



21世纪10年代初中国东部夏季小雨频次地形效应的趋势转折

董雪晨^{1,2}, 龚道溢^{1,2*}, 王子晴^{1,2}

1. 北京师范大学地理科学学部/灾害风险科学研究院, 北京 100875;

2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

* 联系人, E-mail: gdy@bnu.edu.cn

2021-07-23 收稿, 2021-11-21 修回, 2021-11-22 接受, 2021-11-25 网络版发表

国家重点研发计划(2020YFA0608201)资助

摘要 利用中国东部地区1979~2019年9个山地站及相邻的27个平原站逐日降水资料, 分析了夏季不同等级降水地形效应的变化特征, 并探讨了相关气象因子的可能影响. 统计显示, 近40年来小雨频次地形效应于21世纪10年代初发生了显著的趋势转折, 1979~2010年时段呈显著下降趋势($-2.24\%/10a$, $P<0.1$), 之后则为显著上升趋势($34.02\%/10a$, $P<0.05$). 对山地站和平原站的比较显示, 小雨频次地形效应趋势的转折主要是由山地站的变化引起. 进一步分析相对湿度、气温、气柱水汽量、近地面风速等气象因子的相关变化, 结果显示近地面风速与小雨频次的地形效应有显著的正相关, 去趋势后二者相关达 $0.51(P<0.01)$, 尤其在仅考虑山地站存在降水同时相邻平原站无降水的情况下, 山地站小雨频次与风速的相关达 $0.60(P<0.01)$; 而其他3个因子与地形效应的变化缺乏显著相关. 观测显示, 21世纪10年代初中国东部近地面风速的趋势发生了显著变化, 由之前的减弱($-0.10\text{ m/(s }10a)$, $P<0.01$)变为显著增强($0.19\text{ m/(s }10a)$, $P<0.05$). 这说明, 近地面风速很可能是小雨频次地形效应趋势转折的主要原因.

关键词 地形效应, 小雨频次, 影响因子, 近地面风速, 趋势转折

降水的地形效应是一个全球普遍存在的现象, 气候态上表现为山地降水的频次和雨量明显高于相邻的山下台站^[1]. 地形降水受到多种因素的影响, 其中低层气流遇到山地阻挡, 或被迫抬升在迎风坡产生降水^[2,3]、或形成扰流在背风坡产生辐合进而影响降水^[4], 可能是最直接的动力因子. 另一方面, 山地特殊的热力条件也可能影响局地降水, 日间太阳辐射增暖山顶使得大气层结不稳定并激发深对流, 导致山顶降水增加, 例如夏季正午雷暴降水^[5]; 而夜间的辐射冷却则会抑制山顶的对流活动, 受重力波影响形成的下行气流在山脚处与不稳定湿气团汇聚并伴随降水^[6]. 此外, 大尺度云系经过山地时, 常产生播种-供给云效应, 较低的

“播种云”内水汽累积, 配合高层“供给云”导致山顶降水增强^[7,8]. 近年来有研究指出, 在一些大气污染较重的地区, 气溶胶也会造成地形降水的变化^[9,10], 其中通过影响云的微物理过程, 特别是云滴数量增多、云滴半径减小, 降低降水效率^[11~13]; 而吸收性气溶胶还能通过改变大气边界层稳定性, 从而抑制地形降水的产生^[14].

观测表明, 降水的地形效应也存在长期变化, 如有研究分析了近半个世纪美国西部山地站与海岸线附近主要城市台站的年降水量比值, 发现在加利福尼亚中南部、西雅图东部、落基山脉东部等地区, 该比值的减少幅度达 $10\%\sim 25\%$ ^[15~17]. 有学者基于中国中东部地

引用格式: 董雪晨, 龚道溢, 王子晴. 21世纪10年代初中国东部夏季小雨频次地形效应的趋势转折. 科学通报, 2022, 67: 184–192

Dong X C, Gong D Y, Wang Z Q. Enhancement of the orographic effect in summer light rains over eastern China since the early 2010s (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 184–192, doi: [10.1360/TB-2021-0736](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0736)

区的台站降水资料,指出1950~2005年期间,华山、五台山等山地站与其周边平原站的年降水量之比减幅约为14%~27%^[18-20]。本研究的目的是利用台站观测资料和多套网格降水产品,挑选中国东部地区多组山地站,分析其降水地形效应的变化特征,以及与相关气象要素的关系,以期加深全球变化背景下东亚季风区降水地形效应的响应及可能机制的科学认识。

1 资料和方法

本文使用的气象台站观测资料来源于中国气象局国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/site/index.html>)提供的“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”,研究时段选取为1979~2019年夏季(6~8月)。山地站挑选的原则是连续性好、数据缺失少(总缺测天数少于15 d)、海拔高度超过800 m,同时挑选距离山地站最近的3个平原站,满足与山地站海拔高度差大于600 m。大部分平原站与山地站相距约30~50 km,由于台站分布稀疏不均,个别台站距离稍远,但也不超过120 km。最后共筛选出9个山地站和27个平原站用于分析(表1)。这些山地站基本都位于相对孤立的小尺度山体上,夏季的大气环流背景和水汽条件也大致相似(图1(a))。

我们使用了4套不同来源和性质的网格降水资料用于对比,包括:(1)欧洲中期天气预报中心提供的ERA5-Land资料,时间为1981年至今,空间分辨率为0.1°^[21];(2)误差订正过的ERA5降水资料(WFDE5),时间为1979~2018年,空间分辨率为0.5°^[22];(3)基于2400余个中国气象台站的观测资料构建的格点化降水数据集(CN05.1),分辨率为0.25°^[23];(4)日本APHRODITE研究计划提供的逐日亚洲陆地降水数据集(APHRO-MA V1101),时间为1979~2007年,空间分辨率为0.5°^[24]。

Givati和Rosenfeld^[15]将地形影响因子(R_o)定义为海拔较高的山地站与其附近平原站的降水量之比,常用于定量表征气候平均意义上的地形效应。不过这个指标用于地形效应的时间变化分析时,对山地降水变化的刻画不够直观,例如当山地站与其附近平原站的降水同向或者反向变化,都可能导致 R_o 变化不稳定^[25],不能直接反映山地降水的相对变化。为了直观描述山地站相对于平原站的降水变化,定义 R_o 的计算公式如下:

$$R_o = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100\%, \quad (1)$$

表1 研究区所选气象台站信息

Table 1 Information of selected meteorological stations over eastern China

组别	区站号	台站名	海拔高度(m)
A	53588	五台山	2208.3
	53673	原平	828.2
	53594	灵丘	938.7
	53578	朔州	1114.8
B	54826	泰山	1533.7
	54727	章丘	121.8
	54823	济南	170.3
	54836	沂源	305.1
C	57046	华山	2064.9
	53948	蒲城	499.2
	57052	永济	354.1
	57143	商县	742.2
D	58437	黄山	1840.4
	58436	宁国	87.3
	58531	屯溪	142.7
	58429	铜陵	37.5
E	56385	峨眉山	3047.4
	56187	温江	539.3
	56386	乐山	424.2
	56485	雷波	1255.8
F	58506	庐山	1164.5
	58500	阳新	45.8
	58507	武宁	116
	58519	波阳	40.1
G	57776	南岳	1265.9
	57774	双峰	100
	57780	株洲	74.6
	57872	衡阳	104.9
H	57894	井冈山	843
	57789	莲花	194.5
	57799	吉安县	71.2
	57896	遂川	126.1
I	58931	九仙山	1653.5
	58926	漳平	205.3
	59133	崇武	21.8
	59134	厦门	139.4

其中, P_1 表示山地站的降水参数, P_2 表示附近平原站降水参数的平均值,显然这个定义本质上就是二者的偏差百分比。

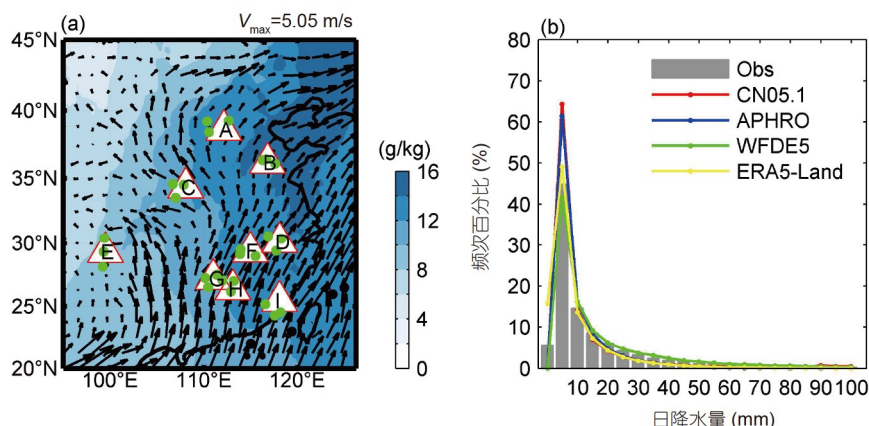


图1 (网络版彩色)大气环流背景和降水频次分布示意图。(a) 中国东部地区多年平均850 hPa风场(风矢)和比湿(填色)及降水观测台站(三角形为山地站, 绿色圆点为平原站)。(b) 多套资料统计的台站及对应格点的降水频次分布。台站信息见表1。比湿和风速为ERA5资料

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of atmospheric circulation background and precipitation frequency distribution. (a) The climate means of 850 hPa wind (in vectors) and specific humidity (in color shadings), and the locations of mountain stations (in triangles) and plain stations (in green dots) over eastern China. (b) The precipitation frequency distribution for the selected stations and the corresponding grids using multiple datasets. Information for stations listed in Table 1. The wind speed and specific humidity are obtained from ERA5 dataset

2 小雨频次地形效应的趋势转折

根据上述定义, 我们首先计算了9组山地站不同等级降水地形效应的气候特征。将日降水分为小雨(0.1~9.9 mm/d)、中雨(10.0~24.9 mm/d)、大雨(25.0~49.9 mm/d)和暴雨(50.0~99.9 mm/d), 分别进行计算。多年数据统计显示, 小雨、中雨、大雨、暴雨雨量的 R_0 值分别为38.40%、49.83%、62.80%和92.07%, 同时雨日频次的 R_0 值分别为27.90%、47.19%、63.37%和85.55%。可见, 气候态上4个等级降水都存在明显的地形效应, 而且随雨强的增加地形效应有偏强的现象(表2)。

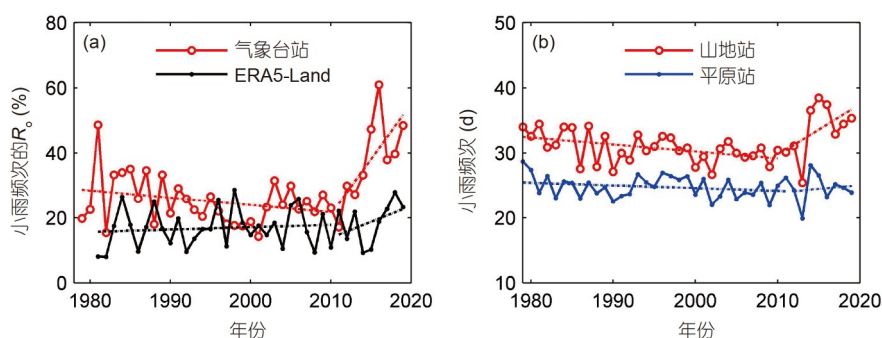
我们进一步分析了4个等级降水地形效应的长期变化, 结果显示在整个研究时段内, 中雨、大雨、暴雨的降水量和降水频次的 R_0 的时间序列均比较平稳, 总体有微弱上升趋势, 线性系数都在0~2%/10a之间, 不过这些趋势统计上并不显著。值得注意的是, 小雨地形效应的长期变化表现出与中雨、大雨和暴雨显著不同的特征。如图2(a)所示, 小雨频次 R_0 突出的特征是在21世纪10年代初前后趋势的反相变化。为了客观检测趋势转折的最优年份, 我们进行了滑动趋势分析, 给定最短趋势统计时段 ≥ 9 年, 同时满足前后2个时段的线性趋势相反而且趋势的绝对值之和最大, 遍历各个可能的年份逐一统计, 结果发现2010年是一个最优转折点。因此, 我们将整个研究时段以2010年为节点分为2段, 1979~2010年小雨频次 R_0 下降趋势为-2.24%/10a

($P < 0.1$), 2011~2019年则以34.02%/10a的速率显著上升($P < 0.05$); 与此同时, 小雨雨量的 R_0 在21世纪10年代初前后也有相似的趋势变化, 2010年之前为显著下降趋势(-2.59%/10a, $P < 0.1$), 2010年之后虽趋势统计上不显著, 但其上升速度仍可达20.57%/10a。我们比较了滑动趋势检测最短统计时段为7和8年的情况, 最优转折点的检测结果相同。此外, 我们统计了小雨频次 R_0 时间序列的累积距平, 结果显示在2010年前后距平累积达到极小值。这说明小雨频次地形效应的趋势转折特征及其2010年左右的最优转折时间点是稳健的。

注意到 R_0 的变化可能受山地和平原降水单独或者共同的影响, 我们分别检查了山地站和平原站地形效应的长期变化。结果显示, 对于中雨、大雨和暴雨事件, 不管是降水量还是雨日频次, 其山地站和平原站在整个研究时段都是同步一致的变化。与此不同的是, 对于小雨事件, 其山地站和平原站的变化特征存在明显的差异, 尤其是2010年以来的趋势差异尤其显著。统计显示山地站小雨频次在1979~2010年期间呈现显著下降趋势, 约为每10a下降1.07 d, 统计上达到0.01显著性水平, 同时段平原站的小雨频次也表现为减少趋势, 但其线性趋势较山地站明显偏弱(-0.41 d/10a); 2010年之后, 山地站小雨频次转为上升, 其线性趋势为7.78 d/10a ($P < 0.1$), 而平原站则没有明显的趋势(图2(b))。此外, 山地站的小雨雨量也表现出2010年前后的反相趋势, 虽未通过0.1的显著性水平检验, 但前后2段的趋势仍达到-1.01和5.70 d/10a。以上分析说明, 气象台站小雨地

表2 多套资料计算的夏季降水 R_0 (%)Table 2 The R_0 in summer precipitation for multiple datasets (%)

	气象台站	CN05.1	APHRO	WFDE5	ERA5-Land
小雨雨量	38.40	2.99	2.89	7.30	19.06
小雨频次	27.90	-1.40	-0.99	12.81	17.17
中雨雨量	49.83	4.30	6.61	8.30	13.99
中雨频次	47.19	4.54	6.65	8.18	13.50
大雨雨量	62.80	8.24	8.27	12.96	22.72
大雨频次	63.37	7.64	9.08	12.68	21.40
暴雨雨量	92.07	11.39	-3.06	-0.10	36.93
暴雨频次	85.55	9.55	-3.01	-0.11	40.87

图2 (网络版彩色)台站和ERA5-Land资料统计的夏季小雨频次 R_0 时间序列(a), 及山地站和平原站夏季小雨频次时间序列(b)。资料时段为1979~2019年Figure 2 (Color online) Time series of R_0 based on summer light rain days from station observation and ERA5-Land (a) and the frequency of summer light rains for mountain and plain stations (b) during 1979–2019

形效应的趋势转折主要由山地站的小雨趋势变化引起。

作为对比, 我们分析了CN05.1、APHRO、WFDE5、ERA5-Land等网格资料的降水地形效应及其变化。与气象台站的做法一致, 分别挑选各个山地站和平原站所在的网格, 计算地形效应。注意到分辨率较粗的资料(APHRO、WFDE5)中有4个平原站与山地站位于同一个网格中, 选择相邻的平原格点替代。同时, 考虑到网格降水与台站观测尺度的差异, 及网格降水强度等级的划分标准, 我们采用的是与台站日降水4个等级相同的百分位值(图1(b)), 因此, 台站与网格各个等级降水在概率上是一致、可比的。根据表2, 从气候态上看, 网格降水的地形效应总体上是明显的, 不过其中CN05.1和APHRO资料中降水的地形效应偏弱。ERA5再分析的2套产品中, 地形效应明显偏强。尤其是分辨率最高的ERA5-Land产品, 4个等级降水地形效应都是4套网格资料中最强的。这说明再分析系统降水预报技巧较高, 另一方面也说明高分辨率对合理刻画地形效

应的重要性。此外, 我们挑选山地网格与相邻最近的平原网格进行分析, 发现其地形效应也普遍存在, 其中ERA5-Land产品4个等级的降水地形效应都很明显。因此, 我们进一步计算了ERA5-Land降水地形效应的长期变化, 结果显示, 其小雨频次的 R_0 在1979~2010年期间没有显著的变化趋势, 而21世纪10年代以来略有上升(9.83%/10a)。其他网格资料中, 不同等级降水的 R_0 在整个研究时段内均无显著趋势。总之, 与台站观测相比, 网格产品小雨频次地形效应的长期趋势以及2010年左右的转折均不明显。

3 相关气象因子分析

以往研究指出小雨的变化受湿度、气温和风速等諸多气象因子的影响^[26]。这节分析夏季相对湿度、气温、气柱水汽量、近地面风速等因子与小雨频次及其 R_0 的相关性。为排除低频变化对结果的影响, 分析前我们将所有的时间序列统一进行了去趋势处理。如表3所

表 3 气象台站小雨频次及其 R_0 与相对湿度、气温、气柱水汽量的相关系数**Table 3** Correlation of the frequency of light rain and R_0 with the relative humidity, temperature, and the total column water vapor for meteorological stations

	相对湿度	气温	气柱水汽量
山地站小雨频次	0.30 ^{a)}	-0.37 ^{a)}	0.12
平原站小雨频次	0.53 ^{b)}	-0.53 ^{b)}	0.10
小雨频次的 R_0	0.01	0.09	0.10

a) $P < 0.1$; b) $P < 0.01$

示,无论是山地站还是平原站,其小雨频次均与相对湿度存在显著的正相关,其中以平原站小雨频次的相关最为突出,相关系数可达0.53($P < 0.01$);同时,小雨频次与气温呈显著负相关,特别是平原站与气温的关系比山地站更强。气柱水汽量与小雨频次没有明显相关,可能与夏季季风区水汽含量整体偏高,不是影响小雨频次的主要因子有关。需要强调的是,这3种气象因子与小雨频次 R_0 的年度变化都没有明显的统计关系,相关系数都接近0。

由于本文筛选的山地站主要是中国东部地区的孤

立山体,山体本身对大气环流的动力、热力反馈较弱。在这种情况下,气流遇到地形阻挡被迫抬升的过程可能更为重要,风速的降低会减弱潮湿空气的抬升作用,不利于地形降水^[27],因此推测地形降水可能更依赖于背景风速的变化。我们分析了近地面风速与小雨频次 R_0 的关系,结果显示,近地面风速与小雨频次的地形效应有显著正相关关系,相关系数为0.51($P < 0.01$) (图3(a))。考虑到大尺度天气过程会同时导致山地和平原站降水,这种情况下很难辨识由风速变化造成的地形降水,因此我们进一步将小雨事件细分为山地站有降水而平原站无降水、山地和平原站同时有降水两种情况进行讨论,前者可以有效剔除大尺度天气过程对降水的影响。如图3(b)所示,用散点图将9组山地站的降水频次与周边无降水的平原站风速标出,发现山地小雨频次与近地面风速有显著正相关关系,相关系数高达0.60($P < 0.01$);各个山地站单独来看也存在这样的正相关,且在78%的山地站中相关系数都通过0.1的显著性检验(表4)。与此形成鲜明对比的是,当山地和平原站同时有降水的情况下,近地面风速与山地小雨频次的关系几乎为0(图3(c))。

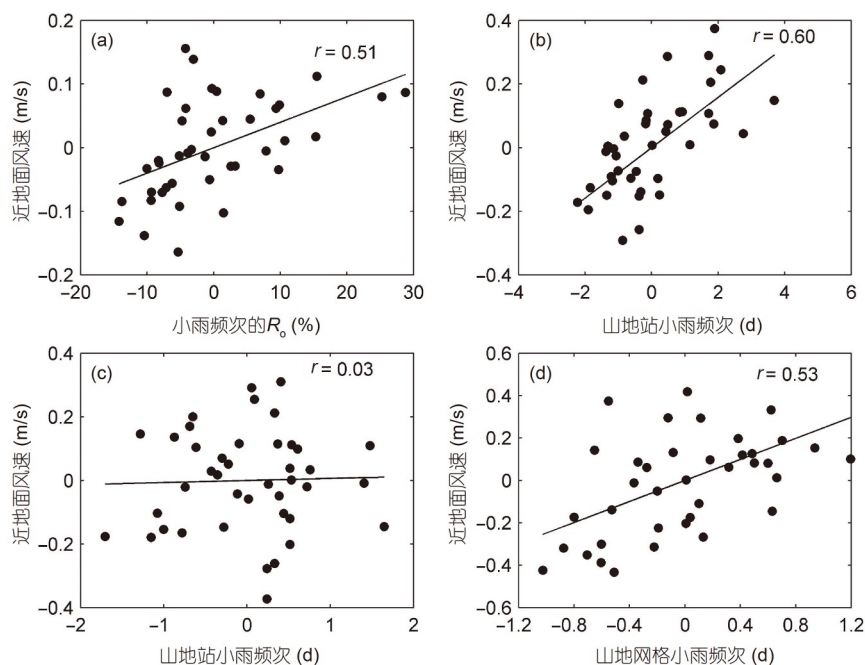
**图 3** (网络版彩色)小雨频次 R_0 与风速的关系。小雨频次的 R_0 (a)、山地站有降水而平原站无降水情况下的小雨频次(b)、山地和平原站同时有降水情况下的小雨频次(c)与近地面风速的散点图; (d) 与(b)一致, 但为ERA5-Land资料统计结果

Figure 3 (Color online) The relation between light rain frequency R_0 and wind speed. Scatter plots for near surface wind speed with the light rain R_0 (a), with the frequency of mountain light rain but without rains in plain stations (b), and with the frequency of mountain light rain with rains in plain stations (c); (d) same as (b), but for ERA5-Land

表 4 山地站小雨频次与近地面风速的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between the frequency of light rain with the near surface wind speed for mountain stations

	五台山	泰山	华山	黄山	峨眉山	庐山	南岳	井冈山	九仙山
r_1	0.33 ^{a)}	0.39 ^{b)}	0.10	0.28 ^{a)}	0.47 ^{b)}	0.32 ^{a)}	0.25	0.45 ^{b)}	0.39 ^{b)}
r_2	-0.13	0.29 ^{a)}	-0.29 ^{a)}	-0.12	0.05	-0.11	-0.20	0.15	0.01

a) $P < 0.1$; b) $P < 0.05$, r_1 为山地站有降水而平原站无降水情况下的相关系数, r_2 为山地和平原同时有降水情况下的相关系数

4 中国东部地区近地面风速的趋势转折

上一节分析表明, 山地小雨频次的地形效应与近地面风速的逐年变化有显著的正相关, 而小雨频次的 R_0 在21世纪10年代初发生了趋势转折, 这种转折是否也与风速的长期趋势变化一致? 首先, 我们检查了27个平原站平均风速的变化. 时间序列显示, 21世纪10年代初前后同样发生了线性趋势的变化. 地面风是一个高变率气象因子, 考虑到本文筛选出的平原站数量较少, 为避免局地噪音干扰, 在 $100^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$, $20^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$ 范围内挑选缺测天数少(低于总观测日数的5%)的台站, 共计527个, 计算其平均值, 以此反映中国东部地区背景风场的变化. 如图4所示, 中国东部地区夏季平均风速的趋势在21世纪10年代初发生了显著变化, 由之前的减弱($-0.10 \text{ m/s } 10\text{a}$), $P < 0.01$)变为显著增强($0.19 \text{ m/s } 10\text{a}$), $P < 0.05$). 使用滑动趋势分析方法发现, 2010年为最优转折点. 同时, 考虑到伴随夏季强天气过程通常会有短时大风, 会造成平均风速的虚高, 因此, 进一步计算了夏季非雨日风速、非大风日风速(最大风速 $\leq 17.0 \text{ m/s}$)及年平均风速的变化. 结果表明, 风速均于21世纪10年代初前后发生趋势的显著变化, 这与以往的研究结论一致, 是东亚地区夏季乃至全年普遍存在的大尺度现象^[28-31]. 可见, 就中国东部整体而言, 近地面风速的趋势变化与小雨频次 R_0 的长期变化及转折有高度一致性.

我们比较了中国东部地区1979~2019年夏季相对湿度、气温、气柱水汽量的长期趋势, 结果显示相对湿度总体呈显著下降趋势, 约为每10 a下降 -0.85% ($P < 0.01$), 气温在整个研究时间段内以 $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($P < 0.01$)的速率上升, 气柱水汽量在整个时段没有明显的趋势. 需要指出的是, 这几个因子的长期变化在整个时段都是比较平稳的, 21世纪10年代初以来的变化趋势与前一时段相比, 并没有表现出明显不同的特征. 显然, 这3个气象因子的长期变化均与小雨频次 R_0 的趋势转折缺乏一致性.

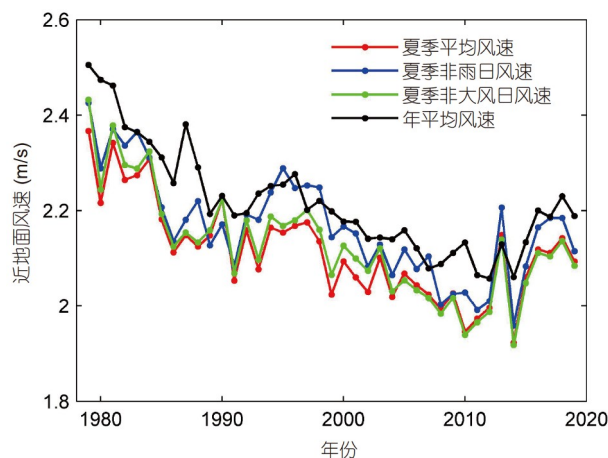


图 4 (网络版彩色)1979~2019年中国东部地区近地面风速的时间序列

Figure 4 (Color online) Time series of the near surface wind speed over eastern China during the period of 1979–2019

此外, ERA5-Land小雨频次地形效应在整个研究时段的发展趋势变化不显著, 我们进一步比较了再分析资料的近地面风速. 首先, 分析了平原网格风速与山地小雨频次 R_0 逐年波动的关系, 结果显示二者也存在正相关关系. 与台站做法一致, 为避免大尺度天气过程的干扰, 针对山地网格有降水同时平原网格无降水的情况进行讨论, 其中考虑模式降水数据普遍存在湿偏差, 根据台站降水的频次分布, 网格降水取相同的百分位值, 当网格降水 $< 1.0 \text{ mm}$ 时统计为无降水日. 如图3(d)所示, 山地网格小雨频次与风速有显著正相关关系($r = 0.53$, $P < 0.01$). 其次, 分析了ERA5-Land风速的长期变化, 结果表明中国东部地区夏季平均风速在1979~2019年间的趋势很弱, 仅为 $0.03 \text{ m/s } 10\text{a}$, 统计上不显著, 而且也没有迹象显示, 21世纪10年代初以来其趋势有任何不同的变化. 因此, ERA5-Land小雨频次 R_0 时间序列缺乏与台站相似的长期变化, 很可能与其近地面风速的偏差有直接关系. 如何改进边界层风的同化和分析技巧, 进而改善其降水地形效应的长期变化, 是一个值得进一步探讨的问题.

5 结论

基于上述分析得到以下结论.

(1) 台站观测显示, 气候态上不同等级降水都存在明显的地形效应, 而且随雨强的增加地形效应有偏强的现象. CN05.1、APHRO、WFDE5、ERA5-Land四套常用网格资料总体上能反映气候态上的降水地形效应, 其中高分辨率的ERA5-Land降水地形效应在几套网格资料中是最明显的.

(2) 所分析的9组山地站小雨频次的地形效应于21世纪10年代初发生了显著转折. 1979~2010年, 小雨频次 R_0 的线性趋势为 $-2.24\%/10a$ ($P<0.1$), 2010年之后则

转为上升趋势, 约为每10a增加34.02% ($P<0.05$). 这种趋势转折主要是山地站的变化引起的.

(3) 对相对湿度、气温、气柱水汽量、近地面风速4个气象因子的分析显示, 只有风速与小雨频次 R_0 的逐年波动有显著相关, 风速偏弱时, R_0 值偏低. 山地站存在降水同时相邻平原站无降水的情况下, 山地小雨频次与风速的相关达0.60 ($P<0.01$). 21世纪10年代初中国东部近地面风速由之前的减弱 ($-0.10\text{ m/s } 10a$), $P<0.01$)变为显著增强 ($0.19\text{ m/s } 10a$), $P<0.05$), 可能是小雨频次地形效应趋势转折的一个主要原因.

参考文献

- 1 Roe G H. Orographic precipitation. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2005, 33: 651–671
- 2 Wallace J M, Hobbs P V. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2006
- 3 Houze R A, James C N, Medina S. Radar observations of precipitation and airflow on the Mediterranean side of the Alps: Autumn 1998 and 1999. *Q J R Meteorol Soc*, 2001, 127: 2537–2558
- 4 Chen C S, Lin Y L, Zeng H T, et al. Orographic effects on heavy rainfall events over northeastern Taiwan during the northeasterly monsoon season. *Atmos Res*, 2013, 122: 310–335
- 5 Mapes B E, Warner T T, Xu M. Diurnal patterns of rainfall in northwestern South America. Part III: Diurnal gravity waves and nocturnal convection offshore. *Mon Weather Rev*, 2003, 131: 830–844
- 6 Houze R A. Orographic effects on precipitation clouds. *Rev Geophys*, 2012, 50: RG1001
- 7 Bergeron T. On the low-level redistribution of atmospheric water caused by orography. In: *The International Cloud Physics Conference*. 1965. 96–100
- 8 Lee J T, Ko K Y, Lee D I, et al. Enhancement of orographic precipitation in Jeju Island during the passage of Typhoon Khanun (2012). *Atmos Res*, 2018, 201: 58–71
- 9 Yang X, Ferrat M, Li Z. New evidence of orographic precipitation suppression by aerosols in central China. *Meteorol Atmos Phys*, 2013, 119: 17–29
- 10 Guo J, Deng M, Fan J, et al. Precipitation and air pollution at mountain and plain stations in northern China: Insights gained from observations and modeling. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119: 4793–4807
- 11 Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *J Atmos Sci*, 1977, 34: 1149–1152
- 12 Lynn B, Khain A, Rosenfeld D, et al. Effects of aerosols on precipitation from orographic clouds. *J Geophys Res*, 2007, 112: D10225
- 13 Qian Y, Gong D, Fan J, et al. Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and Modeling. *J Geophys Res*, 2009, 114: D00K02
- 14 Fan J, Leung L R, Rosenfeld D, et al. Microphysical effects determine macrophysical response for aerosol impacts on deep convective clouds. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: E4581–E4590
- 15 Givati A, Rosenfeld D. Quantifying precipitation suppression due to air pollution. *J Appl Meteorol*, 2004, 43: 1038–1056
- 16 Griffith D A, Solak M E, Yorty D P. Is air pollution impacting winter orographic precipitation in Utah? *J Weather Modificat*, 2005, 37: 14–20
- 17 Rosenfeld D, Givati A. Evidence of orographic precipitation suppression by air pollution-induced aerosols in the western United States. *J Appl Meteorol Climatol*, 2006, 45: 893–911
- 18 Rosenfeld D, Dai J, Yu X, et al. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation. *Science*, 2007, 315: 1396–1398
- 19 Dai J, Yu X, Rosenfeld D, et al. The suppression of aerosols to the orographic precipitation in the Qinling Mountains (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2008, 32: 1319–1332 [戴进, 余兴, Rosenfeld D, 等. 秦岭地区气溶胶对地形云降水的抑制作用. *大气科学*, 2008, 32: 1319–1332]
- 20 Yang H B, Yang D W, Lei Z D. Impact of decreasing orographic precipitation on water resources in Wutai Mountain region, China (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2010, 5: 674–680 [杨汉波, 杨大文, 雷志栋. 五台山区地形雨减少对水资源的影响. *水科学进展*, 2010, 5: 674–680]
- 21 Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst Sci Data*, 2021, 13: 434–4383

- 22 Cucchi M, Weedon G P, Amici A, et al. WFDE5: Bias-adjusted ERA5 reanalysis data for impact studies. [Earth Syst Sci Data](#), 2020, 12: 2097–2120
- 23 Wu J, Gao X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 1102–1111 [吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比. *地球物理学报*, 2013, 56: 1102–1111]
- 24 Yatagai A, Arakawa O, Kamiguchi K, et al. A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. [SOLA](#), 2009, 5: 137–140
- 25 Alpert P, Halfon N, Levin Z. Does air pollution really suppress precipitation in Israel? [J Appl Meteorol Climatol](#), 2008, 47: 933–943
- 26 Wu J, Zhang L, Zhao D, et al. Impacts of warming and water vapor content on the decrease in light rain days during the warm season over eastern China. [Clim Dyn](#), 2015, 45: 1841–1857
- 27 Yang J, Gong D Y. Intensified reduction in summertime light rainfall over mountains compared with plains in eastern China. [Clim Change](#), 2010, 100: 807–815
- 28 Zeng Z, Ziegler A D, Searchinger T, et al. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nat Clim Chang*, 2019, 9: 979–985
- 29 Zhang Z, Wang K. Stilling and recovery of the surface wind speed based on observation, reanalysis, and geostrophic wind theory over China from 1960 to 2017. *J Clim*, 2020, 33: 3989–4008
- 30 Wu J, Zha J, Zhao D, et al. Changes of wind speed at different heights over eastern China during 1980–2011. [Int J Climatol](#), 2018, 38: 4476–4495
- 31 Azorin-Molina C, Dunn R, Ricciardulli L, et al. Land and ocean surface winds [in “State of the climate in 2019”]. *Bull Am Meteorol Soc*, 2020, 101: S63–S65

Summary for “21世纪10年代初中国东部夏季小雨频次地形效应的趋势转折”

Enhancement of the orographic effect in summer light rains over eastern China since the early 2010s

Xuechen Dong^{1,2}, Daoyi Gong^{1,2*} & Ziqing Wang^{1,2}¹ Academy of Disaster Risk Science, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;² State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China* Corresponding author, E-mail: gdy@bnu.edu.cn

In this study, the long-term changes of the precipitation orographic effect were investigated by comparing daily precipitation records for 9 mountain stations with those for 27 nearby plain stations over eastern China during summer from 1979–2019. Given a parameter of interest, e.g., the number of rainy days or precipitation amount, its orographic effect is estimated as the standardized difference between mountain and plain stations. Climatological statistics over the entire data period show evident orographic effects for all analyzed precipitation categories, including the light, moderate, heavy, and torrential rain. And their orographic effects tend to be stronger with the increase of rainfall intensity. Their long-term changes, however, experienced different characteristics. The orographic effect for moderate, heavy, and torrential rain shows no evident change in trends. In contrast, the orographic effect for light rain frequency showed a trend reversing in the early 2010s. Its linear trend is $-2.24\%/10a$ ($P<0.1$) during 1979–2010 but becomes $+34.02\%/10a$ ($P<0.05$) during 2011–2019. Such change results mainly from the long-term changes in mountain rainfall. Furthermore, the co-variations in meteorological factors were explored. It was found that the year-to-year variations in the orographic effect of light rain frequency was significantly related to the near surface wind speed ($r=0.51$, $P<0.01$). Meanwhile, the orographic effect shows no evident relation with relative humidity, air temperature, and the total column water vapor though these factors are closely related to the mountain light rain frequency. Note that large-scale weather systems would lead to concurrent precipitation at mountain and nearby plain stations; in this case, the possible influence of wind would be hard to identify. If count only the mountain station's rainy days which co-occur with no-rain nearby plain stations, the influence of large-scale weather system would hopefully be excluded. The mountain-only light rain frequency shows a more robust positive correlation with surface wind speed ($r=0.60$, $P<0.01$). Station observation shows that the trend of near surface wind speed has also changed in the early 2010s, with a weakening trend of $-0.10\text{ m/(s }10a)$ ($P<0.01$) during 1979–2010 and a strengthening trend of $+0.19\text{ m/(s }10a)$ ($P<0.05$) during 2011–2019. This implies that the near surface wind speed likely plays a key role in the enhancement of the orographic effect since the early 2010s over eastern China. In addition, the orographic effects in four gridded precipitation datasets with different resolution, including the CN05.1, APHRO, WFDE5 and ERA5-Land, were compared. Generally, the presence of the orographic effect is clear for light, moderate, heavy, and torrential rains in these datasets. And the orographic effect for ERA5-Land datasets, which is of the highest resolution, was the most outstanding one among four datasets. Note that the orographic effect of light rain frequency in ERA5-Land did not show any trend reversing during the entire data period. On the other hand, there is a consistent and significant relationship between near surface wind speed and the frequency of mountain grid light rain which co-occur with no-rain nearby plain grids ($r=0.53$, $P<0.01$). However, the near surface wind in ERA5-Land shows no evident trend from 1979 to 2019. This bias is very likely responsible for the lack of long-term trend in orographic effect. It is a challenge to improve the assimilation and analysis skills of the boundary layer wind.

orographic effect, the frequency of light rain, impact factor, near surface wind speed, trend transitiondoi: [10.1360/TB-2021-0736](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0736)