

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.01.014

淮河流域上游不同尺度降雨 集中度时空变化分析

肖紫薇¹, 石朋^{1,2}, 胡健伟³,
瞿思敏¹, 王建金¹, 戴韵秋¹, 陈颖冰¹, 陈星宇¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 水利部水文局, 北京 100053)

摘要: 在评估洪水风险和计算水资源利用率的时候, 了解不同时间内的降雨变化规律以及相关关系是很必要的。本文对淮河上游降雨时空变化规律进行分析研究, 主要通过降水集中指标, 采用月降水量和日降水量系列分别探讨研究区域内降水在不同时间尺度上的变化规律, 随后利用秩次相关检验法分析这种变化趋势的显著性水平, 同时采用线性相关法来分析降雨量占比与 *CI* 值的关系。结果表明, 研究区内的降水无论是在季节性变化还是日尺度的变化上, 都表现出明显的趋势性特征, 且在空间上表现出明显的空间不均衡性, 这在一定程度上增加了研究区的防洪风险; *CI* 值与占总降雨天数的 15% 天中所下的降雨量占比相关性最高。

关键词: 大坡岭流域; 降雨集中度; 趋势分析; 相关性分析

中图分类号: TV121.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2017)01-0074-06

Spatial distribution and temporal trends in daily and monthly precipitation concentration indices in the upper reaches of the Huai River

XIAO Ziwei¹, SHI Peng^{1,2}, HU Jianwei³,
QU Simin¹, WANG Jianjin¹, DAI Yunqiu¹, CHEN Yingbing¹, CHEN Xingyu¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Bureau of Hydrology, MWR, Beijing 100053, China)

Abstract: Understanding precipitation variations of various timescales and their correlations is important for the assessment of flood risk and utilization of water resources. In this study, the spatial and temporal patterns of precipitation concentration in the upper reaches of the Huai River of China are investigated using two indices: the precipitation concentration index (*PCI*) and the concentration index (*CI*) for measuring seasonality and daily heterogeneity using monthly and daily precipitation series, respectively. Then using the rank correlation test to analyze this trend level of significance. The *CI* and percentage of precipitation contributed by the rainiest days is analyzed through the linear correlation analysis. The results show that rainfall in the study area, whether seasonal changes or changes in the date scale, shows a clear trend characteristic and in space also shows a significant spatial imbalance, which adds a certain study of flood risk areas. The daily heterogeneity of the rainfall in a year is highly correlated with the heavy rainfall amount of the 15% rainiest days.

Key words: Dapoling basin; precipitation concentration; trends analysis; correlation analysis

降雨强度、数量以及模式的改变会造成干旱、洪水中大部分降水集中在短时期内, 很大程度地影响着水等极端事件的发生。高的集中度往往意味着一年水资源分布。同时, 降雨数量以及强度的增加会带

收稿日期: 2016-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479062, 40901015); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015B14314)

作者简介: 肖紫薇, 女, 硕士生, 研究方向为水文物理规律模拟及水文预报。E-mail: ivy920714@163.com

通讯作者: 石朋, 男, 教授, 博士, 研究方向为流域水文模拟。E-mail: ship@hhu.edu.cn

来水土流失以及边坡失稳现象的加剧。水土流失又会影响植物以及农作物的生长条件,改变土地利用管理政策^[1]。边坡失稳现象的加剧会大大影响着社会经济以及生活稳定性的提高。研究强降雨事件有助于预估径流量的大小以及土壤损失情况^[2]。降雨时间分布情况也会改变河流状态、地下水容量、水资源利用以及水力发电产业^[3-5]。近年来,降雨集中度及其演变规律成为中国水文学界普遍关注的热点问题,黄晓亚等人依据乌江流域中上游地区 1951—2008 年的逐日降雨资料,分析 26 个气象站点年降雨量、连续 3 日、5 日、7 日无雨日次数、最大日降雨统计特征以及日降雨集中度指数 CI ,并利用非参数 Mann-Kendall 检验分析日降雨集中程度以及降雨统计特征变化趋势^[6]。邢万秋等人基于淮河流域内 30 个常规气象站点 1957—2008 年的逐日降水资料,计算了淮河流域内各站点长期降雨集中度 (LCD) 和逐年降雨集中度 (ACI),并采用 Mann-Kendall 趋势检验法和 Sen's 坡度检验法检测了 ACI 时间上的变化趋势^[7]。众多的研究表明,基于流域降雨集中度的时空变化分析,对流域防洪规划与治理具有重大意义。

本文的研究内容如下:(1) 基于日降雨数据研究淮河流域上游大坡岭流域的降雨集中指数 (PCI) 和集中度指数 (CI) 的时空分布模式,并采用 Mann-Kendall 检验法分析集中度变化趋势;(2) 探究一年中日降雨分布情况与不同降雨天数所得到的降雨量占比之间的关系,以期为包括水土流失、干旱、边坡失稳等在内的环境问题的治理以及水资源管理提供一定的科学依据。

1 研究区概况及资料情况

1.1 流域概况

淮河位于 $31^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 和 $112^{\circ}\text{E}\sim 121^{\circ}\text{E}$ 之间,起源于河南省的桐柏山脉,流入长江,涵盖四个省份。本文研究区域为大坡岭水文站以上集水区域,大坡岭站位于淮河上游,流域面积 $1\,640\text{ km}^2$,干流长度 73 km (见图 1),流域内有桐柏、黄冈、胡家湾、大坡岭、回龙寺、固庙、二道河、新集、吴城、潘庄、固县和毛集 13 个雨量站。流域多年平均降雨量为 918 mm (由 1964—2005 年数据计算得到),多年平均径流深为 375 mm ,大坡岭水文站历年最高水位 104.86 m ,最大流量 $4\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 。流域位于我国南北气候过渡区,区域内气候温和,年平均气温介于 11°C 到 16°C 之间。气温变化由北向南、由沿海向内陆递增。大坡岭流域地处大别山山区,流域内以山

区和丘陵为主,植被较好。流域主要被山脉覆盖,河流流经多支流和坡度较大的山岭区,在旱季容易间歇性断流,水利工程不多,水稻为流域上主要作物。

1.2 数据情况

选取大坡岭流域 13 个雨量站 1964—2012 年的逐日降雨量资料进行研究。流域图以及站点分布图如图 1 所示。

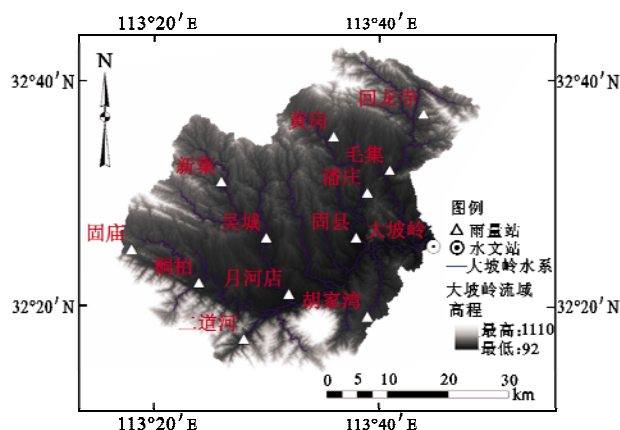


图 1 大坡岭流域图以及站点分布图

Fig. 1 Dapoling basin and the locations of stations

2 研究方法

2.1 月降雨集中度指数 (PCI) 的计算

最开始由 Oliver 等人提出使用降水集中指数系列和它的变异系数来研究月降雨的不均匀性^[8],后来又由 De Luis 等人进行修改^[9]。改进后的指数表示为:

$$PCI = 100 \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{12} p_i\right)^2} \quad (1)$$

式中, p_i 是第 i 个月的降雨量。

年 PCI 值低于 10 则表示在这一年里月降雨量分布均匀,而值为 11 到 20 则表示降雨具有季节性分布特征,值高于 20 则表示月降雨量分布不均匀,有大幅度的波动^[8]。 PCI 值有两种计算方式:一是通过月平均降雨量计算;二是计算每一年的 PCI 值后求多年平均值(本文采用第二种计算方式)。

2.2 日降雨集中度指数 (CI) 的计算

由 Martin-vide 所提出的集中度指数 (CI) 被用来确定日降雨不同量级之间的相关影响^[10]。在给定的时间和区域,日降雨量越大的降水天数就越少。在前人的基础上,得到以下 CI 值计算步骤。

- 1) 降雨等级范围的分类(文章中的 1 mm 间隔表示一级);
- 2) 记录落入每个等级间隔中的降雨天数;
- 3) 计算各组降雨量以及降雨天数;
- 4) 求累积降雨量以及累积降雨天数,再分别除

以总值,得到累积降雨量百分比 $\text{Sum}(p_i)$ 和累积降雨天数百分比 $\text{Sum}(N_i)$;

5) 点绘累积降雨量百分比 $\text{Sum}(p_i)$ 和累积降雨天数百分比 $\text{Sum}(N_i)$, 满足以下公式^[8]:

$$\text{Sum}(p_i) = a \text{Sum}(N_i) \exp(b \text{Sum}(N_i)) \quad (2)$$

式中 p_i 和 N_i 分别为第 i 组的降雨量和降雨天数, a 和 b 为回归系数, 由最小二乘法算得, 即:

$$\ln(a) = \left[\frac{\sum \text{Sum}(N_i)^2 \sum \ln(\text{Sum}(p_i)) + \sum \text{Sum}(N_i) \sum (\text{Sum}(N_i) \ln(\text{Sum}(N_i))) - \sum \text{Sum}(N_i)^2 \sum \ln(\text{Sum}(N_i)) - \sum \text{Sum}(N_i) \sum (\text{Sum}(N_i) \ln(\text{Sum}(p_i)))}{[N \sum \text{Sum}(N_i)^2 - (\sum \text{Sum}(N_i))^2]} \right]$$

$$b = \left[\frac{N \sum \text{Sum}(N_i) \ln(\text{Sum}(p_i)) + \sum \text{Sum}(N_i) \sum \ln(\text{Sum}(N_i)) - N \sum \text{Sum}(N_i) \ln(\text{Sum}(N_i)) - \sum \text{Sum}(N_i) \ln(\text{Sum}(p_i))}{[N \sum \text{Sum}(N_i)^2 - (\sum \text{Sum}(N_i))^2]} \right] \quad (3)$$

6) 通过积分求得曲线下面积 A :

$$A = \left[\frac{a}{b} E^{b \text{Sum}(N_i)} (\text{Sum}(N_i) - \frac{1}{b}) \right]_0^{100} \quad (4)$$

则:

$$CI = \frac{5000 - A}{5000} \quad (5)$$

2.3 Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall 检验法是世界气象组织推荐并被广泛用于实际研究的非参数检验方法, 此方法由 Mann 和 Kendall 提出^[11-13], 近年 Mann-Kendall 方法被众多学者用于分析径流、气温、降水 and 水质等要素时间序列的变化趋势^[14]。

3 结果与分析

3.1 PCI 的时空变化模式

计算研究流域 13 个站点 1964—2012 年的年平均 PCI 值并列于表 1, 表中 R^2 为确定性系数, $P_{15\%}$ 为占总降雨天数的 15% 天中所下的降雨量占比。由表 1 可知, PCI 值变化范围为 15.2 (胡家湾站) 到 24.3 (潘庄站)。由 Oliver 提出的分类标准可知, 降雨存在明显的季节性变化特征, 其中二道河、吴城、潘庄以及毛集四个站 PCI 值大于 20, 月降雨分布非常不均匀, 主要位于研究流域的中部以及南部。

表 1 1964—2012 年大坡岭流域内 13 个站点参数表

Tab. 1 Values of coefficients during 1964—2012 in the Dapoling basin

参数	固庙	桐柏	二道河	新集	吴城	月河店	黄冈	潘庄	固县	胡家湾	回龙寺	毛集	大坡岭
a	0.019	0.020	0.028	0.026	0.035	0.027	0.022	0.018	0.018	0.034	0.040	0.029	0.017
b	0.039	0.039	0.037	0.036	0.035	0.035	0.038	0.041	0.040	0.033	0.032	0.035	0.040
R^2	0.979	0.981	0.984	0.979	0.984	0.982	0.979	0.987	0.983	0.984	0.982	0.986	0.979
CI	0.673	0.668	0.636	0.654	0.622	0.644	0.664	0.654	0.665	0.624	0.613	0.632	0.677
Z_{CI}	-0.433	0.276	-3.4	-0.56	-0.773	1.875	0.133	1.822	1.804	0.16	-0.489	0.418	-0.969
PCI	15.6	15.7	23.6	16.0	24.2	15.5	16.7	24.3	17.9	15.2	15.8	22.5	16.1
Z_{PCI}	1.04	1.129	2.018	0.347	2.711	1.182	0.56	2.266	-2.96	0.462	1.36	5.519	1.307
$P_{15\%}$	63.22	62.28	60.26	61.37	58.47	60.22	62.60	60.36	62.84	58.04	57.46	59.07	63.28

由 Mann-Kendall 检验法计算得到研究区内 13 个站点的 PCI 值变化趋势空间分布如图 2 所示。除了固县站以外的 12 个雨量站 PCI 值均呈增加趋势, 其中二道河、吴城、潘庄以及毛集四个站的增加趋势均达到 95% 显著性水平, 毛集和吴城站更是达

到了 99% 显著性水平的增加。联系表 1 可知, 这四个站月降雨分布极不均匀, 同时, 这种不均匀性还随着时间呈增加趋势。结果表明, 在这四个站发生洪水和干旱等极端事件的可能性更大, 应该加强该地区的防洪措施以及制定相应的水资源利用政策。

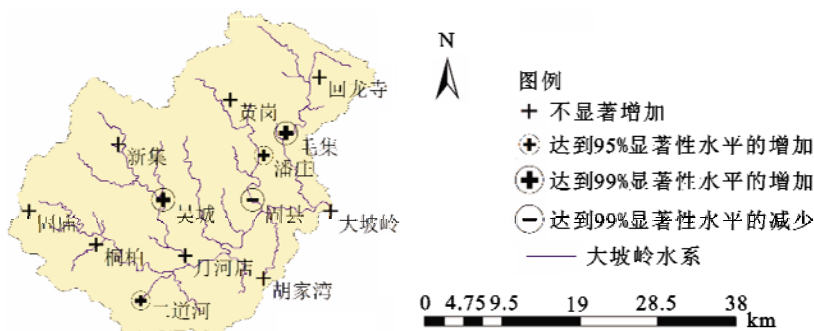


图 2 PCI 值变化趋势空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of trend of concentration index (PCI)

3.2 CI 的时空变化模式

通过公式(2)~(5)计算回归系数 a 和 b 以及 CI 值并列于表 1。选择固庙站 1964 年的 CI 值为例,模拟值与观测值的拟合情况如图 3 所示。

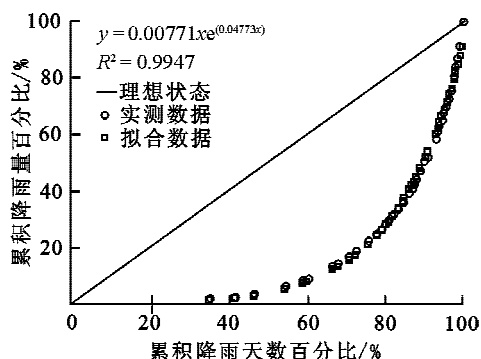


图 3 采用洛伦兹曲线模拟累计降雨量百分比和累积降雨天数百分比分布

Fig. 3 Distribution of Lorenz curve by simulating the relation of percentage of days of precipitation and percentage precipitation

从图 3 可以看出确定性系数 R^2 高达 0.994 7, 拟合情况相当不错,故所求得的 CI 值精度可满足要求。从表 1 可知, CI 值变化范围为 0.613(回龙

寺)到 0.677(大坡岭)。 CI 值为 0 表示降雨分布完全均匀, CI 值为 1 表示所有降雨集中到一个时间点降落,故 CI 值越大,降雨分布越不均匀。

从表 1 可以清楚地看到,整个研究流域上 CI 值普遍偏高,其中回龙寺、吴城和胡家湾站相对偏低,分别位于流域的东北部、中部以及东南部。由 Mann-Kendall 检验法计算得到研究区内 13 个站点的 CI 值变化趋势统计量 Z_{CI} 列于表 1,变化趋势空间分布如图 4 所示。呈增加趋势的站点有 7 个,呈减少趋势的站点有 6 个。其中潘庄、固县和月河店站达到 90% 显著性水平的增加,二道河站达到 99% 显著性水平的减少。从图 4 可以看出,三个显著增加的站点主要位于流域中部,结合表 1 可知,这三个站点日降雨分布较不均匀,且这种不均匀性呈明显增加趋势;位于流域东部的大坡岭站 CI 值增加趋势不明显,但本身 CI 值高。高的集中度往往意味着一年中大部分的雨集中在短时间内降落,发生洪水的可能性大大增加,水土流失情况可能会加重,故应加强这四个站点的工程措施,做好相应的防洪准备。

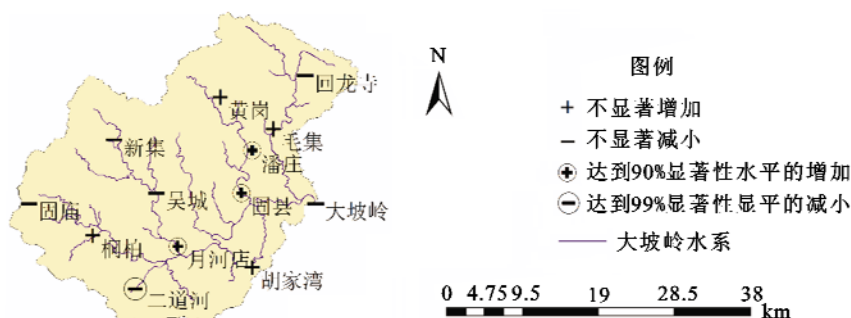


图 4 CI 值变化趋势空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution map of trend of concentration index (CI)

3.3 日降雨分布情况与不同降雨天数所得到的降雨量占比之间的关系

从图 3 可以看出,通过一个特定的降雨天数占比可以确定相应的降雨量占比。分别将 13 个站的降雨量从大到小排列,依次取降雨天数的 5%、10%、15%、20%、25% 和 30% 天,计算相应天数里的降雨量占总降雨量的百分比,然后通过线性相关法分析降雨量占比与 CI 值的关系,关系如图 5 所示。

从图 5 可以看出,这 6 种情况下,降雨量占比与 CI 值均呈正相关关系,确定性系数变化范围从 0.79(占总降雨天数的 30%)到 0.96(占总降雨天数

的 15%),故可知 CI 值与占总降雨天数的 15% 天中所下的降雨量占比相关性最高,这与石朋等人在淮河流域子流域沙颍河流域所得到的结论吻合^[15]。但是也有很多学者采用占总降雨天数的 25% 天的降雨量占比来判断 CI 值^[14-15]。由此可知,地理位置差异以及气候差异会影响降雨量占比与 CI 值之间的相关性程度。

表 1 中列出了该天数的降雨量占比情况,其最大值(63.28)和最小值(57.46)分别对应 CI 的最大值(0.677)和最小值(0.613)。一年中日降雨的不均匀性主要由强降雨事件控制,换言之,不同降雨天数所得到的降雨量占比造成了日降雨的不均匀。

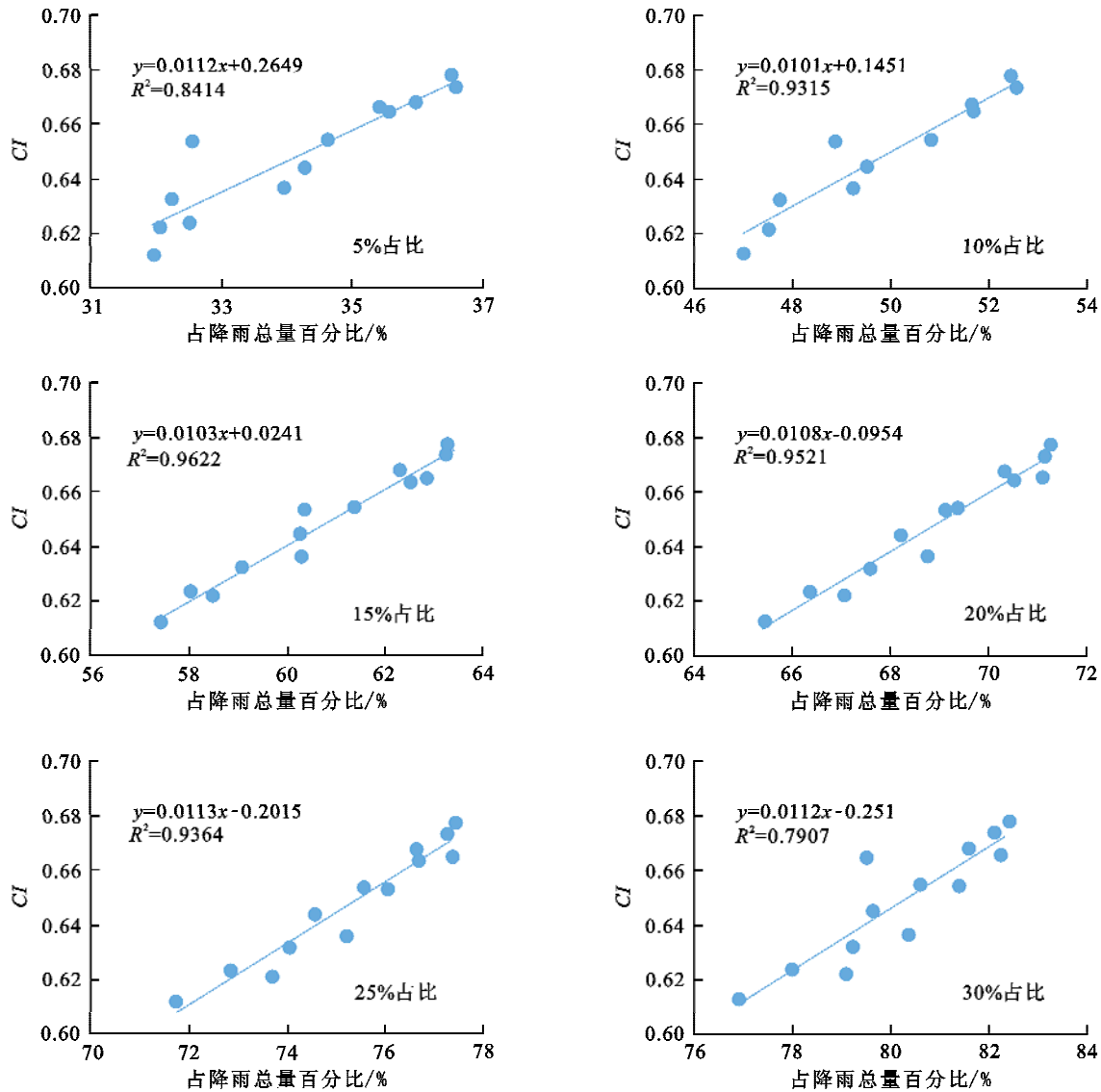


图 5 不同降雨量占比与 CI 值的关系

Fig. 5 Relationship between the CI and the different proportions of the annual rainfall

4 结论

本文主要研究了淮河上游大坡岭流域的降雨分布情况,采用降雨集中指数(PCI)来判断降雨的季节性特征,采用集中度指数(CI)来评估最大日降雨在总降雨量中的占比。得到以下结论。

1) PCI 值结果显示研究流域降雨存在明显的季节性变化特征,结合 Mann-Kendall 趋势检验得出位于研究流域的中部以及南部的二道河、吴城、潘庄以及毛集四个站月降雨分布极不均匀,且这种不均匀性还随着时间呈增加趋势。在这四个站发生洪水和干旱等极端事件的可能性更大,应该加强该地区的防洪措施以及制定相应的水资源利用政策。

2) CI 值总体偏高(0.613~0.677),其中位于流域中部的潘庄、固县、月河店三个站点日降雨分布

较不均匀,且这种不均匀性呈明显增加趋势;位于流域东部的大坡岭站 CI 值增加趋势不明显,但本身 CI 值高,发生洪水和水土流失的可能性较大,故应加强这四个站点的工程措施,做好相应的防洪准备。

3) 降雨量占比与 CI 值均呈正相关关系,其中 CI 值与占总降雨天数的 15% 天中所下的降雨量占比相关性最高,说明一年中日降雨的不均匀性主要由强降雨事件控制。

4) 月降雨集中度(PCI)与日降雨集中度(CI)之间的关系、 PCI 与年降水量之间的关系以及 CI 与年降水量之间的关系都有待进一步地分析研究。

参考文献:

- [1] SCHOLZ G, QUINTON J N, STRAUSS P. Soil erosion from sugar beet in Central Europe in response to climate change induced seasonal precipitation variations[J]. Ca-

- tena, 2008, 72(1):91-105.
- [2] KLIK A, TRUMAN C C. Rainfall intensity and soil texture effects on water, sediment, and pesticide losses[J]. *Measurements & Modelling in Environmental Pollution*, 1997, 13(1):441-450.
- [3] AGUADO E, CAYAN D, RIDDLE L, et al. Climatic fluctuations and the timing of west coast streamflow[J]. *Journal of Climate*, 1992, 5, 12(12):1468-1483.
- [4] PAREDES D, TRIGO R M, GARCIAHERRERA R, et al. Understanding precipitation changes in Iberia in early spring: weather typing and storm-tracking approaches [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7(1):101-113.
- [5] LÓPEZ-MORENO J I, VICENTE-SERRANO S M, GIMENO L, et al. Stability of the seasonal distribution of precipitation in the Mediterranean region: Observations since 1950 and projections for the 21st century[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(10):92-103.
- [6] 黄晓亚, 陈喜, 张志才, 等. 西南喀斯特地区降雨集中度及其变化特征分析-以乌江流域中上游为例[J]. *地球与环境*, 2013, 41(3):203-208.
HUANG Xiaoya, CHEN Xi, ZHANG Zhicai, et al. Analysis of daily rainfall concentration and its change characteristics in southwestern karst Regions-A case study of Wujiang catchment[J]. *Earth and Environment*, 2013, 41(3):203-208.
- [7] 邢万秋, 王卫光, 吴杨青, 等. 淮河流域降雨集中度的时空演变规律分析[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(5):1-5.
XING Wanqiu, WANG Weiguang, WU Yangqing, et al. Change properties of precipitation concentration in Huaihe River basin[J]. *Water Resources and Power*, 2011, 29(5):1-5.
- [8] OLIVER J E. Monthly precipitation distribution, a comparative index [J]. *Professional Geographer*, 1980, 32(3):300-309.
- [9] LUIS M D, GONZÁLEZ-HIDALGO J C, RAVENTÓS J, et al. Distribución espacial de la concentración y agresividad de la lluvia en el territorio de la comunidad valenciana[J]. *Cuaternario Y Geomorfología*, 2007, 11:33-44.
- [10] MARTIN-VIDE J. Spatial distribution of daily precipitation concentration index in peninsular Spain[J]. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(8):959-971.
- [11] MANN H B. Nonparametric test against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3):245-259.
- [12] KENDALL M G. Rank correlation methods [M]. C. Griffin, 1948:108-108.
- [13] BROOKS C E P, Carruthers N. Handbook of statistical methods in meteorology [J]. *Geographical Review*, 1954, 44(4):617.
- [14] SHAW G, WHEELER D, WHEELER D. Statistical techniques in geographical analysis[J]. *Technometrics*, 1985, 30(3):348-349.
- [15] SHI P, QIAO X, CHEN X, et al. Spatial distribution and temporal trends in daily and monthly precipitation concentration indices in the upper reaches of the Huai River, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014, 28(2):201-212.
- [16] ZHANG Q, XU C Y, GEMMER M, et al. Changing properties of precipitation concentration in the Pearl River basin, China [J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2009, 23(3):377-385.
- [17] LI X, JIANG F, LI L, et al. Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period in Xinjiang, China[J]. *International Journal of Climatology*, 2010, 31(11):1679-1693.

(责任编辑 王卫勋)