

# 气象台站网布局优化研究综述

程勇<sup>1</sup> 杨玲<sup>2</sup> 行鸿彦<sup>3</sup> 王伟<sup>3,4</sup> 王峰<sup>3,4</sup> 周勇<sup>3,4</sup>

## 摘要

气象台站网的布局优化可以提高气象台站观测资料的代表性、准确性和可比较性. 简述了气象台站网布局优化方法的国内外研究进展, 讨论了气象台站网布局优化方法的关键技术和存在的问题, 重点介绍和分析了利用线性内插法、最优内插法、信息论法、因子分析法和经验模式法来进行气象台站网的布局优化, 总结了这些方法的可行性. 结合气象业务需求变化, 提出了气象台站网布局优化方法的改进方向.

## 关键词

气象台站网; 布局优化; 最优插值

中图分类号 P46

文献标志码 A

## 0 引言

无论是从事气象、气候学的理论研究, 还是把气象科学用于为国民经济建设服务, 都离不开现有广大气象台站所获取的气象观测资料. 气象工作者往往还需要利用台站的观测资料计算出非台站位置的气象要素值. 因此, 若要根据台站的观测记录确定出所研究区域内任何一点的气象要素值, 并达到一定的精度, 就需要建立一个有科学根据的台站网体系.

根据世界气象组织规定, 基本气象台站按观测内容可划分为密度不同的3个级别. 第1类台站间距最大(可达100 km以上), 主要进行气压、日照、气温、湿度、土壤温度、降水、积雪、云量、能见度、风、天气现象的观测. 第2类台站间距适中, 它不进行日照和深层土壤温度的观测, 在平原地区也不需要进行气压观测. 第3类台站间距最小, 只进行降水、积雪和天气现象的观测. 从我国国情来看, 由于经济和人力因素, 气象观测站点的数量是极其有限的, 且站点的空间分布也是不均衡的. 气象台站网的布局优化是气象探测业务体制改进的一项重要内容. 研究气象台站网络的合理布局有以下几点重要意义.

1) 合理的气象台站网布局符合国家综合气象观测系统的发展需求, 特别是符合国家气候观测网和国家天气观测网的规划要求<sup>[1-2]</sup>. 据了解, 美国从2000年开始已经着手建立新的气候基准站网, 其对美国决策者制定适应气候变化和变率政策、提高适应气候变化能力水平具有重要意义. 因此, 我国加快基准气候观测站网的优化调整工作十分必要.

2) 合理的气象台站网布局能满足气象业务与服务新需求, 满足气象防灾减灾、应对气候变化需求<sup>[3-4]</sup>.

3) 合理的气象台站网布局能切实提高气象台站的气象观测资料的代表性、准确性和比较性<sup>[5-6]</sup>.

总之, 合理布局的气象台站网使气象台站分布趋于平衡, 能够提高气象要素观测资料的代表性、准确性和比较性, 从而使气象台站网满足国家、社会和特定行业的气象业务需求.

## 1 研究现状

自1946年, 苏联的Drozdov等<sup>[7]</sup>首先引用结构函数法开展气象台站的合理分布研究以来, 不少国家的学者相继在天气、气候、高空、

收稿日期 2011-03-24

资助项目 南京信息工程大学科研基金

作者简介

程勇, 男, 博士, 主要研究气象台站网布局优化、分布式网络. yongcheng@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 网络信息中心, 南京, 210024

2 南京信息工程大学 滨江学院, 南京, 210044

3 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京, 210044

4 南京信息工程大学 江苏省气象传感网技术工程中心, 南京, 210044

蒸发和雨量等站网的设计上做了大量的工作,形成多种气象站网布局与优化方法,如线性内插法、区域内插法(正三角形内插法、正方形内插法)、最优内插法、信息论方法、特征矢量内插法和气象观测代表性评定法、因子分析法和经验模式法等。

在国外,针对气象站网设计,原苏联起步最早. 1946年, Drozdov等<sup>[7]</sup>把结构函数作为台站网设计的一种依据,用所计算的气象要素场的结构函数来建立内插标准误差与站点间距的关系,再根据这种关系来决定台站网的密度。

1970年,世界气象组织发布了 Gandin<sup>[8]</sup>提交的一个技术报告,此报告旨在探讨苏联所进行的有关气象站网设计方面的工作,同时还介绍了 Gandin在苏联地球物理观象总台的研究成果. 关于雨量站网的平均合理间距, Gnadin 在全球范围的研究结果是中纬度平原地区为 25~30 km. 文献[8]介绍了线性内插法、区域内插法和最佳内插法,并且讨论和比较了利用这3种方法进行气象站网布局优化的优缺点,它已成为全世界已有的站网布局规划的科学依据之一. 国内很多关于气象站网布局优化的研究结果发现 Gnadin 的结论对于中国的很多地区是不适用的。

1982年,印度的 Moodly等<sup>[9-10]</sup>曾将雨量场的结构函数应用于热带站网的设计. 2004年, Schneebeli等<sup>[11]</sup>利用概率统计和模糊数学,在不同的下雪量阈值情况下,计算区域概率关系,从而确定下雪量观测站的布局. 2004年, Vose等<sup>[12]</sup>利用“消耗-获益”模型确定气候观测网络的台站密度. 2004年, Janis等<sup>[13]</sup>利用 Monte Carlo 反复样本方法来评价美国的气候站网络,发现这个气候站网络的观测资料不能准确反映美国气候的变化. 文献[14]理论分析了由于观测站网密度和布局造成的气象要素区域平均值的不确定性。

我国从20世纪80年代开始气象站网布局优化的研究. 1985年,中国气象局的廖洞贤<sup>[15]</sup>考虑观测误差、截断误差和数值天气预报的需要,给出最优相邻测站间距离、最优垂直网格和最优观测时间间隔的公式. 这些公式主要涉及天气预报所考虑的最短波长,以及最大观测误差和波幅的比,需要利用以地面和空间为基础的混合观测系统。

1986—1992年,中国气象局等单位主要采用结构函数法、相关函数法和最优插值法分别对我国江淮平原、河北平原、四川盆地等地区的气象站网进

行了一系列合理布局研究,同时还探讨了以平面内插取代线性内插的可能性<sup>[16-24]</sup>,所得的结论对这些地区现有站网的评估和新网点的布设均不乏参考意义。

1988年,王庆安等<sup>[25]</sup>及傅抱璞<sup>[26]</sup>利用我国江汉平原地面站网资料和华东地区高空站网资料,探讨了线性内插法和最佳内插法的可行性,作了一些技术性讨论,对山地站网的设计提出了初步看法。

1989年,上海市气象局的卢文芳等<sup>[27]</sup>把气象要素场的空间结构函数作为台站网设计的一种依据,初步研究了上海地区气象站网的合理分布. 利用上海地区12个台站的逐日平均温度、逐日平均相对湿度及月降水量资料,分别计算了相应要素场的结构函数,从而确定各种插值方法,例如线性内插、正三角形内插、正方形内插的内插标准误差. 然后,根据内插标准误差应小于等于观测标准误差的原则,提出上海地区二类站的最佳距离约为50 km,三类站的最佳距离约为30 km。

2007年,中国气象局国家气象中心的赵瑞霞等<sup>[28]</sup>通过统计1978—2000年北京东南低地形区有关台站在春季、夏季、秋季、冬季的逐日平均气温和水汽压的结构函数,分季节分析了该地区这2个二类气象要素的线段及平面内插精度和台站间距的对应关系,并根据内插标准误差不超过观测标准误差的原则,对上述两要素在北京东南低地形区的合理布站方案及间距进行了估算,为2008年北京奥运会气象服务系统建设中气象站网建设提供了一定的依据。

2011年,中国气象局气象探测中心的郭建侠主持公益性行业(气象)科研专项项目——地面气象要素观测环境标准研究. 该项目通过机理分析、观测试验、数值模拟、资料分析等方法,获取观测场周边建筑物、树木、热源、公路、水体以及观测场下垫面性质对温度、湿度、风、降水、辐射等主要气象要素影响的定量评价,并据此提出各类国家级气象台站的观测环境保护指标及选址标准,同时给出不同环境等级台站气象要素观测不确定度范围,为科学选址并保护观测环境以及合理使用观测数据提供技术支撑。

## 2 基于结构函数的站网布局优化方法

以结构函数为基础的站网布局优化方法有:线性内插法、区域内插法(正三角形内插法、正方形内插法)和最优内插法。

设 $f(x, y)$ 是站点 $(x, y)$ 处的气象要素值, $f'(x, y)$ 代表气象要素的距平,那么气象要素的结构函数<sup>[17]</sup>:

$$b_f(x_1, y_1; x_2, y_2) = \overline{(f'(x_1, y_1) - f'(x_2, y_2))^2}. \quad (1)$$

站点 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 之间气象要素的协方差函数:

$$m_f(x_1, y_1; x_2, y_2) = \overline{f'(x_1, y_1) \times f'(x_2, y_2)}. \quad (2)$$

假设在所讨论的地区,结构函数满足均匀和各向同性的条件,即它只是站点间距离 $l$ 的函数:

$$b_f(x_1, y_1; x_2, y_2) = b_f(l). \quad (3)$$

气象要素的观测误差包括系统误差和随机误差,使用偏差来计算各特征函数,可以消除系统误差.再假定 $\delta_f^2$ 呈均匀分布,在 $b'_f(l)$ - $l$ 图上,外推到 $l=0$ 处,会得到:

$$b'_f(0) = 2\delta_f^2. \quad (4)$$

这是实际观测值含有随机观测误差造成的结果.根据气象要素的点值内插的标准误差数值不超过观测标准误差的数值,计算最大容许误差和最大容许距离.根据不同站网密度(间距)来推算内插的误差,也可以根据不同的内插精度要求来计算新站网的密度.

## 2.1 线性内插法

线性内插法是建立在结构函数基础上,计算两站线性内插误差,以确定站间最大允许距离的统计学方法.把沿连接两相邻站的线取作 $x$ 轴,两站间的距离为 $l$ ,所以这两个站的横坐标分别为 $\xi$ 和 $\xi+l$ .因此,线段上任意一点 $\xi+x$ 的 $f'$ 值的线性内插有下列公式,表示为

$$f'(\xi+x) = \left(1 - \frac{x}{l}\right)f'(\xi) + \frac{x}{l}f'(\xi+l). \quad (5)$$

根据协方差函数的定义和随机误差的性质,可以计算出这个内插点相对于真值的内插方差.然而,大多数气象要素的结构函数有下列特点:即在线段中点上 $E$ 最大.线段中点的内插方差 $E$ 可以表示为

$$E = b_f\left(\frac{l}{2}\right) - \frac{1}{4}b_f(l) + \frac{1}{2}\delta_f^2. \quad (6)$$

这样用含有随机误差的观测资料,算出结构函数,从而可以计算出内插方差 $E(l)$ ,画出 $E(l)$ - $l$ 关系图.当给出最大容许内插标准误差 $\sqrt{E}$ 的判据条件,就可以从 $E(l)$ 图上定出两站间最大允许距离,即最佳站距.一般采用右边前两项不超过观测标准误差来确定,即 $E \leq \frac{3}{2}\delta_f^2$ 作为判据.

## 2.2 区域内插法

同样,对于边长 $l$ 的等边三角形的中心,进行线性内插的标准误差表达式为

$$E = b_f\left(\frac{l}{\sqrt{3}}\right) - \frac{1}{3}b_f(l) + \frac{1}{3}\delta_f^2. \quad (7)$$

对于边长 $l$ 的正方形的中心,进行线性内插的标准误差表达式为

$$E = b_f\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right) - \frac{1}{4}b_f(l) - \frac{1}{8}b_f(l\sqrt{2}) + \frac{1}{4}\delta_f^2. \quad (8)$$

计算所得的单一气象要素的 $E_{\max}$ 通常作为此气象要素的最大容许误差的指标,与之对应的 $l_{\max}$ 作为确定单一气象要素站网最优间距的依据.

## 2.3 最优内插法

最优内插公式的推导参阅文献[29],下面介绍具体计算过程.

令 $f'_i = f'_i(x_i, y_i)$ 为气象要素的距平,那么内插点 $(x_0, y_0)$ 的偏差为

$$f'_0 = \sum_{i=1}^n p_i f'_i, \quad (9)$$

其中, $p_i$ 代表各已知点尚未确定的内插权重.

由已知点的协方差函数和观测标准误差来确定 $n$ 个权重 $p_i$ .还可以进一步得到一个更简单的 $E$ 的表达式:

$$E_{\text{opt}} = m_{00} - \sum_{i=1}^n p_i m_{i0}. \quad (10)$$

因此,应在 $\sqrt{E_{\text{opt}}}$ 过大的地方增加站点或在 $\sqrt{E_{\text{opt}}}$ 过小的地方减少站点.

针对某一地区使用线性内插法进行气象台站网的布局优化,该地区必须已有相当一批站点进行了多年观测,取得一批具有时空代表性的资料.线性内插所提供的只是整个研究区域线性内插标准误差与站间距离关系的综合、平均结果,虽然人们可据此根据所需的内插精度对研究区的现有站网确定增减数目,却不能据此确定或撤站的具体位置.而最佳内插法可根据所需的内插精度,确定增加或者撤消站点的具体位置,但它并不能提供研究区内所需站点的具体数目.

## 3 站网布局优化的其他方法

从1984年开始,一些新的方法开始应用于气象台站网设计<sup>[18]</sup>,如信息论方法、因子分析法、经验模式法、特征矢量内插法和气象观测代表性评定法等,下面重点介绍前3种方法.

### 3.1 信息论方法

气象站网的规划是一项涉及到时、空范围内多变量现象的研究课题. 为了提高现有气象站网的效益, 研究现有台站所有可能的多变量组合是十分必要的. 在一个拥有大量台站的研究区域里, 考虑多变量所有可能的组合在计算上是不可能的. 为了解决这种复杂问题, 可以应用信息理论. 该理论使某一子区域内的一组台站所传送的有关另一子区域的信息减至最少, 将某一测点的总信息量分解为该点所在子区域共有的内部信息和其他台站提供的该测点的信息. 为了更好理解分区结果的意义, 提高这一方法的空间分辨率, 下面着重介绍 3 站为一组的分类法.

先考虑平均信息量与信息的关系. 在某气象站实际气象输入量“ $Z$ ”具有可能的离散值  $z_i, i = 1, 2, 3, \dots, N$ , 它在气象站以变量“ $X$ ”被测出, 其值为  $x_j, j = 1, 2, 3, \dots, N$ . 分别用  $P(z_i)$  和  $P(x_j)$  表示事件  $z_i$  和  $x_j$  的概率分布, 它们的联合概率分布用  $P(z_i, x_j)$  表示. 用  $I(z_i, x_j)$  表示  $x_j$  所传送的有关  $z_i$  的信息 (以比特为单位), 它与  $P(z_i)$  和  $P(x_j)$  有关. Shannon 将其定义为

$$I(z_i, x_j) = \log_2 P(z_i/x_j) - \log_2 P(z_i). \quad (11)$$

全部输入/输出事件的组合所传送的平均信息是每对可能的输入/输出事件所传送的信息乘以它们出现的概率之和. 由此可得

$$I(Z, X) = H(X) + H(Z) + H(X, Z). \quad (12)$$

根据平均信息量的定义, 有

$$H(X) = - \sum_j P(x_j) \cdot \log P(x_j), \quad (13)$$

$$H(Z) = - \sum_i P(z_i) \cdot \log P(z_i), \quad (14)$$

$$H(Z, X) = \sum_i \sum_j P(z_i, x_j) \log P(z_i, x_j). \quad (15)$$

可以将整个区域分成若干个子区域, 然后计算这些子区域中各种可能组合的交互信息量, 以便评价每个子区内的台站网密度, 但要计算所有这些组合是不可能的. 因此, 有必要探索简化的、3 站为一组的分区方法. 3 站为一组的分区法很简单, 对于地区性气象研究来说在计算上是可行的. 假设 3 个站的待测变量为  $X_1, X_2, X_3$ . 经过推导, 组间的信息可以简化为

$$I(X_1, X_2, X_3) = H(X_1) + H(X_2) + H(X_3) - H(X_1, X_2, X_3). \quad (16)$$

但是, 由  $X_3$  传输的  $X_2$  信息为

$$I(X_2, X_3) = H(X_2) + H(X_3) - H(X_2, X_3). \quad (17)$$

因此, 内部信息的增加仍是  $X_1$  与  $X_2$  和  $X_3$  联合的结果, 即

$$\Delta I_{\text{int}}(X_1) = I(X_1, X_2, X_3). \quad (18)$$

由于  $X_1$  与  $(X_2, X_3)$  联合而增加的净信息量用  $\Delta I_{\text{net}}(X_1)$  表示, 即为

$$\Delta I_{\text{net}}(X_1) = H(X_1, X_2, X_3) - H(X_2, X_3). \quad (19)$$

进一步推导可得

$$H(X_1) = \Delta I_{\text{int}}(X_1) + \Delta I_{\text{net}}(X_1). \quad (20)$$

这里  $H(X_1)$  是  $X_1$  的总信息量;  $\Delta I_{\text{int}}(X_1)$  是由  $X_1, X_2$  和  $X_3$  构成的三角区中  $X_1$  的内部信息. 式(20)表明: 一个站提供的总信息量等于它的资料平均信息量. 这一总信息量包括两部分:

- 1) 本小组内部信息量  $\Delta I_{\text{int}}(X_1)$ ;
- 2) 由于联合而增加的净信息量  $\Delta I_{\text{net}}(X_1)$ .

在一个具有一定密度及空间分布的站网里, 可以预料所有站都会对其邻近小组提供  $\Delta I_{\text{net}}(X_1)$  的相似数值, 这并不意味着所形成的各三角单元应该具有规则的形状或相等的面积, 这些三角单元形状与面积的差异应该反映出被监视的气象场的空间不均匀性.

将整个研究区域分为若干个可能的三角区图. 利用一致的观测资料和内部信息量  $\Delta I_{\text{int}}$  公式、净信息量  $\Delta I_{\text{net}}$  公式计算出每个站的平均信息量, 3 站一组形成的子区的平均信息量, 以及每 3 站为一组的  $\Delta I_{\text{net}}$  和  $\Delta I_{\text{int}}$ .  $\Delta I_{\text{net}}$  的大小与该台站与该区其他台站之间的交互作用成反比, 即如果净信息量高, 说明该台站与该区其他台站之间的交互作用差, 那么就要在该地区增加台站, 反之, 撤消台站.  $\Delta I_{\text{int}}$  的大小代表该区域的台站输出信息量的大小, 如果内部信息量大, 说明该区域的台站输出信息量大, 进一步说明该区域的台站设置过密, 反之说明该区域的台站设置稀少.

使用信息论方法进行台站网设计, 适合观测资料比较多的地区和单一气象要素的站网设计.

### 3.2 因子分析法

此法将对试图确定气候均匀区的可能性进行探讨, 并提出一种方法, 据此可确定某区域在气候上复杂与否, 进而对台站的最佳数量作出估计.

气候区域的划分基本有 3 种方法:

- 1) 根据人为的主观方法, 它假定区域上气候均匀;
- 2) 根据农田的利用来划定农业气候区;
- 3) 根据基本的地形特点来划分区域, 例如, 在

地图上沿海平原、内陆山区、内陆凹地、沼泽地、高原以及大城市的周围画上线条。

为站网设计需要而划分气候区的上述3种方法,其可行性也许相同,也许不同,但它们都留下一个难以解决的问题,即如何在更复杂的地区决定台站的数量。下面介绍确定气候均匀区的因子分析。有学者已描述过因子分析在区域质量控制上的应用。区域质量控制过程的基础是表示某天( $i$ )某站( $j$ )的气候要素:

$$X_{ij} = a_{i1}f_{1j} + a_{i2}f_{2j} + \dots + a_{in}f_{nj} + \gamma_{ij}. \quad (21)$$

其中 $f_{1j}, f_{2j}, \dots, f_{nj}$ 是 $j$ 站的因子, $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$ 是 $i$ 日的因子权重, $\gamma_{ij}$ 是这个特定日的误差或者残差。已经发现,总方差的85%可用前15个因子( $f_{1j}, f_{2j}, \dots, f_{15j}$ )及其相应的权重( $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i15}$ )来描述。

这些因子由各站的物理特征或物理特征的组合所决定,而因子权重则取决于天气形势。因此在西风带形势下,考虑温度时,纬度因子显得很重要,其相应的权重亦很高,反之在反气旋形势下,当考虑最低温度时,代表夜间辐射因子的权重将很高。那些在相似天气形势下受到相似影响的台站将具有相似的因子。因此,通过选择具有相似因子值的台站归组的方法来确定气候均匀区的努力似乎是合乎逻辑的。这种选择或分组可用很多方法来实现,这里选择了“聚类法”。

聚类过程是通过确定15维因子空间的台站间距离来进行的,即

$$d_{ij}^2 = \sum_{k=1}^{15} (f_{ik} - f_{jk})^2. \quad (22)$$

其中 $d_{ij}$ 是台站 $i$ 和 $j$ 之间的距离, $f_{ik}$ 和 $f_{jk}$ 是这2个站上的第 $k$ 次因子。这种聚类法先产生一定数量的组数,同组内台站之间在因子空间上比其他组的台站更为接近,然后,用主观或者客观方法可将归为一组的台站用线条围起来。根据站网设计要求在各个区域内增加或者撤消台站。

对于某些特定的要素而言,这样的地点可能在气候上很相似,尽管彼此相距甚远并分属不同的气候区。对不同要素进行分析的复杂程度是不同的,这一方面取决于具有本研究所需资料台站的数量,另一方面取决于地形对所考虑要素的印象。虽然有若干相当大的区域对于一两个要素来说是气候均匀的,但是毕竟还存在着其他结构复杂的地区,在这些地区,地形起着很重要的作用。研究结果还显示出对于一个要素来说是结构简单的地区,对另一个要素就可能显得结构复杂了。因此,对于一个要素来说气

候均匀的地区,对另一个要素就不一定是气候均匀区。所以,试图应用因子分析法来划定气候均匀区是行不通的,主要是因为这种方法不可能对全部要素确定唯一的一组区域。根据单一要素来确定站网要求的分析仅适用于拥有足够数量的台站来进行聚类分组的地区。

### 3.3 经验模式法

雨量站网的规划密度是各界关心的问题。气象观测网中最复杂的问题就是如何确定雨量站网的密度。由于降水不仅有量的差异,而且降水形式也有很大的差异,因而,必须考虑如何减少因降水形式不同而引起的误差。以站网推求暴雨面积雨量尚有误差,涉及点降水的站网密度更难以考虑。

在同一精度要求下,测站控制面积愈大,所得的标准误差愈大,如要求推估的降水精度更高,则必须设置较密的站网。此外,雨量站的设置,应参考雨量的分布情形(尤其是暴雨中心),故山区雨量站的密度应较平地为密(我国台湾地区正好相反)。从水文预报角度看,面积雨量比点雨量重要,因此,某地区雨量站网的数目要能精确求得区域降水分布。虽然确定站网密度必须考虑的因素颇多,诸如气候、地形、区域发展情况、用途、预算以及观测人员等,但是真正能符合此要求者不多。

联合国水利专家曾建议,我国台湾雨量站网的设计可依下式加以估算<sup>[18]</sup>:

$$N_p = \frac{K' \times A}{1\ 000} \times P_d^{0.615}. \quad (23)$$

式中 $N_p$ 为雨量站数目; $A$ 为陆地面积; $P_d$ 为每平方公里人口数; $K'$ 为常数,与资源开发利用情况有关,对台湾省可用 $K' = 0.645$ 。

## 4 未来研究方向

线性内插与最优插值法的研究基础都是建立气象要素的结构函数,而且都需要假定在所研究区域气象要素场满足均匀和各向同性的条件。线性内插、最优插值等方法能用于平原地区的气象站网布局与优化,但是对于特定地区,如地形复杂、高差悬殊的山区丘陵是不合适的。对已有的气象台站网布局优化工作总结如下。

1) 这些工作没有研究气象台站观测要素的合理配置。由于任何气象要素场都存在着时间间隔的自相关和空间间隔的协相关,而且其相关性往往随着时空间隔的增大而减小。在同一地区,特别是在山

区,对不同气象要素进行分析的复杂程度是不同的.对于某个气象要素来说是结构简单的地区,对另一个气象要素就可能显得结构复杂了.因此有必要对单个台站观测要素的配置进行深入研究.

2) 已有研究往往存在着气象要素的各向同性和均匀性的假设.然而,由于气象观测环境差异性和中小尺度大气扰动,气象要素的偏差和测站之间的相关系数既不是各向同性,也不均匀.

3) 已有研究缺少对气象要素环境影响因子的考虑.大气系统是一个复杂的非线性系统,气象要素的空间分布受到环境影响的因素很多,如地形、坡向、植被等<sup>[30-32]</sup>.例如,山区的站网密度一般大于平原地区,因为山区气候变化时空差异大,单站的时空代表性范围小,因此山区台站网布局要考虑地形和海拔高度等环境影响因子对气象要素的影响.

4) 已有研究没有考虑融合多种观测资料.2009年,中国气象局的《综合气象观测系统发展规划》明确指出:在“十二五”末,我国将形成地基、空基、天基观测有机结合、优势互补、布局合理、基本满足需求的综合气象观测系统.因此,气象台站网的布局优化方法也应该考虑融合多种数据源的观测资料,增强气象台站网布局的科学性.

5) 已有研究不能适应气象业务和气候变化的新需求.气象台站网的布局优化不仅要从气象业务的观点来研究,还应该在此基础上再补充考虑台站观测资料所服务的对象,特别是对天气敏感的行业和部门.不同的气象服务应该有不同的气象台站网布局设计方法和优化方法.

在未来,可以在下面2个方向上展开研究.

1) 观测系统业务布局研究.在对现有站网布局评估的基础上,开展国家气候观测网、国家天气观测网、区域气象观测网和专业气象观测网的布局设计研究,提出站点布局、观测要素设置、观测项目配置等优化方案.

2) 深化需求分析,通过开展对现有观测系统影响研究和新观测系统模拟试验研究,提出气候系统的关键区和天气的敏感区,为现有观测系统的优化利用、新观测系统布局设计和技术标准等提供科学依据.针对专业性气象保障服务的需求,加强专业性气象观测网的规划设计,建立健全相应的业务规范、技术标准和业务流程,推进专业性气象观测网建设.按照增强区域天气气候代表性,增加资料薄弱区观测密度,强化灾害性、关键性和转折性天气观测,提高专

业气象观测针对性的原则,研究并提出气象观测站布局优化方案.

## 参考文献

### References

- [1] 中国气象局.综合气象观测系统发展规划(2010—2015年)[R].2009  
China Meteorological Administration. Integrated meteorological observing system development plan(2010—2015) [R]. 2009
- [2] THORPEX 中国委员会.中国观测系统研究与可预报性试验计划(THORPEX-China)[R].2005  
THORPEX-China Committee, The observing system research and predictability experiment: A world weather research program-China(THORPEX-China) [R]. 2005
- [3] 中国气象局.区域气象观测站建设指导意见[R].2008  
China Meteorological Administration. Regional meteorological observation station construction guidance [R]. 2008
- [4] 中国气象局.综合气象观测系统发展指导意见[R].2009  
China Meteorological Administration. Integrated meteorological observing system development guidance [R]. 2009
- [5] 周成霞,吴兴洋,潘徐燕.铜仁国家基本站气象要素代表性、连续性分析[J].贵州气象,2010,34(2):20-22  
ZHOU Chengxia, WU Xingyang, PAN Xuyan. Analysis of representativeness and continuity of meteorological elements of Tongren national basic station [J]. Journal of Guizhou Meteorology, 2010, 34(2): 20-22
- [6] 高媛媛,何金海,王自发.城市化进程对北京区域气象场的影响模拟[J].气象与环境学报,2007,23(3):58-64  
GAO Yuanyuan, HE Jinhai, WANG Zifa. Simulation for impact of urbanization on meteorological conditions in Beijing area [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2007, 23(3): 58-64
- [7] Drozdov O A, Shepelevskii A A. The theory of interpolation in a stochastic field of meteorological elements and its application to meteorological map and network rationalization problems[J]. Trudy Niu Gūgms Series, 1946, 1: 13
- [8] Gandin L S. The planning of meteorological station networks (technical note No. 111) [R]. Geneva: WMO No. 265, 1970
- [9] Mooley D A, Mohamed Ismail P M. Structure functions of rainfall field and their application to network design in the tropics [J]. Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology Series B, 1982, 30(1/2): 95-105
- [10] Mooley D A, Mohamed Ismail P M. Correlation functions of rainfall field and their application in network design in the tropics [J]. Pure and Applied Geophysics, 1982, 120(2): 249-260
- [11] Schneebeli M, Laternser M. A probabilistic model to evaluate the optimal density of stations measuring snowfall [J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43(5): 711-719
- [12] Vose R S, Menne M J. A method to determine station

- density requirements for climate observing networks[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(15): 2961-2971
- [13] Janis M J, Hubbard K G, Redmond K T. Station density strategy for monitoring long-term climatic change in the contiguous United States[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(1): 151-162
- [14] Pai Mazumder D, Mölders N. Theoretical assessment of uncertainty in regional averages due to network density and design[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(8): 1643-1666
- [15] 廖洞贤. 最优测站距离、最优垂直分层和最优观测时间间隔的决定[J]. *气象学报*, 1985, 43(2): 153-161  
LIAO Dongxian. Determination of the distance between two neighboring stations, the vertical increment and the observational time interval in optimum sense[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1985, 43(2): 153-161
- [16] 杨贤为. 江淮平原雨量站网的合理分布研究[J]. *安徽气象*, 1986(4): 26-29  
YANG Xianwei. Research on rational planning of rainfall network in Jianghuai plain[J]. *Anhui Meteorology*, 1986(4): 26-29
- [17] 何素兰. 河北平原气象台站网合理布局探讨[J]. *河北气象*, 1986(4): 73-79  
HE Sulan. A study of rational planning of meteorological station networks in Hebei plain[J]. *Hebei Meteorology*, 1986(4): 73-79
- [18] 张强, 杨贤为, 何素兰, 等. 几种气象台站网设计方法简介[J]. *气象科技*, 1987(4): 92-96  
ZHANG Qiang, YANG Xianwei, HE Sulan, et al. Brief introduction to several kinds of methods for meteorological station networks design[J]. *Meteorological Science and Technology*, 1987(4): 92-96
- [19] 杨贤为, 何素兰. 江淮平原二类气象站网的设计[J]. *气象学报*, 1987, 45(1): 104-110  
YANG Xianwei, HE Sulan. The planning of the second group meteorological networks over Jianghuai plain[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1987, 45(1): 104-110
- [20] 杨贤为, 唐国利. 最佳内插法在气象站网设计中的应用[J]. *气象学报*, 1990, 48(3): 374-378  
YANG Xianwei, TANG Guoli. The application of optimum interpolation in meteorological network design[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1990, 48(3): 374-378
- [21] 杨贤为, 何素兰, 张强. 四川盆地气温相关函数场的分析及其在站网设计中的应用[J]. *大气科学*, 1990, 14(4): 497-503  
YANG Xianwei, HE Sulan, ZHANG Qiang. Analysis of SICHUAN basin correlation function field of lapse rate and its application in meteorological network design[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1990, 14(4): 497-503
- [22] 杨贤为, 苏米扬. 四川盆地蒸发站网的合理布局探讨[J]. *应用气象学报*, 1991, 2(1): 106-112  
YANG Xianwei, SU Miyang. A study of rational distribution of the evaporation networks in the Sichuan basin[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1991, 2(1): 106-112
- [23] 张强, 杨贤为. 雨量站网的合理布局研究[J]. *南京气象学院学报*, 1992, 15(2): 111-118  
ZHANG Qiang, YANG Xianwei. A study on rational distribution of rain gauge networks[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1992, 15(2): 111-118
- [24] 崔伟强. 雨量站网的设计: 江汉平原雨量站网合理分布[J]. *气象*, 1987, 13(4): 25-27  
CUI Weiqiang. The designing of rainfall network[J]. *Meteorological Monthly*, 1987, 13(4): 25-27
- [25] 王庆安, 顾亚进. 气象台站网设计的探讨[J]. *气象科学*, 1988(3): 72-80  
WANG Qingan, GU Yajin. An approaching on the planning of meteorological station networks[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 1988(3): 72-80
- [26] 傅抱璞. 山地气候要素空间分布的模拟[J]. *气象学报*, 1988, 46(3): 319-326  
FU Baopu. Simulation of the distribution of climatic elements in mountainous areas[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1988, 46(3): 319-326
- [27] 卢文芳, 王永华. 空间结构函数在上海地区气象站网设计中的应用[J]. *南京气象学院学报*, 1989, 12(3): 325-332  
LU Wenfang, WANG Yonghua. The application of spatial structure functions to the design of weather station networks in the SHANGHAI area[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1989, 12(3): 325-332
- [28] 赵瑞霞, 李伟, 王玉彬, 等. 空间结构函数在北京地区气象观测站网设计中的应用[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(1): 94-101  
ZHAO Ruixia, LI Wei, WANG Yubin, et al. The application of spatial structure functions to the design of weather station networks in Beijing area[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, 18(1): 94-101
- [29] 张玉玲. 数值天气预报[M]. 北京: 科学出版社, 1986  
ZHANG Yuling. Numerical weather prediction[M]. Beijing: Science Press, 1986
- [30] 郭建侠, 戴永久, 雷蕾, 等. MODIS 卫星反演地表覆盖对陕北地区降雨过程模拟的影响[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2007, 43(3): 279-283  
GUO Jianxia, DAI Yongjiu, LEI Lei, et al. A study of MODIS inverted vegetation impacts on modeling rainfall of MM5 in the Northern Shaanxi[J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2007, 43(3): 279-283
- [31] 曾燕, 邱新法, 何永健, 等. 复杂地形下黄河流域月平均气温分布式模拟[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(6): 774-786  
ZENG Yan, QIU Xinfa, HE Yongjian, et al. Distributed modeling of monthly air temperatures over the rugged terrain of the Yellow River Basin[J]. *Science in China D: Earth Sciences*, 2009, 39(6): 774-786
- [32] 于杰, 曾文华, 王建刚. 中国东南地区气象要素场线性内插标准误差初步分析[J]. *解放军理工大学学报: 自然科学版*, 2003, 4(5): 95-99  
YU Jie, ZENG Wenhua, WANG Jiangang. Analysis of linear interpolative standard error about meteorological element field in the southeast China[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science*, 2003, 4(5): 95-99

# A survey on the planning and optimization of meteorological station networks

CHENG Yong<sup>1</sup> YANG Ling<sup>2</sup> XING Hongyan<sup>3</sup> WANG Wei<sup>3,4</sup> WANG Feng<sup>3,4</sup> ZHOU Yong<sup>3,4</sup>

1 Network Information Center, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Binjiang College, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

4 Jiangsu Technology and Engineering Center of Meteorological Sensor Network,  
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** Reasonable planning and optimization of meteorological station networks could improve the representativeness, accuracy and comparability of observation data. This paper summarizes research progress in methods for the planning and optimization of meteorological station networks at home and abroad. It points out the key technology and existing problems in planning and optimization of meteorological station networks. It mainly introduces and analyses linear interpolation method, optimum interpolation method, information theory method, factor analysis method and empirical mode method to plan and optimize the meteorological station networks. This paper also summarizes the feasibility of these methods. According to requirement changes of meteorological service, this paper put forward the suggestions for methods of planning and optimization of meteorological station networks.

**Key words** meteorological station networks; planning and optimization; optimum interpolation