

# 黄河中下游地区过去 300 年降水变化\*

郑景云\*\* 郝志新 葛全胜

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要** 基于清代雨雪档案记载、现代器测气象记录及农田土壤含水量观测资料, 根据降水入渗与水量平衡模型和田间试验验证, 定量复原了 1736~1910 年黄河中下游地区 17 个站点的降水量, 建立了黄河中下游地区及其 4 个子区 1736 年以来的降水变化序列. 通过对重建序列的分析发现: 黄河中下游地区在 1915 年前后存在降水由多变少的突变. 其中 1791~1805 年、1816~1830 年及 1886~1895 年等 3 个时段降水明显偏多; 而 1916~1945 年及 1981~2000 年等 2 个时段降水则明显偏少. 另外, 功率谱分析显示黄河中下游地区降水变化存在 22~25 年、3.9 年及 2.7 年等 3 个显著周期. 但在 1915 年的突变之后, 22~25 年的周期信号开始减弱, 至 20 世纪 40 年代后期, 这一周期信号完全消失, 代之出现了 35~40 年的周期.

**关键词** 黄河中下游地区 清代雨雪档案 过去 300 年 降水变化

## 1 引言

高分辨率历史气候序列的重建, 是国际全球变化研究核心计划“过去全球变化”(PAGES)与“气候变率与可预报性”计划(CLIVAR)的重要内容. 它对于研究气候变率, 建立气候模式, 增加气候预测的准确性及研究人类活动对气候变化影响等都具有重要的意义<sup>[1,2]</sup>. 中国是一个历史悠久的文明古国, 拥有丰富的历史文献资料, 在开展这一领域的研究中具有独特的优势<sup>[3,4]</sup>. 自 20 世纪 70 年代以来, 中国学者已利用历史文献重建了一大批历史气候变化序列. 然而至目前为止, 多数重建结果仅给出了降水多少的等

级概念, 如过去 500 年旱涝等级(全国共 120 个站)<sup>[5]</sup>、过去 2000 年旱涝等级(全国共 45 个地区)<sup>[6]</sup>等; 只有少数工作直接重建了降水量<sup>[7,8]</sup>.

在我国所拥有的各种历史文献记载中, 清代雨雪档案记载被认为是重建高分辨率降水的最可靠资料之一<sup>[9]</sup>. 它起于康熙三十二年(公元 1693 年), 止于宣统三年(公元 1911 年), 覆盖了清代 18 个行省的 268 个府, 其中乾隆元年(1736 年)以后的记载更为详细、系统. 其记载内容包括定量记录(即每次降雪的积雪厚度或每次降雨的入土深度, 以分、寸为记载单位, 因此通常称“雨雪分寸”)和定性描述(对某次降水过程, 或阶段性乃至全年降水状况的定性评估)两类(图 1).

2003-09-08 收稿, 2004-08-25 收修改稿

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40331013)及中国科学院知识创新工程项目(批准号: KZCX3-SW-321)共同资助

\*\* E-mail: zhangjy@igsrr.ac.cn

| 年号   | 乾隆三  | 年 | 公元        | 1738 | 年 | 3         | 月 | 直隶       | 省         | 雪   |
|--|------|---|-----------|------|---|-----------|---|----------|-----------|-----|
| (a)  |      |   |           |      |   |           |   |          | 资料        | 摘录  |
|  |      |   |           |      |   |           |   | 包5       | 闻         |     |
|  |      |   |           |      |   |           |   | 朱批奏折     |           |     |
| 直隶总督李卫   |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 乾隆三年正月十四日(4/3)同得春雪之各州县卫分寸开列于后  |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| .....  |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 正定府属   |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 正定县: 得雪七寸  |      |   | 井陘县: 得雪五寸 |      |   | 获鹿县: 得雪四寸 |   |          | 元氏县: 得雪三寸 |     |
| 栾城县: 得雪七寸  |      |   | 平山县: 得雪四寸 |      |   | 阜平县: 得雪二寸 |   |          | 行唐县: 得雪三寸 |     |
| 晋州: 得雪七寸   |      |   | 藁城县: 得雪一寸 |      |   | 无极县: 得雪五寸 |   |          | 新乐县: 得雪四寸 |     |
| .....  |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 正月二十八日(18/3)奉朱批  |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 年号   | 宣统二  | 年 | 公元        | 1910 | 年 | 7~8       | 月 | 山东       | 省         | 雨   |
| (b)  |      |   |           |      |   |           |   |          | 资料        | 摘录  |
|  |      |   |           |      |   |           |   | 包52(3)   | 瑾         |     |
|  |      |   |           |      |   |           |   | 军机处录副    |           |     |
| 山东巡抚孙宝琦  |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 通省一百零七州县除栖霞县未报外, 六月分各属得雨日期寸数清单   |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 济南府属   |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 历城: 七日(13/7)雨五寸, 十八日(24/7)雨五寸, 二十日(26/7)雨五寸  |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 章邱: 七日(13/7)雨一寸, 十七日(23/7)雨一寸, 十八日(24/7)雨五寸, 二十二日(28/7)雨一寸   |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 邹平: 七日(13/7)雨四寸, 十七日(23/7)雨四寸, 十八日(24/7)雨深透, 二十二日(28/7)雨四寸   |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 长山: 七日(13/7)雨五寸, 十八日(24/7)雨深透, 二十日(26/7)雨二寸  |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| .....  |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 八月十六日(9月19日)   |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 年号   | 同治十二 | 年 | 公元        | 1873 | 年 | 春~秋       | 月 | 直隶       | 省         | 雨、农 |
| (c)  |      |   |           |      |   |           |   |          | 资料        | 摘录  |
|  |      |   |           |      |   |           |   | 包36-39,9 | 丽         |     |
|  |      |   |           |      |   |           |   | 军机处录副    |           |     |
| 直隶总督 李鸿章   |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 本年直隶地方自春徂夏雨泽尚为调匀, 二麦可称中稔, 查各属二麦约收分数: .....正定、顺德、大名、宣化、易州、赵州、定州等十一府州属约收六分余, .....自六月以后(23/7以后)大雨时行.....夏秋之交雨水过多; 秋后又晴, 积潦渐涸, 农民俱已乘时广种麦田. .... |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |
| 十月初一日(20/11)奏  |      |   |           |      |   |           |   |          |           |     |

图 1 雨雪档案记载示例

(a) 雪定量记录清单; (b) 雨定量记录清单; (c) 阶段降水定性描述. 内容仅摘录部分, 标点为作者所加, 括号中日期为换算的阳历日期

与其他历史文献的气候记载相比, 雨雪档案记载具有定量化和高分辨率的优点. 至目前为止, 利用这份资料进行降水重建的尝试工作已取得了较好结果<sup>[9-12]</sup>. 本文拟在这些工作的基础上, 利用这份资料

对黄河中下游地区的降水变化进行重建与分析.

## 2 研究区域与资料简介

黄河中下游地区属暖温带半湿润气候区. 从降

水特征看, 这里降水季节性强、变率大, 旱涝灾害频繁。近来, 由于社会经济的快速发展, 使得这里本已短缺的水资源变得更为紧张。这一地区的历史气候研究已有较好基础<sup>[13,14]</sup>, 进一步重建该地区的降水序列, 分析该地区降水的长期变化规律及其趋势, 合理分配水资源, 对于这一地区今后的水资源利用与社会经济发展具有重要的参考价值。

本文所采用的资料包括黄河中下游地区 17 个站点的雨雪档案记载、器测降水记录(除 17 站外, 还包括其他 5 个非重建站点)、各农业气象站的土壤含水量记录及石家庄栾城农业生态试验站人工模拟降雨田间入渗试验观测资料 4 个部分。各站点的站名及器测气象记录的起止年份列于表 1 中, 由于河间没有器测记录, 本文用其临近站点沧州代替。各站雨雪档案的记载长度均为 1736~1911 年。土壤含水量资料除栾城站为 1996~2002 年外, 其余站点为建站开始(具体年份列于表 1)至 2000 年。人工模拟降雨田间入渗试验观测资料为作者于 2002 年 5 月 30 日~6 月 16 日在石家庄栾城农业生态试验站进行人工模拟降雨田间入渗试验的实测数据。

### 3 降水序列重建

#### 3.1 子区域划分

由于黄河中下游地区 17 个站点间在年内降水量分配、降水年际变率及长期降水量的变化趋势上存在

着一定的差别, 为了详细地分析该研究区域内的总体降水变化特征, 我们首先利用因子分析方法, 依据 1956~1996 年年降水量, 并参照气候区划结果<sup>[15]</sup>, 将研究区域内的站点分成 4 个子区(图 2)。第 I 区包括石家庄、河间(沧州)、太原和济南 4 站, 主要分布在黄河以北(以下简称“河北区”); 第 II 区包括安阳、临汾和长治 3 站, 主要分布在山西南部(以下简称“晋南区”); 第 III 区包括洛阳、郑州、运城、西安与延安 5 站, 主要分布在渭河流域(以下简称“渭河区”); 第 IV 区包括商丘、菏泽、潍坊、泰安和临沂 5 站, 主要分布在山东省境内(以下简称“山东区”。

#### 3.2 1736~1910 年的各站降水量重建

该时段的降水量主要用清代雨雪档案的记载进行重建。关于雨雪档案的记载内容、记录形式、对定性资料的量化处理过程和利用清代档案进行降水重建的方法在文献<sup>[10, 11]</sup>中已经有详细描述, 本文主要对重建思路做简要说明, 并给出重建过程中的参数取值。

(1) 降雨量的重建: 根据水量平衡的基本原理, 在不考虑蒸发量(因在降雨过程中, 空气湿度大, 蒸发量极小)的情况下, 一次降雨量近似等于入渗量和径流量之和。其中入渗量由土壤物理学的 Green-Ampt 入渗模型计算得出:

$$F = (\theta_s - \theta_f) \times \rho \times Z_f / \rho_w, \quad (1)$$

表 1 黄河中下游地区 17 个站点的站名及器测记录的起止年份

| 站点 <sup>a)</sup>      | 农业气象站的具体位置及建站时间/年 | 器测气象记录的起止年份  |
|-----------------------|-------------------|--|
| 石家庄(正定府)              | 栾城, 1996          | 1951~2000 年  |
| 河间(河间府) <sup>b)</sup> | 霸县, 1990          | 1930~1937 年, 1954~2000 年                           |
| 太原(太原府)               | 介休, 1990          | 1916~2000 年(1929, 1938, 1944~1946 和 1948~1949 年缺测) |
| 济南(济南府)               | 济南, 1990          | 1916~2000 年  |
| 延安(延安府)               | 延安, 1990          | 1951~2000 年  |
| 西安(西安府)               | 咸阳, 1990          | 1923~1926 年, 1931~2000 年                           |
| 运城(解州与蒲州府)            | 运城, 1990          | 1956~2000 年  |
| 洛阳(河南府)               | 卢氏, 1990          | 1931~1937 年, 1951~1996 年                           |
| 郑州(开封府)               | 郑州, 1981          | 1930~1938 年, 1950~2000 年                           |
| 临汾(平阳府)               | 临汾, 1990          | 1951~2000 年  |
| 长治(潞安府)               | 长治, 1990          | 1951~2000 年  |
| 安阳(彰德府)               | 濮阳, 1990          | 1919~1926 年, 1931~1937 年, 1951~2000 年              |
| 商丘(归德府)               | 商丘, 1990          | 1954~1999 年  |
| 菏泽(曹州府)               | 菏泽, 1994          | 1951~2000 年  |
| 临沂(沂州府)               | 临沂, 1994          | 1951~2000 年  |
| 泰安(泰安府)               | 泰安, 1987          | 1951~2000 年  |
| 潍坊(青州府与莱州府)           | 潍坊, 1994          | 1951~2000 年  |

a) 括号中的府、州为该站点所对应的清代雨雪档案记载地点; b) 器测记录用沧州站的器测记录代替

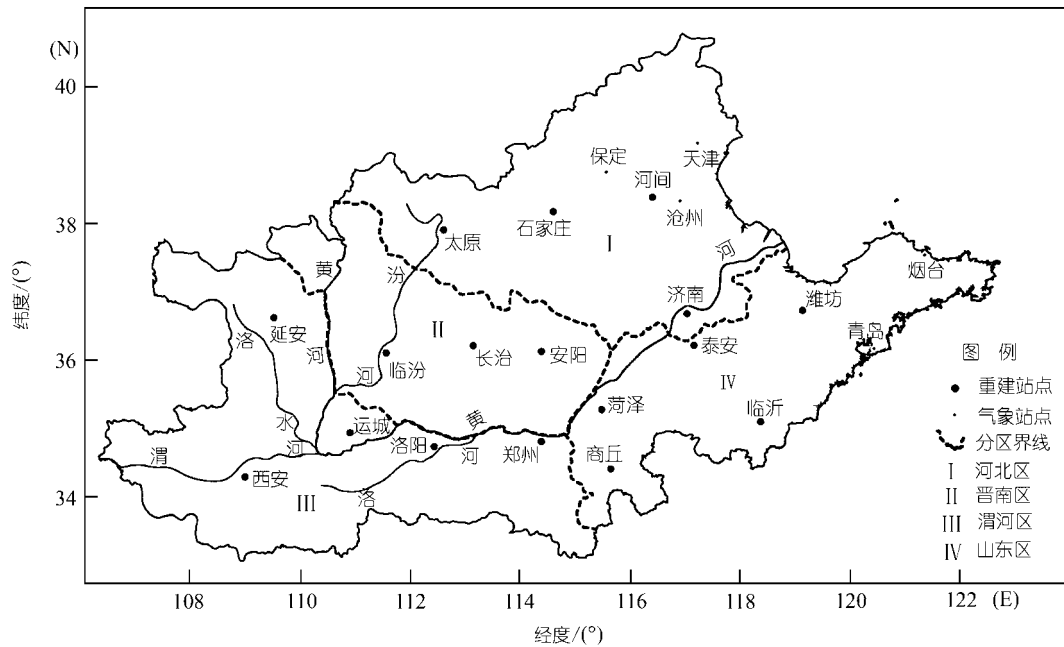


图 2 黄河中下游地区降水类型分区

式中,  $\theta_s$  为土壤饱和含水量;  $\theta_i$  为前期土壤含水量;  $\rho$  为土壤容重;  $Z_f$  为入渗深度, 即雨分寸值;  $\rho_w$  为水的比重. 因一个地区的土壤质地在本研究时段内变化不大, 所以可假定(1)式中的土壤容重、饱和含水量等土壤物理特性参数在研究时段内也变化不大. 为此, 在进行历史时期入渗量恢复计算时, 历史时期的土壤物理特性参数可以用现代农业气象站的观测数值来代替(表 2). 但由于本研究区域内大部分地区春季升温迅速, 风速大, 地表蒸发大, 土壤失墒极快; 同时这一时期降雨量少, 且又多为小雨, 每次降雨后一般很难使土壤含水量达到或接近饱和, 因此在计算过程中需要对土壤饱和含水量的取值做订正(表 3). 而对于山东区的 5 个站点, 由于春季降雨量相对较多, 降雨发生次数较为频繁, 因而没有对饱和含水量进行订正. 另外, 前期土壤含水量的取值仍按文献[10, 11]的方法进行, 分层、分级计算各站的逐月土壤含水量, 结果见图 3. 为节省篇幅, 图 3 和表 3 仅给出各子区中的 1 个站点作为示例.

在非雨季, 由于降雨后地表无径流产生, 因而降雨量近似等于入渗量; 而在雨季(一般为 6~9 月), 地

表有径流产生, 雨水并非全部入渗, 因而降雨量

$$P_r = F/\beta \quad (2)$$

式中,  $P_r$  为降雨量;  $F$  为入渗量(已在上一部计算中获得);  $\beta$  为入渗系数, 它与降雨强度、土壤质地有关, 其大小可根据雨季降雨量与降雨强度的关系获得, 具体确定方法见文献[11], 结果见表 4. 为节省篇幅, 每个子区各取 1 个站点作为示例.

(2) 降雪量的重建: 在清代雨雪档案中, 冬季有大量的雪分寸的记载, 其记载方式与现代气象观测的积雪深度一致, 因而可直接利用现代降雪量与积雪深度之间的转换关系进行降雪量计算, 其关系式为

$$P_s = H_s \times \rho_s / \rho_w \quad (3)$$

式中,  $P_s$  为降雪量;  $H_s$  为每次降雪的积雪深度, 即雪分寸;  $\rho_s$  为雪密度;  $\rho_w$  为水的比重.

据黄河中下游地区有积雪深度记录和逐日降水记录的石家庄等 9 个站点 1951~1990 年 1 月份的资料统计, 降雪量与积雪深度之间有很好的相关关系, 其相关系数、样本量及  $\rho_s$  的取值列于表 5 中, 相关系数均能通过 1% 的显著性水平检验. 选择 1 月份的资料

表 2 研究区域内各站点的土壤物理特性参数<sup>a)</sup>

| 站点  | 土层/cm | $\rho/g \cdot cm^{-3}$ | $\theta_0/\%$ | $\theta_s/\%$ | 站点 | 土层/cm | $\rho/g \cdot cm^{-3}$ | $\theta_0/\%$ | $\theta_s/\%$ |
|-----|-------|------------------------|---------------|---------------|----|-------|------------------------|---------------|---------------|
| 石家庄 | 0~20  | 1.32                   | 21.0          | 32.0          | 安阳 | 0~20  | 1.46                   | 21.9          | 31.0          |
|     | 20~50 | 1.61                   | 21.0          | 32.0          |    | 20~50 | 1.49                   | 19.9          | 30.0          |
| 河间  | 0~20  | 1.18                   | 22.1          | 35.0          | 延安 | 0~20  | 1.28                   | 21.0          | 30.0          |
|     | 20~50 | 1.20                   | 27.6          | 40.0          |    | 20~50 | 1.33                   | 19.0          | 30.0          |
| 太原  | 0~20  | 1.31                   | 29.8          | 35.0          | 西安 | 0~20  | 1.37                   | 20.4          | 30.0          |
|     | 20~50 | 1.39                   | 30.0          | 35.0          |    | 20~50 | 1.52                   | 22.6          | 31.0          |
| 临汾  | 0~20  | 1.43                   | 21.1          | 30.0          | 济南 | 0~20  | 1.45                   | 22.4          | 32.0          |
|     | 20~50 | 1.45                   | 21.9          | 30.0          |    | 20~50 | 1.35                   | 23.8          | 34.0          |
| 长治  | 0~20  | 1.18                   | 26.9          | 36.0          | 泰安 | 0~20  | 1.37                   | 20.4          | 29.1          |
|     | 20~50 | 1.37                   | 26.3          | 36.0          |    | 20~50 | 1.52                   | 22.6          | 32.3          |
| 运城  | 0~20  | 1.43                   | 21.9          | 30.0          | 菏泽 | 0~20  | 1.34                   | 25.9          | 37.0          |
|     | 20~50 | 1.48                   | 20.3          | 29.0          |    | 20~50 | 1.56                   | 23.5          | 33.6          |
| 洛阳  | 0~20  | 1.36                   | 22.0          | 37.0          | 临沂 | 0~20  | 1.43                   | 21.0          | 30.0          |
|     | 20~50 | 1.49                   | 21.8          | 37.0          |    | 20~50 | 1.43                   | 24.0          | 34.3          |
| 郑州  | 0~20  | 1.32                   | 22.4          | 30.0          | 潍坊 | 0~20  | 1.41                   | 20.1          | 28.7          |
|     | 20~50 | 1.62                   | 19.9          | 29.0          |    | 20~50 | 1.45                   | 19.8          | 28.3          |
| 商丘  | 0~20  | 1.36                   | 22.0          | 30.0          |    |       |                        |               |               |
|     | 20~50 | 1.32                   | 23.9          | 31.0          |    |       |                        |               |               |

a)  $\rho$  代表土壤容重,  $\theta_0$  代表田间持水量,  $\theta_s$  代表饱和含水量

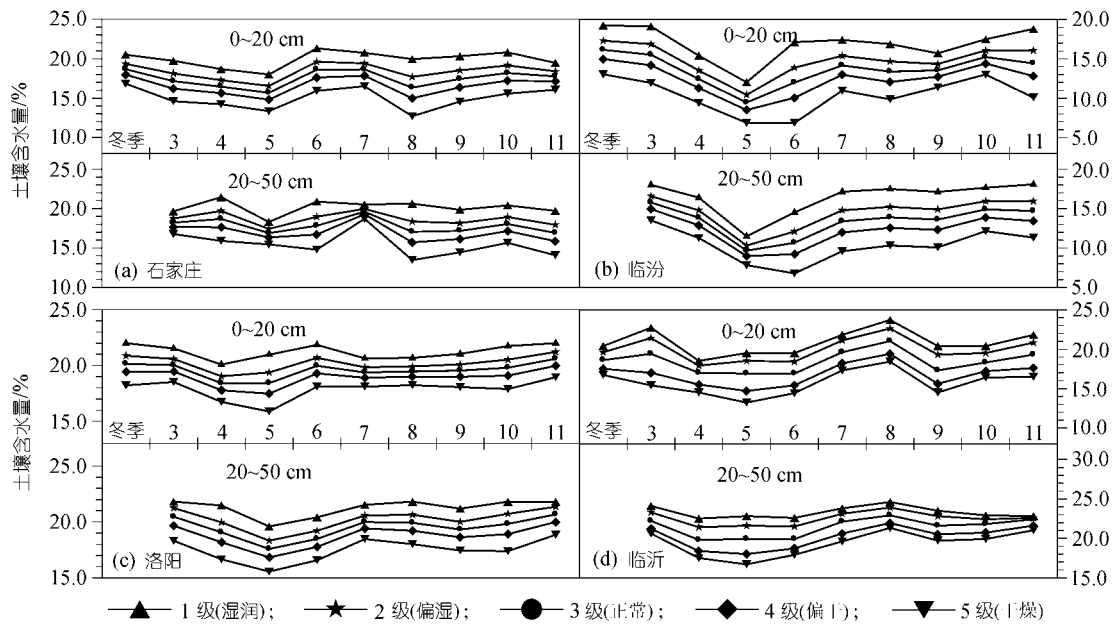


图 3 代表站点 0~20 cm 及 20~50 cm 土层各级土壤含水量取值图

表 3 代表站点的春季土壤饱和含水量订正值/%

| 月份 | 石家庄 |    |    |    |    | 临汾 |    |    |    |    | 洛阳 |    |    |    |    |
|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|    | 1级  | 2级 | 3级 | 4级 | 5级 | 1级 | 2级 | 3级 | 4级 | 5级 | 1级 | 2级 | 3级 | 4级 | 5级 |
| 3  | 27  | 27 | 27 | 27 | 27 | 21 | 21 | 26 | 26 | 26 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 |
| 4  | 27  | 27 | 27 | 27 | 27 | 21 | 21 | 26 | 26 | 26 | 30 | 30 | 30 | 37 | 37 |
| 5  | 27  | 27 | 32 | 32 | 32 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 30 | 30 | 30 | 30 | 37 |

表 4 代表站点的入渗系数的取值

| 站点  | 月份   | 月入渗量/mm | 入渗系数 | 月入渗量/mm | 入渗系数 | 月入渗量/mm | 入渗系数 |
|-----|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| 石家庄 | 6, 9 | ≤59     | 1.0  |         |      | >59     | 0.84 |
|     | 7    | ≤137    | 0.72 |         |      | >137    | 0.46 |
|     | 8    | ≤80     | 0.72 |         |      | >80     | 0.46 |
| 临汾  | 7    | ≤110    | 1.0  | 110~145 | 0.84 | >145    | 0.72 |
|     | 8    | ≤100    | 1.0  | 100~135 | 0.84 | >135    | 0.72 |
| 洛阳  | 7    | ≤130    | 1.0  | 130~170 | 0.84 | >170    | 0.72 |
|     | 8    | ≤120    | 1.0  | 120~155 | 0.84 | >155    | 0.72 |
|     | 9    | ≤90     | 1.0  |         |      | >90     | 0.84 |
| 临沂  | 6, 9 | ≤50     | 1.0  | 50~100  | 0.84 | >100    | 0.72 |
|     | 7    | ≤85     | 0.84 | 85~145  | 0.72 | >145    | 0.46 |
|     | 8    | ≤80     | 0.84 | 80~110  | 0.72 | >110    | 0.46 |

表 5 部分站点的积雪密度及降雪量与积雪深度之间的相关系数

| 站点                     | 石家庄    | 太原     | 临汾     | 安阳     | 西安     | 延安     | 郑州     | 济南     | 菏泽     |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 样本年数                   | 22     | 18     | 21     | 14     | 44     | 30     | 20     | 16     | 19     |
| 相关系数                   | 0.8341 | 0.8411 | 0.9084 | 0.8688 | 0.7886 | 0.8937 | 0.8229 | 0.7886 | 0.9048 |
| 雪密度/g·cm <sup>-3</sup> | 0.0757 | 0.0704 | 0.0790 | 0.0814 | 0.0834 | 0.0838 | 0.0962 | 0.0926 | 0.1204 |

进行统计是因为黄河中下游地区该月的日平均气温通常低于 0℃, 以降雪为主要降水类型, 雪落在地面后不易融化, 可以较为准确的算出积雪深度与降雪量的关系. 需要说明的是, 对于那些没有积雪深度资料的站点, 在计算时, 选其邻近站点代替.

根据以上的重建方法, 即可恢复出黄河中下游地区 17 个站点 1736~1911 年的逐月降水量, 将其累加可得逐季或逐年(前一年的 3 月至次年的 2 月)降水量.

(3) 缺值的插补: 由于各站在 1751 等 15 年(占重建时段, 即 1736~1910 年共 175 年的 8.6%)的清二代雨雪档案记载内容不完整, 为保持序列的完整性, 本文采用以下方法进行插补. 石家庄、河间(沧州)、长治、安阳 4 站以《海河流域历代自然灾害史料》<sup>[16]</sup>确定的旱涝等级进行插补; 济南、泰安、菏泽、临沂、潍坊 5 站以文献<sup>[17]</sup>所重建的逐季旱涝指数为基础, 根据该文所提供的降水与旱涝指数之间的关系式进行插补; 郑州、洛阳、商丘 3 站以《河南省历代大水大旱年表》<sup>1)</sup>中所确定的旱涝等级进行插补; 延安和西安 2 站用《陕西省自然灾害史料》<sup>2)</sup>的水旱灾害记

载进行插补<sup>[18]</sup>; 而太原、运城、临汾 3 站根据《中国近 500 年旱涝分布图集》所附的旱涝等级进行插补. 插补的具体方法为将重建的降水量序列从大到小排序, 分别按 15%, 20%, 30%, 20% 和 15% 分布概率计算降水量平均值, 即为 1(涝)、2(偏涝)、3(正常)、4(偏旱)和 5(旱)5 个旱涝等级所对应的降水量取值. 需要说明的是这种插补有较大的误差的范围, 但由于缺值所占比例较小, 因此不会对重建结果产生实质性的影响.

(4) 重建结果的可靠性验证: 为验证利用上述方法(简称“物理模型法”)所重建的降水是否可靠, 作者还在石家庄采用了田间试验的方法(简称“田间试验法”)进行降水重建. 其中田间试验工作是 2002 年 5 月 30 日~6 月 16 日在石家庄栾城中国科学院农业生态系统试验站进行的, 其基本过程是利用人工模拟降雨器在一块地势平坦的农田内进行定量降雨控制试验, 在降雨过程结束(地表无积水)后, 向下掘土量测该次降雨的入土深度(即土壤干湿交界处的深度)和其他土壤物理参数. 为了使人工模拟降雨试验能够代表各个季节的不同自然降雨状况, 田间试验相应

1) 河南省水文总站编. 河南省历代大水大旱年表. 1980, 173~261

2) 陕西省气象局气象台. 陕西省自然灾害史料. 1976, 38~145

设计了不同降雨强度、降雨历时和降水量. 其中降雨量大小包括 6.25, 12.5, 25.0, 37.5, 50.0, 60.0, 75.0, 85.0 和 100 mm 等, 用于代表自然降水的小雨(0.1~10 mm)、中雨(10~25 mm)、大雨(25~50 mm)、暴雨(50~100 mm)等各种情况; 雨强大小分别为 0.21 mm/min, 0.42 mm/min, 0.83 mm/min, 1.25 mm/min 和 1.67 mm/min, 用于代表各种类型(小雨、中雨、大雨、暴雨和特大暴雨)自然降水的平均雨强; 实验期间土壤的初始含水量变化范围为田间持水量的 24.2%~78.8%, 用于代表降水前的土壤湿润状况从极干到基本湿润; 试验时, 每个试验处理一般设置 3 个以上的重复. 由于该试验是仿照清代雨分寸观测方法而设计和进行的, 因此可以利用观测数据建立降水量与入渗深度关系方程进行清代降雨量重建. 其方程为

$$P_r = 1.6882 \times 10^{-4} Z_f^2 + 0.1298 Z_f, \quad (4)$$

式中  $P_r$  为人工降雨量,  $Z_f$  为入土深度, 样本数为 41 个, 复相关系数  $R=0.9325$ . (4) 式的方差解释量高达  $R^2=87\%$ , 可认为利用该方程能够准确地重建出降水量. 对石家庄站 2 种重建方法所重建的季节与年降水量结果对比分析表明: 2 种方法重建结果的相对误差分别为 2.0%(春季)、3.4%(夏季)、2.1%(秋季)、2.9%(年), 即 2 种方法的重建结果差别很小(详见文献 [12]), 这说明利用物理模型的重建方法是可靠的. 从而也证明在与石家庄土壤质地相近的黄河中下游地区, 采用物理模型法所重建的降水序列, 其结果也是可靠的.

### 3.3 1911~1950 年各子区降水量重建

由于该时段没有清代雨雪档案记载, 且器测记录也残缺不全, 因此本文仅以子区为单元, 分别建立 4 个子区的降水序列. 基本方法是: 首先根据 1951~2000 年器测降水记录, 建立各子区的降水序列(即计算各子区内所有站点的平均值); 然后分析各子区降水序列的空间代表性(即计算子区降水与区内各站降水的相关性); 最后以 1911~1950 年各子区有降水观测站点的降水记录为基础, 根据子区降水与各站降水的回归方程计算各子区降水量.

(1) 河北区: 该区 1911~1950 年降水器测记录较

完整. 其中太原和济南站均从 1916 年开始, 而保定(1914 年开始)与天津(1900 年开始)的器测记录分别与石家庄和沧州站的相关性较好, 利用其相关关系( $P_s=0.6553P_b+185.22$ ,  $r=0.74$ ;  $P_c=0.947P_t+62.375$ ,  $r=0.737$ ; 式中  $P_s$ ,  $P_b$ ,  $P_c$  和  $P_t$  分别为石家庄、保定、沧州和天津的降水量,  $r$  为方程的相关系数)可分别得到石家庄和沧州该时段的年降水量. 进而可以直接计算 4 个站的平均值, 得到河北区 1911~1950 年的降水量. 其中太原、济南 2 站 1911~1915 年及石家庄 1911~1913 年的降水先用第 3.2 小节所介绍的资料和方法插补.

(2) 晋南区: 该区 1911~1950 年降水器测记录较差. 仅安阳的记录自 1919 年开始. 本文采用晋南区降水量与安阳站降水量的回归方程( $P_{av}=0.5774P_a+213.38$ ,  $r=0.8741$ ,  $P_{av}$  为子区降水量,  $P_a$  为安阳站降水量)计算本区该时段的降水量.

(3) 渭河区: 该区 1911~1950 年降水器测记录较差. 仅西安的记录自 1923 年开始. 本文采用渭河区降水量与西安站降水量的回归方程( $P_{av}=0.7928P_x+80.427$ ,  $r=0.8323$ ,  $P_{av}$  为子区降水量,  $P_x$  为西安站降水量)计算本区该时段的降水量.

需要说明的是晋南、渭河 2 子区有部分年份(如晋南区的 1911~1918 年等, 渭河区的 1911~1922 年)没有器测降水记录. 但为保持序列的完整性, 对其中的缺值年份, 仍采用第 3.2 小节所介绍的资料和方法进行插补.

(4) 山东区: 该区的青岛(1898 年开始)和烟台(1888 年开始)的器测降水记录较长. 但由于青岛和烟台 2 站均分布在沿海, 单站的站点代表性相对较差, 故这里采用 2 站平均计算. 即采用山东区降水量与青岛、烟台 2 站平均降水量的回归方程( $P_{av}=0.4739P_{qy}+380.2$ ,  $r=0.6209$ , 其中  $P_{av}$  为子区降水量,  $P_{qy}$  为青岛、烟台 2 站平均降水量)计算本区该时段的降水量. 应该说明的是这一回归方程的方差解释量( $R^2=38.55\%$ )不如上述 3 个子区高. 但较直接使用旱涝等级插补的方法而言, 这一方法还是更为合理一些.

当然, 这样的转换计算和缺值插补会对该时段部分年份的数据精度产生一定的影响, 然而为保持序列完整性, 在没有更好的资料情况下, 这是最好的

一种处理方法,而且它并不会影响气候变化趋势分析结果.

#### 4 区域降水变化趋势分析

基于上述方法与结果,分别计算 4 个子区各站 1736~1910 年和 1951~2000 年的降水量平均值,与 1911~1950 年的各子区降水量相衔接,即可得 4 个子区域的降水量序列;再计算 4 个子区的降水平均值即可得黄河中下游地区的区域降水量序列(图 4).从图中可以看出:(1)山东区的降水距平值 1751~1830 年和 1861~1880 年 2 个时段,与其他 3 个子区变化趋势相反.小波分析还表明:尽管 4 个子区 80 年尺度的小波系数“时间流”波形(图略)十分相似,但在不同子区,信号的强弱是不同的,且存在一定的位相差.其中山东区 80 年尺度的波动信号在近 300 年中一直很强,但其他 3 个子区,特别是晋南与渭河 2 个子区在 1850 以前则较弱,至 1850 年以后才逐渐增强,而且各个峰(对应多雨)、谷值(对应少雨)的出现时间也不尽一致.这进一步说明黄河中游与下游地区的降水在趋势变化上存在一定程度的差异.(2)在 4 个子区中,有 3 个以上子区为多雨的年代为:1741~1750 年、1761~1780 年、1791~1830 年、1851~1860 年、1881~1890 年及 1951~1970 年等 11 个,其中 1791~1800 年、1821~1830 年及 1881~1890 年 3 个年代更为明显;有 3 个以上子区为少雨的年代为:1781~1790 年、1831~1840 年、1861~1870 年、1891~1950 年及 1981~2000 年等 11 个,其中 1911~1950 年及 1981~2000 年两个时段更为明显.这也反映在 4 个子区中,至少有 3 个子区在多数时段内,降水变化具有同时变干和同时变湿的特征.(3)尽管山东区的降水变化在几乎长达 100 年的时间里与其他 3 个子区的变化呈反相,但 4 个子区的降水量主成分分析结果表明:第一主成分(即 4 个子区的降水变化趋势具有一致性)的方差贡献率达 54.3%;同时,整个区域降水序列与各子区降水序列之间的相关系数分别为 0.7169(与渭河区)、0.7711(与河北区)、0.6864(与山东区)、0.7441(与晋南区),均通过 1%显著性水平的检验,说

明 4 个子区的平均降水序列可以较好地反映出整个黄河中下游地区的降水变化趋势.

从图 4(e)还可以看出:近 300 年黄河中下游地区的降水在总体上呈减少趋势.其中在 1915 年以前,以多雨年份占多数(降水量大于序列平均值的年份占总年数的 54%).特别是 1791~1805 年、1816~1830 年及 1886~1895 年 3 个时段不但明显多雨,而且持续时间也较长.而 1811~1820 年、1831~1840 年、1875~1882 年及 1896~1905 年等 4 个时段则明显少雨.尤其是 1877 年,还发生过近 300 年来最严重的一次干旱.这次干旱甚至引起了光绪皇帝的高度重视,并在上谕中多次提及这次干旱的严重程度与影响范围.如:“本年京师入秋以来虽经得有雨泽,尚未沾足,山西、河南、陕西等省亢旱成灾,至今未得透雨,听霄盼望焦灼,虔中祈祷”<sup>1)</sup>,”今年天气亢旱,直隶等省间有飞蝗为害”<sup>2)</sup>,”陕西省旱荒日久,本年山西、河南、陕西等省亢旱为灾”<sup>3)</sup>.这清楚的表明 1877 年在黄河中下游的大部分地区发生了严重干旱,仅山东省旱情轻一些.而自 1915 年起,以少雨年份为主(降水小于序列平均值的年份占总年数的 66%).其中除 1946~1965 年为多雨期外,其余时段均为少雨期.

对该序列的 Mann-Kendall 突变检验表明,在 1915 年前后,黄河中下游地区的降水发生了一次由多雨向少雨的突变.这一结果与其他研究所得到的中国气候曾在 20 世纪初出现跃变的结果是吻合的<sup>[19-21]</sup>.计算突变点前 5 年与突变点后 5 年的降水量平均值发现,降水量相差 80 mm,这在水资源相对紧张的黄河中下游地区是值得注意的.

此外功率谱分析(最大后延数取 88,图略)还表明:降水存在 22~25 年、3.9 年及 2.7 年的显著周期.这些周期的存在表明黄河中下游地区的降水量变化可能与太阳活动及 ENSO 有关.但值得注意的是,小波分析显示:在 1915 年的突变之后,22~25 年的周期信号开始减弱,至 20 世纪 40 年代后期,这一周期信号完全消失,代之出现了 35~40 年的周期.这对今后这一地区降水变化的趋势预估具有极为重要的意义.

1) 上谕档.光绪三年九月二日(1877 年 10 月 8 日)

2) 上谕档.光绪三年七月十六日(1877 年 8 月 24 日)

3) 上谕档.光绪三年九月十八日(1877 年 10 月 24 日)



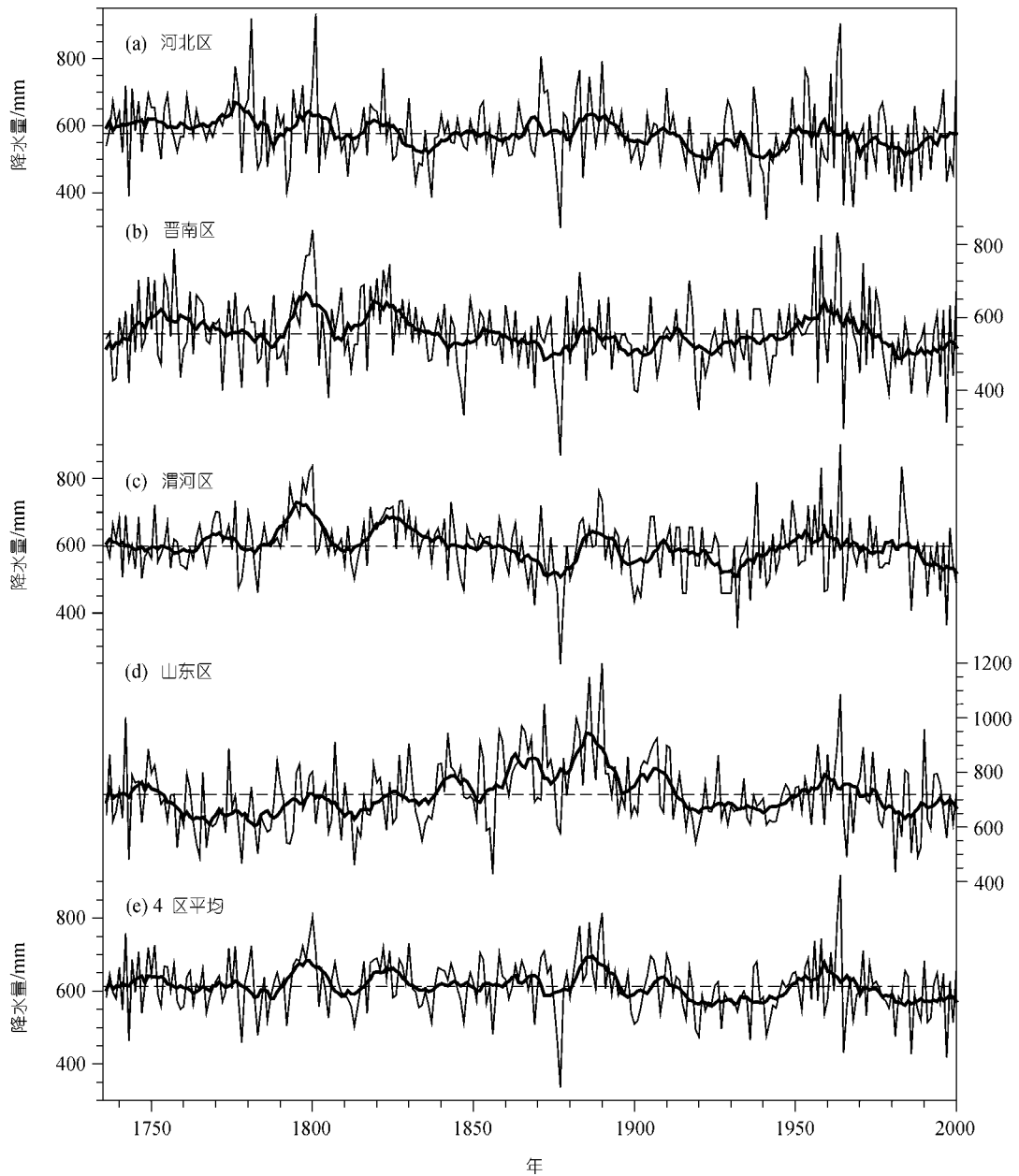


图 4 黄河中下游地区 4 个子区及其平均值的年降水量变化

(a) 河北区; (b) 晋南区; (c) 渭河区; (d) 山东区; (e) 4 区平均. 细线: 逐年降水变化, 粗线: 10 年滑动平均, 虚线: 序列平均值

### 5 结论

通过上述研究, 可以得到以下结论:

(1) 由于清代雨雪档案记载量化程度高, 且具有较高的时间分辨率, 因而结合现代器测气象记录及农田土壤含水量观测资料, 根据地表水量平衡方程

和土壤物理学模型方法, 可以进行分辨率为季的历史降水序列重建. 同时, 利用田间试验方法对重建结果的验证表明: 以上述方法所重建的降水量与田间试验结果差别很小, 这说明根据该方法所重建的降水量是可靠的. 在本研究中, 我们不但探讨了利用清代雨雪档案记载定量恢复降水量的方法, 而且设计

了一系列具体算法,并根据对现代资料和试验资料的分析结果选取有关参数,使得重建方法物理意义明确,重建过程更为客观,从而也使得所重建的序列更易于与国际相关研究接轨.因此,它对于进一步开发利用中国历史文献资料进行全球变化研究具有重要的意义.

(2) 本文定量恢复了 1736~1910 年黄河中下游地区 17 个站点的逐季降水量,建立了黄河中下游地区及其 4 个子区过去 1736 年以来的降水变化序列.通过对重建序列的分析发现:黄河中下游地区在 1915 年前后存在降水由多变少的突变.其中 1791~1805 年、1816~1830 年及 1886~1895 年等 3 个时段降水明显偏多;而 1916~1945 年及 1981~2000 年等 2 个时段降水则明显偏少.另外,功率谱分析显示黄河下游地区降水变化存在 22~25 年、3.9 年及 2.7 年等 3 个显著周期.但在 1915 年的突变之后,22~25 年的周期信号开始减弱,至 20 世纪 40 年代后期,这一周期信号完全消失,代之出现了 35~40 年的周期.这些认识对于这一地区今后的气候预测及水资源利用、社会发展等都具有重要的参考价值.

## 参 考 文 献

- Eddy J A. Past Global Changes Project, Proposed Implementation Plans for Research Activities. Global Change Report No. 19. Sweden, Stockholm, IGBP, 1992. 1~112
- Duplessy J C, Overpeck J. The PAGES/CLIVAR INTERSECTION — Providing paleoclimatic perspective needed to understand climate variability and predictability, Coordinated research objectives of the IGBP and WCRP programs. Venice, Italy, 1994. 9
- Bradley R S. High Resolution Record of Past Climate from Monsoon Asia, The Last 2000 Years and Beyond, Recommendations for Research. PAGES Workshop Report, Series 93-1, 1993. 1~24
- 国家自然科学基金委员会. 全球变化: 中国面临的机遇和挑战. 北京: 高等教育出版社, 1998. 61~75
- 中央气象局气象科学研究所. 中国近 500 年旱涝分布图集. 北京: 地图出版社, 1981. 332
- 张丕远, 王 铮, 刘晓雷, 等. 中国近 2000 年气候演化的阶段性. 中国科学, B 辑, 1994, 24(9): 998~1008
- 张时煌, 张丕远. 北京 250 年来降水量的重新恢复. 见: 张 翼, 张丕远, 张厚瑄, 等编. 气候变化及其影响. 北京: 气象出版社, 1993. 28~34
- 张德二, 刘月巍. 北京清代“晴雨录”降水记录的再研究——应用多因子回归方法重建北京(1724~1904 年)降水量序列. 第四纪研究, 2002, 22(3): 199~208
- 张丕远. 中国历史气候变化. 山东: 山东科学技术出版社, 1996. 261~268
- 郝志新, 郑景云, 葛全胜. 1736 年以来西安气候变化与农业收成的相关性分析. 地理学报, 2003, 58(5): 735~742
- 郑景云, 郝志新, 葛全胜. 山东 1736 年以来逐季降水重建及其初步分析. 气候与环境研究, 2004, 9(4): 551~566
- 郑景云, 郝志新, 葛全胜. 重建清代逐季降水的方法与可靠性——以石家庄为例. 自然科学进展, 2004, 14(4): 475~480
- 叶青超. 黄河流域环境演变与水沙运动规律研究. 济南: 山东科学技术出版社, 1994. 1~223
- 吴祥定, 钮仲勋, 王守春. 历史时期黄河流域环境变迁与水沙变化. 北京: 气象出版社, 1994. 1~169
- 高国栋, 陆渝蓉, 钱建华, 等. 气候学教程. 北京: 气象出版社, 1996. 519~529
- 河北省旱涝预报课题组. 海河流域历代自然灾害史料. 北京: 气象出版社, 1985. 460~863
- 林振杰, 郑斯中. 山东省各地区近 500 年分季旱涝指数. 见: 吴祥定编. 黄河流域环境演变与水沙运行规律研究文集(第二集). 北京: 地质出版社, 1991. 64~106
- 张德二, 刘传志, 江剑民. 中国东部 6 区域近 1000 年干湿序列的重建和气候跃变分析. 第四纪研究, 1997, 17(1): 1~11
- 严中伟, 李兆元, 王晓春. 历史上 10 年~100 年尺度气候跃变的分析. 大气科学, 1993, 17(6): 663~672
- 符淙斌, 王 强. 南亚夏季风长期变化中的突变现象及其与全球迅速增暖的同步性. 中国科学, B 辑, 1991, (6): 666~671
- 刘 禹, Park W K, 蔡秋芳, 等. 公元 1840 年以来东亚夏季风降水变化. 中国科学, D 辑, 2003, 33(6): 543~549 [摘要] [PDF]