

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0001

彭高辉,秦琳琳,马建琴,等. 1955-2015年郑州夏季旱涝急转特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 00-00. PENG G H, QIN L L, MA J Q, et al. Analysis of drought flood abrupt alternation in Zhengzhou during summer in 1955-2015[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 00-00. (in Chinese)

# 1955-2015年郑州夏季旱涝急转特征分析

彭高辉<sup>1</sup>, 秦琳琳<sup>1</sup>, 马建琴<sup>2</sup>, 黄孟亚<sup>1</sup>

(1. 华北水利水电大学 数学与统计学院, 郑州 450046; 2. 华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450046)

**摘要:** 根据郑州 1955-2015 年逐月降水数据, 结合长、短周期旱涝急转指数、线性倾向估计及 Mann-Kendall 突变检验等数学模型, 对郑州年降水特征以及 6 月-9 月份旱涝急转演变规律进行研究。结果表明: 郑州的年降水量总体以  $-7.87 \text{ mm}/(10\text{a})$  的速率下降; 郑州地区的长周期旱涝急转指数(LDFAI)趋势变化不明显, 但 LDFAI 强度呈阶段性变化特征, 存在 2 个偏强期和 2 个偏弱期, 其中 LDFAI 强度大于 1 占 37.7%, 旱涝急转比较频繁; 各相邻月之间的短周期旱涝急转指数 SDFAI 曲线振荡最频繁的是 6 月-7 月, 7 月-8 月次之, 8 月-9 月指数变化平缓。总体来说, LDFAI 的涝转旱的强度比旱转涝强, 长、短周期旱涝急转现象均呈现减弱趋势。

**关键词:** 降水; 旱涝急转; 趋势分析; Mann-Kendall 检验

中图分类号: P426 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Analysis of drought flood abrupt alternation in Zhengzhou during summer in 1955-2015

PENG Gao-hui<sup>1</sup>, QIN Lin-lin<sup>1</sup>, MA Jian-qin<sup>2</sup>, HUANG Meng-ya<sup>1</sup>

(1. School of Mathematics and Statistics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** Based on the monthly precipitation data of Zhengzhou meteorological station from 1955 to 2015, using long and short cycle drought flood abrupt alternation index, Linear Tendency Estimation, Mann-Kendall test and other mathematical models, we analyzed the annual precipitation and the evolution of drought flood during June to September in Zhengzhou. The results were as follows: The annual precipitation significantly decreased at a rate of  $-7.87 \text{ mm}/(10\text{a})$ . The change trend of the LDFAI in Zhengzhou was not obvious, but the intensity of LDFAI exhibited periodic changes, including two strong and two weak periods. The intensity of LDFAI greater than 1 accounted for 37.7% in the recent 61 years, which meant drought flood abrupt alternation occurred frequently. The short cycle drought flood abrupt alternation index between adjacent months had the most frequent fluctuation from June to July, the second most from July to August, and it leveled off from August to September. In general, the intensity of long cycle flood to drought transition was generally stronger than that of drought to flood transition. Both long and short cycle drought flood abrupt alternation phenomena showed a trend of decline.

**Key words:** precipitation; drought flood abrupt alternation; trend analysis; Mann-Kendall test

收稿日期: 2018-04-02 修回日期: 2018-08-02 网络出版时间: 2018-08-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180824.1007.004.html>

基金项目: 河南省科技攻关项目(152102110095); 河南省高校科技创新人才支持计划(15HASTIT046); 华北水利水电大学创新训练计划项目(2017XB142)

**Funds:** The Key Technology Projects of Henan Province(152102110095); Support Plan for Science and Technology Innovation Talents in Colleges and Universities of Henan Province(15HASTIT046); Innovation Training Program of North China University of Water Resources and Electric Power(2017XB142)

作者简介: 彭高辉(1978-), 男, 河南新乡人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事算法实现与水文分析方面研究。E-mail: penggao-hui@ncwu.edu.cn



是旱涝突变中。设气候序列为  $\{X_n\}$ ,  $S_k$  表示第  $i$  个样本  $X_i > X_j (1 \leq j \leq i)$  的累计数, 定义统计量

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, r_i = \begin{cases} 1 & X_i > X_j \\ 0 & X_i \leq X_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i; k = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

在序列随机独立的假定下,  $S_k$  的均值和方差分别为

$$E(S_k) = k(k-1)/4, \quad \text{Var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad 1 \leq k \leq n \quad (5)$$

将新序列  $S_k$  标准化得:

$$UF_k = \frac{(S_k - E(S_k))}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (6)$$

其中:  $UF_1 = 0$ 。给定显著水平  $\alpha$  若  $|UF_k| > U_\alpha$ , 则表明序列存在明显的趋势变化。将此方法引用到反序列  $\{x_n\}$ , 即,  $\{x_n\} = \{X_n, \dots, X_2, X_1\}$ 。再进行类似的运算, 有新的序列  $UF'_k$ , 则反序列的  $UB_k$  由下式给出:

$$\begin{cases} UB'_k = -UF'_k \\ k = n+1-k' \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中:  $UB_1 = 0$ 。给出曲线  $UF_k, UB_k$  的曲线图, 如果两曲线相交, 只有一个交点, 且位于显著性水平范围之内, 则认为该交叉点为突变点, 反之, 不能确定对应两序列的交叉点是否存在突变<sup>[17]</sup>。

## 2 郑州市旱涝急转规律与分析

### 2.1 长周期旱涝急转指数时间演变特征

#### 2.1.1 典型年份旱涝急转

根据式(2), 统计出郑州长周期旱涝急转指数, 再选取最高(低)的 LDFAI 年, 见表 1。由表 1 可知: 高 LDFAI 年中, 6 月-7 月的标准降水量均低于 8 月-9 月, 即 6 月-7 月到 8 月-9 月的降水量有增加趋势; 高 LDFAI 年中 6 月-7 月的标准化降水量均小于 -0.5, 其中有 5 年小于 -1, 说明高 LDFAI 年里有 5 年显著偏旱; 而 8 月-9 月的标准化降水量均大于 0.5, 且有 3 年大于 1, 说明其显著偏涝。同理, 可以得到低 LDFAI 的旱涝情况。即高 LDFAI 对应着“旱转涝”, 低 LDFAI 对应着“涝转旱”。

根据上述分析结果, 在夏季 LDFAI 中选出指数大于 1 的年份为典型旱转涝事件, 小于 -1 的年份为典型涝转旱事件。故, 典型的旱转涝年有 1962、1969、1974、1975、1985、2011 年, 典型的涝转旱年有 1957、1971、1973、1978、1994、2008 年。其中, 在低 LDFAI 年中, 1973 年的 8 月-9 月份为 -0.22, 没有达到 -0.5 个标准差, 但是其 6 月-7 月份为 1.85, 比较接近 2 倍标准差, 差距异常明显, 故将其选为旱转涝年。

表 1 1955-2015 年最高(低) LDFAI 年及其标准化降水量  
Tab. 1 The highest (lowest) LDFAI years during 1955-2015 and their standardized precipitation

高 LDFAI			低 LDFAI		
年份	6 月-7 月	8 月-9 月	年份	6 月-7 月	8 月-9 月
2011	-1.37	1.89	1957	2.92	-1.98
1969	-1.34	1.52	1994	1.67	-1.51
1985	-1.41	0.96	1978	1.32	-1.42
1975	-1.25	0.87	1971	1.27	-1.33
1962	-0.64	1.27	2008	1.2	-0.86
1974	-1.14	0.58	1973	1.85	-0.22

#### 2.1.2 旱涝急转指数的时间变化

夏季 LDFAI 可以反映研究区域是“旱转涝”, 还是“涝转旱”的过程, 但是, 在一定程度上未能反映旱涝急转的强度, 因此, 为了更好地反映旱涝急转的强度变化, 对 LDFAI 取绝对值, 并绘制出 1955-2015 年郑州夏季 LDFAI、旱涝急转强度的年际变化图以及 Mann-Kendall 突变检验趋势图(见图 2)。由图 2(a)可以看出, 1955-1985 年期间发生 5 次典型旱转涝, 4 次典型涝转旱, 发生旱涝急转事件的频率为 3.44 a/次; 1986-2015 年期间发生 1 次典型旱转涝, 2 次典型涝转旱, 发生旱涝急转事件的频率为 10 a/次; 观察趋势线可知, 郑州夏季 LDFAI 以 -0.058/(10a) 的速率下降, LDFAI 正值最大的是 1955 年, 为 8.33; 负值最小的是 1971 年, 为 -5.65; 2009-2012 年 LDFAI 均为正值且波动幅度明显, 表明旱转涝的趋势增强。总体来看, 夏季郑州的 LDFAI 以 -0.058/(10a) 的速率下降, 表明该研究区域旱涝急转现象由旱转涝变成涝转旱为主导。

观察图 2(c), 夏季 LDFAI 强度序列以 -0.137/(10a) 的速率下降, 表示旱涝转换强度减弱。在近 61 年内, 郑州夏季 LDFAI 强度序列呈现显著的阶段性, 1964-1971 年、1996-2015 年为相对偏弱期; 1955-1963 年与 1972-1995 年为偏强期, 其中, 1955 年、1971 年旱涝急转情况比较严重。结合图 2(a)、2(c) 中 LDFAI 偏高(低)的年份看, 郑州涝转旱较早, 这表明研究区域一旦出现旱涝急转异常年, 其涝转旱强度比旱转涝强。

图 2(b)、图 2(d) 依次为夏季 LDFAI 以及强度的 Mann-Kendall 突变检验。从图 2(b) 可以得出, 61 年内, 夏季 LDFAI 序列的正序列曲线  $UF$  在 1977-1985 年、2008-2015 年表现为正值, 表明夏季 LDFAI 两个阶段呈上升趋势, 其中  $UF$  值、 $UB$  值均未超过  $\alpha = 0.05$  显著性水平信度线, 表明趋势

变化并不显著; 曲线  $UF$ 、 $UB$  在临界线内的交叉点比较多, 故夏季 LDFAI 没有发生年代际突变。从图 2(d) 来看, 夏季 LDFAI 强度在 1985-2003 年呈

上升趋势, 其余阶段呈下降趋势, 且其趋势不显著。整体来看, LDFAI 强度由强变弱的趋势并不显著, 图 2(c) 也证实了这个结论。

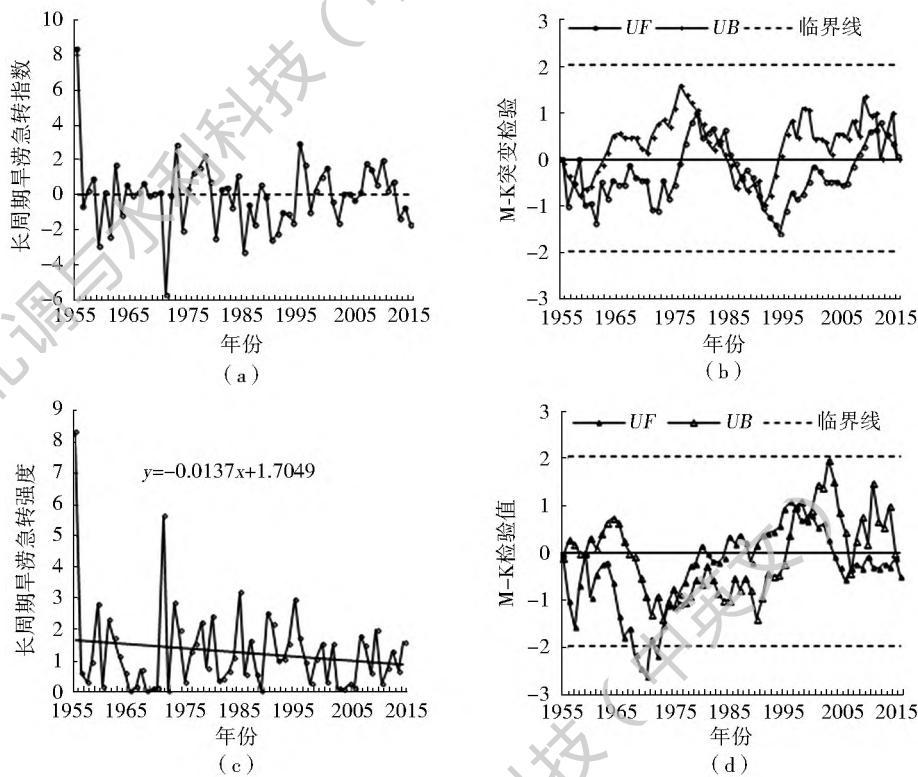


图 2 1955-2015 年郑州 LDFAI 及强度的变化以及 M-K 突变检验

Fig. 2 Changes in value and intensity of LDFAI in Zhengzhou from 1955 to 2015 and M-K abrupt change test results

## 2.2 短周期早涝急转指数时间演变特征

### 2.2.1 典型年份早涝急转

根据式(3), 统计出郑州短周期早涝急转指数, 再选取最高(低)的 SDFAI 年(见表 2)。由表可知: 高 SDFAI 年中, 7、8、9 月标准化降水量均高于相应 6、7、8 月的, 而低 SDFAI 年的情况则相反。高 SDFAI 年中 6 月份的标准化降水量均大于 -0.5, 8 月份的标准化降水量在 0.5 之上, 其中有 2 年大于 2, 为 2.1、2.05, 说明这几年显著偏涝。同理, 可以得到低 SDFAI 年的早涝情况。所以上述数据可以反应郑州 6 月-7 月、7 月-8 月、8 月-9 月早涝急转的变化。

和长周期典型早涝年选择类似, 得出典型的早涝转涝年: 6 月-7 月有 1964 年、1973 年、1999 年、2008 年; 7 月-8 月有 1962 年、1963 年、2003 年、2012 年; 8 月-9 月有 1961 年、1972 年、2014 年。典型的涝转旱年有: 6 月-7 月有 1963 年、1987 年、2015 年; 7 月-8 月有 1977 年、1978 年; 8 月-9 月有 1956 年、1958 年、1998 年、2007 年。其中 2003 年 7 月份的标准化降水量为 -0.41, 低于 0.5 个标准差, 但其 8 月份的为 2.05, 高于 2 个标准差, 两者

的差距异常明显, 故将其选为旱涝转涝年。

表 2 1955-2015 年最高(低) SDFAI 年及其标准化降水量  
Tab. 2 The highest (lowest) SDFAI years during 1955-2015 and their standardized precipitation

高 LDFAI		高 LDFAI		高 LDFAI	
年份	6 月	7 月	年份	7 月	8 月
1964	-0.81	0.64	1963	-1.34	2.1
1999	-0.64	0.77	2012	-0.69	0.71
2008	-0.7	1.92	1962	-0.65	1.73
1973	-0.56	2.61	2003	-0.41	2.05
1961	-1.17	1.19	1972	-1.21	0.51
2014	-0.86	2.32			

低 LDFAI		低 LDFAI		低 LDFAI	
年份	6 月	7 月	年份	7 月	8 月
1963	1.29	-0.88	1978	1.99	-1.12
1987	1.23	-0.83	1977	2.13	-0.93
2015	0.81	-0.76	2007	1.5	-1.19
			1998	0.88	-1.25
			1958	1.76	-0.95

### 2.2.2 旱涝急转的时间变化

绘制出郑州夏季短周期早涝急转指数的趋势图, 见图 3。结果显示, 6 月-7 月 SDFAI 振荡较为频繁且更为剧烈; 7 月-8 月 SDFAI 变化幅度次之; 8 月-9 月的 SDFAI 指数变化在 1962-1997 年一

直比较平稳(旱涝急转现象非常少),仅在1956、1961以及2007年发生了更为明显的震荡;郑州各月份发生短周期旱涝急转事件的频率依次为4.36 a/次、4.69 a/次、6.78 a/次,这表明:短周期旱涝急转现象随着月份的递增而递减。总体来看,在1955-1965年期间6月-7月、7月-8月、8月-9月旱涝急转指数变化幅度较明显,且1963年郑州6月-7月份SDFAI的值为-5.37,7月-8月SDFAI的值为4.91,即这一年旱涝急转现象比较严重(6月-7月发生“涝转旱”,7月-8月发生“旱转涝”)。结合时序图变化情况可以得出,近61年,郑州夏季短周期旱涝急转主要以“涝转旱”为主,且强度呈减弱趋势,此研究结果与长周期尺度的旱涝急转一致。

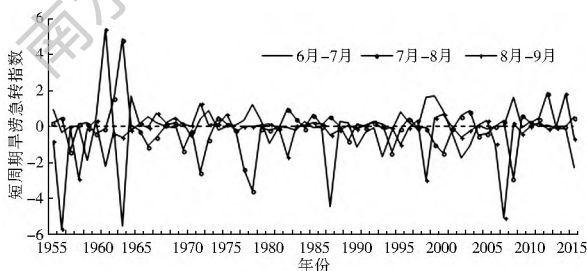


图3 1955-2015年郑州短周期旱涝急转指数(SDFAI)趋势

Fig. 3 The trends of SDFAI in Zhengzhou from 1955 to 2015

### 3 结论

由于城市化、城市下垫面的快速推进改变,导致旱涝灾害发生的频率增加。针对这一问题,本文用LDFAI以及SDFAI,详细研究了郑州旱涝急转的特征,得出如下结论。

(1) 夏季长、短周期旱涝急转指数可以很好地反映郑州6月-9月降水变化分布的特征。

(2) 1955-2015年,郑州旱涝急转事件发生的频率为5.08 a/次;且夏季LDFAI以-0.058/10a的速率下降,即发生旱转涝事件的可能性降低,但夏季LDFAI强度呈现显著的阶段性,1964-1971年、1996-2015年为相对偏弱期;1922-1963年、1972-1995年为相对偏强期。M-K突变检验表明,郑州夏季旱涝急转指数以及急转强度的变化均不显著,且其突变的时间点都在20世纪60年代初。

(3) 郑州夏季6月-7月SDFAI振荡较为频繁,7月-8月SDFAI次之,8月-9月指数变化较平缓,这表明:旱涝急转现象随着月份的递增而递减。郑州夏季短周期旱涝急转事件以“涝转旱”为主,急转的强度呈现出减弱的趋势。

本文仅从降水的角度,分析郑州旱涝急转的变

化特征,具有一定的研究意义,但未考虑温度、大气环流、南支槽等其他因素的约束,后续将结合多因素对研究区域旱涝急转的规律作进一步的探讨、分析。

### 参考文献(References):

- [1] 秦大河, STOCKER T. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): F6. (QIN D H, STOCKER T. Highlights of the IPP Working Group I Fifth Assessment Report[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2014, 10(1): F6. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01001.
- [2] LI C, LI T, LIN A, et al. Relationship between summer rainfall anomalies and sub seasonal oscillations in South China[J]. Dynamics of Atmospheres & Oceans, 2015, 44(F2): 423-439. DOI: 10.1007/s00382-014-2172-y.
- [3] QUESADAMONTANO B, BALDASSARRE G D, RANGECROFT S, et al. Hydrological change: Towards a consistent approach to assess changes on both floods and droughts[J]. Advances in Water Resources, 2017. DOI: 10.1016/j.advwatres.2017.10.038.
- [4] 刘德林. 郑州市近60年来降水变化特征及突变分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 236-238. (LIU D L. Variation characteristics and abrupt change analysis of precipitation in Zhengzhou City over the last 60 year Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(5): 236-238. (in Chinese))
- [5] 崔灿. 郑州一次暴雨天气过程诊断分析[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(120): 137-141. (CUI C. An heavy rain Weather process diagnosis in Zhengzhou[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(120): 137-141. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2014.120.028.
- [6] 王纪军, 胡彩虹, 潘攀, 等. 郑州市夏季降水的变化特征[J]. 河南科学, 2014(9): 001795-1799. (WANG J J, HU C H, PAN P, et al. Variation characteristics of summer precipitation in Zhengzhou[J]. Henan Science, 2014(9): 001795-1799. (in Chinese)) DOI: 10.13537/j.issn.1004-3918.2014.09.026.
- [7] 罗浩, 包为民, 王友恒. 河南省旱涝态势时空特征分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(11): 39-43. (LUO H, BAO W M, WANG YH. Spatial temporal variation and the tendency of droughts and floods in Henan Province[J]. Yellow River, 2016, 38(11): 39-43. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2016.11.010.
- [8] SHI B L, ZHU X Y, HU Y C, et al. Drought characteristics of Henan province in 1961-2013 based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(3): 311-325. DOI: 10.1007/s11442-017-1378-4.
- [9] 史本林, 朱新玉, 胡云川, 等. 基于SPEI指数的近53年河南省干旱时空变化特征[J]. 地理研究, 2015, 34(8): 1547-1558. (SHI B L, ZHU X Y, HU Y C, et al. Spatial and temporal variations of drought in Henan province over a 53-year period based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Geographical Research, 2015. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlyj201508012.
- [10] 闪丽洁, 张利平, 张艳军, 等. 长江中下游流域旱涝急转事件特

- 征分析及其与 ENSO 的关系[J]. 地理学报, 2018, 73(1). (SHAN L J, ZHANG L P, ZHANG Y J, et al. Characteristics of dry wet abrupt alternation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and their relationship with ENSO[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1). (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlx201801003.
- [11] WU Z W, LI J P, HE J H, et al. Occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the mid and lower reaches of the Yangtze River[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(5): 1-1.
- [12] WU Z W, LI J P, HE J H, et al. Large scale atmospheric singularities and summer long cycle droughts floods abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(16): 2027-2034.
- [13] 何慧, 廖雪萍. 华南地区 1961-2014 年夏季长周期旱涝急转特征[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 130-141. (HE H, LIAO X P. Features of long cycle drought flood abrupt alternation in South China during summer in 1961-2014[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1): 130-141. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlx201601010.
- [14] 张水锋, 张金池, 等. 基于径流分析的淮河流域汛期旱涝急转研究[J]. 湖泊科学, 2012, 24(5): 679-686. (ZHANG S F, ZHANG J C. Drought flood abrupt alternation based on runoff in the Huaihe River Basin during rainy season[J]. Journal of Lake Science, 2012, 24(5): 679-686. (in Chinese))
- [15] 中国气象数据网[DB/OL]. http://data.cma.cn/site/index.html, 2017-11. (China Meteorological Data Network[DB/OL]. http://data.cma.cn/site/index.html, 2017-11. (in Chinese))
- [16] 王景才, 徐蛟, 蒋陈娟, 等. 1960-2014 年淮河上中游流域年降水和主汛期降水的时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 51-58. (WANG J C, XU J, JIANG C J, et al. Temporal and spatial characteristics of annual and main flood season precipitation in upper and middle reaches of Huaihe River Basin between 1960 and 2014[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 51-58. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbj.2017.06.008.
- [17] 李红梅, 周天军, 宇如聪. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 358-370. (LI H M, ZHOU T Y, YU R C. Analysis of July-August daily precipitation characteristics variation in eastern China during 1958-2000. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(2): 358-370. (in Chinese))

(上接第 14 页)

- [18] USDA (United States Department of Agriculture). Urban hydrology for small watersheds[M]. 2nd ed. United States: Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division, 1986.
- [19] HUANG S L, LAI H Y, LEE C L. Energy hierarchy and urban landscape system[J]. Landscape and Urban Planning, 2001, 53(1): 145-161. DOI: 10.1016/S0169-2046(00)00150-X.
- [20] ODOM H T, BROWN M T, WHITEFIELD L S, et al. Zonal organization of cities and environment: A study of energy systems basis for urban society [C]. A report to the Chiang Ching-Kuo Foundation for International Scholarly Exchange. Gainesville, FL: Center for Environmental Policy, 1995.
- [21] HUANG S L. Urban ecosystems, energetic hierarchies, and ecological economics of Taipei metropolis [J]. Journal of Environmental Management, 1998, 52(52): 39-51. DOI: 10.1006/jema.1997.0157.
- [22] 夏军, 石卫, 洪思, 等. 气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 279-286. (XIA J, SHI W, HONG S, et al. Revisions on water resources vulnerability and adaption measures under climate change [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 279-286. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.02.019.
- [23] 左其亨. 水资源适应性利用理论及其在治水实践中的应用前景[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 18-24. (ZUO Q T. Theory of adaptive utilization of water resources and its application prospect in water control practice[J]. South to North Water Transfers and water science & Technology, 2017, 15(1): 18-24. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbj.2017.01.004.
- [24] SMIT B, WANDEL J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability [J]. Global Environmental Change, 2006: 16(3): 282-292. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008.
- [25] LIN Y C, HUANG S L, BUDD W W. Assessing the environmental impacts of high altitude agriculture in Taiwan: A Driver-Pressure-State Impact Response (DPSIR) framework and spatial energy synthesis [J]. Ecological Indicators, 2013, 32(43): 4250. DOI: 10.1016/j.ecolind.2013.03.009.
- [26] 吕翠美. 区域水资源生态经济价值的能值研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2009. (LV C M. Research on ecological economic value of regional water resources based on energy theory [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2009. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y1643958.