

文章编号: 1674-8085(2017)04-0045-07

1957~2012 皖北粮食产区降水变化特征研究

*苏海民, 黄园园

(宿州学院环境与测绘工程学院, 安徽, 宿州 234000)

摘 要: 基于皖北粮食产区 1957~2012 年逐月降水资料, 运用趋势分析、不均匀系数、集中度(期)和小波功率谱等方法, 分析了皖北降水年内、年际等变异规律。结果表明: (1) 皖北地区 1957~2012 年降水量总体表现为缓慢增加趋势, 变化率为 8.979 mm/10a。降水年代际变化较大: 20 世纪 60 年代、90 年代和 21 世纪前十年为多雨期; 50 年代后期, 70~80 年代及 2011 和 2012 年降水偏少; (2) 降水不均匀系数变化范围为 0.509~1.576, 50 年代后期至 60 年代较不稳定, 而 2000 年以后, 降水不均匀性持续增加; 从空间分布来看, 降水均匀性由北向南渐少, 但存在年代际变化差异; (3) 降水集中度变化有微弱增加趋势, 多年平均降水集中度为 0.4777, 降水分配遵从“均匀→集中→均匀→集中”过程; 从空间上看, 与不均匀系数变化特征大致一致。56 年来皖北降水集中期最大降水主要集中在 7 月份。(4) 从周期震荡来看, 皖北降水周期以 3~8a 为主, 而降水集中期的降水周期以 2~4 年为主。皖北是我国重要粮食产区, 本研究可为该区农业灌溉规划与水资源管理提供重要依据。

关键词: 皖北; 趋势分析; 不均匀系数; 集中度(期); 小波分析

中图分类号: S161.6

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2017.04.008

VARIATION CHARACTERISTICS OF PRECIPITATION OF GRAIN-PRODUCING AREAS IN NORTHERN ANHUI PROVINCE DURING 1957~2012

*SU Hai-min, HUANG Yuan-yuan

(Environmental and Surveying Engineering College, Suzhou University, Suzhou, Anhui 234000, China)

Abstract: Based on the precipitation data during 1957~2012 in Northern Anhui Province, this paper illustrated and analyzed the characteristics of precipitation, including precipitation trend, non-uniformity coefficient, concentration degree (period) and wavelet analysis. The results showed that: (1) The annual precipitation showed a slow upward trend with 8.979 mm/10a. Inter-decadal variation of the precipitation was larger: the precipitation was abundant in 1960s, 1990s and the first decade of the 21st century but low in the last 50s, 1980s, 1990s, 2011 and 2012. (2) The non-uniformity coefficient varied from 0.509 to 1.576, the precipitation was unstable from the later period in 1950s to 1960s, the non-uniformity of precipitation grew continuously after 2000s. In addition, the spatial variation of non-uniformity indicated decreasing from the north to the south, but there was significant inter-decadal change in different regions. (3) The precipitation concentration degree displayed a slight increasing trend, averaging 0.4777, and the distribution of precipitation was in compliance with the "uniform to centralized to uniform to centralized", which had the same characteristics of variation with non-uniformity coefficient in space. The annual precipitation concentrated in July during the past 56 years. (4) The periodicity of precipitation was approximately 3-8 years and the PCD periodicity was 2-4 years. Finally, this study can provide some

收稿日期: 2017-01-09; 修改日期: 2017-04-07

基金项目: 安徽省高校优秀青年支持计划重点项目(gxyqzd2016347); 宿州学院学术技术骨干项目(2014XJGG06); 安徽省领军人才专项项目(2014lj01); 安徽省大学生创新项目(201510379115)

作者简介: *苏海民(1979-), 男, 山东鄄城人, 副教授, 硕士, 主要从事资源与环境研究(E-mail:hmsu2004@163.com); 黄园园(1995-), 女, 河南周口人, 宿州学院环境与测绘工程学院本科生(E-mail:1479739512@qq.com).

reference for agriculture irrigation planning and managing water resources so as to boost food production in Northern Anhui Province.

Key words: Northern Anhui Province; trend analysis; non-uniformity coefficient; concentration degree (period) of precipitation; wavelet analysis

全球变暖及其对水资源、生态、人类社会等的影响已受到人们的普遍关注。对水资源影响来讲,气候暖化导致水循环加剧。Lenderink G^[1]研究表明,气温每升高 1℃,大气湿度将增加 7%,而大气湿度变化又会使全球水分循环更为活跃和复杂^[2]。降水作为气候的重要因素,对人类活动具有重要影响,降水变化会直接影响区域水资源的变化,进而影响生态环境、旱涝灾害时空特征及农业生产等。因此,研究区域降水变化规律对于工农业生产和自然灾害防治具有重要意义。Zhai P 等^[3]对中国总降水量及日极端降水频度进行研究;XIA Jun 等^[4]对淮河流域 1960~2009 年极端降水时空变化趋势及统计特征进行分析;Qiang Zhang 等^[5-6]对中国降水结构做了系统性的研究;Kunkel 等^[7]研究了美国和加拿大降水长期变化趋势。

安徽省是全国重要粮食生产基地,也是商品粮输出大省,商品量常年在 1000 万 t 左右,销往省外 500 多万 t,是目前我国能够持续输出 500 万 t 以上商品粮的 5 个省份之一,在保障全国粮食安全中起着举足轻重的作用^[8-9]。皖北是安徽省的粮食主产区,被称为“中原粮仓”,2012 和 2013 年粮食总产量分别为 1856.88 万 t 和 1870.29 万 t,分别占全省粮食总产量的 56.46%和 57.03%。农业生产关系到全球粮食生产和安全供应,气候变化影响日益制约着农业生产的可持续发展,降水是粮食生产的决定因素^[10]。由于降水年际变化不均曾给皖北带来严重洪涝灾害,导致皖北地区粮食大面积减产,甚至绝收,2003 年成灾面积达 222.3 万 hm²,粮食产量下降至 883.59 万 t,占全省粮食产量的 39.89%。基于此,研究皖北粮食产区降水变化对该区农业灌溉规划、稳定粮食生产具有重要意义。

1 研究区概况

皖北地区(32°24'N~34°39'N, 114°52'E~118°10'E)主要包括亳州市、阜阳市、宿州市、淮

北市、蚌埠市和淮南市六地市,总面积 38847 km²,占全省总面积的 27.81%。区内地势平坦,以平原为主;气候在中国自然区划中属亚热带与温带的气候过渡地带,横跨淮河两岸,气候具有明显的过渡性和不稳定性,夏季温和多雨,冬季寒冷干燥,年均温为 12~14℃,降水集中在夏季,多年平均降水量为 600~800 mm 左右。

2 数据资料与研究方法

2.1 数据资料来源

选用研究区 5 个气象站 1957~2012 年历年逐月降水量建立年、月降水序列(图 1)。

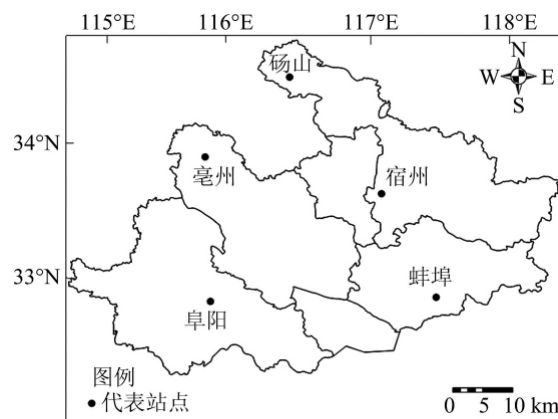


图 1 皖北地区气象站点分布

Fig.1 Spatial distribution of the meteorological stations in North Anhui Province

2.2 研究方法

2.2.1 线性趋势分析

根据降水时间序列数据利用线性回归分析估计降水变化趋势。通常采用一元线性方法表示, $Y = a + bt$,其中, Y 为降水量, t 为时间(本研究 t 从 1957~2012 年), b 表示线性趋势,通常用 $10 \times b$ 表示时间序列的线性倾向率,若 b 为正,表示趋势增加,反之,趋势下降。

2.2.2 降水不均匀系数

本研究采用降水不均匀系数^[11-13]反映皖北平原地区降水年内分布不均匀度:

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{12} \cdot \sum_{i=1}^{12} (R_{ti} - \bar{R})^2 / \bar{R}}, (t=1,2,3 \dots 56) \quad (1)$$

式中, C_v 为降水不均匀系数, 反映降水年内分配均匀度, 其值越小, 表示降水年内分配越均匀, 反之亦然。 R_{ti} 表示第 t 年 i 时段降水量, $\bar{R}$ 表示研究时段平均降水量。

2.2.3 降水集中度和集中期

集中度和集中期^[11,14-16]是利用逐月降水资料反映年内降水集中度和最大降水量出现时段的重要指数。它将月降水量当做矢量, 月降水量的大小和时间看做矢量的大小和方向。计算中将每月都看成 30 天, 不区分大小月, 把 1 月份方向看成 15° , 以后每月依次按 30° 等差递增表示 2~12 的方向, 从 1~12 月的方位角分别为 $15^\circ, 45^\circ, \dots, 345^\circ$ 。将每月降水量分成 x、y 两个方向的分量, 则 x、y 两个方向的矢量合成及总向量可表示为:

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} R_{xi} \sin \theta; R_y = \sum_{i=1}^{12} R_{yi} \cos \theta;$$

$$R_t = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (2)$$

则降水集中度和集中期:

$$PCD = R_t / \sum_{i=1}^{12} R_{ti}; PCP = \arctan\left(\frac{R_x}{R_y}\right) \quad (3)$$

PCD 用来表示研究时段降水的集中程度, 若研究期内降水分布均匀, 则 PCD 为 0; 若 PCD 值越接近于 1, 表示降水月集中在某个时段内。PCP 表示的是合成向量的方位角, 反映了降水量最大值集中的年内时段。

2.2.4 Morlet 小波分析

小波变换分析是对时频局部分析的方法, 包括连续小波分析 (CWT) 和离散小波分析 (DWT) 两种基本形式。本研究采用连续小波分析方法^[17-22]分析皖北平原区 1957-2012 年降水量和降水集中度的周期变化。其函数表达式为:

$$w(s, t) = s^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t') \Psi \left(\frac{t' - t}{s} \right) dt \quad (4)$$

式中, s 为尺度因子, t 为平移因子, * 表示共轭关系; $w(s, t)$ 为基本函数 $f(t)$ 的小波系数。

3 结果与分析

3.1 降水时间变化

皖北地区 1957~2012 年降水量具有明显年际变化, 表现为强烈的逐年波动和年代际变化特征 (图 2)。由图 2 可看出, 皖北降水总体表现为缓慢增长趋势, 线性倾向率为 $8.979 \text{ mm}/10\text{a}$, 多年平均降水量为 841.41 mm , 最大降水量出现在 2003 年, 为 1359.82 mm , 为多年平均降水量的 1.6 倍; 最小值出现在 1966 年, 只有 539.5 mm , 仅为多年平均降水量的 0.64 倍。60 年代初期降水量较多, 60 年代至 90 年代末, 呈平缓波动变化, 而进入 21 世纪以来, 降水渐增, 且波动幅度变大, 降水过程趋于不稳定变化。最近几年, 降水又有所减少。由表 1 可以看出, 20 世纪 60 年代、90 年代和 21 世纪的前十年降水偏多, 降水距平为正, 其中 60 年代距平百分率只有 0.68%, 降水量接近多年平均值。2000 年代降水距平为 8.74%, 为丰水期, 其中 1963 年、1991 年、2000 年、2003 年、2005 年和 2007 年降水距平百分率都在 30% 以上, 2003 年达 60% 以上。50 年代后期, 70~80 年代及 2011 和 2012 年降水偏少, 降水距平为负值, 26 年有 18 年降水距平为负, 1976 年、1978 年、1981 年和 1986 年降水距平百分率在 -23% 以上, 尤其是 50 年代后期和 2011 年和 2012 年, 降水距平百分率分别达到 -5.12% 和 -18.40%。

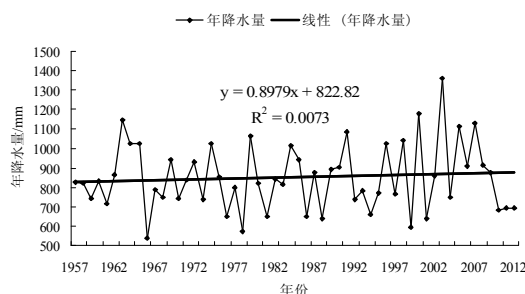


图 2 1957~2012 年皖北地区降水量年际变化

Fig. 2 Inter-annual variation of precipitation in North Anhui Province during 1957~2012

表 1 1957~2012 年皖北地区降水量距平年代际变化

Table 1 Interdecadal variation of Annual precipitation in North Anhui Province during 1957~2012

年代	1957~1960	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000	2001~2010	2011~2012
平均降水量	805.01	854.21	828.72	821.31	863.82	922.58	692.31
降水距平	-43.41	5.80	-19.69	-27.10	15.41	74.17	-156.10
距平百分率	-5.12%	0.68%	-2.32%	-3.19%	1.82%	8.74%	-18.40%

从降水年内分配来看(图 3),皖北区域降水发生在 5~9 月,降水量占年总降水量的 71.82%,最大降水量出现在 7 月,降水量为 215.74 mm,占 25.43%,其次是 6 月和 8 月;最小降水量出现在 12 月,降水量为 17.29 mm,占 2.04%。降水分布趋势 1~6 月呈增长趋势,7 月以后呈下降趋势,降水季节性变化明显。

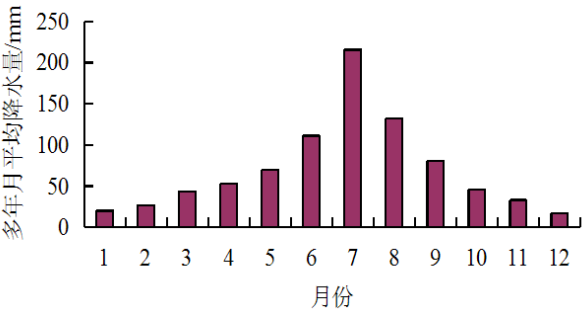


图 3 1957~2012 年皖北地区多年月平均降水量
Fig.3 Average monthly precipitation in North Anhui Province during 1957~2012

3.2 降水年内分配均匀性分析

皖北地区降水年内分配不均匀系数计算结果如图 4 与表 2 所示。从图 4 可以看出,皖北地区降水年内分配不均匀系数具有明显年代际变化,56 年来变化范围为 0.509~1.576,最小值出现在 1959 年,

最大值出现在 1965 年,降水值最大的 2003 年只有 0.860,基本接近平均数。1950 年代后期至 1960 年代较不稳定,1970~1990 年代降水分布相对均匀,2000 年以后这种不均匀性再次增长。从不同区域分析,同一年代际基本符合从北向南逐渐减小,多年平均值砀山县最大为 0.864,阜阳市最小为 0.691,说明北部地区降水较为集中,而南部地区降水年内分配比较均匀,这也与亚热带和暖温带气候特征相符合。但不同年代际变化并不一致,比如,砀山最大值出现在 50 年代后期,而其他城市较大值出现 2001 年以后,降水分配较为集中。

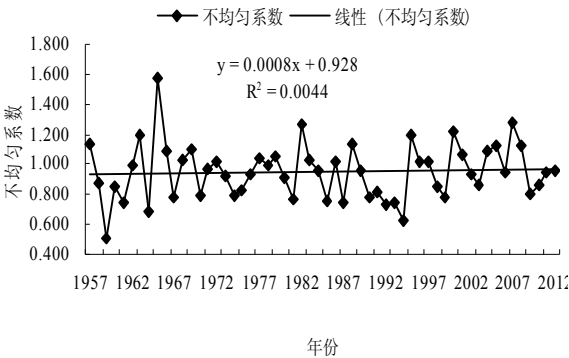


图 4 1957~2012 年皖北地区降水年内分配不均匀系数
Fig.4 Non-uniformity coefficient of precipitation in North Anhui Province during 1957~2012

表 2 1957~2012 年皖北不同地区降水年代际分配均匀系数

Table 2 Non-uniformity Coefficient of Precipitation in Northern cities in North Anhui Province during 1957~2012

	砀山	亳州	宿州	蚌埠	阜阳
50 年代后期	1.173	0.826	0.775	0.506	0.582
60 年代	0.875	0.912	0.995	0.802	0.756
70 年代	0.883	0.813	0.838	0.700	0.667
80 年代	0.826	0.886	0.783	0.763	0.696
90 年代	0.728	0.805	0.778	0.651	0.725
00 年代	0.983	0.941	0.991	0.894	0.889
2011~2012 年	1.054	0.943	1.176	0.950	0.599
多年平均	0.864	0.851	0.861	0.714	0.691

3.3 降水集中度（PCD）和集中期（PCP）分析

从图 5 和表 3 可以看出，皖北地区降水集中度变化有微弱增长趋势，多年平均降水集中度为 0.4777，但年际和年代际变化明显。20 世纪 50 年代后期降水集中度较低，降水年内分配较为均匀，60 年代和 2000 年以后降水集中度较大，降水较为集中，70~90 年代降水集中度基本在多年平均数附近波动，研究时段内降水经历了“均匀→集中→均匀→集中”的动态变化过程。56 年中有 30 年高于多年平均数，26 年低于多年平均数，虽然 2003 年降水量最大，但降水分布并不集中，最大值出现在 1965 年为 0.681，最小值出现在 1959 年为 0.279，二者相差 2.44 倍，说明皖北地区降水极不稳定，对于区域粮食生产的影响较大。1982~1986 年连续 5 年和 2002~2009 年连续 8 年降水集中度大于多年平均值，说明出现了多年连续的降水天气。从各城市

来看，降水集中度变化趋势基本与不均匀系数变化相一致，同一年代际从北向南逐渐减小，说明降水分配逐渐均匀化，同一地区不同年代际降水有集中的趋势，如宿州市从 50 年代后期的 0.461 增加的 2012 年的 0.554，蚌埠从 0.306 增加到 0.458。

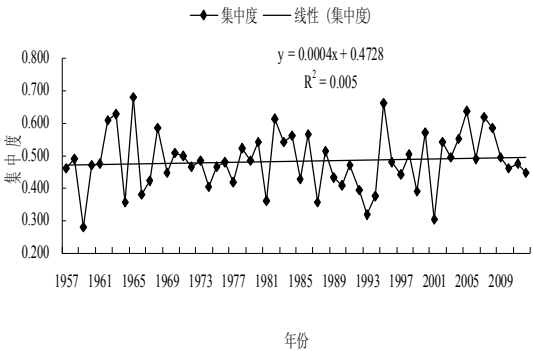


图 5 1957~2012 年皖北地区降水集中度年际变化
Fig.5 Inter-annual variation of precipitation concentration degree in North Anhui Province during 1957~2012

表 3 1957~2012 年皖北降水集中度

Table 3 Precipitation concentration degree in Northern cities in North Anhui Province during 1957~2012

	砀山	亳州	宿州	蚌埠	阜阳	皖北
50 年代后期	0.569	0.445	0.461	0.306	0.353	0.423
60 年代	0.537	0.53	0.533	0.457	0.470	0.503
70 年代	0.517	0.490	0.490	0.452	0.411	0.469
80 年代	0.522	0.526	0.463	0.442	0.416	0.470
90 年代	0.474	0.504	0.476	0.393	0.438	0.452
00 年代	0.581	0.542	0.542	0.484	0.493	0.524
2011~2012 年代	0.489	0.449	0.554	0.458	0.343	0.425
多年平均	0.529	0.510	0.498	0.435	0.435	0.477

从图 6 可以看到，56 年来皖北降水集中期（PCP）波动于 143.95~209.84 之间，且大部分在 195 附近波动，根据方位角转换，皖北最大降水主要集中在 7 月份，不同年份出现最大降水的时间早晚有差异。比如，1981 年 PCP 值为 209.84，说明降水最大值出现在 7 月底前后；2002 年 PCP 值为 175.38，降水最大集中期提前到 6 月 25 日前后。56 年中有 46 年降水集中在 7 月，5 年集中在 6 月，4 年集中在 8 月，最大降水最早的一次出现在 1960 年的 5 月下旬。7 月前后皖北地区农作物处于生长前期，降水过度集中将导致田间渍水作物发育不良，降水提前出现将影响小麦产量。

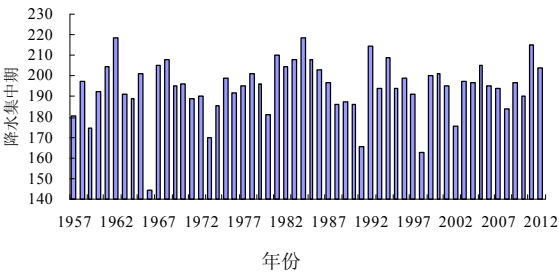


图 6 1957~2012 年皖北地区降水集中期年际变化
Fig.6 Inter-decadal variation of precipitation concentration period in North Anhui Province during 1957~2012

3.4 小波功率谱分析

图 7（左）表明，皖北地区降水量变化较为频繁，有两个主要周期成分：2~4 年周期；6~7 年周期。在 70 年代末期，有 2~3 年的显著周期，80 年

代末与 90 年代初以 5~6 年周期为主, 而 90 年代末与 21 世纪初以 2~3 年周期为显著周期。图 7 (右) 表明, 降水集中期小波功率谱周期以 2~4 年为主, 尤其是在 1960~1970 年代和 2000 年附近, 通过了

95%置信水平的红噪声检验, 具有显著的频域周期特征, 1990 年代中期又存在一个 4 的短暂周期, 在通过红噪声检验的其他频域能量密度相对较弱。

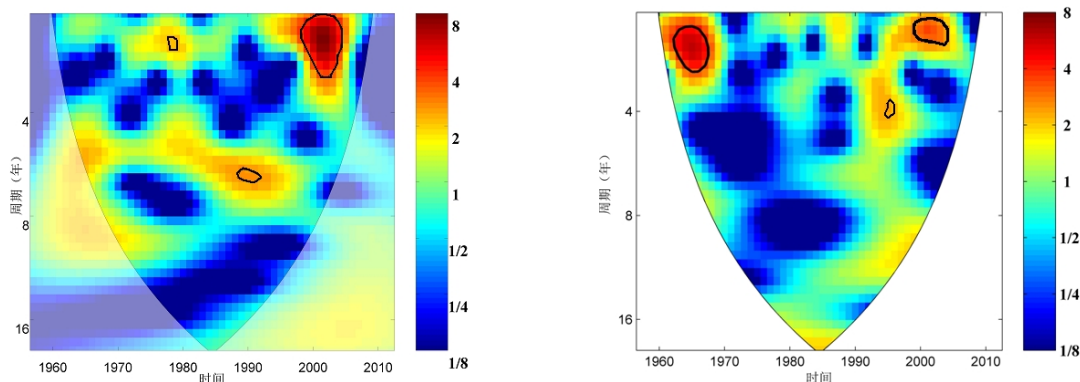


图 7 1957~2012 年皖北地区年降水量 (左) 和降水集中度 (右) 连续小波变换

Fig. 7 Continuous wavelet power of precipitation (left) and PCP (right) in North Anhui Province during 1957~2012

4 结论

通过运用趋势分析、不均匀系数、集中度和小波功率谱等方法利用皖北 1957~2012 年降水过程进行分析, 可以得到以下结论:

(1) 皖北地区 1957~2012 年降水量总体上表现为缓慢的增长趋势, 线性倾向率为 8.979 mm/10a。年际变化表现出高低交错分布, 年代际变化差异较大, 20 世纪 60 年代、90 年代和 21 世纪的前十年为多雨期; 50 年代后期、70~80 年代及 2011 和 2012 年降水较少。

(2) 皖北地区降水年内分配不均匀系数具有明显的年际变化, 56 年来变化范围为 0.509-1.576。50 年代后期至 60 年代较不稳定, 2000 年以后这种不均匀性再次不断增长。同一年代际基本符合从北向南逐渐减小, 但不同年代际变化并不一致。降水集中度变化有微弱的增长趋势, 年际和年代际变化较为明显, 研究时段内降水经历了从均匀→集中→均匀→集中的变化过程。从各城市来看, 同一年代际从北向南逐渐减小, 同一地区不同年代际降水有集中的趋势。56 年降水集中期波动于 143.95~209.84°之间, 且大部分在 195°附近波动, 根据方位角转换, 皖北最大降水主要集中在 7 月份。

(3) 皖北地区降水量小波功率谱周期主要以 2~4 年周期; 6~7 年周期为主; 降水集中期小波功

率谱周期以 2~4 年为主。

(4) 根据上述分析, 皖北地区在进入 2010 年后年降水出现减少趋势, 降水的不均匀程度开始增加, 预测今后可能还有继续持续。

皖北地区是安徽乃至全国的重要粮食产区, 降水对稳定其粮食产量具有重要作用。为确保本区粮食高产、稳产, 建议政府、科研单位加强皖北地区气候变化对粮食生产的影响研究, 把应对气候变化纳入到政府社会经济发展规划中, 进一步加大应对气候变化先进技术的应用和推广, 完善防灾、减灾体系建设, 提高农业生产抵御气候变化的能力。

参考文献:

- [1] Lenderink G, van Meijgaard E. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes[J]. Nature Geoscience, 2008(1): 511-514.
- [2] Trenberth K E, Dai A, Rasmussen R M, et al. The changing character of precipitation[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2003,84:1205-1217.
- [3] Zhai P, Zhang X, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. Journal of Climate, 2005, 18(7): 1096-1108.
- [4] XIA J, SHE D X, ZHANG Y Y, et al. Spatio-temporal trend and statistical distribution of extreme precipitation

- events in Huaihe River Basin during 1960~2009[J]. Journal of Geographical Science, 2012,22(2):195-208.
- [5] Zhang Q, Singh V P, Li J, et al. Analysis of the periods of maximum consecutive wet days in China[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116:23.
- [6] Zhang Q, Singh V P, Peng J, et al. Spatial-temporal changes of precipitation structure across the Pearl River basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 440: 113-122.
- [7] Kunkel K E, Andsager K, Eastering D R. Long-term trends in extreme precipitation events over the conterminous United States and Canada[J]. American Meteorological Society, 1999, 12: 2515-2527.
- [8] 刘定惠,朱超洪. 安徽省粮食生产变化特征及其影响因素分析[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(5):30-32.
- [9] 苏海民,何爱霞,董传斌,等.宿州市粮食生产灰色关联分析及预测[J]. 菏泽学院学报, 2011, 33(5): 9-14.
- [10] 潘根兴,高民,胡国华,等.气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9):1698-1706.
- [11] 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[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(4): 426-431.
- [12] 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[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4):622-630.
- [13] 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[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 990-1000.
- [14] 朱业玉,顾万龙,王记芳,等. 河南省汛期极端降水事件分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(5):495-499.
- [15] 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[J]. 自然资源学报, 2013, 28(1):137-147.
- [16] 杨远东. 河川径流年内分配的计算方法[J]. 地理学报, 1984, 39(2): 218-227.
- [17] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series [J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11: 561-566.
- [18] 戴新刚,任宜勇,陈洪武. 近 50 年新疆温度降水配置演变及其尺度特征[J]. 气象学报, 2004, 65(6): 1003-1010.
- [19] 尹义星,许有鹏,陈莹. 1950~2003 年太湖流域洪旱灾害变化与东亚夏季风的关系[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 381-388.
- [20] 董林垚,陈建,付丛生. 西江流域径流与气象要素多时间尺度关联性研究[J]. 地理科学, 2013, 32(2):209-215.
- [21] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79:61-78.
- [22] 郭琳,宫辉力,朱锋. 基于小波分析的地下水水位与降水的周期性特征研究[J]. 地理与地理信息科学, 2014, 30(2):35-38.

(上接第 44 页)

- [11] 柴世伟,温琰茂,张亚雷,等. 地积累指数法在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2006, 34(12):1657-1661.
- [12] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17):310-315.
- [13] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [14] 徐争启,倪师军,庾先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(02):112-115.
- [15] 张文彤. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2004.
- [16] 谢宏芳,方凤满,王海东. 城市街道灰尘重金属污染研究进展[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(5):78-81.
- [17] 曾咏梅,毛昆明,李永梅. 土壤中镉污染的危害及其防治对策[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(3):360-365.
- [18] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, et al. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 261: 387-397.