

# 变差函数理论在湿季降水量推算全年降水量中的应用

赵楠楠, 杨振京\*, 杨庆华, 宁凯 (中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050803)

**摘要** 基于石家庄市 16 个气象站点 1981—2010 年逐日降水资料, 根据变差函数理论分析并获取了时间变差函数参数, 利用该参数作为克里金插值的约束信息推算全年降水量。结果表明, 湿季(5—9 月)推算结果明显优于其他时段, 且具有较强的稳定性; 该时段的推算误差率普遍小于 11%, 误差率的平均值为 -1.24%, 可作为推估全年降水量的有效方法。

**关键词** 时间变差函数; 降水量; 克里金插值; 降水特征; 湿季

**中图分类号** P 331 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2019)12-0225-06

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.12.062

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Application of Semi-variogram Theory in Estimating Annual Precipitation in Wet Seasonal Precipitation

ZHAO Nan-nan, YANG Zhen-jing, YANG Qing-hua et al (Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050803)

**Abstract** Based on the daily rainfall data at 16 meteorological stations in Shijiazhuang from 1981 to 2010, the semi-variogram was analyzed to calculate the variogram parameters (range; sill and nugget), and then the annual precipitation was estimated by Ordinary Kriging (OK) interpolation constrained by these parameters. The results showed that the estimated precipitation of wet season was closer to the actual precipitation compared to others periods and more stability. The calculated error rates of test data in Shijiazhuang were normally less than 11% and the mean error rate was -1.24%. It indicated that time semi-variogram was an useful method to estimate annual precipitation under the condition of wet seasonal precipitation was known.

**Key words** Time semi-variogram; Precipitation; Kriging interpolation; Precipitation characteristics; Wet season

连续可靠的降水数据是水文分析、水资源管理和气候研究的重要前提。但是, 受人为、经济和气候等因素影响难以获取连续、完整的降水数据, 因此通过已有数据推算补全缺失资料就显得十分必要。气候要素本身就是一个随机变量<sup>[1]</sup>, 统计学方法是气候学家们用来研究气候要素常用的方法。利用统计学方法研究降水的文献很多, 主要是针对其时空分布<sup>[2-4]</sup>、频数<sup>[5]</sup>、降水周期<sup>[6]</sup>、强度特征<sup>[5]</sup>和变化趋势<sup>[7-8]</sup>、预估<sup>[9]</sup>等。降水资料缺失主要分为 2 个方面: 空间资料缺失, 如王刚等<sup>[10]</sup>通过与该站临近的、相关性高的站点补齐缺失数据; 时序资料缺失, 张强等<sup>[11]</sup>用三次样条函数内插方式补齐缺失数据; 晏利斌<sup>[7]</sup>利用多元回归插值方法补齐缺失数据; 张志萍等<sup>[12]</sup>则通过雨量站分区利用相关站点汛期降水量占全年比率插补全年降水量。通常, 气象站点有完整的湿季降水资料而缺少全年完整数据, 如张志萍等<sup>[12]</sup>曾指出大理河流域许多雨量站只记录了 5—10 月份的降水资料, 显然其不能代表年降水量, 所以需要湿季降水数据扩推全年降水量。然而, 对于年内缺失湿季之外降水推算全年降水量的研究很少。变差函数是研究变量空间变化极为有利的工具, 是地质统计学的基本内容之一, 利用地质统计学研究降水<sup>[13-14]</sup>、水位<sup>[15]</sup>等水文参数空间变异特征取得了较好的研究效果。因此, 笔者选取石家庄 16 个气象站点的累年逐日降水资料, 分析、获取各站点时间变差函数参数, 以这些参数为插值约束进而通过湿季降水量推算全年降水量。

## 1 资料与方法

**1.1 数据来源** 中国气象局气象数据中心开放全国国家级站点地面气象资料, 覆盖了绝大多数的县级区域。该研究整理和分析了经中国气象局检验修正后(包括 16 个县站点 1981—2010 年累年逐日降水量、石家庄站点 1955—2015 年逐月降水量)的地面气象资料, 这些资料具有可靠性高、时间连续性好等特点, 得到广泛认可<sup>[10]</sup>。

**1.2 时间变差函数** 变差函数是用来研究区域变量的空间变化特征的有力工具, 根据变差函数的研究理论, 把变差函数中的位置和距离替换为时间和时间差, 则可以用来分析变量的时间相关性, 称其为时间变差函数<sup>[16]</sup>, 时间变差函数  $\gamma(t, f)$  可表达为:

$$\gamma(t, f) = \frac{1}{2} E[Z(t) - Z(t+f)]^2 \quad (1)$$

式中,  $t$  代表时间,  $f$  代表随机过程中的时间间隔,  $Z(t)$  为  $t$  时刻随机变量的取值,  $E[\cdot]$  为随机变量的期望。如果假设随机过程是二阶平稳的, 时间变差函数表达为:

$$\gamma(f) = \frac{1}{2} E[Z(t) - Z(t+f)]^2 \quad (2)$$

根据变差函数理论, 当  $f=0$  时,  $\gamma(f)$  的取值最小, 两者之间的相关性最强; 在  $f$  趋于变程( $\alpha$ )的过程中  $\gamma(f)$  值逐渐增大, 两者之间大的相关性随之减小; 当  $f>\alpha$  时,  $\gamma(f)$  值不再改变, 两者之间没有相关性。

由于受实际取样有限等因素的影响, 需先制作试验变差函数, 试验变差函数计算公式为:

$$\gamma^*(f) = \frac{1}{2N(f)} \sum_{i=1}^{N(f)} E[Z(t_i) - Z(t_i+f)]^2 \quad (3)$$

式中,  $N(f)$  是  $f$  间隔下样本点对的数目。试验变差函数确定之后, 通过一种合适的理论变差函数对其进行拟合, 从而形

**基金项目** 中国地质科学院基本科研业务费专项 (YYWF201627); 国家自然科学基金项目 (41702283)。

**作者简介** 赵楠楠 (1991—), 女, 山东东营人, 硕士研究生, 研究方向: 第四纪气候演化。\* 通信作者, 研究员, 博士, 硕士生导师, 从事第四纪孢粉研究。

**收稿日期** 2019-04-03

成理论变差函数模型。常用的变差函数理论模型有球状模型、高斯模型、指数模型、线性模型等,由于球状模型可以较好地拟合各站点试验变差函数计算结果,故该研究使用的理论模型为球状模型,其表达式为:

$$\gamma(f)=\begin{cases} C_0 & f=0 \\ C_0+C(\frac{3}{2}\frac{f}{\alpha}-\frac{1}{2}\frac{f^3}{\alpha^3}) & 0<f\leq\alpha \\ C_0+C & f>\alpha \end{cases} \quad (4)$$

式中, $C_0$ 为块金效应, $C$ 为基台值, $C_0+C$ 为总基台值。

**1.3 时间变差函数方法的步骤与原则** ①对研究区周边地区站点的累年逐日降水资料进行整理与分析,获得研究区相关站点的时间变差函数各项参数。如果研究区有气象站点,可直接使用该站点通过分析后的变差函数参数;如果没有站点,则可以通过周边站点插值后获取。②获取累年逐日最大降水量( $P_{day}$ )以及累年逐月最大降水量( $P_{month}$ )。分析研究区湿季各月降水量,超过 $P_{month}$ 降水量的月份把超出降水量分配给邻月,优先分配给邻月降水量大的月份;月间降水量分配完毕之后,进行月内降水量分配,月内每天的降水量以 $P_{day}$ 优先分配,不能以整数天分配 $P_{day}$ 的, $P_{day}$ 分配完后,最后一天分配剩余降水量,把这些分配降水的天放置在该月中间。③利用第一步获得的时间变差函数各项参数作为约束,对湿季的日降水量进行普通克里金插值,最后提取该年每天降水量,求和后即可得到该年的全年降水量。

2 石家庄地区年降水特征

石家庄气象站点在 20 世纪 50 年代中期就有连续且完整的年降水资料,其中 5—9 月多年平均降水量占全年降水量的 80%以上,因此该研究中把该时段定义为研究区的湿季。选取石家庄站点的 1955—2015 年的逐月降水资料,计算每年湿季降水量占该年降水总量的比率(图 1)。从图 1 可以看出,近 61 年石家庄地区年降水量变化幅度较大,其中 1996 年降水量最大,高达 1 097.1 mm,1972 年降水量最小,仅

226.0 mm,两者数量悬殊相差甚大。从比率曲线可以看出,石家庄湿季降水量( $P_{wet}$ )占该年降水量的比率变化范围也较大,在 1968 年比率最小,仅 55.04%,在 1988 年比率最大,达 97.72%,几乎全年降水量都在湿季完成,同时也反映了年内降水量的分配也是极不均匀的。此外,降水量最多(最少)的年份,其占全年降水比率并不是最大(最小),且每年比率各不相同,因此常规的方法难以推算该区年降水量。

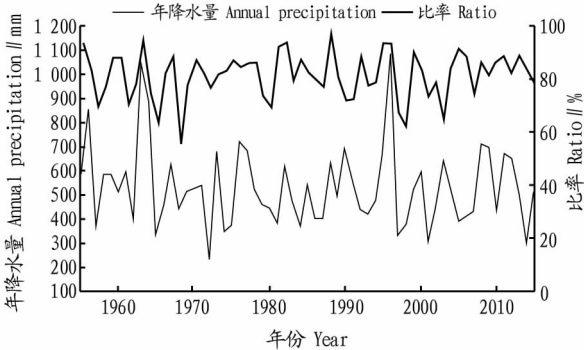


图 1 1955—2015 年石家庄年降水量及湿季降水量占全年的比率变化  
Fig.1 Annual precipitation and ratio change in Shijiazhuang from 1955 to 2015

3 时间变差函数方法在石家庄地区的应用

**3.1 石家庄市气象站点累年逐日降水资料相关性分析** 通过对收集到的石家庄 16 个县站点累年逐月、累年逐日降水数据统计与分析,发现累年逐月、累年逐日数据通过球状模型都可以很好地拟合原始数据。但是,经进一步研究(以行唐为例),发现累年逐月降水数据规律性较差(图 2),虽然根据原始数据可以较好地拟合变差函数,但其可能是由于数据点太少而造成的“假象”,如果将其应用到后期的插值过程中,可能会产生较大的误差,从而导致错误的结果,因此该研究仅对累年逐日降水数据的时间变差函数进行分析与利用。

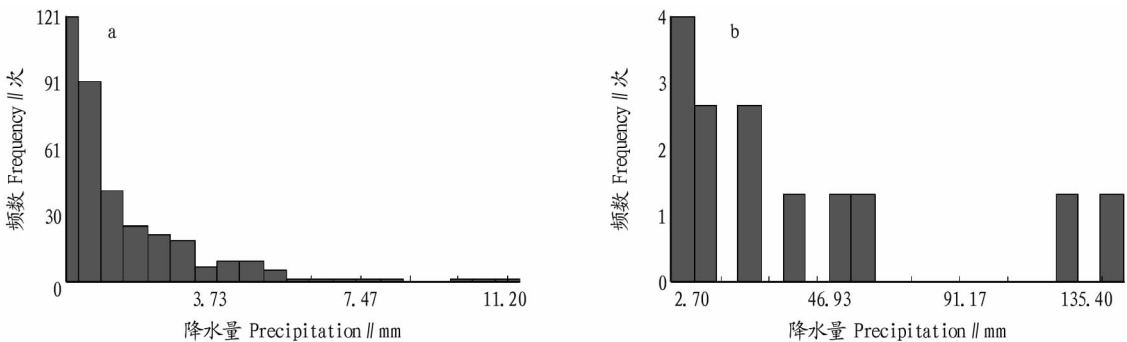


图 2 行唐县气象站累年逐日(a)、逐月(b)降水数据频数分布  
Fig.2 The frequency of annual daily precipitation(a) and annual monthly precipitation(b) in Xingtang County

石家庄 16 个县站点累年逐日降水数据都符合正态分布规律,满足高斯域变差函数基本要求。各站点试验时间变差函数的拟合结果见图 3(一维随机变量),通过球模型可以很好地拟合原始数据( $R^2$  均在 0.94 以上),拟合出的各项参数见表 1。从图 3 和表 1 可以看出,各站点之间的块金效应不

同,变化范围较大,为 0.54~1.40,相差近 2 倍;基台值为 5.124~7.976,变程为 136.4~144.2,它们主要受控于累年日降水量多少及其时间分布。平山站点的块金效应最大(1.40),但是其变程不是最大的;同样,行唐的块金效应最小(0.54),其变程并不是最小的。上述情况可以用变差函数性质解释:

变程越大,随机变量的非均质性越小,但块金效应增大会在一定程度上增加随机变量的非均质性。

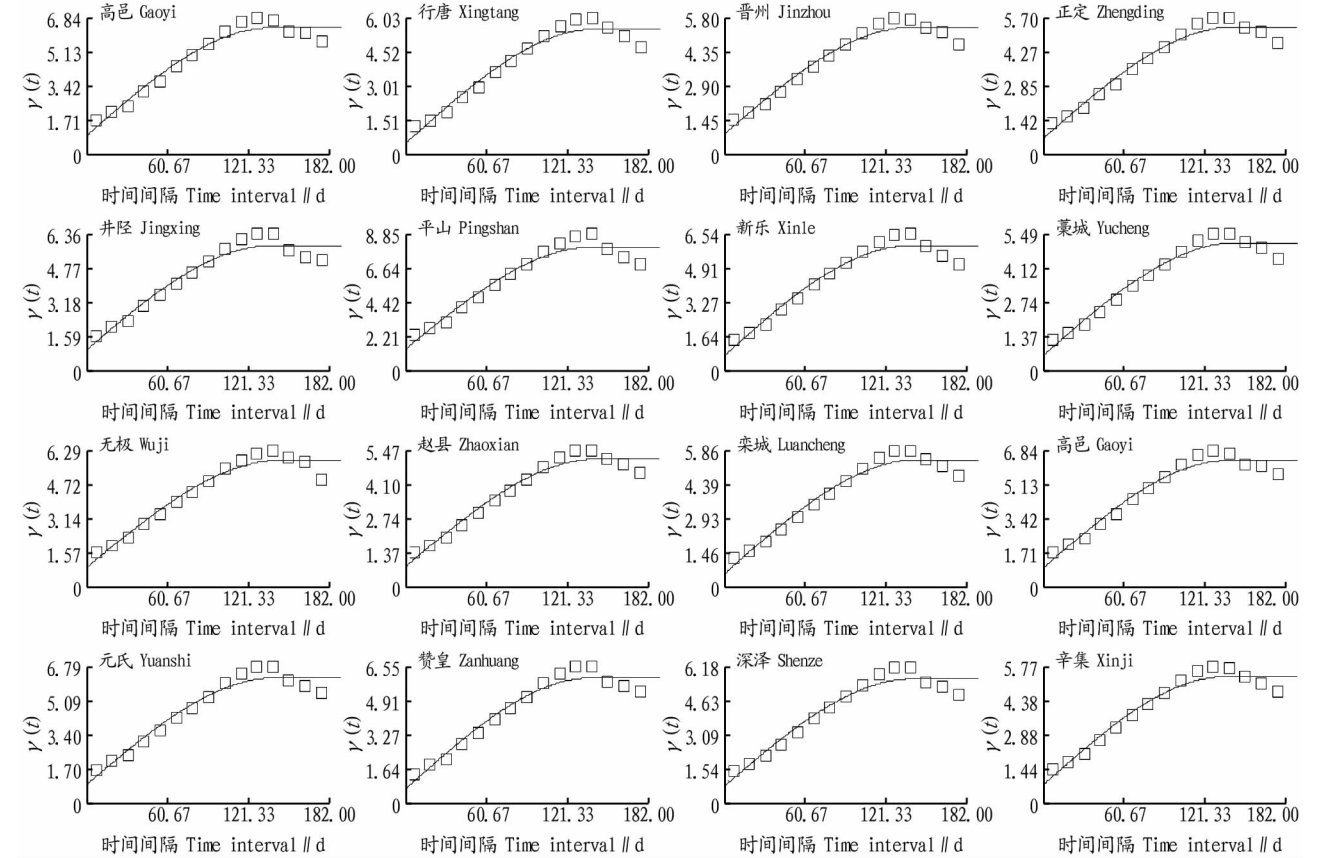


图3 石家庄市 16 个站点的变差函数拟合情况

Fig.3 The fitting of the variogram of 16 meteorological stations in Shijiazhuang

表 1 各县站点时间变差函数参数及相关信息  
Table 1 The variogram parameters and related information of each station

| 地点<br>Station    | $C_0$ | $C_0+C$ | $\alpha//d$ | $R^2$ | $P_{day}$<br>mm | $P_{month}$<br>mm |
|------------------|-------|---------|-------------|-------|-----------------|-------------------|
| 灵寿 Lingshou      | 0.82  | 5.965   | 143.9       | 0.965 | 12.0            | 133.1             |
| 行唐 Xingtang      | 0.54  | 5.541   | 142.0       | 0.956 | 11.2            | 135.4             |
| 晋州 Jinzhou       | 0.91  | 5.394   | 139.4       | 0.960 | 12.1            | 124.0             |
| 正定 Zhengding     | 0.67  | 5.317   | 142.6       | 0.961 | 9.3             | 131.2             |
| 井陘 Jingxing      | 1.00  | 5.792   | 136.4       | 0.943 | 16.7            | 142.0             |
| 平山 Pingshan      | 1.40  | 7.976   | 139.7       | 0.942 | 18.7            | 146.3             |
| 新乐 Xinle         | 0.73  | 5.953   | 137.7       | 0.949 | 11.9            | 141.4             |
| 藁城 Yucheng       | 0.61  | 5.124   | 144.0       | 0.963 | 9.6             | 121.8             |
| 无极 Wuji          | 0.93  | 5.838   | 144.2       | 0.958 | 11.2            | 132.8             |
| 赵县 Zhaoxian      | 0.81  | 5.127   | 143.1       | 0.966 | 9.8             | 123.4             |
| 栾城 Luancheng     | 0.58  | 5.471   | 143.9       | 0.965 | 9.1             | 132.2             |
| 高邑 Gaoyi         | 0.98  | 6.332   | 137.4       | 0.960 | 11.7            | 145.4             |
| 元氏 Yuanshi       | 0.98  | 6.230   | 140.4       | 0.954 | 16.1            | 139.9             |
| 赞皇 Zanhuan       | 0.68  | 6.012   | 139.7       | 0.958 | 14.6            | 146.9             |
| 深泽 Shenze        | 0.83  | 5.653   | 140.3       | 0.949 | 12.7            | 134.2             |
| 辛集 Xinji         | 0.82  | 5.357   | 137.5       | 0.960 | 12.1            | 127.2             |
| 石家庄 Shijiazhuang | 0.70  | 5.460   | 142.7       |       | 9.5             | 127.0             |

3.2 石家庄站点各项时间变差函数参数的确定 时间变差函数的各项参数与日降水量及其时间分布有密切的联系,而降水量的空间分布通常可以由插值方法确定,在气象数据稀少等特殊区域,时间变差函数的各项参数也可以用降水量空间插值方法确定。克里金插值、距离反比插值是降水空间插值中最常用的方法。许多学者研究发现,克里金插值比距离

反比插值精度更高,结果更可靠<sup>[17]</sup>。但是在对石家庄 16 个气象站点的时间变差函数的块金效应、基台值和变程进行变差函数拟合时,发现这些参数空间变异性规律极差(图 4),如果使用克里金插值可能会产生较大的误差。另外,庄立伟等<sup>[18]</sup>在研究东北地区逐日降水空间插值方法时发现,距离反比插值精度比克里金插值精度高,但平滑程度较小,更适合日降水量的空间插值,因此石家庄站点的各项参数由距离反比方法确定,其站点各项参数经插值后结果见表 1。

3.3 石家庄站点  $P_{day}$  和  $P_{month}$  的确定和分配 石家庄站点时间变差函数各项参数获取后,需要确定该站点的  $P_{day}$  和  $P_{month}$ 。该站点距离藁城和正定 2 个站点较近,其大致位于 2 站的中间位置,因此石家庄站点的  $P_{day}$  和  $P_{month}$  由 2 处的平均值确定(表 1)。 $P_{day}$  和  $P_{month}$  确定完以后开始进行月间与月内分配。下面以石家庄 2016 年的  $P_{wet}$  为例(表 2)进行分配,具体步骤如下:7 月降水量 445.6 mm 远大于  $P_{month}$  (127.0 mm),故 7 月降水量分配 127.0 mm,剩余部分优先分配邻月降水量大的月份,依次分配给 5、6、8、9 月。分配完成后的各月降水量见表 2。

月间降水量分配完毕后,进行月内降水量分配,其中,石家庄站点  $P_{day}$  为 9.45 mm。以 5 月为例优先分配 9.45 mm,其中  $88.4/9.45 \approx 9.35$ ,则连续分配 9 天  $P_{day}$ ,第 10 天分配剩余降水量 3.35 mm,即 5 月的 11—19 日日降水量均为 9.45 mm,

20 日为 3.35 mm。  $P_{\text{day}}$  分配完毕后,把分到降水量的 10 d 放在该月中间位置,其余日期降水量分配为 0 mm,另外4个月

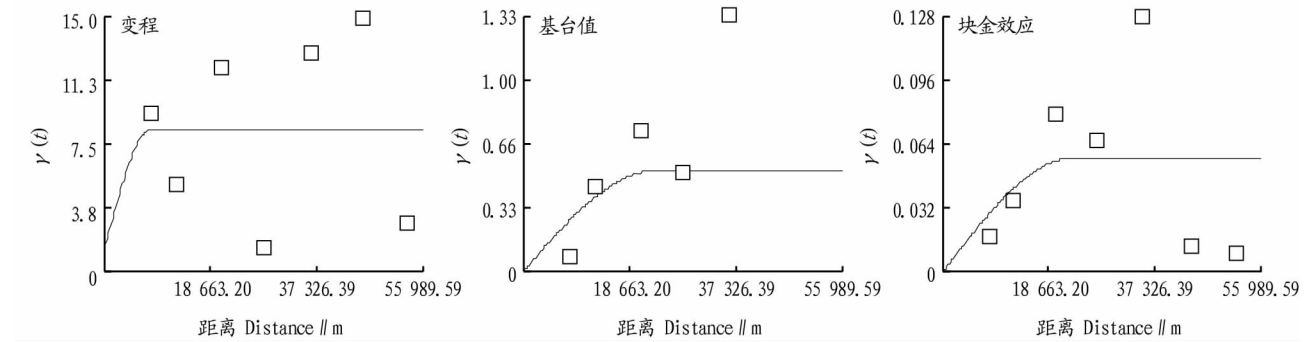


图 4 石家庄市 16 个站点 3 项参数变差函数拟合

Fig.4 The fitting of variogram parameters of 16 meteorological stations in Shijiazhuang

表 2 2016 年实际 Pwet 与分配后降水量

Table 2 The actual precipitation and distributed monthly precipitation in 2016

| 月份<br>Month | 实际降水量<br>Actual precip-<br>itation | 分配后降水量<br>Precipitation after<br>distribution |
|-------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 5           | 16.1                               | 88.4                                          |
| 6           | 61.8                               | 127.0                                         |
| 7           | 445.6                              | 127.0                                         |
| 8           | 48.9                               | 127.0                                         |
| 9           | 24.0                               | 127.0                                         |

份做法相同。湿季之外的月份降水量设为未知,通过后期的插值获得,到此,降水量分配完毕。

3.4 年降水量计算结果及分析 收集到了石家庄站点 2011—2016 年和 2015 年正定、井陉等 6 个站点的逐月降水数据进行验证上述方法的可行性。首先,把各个站点按照上述的步骤处理完毕之后导入到 ArcGIS 10.2.2 软件中,然后,在表 1 中对应站点时间变差函数参数约束下进行普通克里金插值,处理范围为(0~366,-1~1),最后,提取该年内相应天数的插值数值求和后即可得到该年的年降水值。测验数据的原始相关信息见表 3,为证明湿季推算结果可靠性,提供了相邻不同时段的结果(表 4)。

表 3 各测验数据原始降水信息

Table 3 Original information of the test case rainfall data

| 年份<br>Year | 站点<br>Station | $P_3$<br>mm | $P_4$<br>mm | $P_5$<br>mm | $P_6$<br>mm | $P_7$<br>mm | $P_8$<br>mm | $P_9$<br>mm | $P_{10}$<br>mm | $P_{11}$<br>mm | $P_{\text{wet}}$<br>mm | 比率<br>Ratio//% |
|------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|
| 2011       | 石家庄           | 0.2         | 6.4         | 36.1        | 63.2        | 157.7       | 230.2       | 113.2       | 14.6           | 36.6           | 600.4                  | 89.05          |
| 2012       | 石家庄           | 7.8         | 64.4        | 19.4        | 103.1       | 207.4       | 107.0       | 98.4        | 6.5            | 25.7           | 535.3                  | 82.43          |
| 2013       | 石家庄           | 24          | 27.7        | 18.3        | 97.9        | 168.7       | 59.9        | 108.9       | 7.9            | 3.5            | 453.7                  | 89.26          |
| 2014       | 石家庄           | 0.9         | 24.9        | 28.7        | 38.7        | 80.9        | 12.3        | 86.6        | 14.8           | 0.0            | 247.2                  | 83.85          |
| 2015       | 石家庄           | 5.7         | 24.7        | 56.0        | 33.3        | 57.1        | 171.0       | 101.8       | 22.2           | 52.8           | 419.2                  | 78.43          |
| 2016       | 石家庄           | 0.0         | 13.3        | 16.1        | 61.8        | 445.6       | 48.9        | 24.0        | 70.4           | 6.9            | 596.4                  | 83.69          |
| 2015       | 正定            | 1.7         | 26.0        | 65.0        | 24.0        | 56.5        | 248.8       | 76.1        | 24.1           | 43.5           | 470.4                  | 82.05          |
| 2015       | 井陉            | 4.2         | 30.3        | 64.1        | 31.4        | 33.3        | 166.7       | 125.1       | 22.4           | 48.7           | 420.6                  | 78.59          |
| 2015       | 平山            | 2.7         | 29.6        | 59.0        | 37.6        | 136.7       | 154.8       | 156.0       | 28.3           | 58.7           | 544.1                  | 80.25          |
| 2015       | 藁城            | 0.4         | 29.1        | 53.1        | 23.3        | 31.3        | 120.0       | 41.6        | 18.3           | 37.5           | 269.3                  | 75.03          |
| 2015       | 无极            | 0.6         | 30.7        | 51.4        | 15.4        | 48.9        | 137.3       | 83.4        | 25.7           | 38.9           | 336.4                  | 76.96          |
| 2015       | 栾城            | 4.9         | 30.4        | 68.5        | 17.1        | 78.2        | 183.9       | 96.3        | 22.4           | 46.0           | 444.0                  | 80.35          |

注: $P_n$  为 n 月降水量  
Note:  $P_n$  is precipitation in n months

表 4 各时段计算结果及误差率

Table 4 Calculation result and error rate of each period

| 年份<br>Year | 站点<br>Station | $P_a$<br>mm | $P_{S3-7}$<br>mm | $P_{S4-8}$<br>mm | $P_{S5-9}$<br>mm | $P_{S6-10}$<br>mm | $P_{S7-11}$<br>mm | $E_{S3-7}$<br>% | $E_{S4-8}$<br>% | $E_{S5-9}$<br>% | $E_{S6-10}$<br>% | $E_{S7-11}$<br>% |
|------------|---------------|-------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| 2011       | 石家庄           | 674.2       | 478.2            | 618.2            | 788.2            | 903.5             | 954.9             | -29.07          | -8.31           | +16.91          | +34.01           | +41.63           |
| 2012       | 石家庄           | 649.4       | 616.7            | 656.5            | 615.6            | 847.0             | 847.6             | -5.04           | +1.09           | -5.20           | +30.43           | +30.52           |
| 2013       | 石家庄           | 508.3       | 551.2            | 372.5            | 519.0            | 767.9             | 751.5             | +8.44           | -26.72          | +2.11           | +51.07           | +47.85           |
| 2014       | 石家庄           | 294.8       | 237.0            | 185.5            | 283.0            | 233.3             | 351.7             | -19.61          | -37.08          | -4.00           | -20.86           | +19.30           |
| 2015       | 石家庄           | 534.5       | 176.8            | 333.1            | 548.9            | 236.2             | 562.0             | -66.92          | -37.68          | +2.69           | -55.81           | +5.14            |
| 2016       | 石家庄           | 712.6       | 751.4            | 763.4            | 784.2            | 677.7             | 1 003.4           | +5.44           | +7.13           | +10.05          | -4.90            | +40.81           |
| 2015       | 正定            | 573.3       | 173.2            | 563.7            | 545.0            | 429.5             | 787.0             | -69.79          | -1.67           | -4.94           | -25.08           | +37.28           |
| 2015       | 井陉            | 535.2       | 163.3            | 385.5            | 505.7            | 378.9             | 396.2             | -69.49          | -27.97          | -5.51           | -29.20           | -25.97           |
| 2015       | 平山            | 678.0       | 265.6            | 522.6            | 603.5            | 513.4             | 829.1             | -60.83          | -22.92          | -10.99          | -24.28           | +22.29           |

接下表

| 续表 4       |               |             |                  |                  |                  |                   |                   |                 |                 |                 |                  |                  |
|------------|---------------|-------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| 年份<br>Year | 站点<br>Station | $P_a$<br>mm | $P_{S3-7}$<br>mm | $P_{S4-8}$<br>mm | $P_{S5-9}$<br>mm | $P_{S6-10}$<br>mm | $P_{S7-11}$<br>mm | $E_{S3-7}$<br>% | $E_{S4-8}$<br>% | $E_{S5-9}$<br>% | $E_{S6-10}$<br>% | $E_{S7-11}$<br>% |
| 2015       | 藁城            | 358.9       | 137.2            | 383.4            | 322.0            | 234.5             | 248.7             | -61.77          | +6.83           | -10.28          | -34.66           | -30.70           |
| 2015       | 无极            | 437.1       | 147.0            | 403.5            | 383.1            | 310.7             | 334.2             | -66.37          | -7.69           | -12.35          | -28.92           | -23.54           |
| 2015       | 栾城            | 552.6       | 265.8            | 526.0            | 589.2            | 397.9             | 689.2             | -51.90          | -4.81           | +6.62           | -27.99           | +24.72           |

注: $P_a$  为实际年降水量; $P_{sn-n+4}$  为  $n$  月到  $n+4$  月推算降水量, $E_{sn-n+4}$  为对应的误差率  
Note: $P_a$  is the actual annual precipitation; $P_{sn-n+4}$  is the estimated precipitation from  $n$  months to  $n+4$  months;and  $E_{sn-n+4}$  is the corresponding error rate

从表 3 可以看出,同一站点不同年份以及同一年份不同站点之间  $P_{wet}$ 、 $P_a$  和月降水量差别明显,这符合石家庄地区比率、年降水量变化幅度较大以及年内降水分布不均的降水特征。

误差率是推算精度的重要指标,从图 5 可以看出,3—7、6—10 和 7—11 月的计算降水量明显的偏离  $P_a$ ,它们的推算结果普遍难以接受(表 4),不能获得理想的推算效果。虽然 4—8 月推算结果在特殊情况下产生比 5—9 月份较优的推算结果,但是 4—8 月份的推算结果具有很大的不稳定性,最大误差达 37.68%,因此,如果采用 4—8 月降水资料推算  $P_a$ ,其推算结果可能很大程度偏离  $P_a$ ,无法获取具有参考价值的推算结果。5—9 月份推算结果则相对稳定,虽然可能产生高达 16.91% 的误差,但是其推算结果一直游离在  $P_a$  附近,具有较高的参考价值。

表 5 各时段计算误差率的均值、方差与标准差  
Table 5 The mean, variance and standard deviation of calculation error rate

| 推算时段<br>Estimated time period | 平均值<br>Mean//% | 方差<br>Variance | 标准差<br>Standard deviation |
|-------------------------------|----------------|----------------|---------------------------|
| 3—7 月 March-July              | -40.58         | 29.43          | 5.42                      |
| 4—8 月 April-August            | -13.32         | 15.66          | 3.96                      |
| 5—9 月 May-September           | -1.24          | 8.66           | 2.94                      |
| 6—10 月 June-October           | -11.35         | 31.11          | 5.58                      |
| 7—11 月 July-November          | 15.78          | 26.93          | 5.19                      |

利用 5—9 月降水资料推算实际降水量( $P_a$ ) 在石家庄地区获得了较好的应用,其计算误差率普遍在 11% 以下,其中石家庄 2013 年计算误差率仅为 2.11%,说明该方法可以作为 一种全年降水量的推算方法;但石家庄 2011 年和无极 2015

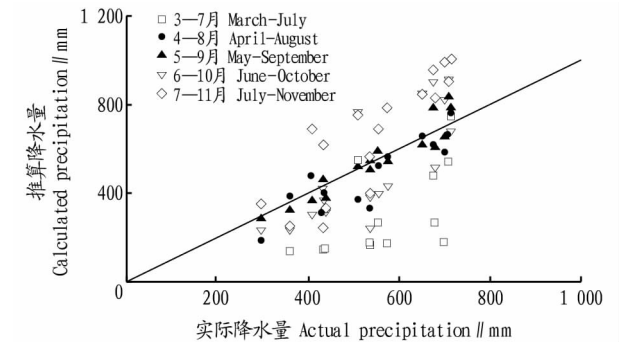


图 5 推算降水量与实际降水量的关系  
Fig.5 Relationship of calculated precipitation and actual precipitation

年推算误差却分别达 16.91% 和 -12.35%(表 4)。误差较大的原因可能是由于  $P_{month}$  和  $P_{day}$  不能代表站点自身降水特征以及克里金的圆滑效应引起的。

由于无法收集充足的历史数据确定去掉奇异值后的  $P_{month}$  和  $P_{day}$ ,对无极和平山借用相邻站点的  $P_{month}$  和  $P_{day}$  进行重新计算(表 4),这 2 个站点的推算误差得到了有效的缩小,故在推算前需要对  $P_{month}$  和  $P_{day}$  的代表性进行检验,尽可能地体现气象站点自身的降水特征。

克里金插值的圆滑效应也是误差来源之一。在占全年比率大致不变的情况下, $P_{wet}$  过高或过小都会导致误差率较大;在  $P_{wet}$  大致相近的情况下,占全年比率的过高或过小同样也会导致误差率较大(图 6)。前者在比率较大的情况下,由于克里金法的圆滑效应,降水量多或少会导致其周围未分配降水量日期的插值结果多或少,并对误差进行传递,从而造成较大的误差率。在  $P_{wet}$  大致相同的情况下也是这种原因。

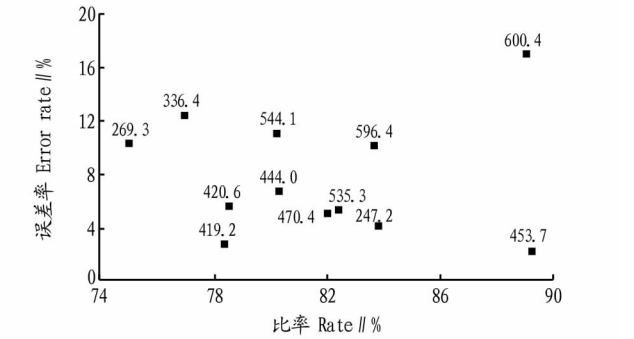
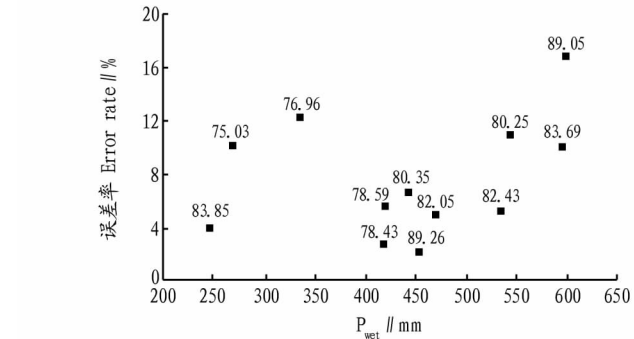


图 6  $P_{wet}$ 、比率和误差率三者之间关系  
Fig.6 Relationship of wet seasonal precipitation, rate and error rate

如在 2011 年石家庄站点,  $P_{wet}$  占全年比率高达 89.05%, 降水量为 600.4 mm, 克里金插值的圆滑效应使得该年产生较大的误差率;而 2013 年石家庄站点比率高达 89.26%, 但是其  $P_{wet}$

仅为 453.7 mm, 虽然克里金法仍有圆滑效应存在, 但是其引起的绝对误差较小, 因而其误差率很小。2015 年藁城站点则相反, 其  $P_{wet}$  及其比率都较小, 从而产生较大的误差。

## 4 结论

利用石家庄 16 个气象站点的逐日降水资料,借助变差函数相关理论,通过对湿季降水量推算全年降水量方法的研究,得出以下结论:

(1)不同时段的结果有很大差异,其中湿季的推算结果最为可靠。3—7、6—10 和 7—11 月推算结果较大幅度地偏离实际降水量( $P_a$ );4—8 月推算结果有较大的不稳定性;而湿季推算结果更可靠,其推算结果和误差的稳定性均较好。

(2)时间变差函数方法在石家庄测验数据中的推算误差普遍小于 11%,其中石家庄 2011 年推算误差最小,仅为 2.11%;其误差率的平均值为-1.24%,方差为 8.66,具有较高的参考价值,可以作为一种推估全年降水量的有效方法。

(3)时间变差函数方法在石家庄 2011 年和无极 2015 年测试数据中误差较大是由于  $P_{\text{month}}$  和  $P_{\text{day}}$  不能代表站点自身降水特征及克里金插值的圆滑作用引起的。其中无极和平山站点借助各自临近站点的  $P_{\text{month}}$  和  $P_{\text{day}}$  使得误差得到一定程度的缩小。

## 参考文献

- [1] 江志红,丁裕国,陈威霖.21 世纪中国极端降水事件预估[J].气候变化研究进展,2007,3(4):202-207.
- [2] 张秀娟,陈晓光,王尧,等.西北四省区降水的时空变化特征分析[J].安徽农业科学,2012,40(18):9809-9812.
- [3] CUI L F, WANG L C, LAI Z P, et al. Innovative trend analysis of annual and seasonal air temperature and rainfall in the Yangtze River Basin; China during 1960-2015[J]. Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics, 2017, 164:48-59.
- [4] 徐利岗,杜历,姚海娇,等.中亚干旱区降水时空变化特征及趋势分析

[J].干旱区资源与环境,2015,29(11):121-127.

- [5] 王志福,钱永甫.中国极端降水事件的频数和强度特征[J].水科学进展,2009,20(1):1-9.
- [6] 刘健,夏军,王明森,等.1961—2015 年山东省降水周期变化特征[J].人民黄河,2017,39(4):6-10.
- [7] 晏利斌.1961—2014 年黄土高原气温和降水变化趋势[J].地球环境学报,2015,6(5):276-282.
- [8] 吴慧,吴胜安.近 48 年海南省极端降水时空变化趋势[J].安徽农业科学,2010,38(19):10101-10103.
- [9] ALIZADEH M J, KAVIANPOUR M R, KISI O, et al. A new approach for simulating and forecasting the rainfall-runoff process within the next two months[J]. Journal of hydrology, 2017, 548:588-597.
- [10] 王刚,严登华,张冬冬,等.海河流域 1961 年-2010 年极端气温与降水变化趋势分析[J].南水北调与水利科技,2014,12(1):1-6,11.
- [11] 张强,孙鹏,陈喜,等.1956~2000 年中国地表水资源状况:变化特征、成因及影响[J].地理科学,2011,31(12):1430-1436.
- [12] 张志萍,冉大川,慕志龙.大理河流域降水资料插补方法探讨[J].人民黄河,2006(12):26-27,78.
- [13] 李巍,范文义,毛学刚,等.降雨量空间插值方法比较研究[J].安徽农业科学,2014,42(12):3667-3669.
- [14] DIRKS K N, HAY J E, STOW C D, et al. High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II: Interpolation of rainfall data[J]. Journal of hydrology, 1998, 208(3):187-193.
- [15] OHMER M, LIESCH T, GOEPPERT N, et al. On the optimal selection of interpolation methods for groundwater contouring: An example of propagation of uncertainty regarding inter-aquifer exchange[J]. Advances in water resources, 2017, 109:121-132.
- [16] 裴韬,周成虎,李全林,等.基于变差函数分析的地震时间相关性定量估算[J].地震,2002,22(2):17-21.
- [17] PIAZZA A D, CONTI F L, NOTO L V, et al. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy[J]. International journal of applied earth observations & geoinformation, 2011, 13(3):396-408.
- [18] 庄立伟,王石立.东北地区逐日气象要素的空间插值方法应用研究[J].应用气象学报,2003,14(5):605-615.

(上接第 211 页)

**2.6 实际样品的测定** 按照上述方法对在本地地区购买的 150 批次的辣椒油、芥末油、花椒油进行提取,并采用高效液相色谱-荧光法测定,均未发现阳性样品。

## 3 结论

建立了一种快速、简便的测定调味油中罗丹明 B 的方法。样品经纯甲醇超声提取后,高速涡旋、离心,有机膜过滤,用高效液相色谱  $C_{18}$  柱分离,荧光检测器检测。实际测定结果表明,该方法前处理步骤简单,提取率高,重现性好,适用于调味油中罗丹明 B 的定量分析。

## 参考文献

- [1] 徐声乐,王兴,刘金萍,等.罗丹明 B 及其在食品中检测方法研究进展[J].食品研究与开发,2015,36(17):136-139.
- [2] 韦娜.拉曼光谱法检测辣椒制品中罗丹明 B 和掺兑地沟油的花生油[D].沈阳:沈阳农业大学,2013.
- [3] 晏娜,康学军.食品中色素的前处理-罗丹明 B 的检测[C]//中国化学会第六届全国仪器分析及样品预处理学术研讨会论文集.北京:中国化学会,2012:249-250.
- [4] 许丽梅,康靖,曾勇明,等.SERS 技术应用于食品中罗丹明 B 的快速检测[J].食品工业科技,2017,38(24):238-242,247.
- [5] 卢士英,邹明强.食品中常见的非食用色素的危害与检测[J].中国仪器仪表,2009(8):45-50.
- [6] 乔海鸿,胡佳薇,王敏娟.高效液相色谱荧光检测法测定辣椒及花椒制品中的罗丹明 B[J].中国卫生检验杂志,2014(5):641-643,646.
- [7] 林纯忠,王韦达,陈美婷,等.低共熔溶剂萃取荧光法快速检测辣椒油中

的罗丹明 B[J].科技与创新,2017(21):32-33.

- [8] 汪敏,江生,毛庆,等.调味品中违禁添加的非食用色素检测技术综述[J].中国调味品,2016,41(11):152-155,158.
- [9] 陈温娟,王朝瑾.非食品添加剂的检测方法研究进展-吊白块和硼酸[J].分析化学,2009,37(A03):357.
- [10] 卫生部发布被滥用的食品添加剂及非法添加物名单[J].中国农业会计,2011(6):60-62.
- [11] 张俭波.解析:食品添加剂、食品营养强化剂扩大使用范围违法添加非食用物质名单新资源食品[J].中国卫生标准管理,2010(1):52-54.
- [12] 曲双双,肖光辉,刘婷,等.UPLC-MS/MS 法同时测定婴幼儿配方奶粉中的壬基酚和双酚 A[J].中国食品添加剂,2016(8):185-190.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局.进出口食品中罗丹明 B 的检测方法.高效液相色谱质谱法:SN/T 2430—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [14] 林清荷,陈鑫,吴忠兴.辣椒粉中罗丹明 B 液相色谱检测方法的研究[J].农产品加工,2012(11):157-158.
- [15] 咸瑞卿,高文超,王小兵,等.调味品中罗丹明 B 的 HPLC-FLD-DAD 测定方法研究[J].中国调味品,2013,38(8):109-112.
- [16] 韦娜,王煜,张孝芳,等.辣椒制品中罗丹明 B 的基体固相分散提取条件优化[J].食品与生物技术学报,2014,33(3):275-281.
- [17] 陈艳美,于淼.罗丹明 B 染色食品对人体的危害及检测[J].科学之友,2011(18):153,157.
- [18] YAN S C, LI Z S, ZOU Z G. Photodegradation of rhodamine B and methyl orange over boron-doped  $g-C_3N_4$  under visible light irradiation[J]. Langmuir, 2010, 26(6):3894-3901.
- [19] 殷建易,李佐卿,谢东华,等.凝胶净化-高效液相色谱法检测对位红在辣椒酱和辣酱油中的残留量[J].分析化学,2006,34(6):867-870.
- [20] 汤建春,龙朝阳,许秀敏,等.高效液相色谱荧光检测法测定辣椒油、辣椒粉、火锅底料中的罗丹明 B 染料[J].中国卫生检验杂志,2011,21(12):2843-2844.