doi:10.3724/SP.J.1201.2014.01032

海河平原1956年-2011年降水特征分析

雷 廷,张兆吉,费宇红,孟素花,钱 永

(中国地质科学院 水文地质环境地质研究所,石家庄 050061)

摘要: 基于海河平原28个四级子区1956年-2011年逐月平均降水量数据,运用线性倾向估计、Mann-Kendall趋势检验、Morlet小波分析等方法,对海河平原年降水量变化特征进行研究。结果表明:海河平原北部和南部降水最丰,中部滨海地区次之,而中部山前地带最寡;降水主要集中在夏季,约占全年降水量的68.7%,冬季降水量最少,约占全年降水量的2.5%。研究还发现,近56年来海河平原年降水量呈现不明显的下降趋势,这主要是由夏季降水量明显减少造成的。28个四级子区中,年降水量下降趋势较为显著的子区有12个,主要分布在黑龙港运东平原及西北部山前平原,而个别子区降水量变化呈现不明显的上升趋势。近56年,海河平原年降水量整体上的周期性变化不明显,但在1956年-1990年、1956年-1980年、1993年-2008年期间分别存在4 a、11 a和7 a尺度的周期变化。

关键词: 降水特征;线性倾向估计;Mann-Kendall法;小波分析;海河平原

中图分类号: P333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0032-05

Analysis of Precipitation Characteristics in the Haihe River Plain from 1956 to 2011

LEI Ting, ZHANG Zhao-ji, FEI Yu-hong, MENG Su-hua, QIAN Yong

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Based on the average monthly precipitation data collected at 28 Level-4 sub-segments in the Haihe River Plain from 1956 to 2011, the variation characteristics of precipitation in the Haihe River Plain were analyzed using the methods of linear regression, Mann-Kendall trend test, and Morlet wavelets analysis method. The results showed that (1) the average precipitation in the Haihe River Plain varies spatially. The north and south have the most abundant rainfall, followed by the central coastal area, and the central piedmont has the least amount of rainfall; and (2) the average precipitation also varies temporally. Over 68.7% of the rainfall occurs in summer, while only about 2.5% occurs in winter. In addition, annual precipitation in the Haihe River Plain had an insignificant decreasing trend in the recent 56 years, which was caused by the obvious decreasing trend of precipitation in summer. Among the 28 Level-4 sub-segments, 12 of them showed a significant decreasing trend of precipitation, and they are mainly located in the Heilonggangyundong Plain and the piedmont plain in the northwest. Moreover, a few Level-4 sub-segments had an insignificant increasing trend of precipitation. In the recent 56 years, there was no significantly periodic change on the annual precipitation; however, there were a 4-year interval, a 7-year interval, and an 11-year interval occurring during the periods of 1956 to 1990, 1993 to 2011, and 1956 to 1980, respectively.

Key words: precipitation characteristics; linear regression; Mann-Kendall test method; avelet analysis; Haihe River Plain

海河平原是华北地区的主要平原,包括北京市、天津市和河北省平原的全部,以及山东省和河南省黄河以北平原,是我国重要的政治、经济和文化中心,人口稠密,工农业发达。近几十年来,在地下水开采、地表水利工程、降水、蒸发等一系列因素影响下,水资源短缺成为困扰海河平原经济发展的一大难题[1]。降水的时空变化是区域水资源时空分布的重要制约因素[2]。近年来,针对该地区降水量的变化已开展了不少研究[3-6],但大多只是针对局部地区,缺乏对整个海河平原降水量的时空演变规律分析。本文利用56年来的降水资料(1956年-2011年)对该地区降水变化特征进行系统分析,为该地区水资源变化特征研究和水资源利用提供支持。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

海河平原按地表水流域三级区划分,可分为北四河平

收稿日期:2013-09-04 修回日期:2013-12-03 网络出版时间:2013-12-17
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01045.html
基金项目:国家973计划项目(2010CB428801-1)
作者简介:雷 廷(1988-),男,湖北京山人,硕士研究生,主要从事地下水可持续利用方面的研究。E-mail:Leiting42082@163.com

原、滦河平原、大清淀东平原、大清淀西平原、黑龙港运东平原、子牙河平原、漳卫河平原和徒骇马颊河平原(图 1)。在三级分区的基础上按照所属行政区的不同将海河平原划分为 28 个四级子区(表 1)。

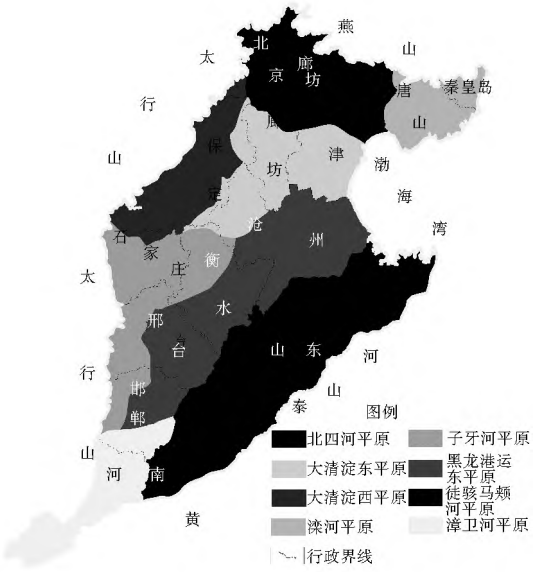

图 1　海河平原地表水流域三级分区

Fig. 1　The Level-3 sub-segments in the Haihe River Plain

表 1　海河平原 28 个四级子区

Table 1　The 28 Level-4 sub-segments in the Haihe River Plain

三级子区	行政分区	四级子区	三级子区	行政分区	四级子区
北四河平原	北京	北四河北京	黑龙港运东平原	沧州	黑龙港运东沧州
	廊坊	北四河廊坊		邯郸	黑龙港运东邯郸
	唐山	北四河唐山		衡水	黑龙港运东衡水
	天津	北四河天津		邢台	黑龙港运东邢台
大清淀东平原	保定	大清淀东保定	徒骇马颊河平原	邯郸	徒骇马颊河邯郸
	沧州	大清淀东沧州		河南	徒骇马颊河河南
	衡水	大清淀东衡水		山东	徒骇马颊河山东
	廊坊	大清淀东廊坊	漳卫河平原	河南	漳卫河平原河南
	天津	大清淀东天津		邯郸	漳卫河平原邯郸
大清淀西平原	保定	大清淀西保定	子牙河平原	沧州	子牙河平原沧州
	北京	大清淀西北京		邯郸	子牙河平原邯郸
	石家庄	大清淀西石家庄		衡水	子牙河平原衡水
滦河平原	秦皇岛	滦河及沿海秦皇岛		石家庄	子牙河平原石家庄
	唐山	滦河及沿海唐山		邢台	子牙河平原邢台

本文研究数据采用的是海河水利委员会提供的海河平原 28 个地表水流域四级子区 1956 年– 2011 年逐年逐月的平均降水量资料。经过计算得到海河平原全区内 1956 年–2011 年逐年逐月平均降水量及各季节的平均降水量。

1.2　主要研究方法

1.2.1　线性倾向估计

线性倾向估计[7-8], 是用 x_i 表示样本量为 n 的某一气候变量, 用 t_i 表示 x_i 所对应的时间, 建立 x_i 与 t_i 之间的一元线性回归:

$$x_i = a' + b' t_i \quad (i = 1, 2, 3 \cdots, n) \tag{1}$$

式中: a'、b' 为回归系数, a' 和 b' 用最小二乘法进行估计。

$$\begin{cases} b' = \dfrac{\sum_{i=1}^{n} x_i t_i - \frac{1}{n}(\sum_{i=1}^{n} x_i)(\sum_{i=1}^{n} t_i)}{\sum_{i=1}^{n} t_i^2 - \frac{1}{n}(\sum_{i=1}^{n} t_i)} \\ a' = \bar{x} - b' \bar{t} \end{cases} \tag{2}$$

其中, $\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$, $\bar{t} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i$

回归系数 b' 的正负号表示气候变量 x 的趋势倾向。$b' > 0$, 说明随时间 t 的增加, x 呈上升趋势; $b' < 0$, 说明随时间 t 的增加, x 呈下降趋势。

1.2.2　Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall(简称 M-K) 法是一种广泛应用于气温、降水、径流等水文现象的非参数统计检验方法, 以适用范围广、人为性少、定量化程度高而著称, 能很好地揭示时间序列的趋势变化, 目前已被广泛应用于水文时间序列的趋势分析中[9-11]。其统计量为: 对于具有 n 个样本量的时间序列 x, 计算统计量:

$$Z = \left(\frac{4S}{n(n-1)} - 1\right) / \sqrt{\frac{4n+10}{9n(n-1)}} \tag{3}$$

其中, $S = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=i+1}^{n} r_{ij}$, $r_{ij} = \begin{cases} 1 & x_j > x_i \\ 0 & x_j \leqslant x_i \end{cases} (j = i+1, i+2, \cdots, n)$

可见, S 是第 i 时刻以后的数值 x_j $(j = i+1, \cdots, n)$ 大于 i 时刻数值 x_i 的样本个数。

Z 为正值表示增加趋势, 负值表示减少趋势。确定显著性水平 α 时, 若 $|Z| > Z_{\alpha/2}$, 则表明变化趋势是显著的, 否则表明变化趋势是不显著的。本文分别在 α= 0.1、α= 0.05、α= 0.01 的显著性水平下进行检验, 查表可以获得 $Z_{0.05}$ = 1.645、$Z_{0.025}$ = 1.96、$Z_{0.005}$ = 2.576。

1.2.3　小波分析

小波分析在水文时间序列变化研究中能清晰的揭示出隐藏在时间序列中的多种变化周期, 反映系统在不同时间尺度中的变化趋势, 并能对系统未来发展趋势进行定性估计, 目前已被广泛应用于水文时间序列的周期分析中[12-22]。由于 Morlet 小波在时、频域的局部性都较好[12-15], 因而本文采用选取 Morlet 小波对海河平原平均降水量进行小波分析。Morlet 小波为复小波, 其解析形式为:

$$\Psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \tag{4}$$

Morlet 小波变换系数 $WX(a, b)$, 定义为:

$$W_X(a, b) = C_X(a, b) C_X^*(a, b) = |C_X(a, b)|^2 \tag{5}$$

式中: $C_X(a, b)$ 和 $C_X^*(a, b)$ 分别是 X 的原函数和共轭函数的小波系数。

Morlet 小波变换系数的模和实部是两个重要的变量。其模的大小表示特征时间尺度信号的强弱, 实部表示不同特征时间尺度信号在不同时间上的分布和位相两方面的信息[15]。

将时间域上的不同尺度 a 的所有小波系数的平方进行积分, 即为小波方差, 小波方差可以表示时间序列中该周期波动的强弱或能量大小[16], 其计算公式为:

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_X(a, b)|^2 \mathrm{d}b \tag{6}$$

2 结果分析

2.1 海河平原降水空间分布特征分析

从图 2 可以看出,海河平原年平均降水量在空间上呈现较为明显的分带性:北部和南部降水最为丰富,年平均降水量均超过 550 mm,北四河唐山年平均降水量甚至达到612.61 mm;中部滨海地区次之,年平均降水量在500~550 mm 之间;中部山前地带降水量最少,年平均降水量不足 500 mm,大清淀西石家庄年平均降水量最小,仅有456.44 mm。

图 2 海河平原年平均降水量分布

Fig. 2 Distribution of average annual precipitation in the Haihe River Plain

2.2 海河平原降水时间演变特征分析

2.2.1 海河平原降水变化总体趋势

统计结果表明,56 年来,海河平原年平均降水量为542.04 mm;最大雨量年出现在 1964 年,降水量为 936.34 mm;最小雨量年出现在 1965 年,降水量只有 348.65 mm。总体上,年降水量变化呈现下降趋势(图 3)。其趋势线方程为 $y = 1.99x + 598.78$,相关系数 $r = 0.139 < 0.2875$,显示下降趋势在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平上是不明显的。

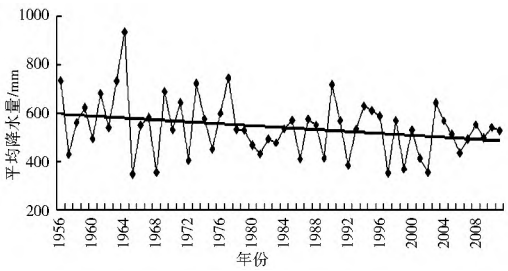

图 3 海河平原年平均降水量变化

Fig. 3 Variation of average annual precipitation in the Haihe River Plain

利用 M-K 法对海河平原年降水量变化趋势进行显著性检验,检验值 $Z = -1.76$,表明海河平原年降水量变化呈现下降趋势,但其绝对值小于 $Z_{0.025} = 1.96$,同样说明这种下降趋势在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平上是不显著的。

2.2.2 海河平原降水量变化空间差异性分析

采用 M-K 法对海河平原 28 个四级子区 1956 年–2011 年期间的降水量变化趋势进行显著性检验(表 2、表 3),结果表明:海河平原 28 个子区年降水量变化大多呈现下降趋势,部分子区下降趋势非常明显。其中通过 90% 显著性检验的子区有 12 个,通过 95% 显著性检验的子区有 7 个,甚至有一个子区的下降趋势通过 99% 显著性检验,仅有两个子区的年降水量变化呈现上升趋势,但趋势均不显著。

表 2 海河平原四级子区年平均降水量 M-K 趋势检验统计

Table 2 M-K trend test results of annual precipitation of the Level-4 sub-segments in the Haihe River Plain

四级子区	年平均降水量/mm	M-K 趋势检验值	四级子区	年平均降水量/mm	M-K 趋势检验值
北四河北京	580.8	-1.99	黑龙港运东沧州	557.84	-1.95
北四河廊坊	583.71	-1.86	黑龙港运东邯郸	522.72	-2.03
北四河唐山	612.61	-1.41	黑龙港运东衡水	517.01	-2.1
北四河天津	567.84	-1.52	黑龙港运东邢台	501.34	-1.93
大清淀东保定	473.12	-0.41	徒骇马颊河邯郸	526.74	-2.72
大清淀东沧州	521.05	-2.12	徒骇马颊河河南	560.77	-0.92
大清淀东衡水	501.48	-1.15	徒骇马颊河山东	558.25	-1.06
大清淀东廊坊	524.36	-1	漳卫河平原河南	577.65	-0.87
大清淀东天津	544.4	-0.89	漳卫河平原邯郸	534.32	-2.24
大清淀西保定	515.98	-1.55	子牙河平原沧州	531.91	0.83
大清淀西北京	566.75	-1.84	子牙河平原邯郸	549.05	-2.01
大清淀西石家庄	456.44	1	子牙河平原衡水	490.44	-1.26
滦河及沿海秦皇岛	591.96	-1.87	子牙河平原石家庄	478.56	-1.01
滦河及沿海唐山	589.15	-1.06	子牙河平原邢台	482.04	-1

表 3 海河平原四级子区年平均降水量 M-K 趋势检验结果统计

Table 3 Statistics of M-K trend test results of the average annual precipitation of the Level-4 sub-segments in the Haihe River Plain

变化趋势	子区数			
		通过 90% 显著性检验($\lvert Z\rvert > Z_{0.05}$)	通过 95% 显著性检验($\lvert Z\rvert > Z_{0.025}$)	通过 99% 显著性检验($\lvert Z\rvert > Z_{0.005}$)
上升	2	–	–	–
下降	26	12	7	1

依据检验结果绘制海河平原降水量变化趋势分布图(图 4),可以看出,降水量呈现明显下降趋势的地区(通过 90% 显著性检验)主要集中在黑龙港运东平原及西北部山前平原,大清河平原石家庄地区及子牙河平原沧州地区降水量变化呈现上升趋势,但趋势不显著。

2.2.3 海河平原降水量变化季节差异性分析

海河平原降水量年内分配不均,降水主要集中在夏季,约占全年降水量的 68.7%,冬季降水量最少,约占全年降水量的 2.5%。四季降水量变化趋势存在差异(表 4):春季降水量变化呈现增多的趋势,但趋势不显著;夏季、秋季和冬季降水量变化呈现减少的趋势,其中夏季降水量减少趋势非常显著。海河平原年降水量呈现下降趋势主要是由于夏季降水量的明显减少造成的。

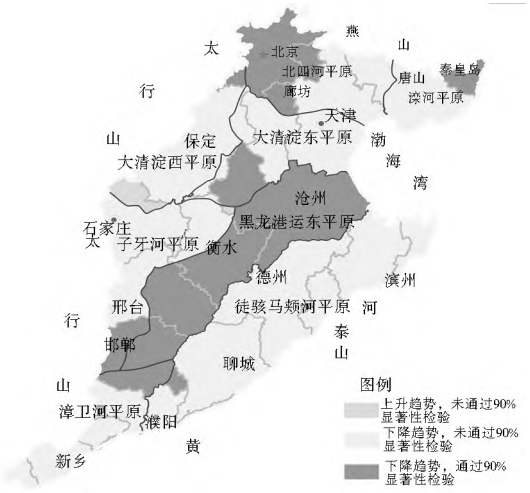

图 4　海河平原年降水量变化趋势分布

Fig. 4　Distribution of variation trend of average annual precipitation in the Haihe River Plain

表 4　海河平原四季降水量 M-K 趋势检验

Table 4　M-K trend test result of the seasonal precipitation in the Haihe River Plain

季节	春季	夏季	秋季	冬季
检验值	1.75	– 2.79	– 0.34	– 1.24
变化趋势	增多	减少	减少	减少
α = 0.05 显著性检验	未通过，变化趋势不显著	通过，变化趋势显著	未通过，变化趋势不显著	未通过，变化趋势不显著

2.2.4　海河平原降水量周期变化

为了消除或减小序列开始点和结束点附近的“边界效应[14]”，本文对海河平原年降水量距平时间序列两端数据进行对称延伸，在进行完小波变换后，去掉两端延伸数据的小波变换系数，保留原数据序列时段内的小波系数。

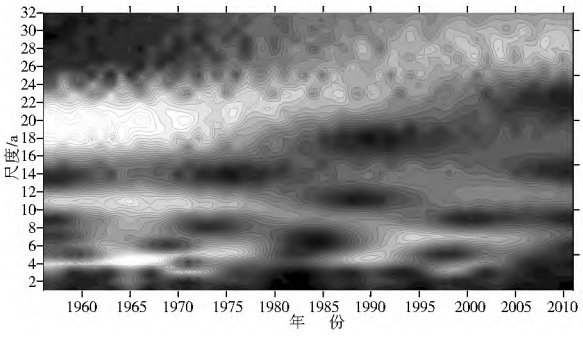

图 5　海河平原年平均降水量 Morlet 小波变换模数等值线

Fig. 5　Isoline of the modulus of Morlet Wavelet coefficient in analyzing average annual precipitation in the Haihe River Plain

图 5 描述了海河平原平均降水量距平序列 Morlet 小波变换系数模的波动周期，其值的大小相当于小波能量谱。当模越大时，其对应时段和尺度的周期性越显著，由此可以分析年降水量在小波变化域中波动能量强弱的变化特性[18-21]。图中振荡信号的强弱通过灰度的大小来表示，即灰白色的区域对应着 Morlet 小波变换系数模数的高值区，表示此周期的能量信号较高；而深灰色区域则对应着 Morlet 小波变换系数的低值区，说明该波动周期的能量信号较低。

由图 5 可知，从整个时域上看，海河平原年降水量变化周期性不显著，但在局部时段内降水量变化存在周期性。图中 4~ 5 a 左右尺度的周期变化信号最强，其波动能量影响尺度的范围是 1956 年– 1990 年，但在 1980 年– 1985 年期间该信号很弱。此外，较强的信号还有 6~ 7 a、10~ 13 a 和 19~ 21 a 左右的变化周期，分别表现在 1993 年– 2011 年、1956 年– 1980 年和 1956 年– 1970 年期间。

由于小波变换系数的模和实部等值线图只能显示水文时间序列周期变化的大概特征，为进行准确分析，需要用小波方差分析进行验证，以确定降水时间序列的显著周期[22]。

图 6 描述了小波方差随尺度 a 变化的过程，小波方差的峰值对应的尺度为该序列的主要时间尺度，反映时间序列变化的主要周期。由图 6 可知，海河平原年降水量的小波方差存在 4 个极值，分别为 4 a、7 a、11 a 和 22 a。其中 4 a 和 22 a 尺度小波方差的极值表现最为明显，为主周期变化，7 a 和 11 a 的时间尺度为次周期变化。但是 22 a 时间尺度超过了小波变换的最大可信周期（取资料长度的 1/3，即 19 a 及以下的时间尺度可信），该周期不可信。因而可以确定，海河平原降水量存在 4 a 尺度的主周期变化，以及 7 a、11 a 尺度的次周期变化。4 a 尺度的主周期变化的影响范围是 1956 年– 1990 年，其中在 1980 年– 1985 年期间该信号很弱。7 a 尺度的周期变化影响范围是 1993 年– 2011 年；11 a 尺度的周期变化影响范围是 1956 年– 1980 年。

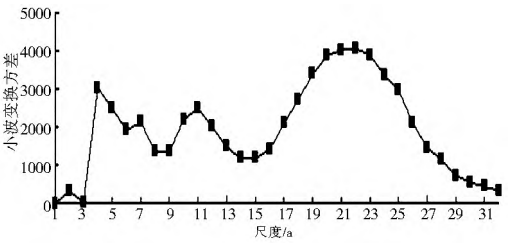

图 6　海河平原年平均降水量小波变换方差

Fig. 6　Wavelet variance of average annual precipitation in the Haihe River Plain

3　结论

（1）利用海河平原 28 个四级子区 1956 年– 2011 年逐月平均降水量数据，对海河平原年降水量变化特征进行分析。结果表明：海河平原降水在北部和南部降水最丰，中部滨海地区次之，而中部山前地带最寡；降水主要集中在夏季，约占全年降水量的 68.7%，而冬季降水量最少，约占全年降水量的 2.5%。

（2）利用线性倾向估计和 Manr-Kendall 法对海河平原降水量进行趋势分析，结果表明：海河平原年降水量变化呈现不明显的下降趋势，这一下降趋势主要是由于夏季降水量的明显减少造成的；全区降水量减少明显的地区为黑龙港运东平原及西北部山前平原，仅有大清淀西平原平原石家庄地区及子牙河平原沧州地区降水量变化呈现上升趋势，但趋势不显著。

（3）Mortel 小波分析的结果显示，海河平原年降水量在 1956 年– 2011 年期间全时域上周期变化不明显，但在局部时域内存在较明显周期变化。在 1956 年– 1990 年期间存在

4 a 左右的时间尺度变化周期, 这一周期信号在 19 世纪 70 年代信号最强, 其后信号逐渐减弱; 在 1993 年– 2008 年期间出现 7 a 左右的时间尺度变化周期, 在 1956 年– 1980 年期间还存在 11 a 左右的时间尺度变化周期。

致谢: 本文所选用的降水数据由海河水利委员会提供, 在此, 对海河水利委员会表示感谢。

参考文献(References):

[1] 费宇红, 张兆吉, 陈京生. 人类活动与海河平原水资源关系研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(增刊): 102-107. (FEI Yu-hong, ZHANG Zhao-ji, CHEN Jing-sheng. Analysis on Relationship between Human Activities and Water Resources in Haihe Plain [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(supp.): 102-107. (in Chinese))

[2] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础(第三版)[M]. 北京: 地质出版社, 1995. (WANG Da-chun, ZHANG Ren-quan, SHI Yi-hong, et al. General Hydrogeology (Third Edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995. (in Chinese))

[3] 李春强, 杜毅光, 李保国. 1956-2005 年河北省降水量变化的小波分析. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1340-1344. (LI Chun-qiang, DU Yi-guang, LI Bao-guo. A Wavelet Analysis on Annual Rainfall Variation in Hebei Province during 1965-2005[J]. Progress in Geography, 2010, 29(11): 1340-1344. (in Chinese))

[4] 李鹏程, 李琼芳, 蔡涛, 等. 北京天津地区近 51a 降水变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(10): 6-9. (LI Peng-cheng, LI Qiong-fang, CAO Tao, et al. Feature Analysis of 51 Years Precipitation Change in Beijing and Tianjin Area[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(10): 6-9. (in Chinese))

[5] 刘振铎, 段现辉, 哈建强. 沧州市近 50 年降水量特性分析[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(3): 18-20. (LIU Zhen-duo, DUAN Xian-hui, HA Jian-qiang. Feature Analysis of 50 Years Precipitation Change in Cangzhou. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2011, 17(3): 18-20. (in Chinese))

[6] 王霞, 苗文海, 刘莉莉, 等. 德州市降水量及气温变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(8): 13-15. (WANG Xia, MIAO Wen-hai, LIU Li-li, et al. Analysis of Variation Trends of Precipitation and Temperature in Dezhou City [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(8): 13-15. (in Chinese))

[7] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 2008. (WEI Feng-ying. Modern Technology of Statistics Diagnosis and Forecast for Climate (Second Edition) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008. (in Chinese))

[8] 孙佳. 石羊河流域气候变化趋势及突变分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2008. (SUN Jia. Analyzing Climate Change Trends and Abrupts in Shiyang River Basin for 47 Years[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. (in Chinese))

[9] 胡刚, 宋慧. 基于 Mann-Kendall 的济南市气温变化趋势及突变分析[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2012, 26(1): 96-101. (HU Gang, SONG Hui. Analysis of Air Temperature Variation Trend and Abrupt Change in Jinan Based on Mann-Kendall Test[J]. Journal of University of Jinan(Sci. and Tech.), 2012, 26 (1): 96-101. (in Chinese))

[10] 张燕明, 文俊, 王新华, 等. 基于 Mann-Kendall 分析的昆明降雨与气温变化趋势研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(25): 15755-15757. (ZHANG Yan-ming, WEN Jun, WANG Xin-hua, et al. Study on Change Trend of Precipitation and Temperature in Kunming City Based on Mann-Kendall Analysis [J]. Journal of Anhui Agr. i Sci., 2011, 39(25): 15755-15757. (in Chinese))

[11] 张永欣, 宋明, 杨艳娟. 1956-2011 年华北地区气温和降水变化特征[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(2): 726-728. (ZHANG Yong-xin, SONG Ming, YANG Yan-juan. The Change Characteristic of Temperature and Precipitation in the North China during 1956 and 2011[J]. Journal of Anhui Agr. i Sci., 2013, 41(2): 726-728. (in Chinese))

[12] 李华敏. 基于小波分析理论的岩溶水文过程多时间尺度分析[D]. 天津: 天津师范大学, 2012. (LI Hua-min. Multiple Time Scales Analysis of Karst Hydrological Process Based on Wavelet Analysis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))

[13] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 515-517. (WANG Wen-sheng, DING Jing, XIANG Hong-lian. Application and Prospect of Wavelet Analysis in Hydrology[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(4): 515-517. (in Chinese))

[14] 吕翠美, 吴泽宇, 刘文立, 等. 伊河流域径流周期变化特征的小波分析[J]. 人民黄河, 2007, 29(5): 34-37. (LV Sui-mei, WU Ze-yu, LIU Wen-li, et al. Wavelet Analysis of the Characteristics of Runoff Periodic Variation in Yihe River Basin[J]. Yellow River, 2007, 29(5): 34-37. (in Chinese))

[15] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. (WANG Wen-sheng, DING Jing, LI Yue-qing. Hydrology Wavelet Analysis[M]. Beijing: Chemical Industy Press, 2005. (in Chinese))

[16] 陈克龙, 李双成, 周巧富, 等. 江河源区达日县近 50 年气候变化的多尺度分析[J]. 地理研究, 2007, 26(5): 526-533. (CHENG Ke-long, LI Shuang-cheng, ZHOU Qiao-fu, et al. Multi-Scale Study on Climate Change for Recent 50 Years in Dari County in the Source Regions of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. Geographical Research, 2007, 26(5): 526-533. (in Chinese))

[17] 李瑞平, 史海滨, 李章俊, 等. 连续小波变换在气温和降水变化分析中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 86-89. (LI Rui-ping, SHI Hai-bin, LI Zhang-jun, et al. Continue Wavelet Transform Application on Analysis of Temperature and Precipitation Variations[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(1): 86-89. (in Chinese))

[18] 张少文, 丁晶, 廖杰, 等. 基于小波的黄河上游天然年径流变化特性分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(3): 32-37. (ZHANG Shao-wen, DING Jing, LIAO Jie, et al. Analysis of Natural Annal flow Time Seris in the Upper Reach of the Yellow River Based on Wavelet Transform[J]. Journal of Sichuan University (Engineering and Science Edition), 2004, 36 (3): 32-37. (in Chinese))

[19] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961-2005 年东北地区气温和降水变化趋势. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531. (HE Wei, BU Ren-cang, XIONG Zai-ping, et al. Characteristics of Temperature and

(下转第 41 页)

电能源科学, 2010, 28(6): 16-18. (YIN Zhi-jie, GUAN Yu-hui. Research on Comprehensive Evaluation Method of Water Resources Security in Nanjing City[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(6): 16-18. (in Chinese))

[4] 许成娟, 梁川. 昆明市松华坝水源保护区水资源安全综合评价[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(1): 161-165. (XU Cheng-juan, LIANG Chuan. Comprehensive Water-quality Security Evaluation of Songhuaba Water-resource Protection Zone in Kunming[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(1): 161-165. (in Chinese))

[5] 张臻, 王龙昌, 杨松, 等. 基于 AHP 法的四川省水资源可持续利用综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 213-218. (ZHANG Zhen, WANG Long-chang, YANG Song, et al. Study on the AHP Comprehensive Evaluation of Sustainable Water Resources Utilization of Sichuan Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 213-218. (in Chinese))

[6] 曾现进, 李天宏, 温晓玲. 基于 AHP 和向量模法的宜昌市水环境承载力研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6): 200-205. (ZENG Xian-jin, LI Tian-hong, WEN Xiao-ling. Analysis on Carrying Capacity of Water Environment in Yichang City Based on AHP and Vector Norm Method[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(6): 200-205. (in Chinese))

[7] 贡力. 基于 WPI 的水安全评价体系研究[J]. 中国农村水利水电, 2010, (9): 4-7. (GONG Li. Evaluation System of Water Security Based on Water Poverty Index[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010, (9): 4-7. (in Chinese))

[8] 孙毓蔓, 夏乐天, 王春燕. 基于主成分分析的南京市水资源承载力研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(10): 74-75. (SUN Yu-man, XIA Le-tian, WANG Chun-yan. Nanjing Water Resources Carrying Capacity Research Based on Principal Component Analysis[J]. Yellow River, 2010, 32(10): 74-75. (in Chinese))

[9] 邵东国, 杨丰顺, 刘玉龙, 等. 城市水安全指数及其评价标准[J] 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 122-126. (SHAO Dong-guo, YANG Feng-shun, LIU Yu-long, et al. Urban Water Security Index and Its Evaluation Criterion[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 122-126. (in Chinese))

[10] 史正涛, 刘新有. 城市水安全研究进展与发展趋势[J]. 城市规划, 2008, 32(7): 82-87. (SHI Zheng-tao, LIU Xin-you. Progress and Trend in Urban Water Safety Study[J]. City Planning Review, 2008, 32(7): 82-87. (in Chinese))

[11] 王淑云, 刘恒, 耿雷华, 等. 水安全评价研究综述[J]. 人民黄河, 2009, 31(7): 11-13. (WANG Shu-yun, LIU Heng, GENG Lei-hua, et al. Research Review of Water Security Assessment[J]. Yellow River, 2009, 31(7): 11-13. (in Chinese))

[12] 史正涛, 刘新有, 黄英, 等. 基于边际效益递减原理的城市水安全评价方法[J]. 水利学报, 2010, 41(5): 545-552. (SHI Zheng-tao, LIU Xin-you, HUANG Ying, et al. Evaluation Method for Urban Water Safety Based on Law of Diminishing Marginal Utility[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5): 545-552. (in Chinese))

[13] 李祚泳, 汪嘉杨, 王文圣, 等. 基于广义对比加权的水安全综合指数评价[J]. 水资源保护, 2009, 25(4): 5-11. (LI Zuo-yong, WANG Jia-yang, WANG Wen-sheng, et al. Comprehensive Index Assessment Method of Water Safety Based on Weighted Method with Generalized contrast[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(4): 5-11. (in Chinese))

[14] 刘昕. 区域水安全评价模型及应用研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2011. (LIU Xin. Research on Regional Water Security Assessment Model and Its Application[D]. Shanxi: Northwest Agriculture and Forestry University of Science and Technology, 2011. (in Chinese))

[15] 丁恒康, 李祚泳, 汪嘉杨. 基于熵变加权法的水安全综合指数评价[J]. 成都信息工程学院学报, 2010, 25(3): 312-316. (DING Heng-kang, LI Zuo-yong, WANG Jia-yang. Comprehensive Index Assessment of Water Safety Based on Entropy Weight Coefficient Method[J]. Journal of Chendu Univesity of Information Technology, 2010, 25(3): 312-316. (in Chinese))

[16] 黄英, 刘新有, 史正涛, 等. 复杂系统评价指标的评价方法研究——以城市水安全为例[J]. 水文, 2009, 29(2): 45-49. (HUANG Ying, LIU Xin-you, SHI Zheng-tao, et al. Study on Assessment Methods of Evaluate Indexes for Complex System: Taking Urban Water Safety as Case[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(2): 45-49. (in Chinese))

[17] 高媛媛, 王红瑞, 许新宜, 等. 水资源安全评价模型构建与应用——以福建省泉州市为例[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2): 204-214. (GAO Yuan-yuan, WANG Hong-rui, XU Xin-yi, et al. Assessment of Water Resources Security —Case of Quanzhou City in Fujian Province[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(2): 204-214. (in Chinese))

[18] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000. (ZHAO Ke-qin. Set Pair Analysis and Its Preliminary Application[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))

(上接第 41 页)

Precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 519-531. (in Chinese))

[20] Xu Yueqing, Li Shuangcheng, Cai Yunlong. Wavelet Analysis of Rainfall Variation in the Hebei Plain[J]. Science in China Ser. D Earth Sciences, 2005, 48(12): 2241-2250.

[21] Mathevet T, Leppiller M, Mangin A. Application of Time-series Analyses to the Hydrological Functioning of an Alpine Karstic System: The Case of Bange-L' Eau Morte[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2004, 8(6): 1051-1064.

[22] 郭慧芳. 基于小波分析的径流中长期预报模型研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007. (GUO Hui-fang. Study of Long-term Ruffoff Forecast Model Based on Wavelet Transform[J]. Zhengzhou: Zhengzhou University. (in Chinese))