

空气污染抑制小雨: 华南与青藏高原对比分析^{*1}

李 雄¹ 苏 志²LI Xiong¹ SU Zhi²

1. 广西气象服务中心, 南宁, 530022

2. 广西气候中心, 南宁, 530022

1. *Guangxi Meteorological Service Center, Nanning 530022, China*2. *Guangxi Climate Centre, Nanning, 530022, China*

2013-05-27 收稿, 2014-02-19 改回.

李雄, 苏志. 2014. 空气污染抑制小雨: 华南与青藏高原对比分析. 气象学报, 72(3): 596-605

Li Xiong, Su Zhi. 2014. Suppression of light precipitation by air pollution: A comparison between observations in South China and the Tibetan Plateau. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(3): 596-605

Abstract Precipitation and visibility (surrogate for aerosol loading) records at the 10 weather stations in the Tibetan Plateau and South China were examined with the span of 32 years (1980—2011). It was shown that the values of visibility were high in the Tibetan Plateau and low in South China. The light rainfall decreased at the 3 stations in South China (Nanning, Beihai and Baise) while the other 7 stations (2 in South China and 5 in the Tibetan Plateau) showed little fluctuation. A significant positive correlation was observed between the visibility at 20:00 BT and the light rainfall during the following 24 hours in the stations Nanning, Beihai and Baise with the other 7 stations having no significant correlation, which might suggest that the decrease trends of the light rainfall were caused by air pollution suppressing precipitation. The quantitative analysis showed that for each reduction of 1 kilometer of the visibility at 20:00 BT, the light rainfall of the following 24 hours would decrease by 0.019, 0.028 and 0.027 mm in the stations Nanning, Beihai and Baise, respectively. The correlation coefficients were significantly positive between the visibility at 20:00 BT and the normalization convective available potential energy (N_{CAPE}) of the following 24 hours, which was consistent with the phenomenon of air pollution suppressing light rainfall. It was also observed that the response of N_{CAPE} to the invigoration effect of visibility/aerosol had 2 peaks for each day.

Key words Light precipitation, Suppress, Visibility, Invigoration effect, Normalization convective available potential energy

摘 要 以能见度作为气溶胶浓度表征物, 采用 1980—2011 年青藏高原和华南共 10 个台站资料, 分析空气污染对降雨的影响。结果显示: 青藏高原空气质量一直维持在很好状态, 而华南地区存在严重的空气污染; 华南地区的南宁、北海、百色 3 站小雨下降趋势明显, 而青藏高原 5 站和华南地区的梧州、桂林 2 站的小雨趋势变化不明显; 南宁、北海、百色 3 站 20 时能见度与随后 24 h(当日 20 时至次日 20 时)小雨雨量正相关显著, 而青藏高原 5 站和梧州、桂林 2 站 20 时能见度与随后 24 h 小雨雨量正相关不显著, 这可能表明南宁、北海、百色 3 站小雨下降趋势与空气污染抑制有关; 定量分析显示能见度每降低 1 km, 南宁、北海、百色 3 站小雨雨量分别减少 0.019、0.028 和 0.027 mm; 南宁、北海、百色 3 站出现小雨时 20 时能见度与未来 24 h 内各时次归一化对流有效位能正相关显著, 这一现象与空气污染抑制小雨现象吻合; 归一化对流有效位能对地面能见度/气溶胶激励效应的响应时间每日有两个高值。

关键词 小雨, 抑制, 能见度, 激励效应, 归一化对流有效位能**中图法分类号** P426

* 资助课题: 广西自然科学基金项目(2010GXNSFA013007)。

作者简介: 李雄, 主要从事空气污染和气候变化研究。E-mail: lixiong32003@aliyun.com

1 引言

人类活动对气候的影响,是当前气候变化研究的重点,它主要表现为工业革命以来温室气体排放造成的温室效应以及增大的气溶胶效应。IPCC第四次评估报告指出(Rotstayn, et al, 2009):目前人类活动影响气候的研究结论中,最大不确定因素是气溶胶的辐射强迫效应,主要包括(1)直接效应:气溶胶散射和吸收太阳短波辐射和地面长波辐射,估计全球平均幅度为 $-0.1 \sim -0.9 \text{ W/m}^2$; (2)第一间接效应:在一定云水含量的情况下,增加气溶胶粒子会使云滴数量增多而半径变小,从而导致云反照率的增大,这一效应的幅度非常不确定,估计全球平均幅度在 $-0.3 \sim -1.8 \text{ W/m}^2$; (3)第二间接效应:气溶胶作为云凝结核(CCN)和冰核(IN)对降水产生影响,这一效应的研究结论更不确定,IPCC甚至未能给出其波动幅度;气溶胶效应的这些不确定性是目前气候变化研究的一个难点。

空气污染会增加云中气溶胶粒子浓度,改变云凝结核和冰核的数量,进而改变局地近地面边界层不稳定性和大尺度环流,影响云和降水的形成,最终对全球水循环和能量平衡产生作用。对这一现象的研究早在20世纪60年代就已经开始(Warner, et al, 1967)。不过,该领域研究是一个具有挑战性的工作(Khain, 2009),迄今为止,空气污染-云相互关系的研究已有一定的进展,而空气污染-降水关系的研究结论则存在很大不确定性(Yi, et al, 2012),在观测事实方面,仅有极少数可信的观测显示空气污染对降水产生影响(Alpert, et al, 2008)。

近年来,在中国东部(Qian, et al, 2009)和台湾地区(Chen, et al, 2008)以及韩国(Yum, et al, 2010)等许多地方出现了小雨明显减少的趋势。相关研究将其归因于空气污染对小雨的抑制作用,这些论证除了使用数值模式,也尝试用实况资料进行统计分析来加以阐述。如Yum等(2010)发现韩国各地小雨日数普遍减少后,又分析了相同台站总雨量、中/大/暴雨日数,发现这些地方总雨量、中/大/暴雨日数并未减少,部分地区甚至出现增强趋势;Yum等(2010)指出小雨日数的减少与总雨量、中/大/暴雨日数的变化是不吻合的,并将这种不吻合归因于空气污染。Qian等(2009)则认为:中国东部小雨日数减少是与气溶胶浓度增大同步的。这些论述对于证

明“空气污染抑制小雨”的假设无疑是合理、有力的。此外,如果能够找到一个未受空气污染影响的地区,了解其小雨变化趋势,并以此为背景分析其他受空气污染影响台站的小雨变化情况,应当也是一种合理的方法。不过,降雨观测在全球的普及主要发生在近百年特别是近几十年,这同时也是全球各地经济高速发展、空气污染急剧增加的时期,找到“未受空气污染影响的地区”似乎并不容易。在这方面,段婧等(2008)采用能见度逐年变化小于 0.1 km 的台站作为背景站是一个有益的尝试。而本研究将从另一个角度来解决这个问题:选用一个几乎不受空气污染影响的地区——青藏高原作为背景场。青藏高原在华南地区的西北方向,就高层风而言可近似作为华南地区的上风向地区;该高原是世界上海拔最高的地区,人烟稀少,空气质量即使在最近几十年来也没有太大恶化(后文分析中显示的青藏高原能见度偏高的观测事实反映了该地区空气质量良好)。本研究通过比较青藏高原与华南地区的小雨变化差异,来揭示空气污染对小雨的影响。当然,这会带来一个问题:华南与青藏高原气候有较大差异,它们降水特征的差异,未必是空气污染造成的。不过,考虑到本领域的许多研究结论尚存在不确定性,对比分析空气污染严重的华南地区与几乎未受污染影响的青藏高原之间的降雨差异,作为一种探索,仍是有研究意义的。

2 资料 and 主要方法

2.1 能见度与降雨资料

选取青藏高原和华南各5个台站(表1),分析其1980—2011年逐日雨量和逐日20时(北京时,下同)能见度资料。能见度观测时间为每日02、08、14、20时;之所以取20时能见度,而不是02、08、14时能见度,是因为日雨量统计时段为当日20时至次日20时。能见度在本研究中被作为气溶胶浓度的表征物来使用,这一做法的依据是:能见度与气溶胶的紧密联系已被许多文献证明(曹伟华等, 2013; 梁延刚等, 2008; 刘宁微等, 2012; 邱金桓等, 2001; 吴兑等, 2010),并有多篇论文采用能见度作为气溶胶表征物来分析其对降雨的影响(戴进等, 2008; 段婧等, 2008; Rosenfeld, et al, 2007; Samaneh, et al, 2012; Wang, et al, 2011)。

表1 台站表
Table 1 List of the stations

所属区域	站名	区站号	经度(°E)	纬度(°N)	海拔高度(m)
青藏高原	那曲	55299	92.07	31.48	4507.0
	拉萨	55591	91.13	29.67	3648.9
	定日	55664	87.08	28.63	4300.0
	昌都	56137	97.17	31.15	3306.0
	林芝	56312	94.33	29.67	2991.8
华南	桂林	57957	110.30	25.33	164.4
	梧州	59265	111.25	23.65	114.8
	南宁	59431	108.35	22.85	121.6
	北海	59644	109.20	21.48	12.8
	百色	59211	106.60	23.90	145.0

资料缺失情况:降雨资料缺 2011 年 10 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日数据,因此记 2011 年的年累计雨量/雨日为缺失;能见度资料缺 2000 年 1 月 1 日至 2000 年 6 月 30 日数据,记 2000 年的年平均能见度为缺失。

2.2 归一化对流有效位能资料

当气块的浮力大于重力时,一部分位能可以释放出来,这部分能量对空气对流有积极作用,并可转化为大气动能,称其为对流有效位能(E_{CAPE}),其表达式为

$$E_{\text{CAPE}} = g \int_{Z_f}^{Z_e} \frac{1}{T_{\text{ve}}} (T_{\text{va}} - T_{\text{ve}}) dz \quad (1)$$

式中, Z_f 为自由对流高度, Z_e 为平衡高度, T_v 为虚温,下标 a 表示地面上的上升量,下标 e 表示环境相关量(刘玉玲,2003)。

对流有效位能是对流天气分析中常用的一个参数。其垂直分布在对流风暴的发展过程中起着重要作用,为综合考虑对流有效位能垂直分布情况引入归一化对流有效位能(N_{CAPE})参数,该参数是自由对流层厚度内平均浮力与厚度之比,表达式为

$$N_{\text{CAPE}} = E_{\text{CAPE}}/F_{\text{cl}} \quad (2)$$

式中, F_{cl} 为自由对流层厚度(陈晓红等,2006;张玲等,2008)。

气象信息综合分析处理系统(MICAPS)是中国气象局自主研发的气象业务基础软件,目前已经在中国气象、水文、农业及民航等相关领域得到广泛应用。MICAPS3.1 软件系统可以直接输出归一化对流有效位能,方法如下:

将 1000/925/850/700/500/400/300/200 hPa 高度/气温/露点/风向/风速数据写成 MICAPS 温

度对数压力图格式文件。打开 MICAPS3.1 系统,点击主菜单“文件”→“打开”按钮,选择温度对数压力图文件→出现“单站高空分析”对话框,在对话框的工具栏中选择“物理量批量导出”按钮→出现“数据保存向导”,选择站点和时段,并选择输出物理量为“归一化对流有效位能”,设置目标文件夹路径→点击“完成”按钮,即可生成归一化对流有效位能数据文件。

采用以上方法,获取每日 08、20 时的归一化对流有效位能,然后通过反距离权重内插方法,计算出全天其他时次归一化对流有效位能,最终得到 2001—2011 年逐时归一化对流有效位能数据。

2.3 降雨-能见度相关性分析方法

研究降雨随能见度的变化是否发生改变,以了解气溶胶对降雨的影响。不过,降雨和气溶胶是相互影响的,它们还共同受其他要素的影响。如何根据降雨和气溶胶存在的相关关系来推断是气溶胶影响了降雨,而不是降雨影响了气溶胶,也不是其他要素同时影响了降雨和气溶胶?为解决这一问题,采用了以下方案:

(1)时间分离。把研究对象(雨量-能见度、归一化对流有效位能-能见度)限制在不同的时间区间里进行分析。如:研究能见度和雨量关系时,取 20 时能见度数据,分析它对未来 24 h(当日 20 时至次日 20 时)雨量影响。如果统计分析表明它们相关,显然,更可能的情况是现在的能见度/气溶胶影响了未来的雨量,而不是未来的雨量会影响现在的能见度/气溶胶。

(2)第 5.1 节和第 6 节采用了忽略时间要素的

分析方法,具体做法是:只按照需要对研究的两要素进行统计分析,不考虑年际变化影响。该方法最初被 Rosenfeld 等(2007)用于研究空气污染与降雨关系,其突出优点是可将样本数大幅度提高(Liu, et al, 2009)。从理论上来说,只要样本数足够大,就可以排除其他要素的影响,得到气溶胶浓度和降雨的真实关系。

3 华南与青藏高原能见度差异

从 20 时能见度的逐年变化曲线(图 1)可见,近 30 年来青藏高原(图 1a)各站年平均能见度都在 28 km 以上;上升趋势的信度 $p < 0.001$,但速度很小,仅为 0.019 km/a,近 30 年来累计上升不足 1 km;可以认为青藏高原空气质量一直维持在很好水平。

华南(图 1b)各站能见度在 10—20 km,5 站平均值以 -0.092 km/a 的速度下降,近 30 年来累计下降约 3 km,下降的信度 $p < 0.001$ 。华南能见度较低、下降速度快,显示出华南地区存在严重的空气污染并且呈继续恶化趋势。

以能见度高低作为判断空气质量好坏的标准,则青藏高原和华南可以分别被看作非污染地区和污染地区。如果空气污染能够影响降雨,那么这种影响更可能发生在华南地区而不是青藏高原,并导致华南地区和青藏高原的降雨呈现不同的特征。下面将分析两地的降水特征差异,并研究这种差异和空气污染的关系。

4 华南与青藏高原雨量和雨日差异

定义日雨量大于 50 mm 为暴雨,25.1—50 mm

为大雨,10.1—25 mm 为中雨,1.1—10 mm 为小雨,0.1—1 mm 为微量雨,计算各站各级别雨量和雨日年趋势变化,以了解华南与青藏高原降雨差异(表 2—5)。

4.1 微量雨分析

表 2 显示,青藏高原定日、昌都两站年累计微量雨雨量呈显著变化趋势($p < 0.05$),其中定日下降速率达 11.5%/(10 a),昌都上升速率为 6.4%/(10 a);青藏高原其余各站年累计微量雨雨量趋势变化不显著。由表 3 可见,定日站年累计微量雨雨日以 14.9%/(10 a)的速度下降,信度 $p < 0.001$;青藏高原其余各站年累计微量雨雨日变化不显著。

华南地区梧州、南宁和百色 3 站年累计微量雨雨量下降趋势显著($p < 0.01$),下降速率均超过 8%/(10 a);这 3 站年累计微量雨雨日也呈显著下降趋势,速率超过 8%/(10 a);华南地区的桂林、北海两站微量雨雨量、雨日无显著变化(表 4、5)。

4.2 小雨分析

表 2—3 显示青藏高原各站年累计小雨雨量、雨日均无显著趋势变化。而表 4—5 显示华南地区南宁、百色 2 站年累计小雨雨量、雨日都呈显著下降趋势($p < 0.05$);北海年累计小雨雨量趋势变化不显著,而雨日下降趋势显著($p < 0.01$);桂林、梧州 2 站年累计小雨雨量、雨日趋势变化都不显著。

4.3 中雨分析

拉萨、定日 2 站雨量呈增长趋势($p < 0.05$),速率为(17%—18%)/(10 a)(表 2);拉萨雨日也为增长趋势($p < 0.05$),速率为 17%/(10 a)(表 3);桂林雨量、雨日都呈显著下降趋势($p < 0.001$),下降速率分别为 12.2%/(10 a)、12.6%/(10 a)(表 4、5)。

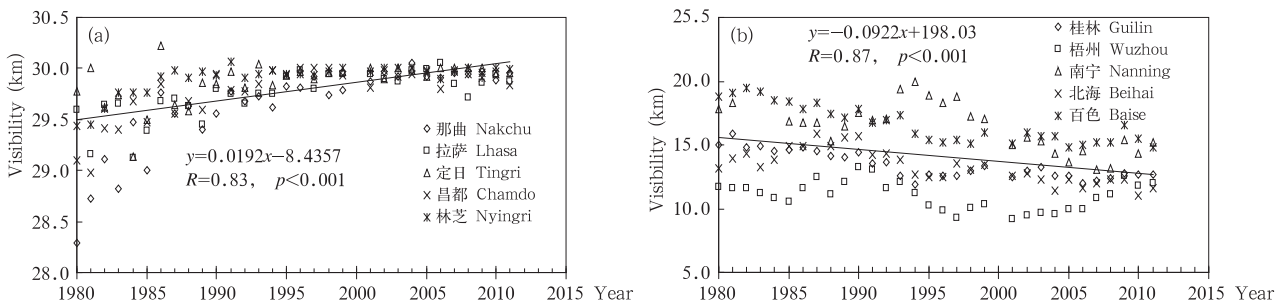


图 1 逐日 20 时能见度年变化

(a. 青藏高原, b. 华南;直线为 5 站平均的线性趋势线)

Fig. 1 Time variation of the annual-averaged visibility at 20:00 BT for the Tibetan Plateau (a) and South China (b)

表2 青藏高原各级别年累计雨量变化速率与趋势相关系数(雨量与年份相关)

Table 2 The change rate and the correlation coefficient of the linear regression for the annual rainfalls of each precipitation intensity category for the stations in the Tibetan Plateau

	降水级别	那曲	拉萨	定日	昌都	林芝
变化速率 (%/10 a)	微量雨	6.351	1.554	-11.483	6.440	-2.983
	小雨	3.506	5.133	6.207	1.348	1.321
	中雨	-3.311	16.965	17.961	-3.786	3.053
	大雨	14.913	-3.736	18.020	--	-17.815
	暴雨	--	--	--	--	--
相关系数	微量雨	0.256	0.060	-0.484**	0.342*	-0.169
	小雨	0.177	0.180	0.199	0.069	0.096
	中雨	-0.096	0.379*	0.339*	-0.095	0.095
	大雨	0.118	-0.040	0.154	--	-0.303
	暴雨	--	--	--	--	--

* : 显著性水平 $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

表3 同表2,但对青藏高原各级别年累计雨日

Table 3 As in Table 2 but for rainy days in the Tibetan Plateau

	降水级别	那曲	拉萨	定日	昌都	林芝
变化速率 (%/10 a)	微量雨	2.484	1.494	-14.947	3.814	-4.995
	小雨	2.282	0.404	1.316	2.059	-0.413
	中雨	-1.026	17.035	11.886	-1.637	5.114
	大雨	9.217	-2.450	9.902	--	-19.696
	暴雨	--	--	--	--	--
相关系数	微量雨	0.141	0.078	-0.689***	0.257	-0.312
	小雨	0.139	0.018	0.056	0.120	-0.039
	中雨	-0.030	0.356*	0.253	-0.044	0.165
	大雨	0.078	-0.026	0.104	--	-0.366*
	暴雨	--	--	--	--	--

* : 显著性水平 $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

表4 同表2,但对于华南地区各级别年累计雨量

Table 4 As in Table 2 but for rainfalls in South China

	降水级别	桂林	梧州	南宁	北海	百色
变化速率 (%/10 a)	微量雨	-5.124	-10.809	-8.737	-7.057	-10.013
	小雨	-4.420	-1.255	-6.001	-7.190	-10.586
	中雨	-12.193	-1.274	-1.717	-5.752	-2.079
	大雨	4.207	10.259	0.305	-6.990	1.375
	暴雨	13.013	-6.012	-6.229	1.394	34.406
相关系数	微量雨	-0.301	-0.617***	-0.449**	-0.330	-0.526**
	小雨	-0.329	-0.075	-0.386*	-0.330	-0.562**
	中雨	-0.607***	-0.053	-0.063	-0.231	-0.082
	大雨	0.139	0.238	0.008	-0.192	0.039
	暴雨	0.245	-0.114	-0.117	0.033	0.419*

* : 显著性水平 $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

青藏高原其余各站和华南其余各站中雨变化不显著。

4.4 大雨分析

昌都站由于样本太少,没有进行趋势分析;林芝站累计雨日减少信度 $p < 0.05$ (表3)。青藏高原其

余各站以及华南各站年累计大雨雨量、雨日变化都不显著。

4.5 暴雨分析

青藏高原各站由于样本太少没有进行年累计暴雨雨量、雨日的分析。表4和5显示华南各站中只

有百色站年累计暴雨雨量呈显著增长趋势($p < 0.05$)。

综上所述,青藏高原部分台站微量/中/大雨发生了趋势变化,这种趋势变化可能很难归因于气溶胶浓度改变的影响,因为第3节的能见度分析显示该地区基本没有空气污染,下面将不再分析微量/中/大雨;此外,暴雨样本数偏少,也被排除在下面的分析样本之外;而小雨趋势变化在青藏高原和华南有很大不同:青藏高原年累计小雨雨量、雨日都没有显著趋势变化(表2、3),对应于该地区空气质量一直维持在很好状态(图1a);华南部分地区年累计小

雨雨量、雨日出现下降趋势(表4、5),对应于华南空气质量正在快速恶化(图1b);如果认为空气污染可以抑制小雨,则能够解释华南和青藏高原小雨变化的差异,这也与中国东部地区(Qian, et al, 2009)和台湾地区(Chen, et al, 2008)以及韩国(Yum, et al, 2010)等地的研究结论吻合。当然,仅凭降雨/能见度自身的趋势变化显然不足以得出“空气污染抑制小雨”的结论,下面将通过降雨-能见度相关性、归一化对流有效位能-能见度相关性对这一问题做深入研究。

表5 同表2,但对于华南地区各级别年累计雨日
Tabel 5 As in Table 2 but for rainy days in South China

		桂林	梧州	南宁	北海	百色
变化速率 (%/10a)	微量雨	-5.123	-9.692	-8.364	-5.586	-8.490
	小雨	-4.237	-3.742	-7.450	-7.801	-9.059
	中雨	-12.623	0.395	-1.193	-6.579	-3.789
	大雨	5.958	11.137	1.678	-7.363	2.514
	暴雨	9.829	-8.256	-6.716	3.769	26.046
相关系数	微量雨	-0.331	-0.558***	-0.460*	-0.323	-0.495**
	小雨	-0.343	-0.26	-0.473**	-0.420**	-0.553***
	中雨	-0.657***	0.019	-0.044	-0.257	-0.158
	大雨	0.199	0.253	0.046	-0.199	0.072
	暴雨	0.223	-0.181	-0.140	0.095	0.390

*: 显著性水平 $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

5 能见度与小雨雨量的相关

5.1 能见度与小雨雨量逐日资料的相关

对于每一个台站,计算20时能见度与未来24h(当日20时—次日20时)雨量逐日数据的相关系数,分析对象限于小雨样本,即当日20时—次日20时雨量为1.1—10 mm的降雨样本。表6显示,青藏高原各站雨量和能见度相关不显著($p > 0.05$);而华南地区的南宁、北海、百色3站雨量和能见度为正的显著相关关系,即能见度变小对应降雨变少,这表明气溶胶浓度高对应雨量小,相关信度 $p < 0.01$;梧州站雨量和能见度相关不显著($p > 0.05$),桂林站雨量和能见度则为负相关关系。

对比表6和第4节分析的各站降雨变化趋势,发现逐日小雨雨量-能见度相关和小雨雨日趋势变化有很强的一致性:南宁、北海、百色3站雨量和能见度正相关显著,能见度越低,气溶胶浓度越大,对应的雨量越小,即空气污染抑制了这3个台站的降雨(表6);反映在趋势变化上为小雨年累计雨日呈

显著下降态势(表5)。表6中青藏高原各站、华南桂林、梧州站空气污染对小雨没有显著的抑制作用(即雨量和能见度相关不显著或为负相关),对应于这些台站小雨趋势变化不显著(表2—5)。

表6 当日20时能见度与未来24h
(当日20时—次日20时)小雨雨量逐日资料的相关
Tabel 6 List of the correlation coefficients between
the visibility at 20:00 BT and the light
rainfall of the following 24 hours

台站	相关系数	台站	相关系数
那曲	0.005	桂林	-0.064**
拉萨	-0.044	梧州	0.035
定日	-0.049	南宁	0.067**
昌都	-0.017	北海	0.100***
林芝	0.017	百色	0.084***

*: 显著性水平 $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

对于雨量和能见度正相关显著的南宁、北海、百色3站,绘制出雨量随能见度的变化(图2)。绘制时参考了Rosenfeld等(2007)的做法,只选取出现小雨的样本,把当日20时—次日20时降雨量作为当日20时能见度的函数,反距离权重插值并进行滑

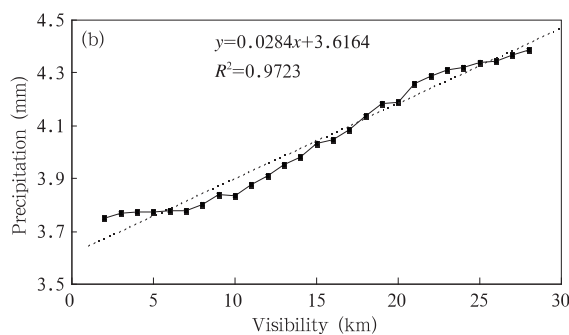
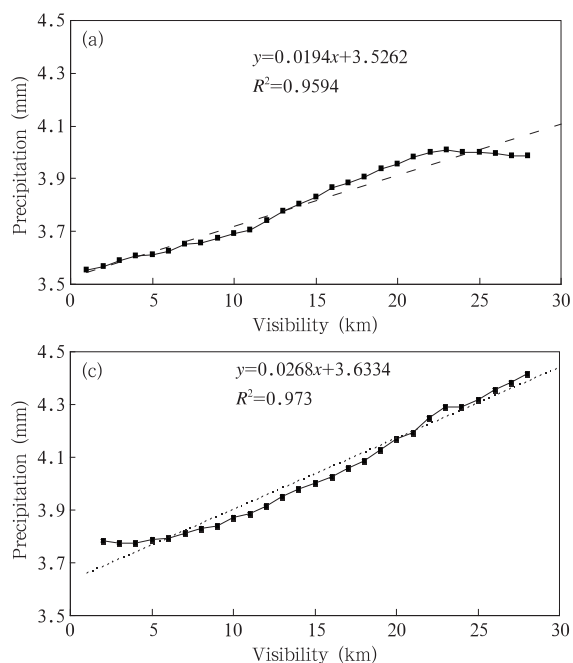


图2 南宁(a)、北海(b)和百色(c)3站未来24 h 小雨降雨量随20时能见度变化(虚线为趋势线)
Fig. 2 Light rainfall of the following 24 hours as a function of the visibility at 20:00 BT in the stations of Nanning (a), Beihai (b) and Baise (c)

动平均,插值使用总数据量的20%数据(离指定能见度值最近的前后各10%数据),滑动采用-5—5共11个样本进行平均。由图2可见,随着当日20时能见度的降低,未来24 h雨量呈稳步减少态势;图中虚线为线性趋势线,其趋势公式的一次项系数分别为0.019(南宁)、0.028(北海)和0.027(百色),这表明能见度每减小1 km,南宁、北海、百色3站小雨雨量将分别减少0.019、0.028和0.027 mm。

5.2 能见度与小雨雨量年资料的相关

图3给出了百色逐年小雨累计雨量及小雨开始时年平均能见度,小雨开始时年平均能见度计算方法为:如果当日20时至次日20时雨量为1.1—10 mm,则将当日20时能见度纳入统计范围,把每年满足条件的样本进行算术平均,得到20时能见度年平均作为小雨开始时年平均能见度。图3显示雨量和能见度都呈下降趋势,其相关系数为0.477,相关信度 $p < 0.01$ 。

参照对百色站年值的处理方法,逐站计算了所有台站年雨量和能见度的相关系数(表7),可见,只有南宁、百色2站雨量和能见度的年值正相关达到显著水平($p < 0.05$),其余各站雨量和能见度相关不显著。

年小雨累计雨量是以下两层信息的综合体:一是单次小雨降雨量大小,二是年小雨日(次)数的多少;只有南宁、百色2站年小雨累计雨量与能见度成

正相关,表明单次小雨雨量和小雨次数组成的综合体随能见度的降低(气溶胶浓度升高)而减小,即这个综合体受空气污染抑制而减小。这与第4节雨量、雨日趋势分析的一致性:只有南宁、百色两站雨量、雨日同时出现显著减少趋势。

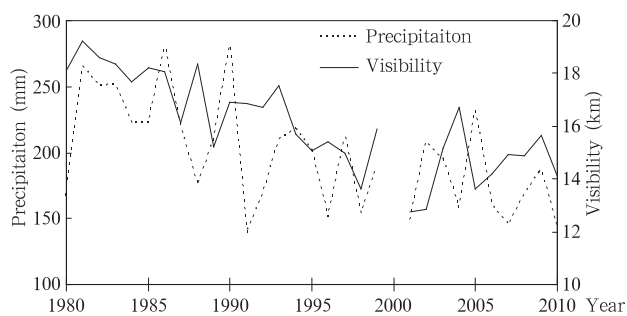


图3 百色20时能见度与未来24 h (当日20时—次日20时)小雨雨量变化

Fig. 3 Variation of annual values of the visibility at 20:00 BT and the light rainfall during the following 24 hours in the station of Baise

比较年值、日值相关性的分析结果和雨量、雨日的年趋势变化,得到以下结果:(1)南宁、百色两站小雨雨量、雨日都呈显著减少趋势(表4、5),对应两站年值和日值雨量-能见度的相关都很显著(表6、7);(2)北海小雨雨量趋势变化不明显(表4);北海小雨雨日下降的趋势相关系数为-0.42($p < 0.01$),其绝对值小于南宁(-0.473)和百色(-0.553),在年

值样本数相同的情况下,表明北海小雨雨日下降趋势明显弱于南宁、百色(表 5),对应北海雨量-能见度的日值相关显著而年值相关不显著(表 6、7);(3)青藏高原各站和华南桂林、梧州两站雨量、雨日均无显著减少趋势(表 2—5),对应其年值和日值的雨量-能见度都不相关(表 6、7)。

总体而言,小雨减少趋势显著的台站,雨量和能见度正相关显著;减弱趋势越显著,其雨量和能见度正相关也越显著。

表 7 同表 6,但对于年值

Table 7 As in Table 6 but for yearly values

台站	相关系数	台站	相关系数
那曲	0.113	桂林	0.064
拉萨	-0.017	梧州	-0.082
定日	-0.003	南宁	0.358*
昌都	0.096	北海	0.073
林芝	0.210	百色	0.477**

*: 显著性水平 $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

6 归一化对流有效位能对地面能见度/气溶胶激励效应的响应

气溶胶激励效应理论由 Rosenfeld 等(2008)提出,该理论认为:污染空气中细小的云滴粒子在上升到过冷层之前不会形成降水,到达过冷层后冻结而形成冰相降水,冰相降水粒子下降到低层发生融化;

高空凝结释放潜热和低空融化吸收潜热导致污染空气相对洁净空气有更强的热能上升运动,产生更多的对流云和降水。在这一过程中,高空凝结和低空融化消耗的对流有效位能将转换成等量的动能。

按照激励效应的理论,降雨云系的对流有效位能将与污染物浓度有关,在此用归一化处理后的对流有效位能进行分析。对南宁、百色、北海 3 个已被证明小雨-能见度相关显著的台站,分析其归一化对流有效位能与能见度的相关性,作为小雨-能见度相关的一个补充。

采用当日 20 时至次日 20 时雨量为小雨的样本,计算当日 20 时能见度与未来 24 h 内(即当日 21 时至次日 20 时)逐时归一化对流有效位能的相关系数(图 4),结果表明,除百色站当日 21、22、23 时共 3 个时次正相关的信度 $p < 0.01$ 外,其余各站各时次正相关信度 $p < 0.001$;即当日 20 时能见度越低,气溶胶浓度越大,未来 24 h 归一化对流有效位能越小,这与能见度越低雨量越小现象是一致的,是归一化对流有效位能对地面能见度/气溶胶的激励效应的响应。

分析相关信度随时间的变化,由于同一台站不同时次的样本数相同,其相关信度的大小可以用相关系数的高低来反映。图 4a 显示,南宁站 20 时能见度与 21 时归一化对流有效位能的相关系数为

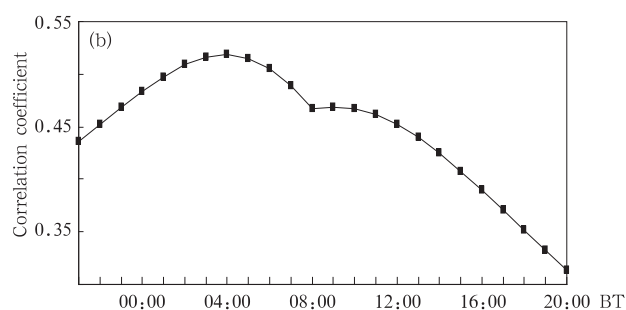
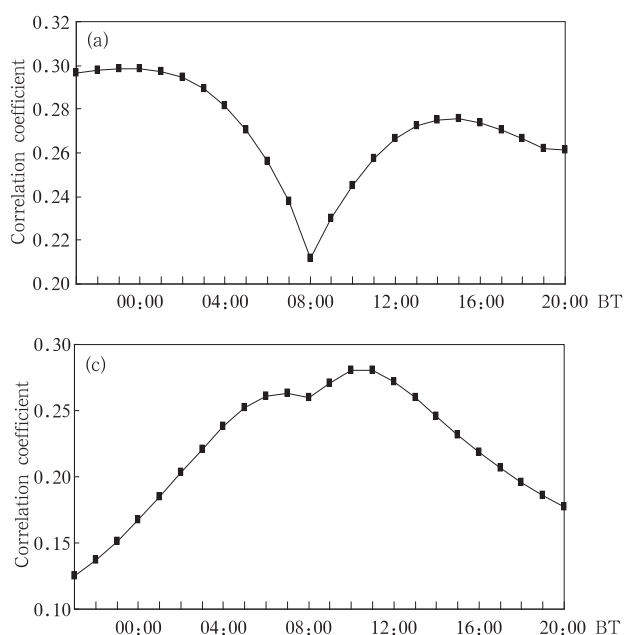


图 4 南宁(a)、北海(b)和百色(c)3 站当日 20 时能见度与未来 24 h(即当日 21 时至次日 20 时)逐时归一化对流有效位能的相关系数(仅统计小雨样本)
Fig. 4 Correlation coefficient between the visibility at 20:00 BT and the Ncape in each hour of the following 24 hours in the stations of (a) Nanning, (b) Beihai and (c) Baise (only for the light rainfall relevant)

0.297,与22时归一化对流有效位能的相关系数增大为0.298,与23时的归一化对流有效位能的相关系数达到第1个峰值0.30,其后相关系数逐渐减小,到次日08时减小到一个低值0.212,然后相关系数又开始逐步增大,到次日15时达到第2个峰值0.276。如果以相关系数最高的时间为归一化对流有效位能对地面能见度/气溶胶激励效应的响应主要发生时间,则在南宁的响应主要发生时间为当日23时和次日15时。

北海、百色两站与南宁站的结果相似:相关系数开始时增大,到某一个峰值后降低,至次日08时降到谷值,然后又开始增大,并出现第2个峰值。北海的两个峰值出现时间分别为次日04时和次日9时,百色则分别是次日07时和次日10时。

7 结 论

以能见度作为气溶胶浓度的表征物,分析青藏高原和华南地区各5个台站20时能见度的逐年变化,发现青藏高原各站年平均能见度都在28 km以上且近30年变化很小;而华南各站能见度在10—20 km,5站平均值以 -0.092 km/a 的速度快速下降,其信度 $p < 0.001$ 。

为了解两地空气污染状况差异对降水的影响,研究各站微量/小/中/大/暴雨年累计雨量和年累计雨日的趋势变化。发现青藏高原部分台站微量/中/大雨发生了趋势变化,考虑到该地区基本没有空气污染,很难将这些趋势变化归因于气溶胶浓度变化的影响。而对于小雨,分析显示青藏高原雨量、雨日都没有明显的趋势变化,而华南部分台站(南宁、北海、百色)小雨下降趋势显著;这可能表明华南南宁、北海、百色3站小雨下降是由于空气污染造成的,这与对中国东部(Qian, et al, 2009)和台湾(Chen, et al, 2008)、韩国(Yum, et al, 2010)等地的研究把小雨减少归因于空气污染的结论吻合。

采用日值资料和年值资料分析20时能见度与未来24 h雨量的相关,发现南宁、百色两站小雨减少趋势最明显,对应于年值和日值的雨量-能见度相关都较明显;北海小雨减少趋势稍弱于南宁、百色,对应于北海雨量-能见度的日值相关显著而年值相关不显著;青藏高原各站和华南桂林、梧州两站雨量、雨日均无明显减少趋势,对应于它们年值和日值的雨量-能见度正相关都不显著。总体而言,小雨减

少趋势明显的台站,雨量和能见度正相关显著;减弱趋势越明显,其雨量和能见度正相关也越显著。定量分析发现能见度每减小1 km,南宁、北海、百色3站小雨雨量分别减小0.019、0.028和0.027 mm。

对南宁、北海、百色3站,分析20时能见度与未来24 h逐时归一化对流有效位能的相关性,以了解归一化对流有效位能对地面能见度/气溶胶激励效应的响应。分析结果表明:20时能见度越低,气溶胶浓度越大,未来24 h的归一化对流有效位能越小,它与能见度越低雨量越小现象一致。比较不同时次归一化对流有效位能-能见度的相关性,发现归一化对流有效位能对地面能见度/气溶胶的激励效应的响应每日有两个峰值。

降雨的形成机制是复杂的,影响要素也是多方面的,要得出空气污染影响华南/青藏高原小雨的排它性结论,本研究显然还只是一个起步,下一步将是用多种工具(特别是数值模式)对这一命题进行研究,以更好地了解空气污染和华南/青藏高原小雨的关系。

参 考 文 献

- 曹伟华, 梁旭东, 李青春. 2013. 北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析. 气象学报, 71(5): 940-951
- 陈晓红, 郝莹, 鲁俊. 2006. 对流参数在强对流天气预报中的释用. 气象与减灾, 2: 8-10
- 戴进, 余兴, Rosenfeld D等. 2008. 秦岭地区气溶胶对地形云降水的抑制作用. 大气科学, 32(6): 1319-1332
- 段婧, 毛节泰. 2008. 华北地区气溶胶对区域降水的影响. 科学通报, 53(23): 2947-2955
- 梁延刚, 胡文志, 杨敬基. 2008. 香港能见度、大气悬浮粒子浓度与气象条件的关系. 气象学报, 66(3): 461-469
- 刘宁徽, 马雁军, 王扬锋. 2012. 辽宁中部城市群夏季大气能见度的观测研究. 气象学报, 70(4): 814-820
- 刘玉玲. 2003. 对流参数在强对流天气潜势预测中的作用. 气象科技, 31(3): 147-151
- 邱金桓, 林耀荣. 2001. 关于中国大气气溶胶光学厚度的一个参数化模式. 气象学报, 59(3): 368-372
- 吴兑, 吴晓京, 李菲等. 2010. 1951—2005年中国大陆霾的时空变化. 气象学报, 68(5): 680-688
- 张玲, 张艳玲, 陆汉城等. 2008. 不稳定能量参数在一次强对流天气数值模拟中的应用. 南京气象学院学报, 31(2): 192-199
- Alpert P, Halfon N, Levin Z. 2008. Does air pollution really suppress precipitation in Israel? J Appl Meteor Climatol, 47(4): 933-943
- Chen J P, Liu S C, Hsu C J, et al. 2008. Rain intensity spectral shift: An aerosol effect? // 15th International Conference on

- Cloud and Precipitation. Cancun, Mexico: International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences, 7-11
- Khain A P. 2009. Notes on state-of-the-art investigations of aerosol effects on precipitation: A critical review. *Environ Res Lett*, 4 (1): 015004(20pp)
- Liu S C, Fu C, Shiu C J, et al. 2009. Temperature dependence of global precipitation extremes. *Geophys Res Lett*, 36: L17702, doi: 10.1029/2009GL040218
- Qian Y, Gong D Y, Fan J W, et al. 2009. Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and modeling. *J Geophys Res*, 114: D2K, doi: 10.1029/2008JD011575
- Rosenfeld D, Dai J, Yu X, et al. 2007. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation. *Science*, 315(5817): 1396-1398
- Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al. 2008. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? *Science*, 321 (5894): 1309-1313
- Rotstajn L D, Keywood M D, Forgan B W, et al. 2009. Possible impacts of anthropogenic and natural aerosols on Australian climate: A review. *Int J Climatol*, 29(4): 461-479
- Samaneh S, Farhang A G, Yahya G. 2012. Visibility trends in Tehran during 1958-2008. *Atmos Environ*, 62: 512-520
- Wang Y, Wan Q, Meng W, et al. 2011. Long-term impacts of aerosols on precipitation and lightning over the Pearl River Delta megacity area in China. *Atmos Chem Phys*, 11(23): 12421-12436
- Warner J, Twomey S. 1967. The production of cloud nuclei by cane fires and the effect on cloud droplet concentration. *J Atmos Sci*, 24(6): 704-706
- Yi B, Yang P, Bowman K P, et al. 2012. Aerosol-cloud-precipitation relationships from satellite observations and global climate model simulations. *J Appl Remote Sens*, 6(1): 63503
- Yum S S, Cha J W. 2010. Suppression of very low intensity precipitation in Korea. *Atmos Res*, 98(1): 118-124