

地形对超强台风罗莎降水影响的初步分析

黄奕武^{1,2} 端义宏³ 余 晖²

(1. 中国气象科学研究院,北京 100081; 2. 中国气象局上海台风研究所,
中国气象局台风预报技术重点开放实验室; 3. 国家气象中心)

提 要: 为了进一步加深地形对台风降水影响的细节了解,用变分法合成的高分辨率降水资料和地形资料,结合日本再分析资料,对0716号台风罗莎登陆期间地形对降水的影响作了初步分析。过程降水量与地形相关分析表明,沿海地形对降水的影响较大。强降水区主要分布在沿海山体的迎风坡上。分析1小时降水量在不同强度区间的频次分布,发现在山体地形的影响下,山脉区域降水加强。浙江东南沿岸的山体引起的降水增益相对东北沿岸区域的山体偏大。利用日本再分析资料和地形资料计算了气流过沿海山体时的无量纲数 Fr 值。由于气流 Fr 较小,气流过浙江沿海地形时更容易翻越山体。抬升位置发生在迎风坡上,因而强降水区也落在迎风坡上。东南沿岸区域的地形对迎风气流的强迫垂直运动在垂直方向上的渗透比东北沿岸区域更深厚,这是导致东南沿岸区域地形对降水增益比东北沿岸区域偏大的原因。

关键词: 超强台风罗莎 地形 强降水过程 无量纲数 Fr

A Study of the Impact of Terrain on the Precipitation of "KROSA"

Huang Yiwu^{1,2} Duan Yihong³ Yu Hui²

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 2. Laboratory of Typhoon Forecast Technique,
Shanghai Typhoon Institute of CMA; 3. National Meteorological Center)

Abstract: The impact of terrain on the precipitation during the landfall of "KROSA" (0716) was analyzed with reanalysis data of JMA, topography data and the high resolution rain data generated by the variation method. The correlation coefficient between total precipitation and topography indicated that the terrain over Zhejiang largely affected the precipitation. The peak rainfall is located mainly on the windward hillsides. The distribution of frequency of different precipitation ranks showed that the relatively stronger precipitation happened in

资助课题: 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421500, 国家科技部科研院所社会公益研究专项 2005DIB3J104, 国家自然科学基金项目: 40730948

收稿日期: 2009年5月4日; 修定稿日期: 2009年7月15日

the topographic regions. The rain gains caused by the mountains along the southeastern coast of Zhejiang were more than those caused by mountains along northeastern coast. With the reanalysis data of JMA, the nondimensional number of flow crossing the topography was counted. As the value of Fr was small in this case, the air could flow over the hills more easily. The forced upward motion occurred windward in association with the heavy precipitation. The forced vertical velocity penetrated more deeply in southeastern coast than in northeastern coast, which might be the reason that the rain gains in southeastern coast were more than in northeastern coast.

Key Words: super typhoon “KROSA” terrain heavy rainfall non-dimensional number Fr

引 言

地形对台风强降水的影响一直是人们关注的议题。钮学新等^[1]统计华东地区登陆台风暴雨时发现迎风坡强迫抬升可使台风降水明显增加。冀春晓等^[2]用 MM5 模式对 0414 号台风 Rananim 登陆期间的降水进行了模拟,设计了有、无地形的试验方案,两种方案导致的降水量差绝对值可达 200mm 以上。钮学新等^[3]用 MM5 模式对 0216 号台风进行了模拟,对比有无地形实验的 24h 预报结果,发现地形使雨量增加 1/3 左右,背风一侧则偏少 1/3 左右。蔡英群等^[4]对 0414 号台风的诊断分析结果也表明,地形抬升作用和喇叭口地形对该台风在闽东南造成的暴雨分布也有很大影响。黄克慧^[5]在分析“云娜”台风降水时发现水汽输送与山脉的正交有利于降水增幅。姚蓉等^[6]在分析“碧利斯”暴雨山洪成因时也指出湘东南地形对暴雨形成的重要作用。何立富等^[7]亦发现在 0513 号台风泰利异常强暴雨过程中地形的抬升对暴雨增幅有明显作用。类似的研究还有许多^[8-9]。以上研究从大尺度方面给出了地形影响的效应。骆荣宗^[10]对 9012 号台风降水进行了诊断分析,指出了地形对降水的两种作用:一是半环形地形和狭谷地带对边界层气流有明显的辐合抬升作用,降水系统可以在该地形发生发展、停滞;二是气流碰到高山产生分支和

汇合现象,在汇合地区派生出地形性准定常的中小尺度天气系统。Pierrhumbert 等^[11]用理想模型研究山脉对气流的影响,发现山脉可在其迎风侧一定距离产生“死水区”,使气流的抬升位于山脉上游,距离与无量纲数 Fr 、 Ro 有关。王晓芳等^[12]利用这一模型对“碧利斯”在罗霄山脉上游产生的暴雨情形进行了估算,实况与理论推断结果基本一致。但 Yu 等^[13]对台风 Xangsane(2000)的观测分析显示,台风经过台湾北部时在大屯山、南港—基隆山脉产生的强降水中心位于迎风坡上甚至山顶邻域。由此可见,地形对台风强降水影响比较复杂,细节方面不同个例存在很大差异,许多观测方面的差异仍需要进一步作机理分析。

地形对气流影响的研究在非台风领域已有一些系统的成果。Smith^[14]指出,当无量纲数 $Fr = hN/U > 1$ 时气流倾向于绕过山体,反之则倾向于翻越山体。这些成果在台风领域的应用并不多见。在研究地形对台风降水影响时引入这方面的成果有积极的意义。

地形对台风强降水影响的细节需要用到高分辨率的观测资料。利用变分的方法^[15]将地面加密观测降水资料与雷达反演的降水结合得到的新资料可以满足这一要求。另一方面,0716 号台风罗莎的降水分布具有典型的地形影响特征。这里将利用新的高分辨率降水资料,对“罗莎”台风降水的地形影响

进行初步分析,并借鉴 Smith 的方法分析其机理,进一步加深地形对台风降水影响的认识。

1 “罗莎”简介

“罗莎”(0716)是2007年影响华东沿海的最严重的台风之一。该台风于10月2日00时(世界时,下同)在菲律宾吕宋岛以东洋面生成;6日08时在台湾登陆,期间在台湾南落打转长达7小时;7日07时30分左右,“罗莎”在浙闽交界处登陆,8日10时进入东海,8日15时减弱并停止编号(图1a)。“罗莎”于4日18时加强为超强台风,登陆台湾时减弱为强台风,在浙闽交界处登陆时中心附近最大风力仍有12级(图1b)。此次台风强度大,减弱速度慢,移动速度慢,从登陆至减弱停编维持了32小时,为历史同期少见。在“罗莎”影响期间,福建北部、浙江大部出现了暴雨、大暴雨,局部甚至特大暴雨。杭州城遭遇40年一遇的内涝,7日12时至8日12时日降水量达191.3mm。

2 “罗莎”过程降水量与地形分布关系

图2a是用1小时一次的地面加密观测资料^①分析得到的6日09时至8日14时“罗莎”的过程降水量,地面站点平均间距为13km。图2b与图2a相同,但所用资料为地面加密观测资料与雷达反演降水通过变分法^[15]合成的降水资料^②。对比两图,由变分法合成的降水资料很好地保留了观测资料的真实性,同时融合了雷达资料连续、高分辨率的优点,对降水的分布细节表现得更好。观

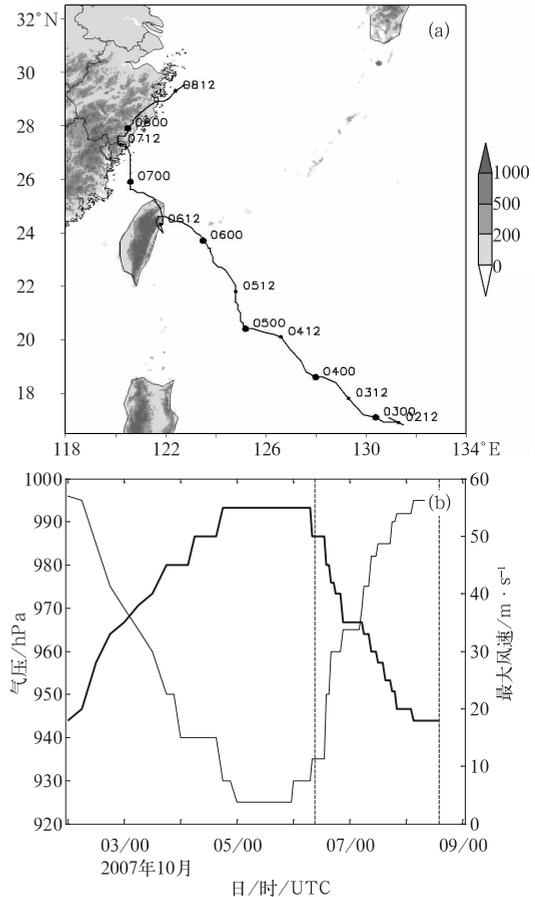


图1 “罗莎”路径(a,阴影为地形高度)、强度(b,粗线为最大风速,细线为中心气压,虚线所标区间为研究时间段)

察图2b中的降水分布,“罗莎”登陆过程降水量分布表现出明显的空间不均匀。主要降水中心集中在浙江沿海一带,大部分位于登陆点右侧,与浙江沿海复杂的地形^③(图3)相匹配。沿海山区降水达300mm,而山区背风一侧及迎风坡前侧的降水呈急剧减少的态势。这种对比体现了沿海地区复杂地形对降水的显著增幅作用和对对流系统传播的阻碍作用。

① 地面加密观测资料由浙江省气象台和国家气象中心提供。

② 地面加密观测与雷达反演降水变分合成的降水资料由中国气象局上海台风研究所提供,分辨率为 0.01° 。

③ 地形资料来源于LAPS地形数据,分辨率为 $30''$ 。

为考察地形与过程降水量的相关性,将分辨率为 $30''$ (约 0.0083°) 的地形资料双线性插值到 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 的格点上,与降水资料形成一一对应的关系。选取四个大小不同的区域(见图 2b、图 3 方框所示),L 区覆盖了过程降水量在 25mm 以上的主要区域;M 区覆盖了沿海主要强降水区;S1、S2 区的选取尽量避开背风区的影响。若区域内格点数为 M ,以 X_i 代表格点降水值, Y_i 代表格点地形高度,根据公式:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^M (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

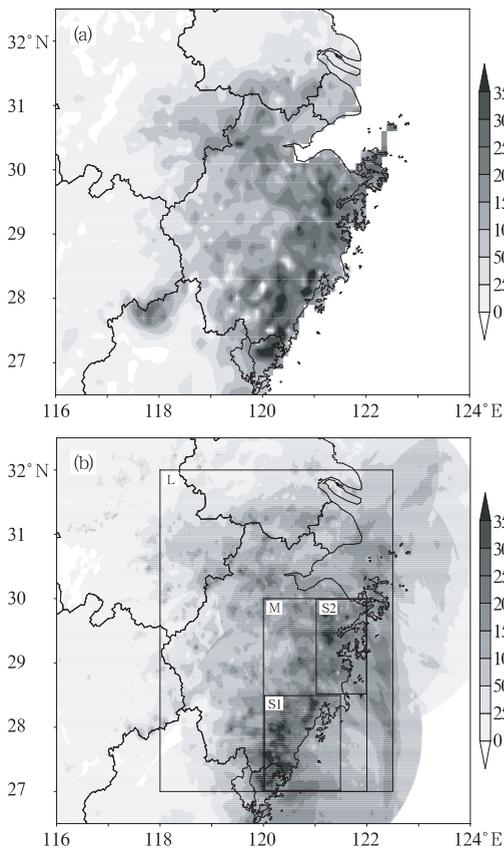


图 2 6 日 09 时至 8 日 14 时“罗莎”的过程降水量(单位: mm)

(a) 地面加密观测资料; (b) 通过变分法合成的降水资料

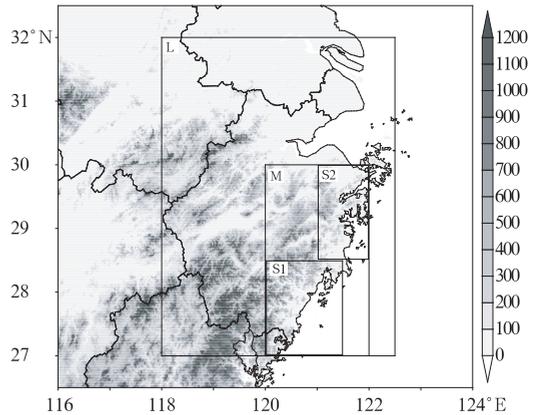


图 3 浙江地区的地形分布(单位: mm)

求出四个区域对应的地形高度与过程降水量的相关系数,其结果见表 1,各相关系数都通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。在较小的 M、S1、S2 区,地形高度、地形梯度与过程降水量呈现强烈的正相关,这表明该区域的降水大值区确实是由地形增水效应产生的结果;而另一方面,在较大的 L 区域,相关系数变为负值,这实际上反映了沿海地形对降水系统传播的阻碍作用。这种阻碍作用使得沿海地形背风一侧降水偏少,但背风一侧存在山区地形且高度与沿海地形相当,这时 L 区中大面积的背风降水与地形关系对相关系数的贡献其实是负的。

进一步对比 S1、S2 区地形与强降水区(过程降水量 $\geq 300\text{mm}$) 的相对位置(见图 4)发现,强降水区主要分布在山体的迎风坡上,降水极值中心位于迎风坡或山顶附近。

对 6 日 09 时至 8 日 14 时共 54 个时次的降水量按强度分四个等级进行频次分析。第一个等级为 $0 \sim 2\text{mm/h}$;第二个等级为 $2 \sim 5\text{mm/h}$;第三个等级为 $5 \sim 10\text{mm/h}$;第四个等级为 $>10\text{mm/h}$ 。在 54 个时次中,这 4 个强度等级的降水量出现频次百分比分布见图 5。由图可见,第一个等级上的降水出现频次分布与图 2b 中的过程降水量分布结构相似但相位相反,这说明在沿海地形的影响

表1 地形高度与过程降水量的相关系数

区域	L	M	S1	S2
	27°~32°N, 118°~122.5°E	27°~30°N, 120°~122°E	27°~28.5°N, 120°~121.5°E	28.5°~30°N, 121°~122°E
相关系数	-0.020	0.430	0.552	0.496
样本数	225951	60501	22801	15251

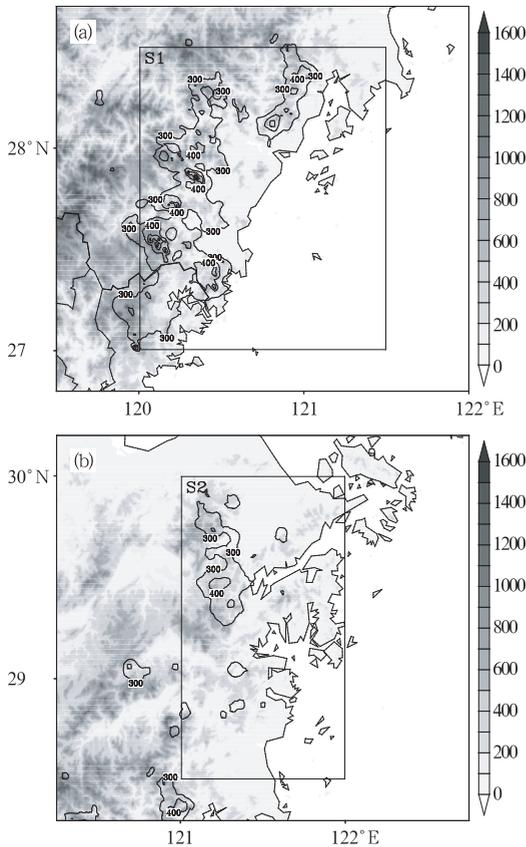


图4 S1(a)、S2(b)区域的地形分布(阴影,单位:m)与强降水区(等值线,间隔100mm)的相对位置

下,沿海的降水强度增加,频次向高强度降水转移。第二个等级的降水频次分布较为均衡。第三等级的降水频次与图2b分布相似,沿海岸高频区有向山脉地区集中的现象。但这种现象在第四等级降水的频次分布上仅S1区域较为明显。这4个等级的降水频次分布与地形在L、M、S1、S2区域上的相关系数见表2。表2中所有相关系数值都通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。由表2可见,由于第一等级降水的频次分布与累积降水量分布

几乎反相,在M、S1、S2区域上,地形与频次分布呈现为负相关性,且相关系数绝对值与表1中对应区域的相关系数绝对值相近。尽管图5b中显示的第二等级降水的频次分布相对均衡,但与地形的相关性在4个区域上都表现为正值,其中L、S1区的正相关性较小。而第三、第四等级降水的频次分布与地形的正相关性主要体现在M、S1、S2区,以S1区的正相关性最为显著。尽管第二等级降水的频次与地形的正相关性在L区域并不显著,但对比L区域上其他等级降水的频次相关系数绝对值,该值显得相当突出,这说明地形的影响即使在较大的L区域范围内也是普遍存在的,但由于背风影响的关系,这种影响的信号仅局限在较小的强度区间上。在累积降水中,由于降水的时间、强度变化信息被累加,许多信号会被掩盖,因而L区域上的地形影响信号在累积降水量与地形关系中没有得到体现,另一方面,在M、S2区域上,第二、三、四等级降水的频次与地形相关系数差别不大;但在S1区域上,第三、四等级的相关系数与第二等级有较大差别。这说明S1区域上的地形影响信号主要集中在较强降水(如:1小时降水量 $\geq 5\text{mm}$ 的降水)的频次分布上。这可以解释为S1区域上的地形对降水的增益比其他区域的地形增益大。

3 地形影响的机理分析

王晓芳等^[12]用Pierrhumbert等^[11]的地形阻滞模型分析了“碧利斯”在罗霄山脉迎风前侧平原地区引起的强降水,认为地形强迫上升及其对暴雨的触发主要不在山坡上,而

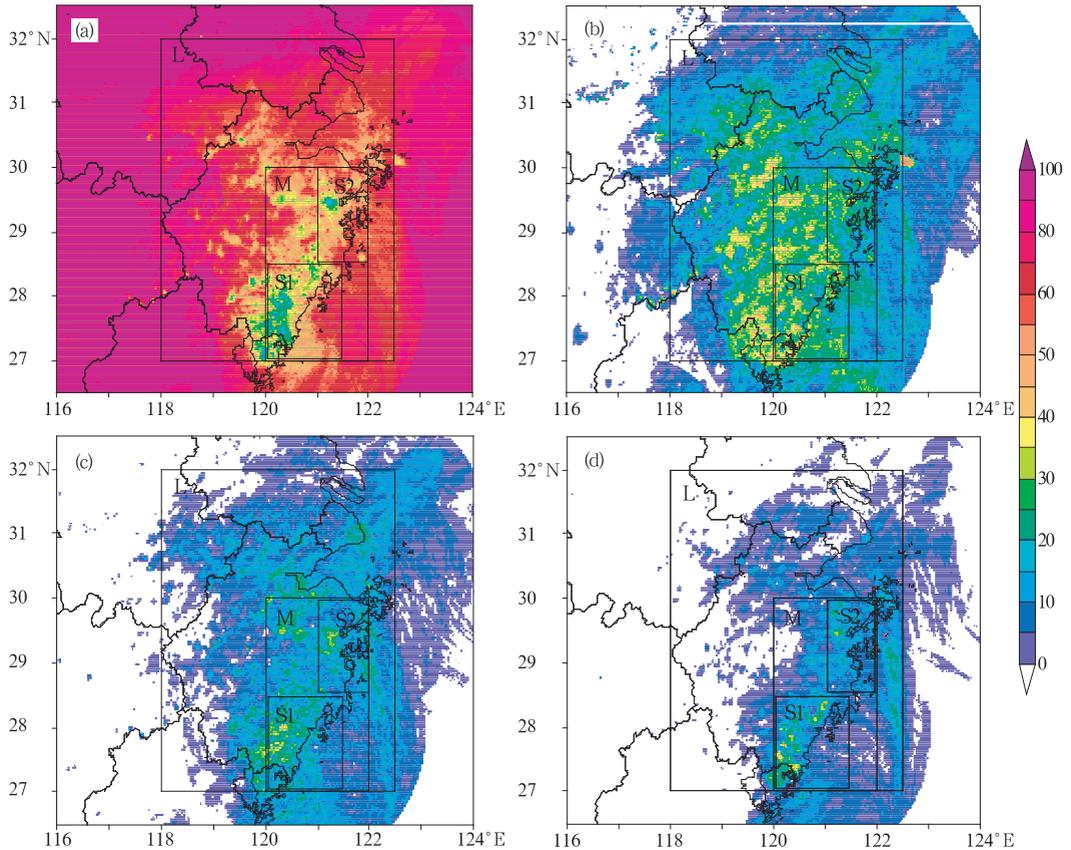


图5 不同降水强度等级出现的频次百分比(%)

(a) 0~2mm; (b) 2~5mm; (c) 5~10mm; (d) >10mm

表2 地形高度与各等级降水频次的相关系数

区域	L	M	SI	S2
	27°~32°N, 118°~122.5°E	27°~30°N, 120°~122°E	27°~28.5°N, 120°~121.5°E	28.5°~30°N, 121°~122°E
第一等级(0~2mm/h)	-0.034	-0.497	-0.527	-0.559
第二等级(2~5mm/h)	0.157	0.320	0.131	0.351
第三等级(5~10mm/h)	-0.063	0.357	0.401	0.279
第四等级(≥10mm/h)	-0.072	0.325	0.488	0.352

是在迎风坡气流上游平原地区,实况与理论估算和推断结果一致。而在本例中,降水极值偏向于分布在山顶或迎风坡上,与前者分析的现象有一定差异。

根据 Smith^[14]的地形影响气流理论,当无量纲数:

$$Fr = hN/U > 1 \quad (2)$$

时,气流倾向于绕过山体,反之则倾向于翻越

山体。式中 h 为山体垂直高度, N 为层结稳定度 ($N = \sqrt{(g/\theta)(\partial\theta/\partial z)}$), U 为气流平均速度。当 Fr 值大于 1.3 时,在山体迎风区一侧可形成死水区,与 Pierrhumbert 等^[11]的研究结果有相似之处。事实上在文献[11]中, Pierrhumbert 的理想模型都是建立在 $Fr \geq 2$ 的基础上。当气流在 Fr 值较低的状态下过山体时,气流很容易翻越山体,此时死水

区将很难形成,气流的抬升发生在迎风坡上而不是迎风坡上游平原。另一方面,气流翻越山体时,在其迎风坡一侧会产生垂直上升运动,这种垂直运动可向上延伸一定高度,延伸的高度与气流的水平速度 U 和稳定度 N 有关,Smith 给出了静力流下的简单估计式:

$$z = U/N \quad (3)$$

表3 S1 迎风区稳定度 N 、迎风风速 U 及 Fr 、 z 值

	稳定度 N/s^{-1}	迎风风速 $U/m \cdot s^{-1}$	$Fr=Nh/U$	$z=U/N$ /m
6日12时	1.12×10^{-2}	12.84	0.70	1141.66
6日18时	1.18×10^{-2}	18.10	0.52	1528.63
7日00时	1.16×10^{-2}	23.78	0.39	2052.84
三个时次平均	1.16×10^{-2}	18.24	0.54	1574.38

表4 S2 迎风区稳定度 N 、迎风风速 U 及 Fr 、 z 值

	稳定度 N/s^{-1}	迎风风速 $U/m \cdot s^{-1}$	$Fr=Nh/U$	$z=U/N$ /m
6日12时	1.18×10^{-2}	12.36	0.57	1046.25
6日18时	1.14×10^{-2}	14.66	0.47	1281.52
7日00时	1.15×10^{-2}	16.79	0.41	1466.20
三个时次平均	1.16×10^{-2}	18.24	0.48	1264.66

选取6日12时、18时和7日00时三个时刻日本再分析资料(分辨率为20km)对S1、S2区域的 Fr 值进行计算。7日00时距台风登陆还有7小时,在所选的三个时刻,S1、S2区域离台风中心较远,风向相对稳定。S1区上的山体山顶高度为800~1000m,多数山顶在800m左右,取 $h_{S1} = 800m$; S2区的山体山顶高度为600m左右,取 $h_{S2} = 600m$ 。以S1、S2的右半部分区域分别作为这两个区域山体的迎风区,以浙江海岸线走向作为山体走向(方位角约为 29°),求出迎风区上稳定度 N 、迎风风速(即风速垂直山脉分量) U 在各时次的1000~900hPa区域平均值见表3、表4。由表可见两个区域各个时次的 Fr 值都小于1,因而气流较容易翻越这两个区域上的山体,抬升发生在迎风坡上,降水增益也发生在迎风坡上。而在王晓芳等^[12]研究的实例中,估算的 Fr 值为2.44,气流的抬

升发生在死水区前沿,与本例的地形影响的方式有所不同,从而导致强降水中心与山体相对位置存在差异。另一方面,S1区的垂直运动延伸高度在各个时刻均比S2区高,加上S1区山体的固有高度比S2区高,两者叠加,使得地形对气流的强迫垂直运动在S1区渗透到更高的高度,从而为S1区的降水增益偏大提供了合理的解释。

4 结论

用由地面加密观测资料和雷达反演降水通过变分法合成的高分辨率降水资料,与高分辨率的地形资料作了相关性分析。根据Smith^[14]的地形影响气流理论对相关性分析的结果作机理分析。

(1) 沿海地区过程降水量与地形呈显著的正相关。沿海地形对降水的影响最大。强降水区(过程降水量 $\geq 300mm$)主要分布在沿海山体的迎风坡上。

(2) 对各时次的降水量按不同强度等级分别分析其频次分布。在山地地形的影响下,山脉区域降水频次向强度较大的区间转移。尽管浙江内陆地区受沿海地形产生的背风气流影响,但其地形影响的信号仍存在于较低强度降水的频次上。地形对降水的增益有很大差别,浙江东南沿岸的山体引起的降水增益相对其他区域的山体偏大。

(3) 由于气流无量纲数 $Fr=hN/U$ 的差异,导致本例台风的强降水中心位置与“碧利斯”在罗霄山脉的强降水位置有所差异。在本例中, Fr 值较小,气流过浙江沿海地形时更容易翻越山体,不易形成死水区,抬升位置发生在迎风坡上,因而强降水区也落在迎风坡上。

(4) S1区的地形对迎风气流的强迫垂直运动在垂直方向上的渗透比S2区域更深厚,是导致S1区域地形对降水增益比S2区

偏大的原因。

参考文献

- [1] 钮学新,董加斌,杜惠良. 华东地区台风降水及影响降水因素的气候分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(3): 402-407.
- [2] 冀春晓,薛根元,赵放,等. 台风 Rananim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 233-244.
- [3] 钮学新,杜惠良,刘建勇. 0216 号台风降水及影响降水机制的数值模拟试验[J]. 气象学报, 2005, 63(1): 57-68.
- [4] 蔡英群,黄岩彬,江善赐,等. 台风登陆后引发的闽东内陆暴雨分析[J]. 气象科技, 2004, 32(增刊): 29-32.
- [5] 黄克慧. 台风云娜后部强降水分析[J]. 气象, 2006, 32(2): 98-103.
- [6] 姚蓉,黎祖贤,叶成志,等. 强热带风暴碧利斯特大暴雨山洪成因分析[J]. 气象, 2007, 33(8): 40-46.
- [7] 何立富,梁生俊,毛卫星,等. 0513 号台风泰利异常强暴雨过程的分析[J]. 气象, 2006, 32(4): 84-90.
- [8] 蔡则怡,宇如聪. LASG η 坐标有限区域数值预报模式对一次登陆台风特大暴雨的数值试验[J]. 大气科学, 1997, 21(4): 459-471.
- [9] 林毅,刘铭,刘爱鸣,等. 台风龙王中尺度暴雨成因分析[J]. 气象, 2007, 33(2): 22-28.
- [10] 骆荣宗. 9012 号台风中尺度螺旋雨带与暴雨的观测分析[J]. 热带气象学报, 1997, 13: 173-179.
- [11] Pierrhumbert R T, Wyman B. Upstream effects of mesoscale mountains[J]. J Atmos Sci, 1985, 42: 977-1003.
- [12] 王晓芳,胡伯威. 地形对 0604 号“碧利斯”登陆台风暴雨的影响[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(2): 97-102.
- [13] Yu Cheng-Ku and Cheng Lin-Wen. 2008. Radar observations of intense orographic precipitation associated with typhoon Xangsane[J]. Mon Wea Rev, 126, 497-521.
- [14] Ronald B. Smith. Progress on the theory of orographic precipitation. Tectonics, Climate, and Landscape Evolution(M); Geological Society of America Special Paper 398, Penrose Conference Series, P. 1-16, doi: 10.1130/2006.2398(01).
- [15] 傅德胜,戴铁丕. 变分法在校准天气雷达测定区域降水量中的应用[J]. 南京气象学院学报, 1990, 13(4): 598-603.