

文章编号:1004-4574(2013)02-0001-06

北京“7·21”暴雨引发的城市内涝灾害防御思考

顾孝天^{1,3}, 李宁^{1,2,3}, 周扬^{1,3}, 吴吉东^{1,2,3}

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 民政部/教育部 减灾与应急管理研究院, 北京 100857)

摘要:利用北京市 1951-2011 年 6-8 月逐日降雨量数据、1951-2012 年 7 月总降雨量和日最大降雨量以及 2012 年 6-7 月份降水量资料, 分析了北京市不同暴雨等级的频次分布和重现期, 利用波动和趋势双变量分析了 1951-2012 年 7 月总降雨量和日最大降雨量的稳定性水平。结果表明: 与 1951-2011 年的 6-7 月平均降雨量和降雨天数相比, 2012 年 6-7 月平均降水量属于异常多的状态, 降雨天数属于正常现象; “7·21”暴雨事件中, 2012 年 7 月 21 日和 22 日总降雨量属于百年一遇的水平; 1951-2012 年北京市 7 月总降水量和日最大降水量的波动随时间有逐渐稳定的趋势, 即降水的稳定性逐渐增强。虽然目前北京市排水系统设计的是 1~3 a 一遇水平, 很难抵御“7·21”暴雨事件, 基于对近 60 a 降水数据的分析, 是否需要提高排水系统能力还需要对暴雨内涝灾害风险和排水系统能力所需成本进行进一步分析。

关键词:“7·21”暴雨; 城市内涝; 降水频次; 重现期; 经验模态分解

中图分类号: P426.615

文献标志码: A

Thinking on urban waterlogging disaster defense initiated by “7·21” extraordinary rainstorm in Beijing

GU Xiaotian^{1,3}, LI Ning^{1,2,3}, ZHOU Yang^{1,3}, WU Jidong^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of EOM, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs and Ministry of Education, Beijing 100875, China)

Abstract: With daily precipitation data of Beijing from 1951 to 2011 (from June to August) and June and July precipitation material in 2012, the frequency distribution and return period of different rain levels were analyzed herein. The total rainfall and the maximum rainfall in July during 1951-2012 were also analyzed using the fluctuation and trend of precipitation. Result show that: In June and July 2012, the monthly average rainfall is in unusually high state and the rain days are in the normal range; in the “7·21” storm events, the rainfall reached a-hundred-year return period level on July 21-22, 2012; the fluctuation of maximum daily precipitation and total precipitation in July from 1951 to 2012 in Beijing has a gradually stable trend of gradually increasing precipitation. Although the present Beijing's drainage system design is 1-3 years return period level and is difficult to resist “7·21” storm events, however, based on the recent sixty years precipitation data analysis, whether to improve drainage ability still need further analysis of the heavy rains waterlogging disaster risk and the required cost in improving the drainage system capability.

Key words: “7·21” extraordinary rainstorm; water-logging; precipitation frequency; return period; empirical Mode Decomposition

收稿日期: 2012-11-25; 修回日期: 2012-12-21

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2012CB955402); 国家自然科学基金项目(41171401); 科技部国际科技合作项目(2012DFG20710); 国家自然科学基金项目(41101506)

作者简介: 顾孝天(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事自然灾害研究. E-mail: gxt890409@163.com

通讯作者: 李宁, 教授. E-mail: ningli@bnu.edu.cn

2012年7月21日,北京“7·21”暴雨造成的城市内涝灾害问题引起了社会对城市基础设施设防水平的广泛讨论,此次特大暴雨引发山区泥石流等灾害,对城市交通等造成了严重影响,导致至少77人死亡以及60 000人被迫撤离,而直接经济损失估计约100亿元人民币(约合16亿美元)^[1]。

国内学者对北京“7·21”暴雨内涝灾害做了研究,Qiu^[1]认为快速发展的城市化是这次暴雨内涝灾害的重要原因;而Sang等^[2]认为主要是因为地形的原因造成了此次巨大的内涝灾害。另外,关于城市内涝灾害的研究也是目前国内外学者的研究重点,尹占娥等^[3]提出了基于情景模拟的城市暴雨内涝灾害的风险评估方法;田心如等^[4]采用数学统计方法分析了江苏省50 a来梅雨数据,对江苏省梅雨及其灾害影响进行了分析评估;王博等^[5]等对暴雨灾害风险评估的研究现状做了比较详细的总结。

暴雨内涝灾害主要是由于降雨量过多、地势低洼以及积水不能及时排出所形成的。北京市的总体地势是北高南低,此次暴雨正好集中在西南部地势偏低的地区,例如积水严重的莲花桥。除了城市化进展和地形因子造成暴雨内涝灾害发生以外,暴雨的主要致灾因子(降水量)到底起到了什么样的作用?北京市的城市灾害管理中,基础设施建设方面是否需要提高排水系统设防水平,提高到什么水平?这些问题都需要进行深入的研究。因此,本文主要通过北京市降雨量的频次、不同等级暴雨的重现期以及降雨量的不稳定性进行研究,分析评估北京市暴雨内涝灾害的风险水平,这样对如何合理地制订城市排涝减灾及发展规划具有非常重要的指导作用。

1 背景

1.1 致灾因子

我国属于季风气候,东部降水呈现出了明显的地区和季节性差异,陶诗言^[6]指出:当季风北推到华北这带地区时,形成华北雨季。因此,北京的多雨时段集中在夏季(6-8月),容易出现雨量集中、强度较大的降雨过程。

2012年7月,中高纬大气环流呈“两高一低”或“两脊一槽”的状态,北方处在“槽”的位置,冷空气易南下,副热带高压将水汽输送过来,在冷空气东移南下和较强天气系统的作用下水汽产生剧烈上升运动,加上大气层结极不稳定,上升运动就越发剧烈,水汽凝结速度加快,同时空气近饱和,在这种有利于降水过程的天气系统影响下,北京发生了“7·21”特大暴雨事件。

1.2 孕灾环境

随着北京城市化进程的加快,高密度的城市资产分布使得北京市承灾体的暴露度增强,暴雨灾害导致的直接损失将增大,由于暴雨内涝灾害导致城市交通、商贸活动中断,使得以交通和经济活动等为主体的城市间接经济损失比重也不断上升。由于城市化发展,城市对地下空间的开发,一旦发生内涝,造成的损失将非常大;另外,史培军指出,由于北京地区自身北高南低地形的存在,北京南部地势偏低地区产生内涝灾害的风险加剧^[7]。

以上分析表明,从北京市城市化进展和地形的角度分析表明:北京市属于暴雨内涝灾害发生的高危险性地区。

2 数据来源

北京市的雨季主要集中在夏季(6-8月),所以本文用1951-2011年的夏季(6-8月)逐日降雨量资料分析不同暴雨等级频次分布和重现期;利用2012年6月和7月总降雨量和降雨天数分析“7·21”暴雨事件与历史同期比较的级别;北京“7·21”暴雨发生在2012年7月份,本文通过分析1951-2012年62年的7月总降水量和日最大降水量的演变趋势和波动特点识别夏季降水的稳定性。

北京市1951-2011年61 a夏季(6-8月)逐日降雨量、1951-2012年62 a的7月总降水量和日最大降水量资料以及2012年6-7月降雨资料是由国家气象信息中心提供的《中国地面国际交换站气候资料年值数据集》和《中国地面国际交换站气候资料日值数据集》^[8]。

3 研究方法

3.1 频次分布和重现期计算

频次分布是指将一组数据资料将观察值大小分为不同组段,然后将观察值归纳到各组段中,最后清点各组段的观察值个数(称频数),用表格形式表示,称为频数分布表。

中国气象局将大雨定义为 24 h 降雨量 ≥ 25 mm 的降水事件。本文按 25 mm 为一个量级将暴雨以上降水划分为 9 个等级^[8],得到暴雨不同等级内的出现频次。利用降水等级和频次的对应关系,得到降水等级-频次经验分布函数,而降水的重现期通常是不同等级降水出现概率 P 的倒数,即

$$T = 1/n \times \text{Num}. \quad (1)$$

式中; n 为计算频次;Num 为文中所求的年数,本文中取的是 61 年数据,即为 Num = 61。

3.2 经验模态分解

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)是由 Huang 等^[9]于 1998 年提出的,适用于分析非线性、非平稳信号时间序列,Wu^[10]等提出经验模态分解方法分析非平稳序列具有很明显的优势。这种方法将各尺度的气候信号从原始数据中分离出来,得到时间序列的高频、中频和低频信号,从而有利于对气候信号进行不同尺度的分析。利用得到的趋势和波动双变量分析时间序列形态确定这个地区的致灾因子的稳定性水平。

EMD 法通过对一个复杂的信号进行平稳化处理,其结果是将不同尺度或层次的波动或趋势分量从原序列中提取出来,得到若干具有不同尺度的本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)分量。

$X(t)$ 为原始时间序列,通过 EMD 法分解最终可以将原始时间序列表示为所有 IMF 及剩余部分之和:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t). \quad (2)$$

这里 n 为所提取的 IMF 的个数; $r_n(t)$ 属于扰动项; $C_i(t)$ 是分解得到的 IMF 分量, $\sum C_i(t) = H_t + P_t$ 。

要分析出时间序列的振幅波动和趋势变化,首先应从分解得到的不同尺度的 IMF 分量中,挑选出与原气候序列相关显著地分量。利用经验模态分解数据可以得到 n 个 IMF 分量(图略),它们分别表示高低频信号,通常 IMF1 分量表示了 1~2 a 周期振荡,IMF2 表示的是 3~5 a 周期振荡,依此类推,IMFn 表示的是长时间尺度的周期振荡。

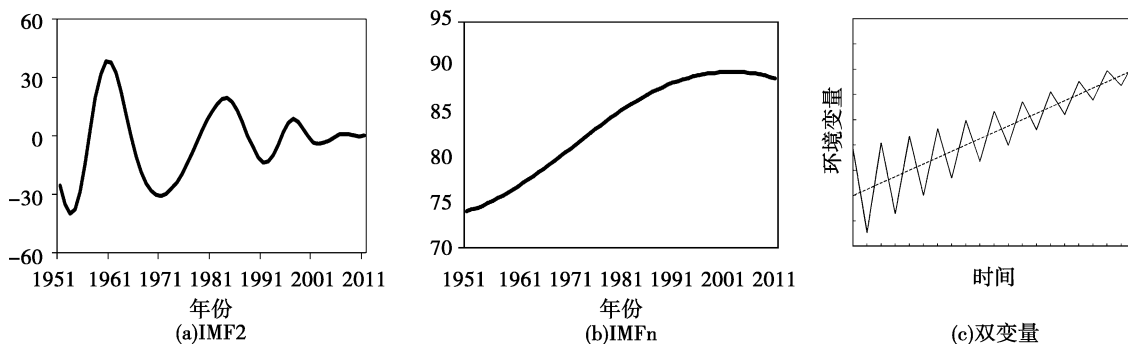


图1 EMD 分解的 IMF2 分量(a)和 IMFn(b)及其双变量(c)的结合

Fig. 1 Components IMF 2 and IMFn by EMD and their bivariate

根据分析目的不同,选择两个 IMF 分量分别表示变量的趋势项和波动项,如图 1 所示。图 1(a)和 1(b)分别为某一站点降水时间序列通过 EMD 分解得到的 IMF2 和 IMFn 分量,反映了变量的振幅波动随时间减小,趋势随时间增加,而图 1(c)为振幅和趋势双变量结合的模式形态。

4 北京市降水特征

4.1 2012 年 6-7 月降水量和降雨天数

1951-2011 年的 61 a 间,北京 6-7 月的平均降雨量为 127 mm,2012 年 6-7 月平均降水量为 194 mm,

比 61 a 平均降雨量多 67 mm。从降雨天数上来看,61 a 的 6-7 月的降雨天数累计为 23 d,2012 年降雨天数累计为 25 d,降雨天数反应 2012 年降水属于相对正常的现象。因此,与 1951-2011 年的平均降水量相比,2012 年 6-7 月平均降水量属于异常多的状态;与 1951-2011 年的平均降水天数相比,2012 年 6-7 月降水天数属于正常值。

4.2 “7·21”暴雨等级与重现期分析

图 2 表示降水频次与降水等级的对应关系,通过分析图 2(a)可以发现,随着降水等级的增大,暴雨出现频次有很明显减小的趋势。将频数进行对数处理后的结果表明:除了最大两个降水等级(8 和 9 级)出现例外的情况,1-7 级的降水等级和频次的对数之间存在着较好的线性关系(图 2(b)),其降水等级与频次分布经验式为:

$$\ln(N) = 6.057 - 0.888D. \tag{3}$$

式中: D 为暴雨等级, N 为频数。

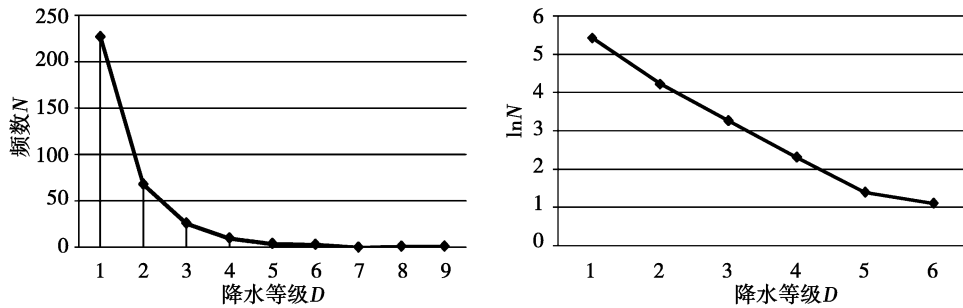


图 2 降水频次与降水等级的对应关系(a)和降水频次对数与降水等级的线性关系(b)

Fig. 2 Relationship between rainfall frequency and rainfall grade (a) as well as linear relationship between logarithmic rainfall frequency and rainfall grade

利用式(1)和(3)可以计算得到北京市各等级降水的频次和重现期(见表 1)。

基于对 1951-2011 年 6-8 月夏季逐日降水量频次分析,得到不同暴雨等级的重现期。从降水总量分析此次“7·21”特大暴雨,7 月 21 日和 22 日的全市平均降雨量达到 160mm,对应表 1 中各降雨等级的重现期发现,此次暴雨等级属于 7-8 级,属于百年一遇的降水过程。因此,通过对降水过程进行频次和重现期的分析,可以发现“7·21”暴雨在降雨等级上属于非常罕见的暴雨事件。

表 1 北京市暴雨等级和频次分布

Table 1 Distribution of rainfall grade - frequency in Beijing Municipality

等级, D	降水范围/mm	出现频次/ N	计算频次	平均重现期/a
1	25 ~ 49.9	227	175.739	0.347
2	50 ~ 74.9	68	72.313	0.844
3	75 ~ 99.9	26	29.755	2.050
4	100 ~ 124.9	10	12.244	4.982
5	125 ~ 149.9	4	5.038	12.108
6	150 ~ 174.9	3	2.073	29.426
7	175 ~ 199.9	0	0.853	71.513
8	200 ~ 224.9	1	0.351	173.795
9	225 ~ 249.9	1	0.144	422.367

4.3 1951-2012 年降水趋势分析

图 3 是北京市 1951-2012 年 62 a 间的 7 月总降水量和日最大降水量的演变趋势。由于夏季平均降水和日最大降水量随时间的演变趋势与 62 a 间的 7 月份降水量的演变趋势类似,图略。

从降水量的线性趋势可以看出,无论是夏季平均降水量还是夏季最大降水量都有随时间的下降趋势,夏季总降水量数据以 1.33 mm/10 a 的趋势减少,而夏季最大降水量的下降趋势为 9.78 mm/10 a;而分析 6-8

月总降水量和日最大降水量的线性趋势,除了 6 月总降水量和日最大降水量有微小的增大趋势(0.214 mm/10 a 和 0.489 mm/10 a),7 月和 8 月总降水量和日最大降水量都有比较明显的下降趋势,其中,7 月、8 月总降水量和日最大降水量的下降趋势通过了 95% 的显著性检验,分别为 -8.876 mm/10 a, -5.049 mm/10 a, -28.688 mm/10 a 和 -7.233 mm/10 a。

北京市夏季降水趋势主要以下降为主,由此推断发生强降水的可能性有减小的趋势。

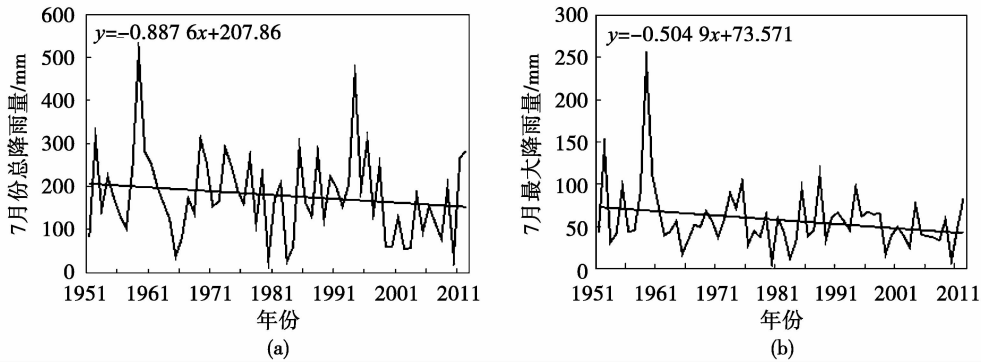


图 3 北京市 7 月总降水量(a)和日最大降水量(b)的演变趋势
Fig. 3 Evolution trend of total rainfall and maximum daily rainfall in July in Beijing Municipality

4.4 1951 - 2012 年降水趋势和波动双变量分析

利用 EMD 法对北京市 1951 - 2012 年 7 月总降水量和日最大降水量资料进行信号分解,而北京市 7 月日最大降水量资料通过 EMD 法分解得到的结果如图 4 所示,降水数据被分解为 5 个本征模函数。

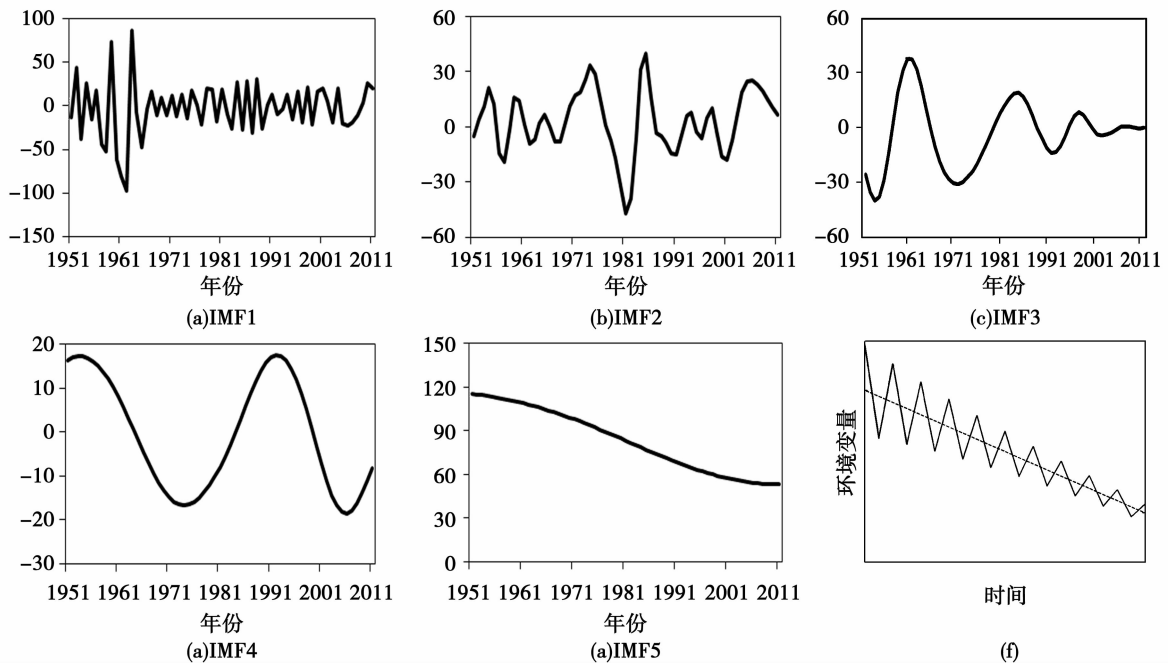


图 4 EMD 分解的北京市 7 月日最大降水量的 IMF 分量
Fig. 4 Component IMF decomposed by EMD for maximum daily rainfall in July in Beijing Municipality

图 4 中 IMF1 分量 4(a)、IMF2 分量 4(b)、IMF3 分量 4(c)、IMF3 分量 4(d)和 IMF5 分量 4(e)分别表示 1 ~ 2 a、3 ~ 10 a 和 10 ~ 15 a、15 ~ 20 a 以及 60 a 左右的周期降水的波动情况,可见降水的波动趋势均由大变小。国内外很多学者通过研究发现^[12],我国的降水主要受到厄尔尼诺 - 南方涛动周期变化的影响,降水量的主要周期与 ENSO 事件的周期类似,穆明权等用不同资料分析 ENSO 事件,研究表明^[13], 2 ~ 8 a 是 ENSO 的一个明显的振荡周期,本文中 IMF2 分量(图 4(b))表示的 3 ~ 10 a 周期与 ENSO 周期比较一致,所以选择 IMF2 分量作为原气候序列的主要物理信号分析降水振幅波动特征,选 IMF5 分量(图 4(e))反映原气候序列的趋势变化情况,结合 IMF2 和 IMF5 变量的趋势和波动双变量的变化情况得出降水变量的形态(图 4

(f))。联合变量的形态在趋势上降水量随时间逐渐减小,在波动上降水量是由大变小的。因此,趋势和波动的联合形态综合地表现出北京市 7 月日最大降雨量的稳定性逐渐增大。

5 结论与讨论

本文从北京市 6-7 月平均降雨量和降雨天数、北京市不同暴雨等级重现期、降水量的线性趋势分析以及波动和趋势双变量经验模态分解这四个角度分析北京市近 60 a 的降雨量。首先,从月平均降雨量和降雨天数来说,与 1951-2011 年 61 a 来 6-7 月平均降雨量和降雨天数相比,2012 年 6-7 月平均降水量属于异常多的状态,而降雨天数属于正常现象;其次,从北京市不同暴雨等级的重现期分析来看,2012 年 7 月 21 日和 22 日总降雨量属于百年一遇的水平;再次,从 1951-2012 年 62 a 间北京市 7 月总降水量和日最大降水量的趋势和波动双变量分析显示,降水量的振幅波动随时间逐渐减小,降水趋势随时间逐渐减小,即降水的稳定性逐渐增加。

因此,基于暴雨内涝灾害致灾因子(降雨量)的稳定性逐渐增大,而“7·21”特大暴雨属于一次极为罕见的事件(百年一遇)。对于是否需要提高北京的排水系统能力,还需要对提高排水系统的成本和再次发生暴雨内涝灾害风险进行比较分析。

参考文献:

- [1] Qiu J. Urbanization contributed to Beijing storms [N]. *Nature News & Comment*, 2012-11-08(6).
- [2] Sang Y K, Wang Z G, Liu C M. What factors are responsible for the Beijing Storm [J]. *Nat Hazards*, 2013, 65(1): 2399-2400.
- [3] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. *地理学报*, 2010, 65(5): 553-562.
YI Zhane, XU Shiyuan, YIN Jie, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 553-562. (in Chinese)
- [4] 田心如, 姜爱军, 高苹, 等. 江苏省典型年梅雨洪涝灾害对比分析[J]. *自然灾害学报*, 2005, 14(5): 8-13.
TIAN Xinru, JIANG Aijun, GAO Ping, et al. Contrastive analysis of plum rains floods in typical years in Jiangsu Province [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(5): 8-13. (in Chinese)
- [5] 王博, 崔春光, 彭涛, 等. 暴雨灾害风险评估与区划的研究现状与进展[J]. *暴雨灾害*, 2007, 26(3): 281-286.
WANG Bo, CUI Chunguang, PENG Tao, et al. Advance and the status of the research on rainstorm disaster assessment and regionalization [J]. *Torrential Rain and Disaster*, 2007, 26(3): 281-288. (in Chinese)
- [6] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 气象出版社, 1980: 1-7.
TAO Shiyuan. *China Heavy Rains* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1980: 1-7. (in Chinese)
- [7] 张璐晶. 内涝责任在城市建设者[N]. *中国经济周刊*, 2012(30).
ZHANG Lujing. Water-logging Responsibility in the City Builder [N]. *China Economic Weekly*, 2012(30). (in Chinese)
- [8] 解以扬, 韩素芹, 由立宏, 等. 天津市暴雨内涝灾害风险分析[J]. *气象科学*, 2004, 24(3): 342-349.
XIE Yiyang, HAN Suqin, YOU Lihong, et al. Risk Analysis of Urban Rainfall Water-logging in Tianjin City [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2004, 24(3): 342-349. (in Chinese)
- [9] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non Stationary Time Series Analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society London*, 1998, 454: 903-995.
- [10] Wu Z H, Huang N E, Long S R, et al. On the Trend, Detrending, and variability of nonlinear and non stationary time Series [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(38): 14889-14894.
- [11] Ropelewski C F, Halpert M S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Nino/Southern oscilltion [J]. *Monthly Weather Review*, 1987, 115: 1606-1626.
- [12] 穆明权, 李崇银. 大气环流的年代际变化-观测资料的分析[J]. *气候与环境研究*, 2000, 5(3): 233-241.
MU Mingquan, LI Chongyin. Interdecadal Variations of Atmospheric Circulation-Observational Analyses [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(3): 233-241. (in Chinese)