

# 江苏降水长期趋势及年代际变化空间差异分析\*

邓自旺<sup>1)2)</sup> 周晓兰<sup>2)</sup> 陈海山<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (南京师范大学地学院,南京 210091)

<sup>2)</sup> (南京气象学院 KLME 实验室,南京 210044)

## 摘 要

根据江苏省 60 个气象站 1961~2001 年的逐月降水量资料,计算了逐月、季和年降水量距平百分率(RAP),以此研究了江苏降水的长期趋势和年代际变化特征及其空间差异。结果表明:全省平均降水量 1、3、6 月有显著的增多趋势,而 4、9 两月有显著的减少趋势;年降水量,南部增多,而北部减少;春季降水量大部分地区减少,夏季降水量主要是南部增多,北部减少,秋季大部分地区降水量减少,冬季全省降水量增多。4 个年代年 RAP 符号变化,在江苏南部呈“- - + +”型,北部为“+ + - -”型,中部则呈“+ - - +”、“+ - + -”等过渡型。春季则在北方呈“- + - +”型,中部呈“+ - - +”型,南部呈“+ - - -”型,徐州和盐城地区主要为“+ + - +”型。夏季 RAP 符号,主要分布型由北到南依次为“+ + - -”、“+ - + -”、“+ - - +”、“- + - +”和“- - + +”。秋季 RAP 符号全省绝大多数台站为“+ - + -”型。冬季 RAP 符号在东部和南部大片地区为“- + - +”型,而西部则主要为“- + + +”、“- - + +”、“- + - +”和“- - - +”型混杂。

关键词: 江苏省 降水 长期趋势 年代际变化 空间差异

## 引 言

全球变化的区域响应是气候变化研究的一个热点问题。任国玉等<sup>[1]</sup>指出,1951 年以来,我国长江中下游地区年和夏季降水呈现明显增加趋势。李峰等<sup>[2]</sup>认为 20 世纪 70 年代中期前后长江中下游地区降水量存在明显变化。孙林海等<sup>[3]</sup>的研究表明我国多雨带也存在明显的年代变化。江苏作为长江下游的我国经济大省,近年来经济快速发展,乡镇企业如雨后春笋般地迅速发展起来,省内经济发展也很不平衡,与我国其它地区相比,该省土地利用方式变化很明显,很多农业用地转化为工业用地,这势必改变当地的气候变化特征,也会使当地气候变化与长江中下游其它地区气候变化有所不同。在全球变暖的背景下,其气候的变化特征特别是其长期趋势和年代际变化特征如何,对此问题的深入研究有助于我们了解工业化对气候变化的影响。降水量(简记为 R)作为反映气候特征的最重要指标之一,对其进行长期趋势和年代际变化特征的研究是有重要意义的。关于江苏降水的变化,施宁<sup>[4]</sup>研究了宁苏扬地区 1470~1995 年间旱涝变化的趋势,指出,宁苏扬地区近 500 多年可划分为差异显著的 6 个旱涝气候阶段,其中近 100 多年来干旱频率高,洪

\* 江苏省教委自然科学基金项目(01 KJBI 70001)和(01 KJBI 7006)资助。

2003-07-15 收到,2003-11-06 收到修改稿。

涝年份略少,总体旱涝年份增多,正常年份减少。田心如和于莲君<sup>[5]</sup>指出,近百年来汛期江苏省较易发生的旱灾,1920~1930年代为旱灾频发期,淮北地区近年有向旱年发展的趋势,江淮之间及苏南地区进入1990年代以来向旱年发展的趋势则愈来愈明显。马骅<sup>[6]</sup>则指出,雨涝是江苏省主要天气气候灾害之一,几乎每年都有不同程度地发生。在雨季里,由于长期连续阴雨或大雨、暴雨而形成大面积的地表径流造成内涝,如果出现大范围连续暴雨会引起山洪爆发。本文则分析全省最新观测资料,揭示其中反映的近40年来江苏省不同季节降水的气候变化趋势和年代际变化的新特征。

## 1 资料和方法

本文所用资料为江苏省60个气象站1961~2001年逐月总降水量资料。季节的划分按气象部门习惯的分法,即春季为3~5月,夏季为6~8月,秋季为9~11月,冬季为12~2月。各季降水量为3个月降水量之和,年降水量为12个月降水量的总和,在分析中采用降水距平百分率(简记为RAP)。

设 $R_i (i=1, 2, \dots, 40)$ 为某站(或全省平均)某月(某季或年)1961~2000年的降水序列,则第 $i$ 年RAP为:

$$r_i = (R_i - M) / M \times 100\% \quad (1)$$

式中 $M$ 为该序列的平均值。为了分析各月和季节RAP的变化趋势,采用线性回归方程: $r_i' = a + bi + \varepsilon$ 来拟合该序列随时间变化的线性趋势,其中 $a, b$ 为回归系数, $\varepsilon$ 为残差,则回归系数 $b$ 即可表示趋势的大小。根据文献<sup>[7]</sup>给出的回归效果检验法,当回归方程的复相关系数大于临界相关系数,则趋势显著,否则不显著。本文取信度为0.05,则相应的临界相关系数为0.305。

为了解RAP的空间分布,采用三次样条函数插值法<sup>[8]</sup>,将计算所得60站线性趋势插值到整个江苏省,空间分辨率为 $0.02^\circ$ (纬度) $\times 0.02^\circ$ (经度),得到变化趋势的空间分布图。

60站4个年代(20世纪60、70、80和90年代)各季节的10年RAP的计算方法如下:

$$rm_k^l = \left( \frac{1}{10} \sum_{i=(k-1) \times 10 + 1}^{k \times 10} R_i - M_l \right) \times \frac{1}{M_l} \times 100\% \quad (2)$$

其中 $l=1, 2, \dots, 60$ ,表示60个站点; $k=1, 2, 3, 4$ ,表示4个年代; $i=1, 2, \dots, 40$ 表示40年, $M_l$ 为 $l$ 站40年平均值。考虑到采用最新资料,本文4个年代分别为1961~1970、1971~1980、1981~1990和1991~2000年,与传统的年代划分有1年之差,但对整个分析影响不大。

为分析全省和各代表站RAP不同时期的趋势和年代际变化特征,采用高斯滤波的方法<sup>[9]</sup>,对RAP序列进行平滑处理,窗宽选择为5。具体采用如下公式:

$$R_i' = \frac{\sum_{j=1}^{40} K\left(\frac{i-j}{5}\right) \times r_j}{\sum_{j=1}^{40} K\left(\frac{i-j}{5}\right)} \quad (3)$$

其中高斯函数形式为  $K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.37} e^{-\frac{t^2}{2 \times 0.37^2}}$ ,  $R_i'$  即为平滑后第  $i$  年 RAP 的值。

## 2 结果分析

### 2.1 趋势分析

根据原始资料计算了全省 60 个站平均各月及年 RAP 的趋势,表 1 给出了全省平均及各地区代表站逐月 RAP 趋势,可见其中 1、3、4、6 和 9 月全省 60 站平均降水量的距平百分率有显著的线性趋势。1、4 和 9 月大部分站点的线性趋势是显著的,3 月(6 个)和 6 月(5 个)有近一半代表站线性趋势显著,其它月份的线性趋势达不到显著性水平。4、7、9、12 月份江苏省降水有减少趋势,特别明显的为 9 月(-76%/40 a)和 4 月份(-58%/40 a)。其余月份则有增加趋势,其中最显著的为 1(87%/40 a)、3(59%/40 a)和 6 月份(55%/40 a)。从江苏省 13 个地市代表站的降水百分率趋势看,1、3、4、6、9 和 10 月趋势符号各站基本上是一致的,但 2、5、7、8、11 和 12 月有的站有正趋势,而另一些站则有负趋势。

表 1 逐月降水距平百分率趋势

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
全省	87*	11	59*	-58*	4	55*	-18	17	-76*	17	20	-6
徐州	76	8	45	-88*	10	43	-9	-6	-65	34	40	-34
连云港	73	13	49	-45	22	9	-34	-10	-100*	22	39	14
宿迁	92	1	37	-55	27	29	-53	30	-116*	59	37	-7
淮阴	49	10	32	-23	-11	92*	-36	-23	-91*	52	45	46
盐城	62*	22	48	-49*	-20	67*	-35	-13	-75*	-23	29	25
扬州	105*	19	57	-69*	20	67*	-17	-37	-87*	20	32	8
泰州	98*	13	72*	-59*	30	50	-26	-5	-97*	8	19	-1
南通	91*	-5	76*	-61*	-37	66*	-1	77	-26	-35	3	-23
南京	93*	7	49	-65*	15	40	-3	24	-101*	37	-9	-11
镇江	102*	8	67*	-69*	-7	62*	-4	15	-112*	4	-7	-3
常州	106*	3	78*	-53	-12	47	-6	24	-84*	8	-8	-18
无锡	109*	5	85*	-72*	-15	45	13	77	-35	-23	6	-22
苏州	116*	-11	82*	-89*	-17	61	80*	64	-53	0	17	-6

\* 通过信度为 0.05 的显著性 F 检验。

从全省平均降水的距平百分率看,春、夏季与年 RAP 变化趋势基本一致,但秋、冬季与年 RAP 变化则有一定的差异。为了了解这一差异,采用公式(3)对原始序列进行滤波,得到全省平均 RAP 变化的平滑曲线(图 1)。可见,年 RAP 基本上在 0 线附近振动,最大幅度在 10%左右。尽管如文献[2]所指出,20 世纪 90 年代前期降水减少,但 90 年代后期降水却是增加的。秋季降水在 60 年代前期急剧下降,幅度达 60%左右,60 年代后期到 70 年代稳定少变,80 年代前期又有所升高,80 年代后期到 90 年代前期又有明显减少,幅度在 45%左右,达到 40 年最低值,90 年代后期降水又开始增多,但仍未达到平均值。冬季降水变化与秋季近于反向,但位相有一定的差异。60 年代初开始,到 70 年代前期持续增多,增幅也达 60%左右,然后减少,到 80 年代初又开始增多,80 年代末和 90 年代初达

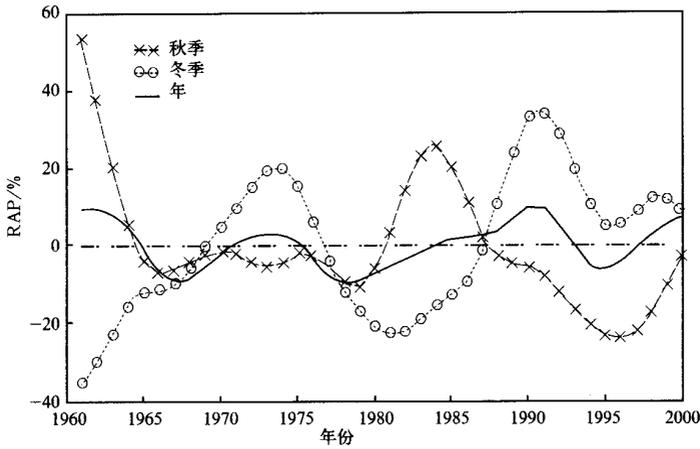


图1 秋季、冬季和年 RAP 平滑序列的变化

40 年最大值, 以后又减少, 但仍维持正距平值。

为了比较江苏省北部、中部和南部降水变化空间的差异, 选择徐州、泰州、苏州分别作为北部、中部和南部的代表站, 绘制出其春、夏、秋、冬季和年 RAP 变化平滑曲线, 结果如图 2 所示。由图可以看出, 3 个代表站之间是有一定的差异的。从春季看, 徐州变化幅度最大, 特别是 20 世纪 80 年代中期以前, 变化较有规律, 幅度较大频率较小, 而 80 年代后期以后, 变化幅度较小而振动频率较高。苏州在 60 年代先增多后减少, 70 年代到 90 年代前期有增多趋势, 泰州降水量在 80 年代初以前有减少趋势, 80 年代初到 90 年代初增多, 然后又减少。夏季降水量变化的差异也很明显, 徐州降水在 80 年代及以前有下降趋势, 而 90 年代又有上升趋势, 苏州降水从 60 年代后期开始持续呈上升趋势, 而泰州降水在 40 年里没有明显的长期趋势。从秋季和冬季 RAP 变化图可以看出, 大趋势并无显著差异, 其差异主要在幅度和位相上。从年总降水量看, 3 站之间也存在差异, 在 80 年代以前其变化位相比较一致, 而 80 年代中期以后差异明显, 苏州降水量明显增多, 而泰州和徐州则近于反相变化。

### 2.2 趋势的空间分布

根据原始的春、夏、秋、冬和年降水序列, 计算了全省 60 站四季和年 RAP 线性趋势, 并绘出了其空间分布图, 如图 3 所示。可见, 春季尽管大部分区域降水有减少趋势, 但也有一部分区域降水有增多趋势。其中增幅最大的为泰州北部和盐城南部地区, 幅度可达 20%/40 a 以上, 另外连云港、宿迁、镇江南部和常州西北部也有一定的增多趋势。降水减少幅度最大的几个中心分别为徐州地区、盐城北部、南通和苏州地区, 最大减幅也可达到 20%/40 a 以上。

夏季降水长期趋势则呈现出南部降水增多, 而北部降水减少的空间分布, 并且这种空间差异非常明显。南通、泰州、扬州、宿迁及这些地区以南的 6 个地区降水都有增多趋势, 其中苏州地区和南京地区有些县市降水量增多幅度可达 70%/40 a, 而北部的盐城中部和北部、连云港及徐州降水都有减少趋势, 其中徐州北部个别县降水量减少幅度也可达到

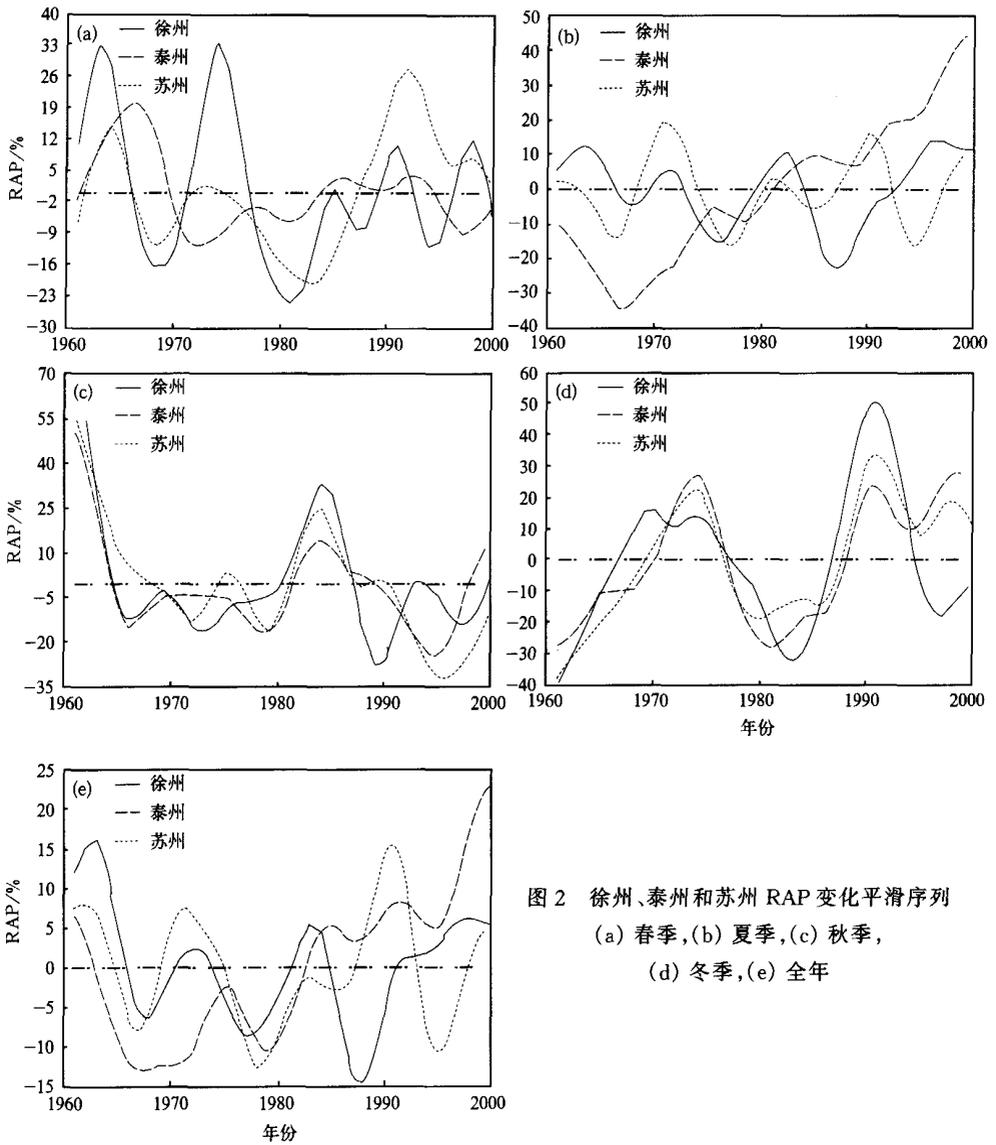


图2 徐州、泰州和苏州 RAP 变化平滑序列  
 (a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季,  
 (d) 冬季, (e) 全年

40 %/40 a。秋季降水全省各地区都有减少趋势,其中沿江的南通、苏锡常、南京及扬州地区减少幅度可达 40 %/40 a 以上,另外盐城北部、连云港、宿迁北部和徐州东部减少趋势也较明显。冬季全省各地区降水均有增多趋势,其中增多幅度最大的区域为宿迁南部、扬州西部和南京北部,幅度可达 40 %/40 a 以上。年 RAP 的变化趋势空间分布的主要特征是,南部降水有增多趋势,而北方降水则显著减少。其中苏州、无锡、常州、南京西部、南通南部降水增多较明显,幅度可达(20 %~30 %)/40 a,而徐州、连云港和盐城部分地区降水则明显减少,幅度可达 -20 %/40 a 左右。

采用显著性 F 检验,结果发现尽管各季各地都有一定的线性趋势,但由于 RAP 的时间变率较大,与总体变率相比,只有夏季线性趋势能够通过显著性检验的区域较大,即苏

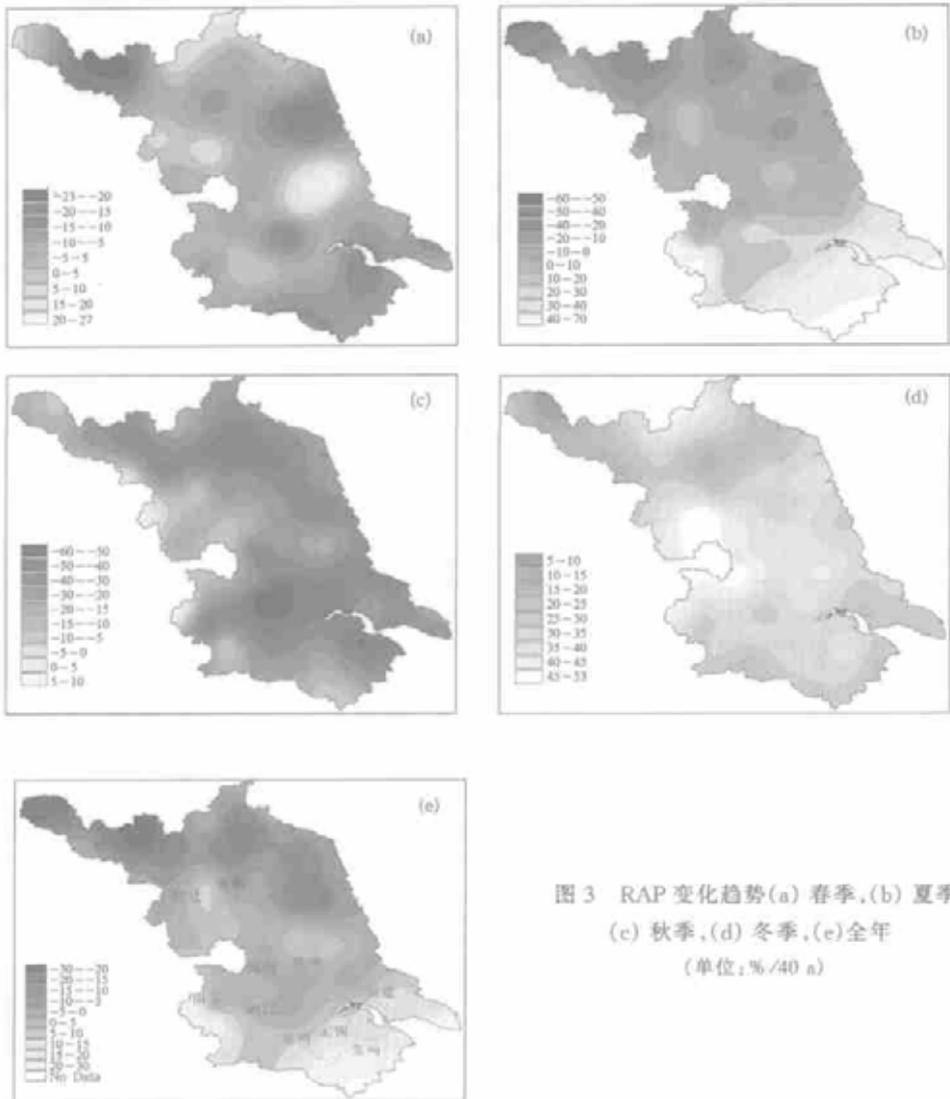


图3 RAP变化趋势(a)春季,(b)夏季,  
(c)秋季,(d)冬季,(e)全年  
(单位: %/40 a)

州、无锡和南通的中部和南部地区 RAP 线性趋势能通过信度为 0.05 的显著性检验,而秋季冬季能通过显著性检验的只有镇江和南京北部、泰州和扬州的南部地区,年 RAP 线性趋势只有苏州南部和南通南部能够达到显著性检验标准,而春季全省都达不到显著性标准。

### 2.3 年代际变化空间差异

为了了解年代际变化的空间差异,根据公式(2)计算了 60 站四季及全年 4 个年代 RAP,结果表明:春季 RAP 年代际变化空间差异主要表现在北部年代际变率大,而南部则较小,尽管 1960~1970 年代省内不同地区降水百分率距平符号相差明显,但 1980~1990 年代绝大多数站点的距平符号是一致的,即 1980 年代降水明显偏少,而 1990 年代降水则显著偏多。其中北部的徐州、连云港、宿迁和盐城北部大多数县市 1980 年代降水比 40 年平均降水偏少 20%左右,而南部各地区则偏少 10%或以下。夏季 RAP 年代际变化与春

季不同,北方变率小而南方变率大,江苏中部的几个地区则介于两者之间。变率最大的为南京、南通和苏州地区,其中有些县市60年代降水偏少达25%以上,90年代偏多也达25%以上,1970~1980年代距平则在10%以内。因此江苏南部地区夏季降水增多趋势明显,而北部有减少趋势,中部趋势则相对较小。秋季RAP的年代际变率很大,为4个季节中变率最大者,4个年代RAP大多数县市都在10%~30%。冬季距平较大的为60年代和90年代,距平可达10%~15%,而1970~1980年代距平则较小,小于10%。年RAP的年代际变率相对较小,其中南通北部、泰州、镇江、扬州地区降水百分率的年代际变化与其它地方相比则更不明显,距平绝对值都很小。

根据4个年代RAP距平符号(RAP < 0 记为“-”,表示降水偏少,否则记为“+”,表示降水偏多或正常),以及排列组合原理,可将4个年代变化分为16个型,但由于“- - - -”和“+ + + +”型是不可能出现的,实际上最多只可能有14个型,将四季和年RAP不同符号型出现的站数进行统计,结果如表2所示,其空间分布如图4所示。

表2 四季和年4个年代RAP符号型的站数统计表

型号	1	2	3	4	5	6	7
符号	+ - - -	- + - -	+ + - -	- - + -	+ - + -	- + + -	+ + + -
春	8	0	1	0	1	0	0
夏	1	1	8	0	5	0	0
秋	0	0	0	5	50	1	3
冬	0	1	0	0	0	0	0
年	1	0	10	0	5	0	0

型号	8	9	10	11	12	13	14
符号	- - - +	+ - - +	- + - +	+ + - +	- - + +	+ - + +	- + + +
春	3	20	21	6	0	0	0
夏	6	7	12	2	16	1	1
秋	1	0	0	0	0	0	0
冬	6	0	38	0	8	0	7
年	3	10	0	3	26	1	1

可见4个年代春季RAP距平符号型主要为10型、9型、1型和11型,其中前两型占总站数的2/3。从空间分布看,北方的宿迁、连云港、淮阴地区、徐州东南部、盐城北部及南京地区为10型(即RAP经历了“少-多-少-多”的变化过程)。扬州、泰州、镇江、常州、无锡和南通北部为9型(多-少-少-多)。而东南部的苏州和南通南部为1型(多-少-少-少)。徐州西北和盐城北部为11型(多-多-少-多)。夏季RAP距平符号型除4、6、7型外,其它各型都有站点出现,可见夏季RAP年代际变化空间差异明显,但站数最多的主要为12、10、3、9、8、5型。南部的苏锡常、南京及镇江地区为12型(少-少-多-多)。北部的徐州、连云港及宿迁北部为3型(多-多-少-少)。10型(少-多-少-多)主要出现在扬州、南京北部、泰州中部和南通北部,8型在12与10型的中间地带,而宿迁、淮阴、盐城和泰州北部则为5型、9型及其它型混杂。秋季60个站中有50个站为5型(多-少-多-少),其余的4个型总共才10个站,并且在空间上零散分布,表明秋季RAP年代际变化在空间上基本上是一

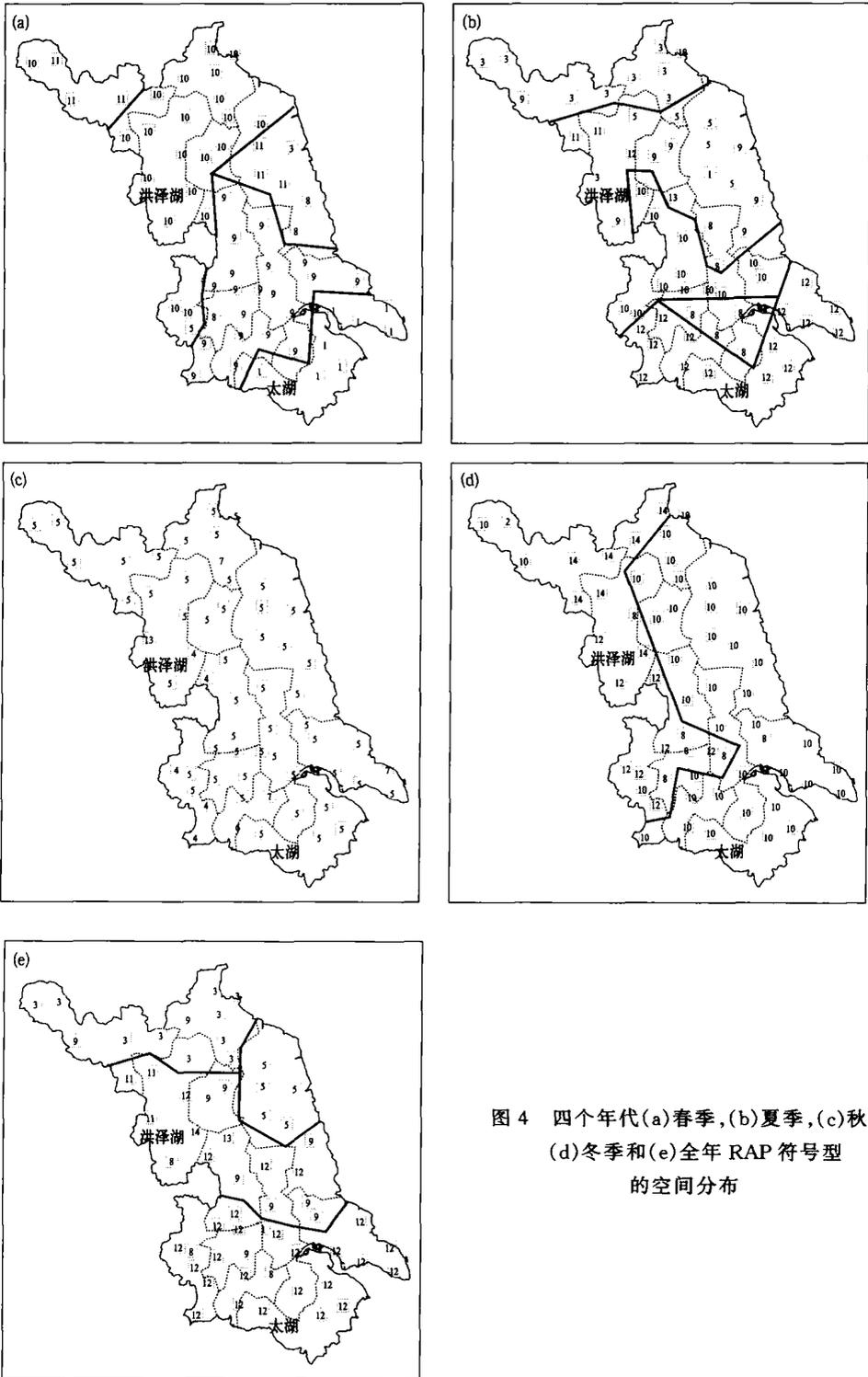


图 4 四个年代(a)春季,(b)夏季,(c)秋季, (d)冬季和(e)全年 RAP 符号型的空间分布

致的。冬季有 38 个站为 10 型(少-多-少-多),约占全省站点的 2/3,东部及南部地区都属于此型。而西部的徐州、宿迁和南京则为 8、12 和 14 型混杂,但基本上所有站点 90 年代降水量都偏多。年总降水量,年代际变化型主要为 12、9、3 和 5 型,其中站点数最多的 12 型(少-少-多-多)分布在苏州、无锡、常州、南京、南通南部、镇江地区;其二为 3 型(多-多-少-少),分布在徐州、连云港和宿迁地区的北部;其三为 5 型(多-少-多-少),主要为盐城北部地区。其它地区为多型混杂。江苏中部和南部年降水量 90 年代都偏多(型号为 8~14)。

### 3 结 语

(1) 就全省平均而言,1、3 和 6 月 RAP 有显著的增多趋势,而 4、9 两月减少趋势显著,其它月份的变化则达不到显著性水平。

(2) 从变化趋势的空间分布看,年和不同季节 RAP 变化趋势存在明显的空间差异。年 RAP 变化趋势为南部明显增大,北部明显减小,中部变化不明显。春季大部分地区 RAP 减小,夏季主要是南部增多,北部减少,秋季则全省 RAP 减小,冬季全省 RAP 增大。尽管如此,只有夏季线性趋势能够通过显著性检验的区域较大,即苏州、无锡和南通的中部和南部地区 RAP 线性趋势能通过信度为 0.05 的显著性检验,而秋季冬季能通过显著性检验的只有镇江和南京北部、泰州和扬州的南部地区,年 RAP 线性趋势只有苏州南部和南通南部能够达到显著性检验标准,而春季全省都达不到显著性标准。

(3) 4 个年代的年 RAP 符号,在江苏南部呈“- - + +”型,北部为“+ + - -”型,中部则呈“+ - - +”、“+ - + -”等过渡型。春季 RAP 符号在北方呈“- + - +”型,中部呈“+ - - +”型,南部则呈“+ - - -”型,徐州和盐城地区主要为“+ + - +”型。夏季 RAP 符号,主要分布型由北到南依次为“+ + - -”、“+ - + -”、“+ - - +”、“- + - +”和“- - + +”。秋季 RAP 符号型全省绝大多数台站为“+ - + -”,冬季 RAP 符号在东部和南部大片地区为“- + - +”型,而西部则主要为“- + + +”、“- - + +”、“- + - +”和“- - - +”型混杂。

### 参考文献

- 1 任国玉,吴虹,陈正洪.我国降水变化趋势的空间特征.应用气象学报,2000,11(3):322~330.
- 2 李峰,何立富.长江中下游地区夏季旱涝年际、年代际变化的可能成因研究.应用气象学报,2002,13(6):718~726.
- 3 孙林海,陈兴芳.南涝北旱的年代气候特征和形成条件.应用气象学报,2003,14(6):641~647.
- 4 施宁.宁苏地区近 500 多年来的旱涝趋势及近期演变特征.气象科学,1998,18(1):28~34.
- 5 田心如,于莲君.江苏省近百年汛期旱涝变化的诊断分析.气象科学,1998,18(4):389~395.
- 6 马骅,张菊芳,徐慧茹.江苏雨涝气候分析.气象科学,1993,13(2):211~218.
- 7 屠其璞,王俊德,丁裕国,等.气象应用概率统计学.北京:气象出版社,1984.251~255.
- 8 汪柄柱.快速样条函数插值网格化法.物探化探计算技术,1996,18(4):357~363.
- 9 马开玉,陈星,张耀存.气候诊断.北京:气象出版社,1996.151~154.

## SPATIAL VARIATION OF PRECIPITATION TREND AND INTERDECADAL CHANGE IN JIANGSU

Deng Zi wang<sup>1)2)</sup> Zhou Xiaolan<sup>2)</sup> Chen Haishan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> ( College of Geographical Sciences , Nanjing Normal University , Nanjing 210091 )

<sup>2)</sup> ( KL ME of Nanjing Institute of Meteorology , Nanjing 210044 )

### Abstract

By analyzing the monthly rainfall (R) series of the 60 weather stations for the 1961 — 2001 period, monthly, seasonal and annual precipitation abnormality percentages (RAP) were calculated. Based on these the spatial patterns of seasonal and annual precipitation trends and interdecadal changes in Jiangsu province were investigated. Results show that: (1) there are significant positive (negative) trends in January, March and June (April and September); (2) annual rainfall increased in the south, decreased in the north and weakly varied in the middle; (3) seasonal mean precipitation decreased in most parts in spring, increased in southern regions and decreased in northern districts in summer, decreased in most areas in autumn and increased all over the province in winter; (4) the abnormality percentage sign variation types of the four decadal average are " - - + +" in the south, " + + - - " in the north and " + - - +" or " + - + - " etc transition types in the middle regions of the province respectively for annual precipitation. For spring precipitation, they are " - + - +" in north, " + - - +" in the middle, " + - - - " in south and " + + - +" in Xuzhou and Yanchen districts. For summer rainfall, they are " + + - - ", " + - + - ", " + - - + ", " - + - +" and " - - + +" from north to south. For autumn rainfall, the type " + + - - " appears at almost all stations in the province. And for winter precipitation the type " - - + +" appears in large area in the south and the east of the province, the other comparative frequent types such as " - + + + ", " - - + + ", " - + - + " and " - - - +" etc appear mainly in the west.

**Key words:** Jiangsu Precipitation trend Interdecadal variation Spatial pattern