

陈思宇, 黄建平, 付强, 等. 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, 2012, 28(3): 339-347.

文章编号: 1004-4965(2012)03-0339-09

气溶胶对我国中东部地区秋季降水的影响

陈思宇¹, 黄建平¹, 付强^{2,1}, 葛颢铭¹, 苏婧¹

(1. 兰州大学大气科学学院/半干旱气候变化教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000 ; ;

2. Department of Atmospheric Sciences, University of Washington, USA)

摘 要: 通过分析近 50 年来中国中东部地区降水资料发现, 秋季降水与其他季节相比有明显减少趋势(每 10 年下降约 54.3 mm), 尤其自 1980 年代以来呈直线下下降趋势(每 10 年降水减少 5.6%)。从降水形成三个基本条件(水汽输送条件、稳定度条件、云微物理条件)出发, 探究秋季降水减小的原因。结果表明, 大气稳定度(对流抑制能(convective inhibition, CIN)以 28.67 (J/kg)/(10 年)的速率增加, 对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)以 12.81 (J/kg)/(10 年)的速率减小以及云微物理性质的变化(云滴有效粒子尺度减小)是导致秋季降水减少的直接原因, 而这两个因素的变化与近 20 多年来气溶胶的大量增多有着非常密切的关系。因此, 由空气污染造成的气溶胶浓度的增加可以作为导致中国中东部地区秋季降水减少的其中一个重要原因。由于秋季天气系统较稳定, 主要受到大尺度系统影响, 动力作用影响大于热力作用, 所以减少了复杂中小天气系统和热力作用对降水的影响, 故而更加突出气溶胶对秋季降水的影响。

关 键 词: 大气科学; 气溶胶; 秋季降水; 奇异值分解; 大气稳定度; 云微物理性质

中图分类号: X513

文献标识码: A

Doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2012.03.006

1 引 言

降水是大气的相变(水汽凝聚成雨雪等)过程。降水的变化与气候、天气和水循环等多个方面联系紧密, 它对农业生产、航空、航海、交通运输、水利建设、防涝抗旱等产生深刻的影响^[1], 所以降水变化一直都是研究气候变化的重要因素。

以前我国降水研究大多集中在夏季^[2-5], 但要全面了解气候变化及其影响, 秋季降水的研究是不可忽视的。秋季降水会直接影响当年农作物收成和来年农业生产, 如影响晚稻抽穗扬花、使棉花烂桃等; 此外, 秋季降水异常还可能影响冬季及来年夏季的降水异常, 从而造成洪涝等灾害^[6]。近年来有学者在对秋季降水的变

化规律以及异常特征等方面进行了深入的研究。徐桂玉等^[7]分析了华西秋雨期的降水特征及其环流成因。李耀辉等^[8]对中国西北地区春季降水异常的时空分布特征进行了细致的分析, 并且诊断研究了秋季太平洋海表温度异常与西北春季降水的空间耦合性。同时李耀辉等^[9-10]也分析了 ENSO 对中国西北地区秋季降水异常的影响, 讨论了 ENSO 年引起西北地区降水异常的环流特征。发现赤道中东太平洋海表温度异常与西北秋季大范围区域性降水异常有较好的对应关系: 在 El Niño 年, 西北地区秋季大部分地区降水异常偏少, La Niña 年的情况相反。宋连春等^[11]指出在降水的季节变化当中, 秋季降水量的均值突变现象在四季中最为明显; 张存杰等^[12]进一步认为全球变暖背景下大气环流

收稿日期: 2010-08-09; 修订日期: 2011-10-28

资助项目: 教育部科技创新工程重大项目培育资金项目(708088); 国家重大科学研究计划项目 2012CB955301; 高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目 708088 共同资助

通讯作者: 黄建平, 男, 福建省人, 教授, 主要从事气候变化和大气遥感的研究。E-mail: hjp@lzu.edu.cn

的调整是影响西北地区秋季降水的直接因素,同时全球变暖背景下 ENSO 事件也是影响西北地区秋季降水的主要因素之一。施能^[13]发现我国秋季大尺度降水异常与来年汛期降水有较好的相关关系,秋季降水还可以对初夏降水提供预报信息。以上研究大多集中在西北地区,本文将研究区域扩展到整个中国中东部地区,从降水形成的微观机理上研究导致秋季降水变化的可能原因。

降水形成主要有三个条件:(1)水汽由源地水平输送到降水地区,即水汽输送条件;(2)水汽在降水地区辐合上升,在上升中绝热膨胀冷却凝结成云,即垂直运动条件;(3)云滴增长变成雨滴而下降,即云滴增长的微物理条件^[1]。气溶胶作为影响降水的重要因子与后两个条件密切相关。Huang 等^[14]认为沙尘气溶胶可以增加云滴蒸发,减少云水含量,从而对东亚地区干旱和半干旱地区云的发展产生重要影响,并抑制降水的发生。Qian 等^[15]解释了大量气溶胶的存在抑制了中国地区夏季小雨日数的发生。Zhao^[16]指出近 40 年的降水明显减少,并与气溶胶的高浓度区有很好的相关;提出了一种气溶胶-降水可能的正反馈机制。龚道溢等^[17]利用 1979—2002 年 194 个站日降水资料分析了我国东部地区夏季日降水频次的周内变化,发现降水频次存在明显的周末效应。

对于天气系统较稳定的秋季,气溶胶高浓度频发区是否导致中国中东部地区秋季降水的变化?气溶胶影响该区域秋季气候效应时空变化如何?对哪一种类型的降水最为显著?本文将从降水形成机制出发对上述问题展开系统研究。本文的研究区域集中在我国的中东部地区(15~60°N,90~140°E),因为在这个区域的污染密集且程度严重;拥有密集的地面观测站点和完整的记录;且降水事件频发^[15]。

2 研究资料与方法

(1) 中国气象科学数据共享服务网提供的

中国地面国际交换站气候资料日平均数据集。在数据处理过程中,剔除资料长度小于近 50 年的站点,最后共使用 503 个站点资料。需要说明的是,本文在统计降水过程中将降水仪器未观测到的降水比如毛毛雨也统计在内,降水量记为 0 mm。此外本文考虑液态降水。

(2) 地面能见度资料因其较长的时间序列及其与气溶胶紧密相关^[18-19],被用于研究气溶胶与降水关系。大气能见度的变化在一定程度上反映了环境污染的程度,与气溶胶光学厚度也有较好的反向对应关系^[20]。能见度资料在 1980 年以前记录单位为级,1980 年以后单位为 km。将能见度等级资料进行转化后会存在明显的系统性差异,因此本文只选用 1980 年以后的能见度资料。为了降低相对湿度、降水对能见度的影响,本文利用 Rosenfeld 的方法^[21]对能见度进行了订正。

(3) 探空资料来自于中国高空国际交换站规定层月均值数据集,资料为 1951 年 1 月以来一日两次的原始气压、高度、温度、温度露点差、风速。本文选取空间均匀、资料年代完整的 28 个探空站,利用露点温度和气温得到每层比湿后代入可降水量(Precipitable Water Vapor)公式得到可降水量。由于 300 hPa 以上水汽输送较小,所以本文在计算整层大气可降水量时,只考虑 300 hPa 以下的层次。

(4) 中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)中的气溶胶光学厚度以及云分数、云粒子有效半径等数据(空间分辨率为 1°×1°)。我们利用 550 nm 处的气溶胶光学厚度数据表征大气气溶胶含量。将气溶胶光学厚度从 0.0 到 1.0 分成 10 份(间隔 0.1),并对与气溶胶光学厚度等分相对应的云微物理性质(如云滴粒子半径)做平均和标准误差处理($\sigma/(2(n-1))$), σ 和 n 分别代表标准偏差和样本量)分析。

(5) 利用 NCEP/NCAR 1959—2008 年月平均再分析资料,计算了近 50 年中国中东部地区对流有效位能(Convective available potential

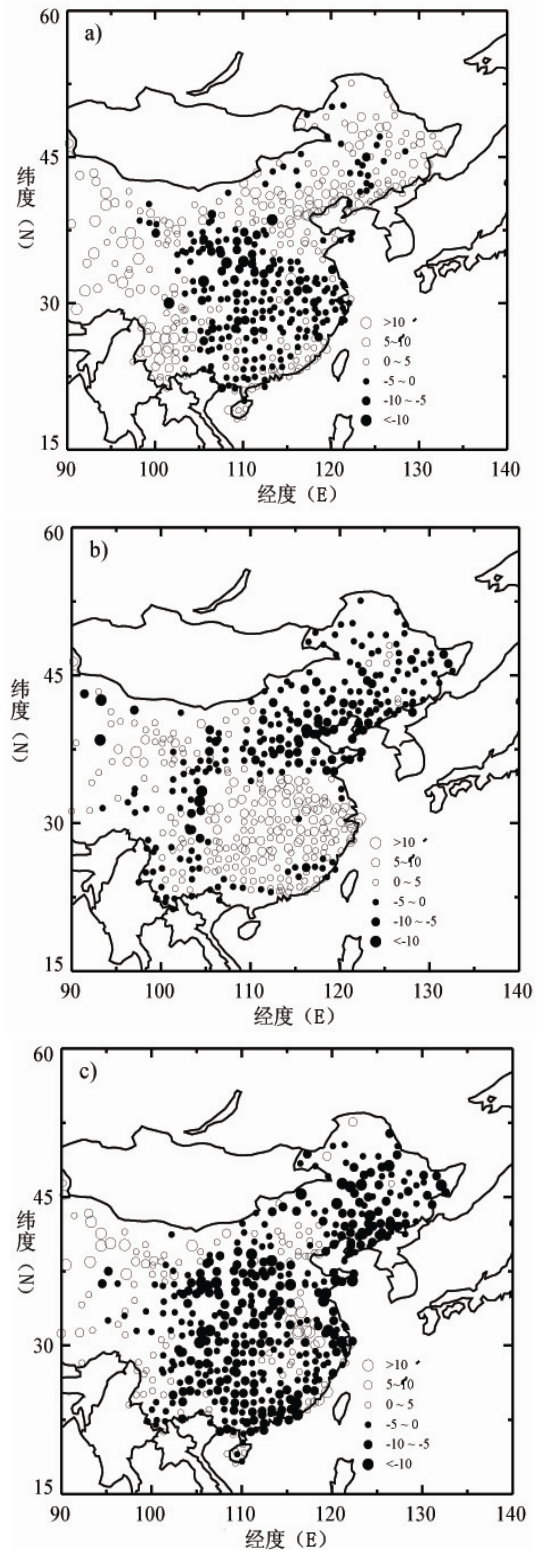
energy, CAPE) 和对流抑制能 (Convective inhibition, CIN) 的变化情况。

3 研究结果与分析

3.1 降水的变化趋势

图 1 中给出了近 50 年来中国中东部地区春、夏、秋、冬四季降水量的变化趋势(采用最小二乘法计算)。从图中可知,春季降水(图 1a)的降低趋势主要集中在长江流域和东南沿海地区,最强降低趋势出现在黄土高原地区,变化趋势值约为 $-2\%/(\text{10 年}) \sim -8\%/(\text{10 年})$;呈增长趋势的范围较大,主要集中在东北部分地区、北京、天津、华北平原、云贵高原和青藏高原等地。夏季降水(图 1b)趋势分布与春季明显不同,降水量的上升或下降趋势较小,减少趋势主要集中在东北、北京、天津、山东半岛和黄土高原等地,变化趋势值约为 $-1\%/(\text{10 年}) \sim -5\%/(\text{10 年})$;南部地区降水趋势基本为正,最大的增长趋势出现在长江中下游平原,变化趋势值约为 $1\%/(\text{10 年}) \sim 10\%/(\text{10 年})$ 。冬季降水(图 1d)趋势基本以增长为主,只有少数观测站出现减少趋势,主要分布在北京、天津、内蒙古等部分地区。秋季降水(图 1c)与其他几个季节相比呈明显负趋势(变化趋势值约为 $-5\%/(\text{10 年}) \sim -10\%/(\text{10 年})$)的区域明显增多,有些地方甚至出现了大于 $10\%/(\text{10 年})$ 的减小趋势,其中长江中下游平原、四川盆地、华北平原、云贵高原等地降水下降剧烈。呈正趋势变化的站点少,且变化趋势都不强。说明中国中东部地区降水正在大范围减少,且东北部、中部和中南部地区等下降趋势比较剧烈。图 1e 为所选所有测站的春、夏、秋、冬季降水平均距平百分率时间变化曲线和趋势线,从图中可看出,春季降水的下降很弱(为 $-18.9 \text{ mm}/(\text{10 年})$),夏季和冬季降水呈现上升趋势(为 $15.7 \text{ mm}/(\text{10 年})$ 和 $24 \text{ mm}/(\text{10 年})$)。秋季降水下降趋势最为明显($-54.3 \text{ mm}/(\text{10 年})$),尤其是自 1980 年代中期以后中国中东部地区秋季降水距平百分率基本为负,平均

每 10 年降水减少 5.6%,距平百分率最小的一年达到 -26.9% ,这是中国中东部地区秋季降水异常变化的一个显著特征。



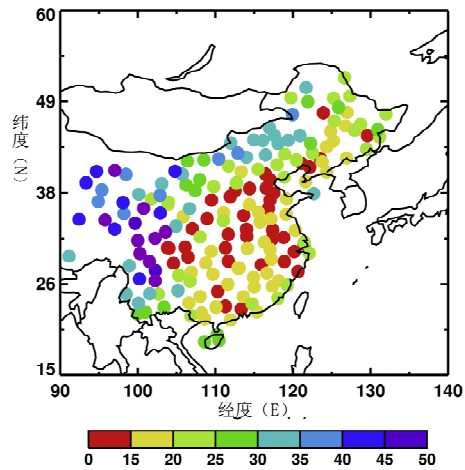
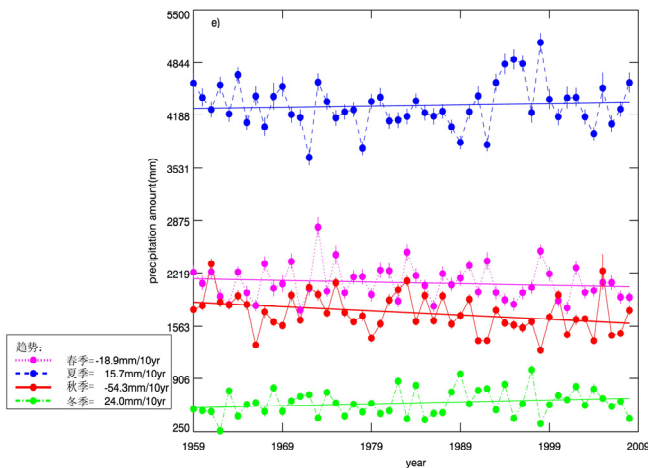
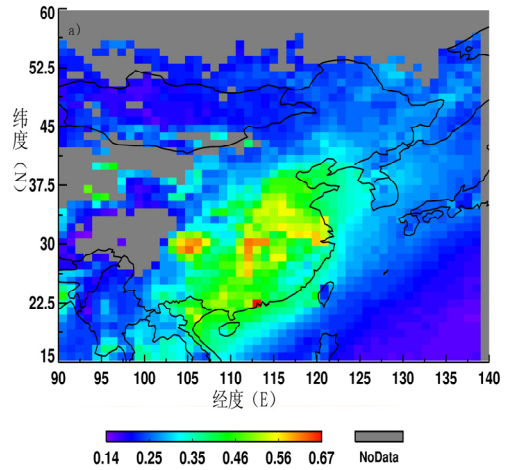
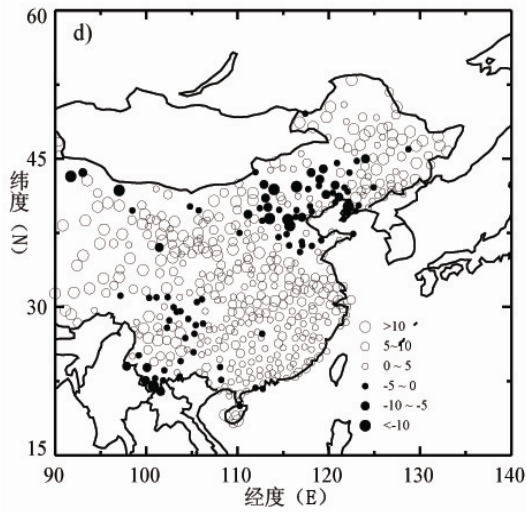


图 1 中国中东部地区 1959—2008 年降水线性变率
a. 春季(%/(10 年)); b. 夏季(%/(10 年)); c. 秋季(%/(10 年)); d. 冬季(%/(10 年)); e. 区域平均降水量的时间序列及其线性趋势。

图 3 2002—2008 年 MODIS 气溶胶光学厚度
(上)和 1980—2005 年秋季订正后能见度多年平均值(下)的水平分布

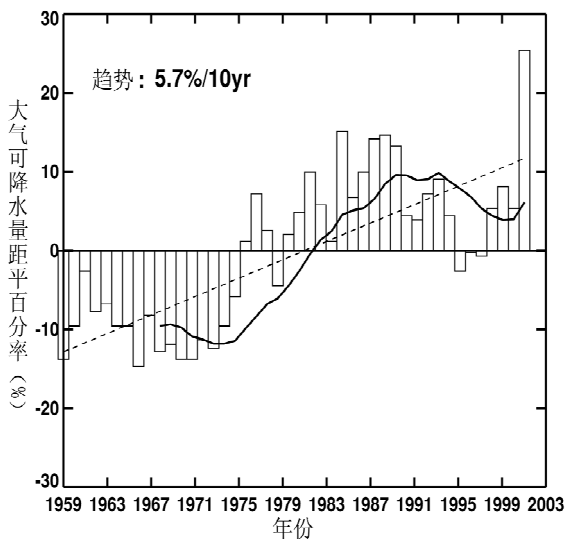


图 2 中国中东部地区 1959—2002 年秋季大气
可降水量距平百分率(%)的时间序列
虚线为趋势线; 实线为九点二项式平滑滤波变化曲线。

3.2 大气水汽的变化趋势

图 2 为利用探空资料计算得到的所选所有测站秋季大气可降水量平均距平百分率的时间变化曲线及其 9 点二项式滤波曲线和趋势线, 在秋季大气可降水量正趋势的基础上, 迭加了显著的年代际变化。总体来看, 1975 年是大气可降水量发生转折的年份, 在此之前大气可降水量距平百分率全部为负, 1960 年代末、1970 年代初是近 50 年来大气可降水量的最低值时段, 距平百分率大约在 -15% 左右。而 1975 年以后大气可降水量的距平百分率基本为正, 并出现两个相对的高峰值, 分别是 1980 年代中期和 1990 年代末(距平百分率达到 15%)、21 世纪初(距平百分率甚至达到了 25% 左右)。中国中东部

大部分地区的大气可降水量呈增长趋势,其中增长最大的区域在长江中上游、东南沿海、西南和东北等地区,其增长率一般为 $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}/(10 \text{ 年})$,部分地区大于 $1.0 \text{ mm}/(10 \text{ 年})$ 。此外,本文利用最小二乘法计算了近50年来大气降水量的变化趋势,中国中东部秋季降水量的变化趋势是增加的,增长率是 $5.7\%/(10 \text{ 年})$ 。表明在大气可降水量成上升趋势的情况下,秋季降水仍出现明显的减少趋势,由此说明秋季降水异常很可能并非是大气水汽变化造成的,应该是另一种机制导致了这种异常的发生。

3.3 气溶胶对降水的影响

3.3.1 气溶胶光学厚度和能见度的空间变化特征

大气中的气溶胶粒子可以通过直接和间接效应影响地气系统的辐射平衡,有关研究表明大量生成的气溶胶除了使环境恶化外,还可能对该区域的气候造成一定影响。为此,有必要研究此区域气溶胶是否对秋季降水产生了重要影响。下面首先分析中国中东部地区气溶胶的变化情况。

图3上(见上页)为2002—2008年秋季多年平均MODIS气溶胶光学厚度^[22-23]的空间分布特征。整个中国中东部地区的秋季年均值达到0.1以上,气溶胶光学厚度分布呈南高北低,具有明显的地理特征,四川盆地、华南沿海、黄河流域、长江中下游等地为气溶胶光学厚度高值区,达到0.6以上,而海域上空的气溶胶光学厚度明显小于陆地上空,秋季年均值大约为 $0.10 \sim 0.15$,但近海区域为气溶胶光学厚度相对高值区。这与罗云峰等^[24]、王跃思等^[25]得到的研究结论基本一致。图3上和图3下的空间分布具有很好的反相关关系,说明能见度可以作为表征气溶胶特性的替代资料。

3.3.2 能见度和降水量的SVD分析

SVD作为一种揭示两个气象要素场耦合模式的一种强有力的诊断分析工具,在大量的研究中得到了广泛的应用。本文将研究区域在秋季的年平均能见度作为左场,分别将年平均的

降水量作为右场,通过对两个场进行SVD分解,分析气溶胶对秋季降水的影响。由于大多数气溶胶生命期短、空间变化大,所以仅考虑两者同期相关性。

经SVD得到了前5对奇异向量的方差贡献,累计方差和相关系数(表1),其中前5对空间分布型的累计方差可解释总方差的75%以上,第一对空间分布型可以基本描述中国中东部地区降水场和能见度场的耦合关系。从能见度与降水量的第一模态的耦合特征可以发现,展开的时间系数(图4)表现出相当一致的下降(相关系数为0.87,通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验水平)。我国能见度场与降水量场SVD的第一模态右场的异性相关系数(图4)均以正相关为主,只在很小地区出现微弱的负相关。在中国的东南部和东北部呈现出较为一致的正的高相关分布,这些地区是第一对偶合分布的显著区(高相关),其范围大约为 $17.5 \sim 36^\circ \text{N}$, $105 \sim 120^\circ \text{E}$ 。气溶胶多(少)的时候降水量少(多),说明气溶胶对降水量有很好的抑制作用。

表1 中国中东部地区前5个奇异向量的解释方差(%)和相关系数(能见度场与降水量场)

奇异向量	方差贡献/%	累计贡献/%	相关系数
第一对	36.56	36.56	0.83
第二对	21.34	58.19	0.90
第三对	7.94	66.13	0.92
第四对	6.50	72.63	0.87
第五对	4.86	77.47	0.90

气溶胶粒子可以散射和吸收太阳辐射,从而改变太阳能量在大气垂直方向的分配,影响大气的垂直运动^[26-28]。同时,气溶胶粒子可以作为云的凝结核或冰核,改变云的物理和微物理特征,进而影响降水^[29-33]。近年来,中国东部地区工业化进程快,城市污染严重,既是黑碳气溶胶的高排放区,又是硫酸盐气溶胶的高排放区,是气溶胶影响区域气候和水循环的独特实验区域。

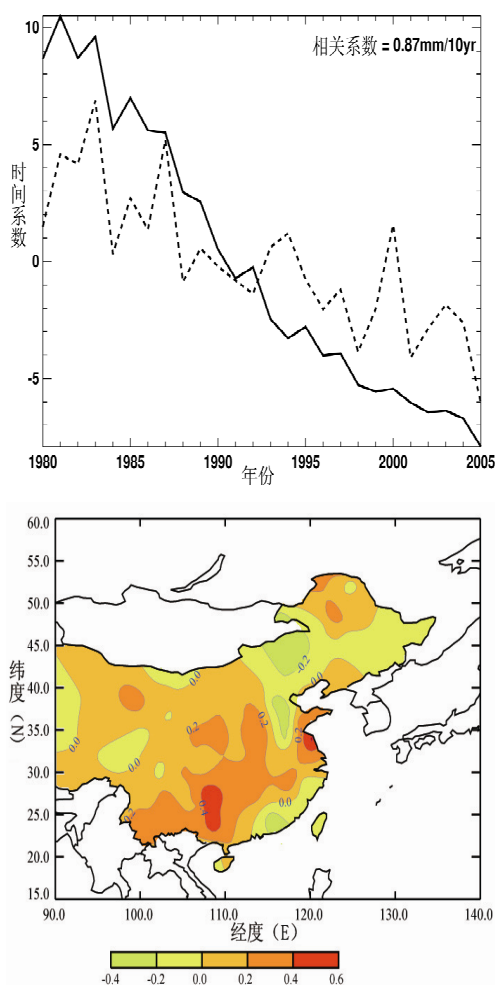


图4 奇异值分解(SVD)第一模态左右奇异向量
a. 对应的时间系数的变化趋势, 实线表示能见度场, 虚线表示降水量场; b. 第一模态右场的异性相关系数。

下面从大气稳定度条件、云微物理条件这两方面出发, 详细分析气溶胶是如何抑制秋季降水的。

3.3.3 对流有效位能、对流抑制能 and 订正后能见度的变化趋势

图5中给出了近50年中国中东部地区对流有效位能和抑制能以及订正后的能见度变化曲线, 秋季强对流出现较少, 对流有效位能增大时对流抑制能减小, 对流有效位能的峰值区域基本对应对流抑制能的低值区, 二者之间呈明显的反相关关系。近50年来, 对流抑制能以 $28.67 \text{ (J/kg)/(10年)}$ 的速率增加, 对流有效位能以 $12.81 \text{ (J/kg)/(10年)}$ 的速率减小, 特别是1980年代以后空气稳定度有较明显的增长趋势, 对流有效位能减小率为 $-2.1\%/(10年)$, 对流

抑制能增长率为 $4.7\%/(10年)$ 。而能见度的线性趋势和对流有效位能的变化趋势十分一致, 和对流抑制能正好相反, 减小趋势为 $-2.7\%/(10年)$ 。由此可看出能见度减小与空气稳定度增加紧密相关, 说明由于气溶胶的增加进而抑制大气垂直运动是导致秋季降水减少的原因之一。

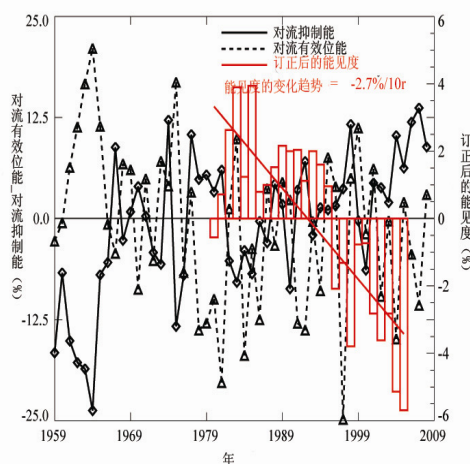


图5 中国中东部地区秋季对流有效位能(点线)、对流抑制能(实线)和订正后能见度(红色柱状图)距平百分比(%)的时间变化序列
红实线表示订正后能见度的变化趋势($\%/(10年)$)。

3.3.4 气溶胶和云滴有效粒子半径之间的关系

图6给出了研究区域中2002—2008年秋季不同云顶温度和液态水路径下, 气溶胶光学厚度和云滴有效粒子半径的变化情况。实线是当云层比较厚(液态水路径大于 70 g/m^2)时, 平均的云滴有效粒子半径随气溶胶光学厚度的变化。从图中可以看出, 当气溶胶光学厚度很小的时候(<0.2), 云滴有效粒子与液态水路径之间的正相关性很强, 液态水路径越大, 云滴有效粒子半径越大。但随着气溶胶光学厚度的增加, 云滴有效粒子半径迅速减小到 $3 \mu\text{m}$ 左右。云顶温度越高, 这种关系就越明显, 当云顶温度大于 289 K 时, 云滴有效粒子半径随气溶胶光学厚度的增加减小约 $5 \mu\text{m}$ (图6c)。而在这些变化关系中的标准误差都是很小的, 说明分析具有统计意义。由此可知, 影响中国中东部秋季降水减少的原因之一是由于气溶胶的大量存在使得云滴有效粒子尺度减小, 云滴转化为雨滴的效率随之降低, 这是抑制秋季降水发生的另一

一个重要原因。

综上所述,从降水形成机制来看,大气稳定性的增加和云微物理性质的改变是导致秋季降水异常减小的原因,这两者与研究区域气溶胶排放量急剧增多密切相关。大量气溶胶的存在减少了地面获得的太阳辐射能量,增加大气稳定度。大气稳定度的增加将抑制上升运动,

减少秋季降水的发生。此外,高浓度气溶胶通过参与云的凝结成核作用,改变了云的微物理结构和特征,使云滴尺度减小,也起到了抑制降水的作用。此外能见度减小的区域也与秋季降水明显减小区域相一致,说明秋季降水的异常减少和所在地区气溶胶异常增加,这两者间有很好的耦合关系。

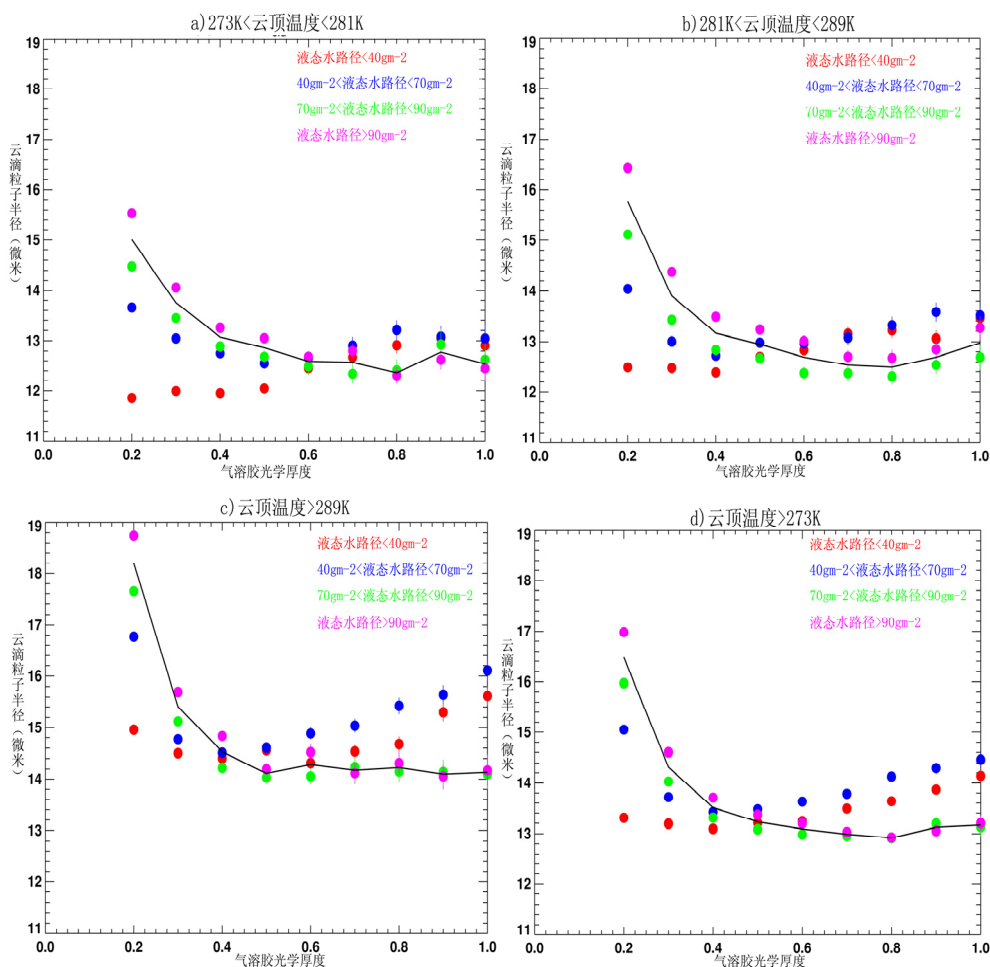


图 6 2002—2008 年秋季在不同云顶温度下云滴有效粒子半径与气溶胶光学厚度之间的关系
不同颜色的实心点表示不同云顶温度下云滴有效粒子半径,竖线表示其标准误差。
黑实线是当液态水路径大于 70 g/m^2 的情况下,平均云滴有效粒子半径随气溶胶光学厚度的变化。

4 结果与讨论

气溶胶是影响气候变化因子中最不确定的。本文利用长时间地面观测资料、探空资料、卫星观测资料和 NCEP 再分析资料分析了中国中东部地区气溶胶对秋季降水的影响,得到以下主要结论。

(1) 中国中东部地区近 50 年秋季的降水相对于其他几个季节显著减少(每 10 年减少 54.3 mm);尤其自 1980 年代以来呈现更加明显的直线下降趋势,每 10 年降水减少 5.6%,距平百分率最小的一年达到 -26.9%。

(2) 从降水形成机制出发,水汽条件、大气稳定度条件和云微物理特性三个方面研究秋季降水异常减小的原因。先排除大气水汽对秋季

降水异常的影响。再综合 MODIS 卫星观测资料和能见度资料表明,近年来我国中东部地区工业进程迅速,污染严重、气溶胶浓度急剧增多,而气溶胶的大量存在影响了大气稳定性和云微物理特性是导致秋季降水减少的一个重要原因。

(3) 秋季天气系统较稳定,一般主要受到大尺度天气系统的影响,动力作用大于热力作用,减少了复杂中小尺度天气系统和热力作用对降水的影响,可以更加突显出气溶胶对降水变化的作用;并且由于秋季降水量较少,对气溶胶的湿清除作用较小,气溶胶浓度常常比夏季大,故而气溶胶对秋季降水的影响要比夏季显著。此外,有关研究表明春季是一年四个季节中沙尘暴爆发次数最多的一个季节^[34],除了春季气候干燥地表土质松散外,春季北方冷空气活动频繁,北方气旋发展旺盛,动力因素影响大,地表的迅速升温易造成对流天气,所以我们认为动力因素对降水的影响过大掩盖了气溶胶的

影响,故而沙尘气溶胶对春季降水的研究很复杂,所以在本文没有进一步讨论。对于冬季降水而言,降水类型包括雨、雪、冰雹、冰雹等,相对于其他季节更为复杂。另外,冬季近地层比较稳定,能见度一般都比较小,且没有显著变化,较难反映气溶胶的真实变化,因此在本文的研究中没有选择冬季。

综上所述,本文从降水形成机制出发,利用观测事实揭示了气溶胶在中国中东部地区秋季降水的异常变化中所产生的重要影响。关于降水 and 气溶胶相互作用的物理机制,仍需要深入研究才能得到进一步的证实。

致 谢:感谢美国西北太平洋国家实验室(PNNL)的钱云(Yun Qian)老师给本文提供的建议和帮助;感谢兰州大学大气科学学院的尚可政老师和王天河老师在本文撰写过程中给予的帮助、单海霞和王闪闪所给予的帮助。

参 考 文 献:

- [1] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,2000:458.
- [2] 简茂球,罗会邦,乔云亭. 印度洋-太平洋各季海温年际变异模的相关性及其与我国夏季降水的关系[J]. 热带气象学报,2006,22(2):131-137.
- [3] 张天宇,孙照渤,李忠贤,等. 春季黑潮区海温异常与我国夏季降水的关系[J]. 热带气象学报,2007,23(2):189-195.
- [4] 陈绍东,王谦谦,钱永甫. 江南汛期降水基本气候特征及其与海温异常关系初探[J]. 热带气象学报,2003,19(3):260-268.
- [5] 金祖辉,罗绍华. 长江中下游梅雨期旱涝与南海海温异常关系的初步分析[J]. 气象学报,1986,44(3):360-372.
- [6] 谌芸,施能. 我国秋季降水、温度的时空分布特征及气候变化[J]. 南京气象学院学报,2003,26(5):662-630.
- [7] 徐桂玉,林春育. 华西秋雨特征及成因探讨[J]. 气象科学,1994,12(4):149-154.
- [8] 李耀辉,李栋梁,赵庆云. 中国西北春季降水与太平洋秋季海温的异常特征及其相关分析[J]. 高原气象,2000,19(1):100-110.
- [9] 李耀辉,李栋梁,赵庆云. 中国西北地区秋季降水异常的特征分析[J]. 高原气象,2001,20(2):94-99.
- [10] 李耀辉,李栋梁,赵庆云,等. ENSO 对中国西北地区秋季异常降水的影响[J]. 气候与环境研究,2000,25(2):102-112.
- [11] 宋连春,张存杰. 20 世纪西北地区降水量变化特征[J]. 冰川冻土,2003,25(2):143-147.
- [12] 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.
- [13] 施能. 1998 我国秋、冬降水、气温场的时空结构特征及其在我国初夏降水预报中的应用[J]. 大气科学,1988,12(3):283-291.
- [14] HUANG J P, LIN J B, MINNIS P, et al. Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia[J]. Geophys Res Lett, 2006(33): L19802, doi: 10.1029/2006GL026561.
- [15] QIAN Yun, GONG Daoyi, FAN Jiwen, et al. 2009. Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and modeling[J]. J Geophys Res, 2008(114): D00K02, doi: 10.1029/2008JD011575.
- [16] ZHAO Chunsheng, TIE Xuexi, LIN Yunping. A possible positive feedback of reduction of precipitation and increase in aerosols over eastern central China [J]. Geophys Res Lett, 2006(33): L11814, doi: 10.1029/2006GL025959.
- [17] 龚道溢,郭栋,罗勇. 中国夏季日降水频次的周末效应[J]. 气候变化研究进展,2006,2(3):131-134.
- [18] CHARLSON R J. Atmospheric visibility related to aerosol mass concentration: Review[J]. Environmental Science Technology, 1969, 3(10): 913-918.
- [19] APPEL B R, TOKIWA Y, HSU J, et al. Visibility as related to atmospheric aerosol constituents[J]. Atmospheric Environment[Atmos. Environ], 1985,19(9): 1 525-1 534.
- [20] QIU J H, YANG L Q. Variation characteristics of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980-1994[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(4): 603-609.

- [21] ROSENFELD D, DAI J, YU X, et al. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation[J]. *Science*, 2007, 315 : 1 396–1 398.
- [22] LEVY R C, REMER L, MATTOO S, et al. Second-generation algorithm for retrieving aerosol properties over land from MODIS spectral reflectance[J]. *J Geophys Res*, 2007(112) : D13211, doi: 10.1029/2006JD007811.
- [23] REMER L A. Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors[J]. *J Geophys Res*, 2008(113) : D14S07, doi: 10.1029/2007JD009661
- [24] 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 30年来中国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析. *大气科学*, 2002, 26(6) : 721—730.
- [25] 王跃思, 辛金元, 李占清, 等. 中国地区大气气溶胶光学厚度与 Angstrom 参数联网观(2004 . 08—2004 . 12)[J]. *环境科学*, 2006 , 27(9) : 1 703-1 711.
- [26] RAMANATHAN V, CRUTZEN P J, KIEHL J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle[J]. *Science*, 2001, 294 : 2 119-2 124.
- [27] RAMANATHAN V, CHUNG C, KIM D, T. et al. Atmospheric brown clouds: Impact on South Asian climate and hydrologic cycle[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2005(102): 5 326 – 5 333, doi:10.1073/pnas.0500656102.
- [28] ROSENFELD D, LOHMANN U, RAGA G B, et al. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation?[J]. *Science*, 2008, 321: 1 309-1 313.
- [29] HUANG J, WANG Y, WANG T, et al. Dusty cloud radiative forcing derived from satellite data for middle latitude regions of East Asia[J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(10): 1 084-1 089.
- [30] HUANG J, MINNIS P, LIN B, et al. Possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES[J]. *Geophys Res Lett*, 2006(33) : L06824, doi: 10.1029/2005GL024724.
- [31] HUANG J, MINNIS P, CHEN B, et al. Long-range transport and vertical structure of Asian dust from CALIPSO and surface measurements during PACDEX[J]. *J Geophys Res*, 2008(113) : D23212, doi: 10.1029/2008JD010620.
- [32] 陈勇航, 黄建平, 王天河, 等. 西北地区不同类型云的时空分布及其与降水的关系[J]. *应用气象学报*, 2005 , 16(6): 716-728.
- [33] KOREN I, KAUFMAN Y J, REMER L A, et al. Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation[J]. *Science*, 2004, 303: 1 342-1 345.
- [34] 张存杰, 汤绪, 李耀辉. 河西走廊沙尘暴特征及气候成因分析[J]. *干旱气象*, 2003, 21(4): 19-22.

EFFECTS OF AEROSOLS ON AUTUMN PRECIPITATION OVER MID-EASTERN CHINA

CHEN Si-yu¹, HUANG Jian-ping¹, FU Qiang^{2, 1}, GE Jin-ming¹, SU Jing¹

(1. Key laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Department of Atmospheric Sciences, University of Washington, USA)

Abstract: Observational data analysis indicates that precipitation decreases by 54.3 mm per decade in mid-eastern China in autumn for 1959—2008 and the decrease rate is 5.6% per decade from the 1980s to the present. This decreasing trend of precipitation is different from that in other seasons. We examine three mechanisms associated with the changes in water vapor transport, atmospheric stability and cloud microphysical properties, which may be responsible for the reduction of the autumn rainfall. The reduction of autumn rainfall are directly caused by the increase of the atmospheric stability, as indicated by the increased convective inhibition (CIN) whose increasing rate is 28.67 J/kg per decade, the decreased convective available potential energy (CAPE) whose decreasing rate is 12.81 J/kg per decade, and the change of cloud microphysical properties, such as the decreased cloud droplet effective radius. Furthermore, the changes of atmospheric stability and cloud microphysical properties may be closely related to the change of atmospheric aerosols, based on satellite observations over the entire mid-eastern China during autumn for 1980—2008. It is suggested that significantly increased aerosol concentrations produced by air pollution (with corrected visibility decreased by -2.7% per decade) are at least partly responsible for the decreased precipitation events, especially light rain events, in mid-eastern China over the past 20 years. The aerosols effect on precipitation is more obvious in autumn since the weather systems in autumn are more stable (when the dynamic effects are greater than the thermal actions) and the precipitation is influenced more by large-scale systems.

Key words: atmospheric science; aerosol; autumn rainfall; singular value decomposition (SVD); atmospheric stability; cloud microphysical properties