

降水预报的红外遥感方法研究^{*}

钱峻屏 李铁芳

(中山大学地学院遥感应用中心, 广州 510275)

摘 要 利用现代化卫星、地面遥感探测手段, 对华南地区 (以广州为主) 地表、大气逆辐射和云体发展进行了长时间跟踪观测, 旨在掌握不同天气状况下地表辐射变化规律, 并以地面有效辐射 (F_0) 作为降水预报因子, 初步估算了 F_0 、云体厚度与降水强度的关系。

关键词 地面有效辐射, 红外长波辐射, 大气逆辐射

分类号 P 407

在热带和中纬度地带的温暖季节里, 中小尺度天气系统是造成降水和暴雨的主要因素^[1]。该系统生命周期短, 时空变化快, 目前, 我国气象台站开展的中小尺度天气预报, 仍主要利用常规资料和 3 h 一次的地面及雷达、卫星、微波资料, 尚未形成有效的业务预报能力。随着大气科学研究向宏观愈宏、微观愈微的领域发展, 我们希望在常规预报方法上寻求突破, 利用自动化、遥测化、反应快捷的现代遥感手段来监视和预报中小尺度天气的发展演变。

1 红外辐射遥感的降雨预报模型

1.1 辐射作为降水预报因子的考虑

太阳辐射是地球表面一切物理过程的能量源泉, 计算辐射平衡和热量平衡, 无论在理论上和实际应用上都具有重要意义。为考察辐射同降水的关系, 选取 1987 年 12 月 10 日晴天状况下 NOAA-9 号卫星通过广东境内时 1、2、4 波段的遥感图象和华南最大 30 d 雨量图, 经几何校正、叠加, 得复合图 1。图 1 表明, 地面红外长波辐射中心与强降雨中心基本一一对应。其中, 两个强地面辐射高值区: 花县翁源一带及河源惠阳一带与最大 30 d 雨量中心吻合很好; 连平、佛冈北部辐射中心与降水中心基本一致。强地表辐射在该地区造成了明显的热岛效应, 强降水区正位于热岛造成的局地热力扰动和平流非线性相互作用下的局地中尺度环流区中^[2], 由于热岛的斜压性, 暴雨区较辐射中心偏北 (下风方向)^[2,3]。

1.2 地面辐射与降水的关系

由地表辐射强度与降水带的相关性可知, 地处热带与亚热带过渡区的华南地区, 海、陆、气相互作用强烈, 水热循环快, 降水在大尺度环流及地形背景下产生的同时还与地气间的辐射平衡有密切关系, 作为甚短时天气预报考虑的因子, 后者的作用相对加强。文献 [4] 讨

^{*} 收稿日期: 1997-03-14 钱峻屏, 女, 25 岁, 助理研究员, 现在广州地理所信息中心工作

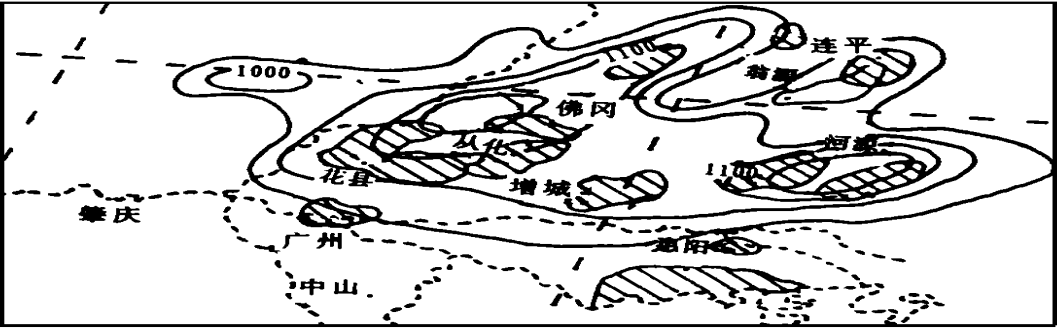


图 1 华南地区地面辐射光谱和最大 30 d 雨量复合图

Fig. 1 Earth surface outgoing radiation map in South China overlapping the greatest 30 d rainfall map
阴影部分 地面红外长波辐射中心， —— 最大 30 d 雨量等值线， —— 其它界线

论了大气与地面的热辐射传递及雨天大气和地表辐射的变化特征，在此基础上，本文引入地面有效辐射，分析其与降水的关系。

地面有效辐射是地面长波辐射和大气逆辐射之差，表示地面向大气和空间放出的热辐射大小。本文利用热红外辐射计（探测波段 $8\sim 13\mu\text{m}$ ，位于透明的大气窗区，以清楚反映云和地表特征）观测广州地区地表和高层大气云底温度，收集了 199408~199510 的单点观测资料（未经任何人为滤波）。现定义为

大气逆辐射
$$E_b = \epsilon T_b^4 \tag{1}$$

地面向上长波辐射
$$E_e = \epsilon T_e^4 \tag{2}$$

地面有效辐射
$$F_0 = E_e - E_b = \epsilon T_e^4 - \epsilon T_b^4 \tag{3}$$

T_e 、 T_b 分别为地面、云底温度（K）， ϵ 为斯蒂芬波尔兹曼常数（ $5.67\times 10^{-8}\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$ ）。(3) 式中取 T_e 为植被表面探测温度，以避免土壤干湿程度及湍流波动的影响。(3) 中地面有效辐射值 $F_0(\text{W}/\text{m}^2)$ 越小，说明云层离地面越近或大气饱和比湿越大； F_0 越大，下垫面温度与大气温度差越大。取雨量在 $10\sim 20\text{ mm/h}$ 时，降水强度为 5； $20\sim 30\text{ mm/h}$ 时，降水强度为 10，余者类推。

图 2 是加密探测到的 F_0 和降水强度随时间变化的曲线，由图可知，有降水时 F_0 值在 $20\text{ W}/\text{m}^2$ 以下，且降水强度与 F_0 呈反相关关系。当 F_0 大于 $20\text{ W}/\text{m}^2$ 时，地气系统间的辐射交换很强，近地层强烈向外辐射，地气系统间热交换明显，近地层的热力顶托抑制了降水的形成。

F_0 的持续递减是判别降水前兆的有效依据。根据对 1994 年 8~12 月及 1995 年 1~10 月的观测资料的统计，发现晴天、高压控制下， F_0 在 $40\sim 100\text{ W}/\text{m}^2$ 之间，地-气系统热交换强烈，地表是强热源；天气转阴，大气中中低云、低积云和雨云占优势时， F_0 明显减小，在 $10\sim 40\text{ W}/\text{m}^2$ 间摆动， F_0 在 $20\text{ W}/\text{m}^2$ 以下通常是降水发生的预兆（取 $F_0=17.6\text{ W}/\text{m}^2$ 为降水临界值）；在 $F_0<17.6\text{ W}/\text{m}^2$ 的 338 个个例中， $F_0>17.6\text{ W}/\text{m}^2$ 且在 1~2 h 内无降水的单点观测个例有 58 个，概率为 17%，其中个别发生在早晨，随即 F_0 迅速增大，地气系统以向外辐射为主；在 366 个降水个例中，有降水且 $F_0>17.6\text{ W}/\text{m}^2$ 的单点个例 41 个，占 11%，且多短时阵雨。因此， F_0 作为短时降水预报因子， $F_0=17.6\text{ W}/\text{m}^2$ 作为降水临界值，预报的成功率较高。

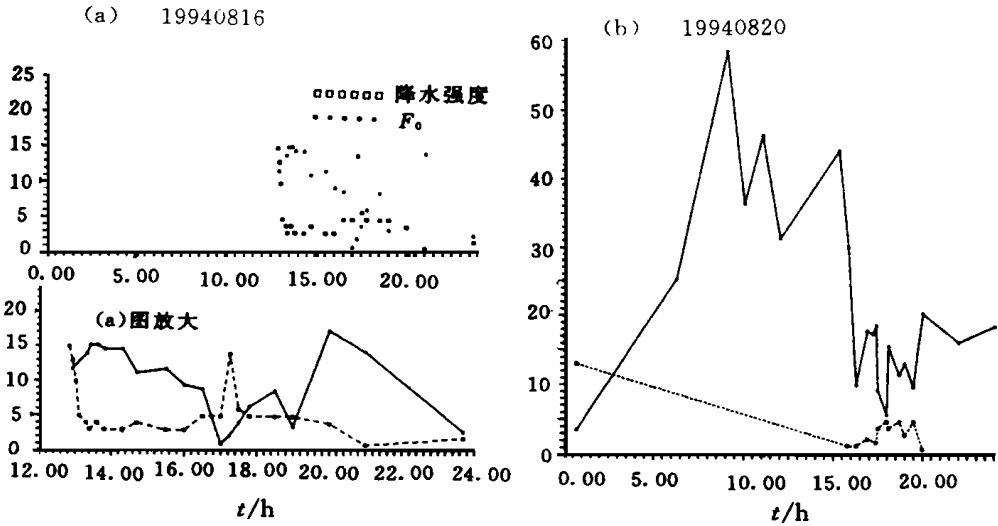


图 2 地面有效辐射 F_0 (实线) 和降水强度 (虚线) 的时间变化曲线

Fig. 2 Variations of surface effective radiation F_0 (solid) and rainfall intensity (dashed) with time

1. 3 不同云型下有效辐射对降水的影响

结合逐日 GMS 静止卫星云图分析 1994 年 8 月至 1995 年 12 月的地面有效辐射变化, 两者的配置与降水的关系大约可分为以下几类:

1 型——出现中、小型降水最多的云型. 广州上空分布有多块细碎对流云, 这些云系是由于冷空气受下垫面加热, 并在较好的水汽条件下形成的. 积雨云团分别处于不同的生命阶段 (生命史为几 h~1 d), 由于高空风作用影响当地有效辐射的逐时变化. 降水发生在 F_0 达到临界值以后, 如图 3 (a, b) (图中 ⊙ 为广州, 数值为云顶最低温度).

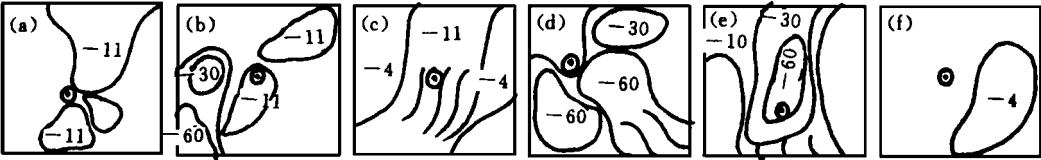


图 3 云型分布及地面有效辐射状况与降水的关系

Fig. 3 Vanition of cloud distribution and surface effective radiation before rainfall

(a) 19940817,降水 (4.5 mm)前 2 h $F_0=18.8$; (b) 19950808,降水 (9.9 mm)前 2 h $F_0=15.1$;
(d) 19950605,降水 (30.1 mm)前 1.5 h $F_0=17.8$; (e) 19950802,降水 (44.2 mm)前 0.5 h $F_0=18.2$

2 型——高空大片层云, 附近无明显的对流系统, 此时降水条件与地面湿度的关系较大, 此类云系要重视湿度校正, 如图 3c.

3 型——强降水云型. 高空是积云、浓积云组成的积云群, 范围可达 $2\sim 20$ 万 km^2 , 有多个强对流中心, 呈涡旋状、带状、线状或逗点状, 云顶温度较低, 垂直发展条件较好, 广州在对流云系的包围下或云群尾部, 降水极易发生, F_0 的临界条件降低, 对应降水也增强 ($> 20 \text{ mm/h}$), 如图 3 (d, e).

4型——无雨类型 (如图 3f). 高空大片晴空或层云、晴天积云, 大气层结较稳定, 水汽条件不充分, 很难形成降水, 仅当 F_0 长时间持续低值 (小于 10 W/m^2), 地面与云底热力差异逐渐消除后, 才有降水发生. 由于没有完整的云图跟踪地面观测, 其中的机理还不甚清楚.

由以上云型分析可知, 造成降水的云团情况复杂, 有一个云团产生的暴雨, 也有几个云团相继通过某地区产生降水, 云团的外形差异也很大, 因此, 获取云图的空间分布和云顶温度, 按云型分类确定其对当地降水的贡献, 结合近地层 F_0 的波动, 进行短时暴雨预报是有一定意义的.

以上结论, 不适用于华南地区 1~4 月的低温阴雨情况, 因初春日照强度低, 湿度大, 陆地的热源作用不明显, 有效辐射变化对降水不敏感.

1.4 模型的建立

综合以上考察结果, 可以利用卫星云图资料读取云顶温度 T_p 和云的空间分布; 利用红外辐射计从地面观测得到实时的云底温度 T_b 和地表温度 T_e 资料, 对流云发展的厚度便由 T_p 和 T_b 估算得到 (暂定义温度厚度 $H = T_b - T_p$); 则局地降水模型可考虑为:

降水强度 $R = a T_b / F_0 + b \times \text{云密度} + c H$ (4)

或 $R = a T_b / F_0 + c H$ (5)

a, b, c 为拟合系数, c 还与湿度有关, a, c 单位分别为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 K^{-1} , F_0 由公式 (3) 求得. 其中, F_0 作为一级产品反映了降水发生的概率, 若 F_0 持续低值, 预报在 1~2 h 内会有降水通常是可行的.

用公式 (5), 选取 1994 年 12 月 2~4 日及 1995 年 8 月 24~28 日两组密度较大的实测资料进行降水强度的估算, 结果见图 4.

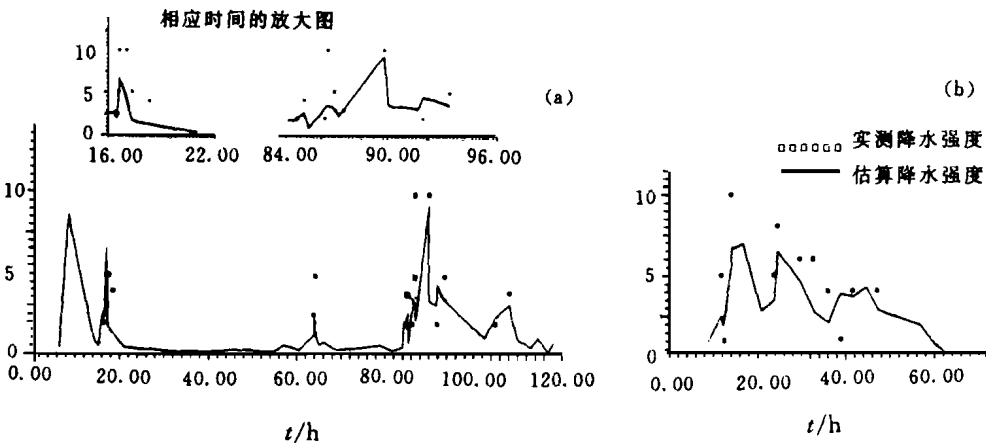


图 4 降水强度估算

Fig. 4 Estimate of rainfall intensity

(a) 19950824~19950828 $a = 1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $c = 1 \text{ K}^{-1}$;

(b) 19941202~19941204 云型 2, $a = 1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $c = 2 \text{ K}^{-1}$

图 4 表明, ① 降水强度 R 的估算结果是合理的, 其与实测降水强度的波动变化关系也是明显的; 强不稳定出现在降水之前, 而雨后出现稳定度低值 ② 利用 F_0 在降水发生前 0.5

~ 2 h 进行预报是可行的. ③ 云图能反映水汽条件和气流运动, 从而提供中、小尺度发展和维持的大范围天气背景.

2 结果讨论

(1) 地表强辐射会引发局地热岛环流, 强辐射与强降水中心具有一定的对应关系, 在现有的诸多降水分析方法中, 加入地表辐射因子分析, 对于准确、及时的降水预报, 应该是有帮助的.

(2) 红外光谱仪探测到的云底温度和地面有效辐射, 能较好地反映局地上空大气的温、湿状况和积雨云发展情况. 有效辐射作为非常规地面观测因子, 反映了地-气系统的能量关系, 表征大气中的热力状况, 它的波动变化对降水有一定指示作用.

(3) 地面有效辐射对感热加热是有贡献的, 也反映了热力对大气的顶托作用. 地面有效辐射能反映局地上空的云、湿变化, 从而预报降水是本文的可喜发现. 但单点观测无法适应复杂多变的天气现象, 所以地面有效辐射与降水的关系尚有待深入探讨.

(4) 在短期和甚短期预报中, 运用先进的高空和地面遥感手段, 选取能表征大气状态的高、低层物理量, 在降水可能发生的前提下, 跟踪大气、积云发展及地面辐射变化, 实时估算降水强度和预报未来降水发展, 这在实际的气象工作中也是很有意义的.

以上是利用遥感资料对局地短时降水预报进行的初步探讨, 由于地表观测和卫星云图资料不能完好匹配, 影响了对降水预报进一步的理论探讨. 另外, 要提高降水预报的精度, 还必须综合水汽、动力、热力因子进行全面考虑.

参 考 文 献

- 1 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 气象出版社, 1980. 150
- 2 李小凡. 热岛效应强迫下中尺度环流的动力特征及极限风速的一种解析表达. 气象学报, 1990, 48: 327~ 335
- 3 李兴生. 坡地对城市热岛影响的数值研究. 气象学报, 1990, 8 (3): 293~ 302
- 4 Li T F, Cheng X X, Qian J P. Impact of Radiation Exchange between Atmosphere and Earth's Surface on the Rainfall in South China. COSPAR Colloquium Space Remote Sensing of Subtropical Oceans (SRSSO), Taiwan, 1995. 221~ 225

Infrared Remote Sensing Method Used in Precipitation Forecasting

Qian Junping* Li Tiefang

Abstract Satellite and ground telemetering equipment are used to observe the earth surface and atmosphere radiation in South China to detect the changing of earth surface radiation under different weather conditions. Surface effective radiation (F_0) is chosen as a rainfall indicator and a rainfall intensity formula was suggested.

Keywords surface effective radiation, infrared radiation, atmosphere adverse radiation

* Center of Remote Sensing, Zhongshan University, Guangzhou 510275