

中国降水非均匀性综合评价

刘永林¹, 延军平¹, 岑敏仪^{1,2}

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062; 2. 陕西师范大学健康地理所, 西安 710062)

摘要: 本研究经过对比各种降水非均匀性研究方法后, 选择降水集中度作为降水非均匀性研究方法, 结合正态分布函数、累积频率和百分位法, 确定降水非均匀性等级评价指标, 分析了1960-2013年中国降水非均匀性等级时空变化特征, 并进行综合评价。研究结果表明: ① 结合正态分布函数、累积频率和百分位法, 确定降水非均匀性等级评价指标, 划分为7个等级: 高度集中、中度集中、轻度集中、正常、轻度分散、中度分散和高度分散。② 近54年来, 中国降水年内分配趋于正常或分散的区域有所增加。

关键词: 非均匀性; 降水集中度; 评价指标; 综合评价; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201503004

1 引言

降水量的时空分配不均匀对农业生产、防汛抗旱、人类生活等各个方面都有重要影响, 主要表现为: 降水量在时间上过于集中, 容易导致集中时段易发生洪涝灾害, 其余时段又易发生干旱灾害; 在空间上过于集中, 降水量不足的地区容易发生干旱灾害。无论是时间上还是空间上的调水措施, 都需要高成本投入。降水量越均匀, 对生产生活是越有利的。例如: 南方地区作物熟制可达一年三熟, 降水量在年内分配越均匀, 就越有利于作物生长, 若降水量过于集中在夏季, 春季及秋季作物需水量就无法保证。

汤奇成^[1]对径流年内分配不均匀系数进行了讨论, 并编制了全国不均匀系数等值图。不均匀系数被引进到降水量不均匀性研究中, 并得到广泛应用^[2-4]。不均匀系数概念明确, 通用性强^[2], 但是简明的数据不能统一地反映年径流量在年内各时段的集中程度以及最大径流量出现的时段^[5]。汤奇成等^[5]借鉴降水量年内分配的向量法, 采用向量合成方法计算不同时段河川径流量的集中度和集中期, 比径流年内不均匀系数有更高的分辨力, 杨远东^[6]对其计算式进行了改进。张录军等在河川径流集中度和集中期基础上^[7], 改进和重新定义了降水集中度和集中期^[8-9], 并得到广泛应用^[10-16]。此外, 还有学者应用完全调节系数^[3, 17]、基尼系数^[18-20]及信息熵紊乱指数^[21-24]等方法对径流和降水量非均匀性进行了研究。

尽管降水非均匀性研究方法是多样的、成熟的, 但是尚未形成系统性地等级评价指标。较多的研究是对计算得出的实际数值进行比对, 探讨区域的非均匀性差异和时空特征。基尼系数可划分为国际上通用的5个区段, 具有一定的参考性, 但由于基尼系数主要应用于经济学上, 其区段划分主要是基于经济学意义, 与地理学和气象学的意义具有

收稿日期: 2015-01-14; 修订日期: 2014-02-10

资助项目: 国家自然科学基金项目(41171090); 国家社会科学基金重点项目(14AZD094) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41171090; National Social Science Foundation of China, No.14AZD094]

作者简介: 刘永林(1989-), 男, 广东罗定人, 硕士研究生, 主要从事全球变化与区域灾害防治研究。E-mail: yorlinliu@163.com

通讯作者: 延军平, 男, 陕西绥德人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110000053M), 主要从事区域发展与自然灾害研究。E-mail: yanjp@snnu.edu.cn

明显的差别, 并且基尼系数常用的4种估算方法复杂^[25]、受误差影响严重、不便于操作。降水集中度的分辨力、敏感性都较高^[5-6], 更直接地使用原始数据进行计算, 尽可能避免数据失真, 并且计算的时间尺度可以自由调节, 计算方法简单有效, 受误差影响甚少, 是介于0到1之间的无量纲, 可比性强。因此, 本研究尝试建立基于降水集中度的降水非均匀性等级评价指标, 并应用于近54年中国降水非均匀性综合评价。

2 资料与方法

2.1 资料

气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网的中国地面气候资料日值数据集 1960-2013 年 54 年观测资料, 在保证数据完整性(连续缺失数据不超过 30d)和台站均匀分布的前提下, 选取中国 569 个国家级气象站(图 1)的观测资料进行研究分析, 缺失数据采用 SPSS21.0 的最大期望算法(EM 估计)进行补全。

本研究定义 30 年为一个气候阶段, 1960-2013 年共 25 个气候阶段: 1960-1989, 1961-1990, …… , 1984-2013。

根据中国气象地理区划^[26], 以省级行政区为基本单元进行了简化, 将中国分为九个气象大区(表 1)。其中, 由于香港、澳门及台湾资料缺失, 不纳入本文研究区域。

2.2 研究方法

2.2.1 降水集中度和集中期 降水集中度(PCD)是表征单站降水量时间分配特征的新参数, 计算公式如下^[8-9]:

$$PCD_i = \sqrt{R_{xi}^2 + R_{yi}^2} / R_i \tag{1}$$

式中: PCD_i 为研究时段内的降水集中度; R_i 为某测站研究时段内总降水量。

$$R_{xi} = \sum_{j=1}^N r_{ij} * \sin \theta_j \quad R_{yi} = \sum_{j=1}^N r_{ij} * \cos \theta_j \tag{2}$$

式中: r_{ij} 为研究时段内某候降水量; θ_j 为研究时段内各候对应的方位角(整个研究时段的方位角设为 360°), i 为年份($i = 1960, 1961, \dots, 2013$), j 为研究时段内的候序

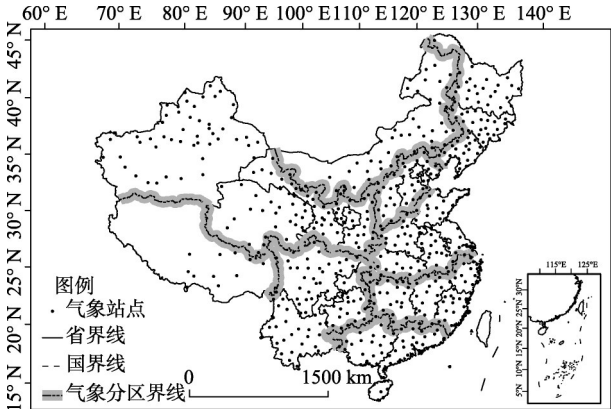


图1 中国气象站点分布图
Fig. 1 Distribution of meteorological stations in China

表1 中国气象地理区划

Tab. 1 Division of meteorological geography in China

| 大区名称 | 省级行政区 |
|-------|-------------------------------------|
| 西北地区 | 陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区、青海省、新疆维吾尔自治区 |
| 华北地区 | 山西省、河北省、北京市、天津市 |
| 内蒙古地区 | 内蒙古自治区 |
| 东北地区 | 辽宁省、吉林省、黑龙江省 |
| 华东地区 | 山东省、河南省、湖北省、安徽省、江苏省、上海市 |
| 江南地区 | 湖南省、山西省、福建省、浙江省 |
| 华南地区 | 广西壮族自治区、广东省、海南省、香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省 |
| 西南地区 | 四川省、重庆市、云南省、贵州省 |
| 西藏地区 | 西藏自治区 |

($j = 1, 2, \dots, 72$)。

由 (1) 式和 (2) 式可知, PCD 能够反映降水总量在研究时段内各个候的集中程度。如果研究时段中, 降水量集中在某一候内, 则它们合成向量的模与降水总量之比为 1, 即 PCD 为极大值; 如果每个候的降水量相等, 则它们各个分量累加后为 0, 即 PCD 为极小值^[9]。

2.2.2 Z 指数 由于某一时段的降水量一般并不服从正态分布, 现假设月、季降水量服从 Pearson III 曲线中的 r 分布, 其概率密度分布为^[27]:

$$P(x) = [\beta \Gamma(y)]^{-1} \left[\frac{x - \alpha}{\beta} \right]^{y-1} e^{-(x-\alpha)/\beta} \quad (3)$$

对降水量 x 进行正态化处理, 可将概率密度函数 Pearson III 型分布转换为以 Z 为变量的标准正态分布, 其转换公式为^[27]:

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \left(\frac{C_s}{2} \phi_i + 1 \right)^{1/3} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \quad (4)$$

式中: Z_i 为经转换后的气象要素值; C_s 为偏度系数; ϕ_i 为标准变量, 均可由降水资料序列计算求得, 即:

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{n\sigma^3} \quad \phi_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (5)$$

式中: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$; x_i 为第 i 个气象要素值。

2.2.3 变异系数 变异系数 (C_v) 是表征数据离散程度的无量纲量, 可用于比较不同量纲或不同均值的数据的离散程度和稳定性。 C_v 越大, 离散程度越大, 即数据波动性越大, 反之, C_v 越小, 离散程度越小, 即数据越稳定。 C_v 小于 1, 表示阈值估计值变化的平均幅度小于平均值, 稳定性较好, C_v 大于 1, 表示阈值估计值变化的平均幅度大于平均值, 稳定性较差^[28]。

$$C_v = \sigma/\bar{x} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

式中: n 为样本个数; σ 为样本标准差; x_i 为各气候要素值; \bar{x} 为各气候要素平均值。

2.2.4 站次覆盖率 站次覆盖率 (F_{ij}) 是某区域内各个非均匀性等级发生站数占全部站数的比例, 用于评价各个非均匀性等级的发生范围:

$$F_{ij} = (m/M) \times 100\% \quad (7)$$

式中: F_{ij} 为 j 站点的 i 级站次覆盖率; M 为评价区域总气象站数; m 为 i 级非均匀性等级的发生站数。

2.3 研究流程

本研究主要包括两方面内容: 降水非均匀性等级评价指标确定、中国降水非均匀性综合评价。其中, 降水非均匀性等级评价指标尚未系统地形成或认可, 因此, 首要工作是需要选取合理的等级阈值和确定较为科学的降水非均匀性等级评价指标。本研究认为科学的评价指标体系应该遵从以下原则:

(1) 对称性。一般来说, 各个等级发生频率应该是具有对称性的, 如基于 Z 指数的气象旱涝划分标准^[27] (表 2), 涝灾及旱灾的各级频率是对称的。

(2) 区分性。能够有效地将不同程度的事件区分出来, 严重程度越高的事件, 频率

应当越小。以表1的Z指数旱涝等级划分为例,气候环境是具有稳定性的,正常年份的可能性和频率应当占主要比例,频率取40%,而随旱涝事件的严重程度加重,发生的频率就降低,特涝(特旱)的发生频率是5%,可以有效地区分出旱涝事件的极端严重性。

(3) 易操作性。应当便于从业人员使用,等级的划分过程不应过于复杂。此外,数值的小数位不应过少或过多。根据计算得出的PCD实际数值,保留两位小数位的情况下,数值之间的差异较小,不能有效地进行区分,而保留四位小数位的情况下,对计算精度要求过高,参考Z指数及参考文献[29],并对实际数值进行比较后,小数位保留3位是较为合适的。

(4) 稳定性。尽管气象要素不会在短时间内发生明显变化,但是不同气候阶段之间仍然会存在一定的差异,为了消除这种差异,分别计算25个气候阶段的阈值,取25个气候阶段阈值平均值作为等级阈值。

(5) 可比性。可广泛适用于不同地区,并且不同地区之间可以进行对比。

本研究主要研究流程是根据评价指标的特点和原则,确定合理的等级阈值,用于建立降水非均匀性等级评价指标,并且实际应用于中国降水非均匀性综合评价(图2)。

表2 Z指数旱涝等级划分

Tab. 2 Graded division of drought and flood based on Z index

| 等级 | 类型 | Z指数 | 发生频率 | 累积频率(%) |
|----|----|----------------------------|------|---------|
| 1 | 极涝 | $Z > 1.645$ | 5 | 100 |
| 2 | 大涝 | $1.037 < Z \leq 1.645$ | 10 | 95 |
| 3 | 偏涝 | $0.842 < Z \leq 1.037$ | 15 | 80 |
| 4 | 正常 | $-0.842 \leq Z \leq 0.842$ | 40 | 70 |
| 5 | 偏旱 | $-1.037 \leq Z < -0.842$ | 15 | 30 |
| 6 | 大旱 | $-1.645 \leq Z < -1.037$ | 10 | 15 |
| 7 | 极旱 | $Z < -1.645$ | 5 | 5 |

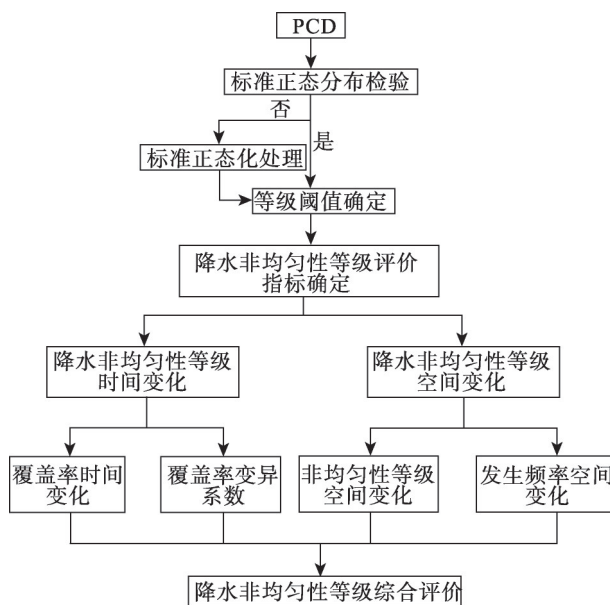


图2 降水非均匀性综合评价研究流程

Fig. 2 Comprehensive evaluation process of precipitation heterogeneity

3 降水非均匀性等级评价指标确定

3.1 正态分布检验

在进行确定阈值之前,有必要对变量的正态分布进行检验。主要原因是:

(1) 在气象统计中,由于统计方法中的随机变量大多假设为遵从正态分布,为了在使用方法时能符合这种假设的条件,严格来说,对研究的变量都应进行分布检验^[30]。

(2) 正态分布的概率密度函数曲线是关于均值 μ 对称的,离 μ 越近的值,概率越大,而离 μ 越远的值,概率越小,这一特点符合阈值划分的原则。其中,标准正态分布是关于 $\mu = 0$ 对称分布,负值区可视为偏小,即降水分散,正值区可视为偏大,即降水集中。

通过观察PCD的直方图以及偏度系数、峰度系数检验,判断PCD是否服从正态分布。利用SPSS21.0得到各个气候阶段的PCD直方图及偏度系数、峰度系数。各个气候阶

段的PCD直方图差异不大,故以1960-1989年气候阶段为例(图3)可以观察到PCD为负偏态分布。假设要检验的变量是遵从正态分布,分别用一次抽样的样本计算偏度系数及峰度系数,若在显著水平 $\alpha=0.05$ 下,

$$|g_1|>1.96\sqrt{\frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}}\qquad |g_2|>1.96\sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}}\qquad (8)$$

则拒绝假设,认为变量不遵从正态分布,否则就可以认为变量遵从正态分布^[30]。一个气候阶段样本量 $n=17070$,即 $|g_1|>0.04$ 和 $|g_2|>0.07$ 认为变量不遵从正态分布。通过计算各气候阶段PCD偏度系数、峰度系数(表3),各气候阶段PCD是不遵从正态分布,而是遵从负偏态分布。

3.2 标准正态化处理

由于各个气候阶段PCD不遵从正态分布,故需要对PCD进行正态化处理。经过指数转换、对数转换、反正弦转换、平方根反正弦转换、Z指数转换,各气候阶段PCD偏度系数、峰度系数仍不能通过正态检验,但反正弦转换效果较为显著,经转换后近似正态分布。过于追求正态分布,有可能导致数据失真,所以接受反正弦转换效果。

以1960-1989年气候阶段为例(表4),记原PCD序列为 X_i ,转换后新序列 Y_i ,对各种转换方法效果进行综合对比,反正弦转换效果最优,偏度系数、峰度系数都显著减少(通过 $\alpha=0.01$ 检验),可认为遵从近似正态分布。

由于反正弦转换后,仍不遵从近似标准正态分布,所以进行标准化处理,记处理后得到的新序列为 Z_i 。

3.3 确定等级阈值和评价指标

确定评价指标的首要工作是等级阈值的选取,而阈值确定方法常用参数法和非参数法。基于极值理论的参数法^[31-33],主要是计算Gamma分布函

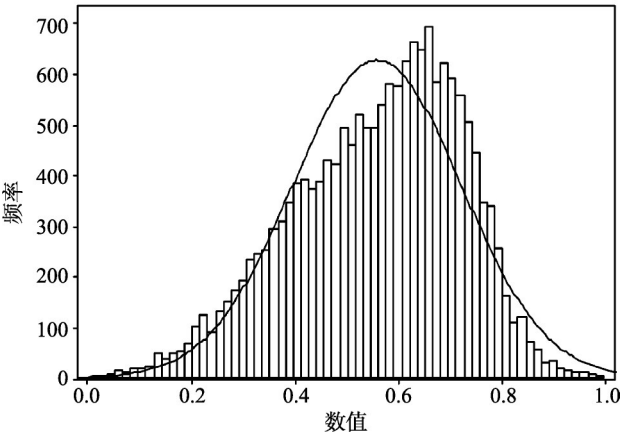


图3 1960-1989年PCD直方图

Fig. 3 Histogram of precipitation concentration degree (PCD) in 1960-1989

表3 各气候阶段PCD偏度系数、峰度系数

Tab. 3 Skewness and kurtosis of precipitation concentration degree (PCD) in various climatic stages

| 气候阶段 | 偏度系数 | 峰度系数 | 气候阶段 | 偏度系数 | 峰度系数 |
|-----------|--------|--------|-----------|--------|--------|
| 1960-1989 | -0.426 | -0.282 | 1973-2002 | -0.419 | -0.284 |
| 1961-1990 | -0.419 | -0.301 | 1974-2003 | -0.416 | -0.281 |
| 1962-1991 | -0.424 | -0.264 | 1975-2004 | -0.424 | -0.246 |
| 1963-1992 | -0.414 | -0.267 | 1976-2005 | -0.446 | -0.218 |
| 1964-1993 | -0.398 | -0.294 | 1977-2006 | -0.453 | -0.222 |
| 1965-1994 | -0.396 | -0.318 | 1978-2007 | -0.450 | -0.206 |
| 1966-1995 | -0.410 | -0.292 | 1979-2008 | -0.447 | -0.196 |
| 1967-1996 | -0.405 | -0.268 | 1980-2009 | -0.439 | -0.224 |
| 1968-1997 | -0.405 | -0.285 | 1981-2010 | -0.441 | -0.228 |
| 1969-1998 | -0.420 | -0.292 | 1982-2011 | -0.443 | -0.204 |
| 1970-1999 | -0.424 | -0.259 | 1983-2012 | -0.450 | -0.193 |
| 1971-2000 | -0.428 | -0.253 | 1984-2013 | -0.446 | -0.213 |
| 1972-2001 | -0.439 | -0.254 | | | |

表4 1960-1989年PCD正态转换偏度系数和峰度系数

Tab. 4 Skewness and kurtosis of precipitation concentration degree (PCD) after normal transformation in 1960-1989

| 转换方法 | 平方 | 立方 | 平方根 | 立方根 | 倒数 | 对数 | 反正弦 | 平方根反正弦 | Z指数 |
|------|-------|------|-------|-------|---------|-------|-------|--------|-------|
| 偏度系数 | 0.24 | 0.81 | -0.92 | -1.15 | 87.16 | -1.91 | -0.07 | -0.39 | -0.10 |
| 峰度系数 | -0.47 | 0.60 | 0.98 | 1.97 | 9640.34 | 8.03 | -0.18 | 0.16 | -0.40 |

数边缘值来确定阈值,计算复杂,在处理大容量数据的时候,工作量大。以百分位法为主的非参数法^[28, 34-37],主要是将样本数据按升序或降序排列,以某个百分位对应的数值确定阈值,易于操作,工作量小,但需要基于一定的主观经验。

经标准化反正弦转换的PCD遵从近似标准正态分布,且降水量是否过于集中或者分散,与旱涝发生频率有一定的关系,因此,等级阈值划分可参考Z指数所用的累积频率。本研究结合正态分布函数、累积频率和百分位法,将降水非均匀性划分为7个等级。

将统计时段内所有的气象站点经标准化反正弦转换的PCD即序列 Z_i (一个气候阶段样本数 $n = 17070$)按从小到大升序排列,根据Z指数累积频率(表2),得到累积频率对应的 Z_i ,再根据式(9)进行反变换为 X_i 。

$$X_i = \sin(Z_i \sigma + \bar{y}) \quad (9)$$

$$\text{式中: } \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad y_i = \sin^{-1} x_i$$

在实际操作过程中,极少存在与累积频率精确对应的单一值,如1960-1989年,PCD = -1.646 累积频率为4.984%,PCD = -1.641 累积频率为5.038%,因此,累积频率5%可取其均值,即PCD = -1.644。

根据上述方法,分别计算出25个气候阶段的累积频率对应值 X (表5)。25个气候阶段估计值的标准差十分小,即各个气候阶段的估计值与平均值的离散程度十分低,是稳定的,因此,各个累积频率对应值的平均值即为各个等级阈值。

根据25个气候阶段估计值的平均值,确定降水非均匀性等级评价指标(表6)。其中,集中等级包含轻度集中、中度集中和高度集中3个等级,分散等级包含轻度分散、中度分散和高度分散3个等级。

4 中国降水非均匀性综合评价

4.1 降水非均匀性时间变化

根据降水非均匀性等级评价指标,对中国569个气象站点1960-2013年降水非均匀性进行等级划分,并计算得到各个站点不同等级的发生频率、全国不同等级的平均发生频率(表7)以及各年份不同等级的站次覆盖率(图4)。

通过对比各个等级的实际频率与理论频率,发现各个等级的实际频率与理论频率是基本一致的(表7)。其中,集中等级实际频率是32%,比理论频率多出2%,正常等级实际频率是38%,比理论频率少2%,分散等级实际频率是30%,与理论频率相等。

从不同等级的变异系数来看(表7),集中等级和分散等级越高,地区差异性就越大。

近54年集中等级的站次覆盖率以1.55%/10a的速度显著地快速下降(通过 $\alpha = 0.01$ 检验)(图4a),分散等级的站次覆盖率以0.24%/10a的速度显著地上升(通过 $\alpha = 0.05$ 检验)(图4a),正常等级的站次覆盖率以1.31%/10a的速度上升(未能通过显著性检验)(图4b)。由此表明,近54年来,中国降水年内分配趋于正常或分散的区域有所增加。

轻度集中、中度集中和高度集中的站次覆盖率都呈现下降趋势,倾向率分别为:-0.28%/10a、-1.02%/10a、-0.25%/10a,中度集中的站次覆盖率下降速度最快(图4c)。

轻度分散的站次覆盖率呈现下降趋势,倾向率-0.10%/10a,中度分散的站次覆盖率基本保持不变,略有上升,倾向率为0.01%/10a,高度分散的站次覆盖率呈现上升趋势,倾向率为0.33%/10a(图4d)。

表 5 各个气候阶段累积频率对应值
Tab. 5 Values corresponding to cumulative frequency in various climatic stages

| 气候阶段 | 5% | 15% | 30% | 70% | 85% | 95% |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1960-1989 | 0.275 | 0.390 | 0.482 | 0.654 | 0.729 | 0.806 |
| 1961-1990 | 0.269 | 0.385 | 0.477 | 0.651 | 0.725 | 0.804 |
| 1962-1991 | 0.272 | 0.388 | 0.479 | 0.652 | 0.726 | 0.804 |
| 1963-1992 | 0.272 | 0.386 | 0.478 | 0.650 | 0.724 | 0.802 |
| 1964-1993 | 0.271 | 0.385 | 0.477 | 0.648 | 0.723 | 0.800 |
| 1965-1994 | 0.268 | 0.383 | 0.475 | 0.648 | 0.723 | 0.802 |
| 1966-1995 | 0.273 | 0.387 | 0.479 | 0.651 | 0.725 | 0.803 |
| 1967-1996 | 0.273 | 0.387 | 0.479 | 0.651 | 0.725 | 0.803 |
| 1968-1997 | 0.270 | 0.385 | 0.478 | 0.651 | 0.725 | 0.804 |
| 1969-1998 | 0.270 | 0.385 | 0.477 | 0.650 | 0.725 | 0.803 |
| 1970-1999 | 0.271 | 0.386 | 0.478 | 0.650 | 0.724 | 0.803 |
| 1971-2000 | 0.268 | 0.383 | 0.476 | 0.649 | 0.723 | 0.802 |
| 1972-2001 | 0.266 | 0.382 | 0.474 | 0.648 | 0.723 | 0.802 |
| 1973-2002 | 0.269 | 0.385 | 0.477 | 0.649 | 0.723 | 0.801 |
| 1974-2003 | 0.269 | 0.383 | 0.475 | 0.648 | 0.722 | 0.800 |
| 1975-2004 | 0.271 | 0.384 | 0.475 | 0.647 | 0.720 | 0.798 |
| 1976-2005 | 0.272 | 0.386 | 0.477 | 0.647 | 0.720 | 0.799 |
| 1977-2006 | 0.271 | 0.384 | 0.475 | 0.646 | 0.719 | 0.798 |
| 1978-2007 | 0.271 | 0.384 | 0.475 | 0.646 | 0.719 | 0.797 |
| 1979-2008 | 0.271 | 0.383 | 0.474 | 0.645 | 0.718 | 0.796 |
| 1980-2009 | 0.269 | 0.382 | 0.472 | 0.643 | 0.717 | 0.795 |
| 1981-2010 | 0.267 | 0.381 | 0.471 | 0.642 | 0.716 | 0.794 |
| 1982-2011 | 0.269 | 0.382 | 0.471 | 0.642 | 0.715 | 0.793 |
| 1983-2012 | 0.268 | 0.381 | 0.471 | 0.641 | 0.714 | 0.793 |
| 1984-2013 | 0.267 | 0.381 | 0.472 | 0.643 | 0.717 | 0.795 |
| 均值 | 0.270 | 0.384 | 0.476 | 0.647 | 0.721 | 0.800 |
| 标准差 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.003 | 0.004 | 0.004 |

| 表 6 降水非均匀性等级评价指标 Tab. 6 Graded evaluation index of precipitation heterogeneity | | | | |
|---|------|-----------------|--------|--------|
| 等级 | 类型 | PCD | 实际频率/% | 累积频率/% |
| 1 | 高度集中 | PCD>0.800 | 5 | 100 |
| 2 | 中度集中 | 0.721<PCD≤0.800 | 10 | 95 |
| 3 | 轻度集中 | 0.647<PCD≤0.721 | 15 | 80 |
| 4 | 正常 | 0.476≤PCD≤0.647 | 40 | 70 |
| 5 | 轻度分散 | 0.384≤PCD<0.476 | 15 | 30 |
| 6 | 中度分散 | 0.270≤PCD<0.384 | 10 | 15 |
| 7 | 高度分散 | PCD<0.270 | 5 | 5 |

| 表 7 降水非均匀性不同等级平均发生频率及变异系数 Tab. 7 Average frequency and variation coefficient in different grades of precipitation heterogeneity | | | | |
|--|------|-------|--------|------|
| 等级 | 类型 | 实际频率% | 理论频率/% | 变异系数 |
| 1 | 高度集中 | 4 | 5 | 2.58 |
| 2 | 中度集中 | 11 | 10 | 1.30 |
| 3 | 轻度集中 | 17 | 15 | 0.89 |
| 4 | 正常 | 38 | 40 | 0.58 |
| 5 | 轻度分散 | 14 | 15 | 0.98 |
| 6 | 中度分散 | 11 | 10 | 1.37 |
| 7 | 高度分散 | 5 | 5 | 2.09 |

从各个等级的站次覆盖率的变异系数来看（表 8），集中等级和分散等级越高，年际波动变化程度越大，但波动程度比地区差异性要明显低（通过 $\alpha = 0.01$ 检验）。由此表明，集中等级和分散等级越高，中国地区差异性越大，年际波动变化程度越大。

4.2 降水非均匀性空间变化

4.2.1 降水非均匀性等级空间变化 对中国各个气候站点的降水非均匀性平均等级进行分析，中国降水非均匀性在空间上整体表现出“南部分散，北部集中，东部分散，西部集中”的空间分布特征（图 5）。

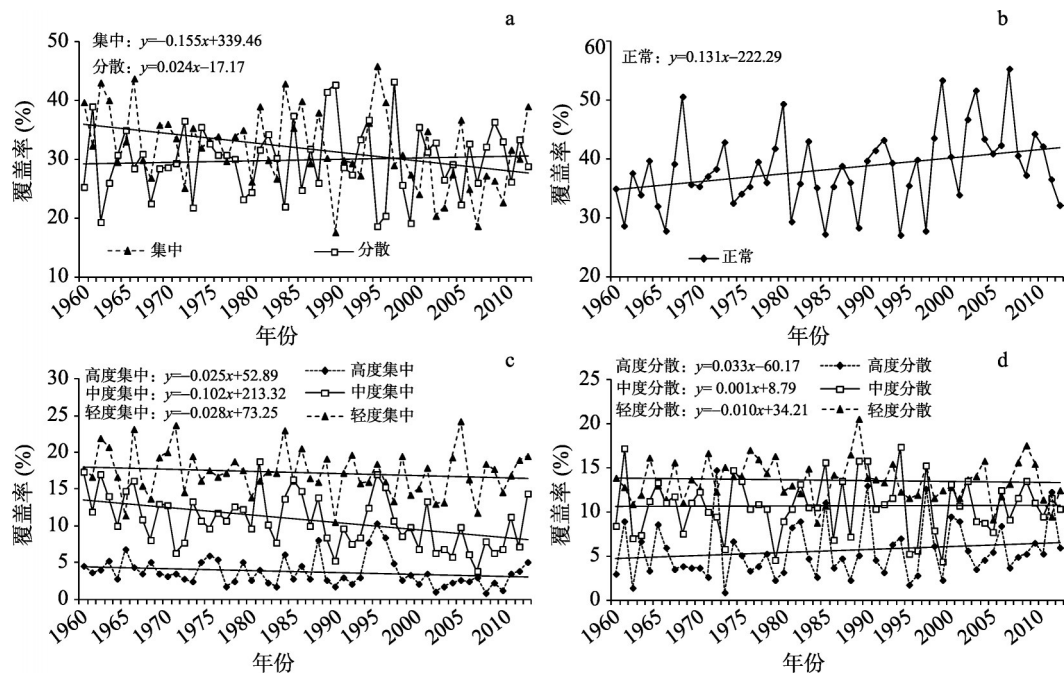


图4 1960-2013年降水非均匀性不同等级站次覆盖率
Fig. 4 Station coverage in different grades of precipitation heterogeneity (1960-2013)

表8 降水非均匀性不同等级站次覆盖率变异系数

Tab. 8 Variation coefficient of station coverage in different grades of precipitation heterogeneity

| 等级 | 高度集中 | 中度集中 | 轻度集中 | 正常 | 轻度分散 | 中度分散 | 高度分散 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 变异系数 | 0.52 | 0.33 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.29 | 0.29 |

西北地区呈出“东—中—西”三段分布：东段（陕西、宁夏、甘肃东部）以正常等级为主；中段北部（甘肃西部）以正常等级为主，南部（青海）以轻度和中度集中为主；东段又以天山分为南北两部分，北部（新疆北部）以高度分散为主，南部（新疆南部）以轻度和中度集中为主，天山地区以正常等级为主。

华北地区以轻度集中为主：河北、北京、天津及山西北部以轻度集中为主，河北东部有中度集中，而山西南部以正常等级为主。内蒙古地区以轻度集中为主，个别站点为正常等级或中度集中。东北地区呈“东—西”两段分布：东段以正常等级为主，西段以轻度和中度集中为主，其中，靠近大兴安岭的地区以中度集中为主。

华东地区呈“南—北”两段分布，大致呈现自北向南趋于分散的格局：北段（河南、山东）以正常等级为主，山东北部有轻度集中分布；南段（湖北、安徽、江苏、上海）以轻度和中度分散为主。

江南地区以中度分散为主：东段（浙江、福建东部）和西段（湖南、江西西部）以中度分散为主，中段（江西东部、福建西部）以轻度分散为主。华南地区以正常等级、轻度分散为主：中段以轻度分散为主，而西段和东段以正常等级为主。

西南地区以正常等级、轻度分散为主：东段（重庆、贵州东部）以轻度和中度分散为主，中段（四川东部）和云南省以正常等级为主，横断山区以中度分散为主，四川西部以轻度集中为主。

西藏地区以中度和高度集中为主。由于西部地区气象资料缺失和西藏地区面积广大,因此,需要考虑少数站点反映的空间特征的代表性。但从用于分析的11个气象站点的非均匀性等级来看,基本都是集中等级(8个站点为集中等级,3个站点为正常等级),一致性较好,有理由认为西藏地区是以集中等级为主的。

从各个气候站点的降水非均匀性等级变异系数进行分析,降水非均匀性等级的稳定性在空间上整体表现出“南部稳定,北部波动,东部稳定,西部波动”的空间分布特征(图6)。

波动程度越大的地区,越需要注意降水量的时空调节,才能有效应对旱涝灾害的发生,其中,内蒙古地区、华北地区东段(河北、北京、天津)、东北地区东段、西北地区中段(青海西部、甘肃西部)和西段(新疆南部)、西藏地区等地区的降水非均匀性的波动程度较大。

4.2.2 降水非均匀性等级发生频率空间变化 分别对中国各个站点的集中等级、正常等级以及分散等级的发生频率进行分析。为了便于描述和理解,下文将发生频率进行如下定义:0~20%为极少发生,20%~40%为较少发生,40%~60%为经常发生,60%~80%为频繁发生,80%~100%为极频繁发生。

(1) 集中等级发生频率空间分布 近54年中国各个站点分散等级发生频率在空间上整体呈现为“南部低北部高”的分布格局(图7)。

西北地区集中等级发生频率大致呈现自东向西逐渐递增的空间分布特征:陕西极少发生,宁夏、甘肃较少或经常发生,青海频繁发生,新疆北部极少发生,新疆南部经常或频率发生。华北地区集中等级频繁发生,发生频率大致自西向东逐渐递增,东部极频繁发生。内蒙古地区集中等级频繁发生,靠近大兴安岭一带为极频繁发生。东北地区集中等级发生频率自东向西逐渐递增。

华南地区、江南地区、华东地区(除山东省以外)、西南地区东段(贵州、重庆)集中等级极少发生,说明这些地区的降水量是较为均匀的。西南地区集中等级较少发生,呈现“东低西高”分布:东段(贵州、重庆)极少发生,东段(四川东部、云南东部)较少发生,云南、四川交界地区频繁发生。西藏地区集中等级极频繁发生。

(2) 正常等级发生频率空间分布 近54年中国各个站点正常等级发生频率空间分布格局较为复杂,各个气象大区的区内分布也有所差异(图8)。

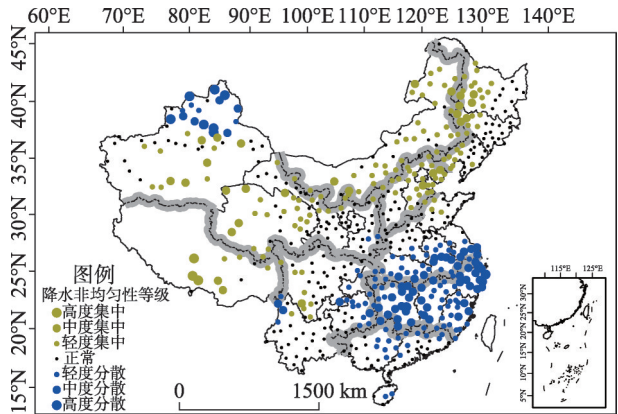


图5 降水非均匀性平均等级空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of average grade of precipitation heterogeneity

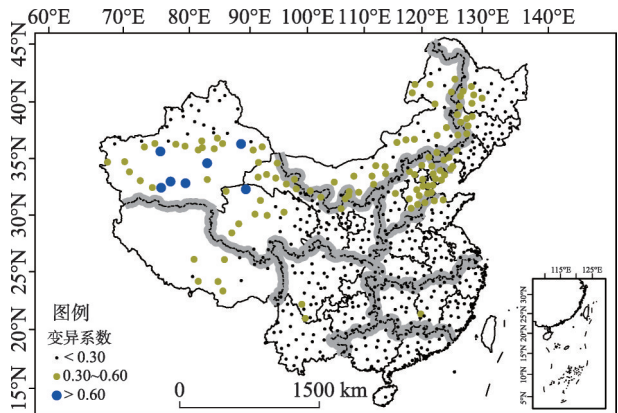


图6 降水非均匀性等级变异系数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of grade variation coefficient of precipitation heterogeneity

西北地区正常等级发生频率呈现“东高西低”的空间分布特征: 陕西、宁夏、甘肃东部频繁发生, 青海、甘肃西部和新疆极少或较少发生。

华北地区呈现“东低西高”的空间分布特征: 河北、北京、天津极少或较少发生, 山西经常发生。内蒙古地区正常等级较少或经常发生。

东北地区正常等级发生频率呈现“东多西少”的空间分布特征: 东段频繁发生, 西段较少或经常发生。

华北地区呈现“北高南低”的空间分布特征: 河南、山东经常或频繁发生, 湖北、安徽、江苏、上海较少或极少发生。

江南地区正常等级较少或极少发生, 福建发生频率稍高。华南地区正常等级较少或经常发生。

西南地区正常等级整体上频繁发生: 重庆、贵州东部较少发生, 贵州西部、四川、云南频繁或极频繁发生。西藏地区存在一定的地区内部差异, 整体上以极少或较少发生。

(3) 分散等级发生频率空间分布 近54年中国各个站点分散等级发生频率在空间上整体呈现为“南部高北部低”的分布格局(图9)。西北地区分散等级发生频率大致呈现为“东少西多”的空间分布格局: 陕西南部较少或经常发生, 陕西北部、甘肃、青海极少发生, 新疆南部较少或经常发生, 新疆北部极频繁发生。华北地区、内蒙古地区、东北地区、西藏地区分散等级都极少发生。华东地区分散等级发生频率自北向南逐渐递增: 山东极少发生, 河南较少发生, 湖北、安徽、江苏、上海频繁或极频繁发生。江南地区分散等级频繁或极频繁发生, 并且以极频繁发生为主。华南地区分散等级较少或经常发生。西南地区整体上呈现“东高西低”的空间分布格局: 重庆、贵州东部频繁或极频繁发生, 四川、云南、贵州西部极少或较少发生。

“东少西多”的空间分布格局: 陕西南部较少或经常发生, 陕西北部、甘肃、青海极少发生, 新疆南部较少或经常发生, 新疆北部极频繁发生。华北地区、内蒙古地区、东北地区、西藏地区分散等级都极少发生。华东地区分散等级发生频率自北向南逐渐递增: 山东极少发生, 河南较少发生, 湖北、安徽、江苏、上海频繁或极频繁发生。江南地区分散等级频繁或极频繁发生, 并且以极频繁发生为主。华南地区分散等级较少或经常发生。西南地区整体上呈现“东高西低”的空间分布格局: 重庆、贵州东部频繁或极频繁发生, 四川、云南、贵州西部极少或较少发生。

4.3 降水非均匀性综合评价

综合考虑各个气象站点降水非均匀性等级的多年平均等级、发生频率、变异系数等要素的时空变化特征, 并采用GIS空间叠置法, 对中国各个地区的降水非均匀性进行综合评价和分类(图10)。

西藏地区、华北地区东段(河北、北京、天津)、大兴安岭地区(内蒙古东部、东北地区西段)是降水高度集中区; 新疆南部、青海、内蒙古地区是降水中度集中区; 甘肃北部、山东是降水轻度集中区; 西南地区西段(四川、云南、贵州西部)、西北地区东段

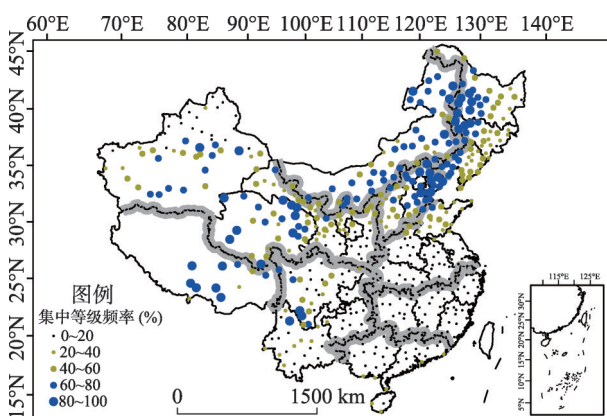


图7 1960-2013年集中等级发生频率空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of frequency of centralized grade (1960-2013)

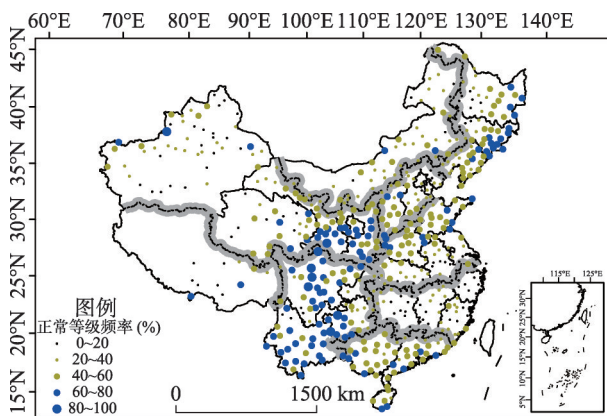


图8 1960-2013年正常等级发生频率空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of frequency of normal grade (1960-2013)

(陕西、宁夏、甘肃南部)、山西、河南、东北地区东段是降水正常区；华南地区是降水轻度分散区；西南地区东段（重庆、贵州东部）、华东地区南段（湖北、安徽、江苏、上海）是降水中度分散区；江南地区、新疆北部是降水高度分散区。为检验降水非均匀性综合评价及其区划的准确性，对各个类型气候区的非均匀性等级时间序列进行分析（图 11）。

正常区（图 11a）：正常年份有 52 a，轻度集中年份有 2 a，正常年份占绝大多数；

轻度分散区（图 11b）：正常年份和轻度分散年份均有 26 a，中度分散年份有 2 a，轻度分散年份比正常区明显增多；

中度分散区（图 11c）：正常年份有 11 a，轻度分散年份有 28 a，中度分散年份有 15 a，中度分散年份比轻度分散区明显增多；

高度分散区（图 11d）：轻度分散年份有 11 a，中度分散年份有 28 a，高度分散年份有 15 a，高度分散年份比中度分散区明显增多；

轻度集中区（图 11e）：正常年份有 34 a，轻度集中年份有 18 a，中度集中年份有 2 a，轻度集中年份比正常区明显增多；

中度集中区（图 11f）：正常年份有 11 a，轻度集中年份有 28 a，中度集中年份有 15 a，中度集中年份比轻度集中区明显增多；

高度集中区（图 11g）：轻度集中年份有 14 a，中度集中年份有 30 a，高度集中年份有 14 a，高度集中年份比中度集中区明显增多。

各类型分区的降水非均匀性等级具有较为明显的差异，因此，本文对中国降水非均匀性的综合评价以及各类型分区的划分是比较准确有效的。

5 讨论与结论

5.1 讨论

(1) 基本单元问题 本研究主要是以省级行政区为基本单元进行研究分析，在对中国降水非均匀性综合评价时，发现个别地区的内部差异十分明显，因此，针对个别地区又以县级行政区为基本单元加以细化分析，能够更加全面地反映中国降水非均匀性的地区差异。其中，主要包括：大兴安岭地区、新疆北部、甘肃南部、贵州西部。

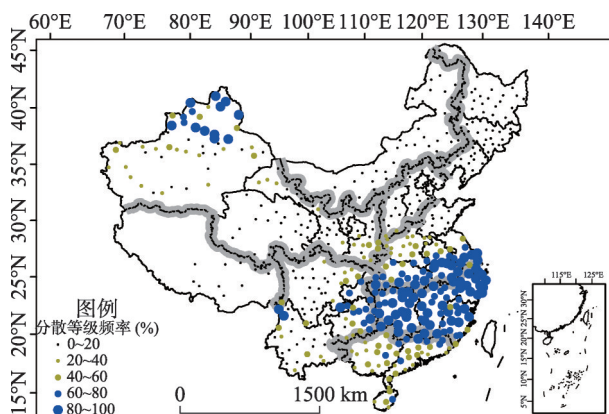


图 9 1960-2013 年分散等级发生频率空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of frequency of dispersed grade (1960-2013)

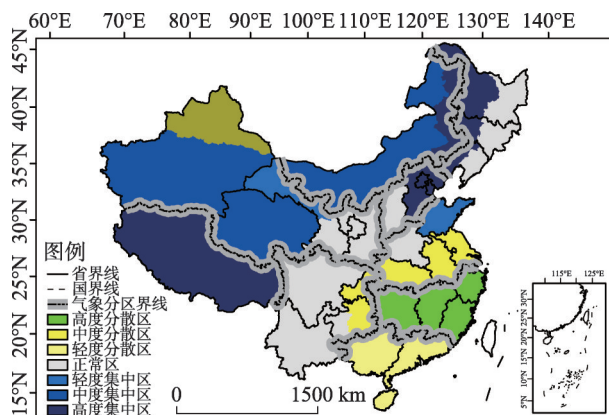


图 10 中国降水非均匀性综合评价

Fig. 10 Comprehensive evaluation of precipitation heterogeneity in China

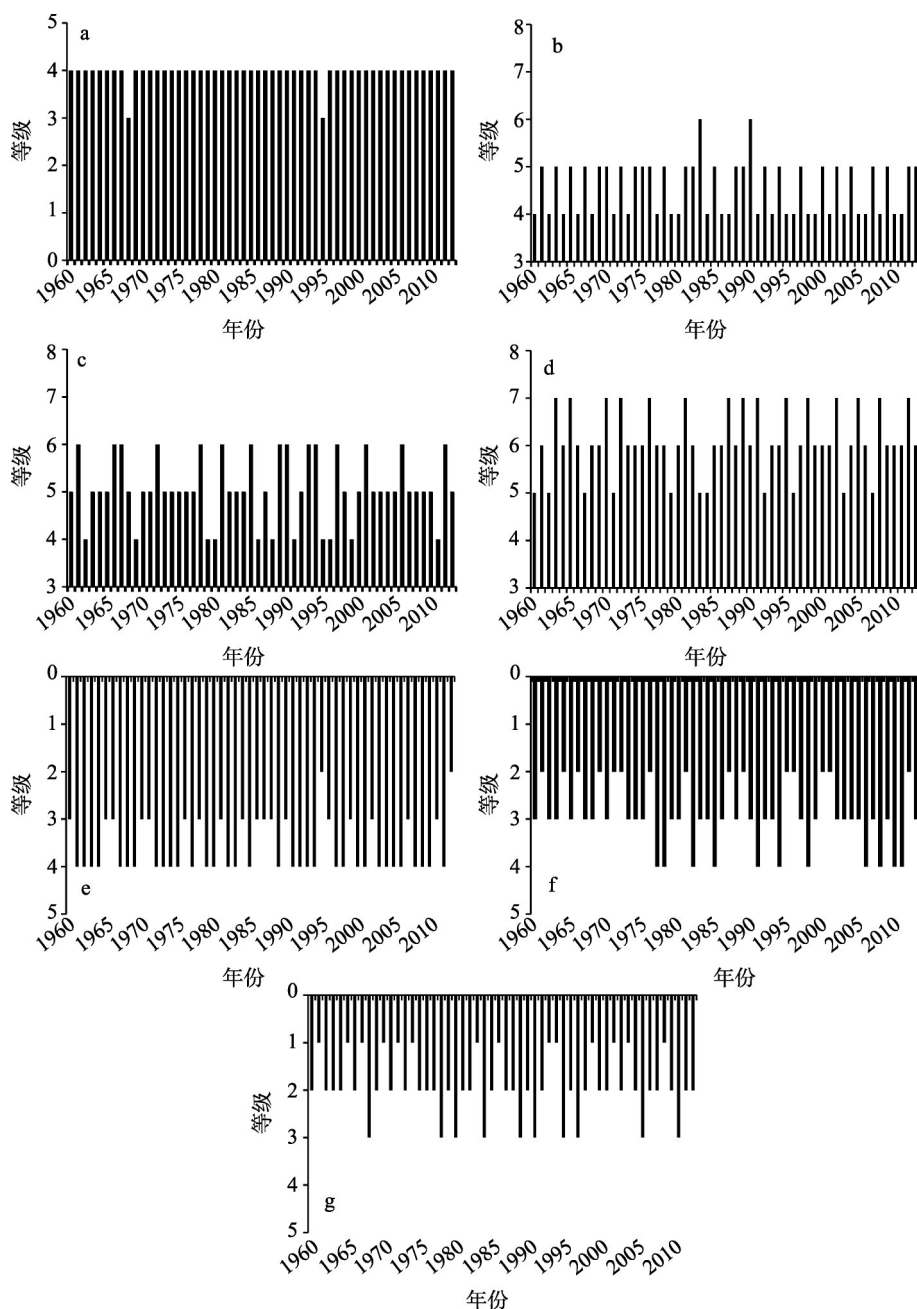


图 11 1960-2013 年各类型分区等级变化;

a. 正常区; b. 轻度分散区; c. 中度分散区; d. 高度分散区; e. 轻度集中区; f. 中度集中区; g. 高度集中区
 Fig. 11 Level changes of each region (1960-2013) (a. normal region; b. mild dispersion region; c. moderate dispersion region; d. high dispersion region; e. mild centralization region; f. moderate centralization region; g. high centralization region)

(2) 评价指标问题 研究降水非均匀性的方法是多种的, 若同时使用多种方法进行研究分析, 容易产生计算结果的不一致甚至相反, 在对比各种研究方法的优缺点后, 认为降水集中度是多种方法中最优一种, 因此, 本研究仅使用降水集中度作为降水非均匀性研究方法。常用的降水非均匀性研究方法主要是非均匀性系数、降水集中度、基尼系

数,降水集中度的分辨力和敏感性都高于非均匀性系数^[5-6],而基尼系数需要建立在洛伦茨曲线的基础上,并且估算工作复杂,因此,降水集中度是多种方法中最优一种。此外,在确定各个等级阈值时,主要是结合正态分布函数、累积频率和百分位法进行确定,需要基于一定的主观经验。若修改各个等级的发生频率,相应的阈值就需要重新确定,存在一定的波动性,需要在今后的应用中,逐步寻找到最佳的发生频率并修正阈值。

(3) 时间尺度问题 本文所使用的时间尺度对反应降水年内分配非均匀性特征是有重要影响的,从PCD的理论特性可知,时间尺度越小,方位角间隔就越小,越能反映降水年内分配非均匀性,一定程度上可认为精度就越高,但对数据准确性要求就越高,而时间尺度越大,方位角间隔就越大,不能很好地反映的非均匀性特征。中国大部分地区降水主要集中在夏季,若使用月降水量或季节降水量,则并不能很好地区分各个地区的非均匀性,若使用日降水量,则导致方位角间隔过小、工作量大、要求过高等问题,因此,本文主要是使用候降水量研究分析降水年内分配非均匀性。

5.2 结论

本研究旨在提出和建立适用于全国范围的较为完善的降水非均匀性等级评价指标,并应用于1960-2013年中国降水非均匀性综合评价中,主要得出以下结论:

(1) 提出并建立了适用于全国范围的降水非均匀性等级评价指标。本研究以1960-2013年全国569个国家级气象站的日降水量作为基础资料,计算得出各个站点的降水集中度,结合正态分布函数、累积频率和百分位法,取25个气候阶段估计值的平均值作为各个降水非均匀性等级阈值,建立了较为完整的降水非均匀性等级评价指标(表6)。

(2) 近54年来,中国降水年内分配趋于正常或分散的区域有所增加。其中,轻度集中、中度集中和高度集中的站次覆盖率都呈现下降趋势;轻度分散的站次覆盖率呈现下降趋势,中度分散的站次覆盖率基本保持不变,略有上升,高度分散的站次覆盖率呈现上升趋势。

(3) 结合中国降水非均匀性等级时空变化特征,将中国划分为7个区域类型。西藏地区、华北地区东段、大兴安岭地区是降水高度集中区;新疆南部、青海、内蒙古地区是降水中度集中区;甘肃北部、山东是降水轻度集中区;西南地区西段、西北地区东段、山西、河南、东北地区东段是降水正常区;华南地区是降水轻度分散区;西南地区东段、华东地区南段是降水中度分散区;江南地区、新疆北部是降水高度分散区。

参考文献(References)

- [1] Tang Qicheng. Calculation and discussion of the non-uniform coefficient of annual runoff distribution. *Resources Science*, 1982, 4(3): 59-65. [汤奇成. 径流年内分配不均匀系数的计算和讨论. *资源科学*, 1982, 4(3): 59-65.]
- [2] Feng Guozhang, Li Ying, Li Peicheng. Quantification of nonuniformity in annual distribution of stream flows. *Journal of Northwest Agricultural University*, 2000, 28(2): 50-53. [冯国章, 李瑛, 李佩成. 河川径流年内分配不均匀性的量化研究. *西北农业大学学报*, 2000, 28(2): 50-53.]
- [3] Zhen Hongxing, Liu Changming. Changes of annual runoff distribution in the headwater of the Yellow River Basin. *Progress in Geography*, 2003, 22(6): 585-590. [郑红星, 刘昌明. 黄河源区径流年内分配变化规律分析. *地理科学进展*, 2003, 22(6): 585-590.]
- [4] Gu Wanlong, Wang Jijun, Zhu Yeyu et al. Annual distribution of precipitation over the Huaihe River basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(4): 426-431. [顾万龙, 王纪军, 朱业玉等. 淮河流域降水量年内分配变化规律分析. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(4): 426-431.]
- [5] Tang Qicheng, Cheng Tianwen, Li Xiuyun. Preliminary study on the degree and time of concentration of monthly runoff of Chinese streams. *Acta Geographica Sinica*, 1982, 37(4): 383-393. [汤奇成, 程天文, 李秀云. 中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究. *地理学报*, 1982, 37(4): 383-393.]
- [6] Yang Yuandong. Calculation method of the annual runoff distribution. *Acta Geographica Sinica*, 1984, 39(2): 218-227.

- [杨远东. 河川径流年内分配的计算方法. 地理学报, 1984, 39(2): 218-227.]
- [7] Wang Jijun, Pei Tiefan. Non-uniformity index of annual precipitation distribution. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(9): 1364-1368. [王纪军, 裴铁藩. 降水年内分配不均匀性指标. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1364-1368.]
- [8] Zhang Lujun, Qian Yongfu. Annual distribution features of precipitation in China and their interannual variations. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 17(2): 146-163.
- [9] Zhang Lujun, Qian Yongfu. A study on the feature of precipitation concentration and its relation to flood-producing in the Yangtze River valley of China. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(4): 622-630. [张录军, 钱永甫. 长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究. 地球物理学报, 2004, 47(4): 622-630.]
- [10] Qin Weijian, Wang Yongqing. Study on variation characteristics of precipitation concentration degree in Guangxi under the background of global climate becoming warm. *Meteorological and Environmental Research*, 2010, 1(5): 17-21.
- [11] Li Xuemei, Jiang Fengqing, Li Lanhai. Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period in Xinjiang, China. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(11): 1679-1693.
- [12] Lu Zhihua, Xia Ziqiang, Yu Lanlan et al. Temporal and spatial variation of characteristics of precipitation in Songhua River basin during 1958-2009. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 990-1000. [陆志华, 夏自强, 于岚岚 等. 1958-2009年松花江流域降水时空演变特征. 自然资源学报, 2012, 27(6): 990-1000.]
- [13] Wang Nan, Li Dongliang, Zhang Jie. The intra-seasonal heterogeneity of the strong precipitation events and the corresponding atmosphere circulation characteristics in the middle and upper Yellow River Basin in flood season. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(1): 239-248. [王楠, 李栋梁, 张杰. 黄河中上游季节内强降水的时间非均匀性特征及其对大气环流的响应. 中国沙漠, 2013, 33(1): 239-248.]
- [14] Zou Liyao, Ding Yihui, Wang Ji. Spatial and temporal characteristics of heavy precipitation long-term changes in Northeast China and causation analysis. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(1): 137-147. [邹立尧, 丁一汇, 王冀. 东北强降水时空变化的特征和原因分析. 自然资源学报, 2013, 28(1): 137-147.]
- [15] Liu Wenli, Zhang Mingjun, Wang Shengjie et al. Intra-annual inhomogeneity of precipitation and its prediction in Shaanxi Province of Northwest China in 1960-2011. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(7): 1877-1887. [刘文莉, 张明军, 王圣杰 等. 1960-2011年陕西省年内降水分配非均匀性特征及预测. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1877-1887.]
- [16] Cao Yongqiang, Lulu, Zhang Tingting et al. Spatio-temporal variation in precipitation in Zhejiang province based on PCD and PCP. *Resources Science*, 2013, 35(5): 1001-1006. [曹永强, 路璐, 张亭亭 等. 基于降水集中度和集中期的浙江省降水时空变化特征分析. 资源科学, 2013, 35(5): 1001-1006.]
- [17] Feng Guangyang. Discussion on intra-annual differential coefficient. *Resources Science*, 1994, 16(5): 67-72. [冯光扬. 年内不均匀系数探讨. 资源科学, 1994, 16(5): 67-72.]
- [18] Shi Wanli, Yu Xuezhong, Liao Wengen et al. Spatial and temporal variability of daily precipitation concentration in the Lancang River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2013, 495: 197-207.
- [19] Liu Xinyou, Shi Zhengtao, Peng Haiying et al. Study on precipitation temporal distribution homogeneous degree based on the Gini coefficient. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2007, 28(2): 46-48. [刘新有, 史正涛, 彭海英 等. 基于“基尼系数”的降水时间分布均匀度变化研究. 气象研究与应用, 2007, 28(2): 46-48.]
- [20] Shi Wanli, Yang Qinke, Li Xiaofang et al. Study on temporal inequality of precipitation in the Loess Plateau based on Lorenz curve. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4): 172-177. [史婉丽, 杨勤科, 李小芳 等. 基于洛伦茨曲线的陕北黄土高原降雨分布不均匀性分析. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 172-177.]
- [21] Singh V P. The use of entropy in hydrology and water resources. *Hydrological Processes*, 1997, 11(6): 587-626.
- [22] Wang Dong. Principle of maximum entropy and its application in hydrology and water resources. *Advances in Water Science*, 2001, 12(3): 424-430. [王栋. 最大熵原理在水文水资源科学中的应用. 水科学进展, 2001, 12(3): 424-430.]
- [23] Mishra A K, Özger M, Singh V P. An entropy-based investigation into the variability of precipitation. *Journal of Hydrology*, 2009, 370(1): 139-154.
- [24] Deng Pengxin, Hu Qingfang. Heterogeneity study of rainfall in the Taihu Lake basin. *Hydro-Science and Engineering*, 2014(5): 34-40. [邓鹏鑫, 胡庆芳. 太湖流域降水不均匀性研究. 水利水运工程学报, 2014(5): 34-40.]
- [25] Xiong Jun. A comparative analysis of appraisal method of Gini coefficient. *Research on Financial and Economic Issues*, 2003, (1): 79-82. [熊俊. 基尼系数估算方法的比较研究. 财经问题研究, 2003, (1): 79-82.]
- [26] Wang Xiurong, Guo Jinxiu. *China Meteorological Geographical Regionalization (Consultation Draft)*. Beijing: National Climate Center, 2009. [王秀荣, 郭进修. 中国气象地理区划 (征求意见稿). 北京: 国家气候中心, 2009]
- [27] Ju Xiaosheng, Yang Xianwei, Chen Lijuan et al. Research on determination of station indexes and division of regional flood/ drought grades in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, 8(1): 26-33. [鞠笑生, 杨贤为, 陈丽娟

- 等. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究. 应用气象学报, 1997, 8(1): 26-33.]
- [28] Li Qingxiang. Study on threshold values with an extreme event of precipitation in Beijing. *Advances in Water Science*, 2010, 21(5): 660-665. [李庆祥. 北京地区强降水极端气候事件阈值. 水科学进展, 2010, 21(5): 660-665.]
- [29] Zhang Qiang, Zou Xukai, Xiao Fengjing. Classification of Meteorological Drought, GB/T 20481-2006. Beijing: Standards Press of China, 2006. [张强, 邹旭恺, 肖风劲. 气象干旱等级 GB/T20481-2006. 北京: 中国标准出版社, 2006.]
- [30] Huang Jiayou. Meteorological Statistical Analysis and Prediction Method. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 24-26. [黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法. 北京: 气象出版社, 2007: 24-26.]
- [31] Zhang Xuebin, Wang Jiafeng, Zwiers F W et al. The influence of large-scale climate variability on winter maximum daily precipitation over North America. *Journal of Climate*, 2010, 23(11): 2902-2915.
- [32] Dong Quan, Chen Xing, Chen Tiexi. Characteristics and changes of extreme precipitation in the Yellow - Huaihe and Yangtze - Huaihe rivers basins, China. *Journal of Climate*, 2011, 24(14): 3781-3795.
- [33] Li Jian, Yu Rucong, Sun Wei. Calculation and analysis of the thresholds of hourly extreme precipitation in mainland China. *Torrential Rain and Disasters*, 2013, 32(1): 11-16. [李建, 宇如聪, 孙澍. 中国大陆地区小时极端降水阈值的计算与分析. 暴雨灾害, 2013, 32(1): 11-16.]
- [34] Zhai Panmao, Pan Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(S1): 1-10. [翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. 地理学报, 2003, 58(S1): 1-10.]
- [35] Gong Daoyi, Han Hui. Extreme climate events in northern China over the last 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(2): 230-238. [龚道溢, 韩晖. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析. 地理学报, 2004, 59(2): 230-238.]
- [36] Zhang Xuebin, Hegerl G, Zwiers F W et al. Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. *Journal of Climate*, 2005, 18(11): 1641-1651.
- [37] Alexander L V, Zhang Xuebin, Peterson T C et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D5).

Comprehensive evaluation of precipitation heterogeneity in China

LIU Yonglin¹, YAN Junping¹, CEN Minyi^{1,2}

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2. Institute of Healthy Geography, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: Through comparisons of various methods, the method of precipitation concentration degree (PCD) was used to study precipitation heterogeneity. In addition to PCD, normal distribution functions, cumulative frequencies, and percentiles were used to establish a graded evaluation index of precipitation heterogeneity. A comprehensive evaluation of precipitation heterogeneity and its spatiotemporal variation in China in 1960-2013 were analyzed. Results indicated that: (1) seven categories of precipitation heterogeneity could be identified: high centralization, moderate centralization, mild centralization, normal, mild dispersion, moderate dispersion, and high dispersion; (2) during the study period, the precipitation in more parts of China tended to be normal or dispersed, which is beneficial to human activities.

Keywords: heterogeneity; precipitation concentration degree; evaluation index; comprehensive evaluation; China