

莫拉克台风暴雨移置香港地区的 PMP 分析研究

张叶晖, 陈宏, 兰平

(南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

摘要:基于台湾 66 个站点年最大日雨量历史资料、台湾中央气象局 2009 年 8 月 8~10 日莫拉克台风暴雨期间 251 个台湾雨量站逐时降雨资料和香港地区 65 个雨量站的历史逐时降雨资料, 以及与香港相邻的 3 个广东省雨量站(西沥站、横岗站和深圳站)资料, 利用分时段地形增强因子法(SDOIF), 将莫拉克台风暴雨最大 24h 实测暴雨中的辐合雨分量分割, 并将其辐合雨成分移置到香港地区, 与香港地区 24h 平均地形增强因子相结合, 估算出香港地区的可能最大降水。结果显示, 莫拉克最大 24h 降雨量中地形的增强幅度约为 45%; 得出香港地区最大 24h 平均可能最大降水分布图, 其最大中心值 1230.2 mm(未考虑水汽放大), 与香港地区历史暴雨中心一致, 均发生在大帽山附近。

关键词:暴雨分割; 地形增强因子; 辐合雨; 暴雨移置; 最大可能降水

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2014)05-0025-06

1 引言

2009 年 8 月, 莫拉克(Morakot)台风带来的大量降雨集中在台湾南部嘉义及高雄山区, 共有 15 个雨量站的累积雨量超过 2000mm, 其中以阿里山站的累积雨量(8 月 5~10 日)达 2884mm 为最高; 阿里山站的 48h 最大雨量更高达 2361mm, 打破台湾的雨量纪录, 较长时段(如 24~72h)的降雨甚至与世界纪录相差不大^[1-3]。长历时且超量的极端降雨, 造成世纪大灾难, 也使我国东南沿海的防洪面临严峻的局面。本文试图运用水文气象途径暴雨分割技术^[4-6], 得出莫拉克台风暴雨移置到香港地区的最大 24hPMP 的空间分布。

早在 1988 年, 林炳章^[4]指出, 在山区暴雨移置中最难处理的是暴雨分割, 即将山区暴雨分割成两部分: 由大气运动所形成的辐合雨分量和由地形影响产生的地形雨分量, 后者是不能移置的, 前者可以移置到比较广大的一个范围内; 文中以海南岛昌化江大广坝流域为例, 提出了分时段地形增强因子法(Step-Duration-Orographic-Intensification-Factor Method, SDOIF)在山区 PMP 估算中的应用, 成功地解决了山

岳地区的暴雨移置问题。后来, 该法被 WMO 收录于第三版的 PMP 估算手册 (“Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation”, WMO NO-1045, Geneva, 2009)^[5]中。

本文利用此方法, 基于台湾地形特点、多站点年最大日雨量历史资料以及莫拉克台风暴雨的天气形势分析, 推求出台湾地区针对 2009 年莫拉克台风暴雨的当地 24h 的平均地形增强因子分布, 即地形雨分量; 进而将莫拉克台风暴雨最大 24h 实测暴雨中的辐合雨分量分割出来, 这个辐合雨分量可以在较大范围内进行移置; 然后将其辐合雨成分移置到设计地区, 与设计地区的地形雨分量结合。本文以香港地区为例, 将莫拉克台风暴雨最大 24h 辐合雨分量与香港地区 24h 平均地形增强因子相结合, 从而估算出香港地区的可能最大降水。

2 资料与方法

2.1 资料介绍

本文用到的数据有典型暴雨观测数据和地区历史降雨数据。

对于典型暴雨观测数据, 本文主要运用 2009 年 8

收稿日期: 2013-12-12

基金项目: 香港 PMP 项目《PMP Updating Study》; 水利部公益性行业专项经费基金资助项目(20111033)

作者简介: 张叶晖(1983-), 女, 湖北蕲春人, 博士, 讲师, 研究方向为大气科学。E-mail: zhangyehui@gmail.com

月8~10日台湾地区莫拉克台风期间的逐时降雨资料。数据来源为台湾中央气象局的251个雨量站逐时降雨资料。地区历史降雨数据由两部分组成:其一是香港地区65个雨量站的历史逐时降雨资料与与香港相邻的3个广东省雨量站(西沥站、横岗站和深圳站)资料,每个站点拥有的历史资料长度不等(18~39a);其二是台湾地区66个雨量站的年最大日雨量历史资料,其中最短数据资料为19a,而最长的数据资料为60a。图1为历史资料站点分布情况。

2.2 研究方法

本文依据林炳章^[4]提出的分时段地形增强因子法,进行暴雨分割和移置,其原理简述如下。

对于某一场暴雨,流域内任一点、任一时刻的降雨强度,可定义为,

$$I(x,y,t)=I_0(x,y,t)\times f(x,y,t) \quad (1)$$

式中: $I_0(x,y,t)$ 为没有地形影响时的降雨强度,即辐合降雨强度; $f(x,y,t)$ 为地形增强因子。这两个变量均视为随机变量。

Δt 时段内的平均降雨强度定义为,

$$I_{\Delta t}(x,y)=I_{0\Delta t}(x,y)\times f_{\Delta t}(x,y) \quad (2)$$

式中: $I_{0\Delta t}(x,y)$ 和 $f_{\Delta t}(x,y)$ 分别是 Δt 时段内辐合雨的平均雨强和平均地形增强因子。因此,时段流域内某空间点 (x,y) 的降雨量为,

$$r_{\Delta t}(x,y)=\int_{\Delta t} I(x,y,t)dt\approx I_{\Delta t}(x,y)\times\Delta t$$

$$\begin{aligned} &=I_{0\Delta t}(x,y)\times f_{\Delta t}(x,y)\times\Delta t \\ &=r_{0\Delta t}(x,y)\times f_{\Delta t}(x,y) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $r_{0\Delta t}$ 为流域内点 (x,y) 在 Δt 时段内无地形影响的辐合雨雨量。

在 Δt 时段内,整个流域面积 A 上的平均降雨量为,

$$\begin{aligned} \bar{R}_{\Delta t,A} &= \frac{\int_A r_{\Delta t}(x,y)dxdy}{\int_A dxdy} = \frac{\int_A r_{0\Delta t}(x,y)\times f_{\Delta t}(x,y)dxdy}{\int_A dxdy} \\ &\approx \frac{\sum_i^m \sum_j^n r_{0\Delta t}(x_i,y_j)\times f_{\Delta t}(x_i,y_j)\Delta x_i\Delta y_j}{\sum_i^m \sum_j^n \Delta x_i\Delta y_j} \end{aligned} \quad (4)$$

若取 $\Delta x_1=\Delta x_2=\dots=\Delta x_m, \Delta y_1=\Delta y_2=\dots=\Delta y_n$,即以流域为中心,围绕流域周围地区构造一个 $m\times n$ 的计算网格,则有

$$\bar{R}_{\Delta t,A} = \frac{1}{m\times n} \left[\sum_i^m \sum_j^n r_{0,\Delta t}(x_i,y_j)\times f_{\Delta t}(x_i,y_j) \right] \quad (5)$$

式中: $r_{0,\Delta t}(x_i,y_j)$ 和 $f_{\Delta t}(x_i,y_j)$ 表示的是流域内面积为 $\Delta x_i\times\Delta y_j$ 的网格上平均辐合雨雨量和该网格平均地形增强因子。

式(3)中的 $r_{\Delta t}(x,y), r_{0\Delta t}(x,y)$ 和 $f_{\Delta t}(x,y)$ 分别是随机变量 $R_{\Delta t}(x,y), R_{0\Delta t}(x,y)$ 和 $F_{\Delta t}(x,y)$ 的一个具体

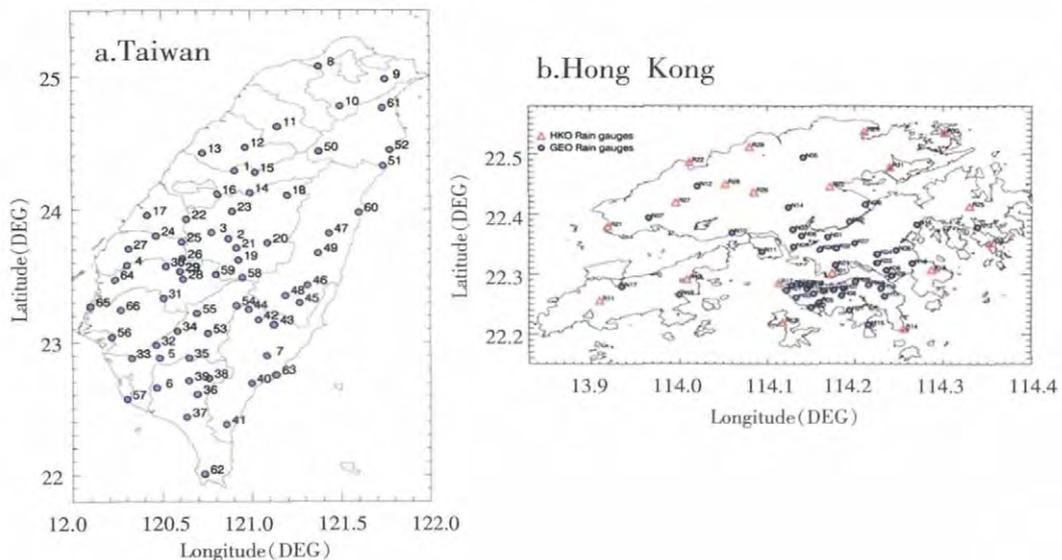


图1 台湾地区(a)和香港地区(b)历史降雨资料站点分布
Fig.1 The location of the stations for the historical rainfall data in Taiwan (a) and Hongkong (b)

样本值,即

$$R_{\Delta}(x,y)=R_{0,\Delta}(x,y)\times F_{\Delta}(x,y) \quad (6)$$

对式(6)两边求数学期望,得

$$ER_{\Delta}(x,y)=E[R_{0,\Delta}(x,y)\times F_{\Delta}(x,y)] \quad (7)$$

假定 $R_{0,\Delta}(x,y)$ 和 $F_{\Delta}(x,y)$ 为相互独立的随机变量,即 $F_{\Delta}(x,y)$ 仅为地形增强因子,与辐合雨雨量无关,则有

$$ER_{\Delta}(x,y)=ER_{0,\Delta}(x,y)\times EF_{\Delta}(x,y)$$

$$EF_{\Delta}(x,y)=\frac{ER_{\Delta}(x,y)}{ER_{0,\Delta}(x,y)}$$

$$\bar{f}_{\Delta}(x,y)=\frac{\bar{r}_{\Delta}(x,y)}{\bar{r}_{0,\Delta}(x,y)} \quad (8)$$

$\bar{f}_{\Delta}(x,y)$ 的物理概念是:流域内某点 (x,y) 的地形对 Δt 时段暴雨的平均增强幅度,称为 Δt 时段的增强因子,它包括地形触发、抬升、缩窄、水汽障碍等综合影响。由于 PMP 是极端事件,属于特大暴雨,实测大暴雨的机制可以认为接近于 PMP 的机制,因此可以通过时段年降雨量极值系列 $\bar{r}_{\Delta}(x,y)$, 利用式(8)直接推求不同时段的增强因子 $\bar{f}_{\Delta}(x,y)$ 。同时,假定水汽入流方向上的平原或海岸带的降雨不受地形影响,所以 $\bar{r}_{0,\Delta}(x,y)$ 选用水汽入流方向上邻近的平原或海岸带的降水资料。

本文将运用上述方法进行如下分析和计算。(1)利用台湾地区 66 个雨量站的历史逐时降雨资料,推求莫拉克台风暴雨期间台湾地区的平均地形增强因子;(2)结合台湾莫拉克台风暴雨实测数据对莫拉克台风暴雨进行分割得到其辐合雨成分;(3)同样的方法,利用香港地区 65 个雨量站的历史逐时降雨资料,得到香港地区的平均地形增强因子;(4)将分割得到的莫拉克台风暴雨的辐合雨分量与香港地区的平均地形增强因子结合,得出香港地区平均 PMP 估计值的空间分布。本文以 24h 时段为例进行详细介绍。

3 结果分析

3.1 台湾地区的平均地形增强因子

台湾莫拉克台风影响期间,西南季风强盛,热带辐合带活跃,热带风暴天鹅位于莫拉克的西南面。由于天鹅与莫拉克之间的逆时针互旋,使南海上空的西风急流转为西南急流,这股西南急流作用下水汽沿着莫拉克作逆时针旋转,在台风的南、东、北 3 面形成一个很强的水汽通道。这样一支强的水汽流输送水汽和能量,有利于积云的强烈发展,这是造成台湾南部超强降水的一个原因^[7-8]。根据上一节分时地形增强因子法的介绍可知,在推求平均地形增强因子时,需选用水汽入

流方向上邻近站点的降水资料作为基准站点。因此,依据莫拉克台风暴雨的特点,在台湾西南部选取了 5 个站点作为基准点 $\bar{r}_{0,\Delta}(x,y)$:永康 56(海拔高度 8.1m)、高雄 57(2.3m)、朴子 64(8 m)、北门 65(14m)和下营 66(5m),位置如图 2 所示。这 5 个基准站点的 24 h 年最大降雨量的平均值分别为 273.54mm、286.35mm、244.84mm、230.13mm 和 258.79mm,然后再计算这 5 站的平均值 258.73mm 作为,取 5 站平均值是为了减小单个站点抽样误差。

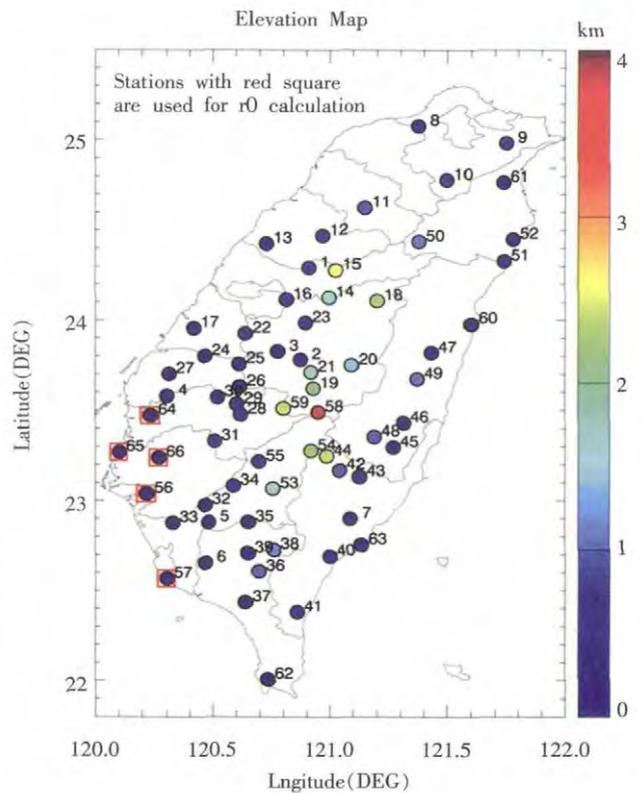


图2 台湾地区 66 个站点高程分布图,其中选取的 5 个基准站点用红方框标出。
Fig.2 The elevation of Taiwan 66 stations and the stations with red square are used for r_0

利用台湾一共 66 个雨量站点的长年逐时降水资料,可以推求各站点 24h 年最大降雨量平均值,进而求得台湾各站 24h 的地形增强因子。为方便移置到香港地区,对结果进行克里金(Kriging)插值,将台湾地区划分成 5km×5km 的网格,插值结果如图 3 所示。从图 3 中可以看到,地形增强因子最大值分布在玉山(3 844.8m)附近,其值超过了 2.0;而大部分沿海地区,地形增强因子均在 1 左右。这与实际情况相符,地形对降水有增幅作用,特别是在迎风坡一侧,由于地形抬升作用导致降水增强。

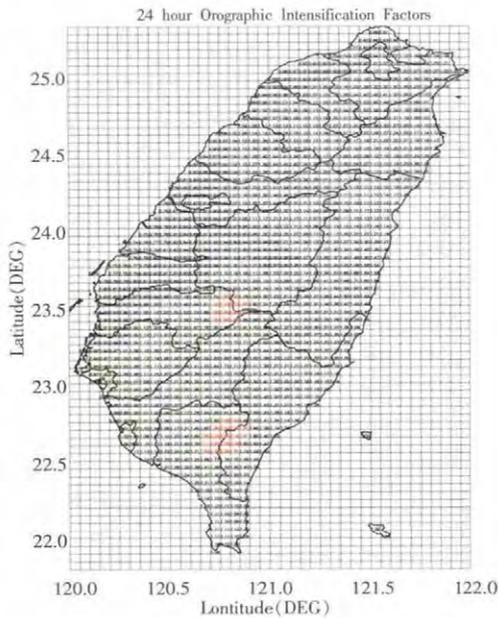


图3 台湾地区66个站点24h的地形增强因子网格分布图(5km×5km)
Fig.3 The 24 h step-duration-orographic-intensification-factor (SDOIF) for Taiwan at a resolution of 5km×5km

3.2 香港地区的平均地形增强因子

根据类似的方法,可以推求出香港地区的平均地形增强因子。从香港多年来台风入侵的方位来看,主要的水汽流来自于东北方或北方,因此,本文中对香港地区,推求平均地形增强因子时的基准站点选取的是香港站点R22(8m)、R30(23m)和广东深圳站点(27m)。这3个站点各自的24h年最大降雨量的平均值分别为195.79mm、199.95mm和204.45mm,然后再计算这3站的平均值200.07mm作为 \bar{r}_0 。图4显示的是香港地区65个站点24h的地形增强因子网格分布图。24h的最大地形增强因子发生在大帽山(944m)附近。值得注意的是,由于网格点的值均由实测站点计算结果通过克里金方法插值得出,因此,理论上,越靠近实测站点的网格点结果越可靠。

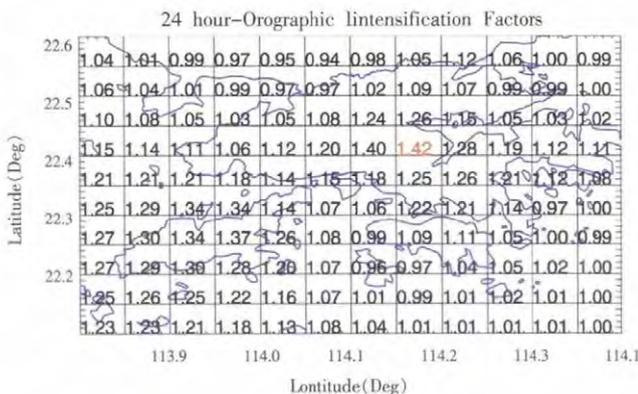


图4 香港地区65个站点24h的地形增强因子网格分布图(5km×5km)
Fig.4 The 24h step-duration-orographic-intensification-factor (SDOIF) for Hong Kong at a resolution of 5km×5km

3.3 台湾莫拉克台风暴雨地形分割

利用台湾中央气象局的251个雨量站在莫拉克台风期间的逐时降雨资料,可以得到台湾地区莫拉克台风期间最大24h降雨分布图;同样,用克里金方法将各站点结果插值到5km×5km的均匀网格;结合图3结果,利用式(3)可以得出台湾地区莫拉克台风期间最大24h无地形影响的辐合雨雨量。图5给出了莫拉克台风期间最大24h降雨量的等雨量线(左图)和得到的除去地形影响以后的辐合雨等雨量线(右图)。从图中可知,莫拉克台风暴雨最大24h辐合雨最大值为864.3mm,而观测得到的最大24h点雨量为1583.5mm,这说明地形24h暴雨的增强幅度约为45%。

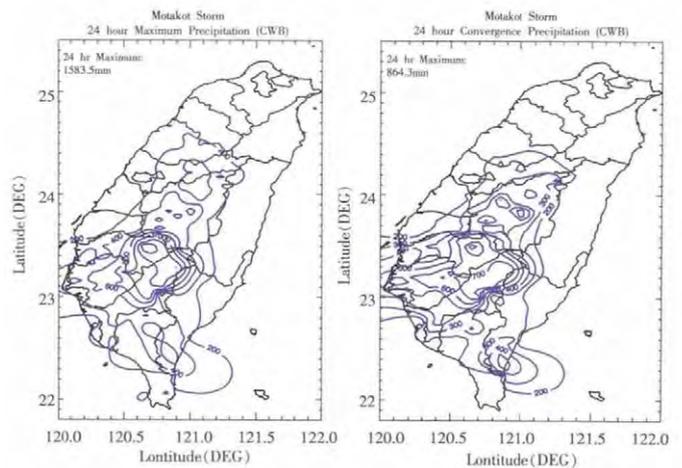


图5 莫拉克台风期间最大24h降雨等雨量线(左图)和除去地形影响的辐合雨等雨量线(右图)
Fig.5 The maximum 24h isohyets (left) and the corresponding convergence isohyets (right) during Morakot Typhoon

根据莫拉克最大24h辐合雨等雨量线可以得出台湾地区相应的面积-降雨量的关系,见表1。

3.4 莫拉克台风暴雨移置香港地区

将莫拉克台风暴雨的地形影响消去之后剩下的辐合雨成分,就可以认为是由于莫拉克台风天气系统造成的。因此,利用莫拉克最大24h辐合雨等雨量线推求的台湾地区面积与降雨量关系(表1),得出与香港地区面积相当的设计暴雨PMP模式,并将其移置到香港地区(图6a),与之前得到的香港地区24h平均地形增强因子相结合,得出香港地区PMP的预估值。

图6b为网格化的莫拉克辐合雨分量乘以各点的香港地区地形增强因子,就得到各格点对香港地区平均PMP的贡献;图6c为对应的等雨量线分布图。从图中可知,香港地区24h平均PMP贡献最大值发生在大帽山附近,约为1230.2mm,这一结果也与历史暴雨中

表1 莫拉克最大24h辐合雨成分得出的台湾地区面积与降雨量关系表

Table1 Relation of area average rainfall with area size in Taiwan from maximum 24h convergence isohyets

Isohyets/mm	0-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400	400-450
Area /km ²	14690	5757	5061	5371	2128	1677	1230	1131	1133
Isohyets/mm	450-500	500-550	550-600	600-650	650-700	700-750	750-800	800-900	
Area/km ²	720	576	476	554	449	401	81	10	

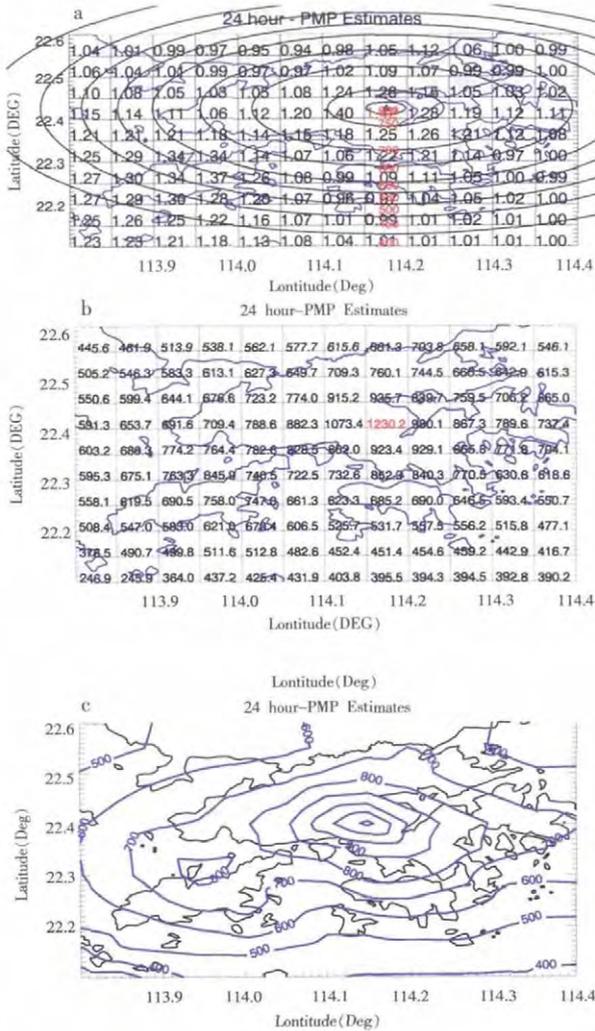


图6 香港地区24h(a)设计暴雨PMP等雨量线模式与香港SDOIF分布的叠加图;(b)考虑了地形影响后的PMP预估网格点值;(c)考虑了地形影响后的PMP等雨量线

Fig.6 (a) The generalized convergence isohyetal pattern overlapped on the Hong Kong SDOIF map; (b) Distribution of gridded-average PMP fraction; (c) Isohyets of 24 h PMP Embryo in Hong Kong

心一致。由于大帽山站点是香港地区海拔最高的雨量站点(944m),受地形影响较大,为香港地区多发的暴雨中心。这也说明,利用分时段地形增强因子法将莫拉克台风暴雨移置到香港地区的这一做法是可行、有效的。利用同样的方法,可以得出其他时段的PMP的分布图(本文略),从而得到暴雨移置到香港地区以后的

时空分布。

4 结论

(1) 利用分时段地形增强因子法可以成功有效的将山地实测大暴雨分解为纯天气系统的动力强迫导致的辐合雨分量和由地形影响导致的地形雨分量;本文以莫拉克台风暴雨为例,发现台湾地区最大24h降雨量中地形的增强幅度约为45%。

(2)以最大24h降雨为例,本文将分割得到的莫拉克辐合雨成分移置到香港地区,结合香港地区平均地形增强因子,得到24h平均PMP贡献分布图(图6);结果与香港地区历史暴雨中心一致,其贡献最大值发生在大帽山附近,约为1230.2mm(未考虑水汽放大)。

(3)利用分时段地形增强因子方法,可以得到各时段实测的山地暴雨消除了地形影响的非山地暴雨(辐合雨)分布图,并且可以将其进行移置,从而得到暴雨移置后的设计暴雨的时空分布;当然,此方法也有局限性,它较适用于资料充分的地区,而且对于雨量站的分布和资料观测系列有一定的要求;同时,结果与插值的网格点密度也有关系,一般来说,网格点越密集,得到的插值结果越好。需要指出的是,本文给出的最后结果并没有经过移置修正。

参考文献:

[1] Chien, F.C., H.C. Kuo. On the extreme rainfall of Typhoon Morakot (2009)[EB/OL]. J. Geophys. Res., 01/2011; 116, doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2010JD015092>.

[2] 刘正钦,杨道昌,林宥丞,等. 在长延时台风下探讨暴雨移置法之重要关键因子[J]. 台湾水利, 2012,60(1):1-14. (LIU Chengqin, YANG Taochang, LIN Yucheng, et al. Discussion on the Important Key Factor of Storm Transposition Method Under Long Duration Typhoon[J]. Journal of Taiwan Water Conservancy. 2012, 60(1):1-14. (in Chinese))

[3] 崔鹏,陈树群,苏凤环,等.台湾“莫拉克”台风诱发山地灾害成因与启示[J]. 山地学报, 2010,28(1):103-105. (CUI Peng, CHEN Suchin, SU Fenghuan, et al. Formation and mitigation countermeasure of geo-hazards caused by Moarc typhoon in Taiwan [J]. Journal of Mountain Science, 2010,28(1):103-105. (in Chinese))

[4] 林炳章. 分时段地形增强因子法在山区PMP估算中的应用 [J]. 河

- 海大学学报, 1988,16(3). (LIN Bingzhang. Application of the step-duration orographic intensification factors method to estimation of PMP for mountainous regions [J]. Journal of Hohai University, 1988,16(3). (in Chinese))
- [5] World Meteorological Organization (WMO). Manual on estimation of probable maximum precipitation [R]. Geneva: Operational Hydrology, Rep 1 (WMO No.1045)WMO, 2009.
- [6] 林炳章, 邵月红, 闫桂霞, 等. 水文气象促进工程水文计算核心课题研究的发展 [A]. 中国水文科技新发展—2012 中国水文学术讨论会论文集 [C]. 2012. (LIN Bingzhang, SHAO Yuehong, YAN Guixia, et al. The development of the key researches in engineering hydrology boosted by hydrometeorology [A]. New Development in Chinese Hydrology—2012 Chinese Hydrology Symposium[C]. 2012. (in Chinese))
- [7] Hong, C.C., Hsu, H.H., Lee, M.Y., Kuo, J.L. Role of sub-monthly disturbance and 40–50 day ISO on the extreme rainfall event associated with Typhoon Morakot (2009) in southern Taiwan [J]. Geophysical Research Letters, 2010,37.
- [8] 郭林, 郑秀云, 苏志重. 0908 号台风“莫拉克”超强降水原因分析[A]. S1 灾害天气研究与预报[C]. 2012. (GUO Lin, ZHENG Xiuyun, SU Zhizhong. The mechanism of the severe rainstorm 0908 typhoon Morakot [A]. S1 Catastrophic Weather Research and Forecast [C]. 2012. (in Chinese))

Study on Transposition of Taiwan Morakot Storm over Hong Kong

ZHANG Yehui, CHEN Hong, LAN Ping

(Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In this paper, the step-duration-orographic-intensification-factor (SDOIF) method is adopted to study the transposition of Taiwan Morakot storm over Hong Kong based on 66 stations of Taiwan with historical hourly data, storm observations during the period of Morakot storm invasion of Taiwan (2009.8.8–10) at 251 ground stations over Taiwan, 65 Hong Kong stations with historical data length more than 18-year and 3 stations from Guangdong (Xili, Shiyan and Shenzhen stations). By using the SDOIF method, the maximum 24h rainfall of Morakot can be separated into the convergence component and the orographic component; a generalized convergence isohyetal pattern for the Taiwan Island based on the Morakot convergence components can be derived; transpose this generalized convergence isohyetal pattern onto the corresponding SDOIF of Hong Kong; then the embryonic PMP distribution can be obtained. It is found that the orographic intensified the maximum 24h rainfall of Morakot by 45%; the maximum (1230.2 mm) of the derived embryonic PMP distribution over Hong Kong located the same area as the storm center based on historical observations.

Key words: storm separation; step-duration-orographic-intensification-factor; convergence rainfall; transposition; probable maximum precipitation

《水文》杂志征订启事

《水文》杂志是由水利部主管,水利部水文局(水利信息中心)主办,国内外公开发行的我国水文水资源专业的学术性科技期刊,系我国地球物理学类和水利工程类全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国科学引文数据库来源期刊、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊、中国期刊网和“万方数据——数字化期刊群”入网期刊。

刊登内容:水文水资源基础理论研究,水文站网规划设计,水文测验技术,水文资料处理与服务,水文水资源分析计算,水文情报预报,水资源调查评价,水环境、水生态监测与水质预测,新技术在水文水资源方面的应用,测验仪器设备的研制,国内外水文水资源科技进展综述、评述以及有关信息和动态等。

出版发行:《水文》杂志为双月刊,每逢双月25日出版,国内由北京

报刊发行局总发行,全国各地邮局均可办理订阅手续,邮发代号:2-430,每册定价20元,全年共120元;国外由中国国际图书贸易总公司(地址:北京399信箱,邮政编码:100044)发行,代号:BM511。

通讯地址:北京市白广路二条2号,100053,电话:(010)63203599; 传真:(010)63204559;E-mail:j.hyd@mwr.gov.cn

投稿网址:<http://sw.allmaga.net/ch/index.aspx>;咨询电话:(010)63203676

*注:鉴于目前网络投稿系统与原信箱投稿方式仍在并行阶段,为了避免遗漏和延误编审稿件,所以2014年全年来稿必须同时向上述两个网址投稿方可登记在册,否则视为投稿未成功。2015年将仅接收网上投稿系统稿件。