

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.03.008

基于二次重现期的城市两级排涝标准衔接的设计暴雨

陈子燊¹, 高时友^{1,2}, 李鸿皓³

(1. 中山大学水资源与环境系, 广东 广州 510275; 2. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611;
3. 珠海市公共气象服务中心, 广东 珠海 519000)

摘要: 使用珠海市 1984—2015 年 R_{1h} - R_{6h} 、 R_{1h} - R_{12h} 、 R_{1h} - R_{24h} 3 个历时暴雨组合推算排水排涝两级标准衔接的设计暴雨水平。应用阿基米德极值 Copula 与 Kendall 分布函数构建不同历时暴雨组合的联合概率分布模式。分析各历时暴雨组合的遭遇概率、“或”重现期、“且”重现期和二次重现期, 以出现最大可能概率的方法推算各组合的设计暴雨值。结果表明: 二次重现期所对应的累积频率更准确地代表了特定设计频率情况下不同历时暴雨组合的风险率; 重现期分别为 2 年、3 年、5 年、10 年、20 年、50 年、100 年推算的二次重现期设计值介于“或”重现期和“且”重现期设计值之间, 小于相应的边缘分布重现期设计值, R_{1h} - R_{6h} 组合推算的设计值相对误差为 3.1%~7.1%; R_{1h} - R_{12h} 组合推算的设计值相对误差为 3.3%~9.3%; R_{1h} - R_{24h} 组合推算的设计值相对误差为 3.9%~12.0%。二次重现期推算的不同历时暴雨组合的设计暴雨分位值为内涝工程的风险管理和管渠尺寸提供了优选标准和设计参考。

关键词: 设计暴雨; 极值 Copula; 二次重现期; 城市排涝标准; 珠海市

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2017)03-0382-08

极端降雨导致的城市内涝受到中国社会的极大关注。治理城市内涝和建设海绵城市需要构建内涝防治标准体系, 涉及城市防洪、排涝及排水 3 种设计标准关系^[1], 需研究雨水管道规划设计标准和内河治理标准及其与防洪标准的衔接关系。目前, 城市排水通常采用 2 级排涝体系: 一级排涝系统负责较大区域暴雨涝水以及市政雨水管网所汇集涝水的排除, 属于水利排涝范畴, 设计暴雨可采用历时 3~24 h 的最大降雨, 防治目标为发生城市内涝防治标准以内的暴雨时, 城市不能出现内涝灾害, 城市内河最高水位不超过最高控制水位且不对城市排水防涝的排水系统的排水造成顶托; 二级排涝系统承担城市小区、街道等小区域的雨水排除, 属于市政排水范畴, 设计暴雨可采用短历时强降雨, 防治目标为发生雨水管网设计标准以内的暴雨时, 地面不应有明显积水。城市的一、二级排水排涝系统虽然都是承担暴雨带来的涝水排除任务, 但由于涵盖了市政排水和水利排涝 2 个行业, 其采用的设计标准、行业规范各不相同。排水排涝两级标准衔接的设计暴雨值的推算已成为海绵城市建设中需要面对的重要问题。

谢华和黄介生^[2]研究了河网地区城市一、二级排水标准的衔接关系, 提出一级排水系统的设计暴雨必须以二级排水设计短历时强降雨总量作为峰值雨量, 提出了二者之间的重现期衔接关系^[3]。贾卫红和李琼芳^[4]通过分析上海市排水标准与除涝标准的差别, 提出了研究年最大 1 h 与年最大 24 h 雨量相融性关系的方法, 建立了排水标准与除涝标准衔接的暴雨重现期关系。杨星等^[5]认为城市管道排水和河道排涝存在组合设计的问题, 组合设计的安全性可以用风险率表示。显然, 仅考虑设计暴雨组合的重现期、安全度或风险率还无法为内涝防治工程规划提供设计参数。由于不同历时暴雨组合的设计值涉及排水排涝两级标准衔接的实质问题, 推算不同历时暴雨组合设计值构成了城市内涝防治工程一个关键的技术问题。

本研究将以年最大 1 h 短历时强降雨为峰值, 建立其与同场暴雨多个不同历时最大雨量的组合序列。采

收稿日期: 2016-08-31; 网络出版时间: 2017-04-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20170426.0932.034.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41371498)

作者简介: 陈子燊(1952—), 男, 福建福州人, 教授, 主要从事极端水文气象事件概率分布与风险研究。

E-mail: eesczs@mail.sysu.edu.cn

用近年来被广泛用来建立多变量的联合分布与遭遇风险研究的 Copula 函数^[6-8]和更严谨的安全与危险域表达的 Kendall 分布函数的理论与方法,构建具有排水排涝内在联系的不同历时暴雨联合概率分布模式,分析联合分布的“OR”、“AND”和二次重现期。推算不同历时暴雨组合的“OR”、“AND”和二次重现期的设计值。研究成果可为城市排水排涝标准的衔接提供新的思路与工程设计参考依据。

1 理论与方法

1.1 Copula 函数与首次重现期

根据 Sklar 定理,若 $F(\cdot)$ 是一个二维随机变量 (X, Y) 的累积分布函数,其边缘分布函数是连续函数 $u=F_X(x)$, $v=F_Y(y)$, 则有唯一的 Copula 函数 C 使得:

$$F(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y) = C(F_X(x), F_Y(y)) = C(u, v) \quad (1)$$

Nelsen^[9]证明了 Gumbel-Hougaard Copula 是 Archimedean Copula 函数族中的唯一多变量极值 Copula 函数,两变量的结构形式为

$$C(u, v) = \exp\{-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/\theta}\} \quad (2)$$

当且仅当边缘分布和 Copula 函数均为极值分布时,构造的联合分布才是极值分布,适用于极值事件的频率分析。

采用算符“ $\vee$ ”定义“OR”极端事件 $E_{XY}^\vee: E_{XY}^\vee = \{X > x \vee Y > y\}$; 以“ $\wedge$ ”定义“AND”极端事件 $E_{XY}^\wedge: E_{XY}^\wedge = \{X > x \wedge Y > y\}$, 则极端事件 $E_{XY}^\vee$ 的“OR”联合重现期和 $E_{XY}^\wedge$ 的“AND”联合重现期分别为:

$$T_{\text{OR}} = \frac{1}{P(X > x \vee Y > y)} = \frac{1}{1 - C(F_X(x), F_Y(y))} \quad (3)$$

$$T_{\text{AND}} = \frac{1}{P(X \geq x \wedge Y \geq y)} = \frac{1}{1 - F_X(x) - F_Y(y) + C(F_X(x), F_Y(y))} \quad (4)$$

“OR”联合重现期和“AND”联合重现期也合称为首次重现期(Primary Return Periods)。

1.2 二次重现期

由“OR”首次重现期和“且”首次重现期可知,不同的 u, v 组合只要其出现累积概率(记为 t)相同,都可产生相同的重现期。Salvadori 和 Michele^[10]指出,在安全事件与危险事件的判定上,两者都存在着较大的局限性。在工程应用中,以往通常选择某一“OR”首次重现期作为安全或风险设计控制值。然而,相同重现期值的不同样本所包含的“OR”首次重现期安全域/危险域不同。为解决由首次重现期定义的安全域/危险域不够严格的问题,Salvadori 和 Michele^[11]利用 Nelsen 定义的 Kendall 分布函数划分出亚临界(安全域)、临界(警戒事件)和超临界(危险域)3 种情景。通过求累积概率小于或等于 t_* 的临界概率将多维的极值事件投射为一维分布。基于 Copula 函数累积概率为 t_* 的 (u_*, v_*) 组合值, Kendall 分布函数 K_C 为^[9]

$$K_C(t_*) = P[C(u_*, v_*) \leq t_*] \quad (5)$$

则若 C 为 Archimedean copula, K_C 可通过生成元 $\varphi(t)$ 直接求得:

$$K_C(t) = t - \varphi(t)/\varphi'(t) \quad 0 < t \leq 1 \quad (6)$$

式中: $\varphi'(t)$ 为 $\varphi(t)$ 的右导数。由 Kendall 分布函数确定的重现期称二次重现期(Secondary Return Periods)或称 Kendall 重现期(Kendall Return Periods)^[9-10]为

$$T_K(x, y) = \frac{1}{1 - K_C(t_*)} \quad (7)$$

理论分析结果有: $T_{\text{OR}} < T_K < T_{\text{AND}}$ 。由 $K_C(t_*)$ 确立的安全域/危险域边界为曲线^[11], 比首次重现期定义的线性边界更明确和严谨。

1.3 两种历时降雨组合的设计值

在单变量频率分析中,给定一个重现期,通过概率分布的反函数即可估算出对应的设计分位值。而对于

多变量的情形，相同或不同重现期组合可以有无数多种的分位值与之对应，并且这些分位值组合不能通过概率分布的反函数直接估算。具有相同重现期或不同重现期组合的不同历时雨量分位值组合构成了一个二维点集(等曲线)。在这些不同的分位值组合中，必然存在一个组合 (x_{ml}, y_{ml}) 使联合概率密度 $f(x, y)$ 达到最大值，即该组合出现的可能性最大。为此，在设定的重现期下，出现可能性最大的不同历时暴雨组合可作为城市排水排涝管渠工程设计的优选参考标准。

$$(x_{ml}, y_{ml}) = \underset{(x,y) \in S_y^x}{\operatorname{argmax}} f(x, y) \tag{8}$$

$$f(x, y) = c(u, v) f_x(x) f_y(y) \tag{9}$$

式中： $c(u, v)$ 为二维 Archimedean Copula 的概率密度函数； $f_x(x)$ 和 $f_y(y)$ 分别为随机变量 X 、 Y 的概率密度函数。

2 实例计算与分析

2.1 基本数据和样本选取

采用珠海站气象站 1984—2015 年连续 32 年的逐时降雨为基本资料，选取历年最大 1 h 降雨(R_{1h})为样本峰值，抽取同场暴雨的连续最大 6 h、12 h 和 24 h 雨量，以保证不同历时的降雨组合选自同场暴雨。构成 R_{1h} - R_{6h} (组合 1)、 R_{1h} - R_{12h} (组合 2)、 R_{1h} - R_{24h} (组合 3)3 个历时暴雨组合序列。

2.2 边缘分布与联合分布

采用 3 种三参数概率分布函数择优：皮尔逊Ⅲ型分布(PE3)、广义极值分布(GEV)、对数正态分布(GNO)分别拟合 4 个历时(1 h、6 h、12 h 和 24 h)雨量样本的概率分布。参数估计使用线性矩(L-矩)方法。经验频率分布使用 Gringorten 公式计算。拟合结果采用均方根误差(E_{RMS})和概率点据相关系数(C_{PPC})对比其拟合优度。对比结果显示，4 个降雨历时的概率分布以广义极值分布最优。各暴雨样本概率分布的参数和拟合结果见表 1。

表 1 不同历时降雨的概率分布参数与拟合优度检验值

Table 1 Parameters of the probability distribution and the values of goodness of fit tests for different duration rainstorms

雨量	边缘分布	位置参数	尺度参数	形态参数	E_{RMS}	C_{PPC}
R_{1h}	GNO	60.037	15.897	-0.484	2.796	0.988
	GEV	55.290	12.943	-0.097	2.743	0.989
	PE3	37.652	2.016	0.076	2.988	0.987
R_{6h}	GNO	115.613	59.958	-0.511	8.164	0.994
	GEV	97.896	48.354	-0.115	7.576	0.995
	PE3	35.439	1.820	0.019	9.635	0.991
R_{12h}	GNO	131.478	76.252	-0.550	8.418	0.996
	GEV	109.292	60.676	-0.141	7.954	0.997
	PE3	36.399	1.585	0.013	10.180	0.994
R_{24h}	GNO	153.396	90.129	-0.491	20.419	0.981
	GEV	126.558	73.195	-0.102	19.752	0.983
	PE3	28.250	1.961	0.013	21.935	0.978

采用相关性指标法计算了 3 个暴雨组合样本的 Archimedean Gumbel-Hougaard Copula 参数 θ (见表 2)。分别构建暴雨组合的联合分布模式如下：

R_{1h} - R_{6h} 组合： $C(u, v) = \exp \{ - [(-\ln u)^{2.255} + (-\ln v)^{2.255}]^{1/2.255} \}$ (10)

R_{1h} - R_{12h} 组合： $C(u, v) = \exp \{ - [(-\ln u)^{2.000} + (-\ln v)^{2.000}]^{1/2.000} \}$ (11)

R_{1h} - R_{24h} 组合： $C(u, v) = \exp \{ - [(-\ln u)^{1.656} + (-\ln v)^{1.656}]^{1/1.656} \}$ (12)

2.3 不同历时暴雨组合的条件概率

暴雨是一定条件下发生的非期望事件, 其风险率可定义为超过某一特定阈值的概率^[8]。据此可将单变量暴雨风险率扩展为排水排涝标准相关联的条件概率。年最大 1 h 短历时暴雨与同场连续最大 24 h 雨量组合的超值条件概率为

$$P(R_{24} \geq r_{24} | R_1 \geq r_1) = \frac{P(R_{24} \geq r_{24}, R_1 \geq r_1)}{P(R_1 \geq r_1)} = \frac{1 - F_{R_{24}}(r_{24}) - F_{R_1}(r_1) + F(r_1, r_{24})}{1 - F_{R_1}(r_1)} \quad (13)$$

同理, 可计算年最大 1 h 短历时暴雨与同场连续最大 6 h 雨量或同场连续最大 12 h 雨量组合的超值条件概率, 计算结果见表 3 和图 1(为省篇幅略去 R_{1h} - R_{12h} 组合遭遇概率图)。表 3 中以年最大 1 h 降水的 7 个设计暴雨值 60 mm、68 mm、76 mm、88 mm、100 mm、117 mm、130 mm(相应的重现期分别为 2 a、3 a、5 a、10 a、20 a、50 a、100 a)为条件, 连续最大 6 h、12 h 和 24 h 的 7 个相同重现期设计暴雨值发生的遭遇概率。3 个设计暴雨组合的条件概率分布显示, 大于 1 h 最大降水设计值条件下同频遭遇概率很高, R_{1h} - R_{6h} 组合最大风险率为 64%~78%, R_{1h} - R_{12h} 组合最大风险率为 59%~75%, R_{1h} - R_{24h} 组合最大风险率为 48%~70%; 如以市政 3 年一遇排水标准与水利排涝 50 年一遇为衔接标准, 3 个暴雨组合的遭遇概率为 5.7%~5.9%, 条件重现期为 16.8~17.7 a。如以市政 2 年一遇排水标准与水利排涝 20 年一遇为衔接标准, 各暴雨组合的遭遇概率为 9.5%~9.9%, 条件重现期为 10.1~10.6 a。

表 3 设计暴雨组合的遭遇风险概率

Table 3 Risk probabilities of design rainstorm combinations

暴雨组合	雨量/mm	T/a	R_{1h}/mm						
			60	68	76	88	100	117	130
R_{1h} - R_{6h}	R_{6h}	116	2	0.779	0.878	0.942	0.978	0.991	0.999
		145	3	0.585	0.728	0.857	0.944	0.977	0.997
		177	5	0.377	0.514	0.691	0.862	0.943	0.993
		222	10	0.196	0.283	0.431	0.665	0.843	0.979
		269	20	0.099	0.147	0.236	0.421	0.652	0.946
		336	50	0.040	0.060	0.098	0.190	0.349	0.828
		391	100	0.020	0.030	0.050	0.098	0.189	0.643
R_{1h} - R_{12h}	R_{12h}	132	2	0.750	0.844	0.914	0.960	0.981	0.996
		168	3	0.563	0.691	0.814	0.911	0.957	0.992
		211	5	0.366	0.489	0.647	0.813	0.907	0.982
		270	10	0.192	0.273	0.407	0.616	0.788	0.957
		333	20	0.098	0.144	0.227	0.394	0.601	0.907
		425	50	0.040	0.059	0.096	0.183	0.327	0.769
		503	100	0.020	0.030	0.049	0.096	0.181	0.589
R_{1h} - R_{24h}	R_{24h}	154	2	0.697	0.778	0.849	0.909	0.944	0.981
		197	3	0.518	0.620	0.727	0.830	0.895	0.964
		245	5	0.340	0.436	0.562	0.710	0.815	0.936
		312	10	0.182	0.249	0.355	0.520	0.673	0.883
		380	20	0.094	0.134	0.204	0.337	0.500	0.805
		477	50	0.039	0.057	0.090	0.163	0.279	0.645
		556	100	0.020	0.029	0.047	0.088	0.161	0.484

2.4 不同历时暴雨组合的重现期

珠海市不同历时降雨组合的“OR”、“AND”和二次重现期计算结果见表 4。由定义和表 3 中不同历时暴

表 2 不同暴雨组合的相关系数和 Copula 参数

Table 2 Correlation coefficients and Copula parameters of different duration rainstorm combinations

暴雨组合	R_{1h} - R_{6h}	R_{1h} - R_{12h}	R_{1h} - R_{24h}
τ	0.540	0.500	0.402
θ	2.255	2.000	1.656

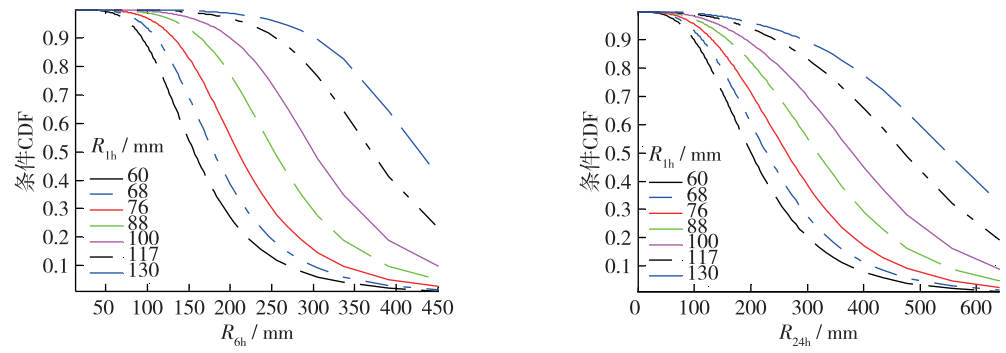


图 1 不同历时暴雨组合的遭遇概率分布

Fig. 1 Encounter probability distribution of different duration rainstorm combinations

雨组合的重现期可见，对设定的重现期，“OR”重现期的危险率必然大于“AND”重现期的危险率，二次重现期的危险率则介于二者之间。由更准确地代表了安全与危险域的二次重现期反映了城市排水与水利排涝两级标准衔接情况下的临界风险概率。以珠海 2013 年出现的最大 1 h 暴雨 119 mm 为例，同场暴雨最大 6 h、12 h 和 24 h 的雨量分别为 283 mm、325 mm 和 331 mm，重现期分别为 55.7 a、24.4 a、18.3 a 和 12.2 a。计算的 R_{1h} - R_{6h} 暴雨组合的 T_{OR} 为 23.0 a， T_{AND} 为 65.0 a， T_K 为 40.5 a； R_{1h} - R_{12h} 暴雨组合的 T_{OR} 为 17.5 a， T_{AND} 为 65.5 a， T_K 为 33.9 a； R_{1h} - R_{24h} 暴雨组合的 T_{OR} 为 11.7 a， T_{AND} 为 69.5 a， T_K 为 27.7 a；各暴雨组合的 T_K 重现期介于 T_{OR} 和 T_{AND} 之间。

表 4 不同历时暴雨组合的重现期对比

Table 4 Comparison of bivariate return periods for different duration rainstorm combinations

T/a	R_{1h} - R_{6h}			R_{1h} - R_{12h}			R_{1h} - R_{24h}		
	T_{OR}	T_{AND}	T_K	T_{OR}	T_{AND}	T_K	T_{OR}	T_{AND}	T_K
100	73.7	155.6	131.7	70.9	169.9	140.7	66.0	206.6	164.7
50	36.9	77.5	65.6	35.5	84.5	70.0	33.1	102.5	81.6
20	14.8	30.6	26.0	14.3	33.3	27.6	13.3	40.0	31.8
10	7.5	15.0	12.8	7.2	16.2	13.5	6.8	19.2	15.3
5	3.8	7.2	6.2	3.7	7.7	6.4	3.5	8.9	7.1
3	2.4	4.1	3.5	2.3	4.3	3.6	2.2	4.8	3.9
2	1.6	2.6	2.2	1.6	2.7	2.3	1.5	2.9	2.3

2.5 不同暴雨组合的两变量设计暴雨值

重现期设计暴雨值推算涉及城市内涝防治工程的管渠尺寸设计，是工程费用投入与效用的重要依据。表 5 为年最大 1 h 暴雨与同场不同历时降雨的设计雨量。利用出现概率最大原理推算的珠海 R_{1h} - R_{6h} 、 R_{1h} - R_{12h} 和 R_{1h} - R_{24h} 3 个组合的 2 a、3 a、5 a、10 a、20 a、50 a、100 a 重现期的设计值见表 6。从表 5 和表 6 可见，各组合暴雨的“OR”重现期和“AND”重现期的设计雨量分别大于和小于相应历时的同频率设计雨量，如 100 年一遇的 1 h 设计雨量为 130 mm， R_{1h} - R_{24h} 组合情况时的“OR”重现期设计雨量为 140 mm，“AND”重现期的设计雨量为 116 mm。由二次重现期推算的组合设计雨量则分别小于相应的边缘分布设计值，以此设计雨量既可达到排水排涝设计标准又能节省工程费用。

分析对比各个暴雨组合的两变量设计值显示，

表 5 珠海市不同历时的设计雨量 mm

Table 5 Design rainfall quantiles of rainstorm of different durations in Zhuhai city

T/a	R_{1h}	R_{6h}	R_{12h}	R_{24h}
100	130	391	503	556
50	117	336	425	477
20	100	269	333	380
10	88	222	270	312
5	76	177	211	245
3	67	144	168	196
2	60	116	132	154

“OR”重现期推算的组合设计值大于单变量设定重现期的设计值。而二次重现期推算的组合设计值介于“OR”重现期和“AND”重现期的设计值, 小于相应的降雨边缘分布重现期设计值。二次重现期设计值与相应的边缘分布设计值对比, R_{1h} - R_{6h} 组合推算的设计值相对误差为 3.1%~7.1%; R_{1h} - R_{12h} 组合推算的设计值相对误差为 3.3%~9.3%; R_{1h} - R_{24h} 组合推算的设计值相对误差为 3.9%~12.0%。从满足排水排涝效能与节省工程费用二者角度综合考虑, 二次重现期设计值可视为最优成果, 适用于排水排涝管渠尺寸的工程设计参考。

表 6 不同历时暴雨组合的同频率设计雨量 mm

Table 6 Design rainfall quantiles of same frequencies for different rainstorm combinations

T/a	R_{1h} - R_{6h}						R_{1h} - R_{12h}						R_{1h} - R_{24h}					
	R_{1h}			R_{6h}			R_{1h}			R_{12h}			R_{1h}			R_{24h}		
	R_{OR}	R_{AND}	R_K	R_{OR}	R_{AND}	R_K	R_{OR}	R_{AND}	R_K	R_{OR}	R_{AND}	R_K	R_{OR}	R_{AND}	R_K	R_{OR}	R_{AND}	R_K
100	138	121	126	413	354	368	138	120	124	543	440	463	140	116	121	598	471	495
50	123	109	112	358	303	315	124	107	111	461	370	390	125	104	108	522	401	424
20	105	93	95	290	240	251	106	91	94	365	287	304	107	88	92	422	315	336
10	93	81	84	241	196	207	94	80	83	299	230	245	95	78	81	351	254	274
5	81	71	73	195	155	165	82	70	72	237	177	191	83	68	71	281	198	217
3	72	63	65	161	125	134	73	62	65	192	140	153	74	61	64	230	157	175
2	64	56	58	132	100	109	65	56	58	154	110	122	66	55	58	186	123	140

由于内涝防治的市政管网排水和内外河道水利排涝涉及不同重现期标准下设计水平的组合, 为了进一步为排水排涝两级标准的衔接提供设计依据, 按二次重现期推算了 3 种暴雨历时组合情况下不同重现期组合的最可能暴雨设计值。从表 7 可见, 如以 R_{1h} - R_{6h} 组合为市政 2 年一遇排水标准与水利排涝 20 年一遇为衔接标准, 此暴雨组合二次重现期的市政排水设计暴雨值为 57 mm, 水利排涝设计值为 232 mm; 以 R_{1h} - R_{12h} 组合为市政 3 年一遇排水标准与水利排涝 20 年一遇为衔接标准, 二次重现期市政排水的设计暴雨值为 64 mm, 水利排涝的设计值为 274 mm。以 R_{1h} - R_{24h} 组合为市政 5 年一遇排水标准与水利排涝 50 年一遇为衔接标准, 二次重现期市政排水的暴雨设计值为 68 mm, 水利排涝的设计值为 383 mm。更详细的市政排水与水利排涝不同衔接标准下不同重现期组合的设计暴雨值可参见表 7。

表 7 不同暴雨组合情况下不同重现期组合的设计雨量 mm

Table 7 Design rainfall quantiles of different rainstorm and different return period combinations

组合	T/a	设计雨量													
		100 a		50 a		20 a		10 a		5 a		3 a		2 a	
R_{1h} - R_{6h}	100	125	369	119	344	119	304	123	351	121	337	120	329	119	323
	50	115	347	112	316	106	282	106	253	109	296	108	285	107	279
	20	94	346	99	294	95	252	90	228	90	198	93	237	92	225
	10	81	346	83	294	87	233	84	207	79	181	79	157	82	192
	5	69	346	71	294	74	232	77	190	73	165	69	142	69	120
	3	61	346	62	294	64	232	68	188	68	152	65	134	61	111
	2	55	346	55	294	57	232	60	188	66	148	61	124	58	109
R_{1h} - R_{12h}	100	124	464	117	440	117	388	117	350	120	426	119	409	118	395
	50	113	430	110	390	104	355	104	317	104	278	107	353	106	337
	20	93	427	97	357	94	304	89	280	89	242	89	210	91	272
	10	80	427	82	357	86	277	83	245	78	218	78	187	78	157
	5	68	427	70	357	73	274	75	222	72	191	67	168	67	138
	3	61	427	61	357	64	274	68	219	67	175	65	153	60	127
	2	54	427	55	357	57	274	60	219	64	168	61	141	58	122

续表7

组合	T/a	设计雨量													
		100 a		50 a		20 a		10 a		5 a		3 a		2 a	
$R_{1h}-R_{24h}$	100	120	498	112	497	112	452	112	416	112	375	112	336	112	294
	50	109	459	108	425	100	411	100	376	100	336	100	299	100	259
	20	89	453	94	384	92	336	85	327	85	289	85	254	85	216
	10	77	453	79	383	83	304	81	274	75	258	75	224	75	189
	5	66	453	68	383	72	297	73	246	71	217	65	199	65	165
	3	59	453	60	383	63	297	67	238	66	198	64	175	58	151
	2	53	453	54	383	56	297	60	238	63	187	60	161	58	140

3 结 论

以历年最大 1 h 暴雨为峰值雨量, 构建了珠海 3 种历时暴雨组合的联合概率分布模式, 计算的二次重现期及其设计暴雨值为制定城市内涝治理与风险管理提供了重要的理论和设计依据。采用的研究方法还可用于分析珠海市以水利排涝为主市政排水为辅情况下的两级排水排涝衔接标准的重现水平, 或应用于其他城市的设计暴雨。主要结论如下:

(1) 对比特定设计频率情况下的不同历时暴雨组合的“OR”重现期与“AND”重现期, 二次重现期为市政排水与水利排涝两级标准衔接的风险管理提供了更精确的参考依据。

(2) 以出现概率最大的方法计算的不同历时暴雨组合与不同重现期组合的二次重现期设计暴雨为防治内涝工程的管渠尺寸提供了优选参考标准和设计依据。

参考文献:

- [1] 鲁航线, 张开军, 陈微静. 城市防洪排涝及排水三种设计标准的关系初探[J]. 城市道桥与防洪, 2007(11): 64-67. (LU H X, ZHANG K J, CHEN W J. Elementary probing into relation of three design standards of urban flood control, flooded fields and drainage[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2007(11): 64-67. (in Chinese))
- [2] 谢华, 黄介生. 平原河网地区城市两级排涝标准匹配关系[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(5): 39-43. (XIE H, HUANG J S. Research on matching relations of two-stage drainage systems for city in plain river network area[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(5): 39-43. (in Chinese))
- [3] 谢华, 黄介生. 城市化地区市政排水与区域排涝关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(5): 10-14. (XIE H, HUANG J S. Study on the relationship of municipal drainage and hydrological for urban area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(5): 10-14. (in Chinese))
- [4] 贾卫红, 李琼芳. 上海市排水标准与除涝标准衔接研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(15): 122-126. (JIA W H, LI Q F. Study on linkage between drainage standards and waterlogging control standards in Shanghai[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(15): 122-126. (in Chinese))
- [5] 杨星, 李朝方, 刘志龙. 基于风险分析法的排水排涝暴雨重现期转换关系[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(2): 171-176. (YANG X, LI C F, LIU Z L. Risk probability analysis of design storm combination of urban pipe drainage and river drainage [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(2): 171-176. (in Chinese))
- [6] ZHANG L, SINGH V P. Bivariate rainfall frequency distributions using Archimedean copulas[J]. Journal of Hydrology, 2007, 332: 93-109.
- [7] 方彬, 郭生练, 肖义, 等. 年最大洪水两变量联合分布研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 505-511. (FANG B, GUO S L, XIAO Y, et al. Annual maximum flood occurrence dates and magnitudes frequency analysis based on bivariate joint distribution [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4): 505-511. (in Chinese))
- [8] 刘曾美, 陈子荣. 区间暴雨和外江洪水水位遭遇组合的风险[J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 619-625. (LIU Z M, CHEN Z S.

- Risk study of the bivariate encounter of interzone rainstorm and flood level of the outer river [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(5): 619-625. (in Chinese))
- [9] NELSEN R B. An introduction to copulas [M]. New York: Springer, 2006.
- [10] SALVADORI G, MICHELE C D. Multivariate multiparameter extreme value models and return periods: a Copula approach [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(10): 219-233.
- [11] SALVADORI G, MICHELE C D. Frequency analysis via copulas: theoretical aspects and applications to hydrological events [J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(12): 229-244.

Design storm for mixed level-1 and level-2 urban drainage standards based on the secondary return period *

CHEN Zisheng¹, GAO Shiyu^{1,2}, LI Honghao³

(1. Department of Water Resource and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China; 3. Zhuhai Public Meteorological Service Center, Zhuhai 519000, China)

Abstract: In this paper, we estimated the design storm for mixed level-1 and level-2 urban drain standards according to data of the combination of 1-hour rainstorm and 6-hour rainstorm ($R_{1h}-R_{6h}$), the combination of 1-hour rainstorm and 12-hour rainstorm ($R_{1h}-R_{12h}$), and the combination of 1-hour rainstorm and 24-hour rainstorm ($R_{1h}-R_{24h}$) in Zhuhai city between 1984 and 2015. First, the models of joint probability distribution about different combinations were built using the Archimedean extreme value Copula and the Kendall distribution function. Then, the occurrence probability, “OR” return period, “AND” return period and the secondary return period for each combination were analyzed, and the design storms for each combination were estimated by the method with the maximum occurrence probability. The results are as follows: the cumulative frequency corresponding the secondary return period more accurately represents the risk probabilities of rainstorms of different combinations with specific design frequency; the estimated design storm quantiles of the secondary return period based on return periods with 2-year, 3-year, 5-year, 10-year, 20-year, 50-year and 100-year are between the design storm quantiles of the “OR” return period and these of the “AND” return period, and less than these of the marginal distribution return period, respectively. Compared with the case of design storm quantiles of the marginal distribution return period, the relative error of the $R_{1h}-R_{6h}$ is between 3.1% and 7.1%; that of the combination of $R_{1h}-R_{12h}$ is between 3.3% and 9.3%; that of $R_{1h}-R_{24h}$ is between 3.95% and 12.0%. These provide optimization criterion and guide for the risk management of waterlogging project and the design of drainage pipe, respectively.

Key words: design storm; extreme value Copula; secondary return periods; urban drainage standards; Zhuhai city

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41371498).