

近 50 年中国降水序列均一性检验与订正研究

江志红¹ 黄 群¹ 李庆祥²

1 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室, 南京 210044
2 国家气象信息中心, 北京 100081

摘 要 选取中国近 50 年 (1951~2004 年) 月降水资料中具有连续观测 20 年以上记录的 681 个台站资料, 通过对各站年代际分量的 EOF 分析及 North 判别检验, 结合标准正态检验 (SNHT) 方法, 发现所检站点中约有 4% 的台站降水序列存在非均一性。利用比值法对非均一降水序列进行了订正, 结果表明对年降水序列的订正量在 -3%~7% 之间。必须注意的是, 由于我国现有台站观测网的密度不够, 影响了对非均一降水序列的订正精度。

关键词 North 判别 标准正态检验方法 降水均一性 订正

文章编号 1006-9585 (2008) 01-0067-08 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Study of Precipitation Series Homogeneous Adjustment and Their Correction over China in the Last 50 Years

JIANG Zhi-Hong¹, HUANG Qun¹, and LI Qing-Xiang²

1 *Nanjing University of Information Science and Technology, Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing 210044*
2 *National Meteorological Information Center, Beijing 100081*

Abstract Applying EOF analysis and North test and standard normal homogeneity test (SNHT) to monthly precipitation data of 681 stations, which are recorded in at least 20 years of the last 50 years (1951—2004), we find that 4% stations records have inhomogeneity. Through ratio correction, the inhomogeneity in annual precipitation time series is corrected with in about -3%—7%. It should be noticed that the density of the stations observation net now is too small to detect the precipitation data inhomogeneity and more stations are needed.

Key words North test, standard normal homogeneity test, precipitation homogeneity, correction

1 引言

长时间的降水序列是水资源和水循环气候及其气候变化研究的基础, 近 50 年来, 我国气象部门建立了较完善的地面降水监测网, 但由于台站的迁移、仪器的变更及其观测规范的变化等因素, 导致了资料序列中的非均一性, 显然, 这种包含

非气候因素变化的非均一性气候序列直接影响了气候业务及气候研究工作的质量与水平的提高。国外许多气候学家对气候序列的非均一性检验及其订正极为关注, 作了大量工作, 取得了十分重要的进展^[1]。

Groisman 等^[2]研究表明, 降水数据的非均一性, 可能会引起站点记录改变 4%~40%, 同时还得出, 在过去 100 年内, 北半球中高纬度不同国

收稿日期 2006-12-31 收到, 2007-10-10 收到修定稿
资助项目 国家科技基础性工作专项资金项目 2005DKA31700-01
作者简介 江志红, 女, 1963 年出生, 博士, 教授, 主要从事气候学研究。E-mail: zhjiang@nuist.edu.cn

家的许多主要观测站都发生了 1~3 次改变。Dai 等^[3]分析了全球 1900~1988 年全球降水站点资料的非均一性,结果表明,由于仪器的改变中高纬度的许多站点记录存在不均一性。近年来,我国不少专家也开始注意这方面的研究。文献^[4~13]系统介绍了国内外气候资料均一性研究的方法以及一些国家利用这些方法对本国或区域气候序列进行研究的成果,其主要集中在对我国平均温度、极端温度、高空风速以及探空等资料的均一性进行了检验和订正,但有关降水量资料的检验和订正尚无系统研究。

本文从全国月降水资料出发,对各站 12 个月时间序列的年代际分量进行 EOF 分析,利用 North 判别检验其是否存在显著突变的主分量,再采用标准正态检验 (SNHT) 方法检测 EOF 第一时间序列,以判断该站降水序列是否存在断点。结合 SNHT 方法对断点性质进行判断,对确定的不均一站年降水序列进行订正,并构造参考序列订正至逐月。在此基础上,形成具有近似均一性的近 50 年中国月降水数据集,以便为我国月降水数据集的均一化业务提供有益尝试。

2 资料来源及处理

本文采用的资料为国家气象信息中心气象资

料室收集整理的全国 750 个站 1951~2004 年逐月降水总量资料,由于建站时间不一致、缺测和站点取消等多种原因导致每个站点序列长度并不相同,本文从中选取 681 个具有连续观测 20 年以上记录的站点,图 1 给出了 681 站点的分布情况。可以看出中国东部地区站点密度相对较大,而西部新疆地区站点分布很稀疏,西藏地区较大范围内根本没有观测站点。

上述数据中,当个别月份资料缺测时,利用与其相关最大的 4 个站点同期观测资料,由逐步回归方法进行插补,得出连续的月降水量资料序列。

为了保证以下检验结果不受个别错误数据的影响,首先对所取得的数据集进行初步的质量分析和控制。具体方法如下:

由于降水分布通常是偏态,对于不服从正态分布的变量需作正态化处理,为此对逐月各站的降水资料进行了开 3 次方处理,并标准化。标准化的过程中,分别统计月降水偏差大于 3 倍均方差 (3σ) 以及 5 倍均方差 (5σ) 的情况。结果表明,大于 3σ 的纪录为 1 125 个,占总数的 0.28%;大于 5σ 的纪录为 10 个,占总数的 0.0025%。在此,选取 3σ 为标准,月降水偏差大于 3σ 时的记录不进入研究基础资料集。

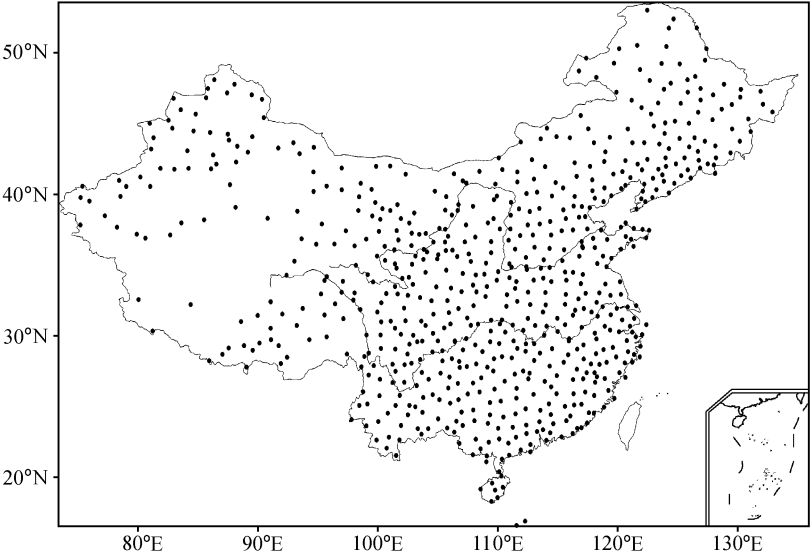


图 1 681 站站点分布
Fig. 1 Distributions of 681 stations

3 均一性检验与订正方法

3.1 North 判别

$$\text{设 } \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,N} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{M,1} & \cdots & x_{M,N} \end{bmatrix}$$

为单个台站月降水序列矩阵,其中 M 为站点资料长度, N 代表 12 个月。 λ_1 、 λ_2 分别为 $X_{M \times N}$ 相关矩阵的第一、第二特征向量对应的特征值。

根据 North 判别^[14],当

$$\lambda_1(2/M)^{1/2} < \lambda_1 - \lambda_2 \tag{1}$$

成立时,说明其第一特征向量代表了 X 场的显著信号。

3.2 均一化检验

利用 Alexandersson^[15] 的 SNHT 方法,通过计算待检序列和距离较近、相关较大的参考序列的比值或差值序列,不仅可以检验序列中的断点,还提供了对资料的订正方法。

序列的断点不仅与气候资料的非均一性有关,也可能是气候突变信号的反映,但如果某一区域中的台站都存在这种变化,可能意味该断点是气候突变信号的反映,与序列的非均一性无关。因此,在进行序列均一性检验时,有必要区分气候突变信号与气候资料的非均一性。故首先必须建立区域的参考序列。具体方法是,从距离最近的 20 个站点中选取相关系数较大的至少 3 个站构造参考序列,即由

$$F_i = \left[\sum_{j=1}^m \rho_j^2 x_{ji} / \bar{x}_j \right] / \sum_{j=1}^m \rho_j^2 \tag{2}$$

建立参考序列,(2) 式中 F_i 为构建的参考序列, m 代表参考台站的个数, x_{ji} 代表第 j 个参考站点第 i 年的观测值, $\bar{x}_j$ 代表第 j 个参考站点的多年平均值, ρ_j 是待检序列和第 j 个参考站序列的相关系数。根据 (2) 式,由于参考序列避开了个别台站的影响,所以这个参考序列可以近似地认为是相对均一的。

构造检验序列有两种方法,即差值法和比值法。在降水量的均一性检验时一般采用比值法。这样构造出来的序列 Q_i 可以表示为

$$Q_i = \frac{Y_i / \bar{Y}}{F_i / F_m}, \tag{3}$$

其中, Y_i 代表降水量序列, $\bar{Y}$ 为降水平均值, F_m 是参考序列的均值。对 Q_i 进行标准化,得到 Z_i , 即

$$Z_i = (Q_i - \bar{Q}) / \sigma_Q. \tag{4}$$

根据降水序列的实际情况,采用单断点的平均值检验断点,具体方法如下:

设序列 $\{Z_i\} (i=1, 2, \cdots, n)$, 若 $\{Z_i\}$ 序列没有断点存在,则统计假设为 Z_i 服从标准正态分布,即 $H_0: \forall i, Z_i \in N(0, 1)$; 若 $\{Z_i\}$ 序列有一个间断点 a , 则统计假设为

$$\begin{cases} Z_i \in N(\mu_1, 1), i \in \{1, \cdots, a\} \\ Z_i \in N(\mu_2, 1), i \in \{a+1, \cdots, n\} \end{cases}$$

其中, μ_1 、 μ_2 分别为假设间断点 a 前后两个序列的平均值 ($\mu_1 \neq \mu_2$), n 为样本总量。 σ 为前后两段的均方差,因为没有考虑方差间断,所以 σ 前后不变。根据最大似然比率的标准技术,构造统计量 T_s 作为显著性判据:

$$T_s = a(\bar{z}_1^2) + (n-a)(\bar{z}_2^2), \tag{5}$$

如果 T_s 的最大值 $T_{s,\max}$ 大于选定的显著性水平(临界值与序列长度有关),该点即为断点,需要进行订正。

T_s 的最大值

$$T_{s,\max} = \max_{1 \leq a \leq n-1} \{a\bar{z}_1^2 + (n-a)\bar{z}_2^2\}, \tag{6}$$

式中, $\bar{z}_1$ 、 $\bar{z}_2$ 分别表示断点 a 前后的平均值, n 表示序列的长度。表 1 为通过内插方法得出的 10~55 年的 T_{10} 、 T_5 值,在本文中选取显著性水平 5% 检验非均一性。

3.3 非均一序列的订正

由 Alexandersson^[15] 的 SNHT 方法,对于检测出的不均一的断点,比值的两个均值可以由下式来计算:

$$\begin{cases} \bar{q}_1 = \sigma_Q \bar{z}_1 + \bar{Q}, \\ \bar{q}_2 = \sigma_Q \bar{z}_2 + \bar{Q}, \end{cases} \tag{7}$$

则 1 到 a 年的订正量即为 $\bar{q}_2 / \bar{q}_1$, 又称为订正系数。

$$P_i = Y_i (\bar{q}_2 / \bar{q}_1), \quad i=1, \cdots, a \tag{8}$$

式中, σ_Q 为序列 Q_i 的均方差, $\bar{Q}$ 为序列的平均值, y_i 为订正前的序列, P_i 为订正后的序列,在应用了上述订正系数后,序列就可以认为是均一的。

4 降水量序列中非均一点的确定

4.1 月降水量突变点的检测

考虑到降水的不连续通常发生在年代际时间

表 1 显著性水平的临界值表

Table 1 Critical values for the ratio test as the 10%, 5% significance levels

序列长度	显著性水平 10%	显著性水平 5%	序列长度	显著性水平 10%	显著性水平 5%
10	5.05	5.70	40	6.96	8.23
25	6.55	7.75	41	6.99	8.26
26	6.58	7.78	42	7.01	8.28
27	6.60	7.81	43	7.03	8.30
28	6.63	7.85	44	7.05	8.32
29	6.66	7.88	45	7.07	8.34
30	6.69	7.91	46	7.09	8.36
31	6.71	7.94	47	7.11	8.38
32	6.74	7.97	48	7.13	8.40
33	6.77	8.01	49	7.15	8.42
34	6.79	8.04	50	7.17	8.44
35	6.82	8.07	51	7.19	8.46
36	6.85	8.10	52	7.21	8.48
37	6.88	8.13	53	7.23	8.50
38	6.91	8.17	54	7.25	8.52
39	6.93	8.20	55	7.27	8.54

尺度上,在此对标准化的月降水序列做了 5 年低通滤波处理,以去掉年际变化。

对于滤波处理后 681 个站的月时间序列进行主成分分析,利用 North 判别 (1) 式检验第一特征值得出 375 个站主成分显著,约占总数的 55.07%。

对于检出的 375 站采用 SNHT 方法检测 EOF 第一时间序列,得出有 327 个站点含有断点,除去断点时间位于序列前后两年的 26 个站,剩下需要检测的站为 301 个。下面以 58251、50246 站为例,说明该检验的步骤和结果。

图 2 是 58251 站标准化的 EOF 第一时间序列及其 T_s 序列。由 T_s 序列可以看到,图中 3 个峰有

2 个超过了 5% 的显著性水平,分别位于 1969 年与 1985 年,1985 年出现的最大值达到 13.55,说明该站点 EOF 时间序列不连续,需要进一步的检验此断点是否为非均一性的断点。

图 3 是 50246 站标准化的 EOF 第一时间序列及其 T_s 序列。由 T_s 序列可以看到,1997 年序列出现了最大值 7.30,但并没有超过 5% 的显著性水平 (8.01),说明该站是均一的,不需要进行订正。

4.2 对年降水量的均一性检验

4.2.1 参考序列的构造和检验序列的形成

由于各台站降水序列长度不一,在此统一使用 1960~2004 年的年降水量作相关系数的运算,对个别站点时间段达不到上述要求,则根据该站已有资料的时间段作相关系数分析。均一性检验和订正最为重要的是获取一个尽可能均一的检验和订正参考序列,为此 Alexanderson 等提出待检站点与其对应参考站点的相关性标准应达到 0.8~0.9。但计算发现,301 个待检站点与周围至少 3 个站点相关性达到 0.8 以上的仅为 11 个,这与我国站点分布不够密以及降水空间变率有很大关系。为建立参考序列,本文将相关性标准逐步降低,分别以 >0.8、0.7~0.8、0.6~0.7 和 0.5~0.6 为标准,表 2 给出了不同相关系数标准下站点的数目。可见要提高降水量序列的均一性订正精度,需要更高密度的观测数据网,以便构造较好的参考序列。

经过 SNHT 检验后,去掉突变年位于序列前后两年的站点 (虚假不连续点),剩下的站点即为存在非均一性断点的站 (如表 3),共计 25 个站有突变点,占所检站点总数的 3.97%。

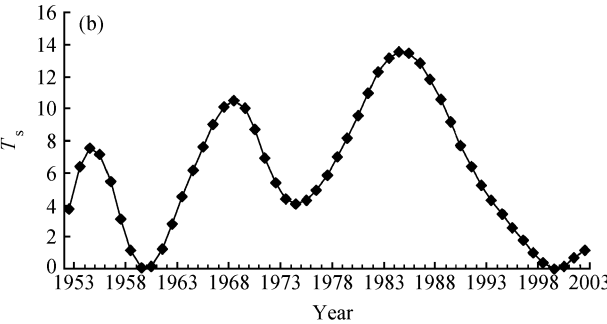
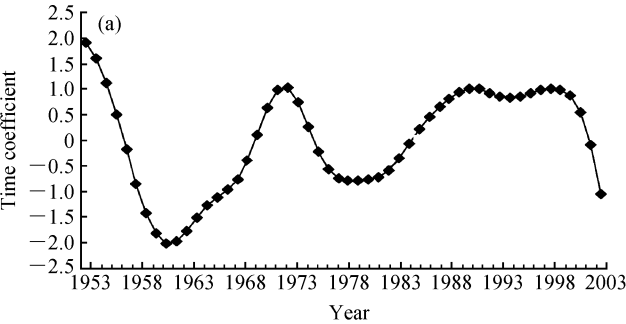


图 2 58251 站标准化的月降水 (a) EOF 第一时间序列和 (b) T_s 序列
Fig. 2 (a) First standard mode of the EOF analysis and (b) T_s series of station 58251

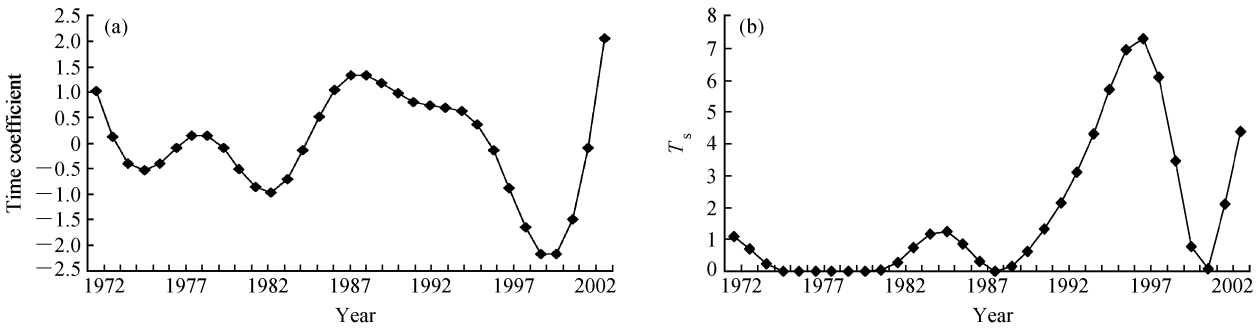


图 3 50246 站标准化月降水 (a) EOF 第一时间序列和 (b) T_s 序列
Fig. 3 (a) First standard mode of the EOF analysis and (b) T_s series of station 50246

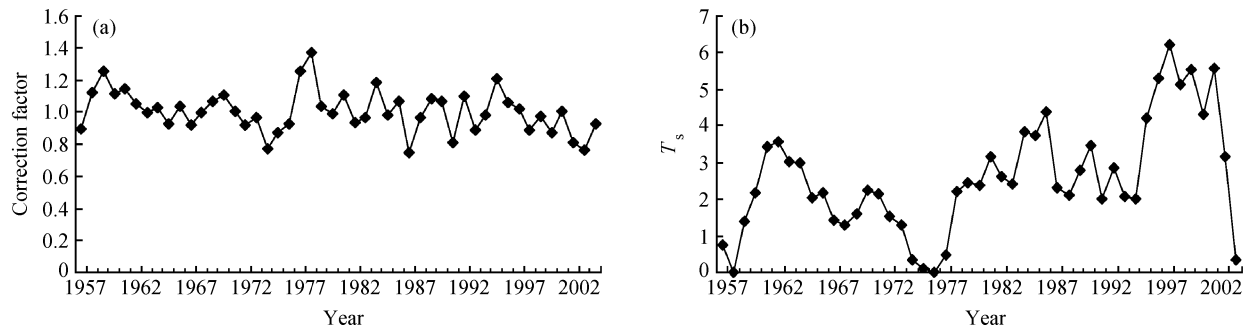


图 4 57106 站年降水量 (a) 比值序列和 (b) T_s 序列
Fig. 4 (a) Correction factor series of annual precipitation and (b) T_s series of station 57106

表 2 不同相关系数标准下站点的数目	
Table 2 Number of stations with different correlation standard	
相关系数	站点个数
>0.8	11
$0.7\sim0.8$	92
$0.6\sim0.7$	93
$0.5\sim0.6$	53

表 3 需要订正的不同相关系数标准下站点的数目	
Table 3 Number of stations that need to be corrected with different correlation standard	
相关系数	站点个数
>0.8	2
$0.7\sim0.8$	7
$0.6\sim0.7$	10
$0.5\sim0.6$	6

4.2.2 检验结果

下面分别以 57106、58251 站为例，说明检验步骤以及结果。

以 57106 站为例，在距离最近的 20 个站中，选取 57134、57016 和 57206 3 个相关系数分别达到 0.7291、0.7268 和 0.8238 的站建立年降水量的参考序列，图 4 即为 57106 站的降水量比值序列以及 T_s 序列。从比值序列可以看出，待检序列与参考序列比值一直在 1 附近振荡，而到 1997 年以后，比值一直位于 1 以下。从 T_s 图上可以看出 1997 年的高值点达到了 6.2048，但并没有超过 5% 的显著性水平，因此，该点不能算作不连续的点，该站是均一的。

以 58251 站为例，在距离最近的 20 个站中，选取 58221、58208、58203 和 58236 4 个相关系数分别达到 0.8366、0.8299，0.7607 和 0.7468 的站建立年降水量的参考序列，根据上面的计算方法，得出的降水量比值序列以及 T_s 序列（如图 5）。可以看到待检序列与参考序列的比值一直在 1 附近振荡，但 20 世纪 60 年代之后的比值低于 60 年代之前，在 T_s 图上可以看到比较明显的不连续点发生在 1960 年，最大值为 10.809，超过了 5% 的水平，即该序列是非均一的。

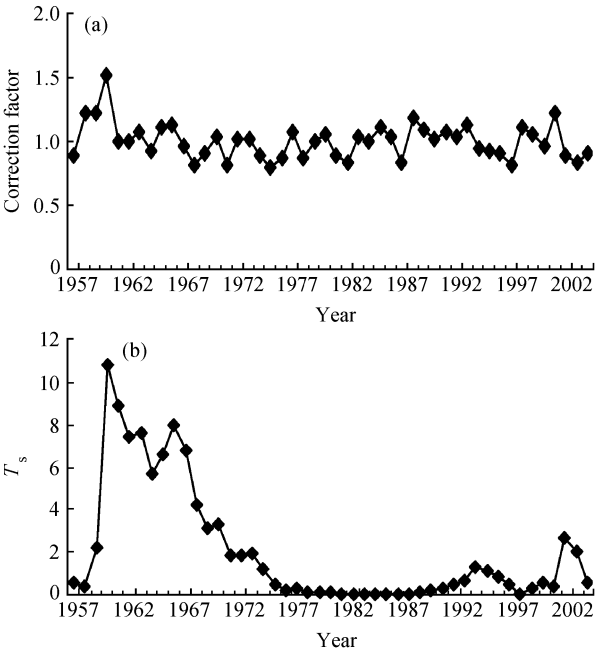


图5 58251 站年降水量 (a) 比值序列和 (b) T_s 序列
Fig. 5 (a) Correction factor series of annual precipitation and (b) T_s series of station 58251

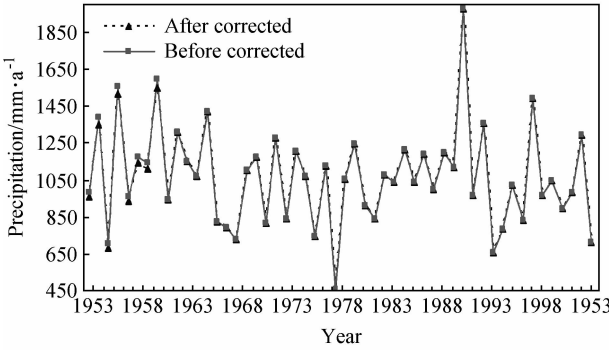


图6 58251 站订正前后的年降水量序列
Fig. 6 Precipitation series before corrected and after corrected at 58251

表4 年降水量均一性检验结果
Table 4 Results of homogeneity test of annually precipitation

相关系数	台站号	$T_{s,max}$ 年份	$T_{s,max}$	订正系数	$Y_i/\bar{Y}$ 与 F_i 相关系数
>0.8	58314	1964	10.9962	0.9883	0.876
	58326	1967	15.2541	1.0173	0.8602
	51087	1985	10.9679	1.0147	0.9102
	51365	1969	8.4186	0.9872	0.8956
	54324	1992	8.5643	1.0141	0.8761
0.8~0.7	54836	1992	8.4176	1.0166	0.8697
	56144	1999	9.4378	0.9902	0.8267
	58251	1960	10.8090	0.9718	0.8272
	58477	1974	9.4004	1.0125	0.8128
	50527	1999	13.8271	1.0511	0.7399
0.7~0.6	50888	1981	9.6820	0.9836	0.8082
	51241	1979	13.8713	0.9784	0.8414
	51330	1988	9.7630	1.0352	0.7311
	51463	1974	12.2831	1.0315	0.8446
	52868	1999	10.1126	0.9721	0.7774
0.6~0.5	53588	1988	14.9808	0.9679	0.7859
	54823	1990	8.8959	1.0258	0.7783
	56951	1988	16.3560	0.9921	0.7982
	57348	2000	8.7997	1.0136	0.8182
	52737	1973	20.6696	1.0701	0.7285
	59948	1985	10.3545	1.0252	0.7042
	51642	1975	11.7512	1.0750	0.7966
	52495	1992	8.8426	1.0549	0.7589
	54181	1987	8.6480	0.9892	0.7818
	56065	1986	12.1681	0.9897	0.7772

5 非均一降水量序列的订正

5.1 年降水量的订正

图6为58251站订正前后的年降水序列，1960年订正序列比原始序列减少了44.8mm。

在681个站中，除去与其对应的参考站点中相关性 <0.5 而不做检测的52个站以外，剩下629个站中检测出25个站有突变点，占所检站点总数的3.97%。表4为这些站的检验结果和订正情况。由表4可以看出，25个站点的订正系数位于0.97~1.1之间。当选取的参考站点相关系数 >0.7 时，年降水量原始序列与构造的参考序列相关性总在0.8以上，且大部分位于0.85以上；当选取的参考站点的相关系数 >0.6 时，年降水量原始序列与构造的参考序列相关系数在0.7~0.8之间；选取的参考站点的相关系数 >0.5 时，则相关系数在0.7左右。表明年降水量原始序列和构造参考序列的相关性与待检站点和对应参考站点的相关性有关，也直接影响了序列的订正精度。

表 5 58251 站各月的订正系数

Table 5 Correction factors for monthly precipitation of station 58251

月份	订正系数
1 月	1.0326
2 月	1.0392
3 月	0.9988
4 月	0.9513
5 月	1.0180
6 月	1.1413
7 月	0.8254
8 月	0.5483
9 月	1.1903
10 月	0.9743
11 月	1.0046
12 月	2.0047

5.2 对月降水量的订正

在对年降水量进行订正后，得出了非均一的年份，运用同样的方法，可以对逐月资料进行订正。表 5 为 58251 站各月的订正系数，比较得出，7 和 8 月的订正系数分别为 0.8254 和 0.5483，与年降水的订正方向一致，且幅度较大，这与降水较多的月份给予较多的权重是一致的；也有月份出现了与年降水量订正方向相反的情况，例如 12 月订正系数为 2.0047，但是尽管如此，由于冬季降水量很小，所以订正量不大。

6 讨论与结论

- (1) 采用 North 检验与 SNHT 方法结合，对我国 20 年以上的月降水资料进行均一性检验，结果表明，大约只有近 4% 的台站降水序列存在非均一性。
- (2) 年降水量序列订正系数在 -3%~7% 之间，且与夏季的月降水订正系数一致，这与夏季降水比较多，冬季降水偏少有关。
- (3) 待检台站与参考台站的相关性不高，站点过于稀疏是导致降水量序列非均一性订正困难的主要问题。
- 本工作的目的是制作均一化降水量数据集，因为单纯从气候数据的均一化角度来讲，本文站点过于稀疏，无法得到较高信度的均一化降水量

数据集。在以后的工作中，有必要引用加密数据，提高资料站点密度，以提高订正的精确性。但我们从均一化数据集制作的角度，基于月降水台站的分布密度，得到了 1 级近似均一性的降水数据集，这在应用上是可行的。

参考文献 (References)

[1] 李庆祥, 刘小宁, 张洪政, 等. 定点气候序列的均一性研究. 气象科技, 2003, **31** (1): 2~12
Li Qingxiang, Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, et al. Homogeneity study of in situ observational climate series. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2003, **31** (1): 2~12

[2] Groisman P Y, Koknaeva V V, Belokrylova T A, et al. Overcoming biases of precipitation measurement: A history of the USSR experience. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1991, **72**: 1725~1733

[3] Dai Aiguo, Fung I Y, Del Genio D. Surface observed global land precipitation variations during 1900—88. *J. Climate*, 1997, **10**: 2943~2949

[4] 李庆祥, Menne M J, Williams Jr C N, 等. 利用多模式对中国气温序列中不连续点的检测. 气候与环境研究, 2005, **10** (4): 736~742
Li Qingxiang, Matthew M J, Williams Jr N, et al. Detection of discontinuities in Chinese temperature series using a multiple test approach. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 736~742

[5] Li Qingxiang, Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, et al. Detecting and adjusting on temporal inhomogeneities in Chinese mean surface air temperature datasets. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, **21**: 260~268

[6] 黄嘉佑, 刘小宁, 李庆祥. 夏季降水量与气温资料的恢复试验. 应用气象学报, 2004, **15** (2): 200~206
Huang Jiayou, Liu Xiaoning, Li Qingxiang. The experimental study of reconstruction for summer precipitation and temperature in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2004, **15** (2): 200~206

[7] 刘小宁. 我国 40 年年平均风速的均一性检验. 应用气象学报, 2000, **11** (2): 27~34
Liu Xiaoning. The homogeneity test on mean annual wind speed over China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2000, **11** (2): 27~34

[8] 刘小宁, 孙安健. 年降水量序列非均一性检验方法探讨. 气象, 1995, **21** (8): 3~6
Liu Xiaoning, Sun Anjian. An inhomogeheity test study of annual precipitation series. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1995, **21** (8): 3~6

- [9] 宋超辉, 刘小宁, 李集明. 气温序列非均一性检验方法的研究. 应用气象学报, 1995, **6** (3): 289~296
Song Chaohui, Liu Xiaoning, Li Jiming. A study of testing methods on inhomogeneity of temperature sequences. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1995, **6** (3): 289~296
- [10] 翟盘茂. 中国历史探空资料中的一些过失误差及偏差问题. 气象学报, 1997, **55** (5): 563~572
Zhai Panmao. Some gross errors and biases in China's historical radiosonde data. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, **55** (5): 563~572
- [11] 唐国利, 任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析. 气候与环境研究, 2005, **10** (4): 791~798
Tang Guoli, Ren Guoyu. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 791~798
- [12] 周雅清, 任国玉. 华北地区地表气温观测中城镇化影响的检测和订正. 气候与环境研究, 2005, **10** (4): 744~753
Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Identifying and correcting urban bias for regional surface air temperature series of north China over period of 1961—2000. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 744~753
- [13] 任国玉, 徐铭志, 初子莹, 等. 近 54 年中国地面气温变化. 气候与环境研究, 2005, **10** (4): 717~727
Ren Guoyu, Xu Mingzhi, Chu Ziyang, et al. Changes of surface air temperature in China during 1951—2004. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 717~727
- [14] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon. Wea Rev.*, 1982, **110**: 699~706
- [15] Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data. *International Journal of Climatology*, 1986, **6**: 661~675