

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.016

城镇内涝防治中市政排水与水利排涝的标准衔接研究

刘曾美^{1,2},熊腮敏¹,雷勇³,胡海英^{1,2}

(1. 华南理工大学土木与交通学院,广东广州 510640;
2. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心,广东广州 510640;
3. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院,广东广州 511430)

摘要:针对城镇内涝防治采用市政排水与水利排涝两级排涝模式,提出一套合理解决两级排涝标准衔接的理论体系与方法。通过剖析市政排水与水利排涝衔接的本质,揭示市政排水标准和水利排涝标准的衔接存在两类风险:市政排水不能及时排除水利排涝标准内的暴雨涝水,水利排涝不能将市政排水标准内的暴雨涝水有效蓄存或及时排出。两类衔接风险存在的机理是客观存在两类暴雨过程:对于高强度的短历时大暴雨,水利排涝历时暴雨不超标情况下市政排水历时暴雨超标;对于强度不高的长历时大暴雨,市政排水历时暴雨不超标情况下水利排涝历时暴雨超标。由此构建两级排涝标准的衔接风险分析模型,基于 Copula 函数给出求解方法。以广州市中心城区为例,对市政排水标准与水利排涝标准的衔接风险进行研究,结果表明:第一类衔接风险较大,且随市政排水标准的提升而显著减小;第二类衔接风险较小,且随水利排涝标准的提高而减小。目前广州市中心城区市政管网的排水标准为1年一遇至3年一遇,水利排涝标准为20年一遇,第一类衔接风险不低于15.63%,第二类衔接风险不到1%。可通过完善排水管网、建设城镇涝水行泄通道和优化运行管理等综合措施提高市政排水标准,若市政排水达到10年一遇或20年一遇标准时,第一类衔接风险均值可降至4.42%或2.26%。

关键词:城镇内涝治理;市政排水;水利排涝;标准衔接;Copula 函数;广州市

中图分类号:TU981.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0125-08

Study on design standard matching between municipal drainage and water conservancy drainage in urban local flood control // LIU Zengmei^{1,2}, XIONG Saimin¹, LEI Yong³, HU Haiying^{1,2} (1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and Greenization for Water Conservancy Project, Guangzhou 510640, China; 3. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Conservancy Commission, Guangzhou 511430, China)

Abstract: In view of the two-step drainage mode of municipal drainage and water conservancy drainage in urban local flood control, a set of theoretical systems and methods was put forward to reasonably solve the problem of two-step drainage standard matching. By investigation of the nature of the connection between municipal drainage and water conservancy drainage, it was revealed that there are two kinds of risks resulting from design standard matching between municipal drainage and water conservancy drainage: the municipal drainage system cannot timely drain the rainstorm within the design standard of water conservancy drainage into the urban river network; the water conservancy drainage system cannot timely drain the rainstorm within the design standard of municipal drainage into the external receiving water body or retain it in the urban river network. The causation of the two kinds of risks was also revealed: under the condition that rainstorm within the water conservancy drainage duration does not exceed the design value, the rainstorm within the municipal drainage duration exceeds the design value; under the condition that rainstorm within the municipal drainage duration does not exceed the design value, the rainstorm within the water conservancy drainage duration exceeds the design value. Thereby, the risk analysis model for analyzing the two-stage standard matching relationship was established based on the two kinds of matching risks, and finally, a set of methods for solving the model was proposed based on the Copula function. A case study on the

基金项目:广东省水利科技创新项目(2016-27,2011-18);水力学与山区河流开发保护国家重点实验室开放研究基金(1113)

作者简介:刘曾美(1970—),女,副教授,博士,主要从事洪涝灾害防治和水利综合规划研究。E-mail: liuzm@scut.edu.cn

standard matching between municipal drainage and water conservancy drainage in Guangzhou downtown was conducted. The results indicated that the first kind of matching risk is relatively high and decreases significantly with the improvement of the municipal drainage standard; the second kind of matching risk is low and decreases with the improvement of the water conservancy drainage standard. At present, the drainage standard of municipal pipe network in Guangzhou downtown is formulated regarding the design rainstorm occurring once every one to three years, and the water conservancy drainage standard is formulated regarding the design rainstorm occurring once every 20 years, therefore, the first kind of matching risk is not less than 15.63%, while the second kind of matching risk is less than 1%. Comprehensive measures, such as source control, improvement of drainage pipe network, construction of urban waterlogged drainage channel, and optimization of operation management, should be taken to improve the municipal drainage standard. If the municipal drainage can reach the standard of once-in-a-decade or once-in-two-decade rainstorm by adopting comprehensive measures, the average value of the first kind of matching risk can be reduced to 4.42% or 2.26%.

Key words: urban local flood control; municipal drainage; water conservancy drainage; design standard matching; Copula function; Guangzhou City

近年来,在全球气候变化和城镇化快速发展背景下,城市灾害性暴雨事件频发,城镇内涝灾害日趋严重^[1-3]。通常,城镇内涝防治采用市政排水和水利排涝两级排涝模式。市政排水承担城市小区、街道等小区域的涝水排除,将涝水排入城市内河网;水利排涝负责较大区域暴雨涝水和市政雨水汇集的涝水排除,将城市内河网的涝水排至区域外。在涝水排除过程中,两级排涝模式必然存在衔接问题^[4]。市政排水与水利排涝的能力取决于设计标准,设计标准均用暴雨重现期表示,因此,要解决两级排涝的衔接问题,必须先解决两级排涝的暴雨设计标准衔接问题。

关于市政排水与水利排涝的暴雨设计标准衔接研究可以归纳为3类:①根据不同暴雨取样方法得到重现期衔接关系^[5-7],针对的是相同历时暴雨,不能反映市政排水的暴雨历时与水利排涝的暴雨历时不同可能导致的差异。②从不同历时暴雨形成的流量角度得到两级暴雨重现期衔接关系^[8-11],如陈鑫等^[8]基于SWMM(storm water management model)研究城市排涝与排水体系的重现期衔接关系;黄国如等^[9]基于城市综合流域排水模型研究市政排水与水利排涝标准的衔接关系;李永坤等^[10]用推理公式法、综合单位线法研究北京马草河市政排水与水利排涝的衔接关系;李连文^[11]基于MIKE模型研究水利排涝与市政排水的衔接关系,但同一区域相同暴雨形成的流量会因下垫面条件而改变,从而导致衔接关系改变。③从两个标准所关注的不同历时暴雨之间的关系出发,分析得出市政排水与水利排涝设计暴雨重现期的衔接关系,如谢华等^[12]认为水利排涝系统的设计暴雨必须以市政排水设计的短历时雨量作为其峰值雨量;刘俊等^[13]从最大1h雨量不超过设计雨量的降雨过程中得到最大24h雨量,其重现期即为相匹配的水利排涝标准;杨星等^[14]研究了在满足河道设计排涝条件下发生超过管道排水安全

要求的破坏概率,以此作为标准衔接的依据;陈庆沙等^[15]考虑在管道正常排水条件下,河道涝水以一定的概率影响管道正常排水,并以该破坏风险确定与管网排水相衔接的河道排涝标准;陈子燊等^[16]基于二次重现期方法推算了与市政排水历时(1h)设计暴雨相衔接的最大6h、12h、24h设计暴雨分位值;贾卫红等^[17]通过研究与除涝历时暴雨相应的排水历时暴雨的频率分布,用与除涝标准同频率的相应排水历时暴雨在年最大系列中的重现期,作为与除涝标准的对应关系。以上研究从不同视角研究了市政排水历时暴雨与水利(河道)排涝(除涝)历时暴雨的设计标准衔接关系,但两级排涝标准的衔接会带来怎样的风险,以及如何揭示市政排水标准与水利排涝标准衔接所带来的风险,这些问题有待进一步深入研究。

鉴于此,本文通过剖析市政排水与水利排涝衔接的本质,揭示市政排水标准与水利排涝标准的衔接存在两类风险,并揭示两类衔接风险存在的机理,由此构建市政排水标准与水利排涝标准衔接风险的分析模型,且以广州市中心城区为例,研究市政排水标准与水利排涝标准衔接的风险。

1 理论体系

1.1 市政排水与水利排涝衔接的本质

城镇内涝治理体系如图1所示,市政排水系统是解决城市小区、街道等较小汇流面积上短历时暴雨产生的涝水排向城市内河网的问题;水利排涝系统是解决较大汇流面积上较长历时暴雨产生的涝水通过城市内河网的蓄排问题。从排水角度分析,市政排水是城市地面雨水排入城市内河网的一个通道,城市内河网是市政排水网络的接纳体,其暴雨涝水通过水利排涝排至区域外承泄区。由此可见,城镇内涝防治体系的有效运行不仅要求市政排水系统和水利排涝系统均能及时排除各自设计标准的暴雨

涝水,而且还要求市政排水与水利排涝两个系统的排水(排涝)能力相互衔接。因此,市政排水与水利排涝衔接的本质包含两层含义:①市政排水系统的排水能力必须保证其能及时将水利排涝设计标准内的暴雨涝水排至城市内河网,确保水利排涝有水可排,地面不积水;②水利排涝系统的排涝能力必须保证其能及时将市政排水系统排向城市内河网的暴雨涝水有效蓄存或排至区域外承泄区,确保市政排水口的畅通,内河网水位不超过最高控制水位,陆地不受淹。

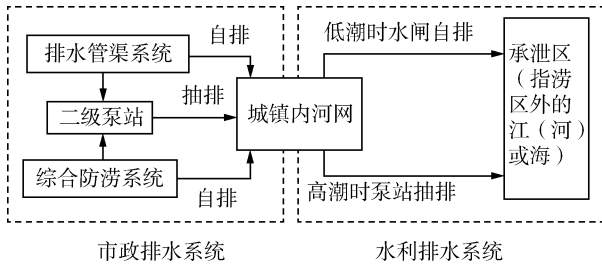


图1 城镇内涝防治体系

Fig. 1 Urban local flood control system

1.2 市政排水标准与水利排涝标准衔接的风险

市政排水系统的排水能力与水利排涝系统的排涝能力均以其设计暴雨为设计依据,设市政排水历时为 t_m ,水利排涝历时为 t_c ,市政排水的设计标准(重现期)为 T_m ,水利排涝的设计标准(重现期)为 T_c ,市政排水重现期为 T_m 的设计暴雨量为 x_T ,水利排涝重现期为 T_c 的设计暴雨量为 y_T ,则市政排水系统的排水能力能保证其及时排除暴雨量 x_T 的涝水,而当历时 t_m 内的暴雨量大于 x_T 时,则不能及时排除;同理,水利排涝系统的排水能力能保证其有效蓄存或及时排除暴雨量 y_T 的涝水,而当历时 t_c 内的暴雨量大于 y_T 时,则不能有效蓄存或及时排出。若一场暴雨过程,水利排涝历时 t_c 的暴雨量没有超过 y_T ,而市政排水历时 t_m 的暴雨量却超过了 x_T ,则导致市政排水系统不能将水利排涝标准内的暴雨涝水及时排至城市内河网;又倘若一场暴雨过程,市政排水历时 t_m 的暴雨量未超过 x_T ,而水利排涝历时 t_c 的暴雨量超过了 y_T ,则导致水利排涝系统难以将市政排水标准内的暴雨涝水有效蓄存或及时排出。由此可见,无论市政排水标准和水利排涝标准如何衔接,客观上始终存在两类风险:①市政排水系统不能及时排除水利排涝标准内的暴雨涝水;②水利排涝系统难以将市政排水标准内的暴雨涝水有效蓄存或及时排出。本文将两级排涝标准衔接客观存在的两类风险分别称为第一类衔接风险和第二类衔接风险。

1.3 衔接风险存在的机理

暴雨过程是随机的,一场大暴雨既可能是高强度

度的短历时大暴雨,也可能是强度并不高的长历时大暴雨。当发生高强度的短历时大暴雨时,由于市政排水历时的暴雨量超过了市政排水的设计暴雨,致使市政排水系统不能及时将暴雨涝水排入城市内河网从而导致地面积水,使得水利排涝设施没有足够的雨水蓄排;当发生强度不高的长历时大暴雨时,虽然市政排水历时的暴雨量没有超过市政排水历时的设计暴雨,市政排水系统能够及时将暴雨涝水排入城市内河网,但是由于水利排涝历时的暴雨量超过了水利排涝的设计暴雨,致使水利排涝系统不能将市政排水系统排至城市内河网的雨水有效蓄存或及时排出,导致涝水漫溢、陆地受淹。由此可见,第一类衔接风险是因高强度的短历时大暴雨所致,是在水利排涝历时暴雨不超标的情况下市政排水历时暴雨超标,导致市政排水系统不能及时排除水利排涝标准内的暴雨涝水;第二类衔接风险是因强度并不高的长历时大暴雨所致,是在市政排水历时暴雨不超标的情况下水利排涝历时暴雨超标,导致水利排涝系统难以将市政排水标准内的暴雨涝水有效蓄存或及时排出。因此,这两类暴雨发生的概率就是城镇内涝防控体系中市政排水标准与水利排涝标准的两类衔接风险。

2 衔接风险分析模型

由于两类衔接风险存在的机理是客观存在两类暴雨过程:①对于高强度的短历时大暴雨,其水利排涝历时暴雨不超标而市政排水历时暴雨超标;②对于强度不高的长历时大暴雨,其市政排水历时暴雨不超标而水利排涝历时暴雨超标,因此,必须基于这两类暴雨发生的概率来研究市政排水标准与水利排涝标准的衔接风险。

2.1 模型构建

从风险管理角度,市政排水与水利排涝设计标准的合理衔接,就是要求在水利排涝历时暴雨没有超标的情况下,市政排水历时暴雨超标的风险概率较小;且在市政排水历时暴雨没有超标的情况下,水利排涝暴雨超标的风险概率也较小,通常可取风险概率不超过5%。由此构建市政排水与水利排涝设计标准衔接的风险分析模型。

设市政排水历时 t_m 的暴雨量为 X ,水利排涝历时 t_c 的暴雨量为 Y ,则第一类衔接风险 R_1 可表示为

$$R_1 = P(X \geq x_T | Y \leq y_T) \quad (1)$$

其含义为当水利排涝历时暴雨量未超过设计暴雨量 y_T 时,市政排水历时暴雨量超过设计暴雨量 x_T 的概率。

第二类衔接风险 R_2 可表示为

$$R_2 = P(Y \geq y_T | X \leq x_T) \quad (2)$$

其含义为当市政排水历时暴雨量未超过设计暴雨量 x_T 时,水利排涝历时暴雨量超过设计暴雨量 y_T 的概率。

由此可见,市政排水与水利排涝设计标准衔接风险分析须关注 $P(X \geq x_T | Y \leq y_T)$ 和 $P(Y \geq y_T | X \leq x_T)$ 这两个条件概率,从规划设计角度,可看作以 (x_T, y_T) 为设计组合而存在的组合风险率^[18,26]。

2.2 模型求解方法

不失一般性,将 (x_T, y_T) 记为 (x, y) 。求解条件概率 $P(X \geq x | Y \leq y)$ 和 $P(Y \geq y | X \leq x)$,须正确理解其表达的含义,合理构建市政排水历时暴雨与水利排涝历时暴雨的联合分布^[18]。

根据常规取样方法,分别取以水利排涝为主、市政排水相应和以市政排水为主、水利排涝相应的联合观测样本构建联合分布。设以水利排涝历时 t_c 的暴雨量 Y 为主,其相应市政排水历时 t_m 的暴雨量为 X' ,联合观测系列的联合分布为 $F_c(Y, X')$;以市政排水历时 t_m 的暴雨量 X 为主,其相应水利排涝历时 t_c 的暴雨量为 Y' ,联合观测系列的联合分布为 $F_m(X, Y')$;市政排水历时 t_m 的暴雨量 X 、水利排涝历时 t_c 的暴雨量 Y 的边缘分布分别为 $F_X(X)$ 、 $F_Y(Y)$;相应市政排水历时 t_m 的暴雨量 X' 、相应水利排涝历时 t_c 的暴雨量 Y' 的边缘分布分别为 $F_{X'}(X')$ 、 $F_{Y'}(Y')$ 。根据 Sklar 定理^[19],存在唯一的 Copula 函数 $C_1(u, v)$ 、 $C_2(u, v)$,使得:

$$F_c(Y, X') = C_1[F_Y(Y), F_{X'}(X')] \quad (3)$$

$$F_m(X, Y') = C_2[F_X(X), F_{Y'}(Y')] \quad (4)$$

联合分布函数 $F_c(Y, X')$ 、 $F_m(X, Y')$ 的性质分别和与之对应的 Copula 函数 $C_1(u, v)$ 、 $C_2(u, v)$ 密切相关。Copula 函数中,采用阿基米德族 Copula 函数描述水文变量已具理论和应用基础^[20-26]。根据水利排涝历时的暴雨量 Y 与其相应市政排水历时的暴雨量 X' 的秩相关系数值,以及市政排水历时的暴雨量 X 与其相应水利排涝历时的暴雨量 Y' 的秩相关系数值,大致选用合适的 Copula 函数。最后根据评价指标选取最适合的 Copula 函数,并采用离差平方和最小准则评价 Copula 方法的有效性^[21-22]。

由此得到两类衔接风险的计算公式分别为^[18,26]

$$R_1 = P(X' \geq x | Y \leq y) = \frac{P(X' \geq x, Y \leq y)}{P(Y \leq y)} = \frac{F_Y(y) - F_c(y, x)}{F_Y(y)} \quad (5)$$

$$R_2 = P(Y' \geq y | X \leq x) = \frac{P(Y' \geq y, X \leq x)}{P(X \leq x)} = \frac{F_X(x) - F_m(x, y)}{F_X(x)} \quad (6)$$

对确定的市政排水(或水利排涝)设计标准, $F_X(x)$ 、 $F_Y(y)$ 为确定值,故与水利排涝(或市政排水)的设计标准组合的风险率均随水利排涝(或市政排水)标准的提高而减小。市政排水与水利排涝设计标准的合理衔接应使两类衔接风险都比较小(常取小于 5%)。

3 实例研究

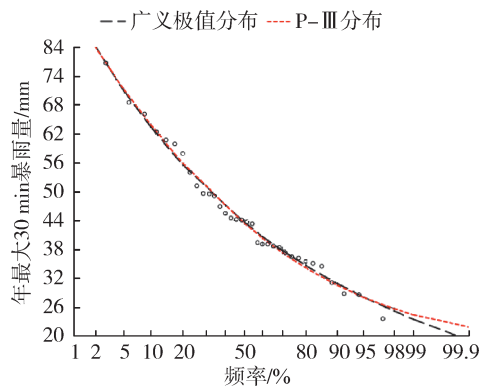
3.1 数据和样本选取

广州市中心城区内涝灾害频繁发生,该区域内仅广州五山气象观测站具有长系列的详细降雨观测资料。由于广州五山气象观测站 1980—2013 年各历时(5 min、10 min、15 min、20 min、30 min、45 min、60 min、90 min、120 min、24 h)年最大降水量序列中,年最大 5 min、10 min、15 min、20 min 降水量序列存在显著变异点,分别出现在 1988 年、1987 年、1984 年、1984 年,而其他各历时的降水量序列不存在显著变异^[27],故本文仅分析市政排水 30 min、60 min、90 min、120 min 暴雨与水利排涝 24 h 暴雨的衔接关系。

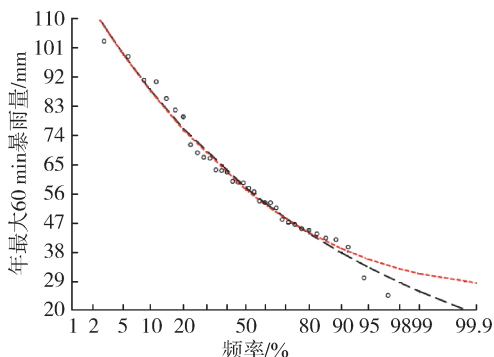
采用广州五山气象观测站 1980—2013 年连续 34 年详细降雨资料,分别选取年最大 30 min、60 min、90 min、120 min 暴雨量,抽取各同场次暴雨的连续最大 24 h 暴雨量,构成以市政排水暴雨为主、水利排涝暴雨相应的联合观测系列;选取年最大 24 h 暴雨量,抽取各同场次暴雨的最大 30 min、60 min、90 min、120 min 暴雨量,构成以水利排涝暴雨为主、市政排水暴雨相应的联合观测系列。

3.2 边缘分布构建

对于市政排水年最大 30 min、60 min、90 min、120 min 暴雨系列和水利排涝年最大 24 h 暴雨系列分别采用 P-III 型分布模式和广义极值分布模式择优构建其边缘分布。对相应的水利排涝 24 h 暴雨系列与相应的市政排水 30 min、60 min、90 min、120 min 暴雨系列均采用 P-III 型分布模式构建其边缘分布。采用比较稳健的线性矩法结合目估适线法估计分布和统计参数,采用拟合优度指标优选分布。限于篇幅,此处仅给出年最大 30 min、60 min 暴雨系列的分布结果(图 2)。经对比分析发现,年最大 30 min、60 min 暴雨系列广义极值分布模式的拟合结果均优于 P-III 型分布模式的拟合结果。根据广义极值分布模式的拟合结果,年最大 30 min 暴雨系列



(a) 年最大 30 min 暴雨量



(b) 年最大 60 min 暴雨量

图 2 广义极值分布和 P-III 型分布模式的优化拟合频率曲线对比

Fig. 2 Comparison of optimized fit frequency curves for generalized extreme value distribution and P-III distribution

的形状参数、尺度参数和位置参数分别为： $\xi = -0.008, \sigma = 10.595, \mu = 39.750$ ；年最大 60 min 暴雨系列的 3 个分布参数分别为： $\xi = -0.027, \sigma = 16.597, \mu = 51.682$ 。

3.3 联合分布构建

市政排水各历时年最大暴雨与相应水利排涝 24 h 暴雨,以及水利排涝年最大 24 h 暴雨与相应市政排水各历时暴雨的相关性可用 Kendall 秩相关系数来表征,各联合观测系列的 Kendall 秩相关系数见表 1。

由表 1 可见,以市政排水为主的各历时年最大暴雨与相应水利排涝 24 h 暴雨的 Kendall 秩相关系数均较高,故采用 GH Copula 函数与 Clayton Copula 函数来描述变量间的相关性;以水利排涝为主的年最大 24 h 暴雨与相应市政排水各历时暴雨的 Kendall 秩相关系数均相对较低,而且对于相应市政排水历时 30 min 暴雨, Kendall 秩相关系数为

-0.0053,因此,该组合采用 AMH Copula 函数与 Frank Copula 函数描述变量间的相关性,其他组合采用 GH Copula 函数、Clayton Copula 函数、AMH Copula 函数和 Frank Copula 函数等 4 种阿基米德族 Copula 函数描述变量间的相关性。本文采用理论联合分布概率与经验联合分布概率适线和离差平方和最小 (ordinary least squares, OLS) 准则评价 Copula 方法的有效性,选取符合 OLS 准则的 Copula 函数作为联结函数^[22]。

通过分析计算,得到以市政排水为主的 30 min、60 min、90 min、120 min 暴雨量 $X_{30\text{min}}, X_{60\text{min}}, X_{90\text{min}}, X_{120\text{min}}$ 与相应水利排涝 24 h 暴雨量 $Y'_{24\text{h}}$ 的联合分布 $F_m(X, Y')$ 和以水利排涝为主的 24 h 暴雨量 $Y_{24\text{h}}$ 与相应市政排水 30 min、60 min、90 min、120 min 暴雨量 $X'_{30\text{min}}, X'_{60\text{min}}, X'_{90\text{min}}, X'_{120\text{min}}$ 的联合分布 $F_c(Y, X')$ ：

$$F_m(X_{30\text{min}}, Y'_{24\text{h}}) = \exp\{-[(-\ln F_X(X_{30\text{min}}))^{1.5803} + (-\ln F_{Y'}(Y'_{24\text{h}}))^{1.5803}]^{1/1.5803}\} \quad (7)$$

$$F_m(X_{60\text{min}}, Y'_{24\text{h}}) = \exp\{-[(-\ln F_X(X_{60\text{min}}))^{1.8826} + (-\ln F_{Y'}(Y'_{24\text{h}}))^{1.8826}]^{1/1.8826}\} \quad (8)$$

$$F_m(X_{90\text{min}}, Y'_{24\text{h}}) = \exp\{-[(-\ln F_X(X_{90\text{min}}))^{1.7531} + (-\ln F_{Y'}(Y'_{24\text{h}}))^{1.7531}]^{1/1.7531}\} \quad (9)$$

$$F_m(X_{120\text{min}}, Y'_{24\text{h}}) = \exp\{-[(-\ln F_X(X_{120\text{min}}))^{1.6214} + (-\ln F_{Y'}(Y'_{24\text{h}}))^{1.6214}]^{1/1.6214}\} \quad (10)$$

$$F_c(Y_{24\text{h}}, X'_{30\text{min}}) = F_Y(Y_{24\text{h}})F_{X'}(X'_{30\text{min}}) / [1 + 0.024(1 - F_Y(Y_{24\text{h}}))(1 - F_{X'}(X'_{30\text{min}}))] \quad (11)$$

$$F_c(Y_{24\text{h}}, X'_{60\text{min}}) = F_Y(Y_{24\text{h}})F_{X'}(X'_{60\text{min}}) / [1 - 0.4868(1 - F_Y(Y_{24\text{h}}))(1 - F_{X'}(X'_{60\text{min}}))] \quad (12)$$

$$F_c(Y_{24\text{h}}, X'_{90\text{min}}) = \exp\{-[(-\ln F_Y(Y_{24\text{h}}))^{1.3047} + (-\ln F_{X'}(X'_{90\text{min}}))^{1.3047}]^{1/1.3047}\} \quad (13)$$

$$F_c(Y_{24\text{h}}, X'_{120\text{min}}) = \exp\{-[(-\ln F_Y(Y_{24\text{h}}))^{1.4095} + (-\ln F_{X'}(X'_{120\text{min}}))^{1.4095}]^{1/1.4095}\} \quad (14)$$

3.4 风险分析

对市政排水各历时的暴雨设计标准,取重现期为 50 a、20 a、10 a、5 a、3 a 和 2 a;对水利排涝 24 h 暴雨设计标准,取重现期为 50 a、30 a、20 a、10 a 和 5 a。对以水利排涝为主的 24 h 暴雨与相应市政排水某历时暴雨的任一重现期组合,根据其边缘分布概率

表 1 各联合观测系列的 Kendall 秩相关系数

Table 1 Kendall rank correlation coefficients for combined observation series

联合观测系列	秩相关系数			
	$t_m = 30\text{ min}$	$t_m = 60\text{ min}$	$t_m = 90\text{ min}$	$t_m = 120\text{ min}$
市政排水为主、水利排涝相应	0.3672	0.4688	0.4296	0.3832
水利排涝为主、市政排水相应	-0.0053	0.1248	0.2335	0.2906

从式(11)~(14)中选取相应的联合分布函数求得其联合分布概率,再由式(5)计算其第一类衔接风险;对以市政排水为主的某历时暴雨与相应水利排涝24h暴雨的任一重现期组合,根据其边缘分布概率从式(7)~(10)中选取相应的联合分布函数求得其联合分布概率,再由式(6)计算其第二类衔接风险。市政排水各历时暴雨与水利排涝24h暴雨衔接的两类风险结果如表2所示。

由表2可见,对市政排水设计暴雨重现期取50a、20a、10a、5a、3a和2a,水利排涝暴雨重现期取50a、30a、20a、10a和5a,且市政排水暴雨设计标准不超过水利排涝暴雨设计标准的任一组合情况,衔接风险总体有如下规律:①第一类衔接风险较大,随市政排水标准的提高而显著减小,而随水利排涝标准变化不明显,当市政排水设计暴雨重现期分别为2a、3a、5a和10a时,第一类衔接风险分别为22.72%~32.85%、12.68%~18.64%、5.18%~11.23%和1.88%~6.86%;②第二类衔接风险较小,且随水利排涝标准的提高而减小,随市政排水标准的提高稍有增加,若水利排涝设计暴雨重现期不低于10a,则第二类衔接风险均值最大为1.98%,最大衔接风险为3.95%。

目前广州市中心城区市政管网的排水标准为1

年一遇至3年一遇,水利排涝标准为20年一遇,则第一类衔接风险不低于15.63%,而第二类衔接风险不到1%。也就是说,市政排水系统至少有15.63%的概率不能将水利排涝标准内的暴雨涝水及时排入城市内河网,而水利排涝系统仅有不到1%的概率不能及时将市政排水系统排入城市内河网的暴雨涝水排出。由此可见,欲提升城市应对暴雨内涝的能力,必须设法提高市政排水设计标准。根据GB 50014—2021《室外排水设计规范》,特大城市中心城区雨水管渠设计重现期是3~5a,即使按5年一遇标准对市政排水管网进行提标改造,其第一类衔接风险仍达7.76%~11.24%。针对已建排水系统的扩建或提标改造,将面临耗资巨大、实施困难、拆迁、耗时等多方面难题,尤其在人口、建筑密度大,场地空间有限,地下管线拥挤等限制因素较多的老城区和已建城区,通过改扩建市政管网以提高市政排水标准是不可取的。即使在一些被称之为小排水系统的发达国家,市政管网排水系统主要担负重现期1~10a范围暴雨的安全排放,以保证城市和居住区的正常运行^[28]。因此,广州市应通过完善排水管网、建设城镇涝水行泄通道和优化运行管理等综合措施来应对,以提高市政排水标准。若采用综合措施使市政排水设计重现期达到10a或20a的标准,

表2 市政排水与水利排涝不同暴雨组合的两类衔接风险

Table 2 Calculation results of two kinds of matching risks for different rainstorm combinations of municipal drainage and water conservancy drainage

T_m/a	T_c/a	$R_1/\%$					$R_2/\%$				
		$t_m = 30 \text{ min}$	$t_m = 60 \text{ min}$	$t_m = 90 \text{ min}$	$t_m = 120 \text{ min}$	平均值	$t_m = 30 \text{ min}$	$t_m = 60 \text{ min}$	$t_m = 90 \text{ min}$	$t_m = 120 \text{ min}$	平均值
50	50	2.28	1.17	0.6	0.18	1.06	0.24	0.16	0.62	0.96	0.50
20	50	4.27	2.65	1.81	0.94	2.42	0.14	0.07	0.33	0.59	0.28
20	30	4.27	2.63	1.62	0.79	2.33	0.31	0.19	0.71	1.25	0.62
20	20	4.27	2.61	1.46	0.68	2.26	0.57	0.41	1.25	2.19	1.11
10	50	6.84	5.00	4.10	3.05	4.75	0.09	0.04	0.20	0.39	0.18
10	30	6.84	4.97	3.77	2.70	4.57	0.21	0.10	0.43	0.84	0.40
10	20	6.85	4.93	3.48	2.40	4.42	0.38	0.22	0.77	1.52	0.72
10	10	6.86	4.8	2.94	1.88	4.12	1.07	0.82	2.09	3.95	1.98
5	50	11.23	9.56	9.22	8.91	9.73	0.06	0.02	0.11	0.25	0.11
5	30	11.24	9.5	8.76	8.34	9.46	0.13	0.05	0.24	0.54	0.24
5	20	11.24	9.42	8.29	7.76	9.18	0.25	0.12	0.45	0.98	0.45
5	10	11.25	9.19	7.31	6.55	8.58	0.71	0.44	1.26	2.68	1.27
5	5	11.28	8.72	6.15	5.18	7.83	2.04	1.63	3.50	6.99	3.54
3	50	16.45	15.84	16.97	18.64	16.98	0.04	0.01	0.07	0.17	0.07
3	30	16.45	15.75	16.44	17.99	16.66	0.10	0.03	0.16	0.37	0.17
3	20	16.46	15.63	15.87	17.26	16.31	0.18	0.07	0.29	0.69	0.31
3	10	16.48	15.27	14.51	15.51	15.44	0.51	0.26	0.81	1.90	0.87
3	5	16.52	14.52	12.68	13.07	14.20	1.47	0.99	2.33	5.14	2.48
2	50	23.18	24.63	28.28	32.85	27.24	0.03	0.01	0.05	0.12	0.05
2	30	23.19	24.49	27.55	32.22	26.86	0.07	0.02	0.10	0.27	0.12
2	20	23.20	24.33	27.14	31.50	26.54	0.13	0.04	0.19	0.49	0.21
2	10	23.22	23.81	25.6	29.58	25.55	0.37	0.16	0.55	1.37	0.61
2	5	23.28	22.72	23.24	26.48	23.93	1.09	0.62	1.58	3.79	1.77

则第一类衔接风险的均值可降为 4.42% 或 2.26%。

4 结 语

本文揭示了市政排水系统与水利排涝系统相互衔接的本质,包含两层含义:①市政排水系统的排水能力必须保证其及时将水利排涝设计标准内的暴雨涝水排至城市内河网;②水利排涝系统的排涝能力必须保证其能及时将市政排水设计标准内的暴雨涝水排至区域外承泄区。市政排水标准和水利排涝标准的衔接客观上存在两类风险:①市政排水系统不能及时排除水利排涝标准内的暴雨涝水;②水利排涝系统难以将市政排水标准内的暴雨涝水有效蓄存或及时排出。两类衔接风险存在的客观原因是存在两种暴雨过程:①水利排涝历时暴雨不超标情况下市政排水历时暴雨超标;②市政排水历时暴雨不超标情况下水利排涝历时暴雨超标。由此构建了两级设计标准的衔接风险分析模型。

本文构建的衔接风险分析模型适用于城镇内涝防治中市政排水标准与水利排涝标准的衔接风险分析,可为科学构建城镇内涝防治体系,有效应对城镇内涝提供科技支撑。

本研究实例中,基于年最大值取样,选取了两类联合观测系列:①以市政排水暴雨为主、水利排涝暴雨相应的联合观测系列;②以水利排涝暴雨为主、市政排水暴雨相应的联合观测系列,这种选择方法会遗漏部分暴雨信息。若要提高风险分析结果的精度,可基于超阈值选择来选取联合观测样本。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Chang. Climate change 2013 the physical science basis: working group I contribution to the fifth assess[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advance in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))
- [3] 王浩,王佳,刘家宏,等. 城市水循环演变及对策分析[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 3-11. (WANG Hao, WANG Jia, LIU Jiahong, et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 3-11. (in Chinese))
- [4] 张建云,王银堂,刘翠善,等. 中国城市洪涝及防治标准讨论[J]. 水力发电学报, 2017, 36(1): 1-6. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, LIU Cuishan, et al. Discussion on the standards of urban flood and waterlogging prevention in China [J]. Journal of Hydroelectric

- Engineering, 2017, 36(1): 1-6. (in Chinese))
- [5] TAKEUCHI K. Annual maximum series and partial duration series evaluation of Langbein's formula and Chow's discussion[J]. Journal of Hydrology, 1984, 68(1/2/3/4): 275-284.
- [6] 邓培德. 城市暴雨两种选择方法的概率关系与应用评述[J]. 给水排水, 2006, 32(6): 39-42. (DENG Peide. Review on probability and application of two sampling methods for urban storm [J] Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(6): 39-42. (in Chinese))
- [7] 邵卫云. 基于水文特性的暴雨选择方法的频率转换[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(8): 1597-1603. (SHAO Weiyun. Probability relationships between rainstorm sampling methods based on hydrological characters[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(8): 1597-1603. (in Chinese))
- [8] 陈鑫,邓慧萍,马细霞. 基于 SWMM 的城市排涝与排水体系重现期衔接关系研究[J]. 给水排水, 2009, 35(9): 114-117. (CHEN Xin, DENG Huiping, MA Xixia. Study on the matching relationship of the return period between urban waterlogging drainage and urban drainage system based on SWMM model[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(9): 114-117. (in Chinese))
- [9] 黄国如,王欣. 基于城市雨洪模型的市政排水与水利排涝标准衔接研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 1-5. (HUANG Guoru, WANG Xin. Study on standard syntaxis of urban drainage between pipe and river based on urban storm flood models[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 1-5. (in Chinese))
- [10] 李永坤,房亚军,潘兴瑶,等. 北京城市典型流域市政排水与水利除涝衔接关系研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 603-608. (LI Yongkun, FANG Yajun, PAN Xingyao, et al. Cohesive relationship for return period between municipal drainage system and waterlogged drainage system[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5): 603-608. (in Chinese))
- [11] 李连文. 基于 MIKE 模型的城市水利除涝与市政排水衔接研究[D]. 南昌:南昌大学, 2020.
- [12] 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): 39-42. (XIE Hua, HUANG Jiesheng. 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): 39-42. (in Chinese))
- [13] 刘俊,俞芳琴,张建涛,等. 城市管道排水与河道排涝设计标准的关系[J]. 中国给水排水, 2007, 23(2): 43-45. (LIU Jun, YU Fangqin, ZHANG Jiantao, et al. Study on relationship between design standards of pipe and river drainage[J]. China Water and Wastewater, 2007, 23(2): 43-45. (in Chinese))
- [14] 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 Xing, LI Chaofang, LIU Zhilong. 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))
- [15] 陈庆沙, 黄友谊, 戴贤波, 等. 厦门市管网排水与河道排涝标准关系分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(10): 60-62. (CHEN Qingsha, HUANG Youyi, DAI Xianbo, et al. Study on relationship between design standard of pipe and river drainage of Xiamen City [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(10): 60-62. (in Chinese))
- [16] 陈子燊, 高时友, 李鸿皓. 基于二次重现期的城市两级排涝标准衔接的设计暴雨[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 382-389. (CHEN Zishen, GAO Shiyu, LI Honghao. Design storm for mixed level-1 and level-2 urban drainage standards based on the secondary return period [J]. Advance in Water Science, 2017, 28(3): 382-389. (in Chinese))
- [17] 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 Weihong, LI Qiongfang. Study on linkage between drainage standards and waterlogging control standards in Shanghai [J]. China Water and Wastewater, 2015, 31(15): 122-126. (in Chinese))
- [18] 刘曾美, 覃光华, 陈子燊, 等. 感潮河段水位与上游洪水和河口潮位的关联性研究[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1278-1285. (LIU Zengmei, QIN Guanghua, CHEN Zishen, et al. Study on the correlation of the water level of the tidal river with upstream flood and estuary tide level [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(11): 1278-1285. (in Chinese))
- [19] NELSEN R B. An introduction to Copulas [M]. New York: Springer-Verlag, 1999.
- [20] SALVADORI G, DE MICHELE C. Frequency analysis via copulas: theoretical aspects and applications to hydrological events [J]. Water Resource Research, 2004, 40: 1-17.
- [21] 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))
- [22] 刘曾美, 陈子燊. 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 Zengmei, CHEN Zishen. 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))
- [23] SALVADORI G, DE MICHELE C. Multivariate multiparameter extreme value models and return periods: a copula approach [J]. Water Resource Research, 2010, 46: 1-11.
- [24] SALVADORI G, DURANTE F, DE MICHELE C. A multivariate copula-based framework for dealing with hazard scenarios and failure probabilities [J]. Water Resource Research, 2016, 52(5): 3701-3721.
- [25] 刘曾美, 王尚伟, 蔡玉婷, 等. 感潮地区涝区暴雨与承泄区上游洪水的遭遇规律[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 89-94. (LIU Zengmei, WANG Shangwei, CAI Yuting, et al. Coincidence rules of rainfall in waterlogging area of tide-affected area and upstream flood in flood area of drainage receiver [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 89-94. (in Chinese))
- [26] 刘曾美. 极值分布理论与风险分析在珠江三角洲水环境的应用[D]. 广州: 中山大学, 2011.
- [27] 陈梅, 陈斯达, 刘曾美, 等. 广州市中心城区短历时暴雨变异特性研究[J]. 人民长江, 2016, 47(12): 1-5. (CHEN Mei, CHEN Sida, LIU Zengmei, et al. Study on variation characteristics of short-duration rainstorm in central urban area of Guangzhou [J]. Yangtze River, 2016, 47(12): 1-5. (in Chinese))
- [28] U. S. Department of Transportation. Urban drainage design manual [M]. 3rd ed. Washington D. C.: Hydraulics Engineering Publication, 2009.

(收稿日期: 2021-08-23 编辑: 施业)

· 简讯 ·

喜 报

《水资源保护》2020 年被评为中国精品科技期刊、RCCSE 中国权威学术期刊, 2021 年 4 月收到美国《工程索引》EI 收录的通知, 12 月被评为第 7 届华东地区优秀期刊、江苏省新闻出版政府奖期刊奖提名奖。

《水资源保护》近年来建立了“一刊一会一平台”的办刊模式, 以办好《水资源保护》实体刊为核心, 以会议和网络平台为两翼, 对应《水资源保护》的刊文范围, 创立了几大品牌学术会议——“水资源高效利用与节水技术论坛”“水生态大会”“水利信息化技术论坛”, 以及《水资源保护》线上分享会, 邀请全国知名专家做学术报告, 很好地团结凝聚了专家; 在网络利用方面, 充分利用微信、QQ、微博多种平台, 尤其在微信工作群和微信公众号方面, 充分发挥网络传播优势, 很好地扩大和提高了《水资源保护》的影响。在内容质量方面, 《水资源保护》及时追踪学科发展前沿和重大热点问题, 以及国家、省部级等各类重大基金研究进展, 大力约稿, 不断做专栏、专辑, 近年来组织策划了黑臭水体治理、海绵城市建设、智慧水利、“一带一路”水资源研究、新疆水资源研究、长江大保护、黄河流域高质量发展、粤港澳水问题、长三角水问题、城市防洪等一系列反映学科研究热点的专题征稿, 彰显《水资源保护》期刊的专业特色, 提高了期刊的学术质量。

《水资源保护》编辑部