

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.04.015

上海市不同历时暴雨组合概率研究

曾 明^{1,2}, 张雨凤¹, 李琼芳^{1,2}, 任锦亮³, 虞美秀^{1,2}, 马俊超^{1,2}, 鞠 彬^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学国际河流研究所, 江苏 南京 210098;
3. 盐城市水利勘测设计研究院, 江苏 盐城 224000)

摘要:基于上海市徐家汇站 1960—2011 年的日降雨资料,分析上海市年最大 1d 和 3d 降水量年际变化和年代际变化特性;择优选择 GH Copula 函数构建了年最大 1d 与 3d 降水量的联合分布模型,并推算它们的同现重现期和组合风险概率。结果表明:年最大 1d 和 3d 降水随时间呈增加趋势,自 20 世纪 70 年代开始其均值随年代增加;年最大 1d 和 3d 设计暴雨同频遭遇风险率在 75% ~ 85% 之间,且同现风险率随年最大 1d 设计暴雨值增大而增加。在设计上海市防洪排涝标准时若考虑最大 1d 和 3d 降水量的遭遇组合,有利于提升防洪排涝能力,保障防洪安全。
关键词:年最大 1d 降水量;年最大 3d 降雨量;暴雨频率;Copula 函数;联合概率分布;同现风险率;上海市

中图分类号:TV125 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)04-0082-05

Study on probability for rainstorm combinations during different durations in Shanghai City

ZENG Ming^{1,2}, ZHANG Yufeng¹, LI Qiongfang^{1,2}, REN Jinliang³, YU Meixiu^{1,2},
MA Junchao^{1,2}, JU Bin^{1,2}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Institute of International River Research, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Yancheng Surveying and Design Institute of Water Resources, Yancheng 224000, China)

Abstract: Based on the daily precipitation at Xujiahui station from 1960 to 2011, interannual variation and interannual changing characteristics of annual 1-day and 3-day maximum rainfall were analyzed. The Gumbel-Hougaard Copula function which was selected preferentially was used to build the joint distribution model of annual 1-day and 3-day maximum rainfall, then the co-occurrence return periods and the risk probability were calculated. The result showed that the annual 1-day and 3-day maximum rainfall had an increasing trend with time passed by. In addition, since the 70s their mean values also increased with years. The encounter risk rate of annual 1-day and 3-day design storm rainfall under the same frequency ranged from 75% to 85%, and the co-occurrence risk rate increased with the increase in annual 1-day design storm rainfall. If people consider the joint probability distribution of annual 1-day and 3-day rainfall for designing the flood control and drainage standard for Shanghai, the capability of flood control and drainage will be improved and flood control safety will be guaranteed.
Key words: annual 1-day maximum rainfall; annual 3-day maximum rainfall; rainstorm frequency; Copula function; joint probability distribution; co-occurrence risk rate; Shanghai City

随着城市化进程的加快,城市洪涝灾害问题日益突出。城市化形成的热岛效应、阻障效应、凝结核效应导致城区降雨模式和分布发生显著变化。暴雨强度和频次增加,再加上现有的城市排水设施标准

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41171220); 国家科技支撑计划(2012BAB03B03); 水利部公益性行业科研专项(201001069, 2011101052)
作者简介:曾明(1991—),女,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail:zm199173@qq.com
通信作者:李琼芳,教授。E-mail:li_qiongfang@hotmail.com

低,满足不了城市排泄洪水要求,加剧了洪涝灾害持续的时间^[14]。若遭遇不同历时的极端降雨,会进一步加剧洪涝灾害的严重程度和持续时间。为提升城市防洪排涝能力提供科学依据,目前已有学者开展了不同历时暴雨的联合概率分布研究,如许月萍等^[5]应用几种 Copula 函数模拟了浙江省云港流域不同历时降雨量的二元联合分布,减小了水文频率分析中的不确定性;张娜等^[6]使用年最大 1 d 和 7 d 降水推求了隔河岩水利枢纽工程的设计暴雨,全面描述了暴雨事件;陈子桑等^[7]基于 Copula 函数构建了广州市最大 1 d 降水量与历时 3 d 降水量的联合分布模型,验证了其可行性。随着全球气候变化、海平面上升、河口风暴潮加剧以及流域经济社会发展、城镇化率提高、下垫面改变、地面沉降等多重因素影响,上海市热岛和雨岛效应明显,降雨集中、强度增大、历时缩短,局部暴雨频繁发生和时空分布不均等造成了城市道路、低洼地及地下空间积水日益严重,上海市的防洪形势越来越严峻。本文选择具有重要战略地位的上海市为研究对象,探讨不同历时极端降雨的时程变化规律和遭遇组合概率。研究成果可以为上海市防洪减灾系统的建设提供科学依据,从而保障上海市的防洪安全。

1 资料与方法

根据上海气象局提供的徐家汇气象站 1960 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日共 52 a 的日降雨资料,并由此得到年最大 1 d 降水量(W_1)和年最大 3 d 降水量(W_3)序列;采用线性倾向估计法^[8]、Mann-Kendall 趋势分析方法^[8,9]分析上海市年最大 1 d 和 3 d 降水量的年际变化趋势和均值随年代变化特性;选择 P-Ⅲ型分布曲线对年最大 1 d 和 3 d 降水量时间序列进行了频率分析,并采用 Pearson 线性相关系数 ρ 、Kendall 秩相关系数 τ 和 Spearman 秩相关系数 ρ_s ^[10-11]分析它们的相关性,基于 AIC 信息准则和离差平方和最小 (OLS) 准则法^[10-12]选择拟合最优的 Copula 函数构建联合概率分布,计算得到年最大 1 d 和 3 d 设计暴雨遭遇的组合概率、同现风险率及同现重现期。

2 结果与分析

2.1 年最大 1 d 和 3 d 暴雨变化特性分析

图 1 为徐家汇站 1960—2011 年最大 1 d 和 3 d 降水量年际变化图。由图 1(a)中可知,上海地区年最大 1 d 降水量总体上呈上升趋势,线性倾向估计增幅为每 10 年 6.8 mm, M-K 统计量为 1.77,通过置信度 90% 的显著性检验,表明上升趋势较显著。最

高值出现在 2001 年,达到 278 mm。由图 1(b)可知,年最大 3 d 降水量线性倾向估计增幅为每 10 年 7.6 mm, M-K 统计量为 1.28,未通过 90% 置信度的显著性检验,表明上升趋势不如年最大 1 d 降水量的显著,但线性倾向估计增幅略高于年最大 1 d 降水的增幅。

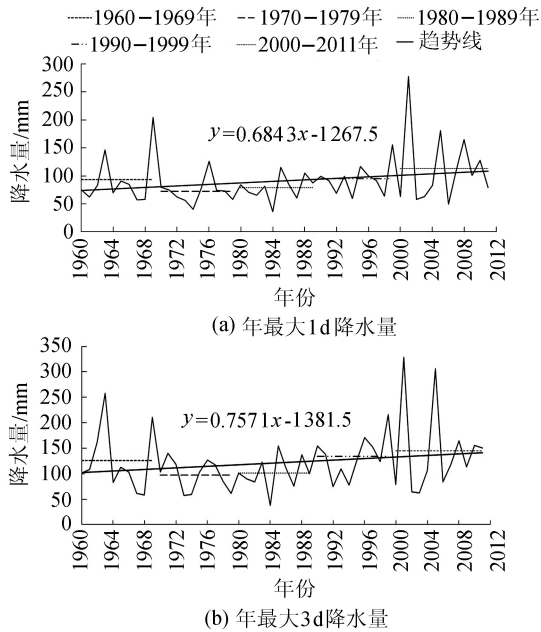


图 1 年最大 1 d 和 3 d 降水量时程变化趋势

图 1(a)显示,1960 年代年最大 1 d 降水量均值较高,1970 年代稍有下降,之后随年代递增明显增加,其中 2000 年代年最大 1 d 降水量均值明显高于其他年代。年最大 3 d 降水量年代际变化特性与年最大 1 d 降水量的相似(图 1(b)),但 1970 年代年最大 3 d 降水量均值明显低于 1960 年代,1980 年代较 1970 年代略有增加,1990 年代增加明显,2000 年代又进一步增加。

上述分析表明,年最大 1 d 和 3 d 降水总体上均呈现上升趋势,若二者遭遇组合,可能更不利于上海市防洪。

2.2 年最大 1 d 和 3 d 设计暴雨组合概率

2.2.1 边缘分布的确定

徐家汇站年最大 1 d 降水量(W_1)和年最大 3 d 降水量(W_3)均服从 P-Ⅲ型分布,运用矩法估计总体分布的 3 个参数的初值 $\bar{x}$ 、 C_v 、 C_s ,并采用离差平方和最小准则对其进行优化,得到最终确定的参数值,并通过了显著水平($\alpha=0.05$)的 K-S 检验。年最大 1 d 和 3 d 降水量最优 P-Ⅲ曲线的统计参数及不同频率下的设计值结果见表 1。

2.2.2 联合分布计算

采用常用的 Pearson 线性相关系数 ρ 、Kendall 秩相关系数 τ 和 Spearman 秩相关系数 ρ_s 分析了年最

表1 年最大1d和3d降水量设计值及统计参数

设计值 <i>P</i> /%	年最大1d		年最大3d	
	参数	降水量/mm	参数	降水量/mm
50		75.8		100.7
20	$E_x=88.9$	118.5	$E_x=116.7$	154.8
10	$C_v=0.52$	149.7	$C_v=0.5$	193.8
5	$C_s=1.82$	180.6	$C_s=1.75$	232.1
2	$C_s/C_v=3.5$	220.9	$C_s/C_v=3.5$	282.0
1		251.2		319.4
0.1		351.0		442.1

大1d和3d降水量的相关性,其结果分别为 $\rho=0.890$ 、 $\tau=0.699$ 和 $\rho_s=0.858$,可看出 W_1 和 W_3 之间存在较强的正相关性,可选用GH Copula、Clayton Copula或Frank Copula函数构建联合分布模型^[13]。采用相关性指标法^[14]估计Copula函数的参数,计算得到上述3种Copula函数的 θ 参数值分别为: $\theta_{GH}=3.3223$ 、 $\theta_{Clayton}=4.6445$ 和 $\theta_{Frank}=11.3660$ 。图2点

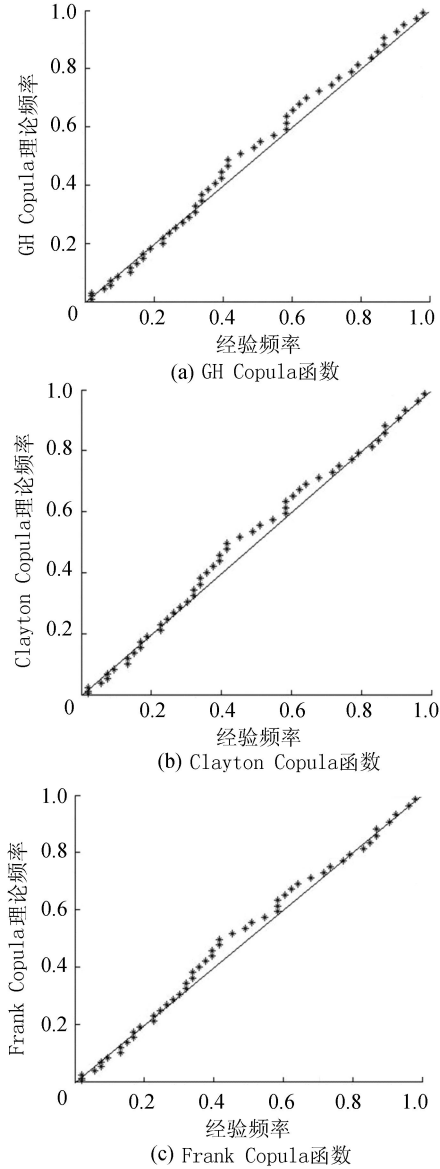


图2 W_1 和 W_3 经验频率与不同函数理论频率的拟合

绘了 W_1 与 W_3 的经验联合频率值和由上述3种Copula函数分别计算得到的理论联合频率值的相关关系,点据较均匀地分布在45°线附近,且相关系数均大于0.99(表2)。表2给出了基于AIC信息准则和离差平方和最小(OLS)准则法^[10-12]对3种Copula函数拟合优度的评价结果,AIC和OLS值越小,表明Copula函数拟合越好。所选3种Copula函数均通过了显著水平的K-S拟合检验,表明3种Copula函数均适用于本研究。鉴于GH Copula强调两变量间的上尾相关性,适用于分析不同历时暴雨的相关关系,因此文中优先选用GH Copula函数构建 W_1 和 W_3 的联合分布模型。基于GH Copula构建的 W_1 和 W_3 的联合分布函数和密度函数如下所示:

$$F(w_1, w_3) = \exp \left\{ - \left[(1 - \ln F_{W_1}(w_1))^{3.3223} + (-\ln F_{W_3}(w_3))^\theta \right]^{1/3.3223} \right\} \quad (1)$$
$$f(w_1, w_3) = F(w_1, w_3) \cdot \frac{\left[(-\ln F_{W_1}(w_1))(-\ln F_{W_3}(w_3)) \right]^{2.3223}}{F_{W_1}(w_1)F_{W_3}(w_3)} \left[(-\ln F_{W_1}(w_1))^{3.3223} + (-\ln F_{W_3}(w_3))^{3.3223} \right]^{-1.398} \quad (2)$$

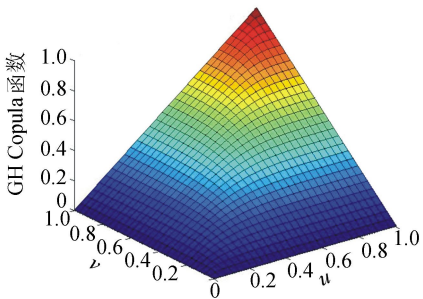
根据上述公式绘制得到了 W_1 和 W_3 的联合分布和密度函数图(图3)。

表2 相关系数、拟合优度指标和K-S检验统计量计算结果

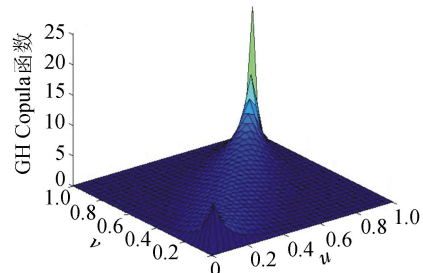
函数类型	相关系数 <i>r</i>	拟合优度指标		K-S 检验统计量 <i>D</i>
		AIC 值	OLS 值	
GH Copula	0.9973	-238.40	0.0991	0.0712
Clayton Copula	0.9973	-237.74	0.0997	0.0682
Frank Copula	0.9960	-238.20	0.0993	0.0813

2.2.3 重现期与风险率计算结果与分析

主要分析了当年最大1d和3d降水量同时超过某一量级的情况,这是对上海市防洪威胁最大、最不利的情形之一,此时的风险率称为同现风险率,记为 $P_{\cap}(w_1, w_3)$,其对应重现期为同现重现期,记为 $T_{\cap}(w_1, w_3)$ 。表3中给出了 W_1 和 W_3 同现重现期的计算结果。由表3可以看出,单变量 W_1 和 W_3 重现期分别为2a时,二者遭遇的同现重现期为2.3a; W_1 和 W_3 重现期分别为100a时,二者遭遇的同现重现期为130a; W_1 和 W_3 重现期分别为1000a时,二者遭遇的同现重现期为1301.8a。可见同频率条件下变量 W_1 和 W_3 联合分布的同现重现期高于单变量的重现期。由此表明,传统以单变量的重现期作为设计暴雨的设计标准要比以联合分布的同现重现期作为设计暴雨的设计标准偏低。如果采用联合设计标准,更有利于提升上海市的防洪能力。



(a) 联合分布函数



(b) 联合密度函数

图3 W_1 和 W_3 的 GH Copula 联合分布和密度函数

表3 不同频率年最大1 d 和3 d 降水量的同现重现期^a

设计 频率/ %	同现重现期						
	$P=50\%$	$P=20\%$	$P=10\%$	$P=5\%$	$P=2\%$	$P=1\%$	$P=0.1\%$
50	2.3	5.1	10.0	20.0	50.0	100.0	1000.0
20	5.1	6.3	10.5	20.2	50.0	100.0	1000.0
10	10.0	10.5	12.8	21.1	50.3	100.1	1000.0
5	20.0	20.2	21.1	25.8	51.7	100.7	1000.0
2	50.0	50.0	50.3	51.7	64.9	106.0	1000.3
1	100.0	100.0	100.1	100.7	106.0	130.0	1001.4
0.1	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.3	1001.4	1301.8

注： P_1 、 P_3 分别表示1 d、3 d 最大降水量的设计频率。

W_1 和 W_3 的同现风险率 $P(W_3 \geq w_3 | W_1 \geq w_1)$ ，即年最大1 d 降水量大于特定设计值条件下年最大3 d 降水量超过设计值的风险率。表1 给出了年最大1 d 降雨7 个设计暴雨的设计标准值：75.8 mm、118.5 mm、149.7 mm、180.6 mm、220.9 mm、251.2 mm、351.0 mm 对应重现期分别为2 a、5 a、10 a、20 a、50 a、100 a、1000 a。表4 给出了年最大1 d 降雨和3 d 降雨不同设计频率组合的同现风险率。由表4 可以看

表4 不同设计暴雨组合的同现风险率

设计暴 雨组合/ mm	同现风险率						
	$W_1=75.8\text{ mm}$	$W_1=118.5\text{ mm}$	$W_1=149.8\text{ mm}$	$W_1=180.6\text{ mm}$	$W_1=220.9\text{ mm}$	$W_1=251.2\text{ mm}$	$W_1=351\text{ mm}$
100.7	0.851	0.988	0.998	1	1	1	1
154.8	0.395	0.798	0.957	0.992	0.999	1	1
193.8	0.200	0.478	0.783	0.949	0.994	0.999	1
232.1	0.100	0.248	0.475	0.775	0.967	0.993	1
282.0	0.040	0.100	0.199	0.387	0.771	0.943	1
319.4	0.020	0.050	0.100	0.199	0.472	0.769	0.999
442.1	0.002	0.005	0.010	0.020	0.050	0.100	0.768

注：斜体数字表示风险概率。 W_1 、 W_3 分别表示1 d、3 d 的最大设计暴雨。

出，同频率 W_1 和 W_3 遭遇的风险率很高，重现期为2 a 的 W_1 和 W_3 遭遇的同现风险率达到85%，不过其值随着重现期的增大而有所减少，但重现期均为千年一遇的二者同现风险率仍然大于75%。由表4 也可以看出，对于某一设计频率的 W_3 值，随着年最大1 d 降雨设计频率的减少（即设计暴雨值的增大），两者遭遇的同现风险率也随之加大。

3 结 论

对上海市近50 年来年最大1 d 和3 d 暴雨的变化特征以及二者不同设计频率的组合概率进行了研究，得出主要结论如下：

a. 上海地区年最大1 d 和年最大3 d 降水量均呈上升趋势，其中年最大1 d 降水量上升趋势更为显著，1970 年代开始两者均值随年代增加。表明未来上海市的防洪可能面临着更为严峻的形势，有必要提升上海地区的防洪排涝标准。

b. 本文使用P-Ⅲ型分布对上海市年最大1 d 和3 d 降水量进行了频率分析，并计算得到不同重现期的设计值。基于GH Copula、Clayton Copula 和Frank Copula 3 种函数构建了年最大1 d 和3 d 降水量的二维联合分布模型，结果表明选GH Copula 函数拟合最优。

c. 同频率条件下联合分布的同现重现期高于单变量的重现期，表明传统以单变量的重现期作为设计暴雨的设计标准偏低。若采用联合分布的同现重现期作为设计暴雨的设计标准，有利于提升上海市的防洪排涝标准。相同频率下的年最大1 d 和3 d 设计暴雨遭遇的同现风险率在75%~85%之间变化，但随重现期增大而减小；对于某一设计频率的年最大3 d 降水量，随着年最大1 d 降雨设计频率的减少（即设计暴雨值的增大），两者遭遇的同现风险率也随之加大。

参考文献：

[1] 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.（YIN Zhan’e, 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））

[2] 周乃晟，袁雯. 上海市暴雨地面积水的研究[J]. 地理学报，1993，48（3）：262-2711.（ZHOU Naicheng, YUAN Wen. The Study on storm-born surface water accumulation in downtown area of Shanghai [J]. Acta Geographica Sinica, 1993，48（3）：262-2711.（in Chinese））

- [3] 房国良,高原,徐连军,等. 上海市降雨变化与灾害性降雨特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(10): 1270-1273. (FANG Guoliang, GAO Yuan, XU Lianjun, et al. Analysis of precipitation change and the characteristics of disaster rainfalls in Shanghai [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(10): 1270-1273. (in Chinese))
- [4] 贺芳芳,赵宾科. 近30年上海地区暴雨的气候变化特征[J]. 地球科学进展, 2009, 24(11): 1260-1267. (HE Fangfang, ZHAO Bingke. The Characteristics of climate change of torrential rains in Shanghai region in recent 30 years[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(11): 1260-1267. (in Chinese))
- [5] 许月萍,童杨斌,富强,等. 几种 Copulas 模拟不同历时降雨量的影响分析[J]. 浙江大学学报:工学版, 2009, 43(6): 1107-1111. (XU Yueping, TONG Yangbin, FU Qiang, et al. Impact analysis for rainfall depth simulation of different durations through several Copulas[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2009, 43(6): 1107-1111. (in Chinese))
- [6] 张娜,郭生练,肖义,等. 基于联合分布的设计暴雨方法[J]. 水力发电, 2008, 34(1): 18-21. (ZHANG Na, GUO Shenglian, XIAO Yi, et al. Design storm method based on bivariate joint distribution [J]. Water Power, 2008, 34(1): 18-21. (in Chinese))
- [7] 陈子桑,刘曾美. 不同历时设计暴雨组合的风险率分析[J]. 水文, 2012, 31(4): 12-17. (CHEN Zishen, LIU Zengmei. Analysis of risk probability for design rainstorm combinations of different durations [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 31(4): 12-17. (in Chinese))
- [8] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:43-47.
- [9] 李春,刘德义,黄鹤. 1958—2007年天津降水量和降水日数变化特征[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(4): 8-11. (LI Chun, LIU Deyi, HUANG He. Characteristics of precipitation and precipitation days from 1958 to 2007 in Tianjin [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2010, 26(4): 8-11. (in Chinese))
- [10] 任锦亮,李琼芳,李鹏程,等. 上海市台风降雨和潮位遭遇组合概率研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(7): 1-4. (REN Jinliang, LI Qiongfang, LI Pengcheng, et al. Joint probability investigation of encounter typhoon rainfall and tide level in Shanghai City [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(7): 1-4. (in Chinese))
- [11] NELSEN R B. An introduction to Copulas [M]. Beilin: Springer,1999.
- [12] JOE H. Multivariate models and dependence concepts [M]. London:Chapman & Hall, 1997.
- [13] 郭生练,闫宝伟,肖义,等. Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J]. 水文, 2008, 28(3): 1-7. (GUO Shenglian, YAN Baowei, XIAO Yi, et al. Multivariate hydrological analysis and estimation [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(3): 1-7. (in Chinese))
- [14] 杜江,陈希镇,于波. Archimedean Copula 函数的参数估计[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(3): 637-640. (DU Jiang, CHEN Xizhen, YU Bo. Parameter estimation of Archimedean Copula [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(3): 637-640. (in Chinese))

(收稿日期:2014-02-15 编辑:高渭文)

(上接第 69 页)

- [6] 刘晓波,彭文启,何国建,等. 基于水质-污染源响应关系的抚仙湖水环境承载力计算研究[J]. 水动力学研究与进展,2011,26(6):652-659. (LIU Xiaobo, PENG Wenqi, HE Guojian, et al. Study on environmental carrying capacity of Fuxian Lake based on the response of water quality to pollution load [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011,26(6):652-659. (in Chinese))
- [7] 杜霞,彭文启. 水质变化驱动机制及经济体排污量估算方法[J]. 人民黄河,2011,33(4):28-30. (DU Xia, PENG Wenqi. Driving mechanism of water quality variation and estimation method for pollutant discharge capacity of economic entities [J]. Yellow River, 2011,33(4):28-30. (in Chinese))
- [8] 尹海龙,徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究[J]. 长江流域资源与环境,2008,17(5):729-733. (YIN Hailong, XU Zuxin. Comparative study on typical river comprehensive water quality assessment methods [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008,17(5):729-733. (in Chinese))
- [9] 魏娜,游进军,解建仓,等. 基于水功能区的水量调控模型研究[J]. 水资源保护,2012,28(6):19-23. (WEI Na, YOU Jinjun, XIE Jiancang, et al. A water quantity regulation model based on water functional zone [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(6): 19-23. (in Chinese))
- [10] 徐智廷,李河海. S-P 概化模型在临沂水功能区纳污能力分析中的应用[J]. 水资源保护,2007,23(3):27-29. (XU Zhiting, LI Hehai. Application of S-P generalized model to analysis of water environmental capacity in Linyi water function area [J]. Water Resources Protection,2007,23(3):27-29. (in Chinese))

(收稿日期:2014-09-28 编辑:徐娟)