

观测场内自然降雨的空间均匀性研究

宋海润¹ 罗仑² 王晓蕾^{1*} 杨会兵¹

(1 国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101; 2 中国人民解放军 93685 部队, 张家口 075000)

摘要 以分辨率为 1 m 的 10 m×20 m 和 10 m×10 m 观测网为研究对象, 运用自制雨量杯开展自然降雨测试试验, 结合克里斯琴森均匀系数、分布均匀系数、降雨偏差系数、降雨极值比系数、单因素方差分析等数学方法对自然降雨的空间均匀性进行了研究, 分析了风、降雨量对空间均匀性的影响, 并讨论了降雨测量仪器在动态比对试验中仪器的架设间隔问题。结果表明: 观测场内自然降雨的空间均匀性良好, 且各项均匀性指标具有较好的一致性; 风对该观测场内的降雨空间均匀性影响不大, 而降雨量的差异对其空间均匀性有一定的影响; 在动态比对试验中, 降雨测量仪器的架设间隔应小于 5 m, 且部分小型降雨测量仪器(如收集杯)架设间隔取 1 m 可行。

关键词 自然降雨; 空间均匀性; 均匀性评价指标; 架设间隔

中图分类号: P426.62 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20190047 **文献标识码:** A

引言

降水现象是指云中液态水或固态水向地面降落的一种天气现象^[1-2], 是描述天气现象的重要气象要素。降水资料是天气动力分析、数值预报模式、水文模型等方面的重要参数, 是雷达与卫星定标、水库管理、工程设计等方面的重要依据^[3], 也是全球水热循环及气候变化研究最主要的气候资料之一。降水资料的准确与否不仅直接影响水文过程研究, 而且对区域乃至全球大尺度的气候水文研究至关重要^[4]。降水的局部性强, 变动性大, 降雨测量与其他气象要素测量相比有其特殊性。因此, 孤立的一台降雨测量仪器的测量值没有多大的实际意义, 需要比较密集的观测网来进行测量^[1,5]。降雨量是在空间分布上随机性较大的气象要素, 而这种空间分布的不均匀性, 使得即使是安装在同一观测场但不同地点的雨量器仍存在测量偏差^[6]。因此, 有必要对自然降雨的空间均匀性进行研究。

目前, 国内外研究人员对不同分辨力下的自然降雨空间均匀性开展了多次试验, 并得到了不同的

降雨均匀性指标。张凌等^[7]在分辨率为 125 m 的降雨区域对空间均匀性进行研究, 发现不均匀性非常显著; A. Gires 等^[8]对 1 km 的雷达降雨分辨率进行研究, 并运用通用多重分形的方法将其分成分辨率为 46 cm 的降雨区域进行分析, 得到了小范围不均匀性较大的结论; Gopinath 等^[9]对面积为 2.1 m×0.7 m 的降雨区域进行研究, 给出了空间均匀性达到 95% 的结果, 但未分析降雨区域内子空间之间的差异; 刘波^[10]、康钊菁^[11]等以 1 m×1 m 和 2.4 m×2.4 m 较小面积的采样区域, 以 20 cm 间隔设置测试点, 并对降雨区域内的子空间进行对比, 发现空间均匀性试验结果都在 97% 以上, 而更大采样区域的降雨空间均匀性还有待研究。

本文以 10 m×20 m 和 10 m×10 m 的采样区域, 以 1 m 间隔设置测试点, 研究自然降雨的空间均匀性; 并分析讨论了风、降雨量等因素对空间均匀性的影响, 为日后大型雨量发生装置的研制与测试及降雨测量仪器动态比对试验中确定仪器架设间隔提供数据支撑。

1 试验方法

1.1 小范围自然降雨均匀性试验

考虑到观测网的选址要远离树木、房屋、人群等障碍物,决定将降雨观测网搭设在南京某气象站楼顶。准备 300 块 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 的正方形木板和 600 个口径相同的塑料杯。考虑到风的影响和测量的便利性,将其中一个塑料杯(固定杯)固定在木板上,再将另一个贴有编号的塑料杯(收集杯)套在被

固定的塑料杯上以收集降雨,共计 300 个收集杯。为了避免其他环境条件影响试验,在没有降雨期间使用油布覆盖收集杯。在降雨开始前,移除油布,以便在试验期间将空的收集杯暴露在自然降雨中。在楼顶的东、西两侧分别搭设 $10\text{ m} \times 20\text{ m}$ 和 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的雨量观测网,每个观测点间隔 1 m ;东、西观测网距离 60 m ,两观测网进行对比分析,如图 1 所示。

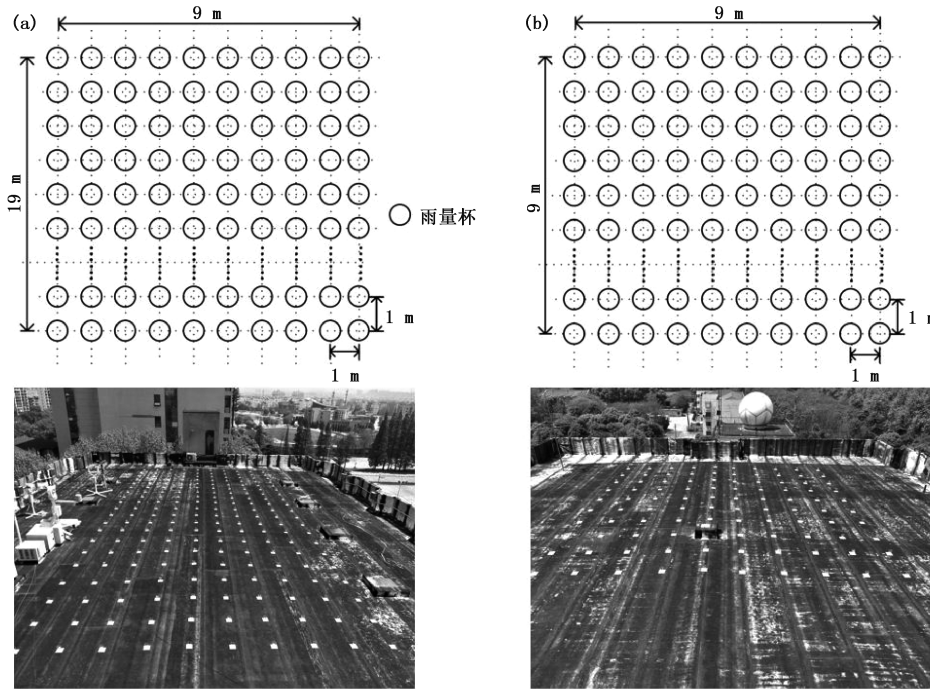


图 1 东(a)、西(b)观测网示意

试验前,用精密电子天平(不确定度为 0.01 g)分别称量收集杯重量,用口径为 50 分度值的游标卡尺(不确定度为 0.02 mm)测量每个收集杯的内径,并记录。试验后,将收集杯快速移至室内并对其进行称量。每个收集杯可以视为一个小型的雨量筒,其收集的雨水重量可以按式(1)换算成每个观测点的累积降雨量 R_A 。

$$R_A = \frac{4(m_2 - m_1)}{\pi \rho D^2} = \frac{4m_0}{\pi \rho D^2} \quad (1)$$

式中, m_2 为降雨后称得重量(g); m_1 为降雨前称得重量(g); ρ 为雨水的密度(g/cm^3); D 为雨量杯口径(cm); m_0 为累积降雨质量(g)。

对式(1)全微分,并用相对变化量来表示,则有:

$$\frac{\Delta R_A}{R_A} = \frac{1}{m_0} \Delta m_0 - \frac{1}{\rho} \Delta \rho - \frac{2}{D} \Delta D \quad (2)$$

由式(1)、(2)可知,直径、重量等测量会引入误差,且降水的重量与降雨量成正比例线性关系。为了方便计算,将降雨质量等效于累积降雨量,故本文均采用降雨质量来进行数据处理与分析。

在观测网旁架设自动气象站和 OTT Parsivel 雨滴谱仪,用以记录自然降雨的起止时间、降雨量、降雨强度以及降雨过程中的风向、风速等气象要素。

1.2 均匀性评价指标

1.2.1 克里斯琴森均匀系数

克里斯琴森(1942年)最早提出了定量描述降水量分布均匀程度的评价指标——克里斯琴森均匀系数 C_U ^[10,12]。它表征了整个测试区域内降水量分

布与平均值的偏差情况,

$$C_U = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |R_{Ai} - \bar{R}_A|}{n \bar{R}_A} \right] \times 100\% \quad (3)$$

式中, R_{Ai} 为测试点 i 的降水量(mm); \bar{R}_A 为测试区域内各测试点平均降水量(mm); n 为测试点总数。

1.2.2 分布均匀系数

若测试区域绝大多数测试点的降雨量与平均降雨量接近,个别测试点的降雨量与平均降雨量偏差较大时, C_U 难以反映上述情况。为更好地表征测试区域降雨的空间均匀性,重点关注降水量较低的部分,引入分布均匀系数 D_U ^[13]。

$$D_U = \left(1 - \frac{\bar{R}_{A_{lq}}}{\bar{R}_A} \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中, $\bar{R}_{A_{lq}}$ 为按照大小排列的降水量低值的 $n/4$ 个测试点的降水量平均值(mm); \bar{R}_A 为测试区域内各测试点平均降水量(mm)。

1.2.3 降雨偏差系数

降雨偏差系数 C 为测试点降雨量的均方差与均值的比值,表示不同测试点降雨量的离散程度^[14]。系数越接近 1,离散程度越大,均匀性越差;越接近 0,离散程度越小,均匀性越好。

$$C = \frac{1}{\bar{R}_A} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{Ai} - \bar{R}_A)^2}{n-1}} \quad (5)$$

式中, R_{Ai} 为每一个测试点的降雨量(mm); \bar{R}_A 为所有测试点降雨量的平均值(mm); n 为测试点总数。

1.2.4 降雨极值比系数

降雨极值比系数 F 反映了测试区域内降雨量两个极值的倍数关系,表示了降雨的不均匀程度^[15]。系数越接近 1,测试区域内降雨越均匀;系数越大,降雨空间越不均匀。

$$F = \frac{R_{A_{max}}}{R_{A_{min}}} \quad (6)$$

式中, $R_{A_{max}}$ 为测试点中降雨量最大值(mm); $R_{A_{min}}$ 为测试点中降雨量最小值(mm)。

1.2.5 单因素方差分析 ANOVA

为分析观测网内部子空间的均匀性,采用单因素方差分析。先将测试网分为若干组,再对各组降雨量进行正态性检验和方差齐性检验,最后用方差分析进行两两对比,从而判断出观测网内部各组之

间有无显著差异,即检验观测网内部子空间的均匀性是否一致。单因素方差分析数学模型如下^[16]。

若要检测出观测网内部试验数据在单因素 A 影响下的水平差异,试验数据必须是建立在如下假设的基础上:

$$x_{ij} \sim N(\mu_i, \sigma_i^2) \quad (7)$$

式中, x_{ij} 为由单因素 A 引起的第 i 个水平、第 j 个观测点的随机变量; μ_i 为第 i 个水平下的均值, σ_i^2 为第 i 个水平下的方差。

判断组与组之间降雨空间均匀性有无明显差异,相当于要做以下的假设检验:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_m \quad (8)$$

若接受 H_0 ,则认为单个因素 A 对结果影响不显著,试验结果的不同仅仅是随机因素的影响;若拒绝 H_0 ,则认为至少有两组数据之间的差异是显著的,单因素 A 对试验的影响显著。

用 F 分布对数据进行检验:

$$F = \frac{S_A/m-1}{S_E/n-m} \sim F(m-1, n-m) \quad (9)$$

式中, S_A 为各组均值与总均值的偏差平方和,反映组间的差异; S_E 为各组内的数据与各组均值偏差平方和的总和,反映组内随机误差的大小; m 为单因素 A 引起的水平个数; n 为测试点的总个数。

为检验 H_0 ,给定显著性水平 α ,记 F 分布的 $1-\alpha$ 分位数为 $F_{1-\alpha}(m-1, (n-m))$,检验规则为当 $F \leq F_{1-\alpha}(m-1, (n-m))$ 时,接受 H_0 ,即观测网内部间均匀性良好;否则拒绝 H_0 ,即观测网内部间均匀性差。

2 数据处理及分析

2.1 降雨空间整体均匀性分析

2017 年 4—5 月,历时一个月,共观测记录 3 次自然降雨过程,共计采样数据 900 个,采用均匀性评价指标分析。3 次降雨过程的有关信息与均匀性指标计算结果如表 1 和表 2 所示。

由于自动气象站记录的风向风速是滑动平均值,若数据处理仍用滑动平均法求出降雨过程中的平均风向风速,会消除风向风速的不稳定波动,难以反映风向风速的变化情况,故采用风玫瑰图,分析降雨过程中的主导风向(红色)与对应平均风速(蓝色),如图 2 所示。可见,试验期间以北风为主。

从表中可以得出:

(1)由于测试设备自身具有一定的体积形状,会对自然风场产生一定的干扰从而引起风场变形误差^[17]。在进行降雨测量的过程中,雨量计器口上方的风速显著大于周围环境风速,造成的降雨风场变形误差为 0.19 mm^[18]。相对于 3 次自然降雨过程的降雨量,风场变形误差远远小于累积降雨量,故可忽略不计。第 3 次测试较之第 1 次,在累积降水量基本相同的情况下,主导风向改变且风速增大,风向风速不稳定波动增大,而降雨空间均匀性变化不明显,两次测试东面观测网 C_U 相差 0.95%,西面观测网 C_U 相差 0.21%,表明风向与风速对分辨力为 1 m 的 10 m×20 m 和 10 m×10 m 观测网中的降雨整体空间均匀性影响不大。

(2)第 2 次测试较之第 1 次,在主导风向与其对应的平均风速基本相同的情况下,降雨量减少,降雨空间均匀性变差。与第 1 次测试相比,第 2 次测试东面观测网 C_U 下降 1.71%,西面观测网 C_U 下降 1.99%,表明降雨量的差异对降雨空间均匀性有一定影响。

(3)3 次自然降雨过程中东西两观测网中克里斯琴森均匀系数 $C_U > 95%$,分布均匀系数 $D_U > 91%$,降雨偏差系数 $C \leq 0.05$,降雨极值比系数 $F \leq 1.66$,整体均匀性较高。但与刘波、康钊菁等以 20 cm 间隔设置测试点的空间均匀性试验结果(均匀系数 $> 97%$)相比^[11],均匀性略有下降,由此可知降雨空间均匀性与设置测试点的间隔(分辨力)有关,且分辨力越大,均匀性越差。

在动态比对试验中,仪器的架设既要保持一定的距离,以免相互影响,又要相互靠近,以免比对双方所处的环境差异过大,通常要保持 3~5 m 的距离^[19]。根据刘波、康钊菁等人的研究表明,自然降雨在 1.1 m×1.1 m 和 2.4 m×2.4 m 的区域内克里斯琴森均匀系数 C_U 分别为 $> 97%$ 和 $> 95%$,整体空间均匀性都较高,且降雨空间内部均匀性也较高。可认为,在动态比对试验中降雨测量仪器架设距离取 1~2 m 是可行的,则本次试验设置分辨力为 1 m 的数据采集是有效的,而更大的架设距离需要进一步验证。因此,为了研究降雨空间内部均匀

性和确定降雨仪器的架设距离,本文进行了降雨空间内部均匀性分析。

2.2 降雨空间内部均匀性分析

将东西两观测网进行分组,采取按行编组、按列编组和按 5 m×5 m 编组 3 种方式,如图 3 所示。对 3 次降雨过程各编组数据进行正态性检验与方差齐性检验,若检验返回值 P_1 与 P_2 均大于 0.05,则表明历次降雨过程的各编组在显著水平 0.05 下服从方差相等的正态分布。

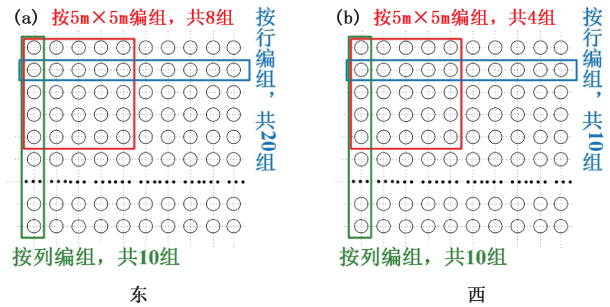


图 3 东(a)、西(b)观测网编组示意图

以 2017 年 4 月 16 日第 1 次降雨观测的东观测网为例,采用单因素方差分析方法研究其内部均匀性。经检验,3 种编组方式的各组均服从方差相同的正态分布,其箱形图如图 4 所示。

将编组内部各组两两交互式多重比较,找出存在明显差异的组别,如图 5 所示。

从图 5a 观察 20 组按行编组多重比较的结果,可以看出第 1 组(蓝色)和第 9 组(红色)之间存在显著差异,也就是说第 1 行和第 9 行的降雨平均重量以及方差在显著性水平为 0.05 下存在显著差异,称为 1 对显著差异,在按行编组交互式多重比较中,分析得到有 40 对具有显著差异;在按列编组交互式多重比较中,分析得到有 9 对具有显著差异;在按 5 m×5 m 交互式多重比较中,分析得到有 10 对具有显著差异。由此,在第 1 次降雨过程中东观测网的内部不均匀对数占比:

$$\frac{(40 + 9 + 10)}{(C_{20}^2 + C_{10}^2 + C_8^2)} \times 100\% = 22.43\%$$

同理,可得到 3 次自然降雨测试中,东西观测网在 3 种不同编组方式下的内部不均匀对数占比如表 3 所示。

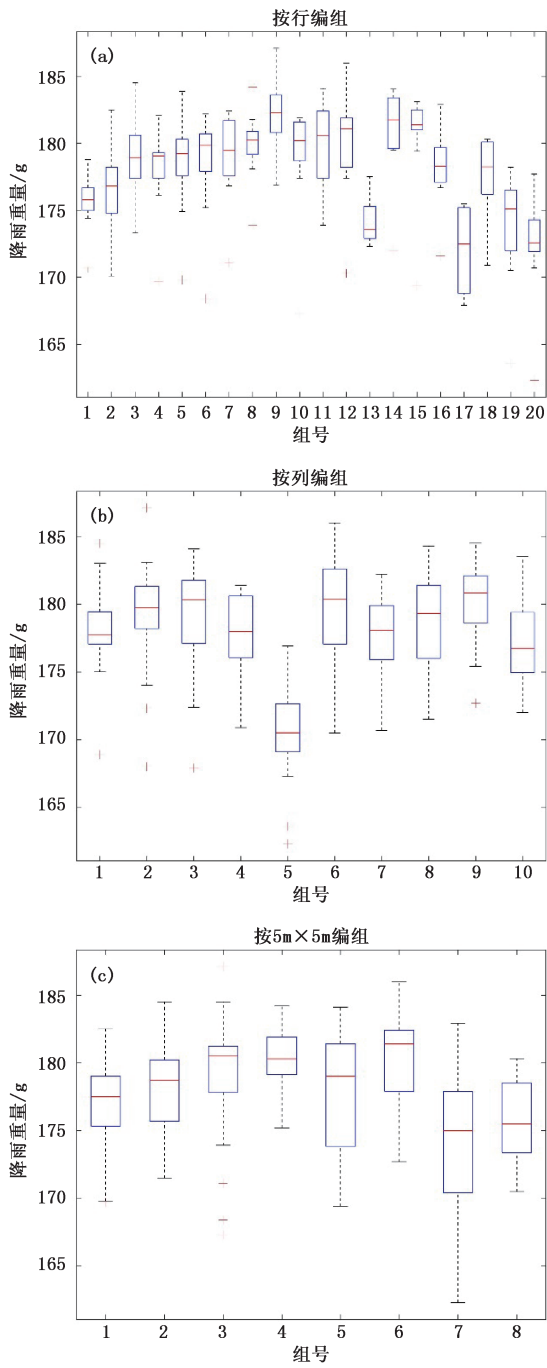


图 4 东观测网按行编组(a)、按列编组(b)、按 5 m×5 m 编组(c)的箱形图

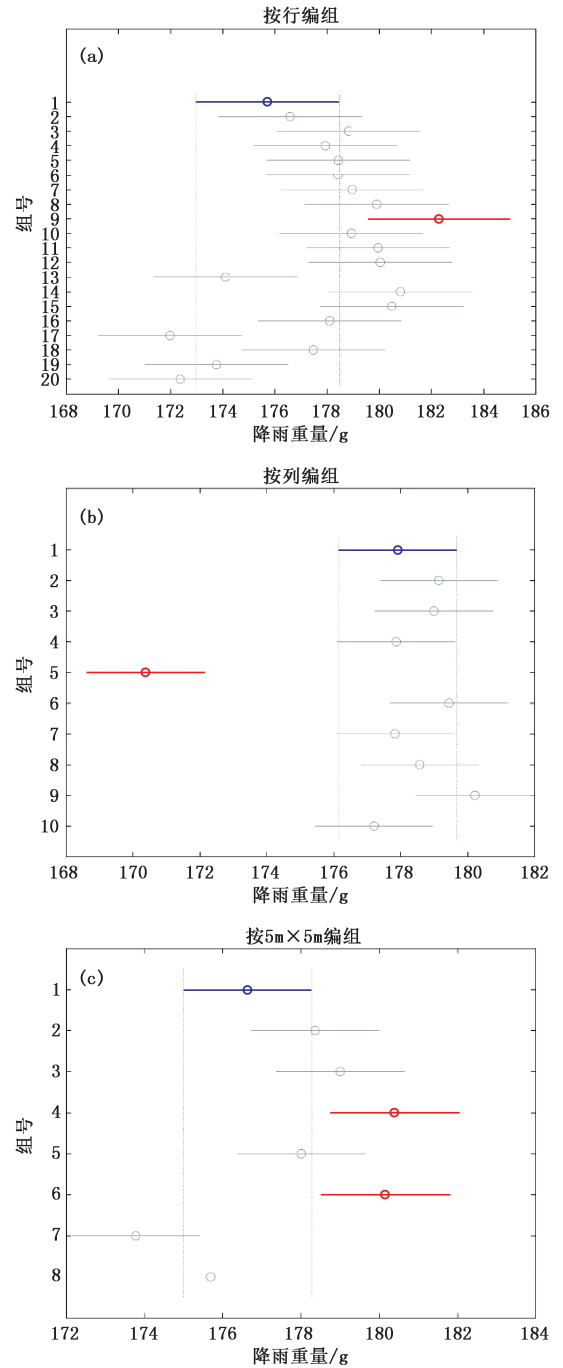


图 5 东观测网按行编组(a)、按列编组(b)、按 5 m×5 m 编组(c)的交互式多重比较图
(图中,圆圈表示各组的平均值,线段表示均值在置信水平为 95%下的置信区间;蓝色表示第 1 组,红色表示与第 1 组存在显著差异的组)

表 3 东西观测网在 3 种编组方式下的内部空间不均匀性

降雨日期	观测网方位	编组方式	内部不均匀比对象数	不均匀占比	5 m×5 m 编组内最大
				%	相对标准差/%
2017-04-16	东面	按行编组	40	22.43	2.96
		按例编组	9		
		按 5 m×5 m 编组	10		
	西面	按行编组	8	19.79	4.08
		按例编组	9		
		按 5 m×5 m 编组	2		
2017-04-25	东面	按行编组	7	9.13	7.76
		按例编组	10		
		按 5 m×5 m 编组	7		
	西面	按行编组	0	0	8.18
		按例编组	0		
		按 5 m×5 m 编组	0		
2017-05-03	东面	按行编组	16	16.35	4.86
		按例编组	15		
		按 5 m×5 m 编组	12		
	西面	按行编组	10	15.63	3.30
		按例编组	5		
		按 5 m×5 m 编组	0		

由表 3 知,较之康钊管^[11]的研究相比,分辨力为 1 m 的观测网中内部均匀性明显下降,内部区域与区域之间存在明显差异,且 5 m×5 m 编组内最大相对标准差在 2.96%~8.18%之间,存在最大相对标准差大于降雨测量仪器的最大允许误差 4%^[20],表明架设距离 ≥ 5 m 时自然雨场环境差异过大,将导致仪器比对差值不能代表仪器误差,不可取。

结合表 1 中 3 次降雨过程的信息表,内部区域与区域间的空间均匀性与降雨环境因素有关,可推测:降雨量愈小,内部空间均匀性愈高;风向风速不稳定波动愈大,风速愈大,风向变化愈快,使区域与区域间的平均降雨量愈均匀,即内部空间均匀性愈高。

3 结论

本文利用试验分析了在 10 m×10 m 和 10 m×20 m 区域内自然降雨事件的空间均匀性,结论如下:

(1)在小范围内自然降雨过程中,其空间均匀性表现良好,均匀性指标可达到 95%以上。但随着环境因素和降雨特征量的改变,自然降雨的整体空间均匀性将会发生变化。

(2)5 m×5 m 编组中内部空间均匀性较差,而在分辨力为 1 m 的观测网中均匀性良好,则在进行小型降雨测量仪器(如收集杯)的动态比对试验中,仪器之间的架设间隔取 1 m 是可行的。

本次试验只是对观测场内自然降雨的宏观特性中的空间均匀性进行了研究,未涉及观测场内自然降雨的微物理特性。下一步,将建立分辨力为 1 m 的雨滴谱仪观测网,研究观测场内自然降雨的微物理特性。

参考文献

- [1] 孙学金,王晓蕾,李浩,等. 大气探测学[M]. 北京:气象出版社, 2009.
- [2] 刘西川,高太长,刘磊,等. 降水现象对大气消光系数和能见度的影响[J]. 应用气象学报, 2010, 21(4): 433-441.
- [3] 叶柏生,杨大庆,丁永建,等. 中国降水观测误差分析及其修正[J]. 地理学报, 2007, 62(1): 3-13.
- [4] 叶柏生,杨大庆,丁永建,等. 降水观测误差修正对降水变化趋势的影响[J]. 地理学报, 2008, 30(5): 716-717.
- [5] 高太长,刘西川,刘磊,等. 降水测量仪器现状及展望[C]//气象水文海洋仪器学术交流会, 2012.
- [6] 陈传振,李爱华. 几种降水测量仪器的讨论分析[J]. 气象海洋水文仪器, 2009, 26(1): 64-65.
- [7] 张凌,吕达仁,段树,等. 降雨空间均匀性与雷达测雨空间平滑误差[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(6): 364-373.

- [8] Gires A, Tchiguirinskaia I, Schertzer D, et al. Influence of small scale rainfall variability on standard comparison tools between radar and rain gauge data [J]. *Atmosphere Research*, 2014, 138(3):125-138.
- [9] Kathiravelu G, Lucke T, Nichols P W B. Designing the perfect rainfall simulator for urban stormwater studies: an impossible dream? [C]// *Conference Proceedings on Urban Drainage*. Sarawak:13th International Conference on Urban Drainage, 2014:1-8.
- [10] 刘波, 王晓蕾, 苏腾, 等. 小尺度空间自然降雨的均匀性分析 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 17(5): 453-458.
- [11] 康钊箐, 王晓蕾, 刘波, 等. 小范围自然降雨空间均匀性的实测改进 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 18(2): 138-143.
- [12] Christiansen J E. *Irrigation by Sprinkling* [R]. California Agricultural Experiment Station Bulletin 670, University of California Agricultural Experiment Station, Berkeley, Calif, 1942.
- [13] 蒋建园, 朱兴业, 刘兴发, 等. 喷灌均匀性系数与分布均匀系数关系研究及试验验证 [J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(4): 199-203.
- [14] 韩文霆, 王玄, 孙瑜, 等. 喷灌水量分布动态模拟与均匀性研究 [J]. *农业机械学报*, 2014, 11:159.
- [15] 刘波, 王晓蕾, 康钊箐, 等. 降雨发生装置空间均匀性的研究 [J]. *地球科学进展*, 2016, 31(8):820-828.
- [16] 韩中庚. *数学建模方法及其应用* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [17] 孙秀宝, 任国玉, 任芝花, 等. 风场变形误差对冬季降雪测量及其趋势估算的影响 [J]. *气候与环境研究*, 2013, 18(2): 178-186.
- [18] 任芝花, 王改利, 邹风玲, 等. 中国降水测量误差的研究 [J]. *气象学报*, 2003, 61(5):621-627.
- [19] 李伟, 贺晓雷, 齐久成, 等. *气象仪器及测试技术* [M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [20] 王晓蕾, 慕新仓, 严金余, 等. *军用地面气象仪器教程* [M]. 北京: 解放军出版社, 2003:210-211.

Spatial Uniformity of Natural Rainfall in Observation Field

SONG Hairun¹ LUO Lun² WANG Xiaolei¹ YANG Huibing¹

(1 College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101;

2 Unit 93685 of PLA, Zhangjiakou 075000)

Abstract: In this paper, the spatial uniformity of natural rainfall is studied by using 10 m×20 m and 10 m×10 m observation networks with a resolution of 1 m. A rainfall test is carried out mainly by using self-made rainfall cups. The applied mathematical methods include Christianson's uniform coefficient, distribution uniformity coefficient, rainfall deviation coefficient, rainfall extreme ratio coefficient, and one-way ANOVA. At the same time, the problem of setting the interval of rainfall measuring instrument in dynamic comparison experiment is discussed. The results show that the spatial uniformity of natural rainfall in the observation field is good, and the uniformity index has good consistency; the wind has little effect on the spatial uniformity of rainfall in the observation field, but the difference of rainfall has some effect on the spatial uniformity; the installation interval of rainfall measuring instruments should be less than 5 m in the dynamic comparison experiment, and it is feasible for some small-scale rainfall measuring instruments to set up at a interval of 1 m, such as collecting cups.

Keywords: natural rainfall; spatial uniformity; uniformity evaluation index; erection interval