈增加(显著增加)和减少(显著减少)的站点数及百分比

Table 1 Number of stations with increasing trends (significant increasing trends) and decreasing trends (significant decreasing trends) of annual light rains and their percentages in mainland China

趋势	小雨量		小雨日数	
	站数	比例/%	站数	比例/%
增加	240	19.1	106	8.5
减少	1 015	80.9	1 147	91.5
显著增加	46	3.7	31	2.5
显著减少	314	25.0	951	75.9

注: 显著增加(减少)是指通过了 $p \leq 0.05$ 的显著性水平检验。

在东亚地区, 包括中国东部, 按照日降水量 ≥ 1.0 mm 标准的全部降水日数和小雨日数没有呈现出显著减少^[52], 因此, 上述中国大陆小雨频数下降主要是小雨事件中的微量或弱降水(日降水量在 0.1~1.0 mm)明显减少造成的。根据 Xu 等^[53] 和 Liu 等^[11] 研究, 中国小雨中的弱降水事件减少最多, 小雨中偏重量级降水频数下降趋势较小。对全国 2300 个站的分析表明, 近半个多世纪中国大陆痕量降水(日降水量达不到 0.1 mm 的降水)事件频数出现了比小雨事件频数更显著的下降趋势, 东部季风区这种一致的下降现象尤其突出。因此, 过去几十年东部季风区轻量级降水发生频数出现了非常明显的趋势性下降变化。

3 大气水汽变化

3.1 水汽输送和可降水量

表 2 给出 1979—2013 年期间全国和三大区域水汽通量指标的变化趋势。NCEP/NCAR 和 ERA-Interim 两套资料均表明, 全国水汽净输送通量具有一定程度增加趋势, 其中 ERA-Interim 增加趋势较大, 通过了 $p \leq 0.05$ 的显著性检验, 进入 21 世纪之前上升趋势更为明显。两套资料分析结果尽管年际变异相似, 年代际和趋势性变化差异却很大, 如近 10 年 NCEP/NCAR 水汽净输送通量表明上升, 而 ERA-Interim 则反映下降, 说明利用再分析资料分析水汽净通量变化还存在一定不确定性。

全国水汽净收支变化取决于西边界、南边界、东边界和北边界的输入、输出通量的平衡(表 2)。西边界的输入和东边界输出通量都显示了较显著的趋势性减少, 但由于输出通量减小速率(两套资料分别为 -14.1×10^6 (kg/s)/10 a 和 -19.8×10^6 (kg/s)/10 a 明显比输入通量减小速率(两套资料分别为 -7.4×10^6 (kg/s)/10 a 和 -9.8×10^6 (kg/s)/10 a 要大(东西方向净通量增加), 尽管南边界输入也减少, 北边界输出却增加, 但变化的量值较小, 因此, 全国水汽净收支量以 $2.4 \times 10^6 \sim 8.4 \times 10^6$ (kg/s)/10 a 的速率增加, 其中 ERA-Interim 表明的增加趋势通过了 $p \leq 0.05$ 的显著性检验。这和 20 世纪 70 年代末至今全国平均年降水量的轻微增加趋势(图 2)一致。

表 2 全国和三大区域 1979—2013 年水汽输送、水汽净通量 (10^6 (kg/s)/10 a) 和大气可降水总量 (mm/10 a) 趋势性变化

Table 2 Linear trends of annual mean moisture transport at different boundaries in whole China and the sub-regions, moisture transport budget (10^6 (kg/s) /10 a) and atmospheric perceptible water (mm/10 a)

区域	资料类型	水汽输送				水汽含量	
		西边界	东边界	南边界	北边界	水汽净通量	大气可降水量
全国	NCEP	-7.43*	-19.82*	-11.66*	3.67*	2.43	-0.09
	ERA	-9.77*	-14.08*	-3.07	0.39	8.41*	0.02
西北干燥区	NCEP	0.89	-4.63*	0.47	2.91*	5.29*	0.04
	ERA	-0.86	-5.09*	1.52*	0.46	3.08*	-0.02
青藏高原区	NCEP	-1.29	-1.96*	-6.26*	0.29	-5.89*	0.08*
	ERA	0.37	-1.04*	1.10	0.46	2.05*	0.18*
东部季风区	NCEP	8.33*	14.08*	-5.48	0.76	5.25*	-0.38*
	ERA	8.90*	19.82*	-4.96	0.85	1.07	-0.09

注: * 为通过 $p \leq 0.05$ 显著性水平检验。

从全国三大区域水汽净收支变化情况看, 西北干燥区 NCEP/NCAR 和 ERA-Interim 两套资料均表明具有较显著增加趋势, ERA-Interim 增加趋势更大, 均通过了 $p \leq 0.05$ 显著性检验(表 2)。西北干燥区水汽净收支增加主要是东边界输出明显减少和南边界输入一定程度增加引起的, 西边界水汽输入变化并不大, 两套资料甚至表明了很小的反向变化趋势, 但东边界输出通量减少均很显著, 介于 $-4.6 \times 10^6 \sim -5.1 \times 10^6$ (kg/s)/10 a 之间, 导致水汽净收支显著增加。这种净收支增加现象和西北干燥区年降水量明显增多的事实也一致。在 1999—2002 年期间, 西北干燥区水汽净收支出现异常高值, 此后突然下降, 近 10 年维持在与 20 世纪 90 年代相当的水平上。

青藏高原区两套资料表明水汽净收支具有不同的变化, 但通常认为可信度更高的 ERA-Interim 资料增加明显。东部季风区两套资料也存在较大差异, 其中 NCEP/NCAR 资料增加趋势明显, 而 ERA-Interim 资料仅轻微增多, 近 15 年二者的变化趋势完全相反, ERA-Interim 资料表明下降趋势, 再次说明再分析资料存在较大不确定性。

1979年以来全国三大区域的大气可降水量变化,两套资料反映出的趋势不一致,NCEP资料为较明显的下降,而ERA-Interim资料序列没有明显变化(图4)。两套资料均表明,1998年是全国大气可降水量最高的一年,显然和强ENSO事件影响及其长江流域特大暴雨洪水有联系;此后,全国平均大气可降水量明显下降,近10年成为1979年以来最低阶段。

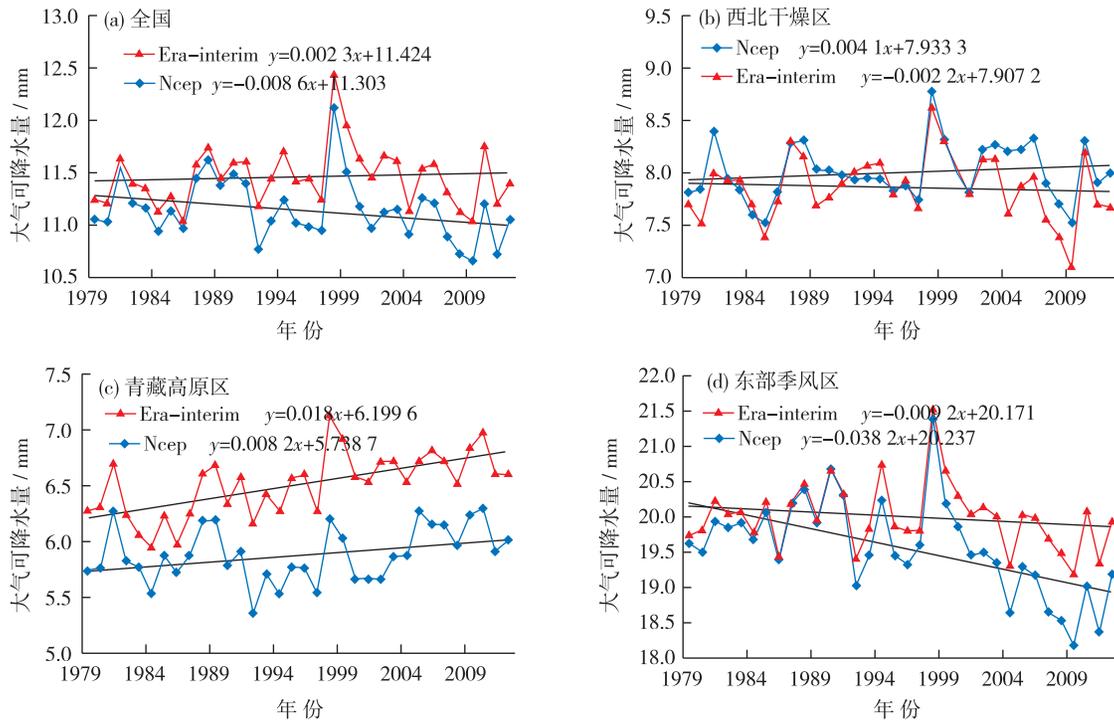


图4 1979—2013年全国及其各大区平均大气可降水量逐年值及其线性趋势

Fig. 4 Country and sub-region averaged annual precipitable water amount over period 1979—2013

三大区域大气可降水量变化,两套资料在西北干燥区反映出的趋势都不明显,NCEP资料略有增加,ERA-Interim轻微减少(图4);青藏高原区两套资料平均值差异很大,但都显示出较明显上升趋势;东部季风区两套资料均表明下降趋势,其中NCEP序列的下降趋势很明显,1998年的异常高值也显得非常突出,此后,大气可降水量出现非常显著的减少现象。

3.2 大气水汽含量

利用探空、地面观测资料分析大气比湿和水汽含量变化,已有一些工作^[54]。Zhao等^[55]利用经过均一化处理的探空观测记录,分析了全国1970—2008年大气水汽含量和可降水量的长期变化趋势,发现对流层年平均比湿增加了,其中大部分地区300 hPa以下大气可降水量增加2%/10 a~5%/10 a,中国北部冬季增加更多,但对流层平均相对湿度变化很小。这一结论和Xie等^[56]针对1979—2005年大气可降水量和相对湿度变化的分析具有一致性;郭艳君和丁一汇^[57]采用92个探空站露点温度资料,分析了全国1958—2005年比湿的变化特征,发现对流层低层呈上升趋势,中高层和平流层低层则为下降趋势,1979—2005年期间这种不同方向变化趋势尤为明显,且对流层低层的上升趋势主要发生在夏、冬两季,但1979—2005年四季均呈上升趋势,夏季最明显。

图5给出根据更新的均一化探空资料计算获得的1979—2012年全国及其各大区平均大气可降水量逐年值及其线性趋势,可以看到不论全国还是各个大区,大气可降水量都明显增加了,其中全国平均增加速率为0.4 mm/10 a,东部季风区达到0.5 mm/10 a,均通过了 $p \leq 0.05$ 的显著性水平检验。这一结果和Zhao等^[55]结论基本相似,说明最近30多年探空观测资料反应的对流层中下层大气湿度出现明显增加现象。

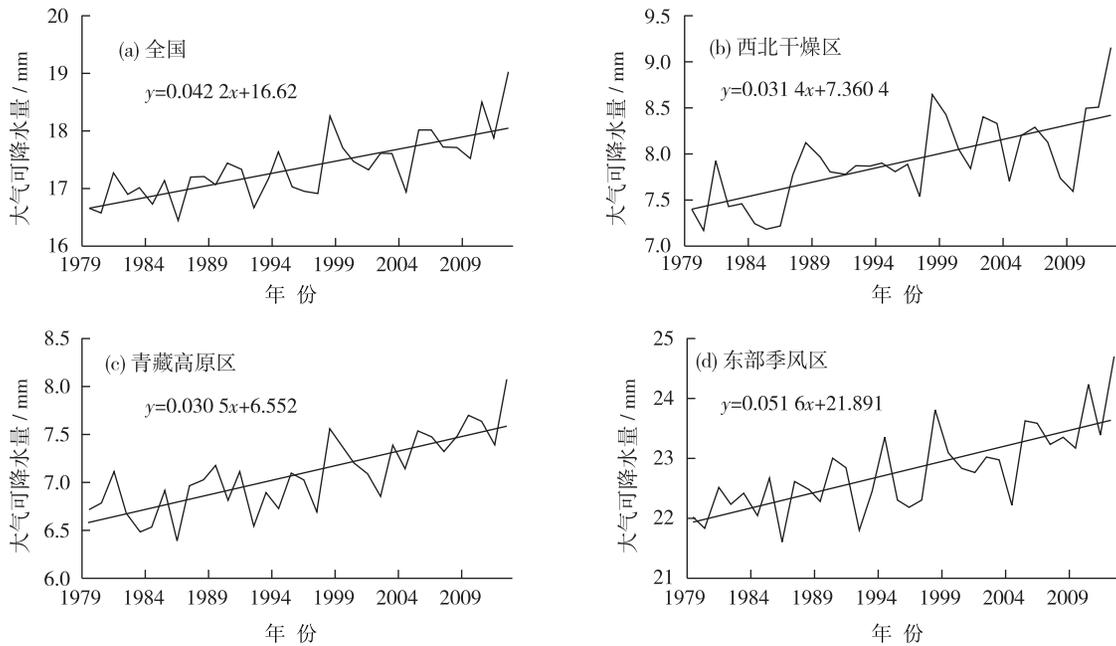


图 5 1979—2012 年全国及其各大区平均大气可降水量变化

Fig. 5 Country and sub-region averaged annual precipitable water amount over period 1979—2012

Song 等^[58]利用地面大气湿度观测资料,分析中国大陆地区地面空气饱和比湿、比湿和相对湿度的长期变化,指出此前 50 余年全国平均饱和比湿明显上升,夏季潜在湿度增加趋势最为明显,但中东部地区夏季是例外;实际比湿在大部分地区也明显上升了,西部地区尤其明显,江淮地区和华南变化不显著,夏季在东部大部分地区则呈现变干趋势;年平均相对湿度在全国多数地区表现为下降趋势,但中东部地区变化趋势相反。

因此,总体上看,近地面大气绝对湿度变化与探空资料反映出的对流层中下层变化基本一致,均表明过去几十年中国大陆地区大气低层水汽含量一般是增加的。20 世纪 70 年代末以后增多尤其明显。这一结论和依据再分析资料的分析结果不完全一致,特别是同再分析资料表明的大气可降水量变化还存在矛盾。造成这种不一致的一个原因可能在于,再分析资料没有准确同化区域内的水循环过程参数,对实际蒸发量的估计有较大偏差,尽管也可能与地面和探空资料序列中残存的非均一性影响或大气水汽含量计算方法有关。在强烈人类活动干预情况下,区域或流域内的实际蒸散发可能随时间在增加,并对大气水汽含量和可降水量变化具有较大贡献。

这一推论得到根据部分流域降水量和径流量资料计算得到的实际蒸发量变化结果的支持。例如,长江干流以北的主要外流河,过去几十年径流量减少趋势明显大于平均降水量减少趋势^[53, 59-60],表明主要由于强烈的人类活动干预,其次由于降水或气候因素变化,年平均径流量大幅度减少,流域内实际蒸散发量已经增加了。研究还表明,人类活动对河流径流量变化的影响在南方比较弱,长江大通水文站和珠江下游的径流量同流域平均降水量之间存在非常好的正相关关系^[29, 53],表明降水量年际和年代际波动及其长期趋势性变化仍然是控制其径流量演化的主要因素,但河流上中游的大坝、农业灌溉面积和城市人口的增加,说明人类活动影响还在较大程度上存在,实际蒸散发量很可能也在随时间增加。

中国东部地区陆表实际蒸散发量的增加以及可能主要由此而引起的大气低层水汽含量的增多,应在一定程度上对部分地区降水总量和极端强降水量增加造成了影响。

4 自然降水变异影响

4.1 历史降水透视

长序列古气候代用记录有助于了解现代观测到的降水变化或多年代尺度变异是否超出了历史自然气候变异范围,对进一步认识现代降水变化原因或机理具有重要意义。但是,重建的降水资料常常仅代表单个地点,对于过去数百年甚至上千年较大区域尺度平均降水变化的定量重建工作还很少,为开展这类分析造成了困难。特别是目前还没有针对全国的过去数百年代用降水量定量重建资料序列,无法从全国范围开展这种分析。

已有研究给出几个中国较大区域平均降水量或干湿变化序列。张德二等^[61]、郑景云等^[62]、Qian等^[63]、郝志新等^[64]分别利用历史文献资料及其重建产品分析了中国东部不同区域近1 000年干湿或旱涝事件变化,结果均表明最近几百年东部不同区域干湿气候存在着明显的年代到多年代尺度波动,但20世纪以来的干湿变化没有出现明显的历史性异常。图6给出海河流域1736—2012年降水量距平百分率变化。这条序列根据“雨雪分寸”和历史旱涝指数两种代用资料以及长序列降水观测资料重建获得^[31-32]。尽管20世纪50年代以来,海河流域年降水量出现较明显的下降趋势,气候干旱化现象比较突出,但从280年的历史序列来看,现代的降水趋势性变化并未突破历史时期波动的界限,因此,目前难以确认全球或区域人类活动影响的信号。

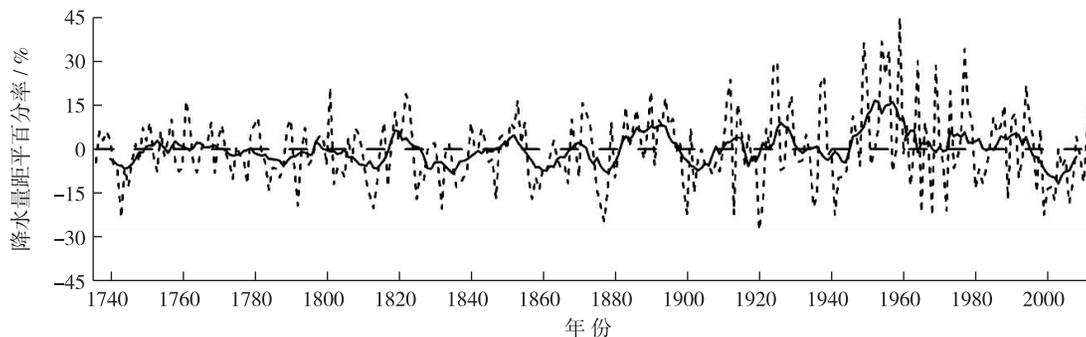


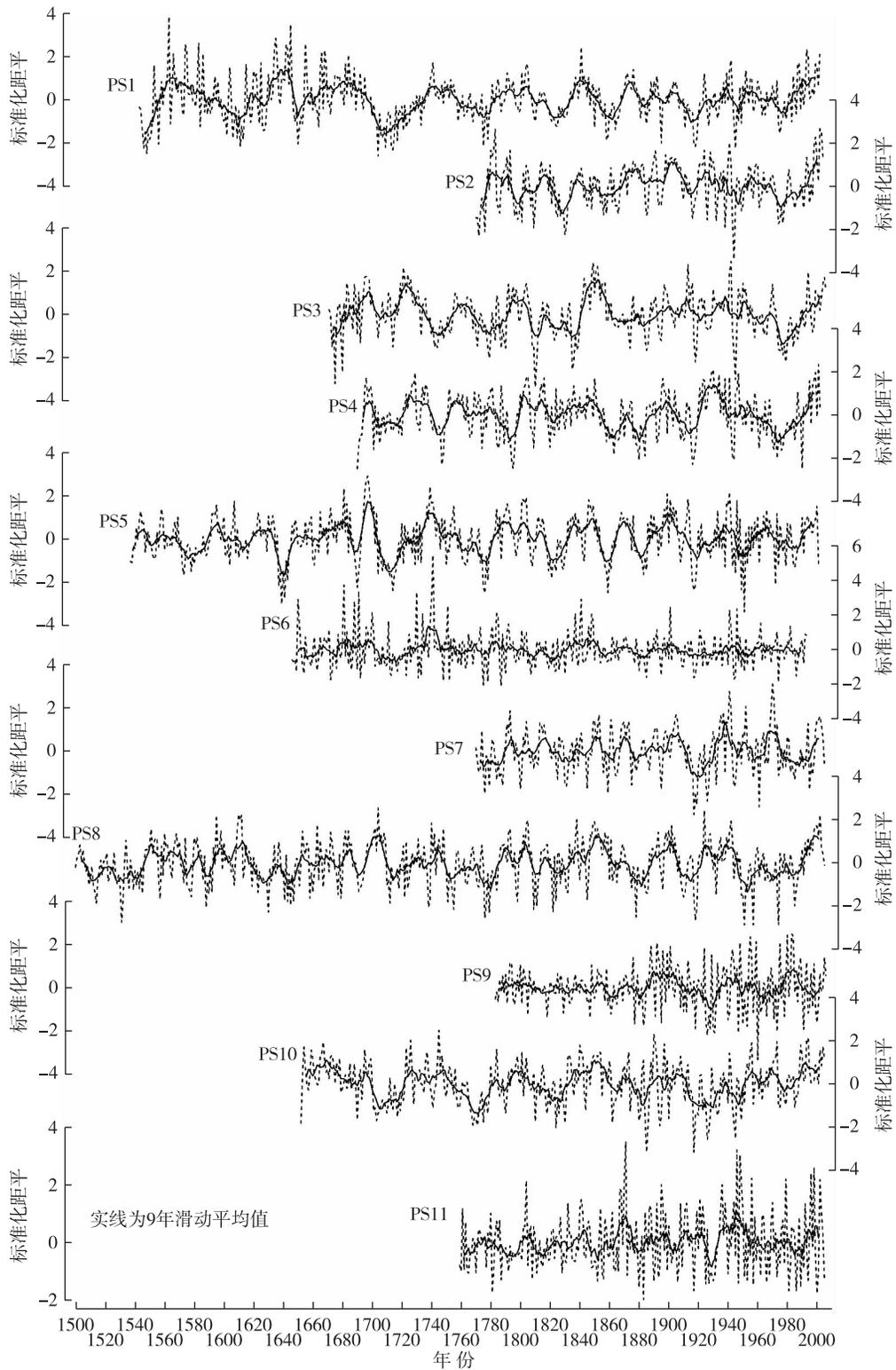
图6 海河流域1736—2012年降水量距平百分率变化^[32]

Fig. 6 Annual precipitation percentage anomalies in the Haihe River basin over period 1736—2012^[32]

在西部地区,主要采用树轮资料重建获得的区域性降水或干湿变化规律具有不同的空间特点。在青藏高原东北部,树轮资料重建的降水量除了表现出明显的年代到多年代尺度波动^[65-68]外,20世纪后半叶降水量似乎已超出近1 000年甚至近2 000年历史最高水平^[69-70],成为树轮资料重建时期最为湿润的时期。如果树轮年表和降水重建序列完全可信,这一结论无疑对于现代气候变化检测和归因具有重要指示性意义,说明20世纪特别是最近几十年仪器观测的降水量增加可能不是自然气候变异引起的。

但是,在新疆地区及其西北东部,树轮资料似乎没有表现出和青藏高原东北部相似的降水或干湿变化。图7表示西北地区11条代表不同地点的树轮重建降水量(干旱指数)标准化距平序列。这11个地点分别为北疆地区^[71]、天山地区^[72]、伊犁民勒克^[73]、呼图壁河^[74]、乌鲁木齐河源^[75]、天山中部^[76]、特克斯河^[77]、巴仑台^[78]、甘肃山丹^[79]、伊犁^[80]和贺兰山北部^[81]。可以看到,北疆和天山地区的降水或干湿重建序列多数再现了近几十年较明显的气候变湿过程,但现代的趋势仍然保持在历史时期自然波动范围之内;其他地点甚至连近几十年的降水增加现象都表现不明显,难以识别出现代降水或干湿变化的异常特征。

因此,从可获得的代用资料序列分析结果看,中国部分地区现代年代以上尺度降水变化似乎仍处于正常波动范围之内,仅个别区域特别是青藏高原东北部表现出一定程度异常。这种异常增加也可能和树轮重建固有的不确定性有关,包括树木生长趋势处理方法、大气中CO₂浓度增加的肥力效应以及大气温度上升的协同效应等,需要深入研究予以澄清。综合现有古气候重建资料和分析结果,中国近几十年各地观测到的降水趋势性变化,多数仍处于年代到多年代尺度自然气候变异的区间内,目前尚难以将其归因于不同时空尺度的人类活动影响。



PS1: 北疆地区 (上年 7 月至当年 6 月降水量)^[71]; PS2: 天山地区 (年降水量)^[72]; PS3: 伊犁尼勒克 (7—8 月降水量)^[73]; PS4: 呼图壁河 (上年 8 月至当年 7 月降水量)^[74]; PS5: 乌鲁木齐河源 (4—5 月降水量)^[75]; PS6: 天山中部 (上年 7 月至当年 2 月降水量)^[76]; PS7: 特克斯河 (上年 7 月至当年 6 月降水量)^[77]; PS8: 巴仑台 (当年 7 月至次年 6 月降水量)^[78]; PS9: 甘肃山丹 (上年 8 月至当年 6 月降水量)^[79]; PS10: 伊犁 (1—8 月 PDSI 指数)^[80]; PS11: 贺兰山北部 (5—7 月 PDSI 指数)^[81]

图 7 西北地区 11 条树轮重建的降水量 (干旱指数) 标准化距平序列^[33]

Fig. 7 Reconstructed standardized annual precipitation (dryness index) anomalies based on tree-ring data over Northwest China^[33]

4.2 多年代尺度变异性

前述海河流域和西北地区代用资料均反映出明显的多年代尺度降水或干湿变化特征。在现代仪器观测时期, 年际到多年代尺度的降水变异性也普遍存在。图 8 表示 1911—2012 年黄淮海地区年降水量标准化距平序列的集成经验模态分解(EEMD) IMF 分量(IMF1—IMF5)。所用站点资料包括北京、天津、太原、石家庄、济南、烟台、青岛、徐州、郑州和西安 10 个长序列观测记录。第 1 分量(IMF1)和第 2 分量(IMF2)分别以准 2 年和准 4~5 年振动为特征, 对原序列方差的贡献分别达到 49% 和 25%, 说明降水量变化主要表现为较强的年际变异性; 第 3 分量(IMF3)展示出准 11 年振动, 对原序列方差的贡献为 8%; 第 4 分量(IMF4)表现为很弱的准 20 年振动, 对原序列方差的贡献仅 4%; 第 5 分量(IMF5)大致为 60 年左右振动表现形式, 振幅较明显, 对原序列方差的贡献也较大, 达到 14%。

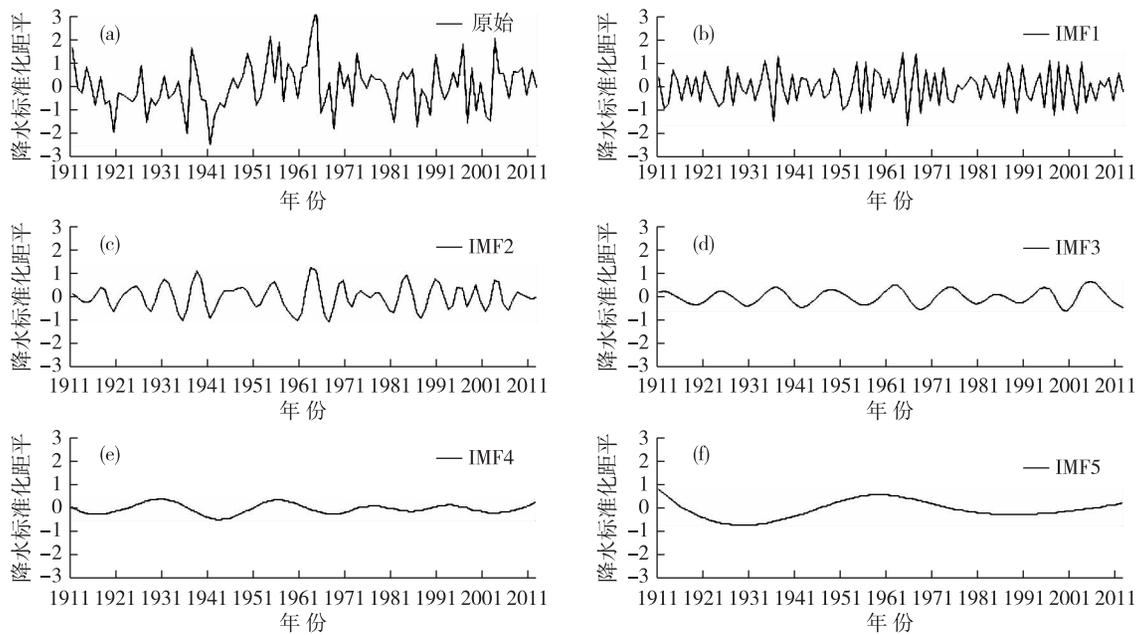


图 8 1911—2012 年黄淮海地区年降水量标准化距平序列集成经验模态分解 IMF 分量(IMF1—IMF5)时间变化
Fig. 8 IMF1—IMF5 components of empirical mode decomposition for region-averaged annual precipitation of the Haihe-Yellow-Huaihe Rivers in 1911—2012

值得注意的是, 包括黄淮海平原在内的华北地区夏季降水不同时间尺度上的波动性质和规律, 已经为先前的研究所揭示, 其中 4~5 年、11 年和 60 年左右的准周期振动均有报道^[17-18, 34, 63, 82]。针对南水北调中、东线区域北部地区分析中指出的降水(干湿)60 年和 10.5 年左右准周期现象, 和本文分析结果一致^[34], 说明这些自然气候变异的准周期性可信。

黄淮海平原降水量多尺度自然变异的准周期性现象, 可能与气候系统不同的内外部因子影响有关。其中, 4~5 年的振动可能和 ENSO 事件影响有关; 准 11 年和准 20 年左右振动可能与太阳活动及其输出太阳辐射的变化有关; 较明显的 60 年左右周期性振动可能反映了 PDO 或 AMO (NAO) 等多年代尺度变异模态的影响^[83]。

5 人类活动影响信号

人类活动可通过 3 种途径影响大尺度降水变化: 温室气体排放增加造成全球气候变暖引起的蒸发作用加强和大气环流变化, 人为气溶胶排放增加造成的直接和间接气候效应以及大尺度土地利用和土地覆盖变化对区域水循环过程的影响^[36, 84-85]。由于总体看来中国大陆地区现代降水量趋势性变化不明显, 加之区域尺度降水波动性较大, 目前仍难以有把握地检测出人类活动影响的信号。

在全球变暖对降水的可能影响方面, Zhang 等^[86]比较了观测和模拟的 20 世纪全球各纬度带平均年降水量, 发现多数纬度带观测的降水量趋势和具有温室气体强迫的模式模拟的降水量趋势具有一致性, 但和没有温室气体强迫的模式模拟结果出现较大差异, 因而认为, 全球陆地降水量变化序列中能够识别出人类影响的信号。Min 等^[5]通过采用最优指纹技术分析进一步指出, 在北半球陆地的 2/3 区域, 人类导致的大气温室气体浓度增加已经引起 20 世纪后半叶强降水事件强度增加。

尽管气候模式不断改进, 迄今多数模式对中国大陆降水基本特征和变异规律的模拟结果仍不尽如人意。假设多模式集成具有足够模拟能力, 最近几十年具有温室气体、气溶胶和自然辐射强迫的全球气候模式模拟结果多数同实测资料分析结果存在较大差异。明显的差异主要表现在绝大多数全球模式模拟的华北和东北地区降水量变化不像观测分析结果那样减少, 而是一般性增加^[87-88], 仅区域气候模式表明部分华北地区减少^[89]; 模拟的西部地区特别是西北地区降水增加, 增加速率一般不如观测来得大^[87-90]; 对东部季风区特别是华北地区, 降水量年代到多年代尺度的低频波动特征没有模拟出来^[84, 90]; 对于小雨或轻量级降水频数变化, 模式与观测之间也存在差异, 模式模拟的减少明显偏弱^[15]。

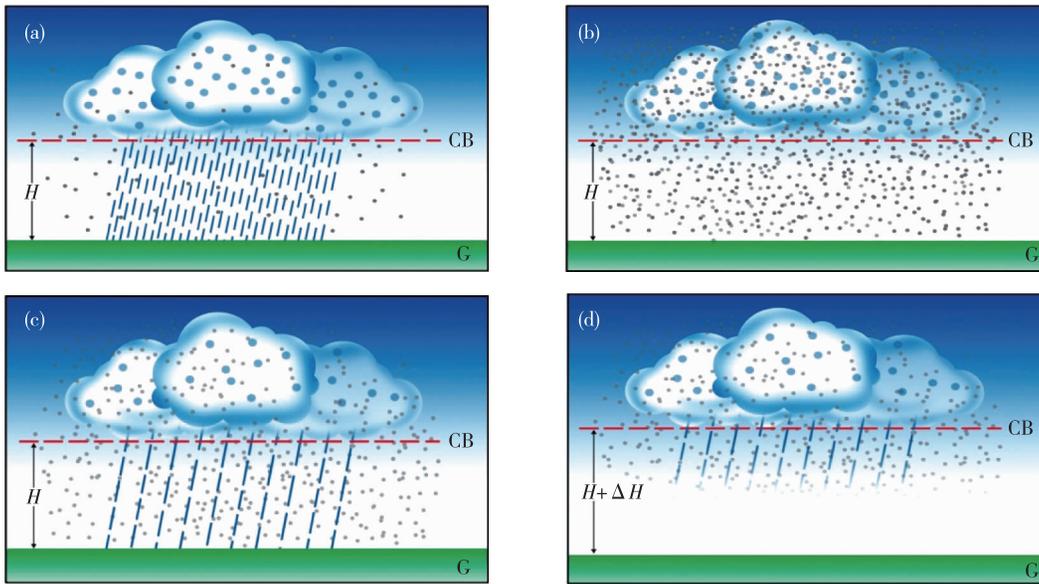
总体上看, 模式模拟和观测分析在东部季风区有更大差异, 西部特别是西北地区相对具有较好的一致性。因此, 东部季风区最近几十年降水变化, 目前难以检测出大气中温室气体浓度增加的影响信号, 不过有研究认为人为全球变暖对极端强降水变化的影响可以识别^[24, 91]; 然而, 西北地区近几十年降水量的明显上升, 全球气候变暖影响的可能性存在^[28, 33, 92]。Zhou 等^[22-23]认为, 全球变暖背景下亚洲东、南部的大洋特别是印度洋海表温度相对于大陆异常增暖, 可能是造成东亚夏季风减弱和 20 世纪 70 年代末以来中国降水出现“南涝北旱”的重要因素。印度洋和中东太平洋海表异常升温是否为对全球变暖的响应, 需要进一步研究证实。

气溶胶排放的影响目前受到极大关注。中国东部是全球气溶胶排放和浓度增加最快的地区之一, 也是气溶胶气候效应研究的热点区域^[93-96]。气溶胶主要通过 3 种途径影响区域降水变化: ① 通过削弱到达地表的太阳直接辐射和总辐射引起气溶胶的直接辐射效应^[93, 97]; ② 通过气溶胶与云的相互作用引起的半直接效应和间接气候效应^[93, 98-100]; ③ 通过气溶胶直接和间接效应共同作用于地表辐射平衡过程以及海陆热力差异间接影响大尺度季风环流系统^[98, 101-102]。

就气溶胶与云的相互作用来看, 作为云的凝结核, 高浓度气溶胶在水汽条件不充分的情况下具有降低云滴相互碰并过程、减小雨滴和降水形成效率以及增长云生命期的作用, 但适当浓度气溶胶在水汽条件充足情况下则具有补充额外凝结核、增进从云滴到雨滴和降水转化的作用^[103-105]。气溶胶对云和降水的影响这样就具有“贫者愈贫, 富者愈富”的效应, 引起偏干地区和偏干季节小雨及痕量降水频率减少、偏湿地区和偏湿季节短历时强降水频率、强度增加(图 9)。前述中国东部季风区观测到的大范围小雨、痕量降水事件频数显著下降以及夏季极端强降水事件频数、雨量较明显的增多, 不排除与气溶胶这种作用有联系的可能性^[15, 94, 106]。

气溶胶可以明显削弱太阳直接辐射和总辐射, 导致地表潜在蒸散发量(PET)下降, 如果没有人工筑坝、农业灌溉和城市化等人类活动影响, 这会减少实际蒸散发量以及大气水汽含量和可降水量, 引起局地 and 区域性降水量减少。但是, 太阳辐射削弱造成的 PET 和实际蒸散发量下降, 又会有利于土壤和浅层地下水存蓄, 减轻由于降水量下降引起的干旱可能性。过去几十年中国东部特别是华北地区各种方法计算的 PET 和蒸发皿(水面)蒸发量都明显下降了^[107-108]。然而, 由于气溶胶导致的 PET 和实际蒸散发量下降在多大程度上影响了华北地区大气降水量和水文干旱, 目前还缺乏研究。Zhao 等^[109]利用气溶胶-气候耦合模式模拟了沙尘气溶胶对干燥和半干燥区气候的影响, 发现沙尘气溶胶对干燥强度和干燥面积的影响依赖于它对降水和 PET 影响的比对关系, 其中 PET 可能起主导作用, 而地面净辐射通量又是 PET 的最大影响因子。沙尘气溶胶可以使某些地区的干燥强度有所缓解。

关于气溶胶对东亚夏季风环流和降水的可能影响, 有若干相关研究, 结论不尽相同^[17, 93, 110]。Menon 等^[110]认为黑碳气溶胶排放导致东亚夏季风变弱, 华北地区降水减少; Lau 和 Kim^[111]提出印度地区黑碳气溶胶排放也可通过影响季风环流强度减少华北地区夏季降水量; Zhang 等^[93]的模拟研究发现, 东亚黑碳气溶胶



(a) 凝结核丰度适中, 云滴多而大, 雨滴多, 地面雨量大; (b) 气溶胶浓度高, 凝结核丰度大, 云滴多而小, 雨滴少, 地面无雨; (c) 气溶胶浓度较高, 凝结核丰度较大, 云滴较多、较小, 雨滴较少, 地面雨量小; (d) 同 (c), 但凝结高度抬升, 地面无雨

图9 不同气溶胶浓度条件下的云物理过程和降水示意

Fig. 9 A sketch of aerosol effects on clouds and precipitation under different climate backgrounds

排放在一定程度上增加了华北等地区夏季降水量。显然, 关于这个问题还需要开展更多研究^[96]。Zhang等^[101]利用一个气溶胶-气候在线耦合模式模拟表明, 硫酸盐、黑碳和有机碳气溶胶的直接和半直接综合效应在东亚地区大气顶和地表夏季均产生明显的负辐射强迫, 导致夏季平均地表气温降低, 且陆地降温明显大于海洋, 造成海陆热力差异减弱, 使得东亚夏季风强度减弱, 夏季降水减少。

区域性土地利用和土地覆盖变化对中国大气降水的影响, 由于缺少高质量的长序列观测资料和可靠的研究方法, 目前难以获得令人信服的结论。Gao等^[112]和Fu^[113]通过区域气候模式的敏感性试验研究发现, 由自然植被到农业等土地利用的转化明显影响了中国部分地区的降水量, 其中夏季华北地区降水减少, 而江南地区降水增加, 但冬季似乎存在相反的变化空间分布型^[114]; 模式敏感性试验也发现, 大规模农田灌溉可通过地气系统相互作用影响区域降水过程^[115]。

6 观测资料的偏差

6.1 弱风速偏差

气象和水文常规观测中一般采用雨量计记录降水量。雨量计测量降水量的主要误差, 来自入口处空气动力学或风速的影响以及降水停止后的蒸发^[116-118]。在有风情况下, 雨量计测量的降水量恒比实际降水量小, 即雨量计捕获率始终小于100%; 湍流越强或风速越大, 捕获率也就越小(图10)。在东北地区冬季降雪观测情况下, 日平均风速为3 m/s, 捕获率为75%左右; 而当日平均风速达到6 m/s时, 捕获率仅有50%左右^[119]。

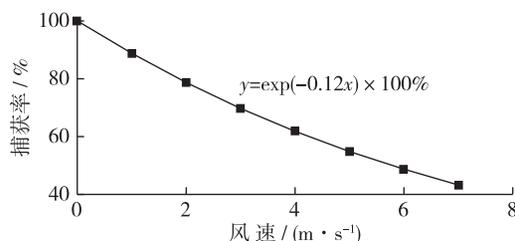


图10 中国东北地区冬季日平均风速与雨量计降雪捕获率的关系

Fig. 10 Relationship between winter snowfall catch ratio of rain-gauge and daily mean wind speed in Northeast China

在过去的几十年, 中国大陆地区近地面平均风速普遍明显下降^[9, 120-123]。这种现象也发生在全球其他大陆, 被称之为“全球静稳”^[124-125]。1956—2004年期间, 全国年平均近地面风速减少速率约为-0.12 (m/s)/10 a, 1974

年以后年平均风速下降速率更大; 北方地区和华中地区年和季节平均风速减小趋势均很明显^[9]。由于高空平均风速也存在减弱现象, 全国大范围近地面平均风速下降同大尺度环流系统变化有一定联系, 但更主要的影响因素是城市化及其观测场附近微观环境变化的影响^[123, 126-127]。不论何种原因, 近地面风速减弱均将引起雨量计捕获率随时间上升。在实际降水量不变的条件下, 捕获率的上升将造成测量的降水量增加, 产生观测降水量升高的假象。

由于风速对雨量计捕获率的影响在冬季降雪情况下更明显^[128], 而平均风速长期减少速率的绝对值在冬春季节较大, 这可能是中国北方广大地区近几十年冬春季降水量表现出增加趋势的原因之一。另外, 由于在强对流等天气条件下一般平均风速也较大, 近地面平均和瞬时风速的下降及其雨量计捕获率的上升, 是否也造成了多数气象站观测到的强降水量和强降水强度长期增加, 就是一个亟待澄清的科学问题。

6.2 城市化偏差

城市化是土地利用和土地覆盖变化一种特殊的局地表现形式, 城市化引起城区及其附近郊区地面气候急剧改变。由于城市建成区面积在全国或全球陆地仅占极小比例, 在开展大尺度气候变化研究时, 城镇气象站记录中检测出的城市化影响要作为系统观测偏差处理。城市化对地面气象站降水长期变化趋势的影响主要来自4个方面:

(1) 通过降低近地面风速和提升雨量计捕获率, 加强降水量上升趋势或减弱降水量下降趋势。如前所述, 普遍的近地面风速减弱对降水量观测记录和趋势分析结果很可能有重要影响, 形成了降水观测偏差。在平均风速变化趋势中, 大概2/3是由于城市化(包括台站附近微环境变化)引起的^[126-127], 属于局地尺度人为因素影响; 另外的1/3左右可能和各种原因引起的大尺度环流变化有关。这样, 城市化过程就通过降低城市站近地面风速和提高雨量计捕获率对观测的降水变化造成了明显影响。

(2) 通过城市及其附近地区独有的热动力作用, 增加了城市气象站的累计降水量和短历时强降水过程。研究发现, 主要由于城市热岛效应(UHI)和下垫面粗糙度增加作用, 城市特别是大城市对建成区及其盛行风下风侧的降水具有明显影响, 增加了总降水量和短历时强降水过程, 造成比周围同高度乡村更高的降水总量和极端强降水事件频率^[129-130]。随着城市发展, 此类影响亦将渐次加强。如果气象站位于城区附近或者城市周边的下风侧, 则其观测的降水量和极端强降水频率将比城市周围其他区域或背景气候条件下要高, 而且伴随城市化进程具有不断增加的趋势^[131]。在分析流域尺度或更大尺度气候变化时, 城市化的这个影响是局地人为噪音, 也应该作为观测资料的偏差对待。

(3) 通过增加城市及其附近区域边界层气溶胶浓度, 减少了城市气象站测得的小雨和痕量降水频率, 增加了短历时强降水事件频率、强度和雨量。人类活动排放的污染物形成气溶胶, 在城市及其附近区域浓度一般也更大; 而气溶胶具有“贫者愈贫, 富者愈富”的效应, 在区域背景气溶胶气候效应基础上, 进一步引起城市气象站附近小雨和痕量降水频率减少, 短历时强降水频率和强度增加(图9)。如前所述, 在城市分布密集的华北等地区, 城市之间的乡村地带同样弥漫着较高浓度气溶胶, 气溶胶对降水的这种影响也在一定程度上发生在城市之间地带。

(4) 通过减少城市冠层和边界层空气相对湿度以及增加凝结层和云底高度, 减少城市气象站测得的小雨和痕量降水频率和降水量。即使没有气溶胶的影响, 由于城市冠层和边界层空气温度较高, 比湿较小, 相对湿度偏低, 饱和差较大, 从云层降落的微小雨滴经过这一层时更容易蒸发, 也会减少地面测量到小雨和痕量降水的机会(图11); 即使有少量雨滴落入雨量计, 由于城市及其周边邻近地区相对湿度小, 量筒内的蒸发作用也比乡村地区强, 导致测量的轻量级降水次数减少; 城市及其附近郊区由于受到UHI影响, 边界层温度一般偏高, 水汽凝结层和零度层高度均增加, 云底高度抬升, 导致雨滴降落路径增长, 进一步增加了小雨滴中途再蒸发的可能性(图11)。当然, 由于全球性气候变暖, 除了城市建成区及其附近郊区, 乡村和旷野地区凝结层和云底高度抬升现象也在一定程度上发生, 这可能是导致更广泛区域小雨和痕量降水事件频率减少的一个原因。

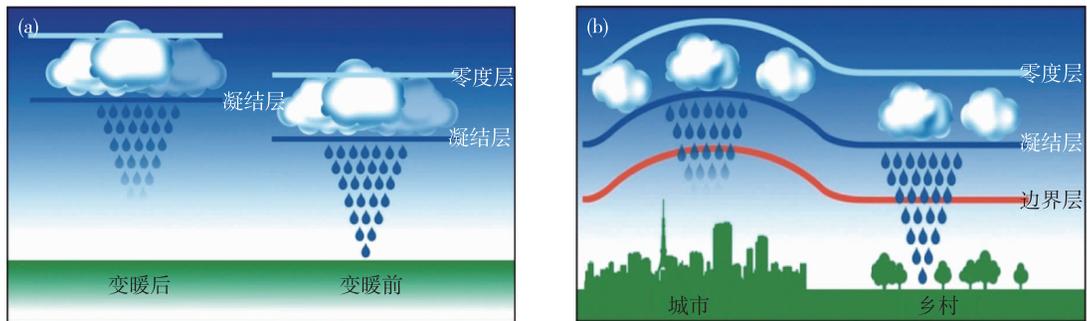


图 11 城市和大尺度气候变暖对水汽凝结层、零度层和轻量级降水过程影响示意

Fig. 11 Effects of urban and large-scale climatic warming on heights of condensation layer, cloud base and light precipitation process

7 结 论

(1) 现代降水长期变化主要表现为降水量趋势具有明显的地域性差异,但总体上没有出现显著增加或减少的长期变化;相对于总降水量,强降水事件特别是短历时极端强降水频率和降水量出现较明显增多,而小雨事件特别是弱降水和痕量降水事件频数在大范围地区显著减小,东部季风区减少尤为明显。

(2) 1979 年以来,再分析资料表明在全国水汽净收支在一定程度上增加了,但不同资料分析结果存在明显差异,各地区的趋势亦不尽相同,说明资料本身存在问题;实际观测资料显示,最近几十年不论近地面还是对流层中下层,中国大陆空气比湿出现较明显上升趋势,即绝对水汽含量一般增加了,近 40 年增加尤为显著;水汽含量增加的原因还需要研究,但可能已对降水变化产生了一定的直接影响。

(3) 区域性代用资料序列反映出,近几十年降水变化仍处于晚近历史时期正常自然波动范围内,仅青藏高原东北部表现出较高程度异常增加现象,具体原因尚待研究;黄淮海地区近百年降水量序列具有多重时间尺度相互叠加作用特点,其中低频自然气候变异的影响有清晰显示。因此,不论是部分区域观测到的趋势性降水变化,还是现代时期经历的若干年份异常和持续性干旱,目前均无法令人信服地将其归因于不同时空尺度人类活动影响。

(4) 温室气体增加和全球变暖对中国大陆地区降水变化影响的信号,从整体上看目前还难以识别,尽管西部地区特别是西北地区观测和模拟的变化具有更高的一致性;大尺度土地利用和土地覆盖变化对区域降水的影响信号,目前也没有得到确认;另一方面,区域性近地面背景风速减弱和人为气溶胶浓度增加可能是东部大范围地区观测到的强降水事件频率增加和轻量级降水事件频率显著减少的原因之一。

(5) 现代地面气候观测资料的系统偏差,构成了中国大陆现有降水趋势分析的最重要不确定性。这种系统性偏差的一个主要来源是城市化过程,它通过增加下垫面粗糙度、城市热岛环流和气溶胶浓度提高短历时强降水事件发生频率和累计雨量,同时通过减少近地面风速和相对湿度、增加凝结层和云底高度、提升气溶胶浓度水平,有效降低轻量级降水事件发生频率和雨量。

(6) 因此,最近一个世纪特别是近几十年,中国大陆作为一个整体的降水量和不同级别降水的趋势性变化,主要是观测资料系统偏差和多种自然、人为因素共同影响的结果,其各自贡献多大,还需要深入研究。

参考文献:

- [1] TRENBERTH K E, DAI A G, RASMUSSEN R M, et al. The changing character of precipitation[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2003, 84(9): 1205-1217.
- [2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis; working group I contribution to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 45-50.

- [3] FRICH P, ALEXANDER L V, DELLA-MARTA P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century[J]. *Climate Research*, 2002, 19(3): 193-212.
- [4] ALEXANDER L V, ZHANG X B, PETERSON T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 2006, 111: D5109. [doi: 10.1029/2005JD006290]
- [5] MIN S K, ZHANG X B, ZWIERS F W, et al. Human contribution to more-intense precipitation extremes[J]. *Nature*, 2011, 470(7334): 378-381.
- [6] WAN H, ZHANG X B, ZWIERS F, et al. Attributing northern high-latitude precipitation change over the period 1966—2005 to human influence[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 45(7/8): 1713-1726.
- [7] TRENBERTH K E. Changes in precipitation with climate change[J]. *Climate Research*, 2011, 47(1): 123-138.
- [8] DAI A G. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58.
- [9] 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): 948-952. (REN G Y, GUO J, XU M Z, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 948-952. (in Chinese))
- [10] 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(7): 1096-1108.
- [11] LIU B H, XU M, HENDERSON M, et al. Observed trends of precipitation amount, frequency, and intensity in China, 1960—2000[J]. *Journal of Geophysical Research(Atmospheres)*, 2005, 110(D8). [doi: 10.1029/2004JD004864]
- [12] JIANG Z H, SHEN Y C, MA T T, et al. Changes of precipitation intensity spectra in different regions of mainland China during 1961—2006[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28: 1085-1098.
- [13] MA S M, ZHOU T J, DAI A G, et al. Observed changes in the distributions of daily precipitation frequency and amount over China from 1960 to 2013[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(17): 6960-6978.
- [14] QIAN W H, FU J L, YAN Z W. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961—2005[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(11). [doi: 10.1029/2007GL029631]
- [15] QIAN Y, GONG D Y, FAN J W, et al. Heavy pollution suppresses light rain in China: observations and modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D7). [doi: 10.1029/2008JD011575]
- [16] 任国玉, 战云健, 任玉玉, 等. 中国大陆降水时空变异规律: I: 气候学特征[J]. *水科学进展*, 2015, 26(3): 299-310. (REN G Y, ZHAN Y J, REN Y Y, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: I: climatology[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(3): 299-310. (in Chinese))
- [17] DING Y H, SUN Y, WANG Z Y, et al. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon: part II: possible causes[J]. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(13): 1926-1944.
- [18] 马柱国, 邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系[J]. *大气科学*, 2006, 30(3): 464-474. (MA Z G, SHAO L J. Relationship between dry/wet variation and the pacific decade oscillation (PDO) in Northern China during the last 100 years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(3): 464-474. (in Chinese))
- [19] 张庆云, 吕俊梅, 杨莲梅, 等. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系[J]. *大气科学*, 2007, 31(6): 1290-1300. (ZHANG Q Y, LYU J M, YANG L M, et al. The interdecadal variation of precipitation pattern over China during summer and its relationship with the atmospheric internal dynamic processes and extra-forcing factors[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(6): 1290-1300. (in Chinese))
- [20] 黄荣辉, 陈际龙. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异[J]. *大气科学*, 2010, 34(6): 1035-1045. (HUANG R H, CHEN J L. Characteristics of the summertime water vapor transports over the eastern part of China and those over the western part of China and their difference[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(6): 1035-1045. (in Chinese))
- [21] REN G Y, DING Y H, ZHAO Z C, et al. Recent progress in studies of climate change in China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29: 958-977.
- [22] ZHOU T J, YU R C, LI H M, et al. Ocean forcing to changes in global monsoon precipitation over the recent half-century[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(15): 3833-3852.
- [23] ZHOU T J, GONG D Y, LI J, et al. Detecting and understanding the multi-decadal variability of the East Asian summer monsoon—recent progress and state of affairs[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2009, 18(4): 455-467.

- [24] LIU R, LIU S C, CICERONE R J, et al. Trends of extreme precipitation in eastern China and their possible causes[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(8): 1027-1037.
- [25] CHIO Y, HO C, KIM J, et al. The impact of aerosols on the summer rainfall frequency in China[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47: 1802-1813.
- [26] WANG Y, WAN Q, MENG W, et al. Long-term impacts of aerosols on precipitation and lightning over the Pearl River delta megacity area in China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(23): 12421-12436.
- [27] LI Z Q, NIU F, FAN J W, et al. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(12): 888-894.
- [28] 张冬峰, 高学杰, 罗勇, 等. RegCM4.0 对一个全球模式 20 世纪气候变化试验的中国区域降尺度: 温室气体和自然变率的贡献[J]. *科学通报*, 2015(17): 1631-1642. (ZHANG D F, GAO X J, LUO Y, et al. Downscaling a 20th century climate change of a global model for China from RegCM4.0: attributable contributions of greenhouse gas emissions and natural climate variability [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015(17): 1631-1642. (in Chinese))
- [29] 任国玉, 陈正洪, 杨宏青. 长江流域近 50 年降水变化及其对于流洪水的影响[J]. *湖泊科学*, 2003, 15(增刊 1): 49-55. (REN G Y, CHEN Z H, YANG H Q. Changes in rainfall and flood frequency in the Yangtze River basin: 1960—2001[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(Supple 1): 49-55. (in Chinese))
- [30] 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 G Y, FENG G L, YAN Z W. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 337-353. (in Chinese))
- [31] 任国玉, 任玉玉, 战云健, 等. 中国大陆降水时空变异规律: II: 现代变化趋势[J]. *水科学进展*, 2015, 26(4): 451-465. (REN G Y, REN Y Y, ZHAN Y J, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: II: recent trends[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4): 451-465. (in Chinese))
- [32] 任国玉, 王涛, 郭军, 等. 海河流域近现代降水量变化若干特征[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(5): 103-111. (REN G Y, WANG T, GUO J, et al. Characteristics of precipitation variations in Haihe River basin in modern times[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(5): 103-111. (in Chinese))
- [33] 任国玉, 袁玉江, 柳艳菊, 等. 我国西北干燥区降水变化规律[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(1): 1-19. (REN G Y, YUAN Y J, LIU Y J, et al. Changes in precipitation over Northwest China[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(1): 1-19. (in Chinese))
- [34] REN G Y, LIU H B, CHU Z Y, et al. Multi-time-scale climatic variations over eastern China and implications for the South-North Water Diversion Project[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2011, 12(4): 600-617.
- [35] 王绍武, 龚道溢, 叶瑾琳, 等. 1880 年以来中国东部四季降水量序列及其变率[J]. *地理学报*, 2000(3): 281-293. (WANG S W, GONG D Y, YE J L, et al. Seasonal precipitation series of eastern China since 1880 and the variability[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000(3): 281-293. (in Chinese))
- [36] 丁一汇, 任国玉. 中国气候变化科学概论[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 281. (DING Y H, REN G Y. *China climate change science introduction*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008: 281. (in Chinese))
- [37] 章名立. 中国东部近百年的雨量变化[J]. *大气科学*, 1993, 17(4): 451-461. (ZHANG M L. Variaton of mean annual precipitation in East China during recent hundred years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1993, 17(4): 451-461. (in Chinese))
- [38] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化[J]. *大气科学*, 2006, 30(5): 894-904. (WEN X Y, WANG S W, ZHU J H. An overview of China climate change over the 20th century using UK UEA/CRU high resolution grid data[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(5): 894-904. (in Chinese))
- [39] 中央气象局气象科学研究所. 中国近五百年旱涝分布图集[M]. 北京: 地图出版社, 1981: 332. (China Central Meteorological Bureau. *Atlas of drought and floods of past 500 years in China*[M]. Beijing: China Atlas Press, 1981: 332. (in Chinese))
- [40] 张德二, 李小泉, 梁有叶. 《中国近五百年旱涝分布图集》的再续补 (1993—2000 年)[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(3): 379-384. (ZHANG D E, LI X Q, LIANG Y Y. A supplement for atlas of drought and floods of Past 500 years in China (1993 to 2000)[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(3): 379-384. (in Chinese))
- [41] GE Q S, ZHENG J Y, HAO Z X, et al. Reconstruction of historical climate in China: high-resolution precipitation data from Qing

- Dynasty archives[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(5): 671-679.
- [42] ZHENG J Y, WANG W, GE Q S, et al. Precipitation variability and extreme events in eastern China during the past 1 500 years [J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2006, 17(3): 579.
- [43] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553-597.
- [44] STERL A. On the (in) homogeneity of reanalysis products[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(19): 3866-3873.
- [45] Von STORCH H, ZWIERS F W. *Statistical analysis in climate research*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [46] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society*, 1998, 454: 903-995.
- [47] 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1989. (DING Y H. *Analysis method of weather dynamics* [M]. Beijing: China Science Press, 1989. (in Chinese))
- [48] 翟盘茂, 周琴芳. 中国大气水分气候变化研究[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(3): 342-351. (ZHAI P M, ZHOU Q F. A study of climate changes of atmospheric water vapour in China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1997, 8(3): 342-351. (in Chinese))
- [49] 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 F H, YANG S Y, REN G Y. Decadal 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))
- [50] 闵岫, 钱永甫. 我国近 40 年各类降水事件的变化趋势[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2008, 47(3): 105-111. (MIN S, QIAN Y F. Trends in all kinds of precipitation events in China over past 400 years[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47(3): 105-111. (in Chinese))
- [51] 王大钧, 陈列, 丁裕国. 近 40 年来中国降水量、雨日变化趋势及与全球温度变化的关系[J]. *热带气象学报*, 2006, 22(3): 283-289. (WANG D J, CHEN L, DING Y G. The change trend in rainfall, wet days of China in recent 40 years and the correlation between the change trend and the change of globe temperature[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2006, 22(3): 283-289. (in Chinese))
- [52] 战云健, 任国玉, 任玉玉, 等. 1951—2009 年东亚地区日降水趋势特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2013, 18(6): 767-780. (ZHAN Y J, REN G Y, REN Y Y, et al. Changes in daily precipitation over East Asia during 1951—2009[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(6): 767-780. (in Chinese))
- [53] XU K H, MILLIMAN J D, XU H. Temporal trend of precipitation and runoff in major Chinese rivers since 1951[J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 73(3): 219-232.
- [54] 赵天保, 涂锴, 严中伟. 大气水汽变化及其反馈效应研究进展[J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(2): 79-88. (ZHAO T B, TU K, YAN Z W. Advances of atmospheric water vapor change and its feedback effect[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 9(2): 79-88. (in Chinese))
- [55] ZHAO T B, DAI A G, WANG J H. Trends in tropospheric humidity from 1970 to 2008 over China from a homogenized radiosonde dataset[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(13): 4549-4567.
- [56] XIE B G, ZHANG Q H, YING Y. Trends in precipitable water and relative humidity in China: 1979—2005[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(10): 1985-1994.
- [57] 郭艳君, 丁一汇. 1958—2005 年中国高空大气比湿变化[J]. *大气科学*, 2013, 38(1): 1-12. (GUO Y J, DING Y H. Upper-air specific humidity change over China during 1958—2005[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 38(1): 1-12. (in Chinese))
- [58] SONG Y F, LIU Y J, DING Y H. A study of surface humidity changes in China during the recent 50 years[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 26: 541-553.
- [59] WANG G S, XIA J, CHEN J. Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model: a case study of the Chaobai River basin in northern China[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7). [doi: 10.1029/2007WR006768]
- [60] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(6): 853-858. (WANG G Q, ZHANG J Y, HE R M. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River basin of the middle Yellow River

- [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(6): 853-858. (in Chinese))
- [61] 张德二, 刘传志, 江剑民. 中国东部 6 区域近 1 000 年干湿序列的重建和气候跃变分析[J]. *第四纪研究*, 1997, 17(1): 1-11. (ZHANG D E, LIU C Z, JIANG J M. Reconstruction of six regional dry/wet series and their abrupt changes during the last 1 000 years in east China[J]. *Quaternary Sciences*, 1997, 17(1): 1-11. (in Chinese))
- [62] 郑景云, 张丕远, 葛全胜. 过去 2 000a 中国东部干温分异的百年际变化[J]. *自然科学学报*, 2001, 11(1): 65-70. (ZHENG J Y, ZHANG P Y, GE Q S. Changes of wet and dry in East China over the past 2 000 years[J]. *Progress in Natural Science*, 2001, 11(1): 65-70. (in Chinese))
- [63] QIAN W H, CHEN D, ZHU Y, et al. Temporal and spatial variability of dryness/wetness in China during the last 530 years[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2003, 76(1/2): 13-29.
- [64] 郝志新, 葛全胜, 郑景云. 过去 2 000 年中国东部地区的极端旱涝事件变化[J]. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 388-394. (HAO Z X, GE Q S, ZHENG J Y. Variations of extreme drought/flood events over eastern China during the past 2 000 years[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 388-394. (in Chinese))
- [65] LIANG E Y, SHAO X M, LIU X H. Annual precipitation variation inferred from tree rings since AD 1770 for the western Qilian Mts, northern Tibetan Plateau[J]. *Tree-Ring Research*, 2009, 65(2): 95-103.
- [66] 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, 34(2): 145-153. (SHAO X M, HUANG L, LIU H B, et al. Changes in precipitation millennium tree-ring records Qinghai Delhi region[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2004, 34(2): 145-153. (in Chinese))
- [67] 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 L, SHAO X M. Precipitation variation in Delingha, Qinghai and solar activity over the last 400 years[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 184-192. (in Chinese))
- [68] 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(5): 461-471. (LIU Y, AN Z S, MA H Z, et al. Changes in precipitation Qinghai Dulan region since 850 AD base on tree-ring records and the relationship with the northern hemisphere temperature[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2006, 36(5): 461-471. (in Chinese))
- [69] SHAO X M, HUANG L, LIU H B, et al. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1 000 years in Delingha, Qinghai[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(7): 939-949.
- [70] YANG B, KANG S Y, LJUNGQVIST F C, et al. Drought variability at the northern fringe of the Asian summer monsoon region over the past millennia[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43(3/4): 845-859.
- [71] 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 H, YUAN Y J, LIU H B, 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))
- [72] 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 W S, YUAN Y J, YU S L, 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))
- [73] 张录, 袁玉江, 魏文寿, 等. 1671—2006 年伊犁尼勒克地区 7—8 月降水序列的重建与分析[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(5): 914-920. (ZHANG L, YUAN Y J, WEI W S, et al. Reconstruction and analysis of 336a July and August precipitation series in Nilka country, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(5): 914-920. (in Chinese))
- [74] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 天山北坡呼图壁河流域近 313 年降水的重建与分析[J]. *干旱区研究*, 2009, 26(1): 130-135. (CHEN F, YUAN Y J, WEI W S, et al. Reconstruction and analysis of precipitation in the Hutubi river basin on the north slope of the Tianshan Mountains during the last 313 year[J]. *Arid Zone Research*, 2009, 26(1): 130-135. (in Chinese))
- [75] 崔宇, 袁玉江, 金海龙, 等. 乌鲁木齐河源 467 年春季降水的重建与分析[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(4): 496-500. (CUI Y, YUAN Y J, JIN H L, et al. Reconstruction and analysis of 467-year spring precipitation series in Urumqi River head[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(4): 496-500. (in Chinese))
- [76] 袁玉江, 李江凤, 胡汝骥, 等. 用树木年轮重建天山中部近 350a 来的降水量[J]. *冰川冻土*, 2001, 23(1): 34-40. (YUAN Y J, LI J F, HU R J, et al. Reconstruction of precipitation in the recent 350 a from tree-rings in the middle Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(1): 34-40. (in Chinese))

- [77] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 特克斯河流域近 236a 降水变化及其趋势预测[J]. 山地学报, 2010(5): 545-551. (CHEN F, YUAN Y J, WEI W S, et al. Variation and precipitation trend of precipitation series for the Tekes River basin during the last 236 years[J]. *Journal of Mountain Science*, 2010 (5): 545-551. (in Chinese))
- [78] 张同文, 王丽丽, 袁玉江, 等. 利用树轮宽度资料重建天山中段南坡巴仑台地区过去 645 年来的降水变化[J]. 地理科学, 2011, 31(2): 251-256. (ZHANG T W, WANG L L, YUAN Y J, et al. A 645-year precipitation reconstruction in Baluntai region on southern slope of mid-Tianshan Mountains based on tree-ring width[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(2): 251-256. (in Chinese))
- [79] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 树轮记录的甘肃山丹近 224 年降水变化[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(5): 82-86. (CHEN F, YUAN Y J, WEI W S, et al. Reconstruction of annual precipitation in Shandan based tree-ring since 1783 AD [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2010, 26(5): 82-86. (in Chinese))
- [80] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 树轮记录的伊犁地区近 354 年帕尔默干旱指数变化[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 355-362. (CHEN F, YUAN Y J, WEI W S, et al. Variations of long-term palmer drought index in recent 354 years in Yili based on tree-ring record[J]. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(2): 355-362. (in Chinese))
- [81] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 树轮记录的贺兰山北部 5—7 月 PDSI 变化[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 344-348. (CHEN F, YUAN Y J, WEI W S, et al. Long-term drought severity variations recorded in tree rings in the northern Helan Mountains[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2010, 6(5): 344-348. (in Chinese))
- [82] 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(3): 307-318. (ZHANG Q Y, WEI J, TAO S Y. The decadal and interannual variations of drought in the Northern China and association with the circulations[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(3): 307-318. (in Chinese))
- [83] MANTUA N J, HARE S R. The Pacific decadal oscillation[J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58(1): 35-44.
- [84] 任国玉. 气候变化与中国水资源[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 193-215. (REN G Y. *Climate change and China water resources*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 193-215. (in Chinese))
- [85] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰. 中国气候与环境演变上卷: 气候与环境的演变与预测[M]. 北京: 中国科学出版社, 2005. (QIN D H, DING Y H, SU J L. *Assessment of climate and environment changes in China; I: climate and environment changes in China and their projection*[M]. Beijing: China Science Press, 2005. (in Chinese))
- [86] ZHANG X B, ZWIERS F W, HEGERL G C, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends[J]. *Nature*, 2007, 448(7152): 461-465.
- [87] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 人类活动引起的我国西北地区 21 世纪温度和降水变化情景分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 327-330. (XU Y, DING Y H, ZHAO Z C. Scenario of temperature and precipitation changes in Northwest China due to human activity in the 21st century[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(3): 327-330. (in Chinese))
- [88] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 590-596. (JIANG D B, WANG H J, LANG X M. East Asian climate change trend under global warming background[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 2004, 47(4): 590-596. (in Chinese))
- [89] 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟: II: 中国区域气候的可能变化[J]. 气象学报, 2003, 61(1): 29-38. (GAO X J, ZHAO Z C, DING Y H. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model: part II: climate change[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(1): 29-38. (in Chinese))
- [90] 许吟隆, 薛峰, 林一骅. 不同温室气体排放情景下中国 21 世纪地面气温和降水变化的模拟分析[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(2): 209-217. (XU Y L, XUE F, LIN Y H. Changes of surface air temperature and precipitation in China during the 21st century simulated by HadCM2 under different greenhouse gas emission scenarios[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(2): 209-217. (in Chinese))
- [91] SHIU C J, LIU S C, FU C B, et al. How much do precipitation extremes change in a warming climate? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(17). [doi: 10.1029/2012gl052762]
- [92] 张存杰, 高学杰, 赵红岩. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 157-164. (ZHANG C J, GAO X J, ZHAO H Y. Impact of global warming on autumn precipitation in Northwest China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 157-164. (in Chinese))
- [93] ZHANG H, WANG Z L, GUO P W, et al. A modeling study of the effects of direct radiative forcing due to carbonaceous aerosol on

- the climate in East Asia[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26: 57-66.
- [94] YU Y, NIU S J, ZHANG H, et al. Regional climate effects of internally and externally mixed aerosols over China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 27: 110-118.
- [95] WANG Z L, ZHANG H, ZHANG X Y. Projected response of East Asian summer monsoon system to future reductions in emissions of anthropogenic aerosols and their precursors[J]. *Climate Dynamics*, 2015; 1-14. [doi: 10.1007/s00382-015-2912-7]
- [96] 张华, 王志立. 黑碳气溶胶气候效应的研究进展[J]. *气候变化研究进展*, 2009(6): 311-317. (ZHANG H, WANG Z L. Advances in studies of black carbon effects on climate[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009(6): 311-317. (in Chinese))
- [97] ZHANG H, WANG Z L. Advances in the study of black carbon effects on climate[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 2(1): 23-30.
- [98] WANG Z L, ZHANG H, SHEN X S, et al. Modeling study of aerosol indirect effects on global climate with an AGCM[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27: 1064-1077.
- [99] FAN J W, LEUNG L R, LI Z Q, et al. Aerosol impacts on clouds and precipitation in eastern China: results from bin and bulk microphysics[J]. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 2012, 117(D16). [doi: 10.1029/2011JD016537]
- [100] WANG Z L, ZHANG H, LI J N, et al. Radiative forcing and climate response due to the presence of black carbon in cloud droplets[J]. *Journal of Geophysical Research(Atmospheres)*, 2013, 118(9): 3662-3675.
- [101] ZHANG H, WANG Z L, WANG Z Z, et al. Simulation of direct radiative forcing of aerosols and their effects on East Asian climate using an interactive AGCM-aerosol coupled system[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38(7/8): 1675-1693.
- [102] 王志立, 郭品文, 张华. 黑碳气溶胶直接辐射强迫及其对中国夏季降水影响的模拟研究[J]. *气候与环境研究*, 2009, 16(2): 161-171. (WANG Z L, GUO P W, ZHANG H. A numerical study of direct radiative forcing due to black carbon and its effects on the summer precipitation in China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 16(2): 161-171. (in Chinese))
- [103] ROSENFELD D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution[J]. *Science*, 2000, 287(5459): 1793-1796.
- [104] ROSENFELD D, LOHMANN U, RAGA G B, et al. Flood or drought: how do aerosols affect precipitation? [J]. *Science*, 2008, 321(5894): 1309-1313.
- [105] STEVENS B, FEINGOLD G. Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system[J]. *Nature*, 2009, 461(7264): 607-613.
- [106] QIAN Y, RUBY L L, GHAN S J, et al. Regional climate effects of aerosols over China: modeling and observation[J]. *Tellus B*, 2003, 55(4): 914-934.
- [107] 邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(4): 437-442. (QIU X F, LIU C M, ZENG Y. Changes of pan evaporation in recent 40 years over the Yellow River basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(4): 437-442. (in Chinese))
- [108] 郭军, 任国玉. 黄淮海河流域蒸发量变化特征及其可能原因[J]. *水科学进展*, 2005, 16(5): 666-672. (GUO J, REN G Y. Recent change of pan evaporation and possible climate factors over the Huang-Huai-Hai watershed, China[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(5): 666-672. (in Chinese))
- [109] ZHAO S Y, ZHANG H, FENG S, et al. Simulating direct effects of dust aerosol on arid and semi-arid regions using an aerosol-climate coupled system[J]. *Int J Climatol*, 2015, 35: 1858-1866.
- [110] MENON S, HANSEN J, NAZARENKO L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. *Science*, 2002, 297(5590): 2250-2253.
- [111] LAU K M, KIM M K. Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau[J]. *Climate Dynamics*, 2006, 26(7/8): 855-864.
- [112] GAO X J, LUO Y, LIN W T, et al. Simulation of effects of land use change on climate in China by a regional climate model[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(4): 583-592.
- [113] FU C B. Potential impacts of human-induced land cover change on East Asia monsoon[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 37(3): 219-229.
- [114] GAO X J, ZHANG D F, CHEN Z X, et al. Land use effects on climate in China as simulated by a regional climate model[J]. *Science in China (Earth Sciences)*, 2007, 50(4): 620-628.

- [115] PIELKE R A, ADEGOKE J, BELTRAN P A, et al. An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall[J]. *Tellus B*, 2007, 59(3): 587-601.
- [116] GOODISON B E, LOUIE P Y T, YANG D Q. WMO solid precipitation measurement intercomparison final report[R]. Geneva: World Meteorological Organization-Publications-WMO TD, 1998: 67.
- [117] YANG D Q, GOODISON B E, BENSON C S, et al. Adjustment of daily precipitation at 10 climate stations in Alaska; application of WMO intercomparison results[J]. *Water Resour Res*, 1998, 34(2): 241-256.
- [118] 任芝花, 王改利, 邹风玲, 等. 中国降水测量误差的研究[J]. *气象学报*, 2003, 61(5): 621-627. (REN Z H, WANG G L, ZOU F L, et al. The research of precipitation measurement errors in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(5): 621-627. (in Chinese))
- [119] 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 X B, REN G Y, REN Z H, 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))
- [120] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. *气象学报*, 2004, 62(2): 228-236. (WANG Z Y, DING Y H, HE J H, et al. An up dating analysis of the climate change in China in recent 50 years[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 228-236. (in Chinese))
- [121] XU M, CHANG C P, FU C B, et al. Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969—2000: evidence from direct ground measurements of wind speed [J]. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 2006, 111 (D24). [doi: 10.1029/2006JD007337]
- [122] JIANG Y, LUO Y, ZHAO Z C, et al. Changes in wind speed over China during 1956—2004[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99(3/4): 421-430.
- [123] GUO H, XU M, HU Q. Changes in near-surface wind speed in China: 1969—2005[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(3): 349-358.
- [124] MCVICAR T R, van NIEL T G, LI L T, et al. Wind speed climatology and trends for Australia, 1975—2006: capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(20). [doi: 10.1029/2008GL035627 (2008)]
- [125] VAUTARD R, CATTIAUX J, YIOU P, et al. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(11): 756-761.
- [126] 刘学锋, 江滢, 任国玉, 等. 河北城市化和观测环境改变对地面风速观测资料序列的影响[J]. *高原气象*, 2009, 28(2): 433-439. (LIU X F, JIANG Y, REN G Y, et al. Effect of urbanization and observation environment change on wind speed trend in Hebei province, China[J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(2): 433-439. (in Chinese))
- [127] 张爱英, 任国玉, 郭军, 等. 近 30 年我国高空风速变化趋势分析[J]. *高原气象*, 2009, 28(3): 680-687. (ZHANG A Y, REN G Y, GUO J, et al. Change trend analyses on upper-air wind speed over China in past 30 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(3): 680-687. (in Chinese))
- [128] YANG D Q, ISHIDA S, GOODISON B E, et al. Bias correction of daily precipitation measurements for Greenland[J]. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 1999, 104(D6): 6171-6181.
- [129] LANDSBERG H E. The urban climate[M]. Beijing: Academic Press, 1981.
- [130] 孙继松, 舒文军. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究[J]. *大气科学*, 2007, 31(2): 312-320. (SUN J S, SHU W J. Effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing city[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(2): 312-320. (in Chinese))
- [131] 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]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(13): 2769-2780.

Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: III : causes for recent trends *

REN Guoyu^{1,2}, LIU Yanju¹, SUN Xiubao^{2,3}, ZHANG Li¹, REN Yuyu^{1,2}, XU Ying¹, ZHANG Hua¹, ZHAN Yunjian^{4,5}, WANG Tao^{2,6}, GUO Yanjun¹, CHEN Yu¹, TANG Guoli⁴, GUO Jun⁷

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

2. *Department of Atmospheric Science, School of Environmental Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;*

3. *College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;*

4. *National Meteorological Information Center, CMA, Beijing 100081, China;*

5. *Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China;*

6. *Cneter for Public Meteorological Service, Hefei 230031, China; 7. Tianjin Climate Cneter, Tianjin 300074, China)*

Abstract: A few of features of long-term precipitation changes have been reported for mainland China for the last decades. The understanding of causes for the observed precipitation trends, however, is lacking. This paper comprehensively analyzes the long-term changes of multi-indicators of precipitation and atmospheric moisture over mainland China, the paleo-precipitation variations over representative areas, and the previous studies related to observed changes and possible causes of precipitation. The following conclusions are drawn: ① There is an obvious regional difference of recent precipitation trends in the country, but no significant long-term change is detectable over the past century or decades for mainland China on a whole. Frequency and amount of intense precipitation or rainstorms appear to increase over the last decades, and frequency of light rain events especially the trace rain events experiences a highly significant decrease over the same time period. ② Reanalysis data (NCEP/NCAR and ERA-Interim) shows a general increase in atmospheric moisture net budget over the last 3 decades, and sounding data and surface observations show significant upward trends of atmospheric perceptible water or specific humidity over the last decades. Tree-ring data and historical documental records indicate that the recent changes of precipitation are well within the ranges of historical natural variability, except for northeastern part of the Qinghai-Tibetan Plateau where the annual precipitation of the last century reconstructed based on tree-ring data seems to surpass the averages of any single century over the last ten centuries. ③ Instrumental observations of the last century show a distinct characteristic of multi-scale quasi-periodicals for annual total precipitation in the North China Plain, with each of them corresponding to the recognized variations of external forcings or internal modes of climate system, indicating the possible influence of natural forcings and variability on precipitation. The influence of increased atmospheric greenhouse gas concentration on precipitation in mainland China on a whole or in the eastern monsoon region of the country can hardly be detected, though the precipitation changes of Northwest China based on proxy data, instrumental data and modeling data are generally consistent with the theory expectation. ④ Weakening of regional surface wind speed is causing a systematic bias in observations of precipitation, and this is very likely to have led to, at least partially, a false upward trend of northern winter snowfall and annual intense precipitation frequency through increasing the catch-rate of rain gauges. The rising level of aerosols concentration in atmosphere is likely to be another major reason for the upward trend of intense precipitation frequency, and it is very likely to be one of the most important causes for the wide-spread decline of light and trace rain events in the monsoon region. ⑤ The data biases of the current observational data related to urbanization effects very likely account for an additionally substantial part of the reported increase in short-duration intense precipitation frequency and amount, and also for a large part of the observed decline of light and trace rain frequency in eastern monsoon region of the country.

Key words: precipitation; intense precipitation; climate change; trend; human activity; natural variability; mainland China

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41575003) and the National Basic Research Program of China (No. 2013CB430202).