

区域降水分布定量测量及其在 IMGRASS 综合试验中的应用方案研究

刘锦丽 孙海冰

(中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029)

摘要 在综合分析现有地基测量降水时空分布方法及设备条件的基础上, 我们选择了雷达-雨量计联合测雨及雷达-辐射计联合遥感降水分布方法作为 IMGRASS 综合试验中的降水测量方案。除了介绍方法的原理、探测方案外, 还讨论了误差来源及改进措施。

关键词 内蒙古草原 雷达 雨量计 降水定量测量

1 引言

在全球气候与环境变化研究中, 降水的定量测量起着十分重要的作用。这是由于降水的时空分布决定了水分循环的格局及气候因子的变化, 也决定了水汽这个大气运动潜热源的释放部位, 从而对大气各种尺度的环流结构和驱动形式起着十分重要的作用。同样地, 在以全球变化研究为科学目标的“内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用”(Inner Mongolia Semi-Arid Grassland Soil-Vegetation-Atmosphere Interaction, IMGRASS)的研究中, 降水测量是必不可少的要素。在 IMGRASS 综合试验中, 降水测量的任务是提供试验期(一个生长季节)内试验区中瞬时及累计雨量分布资料, 作为陆-气相互作用中尺度模式研究及生态对气候变化和人类活动响应研究等的基础数据之一, 同时也可作为中尺度模式及卫星遥感降水的对比验证资料。

目前, 地基降水时空分布的测量方法主要有:(1)利用地面雨量计方法。它可以直接测量单点上雨强随时间的连续变化, 而且测量精度较高。但是, 单个雨量计测量的空间代表性存在一定局限, 有限密度的雨量计网也难以提供真实的空间连续分布的降水强度资料, 而在广阔区域建立和维护较高密度雨量计网是非常困难的。(2)利用数值化常规气象雷达方法。通过数值化常规气象雷达获取时空连续的降水回波分布资料, 利用雷达反射率因子 Z 和降水强度 R 之关系, 获得降水分布资料。这种方法可以及时提供在雷达测量范围内的时间、空间上连续变化的降水资料。但是, 由于各种复杂因素影响, 单纯利用雷达测量方法的误差很大, 可达 $100\% \sim 200\%$ ^[1]。(3)利用雷达-雨量计联合测量方法。其基础还是 $Z-R$ 关系, 这种方法综合了对单点测量精度较高的雨量计测量和反映降水时空分布特征的雷达测量, 利用雨量计测量校准雷达测量。联合观测试验结果证明如果在雷达探测范围内布上一定密度的雨量计, 并在雷达-雨量计资料的联合处

1997-07-18 收到

* 本工作得到国家自然科学基金项目 No.49485006 和重大项目 IMGRASS (No.49790020) 的联合支持

理上采用一定的数学方法, 可获得比单纯雷达方法精度有很大提高的降水测量结果^[2,3]。(4) 雷达-辐射计联合遥感方法。它是在辐射计所测的路程衰减约束下利用降水云的雷达回波确定降水强度沿路径分布的方法。数值试验及实测结果已证明这个方法优于单部雷达方法^[4,5]。此外, 还有采用偏振雷达^[6]、双波长雷达等方法进行地基降水测量, 研究结果表明, 其测雨精度均比利用单部雷达方法有所提高。

在综合对比分析上述各种测量降水的方法并考虑到我们现有设备条件之后, 在 IMGRASS 综合试验中准备采用雷达-雨量计联合测量方法作为降水测量的基本方案, 同时以雷达-辐射计联合遥感方法为辅助方案。下面我们将着重讨论这两种方法, 由于常规雷达测量降水是这些方法的基本组成, 我们将首先讨论单纯雷达测量降水方法。

2 常规雷达测量降水方法

2.1 原理

雷达气象方程给出雷达等效反射率因子 Z 的表达式:

$$Z = \frac{\lambda^4}{\pi^5} |k|^2 \int_{r_m}^{r_M} \sigma(\lambda, r) n(r) dr, \quad (1)$$

式中, λ 为雷达波长, $\sigma(\lambda, r)$ 为降水粒子的后向散射截面, r , r_m , r_M 分别为粒子半径、最小半径与最大半径, $n(r)$ 表示粒子谱分布形式, $|k|^2$ 由水或冰的复折射指数确定。

降水强度 R 可表示为

$$R = \int_{r_m}^{r_M} \frac{4}{3} \pi \rho_w r^3 V(r) n(r) dr, \quad (2)$$

式中, $V(r)$ 为降水粒子的末速度, ρ_w 为水的密度。

由 (1)、(2) 可以建立 $Z-R$ 的关系式。一般可以表示为

$$Z = aR^b, \quad (3)$$

式中, a 、 b 为经验回归系数。建立 $Z-R$ 关系的最基本方法是利用大量的雨滴谱资料计算出相应的 Z 与 R 值, 再用统计回归方法获得 a 、 b 。降水测量时, 只要用雷达测得 Z 的时间、空间分布, 即可利用 $Z-R$ 关系反演出相应时间、空间的降水分布。

2.2 误差分析

大量实验结果表明, 利用单部雷达方法测量降水存在较大误差, 原因主要有以下三个方面。

2.2.1 $Z-R$ 关系的不确定性

由于降水云的结构和变化十分复杂, 而雷达有效照射体内降水元的相态、形状、取向、冰水粒子含量的比例以及谱分布形式等的变化都会影响降水粒子的散射特性, 从而改变 $Z-R$ 关系。因此, 很难建立统一不变的 $Z-R$ 关系, 它往往随地区、季节、降水云的类型和发展阶段的不同而发生变化, 这是导致单部雷达方法降水测量误差的主要因素。

2.2.2 Z值垂直分布的不均匀性

由于地球的球面效应,以及为避开地物遮挡,雷达用 PPI 扫描时一般选择大于零度的仰角,使雷达波束无法得到真正着地降水的回波。距雷达不同距离处测得的Z值所处的高度是不同的,对水平扫描与仰角大于零度角的扫描,距离雷达越远,距地高度越大。观测事实表明,Z值存在垂直分布结构,而Z值的垂直分布结构随降水类型、云的发展阶段及云的不同部位有很大变化,如对流云垂直结构表现为高度不均匀,层状云垂直结构中具有的明显的零度层回波亮带等。其次,降水在下降过程中存在着水平方向的漂移,所以,如果用不同高度上的测量Z值作为地面的Z值来反演地面降水必然导致相当大的误差^[7]。

2.2.3 Z值的测量误差

雷达性能的好坏及标定工作的可靠性直接影响Z值的测量精度。此外,周围地物杂波,奇异回波,超折射回波的干扰,雷达方程中一般未计及的路径衰减(特别是当用较短波长雷达测量较强降水时),数据采集及处理系统方案的不合理设计等都会导致Z值的测量误差。

2.3 改进措施

为了提高雷达测量降水的精度,我们可以从两方面着手研究。一类是针对上述误差的来源逐一设法解决;另一类是寻找新的测量原理和方法。后者将在下两节讨论,这里先讨论利用单部雷达测量降水方法的改进措施。

2.3.1 解决Z-R关系的普适性

虽然不可能建立统一不变的Z-R关系,但许多研究表明,可以建立适用于某地区不同降水类型的Z-R关系,如果进一步采用数学处理方法,则可望进一步改善降水的测量精度。例如,Rosenfeld等^[8]用窗口概率配对法(Window Probability Matching Method, WPMM)改进了Atlas提出的用一阶矩累积分布函数(CDF)进行概率配对得出Z-R关系的气候模式的方法,而且通过实测对比表明了用这种WPMM法比前述的利用滴谱资料法建立的Z-R关系可使测雨的标准方差由33%减少到21%。我国武汉地区用Atlas的概率配对法建立的Z-R关系,对区域累积降水量的试验也获得较好效果。

2.3.2 Z值垂直分布变化的订正

由于Z值的垂直分布随降水类型、云的发展阶段、部位等的变化很大,用距离地面一定高度的Z值替代地面的Z值进行反演导致的降水测量误差必须加以订正。Joss等^[7]认为这个订正,哪怕是粗略的订正都是非常必要的。他们还给出英国、瑞士等国运用的订正方法。目前大多数的订正思路是做Z垂直分布的气候廓线,即在不同地区对不同降水类型、不同发展阶段求出Z(h)的平均廓线,再用此订正雷达实际测量的Z值。我们认为,如果能够在测雨的实时用当时获得的Z(h)(近处无地物遮挡方位上)放入反演程序中进行订正,则可望获得更好的订正效果。

2.3.3 关于Z的测量误差

主要涉及设备的性能质量及定标方法等,可以通过设备的合理维护完成,至于地物杂波的影响及0°C层亮带等问题可以通过组合观测平面方法,特征回波识别方法等加以处理。

3 雷达-雨量计联合测量法

由于降雨云系本身的复杂多变, 用气候统计性的平均订正对于单次降水过程的定量分布测量的改进是有限的, 不能满足研究和应用的需要。研究表明, 如果将雷达与一定空间密度分布的雨量站网结合起来, 以雨量站测得的精度较高的测量值去订正利用雷达方法测得的降水, 则可以在较大程度上提高测雨精度。目前国内外在这方面已提出不少方法, 在 IMGRASS 综合试验中, 我们准备选用以下三种方法。

3.1 平均校正法

用一定密度的雨量计校正通过 $Z-R$ 关系测得的雨强值, 校正时只采用雨量计对雷达测量校准系数的时间或空间平均值。这种方法简单而又可以作为其它方法的对比基础。

3.2 变分校正法

这种方法的思路是, 对每一时刻同时有雷达观测与雨量计观测的网格点 (i, j) 上的雷达测值与雨量计测值作比较, 得到订正因子 $\tilde{C}_R(i, j)$, 考虑到许多网格点没有订正值, 因而需要建立订正因子分析场 $C_R(i, j)$, 以获得每个点上最接近实际的订正值。为了寻求这个最佳的订正分析场, 张培昌等^[2]提出变分校准的方法, 建立了带有弱约束条件的变分方程并确定方程中合适的权重系数。此法考虑了订正因子随网格点的变化, 从而使变分订正后的降水测量精度得以提高。通过对不同类型降水过程的试验以及和平均校正法作对比后发现, 变分校正后的降水测量误差可减少 20%~30%。这种方法的局限性是对雨量站布网密度的要求较高, 而且在数据处理方法上还比较复杂。

3.3 最优插值法

为能够在较稀雨量站网密度条件下获得与变分法相当的降水测量精度, 李建通等^[3]提出了采用最优插值法对测定区域雷达估测降水量进行订正的方法, 方法的主要步骤是

以雷达回波反演的雨强资料 (网格点上和雨量站上的资料分别用 $R_{i,g}$ 与 $R_{k,g}$ 表示) 为初始场, 地面雨量计网资料为观测值, 用 $R_{k,o}$ 表示, 网格点上订正后的降水分析值 $R_{k,a}$ 可表示成

$$R_{k,a} = R_{k,g} + \sum_{k=1}^N P_k (R_{k,o} - R_{k,g}), \quad (4)$$

式中, i, k 分别为网格点和雨量站的序号。 P_k 为权重因子。此方法的核心是寻找使 $R_{i,a}$ 误差方差最小的权重函数 P_k 。关于 P_k 的求法这里不作介绍, 感兴趣的读者可参考文献 [3]。数值试验和实测资料的对比分析表明此法的精度与变分法相当, 但它对雨量计密度的要求比变分法低, 而且在数学处理上也比变分法简单。

除上述几种方法外, 雷达-雨量计联合测雨还有卡尔曼滤波法等。经武汉地区试验, 这种方法也可以明显提高测雨精度。

4 雷达-辐射计联合测量方法

上面分析中已经指出利用单部雷达方法由于多种复杂因素的影响在降水测量中精度

是不高的。理论研究和实际测量表明,微波辐射计能较准确地测量射线路径上的总降水量,但它缺乏距离分辨能力,将雷达和辐射计结合起来的微波主波动联合测雨方法能够发挥雷达和辐射计各自的长处。这种方法不仅在云雨遥感的原理及数值试验方面已做了比较系统的工作^[4],在实测试验中也获得成功^[5]。在 IMGRASS 的综合试验中,我们准备继续用现有的 X 波段雷达-辐射计系统做联合遥感降水分布的实测试验,以提高测雨精度,并进一步改进和完善联合遥感方法本身。

4.1 原理

(1) 利用微波辐射计所测天线路径上亮温值推导出该路径上降水的总衰减量

$$\tau_p = \ln[(T_1 - T_b)/(T_1 - T_{bs})] \quad (5)$$

式中, T_b 为辐射计测得的射线路径的亮温, T_1 为路径平均气温, 而 T_{bs} 为射线上无雨背景亮温。这里, 忽略云雨粒子多次散射造成的衰减, 在选用的 X 波段或更长的微波波长上, 大气气体的衰减贡献一般是变化小的小量, 可加以订正。

(2) 求出衰减系数沿路径的分布 $\sigma(r)$

利用雷达所测路径回波强度导出的 Z 值路径分布, 利用经验关系

$$Z(r) = c\sigma(r)^d \quad (6)$$

$Z(r)$ 为雷达测得的反射率因子沿路径 r 的分布, c 、 d 是依赖于滴谱分布的经验系数。为了由 $Z(r)$ 获得更精确的 $Z-\sigma$ 关系, 先给定 d 的值及 c 的初值 c_0 , 由式 (6) 获 $\sigma_0(r)$, 再用辐射计测得可靠的总衰减量 τ_p 与 $\sigma_0(r)$ 的积分量 τ_0 相比较, 改变 c_0 进行迭代并控制误差, 最后寻找出可以代表该次降水的 c 值, 即得到更接近实际的 $\sigma(r)$ 。通常系数 d 的变化不大, 可以由经验回归关系得出。

(3) 最后再由经验关系得出降水沿路径分布 $R(r)$

$$\sigma(r) = aR(r)^b \quad (7)$$

a 、 b 为依赖于滴谱分布的经验系数。

联合遥感法与单部雷达方法相比较, 它具有以下优点:

(1) 测雨精度高。在降水的时空分布测量中, 明显优于单部雷达法。这是由于联合遥感所依赖的 $\sigma-R$ 关系比较稳定, 对滴谱分布形式的变化不敏感, 而单部雷达法中的 $Z-R$ 关系是极不稳定, 随谱型的变化很大。另外, $\sigma-R$ 关系中变化较大的 c 值可用辐射计测得的衰减量控制、迭代而获得, 从而提高测量精度。

(2) 不要求雷达作绝对定标, 只要求在观测时间内性能保持稳定。

4.2 误差分析

(1) 联合遥感法的主要困难是如何确定无雨背景亮温 T_{bs} , 它无法直接测量而又对测雨精度有重要影响。对 T_{bs} 获取方法的试验表明, T_{bs} 选取的合理程度 (即逼近定义中真正 T_{bs} 的程度) 直接影响了联合遥感法测雨的误差大小。因此, 需要对不同的降雨类型、不同环境情况选择合适的方法获得最接近真实的 T_{bs} 值。

(2) 和利用单部雷达方法一样, 它也必须进行雷达反射率垂直分布的订正。我们曾提出进行此项订正的预想方案^[5], 但真正具体实现这一订正还需进行大量系统实验与研究。此外, 在经验系数 a 、 b 、 d 的确定上也存在一定的误差。

5 IMGRASS 降水测量方案设计

IMGRASS 降水测量的目的是提供综合试验区中一个生长季节内降水时间及空间分布的基础数据, 为其它项目的研究提供资料基础, 特别是为中尺度系统和水循环影响模式的研究以及卫星遥感的原理方法和应用研究提供地基验证的降水资料。

通过对国内外现有各种测雨方法的对比研究, 同时考虑到我们现有设备的能力, 我们准备采用的测量手段有:

(1) SL-3 型翻斗式雨量计自记仪, 共 30 台; (2) C 波段气象雷达; (3) X 波段雷达-辐射计联合系统。布点设计: 雷达站选择及雨量计布网设计的原则是: (1) 据研究需要选择气候、地形、植被、土壤等具有代表性而且变化大的区域为重点。(2) 满足仪器所需的工作及安全条件。根据试验区的布局 (见图 1) 及上述原则考虑, 我们准备将雷达布在贝力克站附近地区。这种选择可以使中科院草原生态站 IMGERS (试验区的中心)、东北的 7 分场 (典型草原)、南边的那日图 (稀树草原、沙带)、贡格尔、锡林浩特等处都在雷达最佳探测距离之内, 只有西边的阿巴嘎旗偏远些 ($>100\text{ km}$)。

图 2 是年平均降水量分布图。可以看出, 试验区处在 $250\sim 350\text{ mm}$ 降水范围内, 从雨量、地形、植被、土壤等条件分析, 锡林浩特-中科院草原生态站-贡格尔一线最具代表性而且各要素变化最大, 故这条线可作为雨量站布网的重点区域, 准备以 $5\sim 10\text{ km}$ 间隔布点, 而锡林浩特-阿巴嘎旗一线各要素变化不大, 雨量站点可布得稀一些。

观测方案的初步考虑是, 试验期内雨量自记仪连续采样, 而雷达、辐射计在强化观测期间对降水过程进行连续测量。由于采用雷达-雨量计联合测雨方法为主, 故观测时以 PPI 及立体扫描为主, 同时兼顾雷达-辐射计联合测雨方法的试验, 在雷达测雨时要穿插进行雷达-辐射计的联合观测, 并以地面雨量站所在方位进行 RHI 扫描, 以便获得降水过程的垂直剖面资料及对反演方法本身进行实测验证。

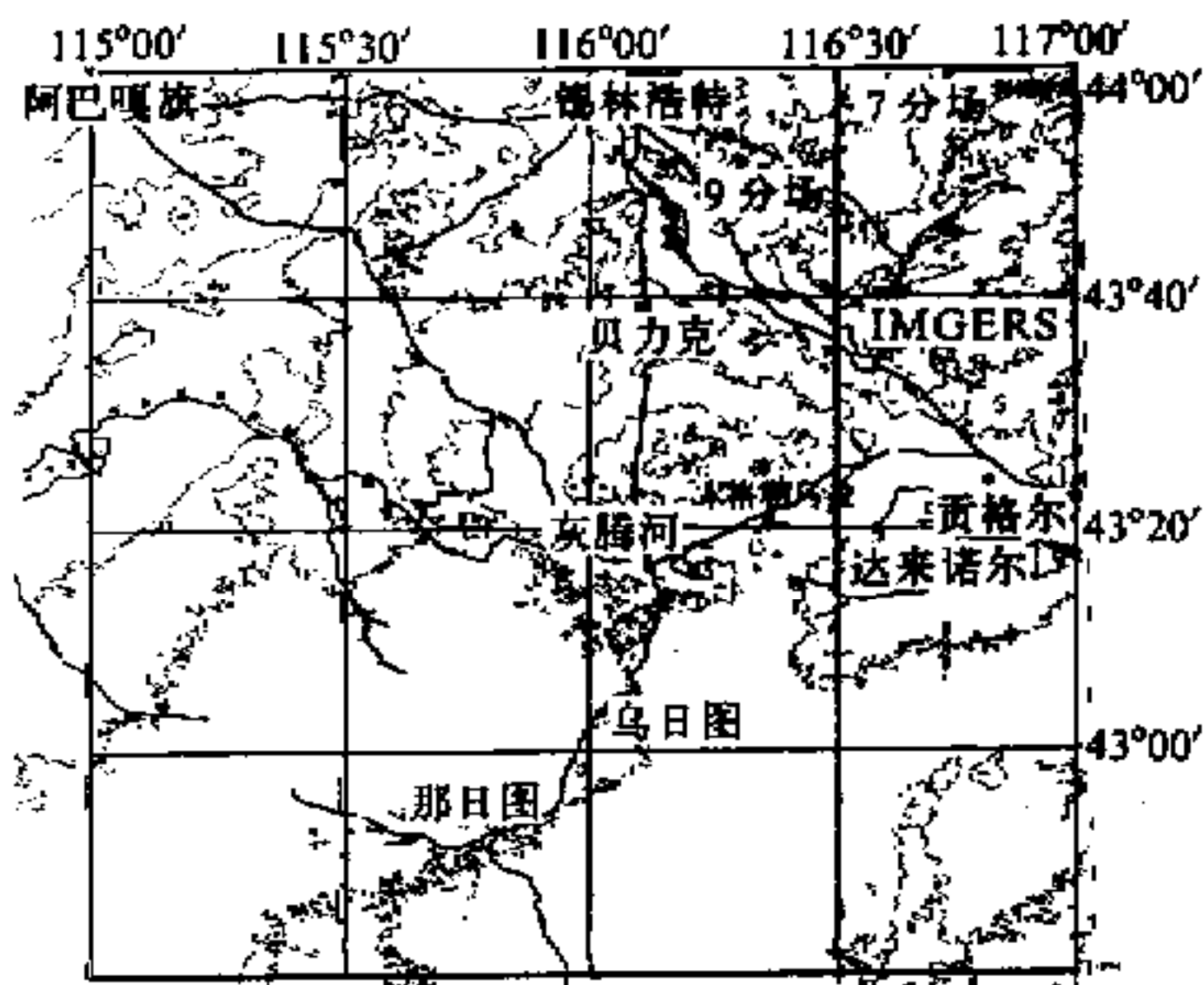


图 1 实验区域图

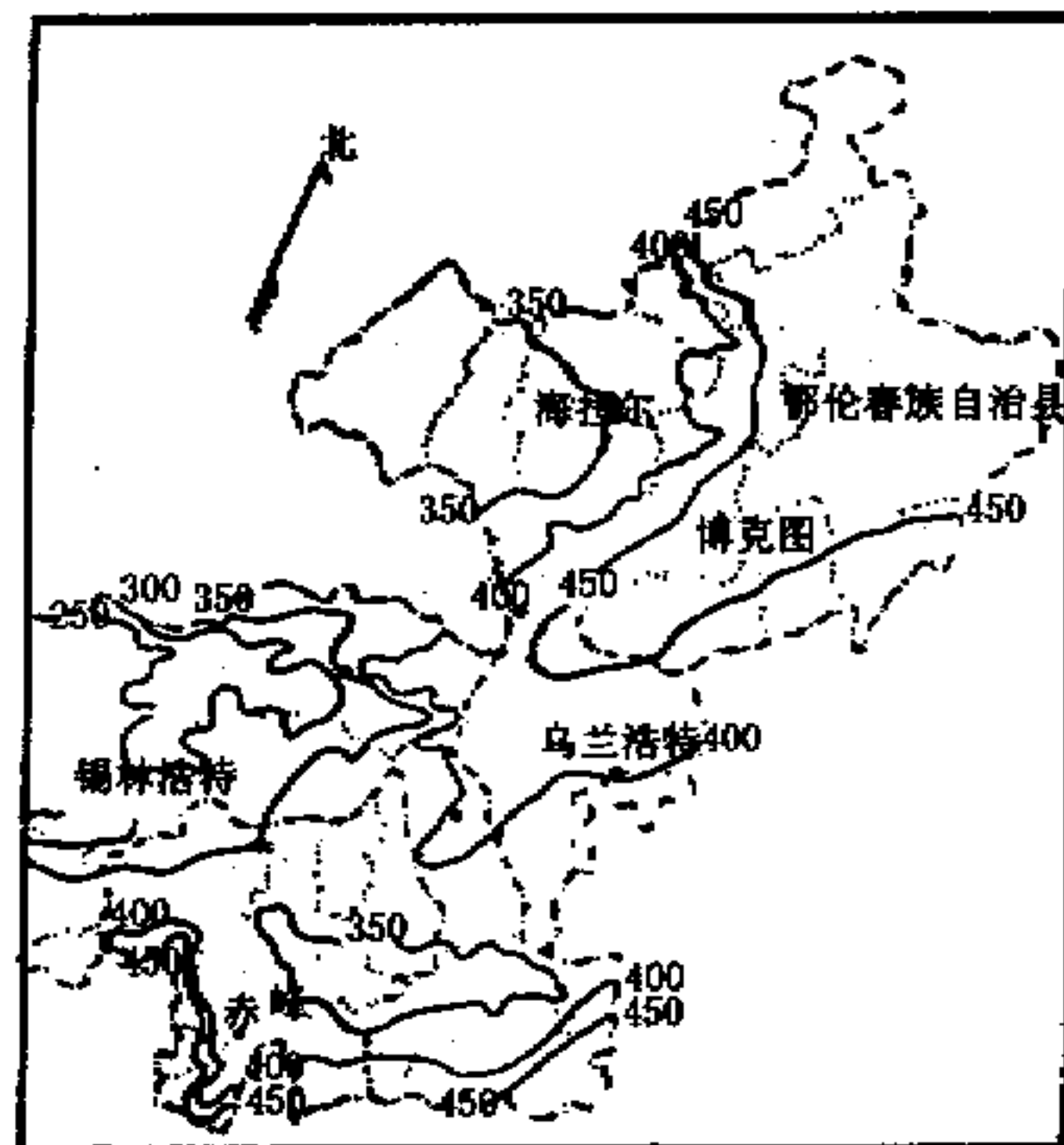


图 2 内蒙古东部年降水量分布图。单位: mm

致谢 在雷达和雨量计联合测雨方案的讨论中,南京气象学院的张培昌、顾松山教授提出了许多宝贵意见,谨此致谢。

参 考 文 献

- 1 J. Wilson, 1979, Radar measurement of rainfall—A summary, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 60, 1048~1058.
- 2 张培昌等, 1992, 用变分法校准数字化天气雷达测点区域降水量基本原理和精度, *大气科学*, 16, 248~256.
- 3 李建通、张培昌, 1996, 最优插值法用于天气雷达测定区域降水量, *台湾海峡*, 15, 255~259.
- 4 吕达仁、林 海, 1980, 雷达和微波辐射计测雨特性的比较与联合应用, *大气科学*, 4, 30~39.
- 5 刘锦丽, 张 凌, 1993, 微波主被动联合测雨的应用研究, *大气科学*, 17, 219~226.
- 6 Seliga, T.A. et al., 1981, A preliminary study of measurements of rainfall rate using the different reflectivity radar technique and raingage network, *J. Appl. Meteor.*, 20, 1362~1368.
- 7 Jurg, Joss, 1990, Precipitation measurement and hydrology, radar in meteorology: Battan memorial and 40th anniversary radar meteorology conference, AMS, 577~606.
- 8 Rosenfeld D. et al., 1994, The window probability matching method for rainfall measurements with radar, *J. Appl. Meteor.*, 33, 682~693.

A Design of Quantitative Regional Precipitation Measurement for IMGRASS

Liu Jinli and Sun Haibing

(Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Based on the analysing of ground-based precipitation measurement methods and considering of our present equipment situation, two methods are chosen for field experiment in IMGRASS. They are combined radar-rain gauges and combined radar and radiometer. In this paper, the principle and the schemes of two methods are introduced, also, the error analysis and the improving ways are given.

Key words Inner Mongolia grassland radar gauge precipitation measurement