

二次重现期在暴雨洪涝灾害中的应用研究

范嘉炜^{1,2,3}, 袁明道^{1,2,3}, 马妍博^{1,2,3}, 潘展钊^{1,2,3}, 张旭辉^{1,2,3}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 广东省大坝安全技术管理中心, 广东 广州 510635; 3. 广东省山洪灾害突发事件应急技术研究中心, 广东 广州 510635)

摘要: 为了在暴雨洪涝灾害事件中实现城市防灾减灾的合理规划和有效预警, 构建了不同历时降雨组合联合分布模型, 应用 Copula 函数与二次重现期原理, 估算不同降雨组合下的联合重现期、同现重现期、二次重现期值, 以及在不同重现期下的降雨设计值。结果表明: 研究区设计暴雨值重现期的分布规律呈现为联合重现期 > 单变量重现期 > 二次重现期 > 同现重现期, 在 P_{1h} & P_{1d} 中, 二次重现期的估算设计暴雨值的误差范围为 0.22% ~ 1.74%, 在 P_{1h} & P_{3d} 中, 二次重现期误差范围为 0.42% ~ 1.89%。结论认为, 两种传统重现期在估算设计暴雨值时存在偏差, 二次重现期能够更准确地描述实际暴雨事件, 并起到了既满足防洪排涝设计要求, 又可以降低工程经济成本的作用。

关键词: Copula 函数; 二次重现期; 暴雨洪涝灾害; 城市排涝; 降雨组合

中图分类号: TV122⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)01-0149-06

Analysis of risk probability of different duration rainstorm disasters based on secondary return period

FAN Jiawei^{1,2,3}, YUAN Mingdao^{1,2,3}, MA Yanbo^{1,2,3}, PAN Zhanzhao^{1,2,3}, ZHANG Xuhui^{1,2,3}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China;

2. Dam Safety Technology Management Center of Guangdong Province, Guangzhou 510635, China;

3. Guangdong Technical Research Centre of Flood Disaster Emergency, Guangzhou 510635, China)

Abstract: In order to complete the reasonable plan and effective early warning of urban disaster in rainstorm and flood disaster, the joint rainfall distribution model of different precipitation duration is constructed. Using the Copula function and the principle of the second recurrence period, this paper estimated the joint recurrence period, co-occurrence period and recurrence period under different rainfall combinations, and the design rainfall value was also estimated under different recurrence period. It is concluded that the distribution law of the design recurrence days of rainstorm in the study area can be summarized as the joint return period > the univariate return period > the secondary return period > co-occurrence return period. In $P_{1h} - P_{1d}$, the error range of the secondary return period is 0.22% ~ 1.74%. In $P_{1h} - P_{3d}$, the error range is 0.42% ~ 1.89%. It is considered that there are estimation error between the two kinds of traditional return periods when estimating the design rainstorm value, and the second return period can describe the actual rainstorm more accurately. The design value which is based on the secondary return period can meet the design requirements of flood control and reduce the economic cost of the project

Key words: Copula function; secondary return period; storm flood disaster; urban drainage; rainstorm combination

1 研究背景

近年来, 受极端水文气候的影响, 我国中南部地区频繁遭遇强降雨袭击, 加剧了城市以及周边乡镇的内涝问题^[1-3]。虽然内涝问题是由多种因素共同

作用下而导致的, 但短时间内的强降雨是众多因素中一个最为主要的诱发因素, 城市的防洪排涝能力不足以应对暴雨的侵袭, 会直接造成城市内涝的发生。当降水集中且强度较大时, 加之市区排水设施落后, 建设标准不达标等因素, 受灾情况更为严重。

收稿日期: 2017-07-25; 修回日期: 2017-11-02

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2014-09)

作者简介: 范嘉炜(1991-), 女, 山西太原人, 硕士, 研究方向为水文水资源等。

内涝的发生给城市的交通运输、通讯、电力等重要系统带来了严重的破坏,给居民的日常生活造成了诸多不便和影响,巨大的经济损失远远超过由暴雨等极端天气导致的直接经济损失^[4-5]。

因此,为加强城市防洪减灾能力,提升现有城区排水设施标准,倪增华等^[6]建立了以年降雨均值和年降雨极值均值为变量的联合分布,提出在实际工程中采用联合重现期下的设计值作为防洪排涝标准更安全。曹伟华等^[7]指出仅基于单一致灾因素的重现期估算会低估致灾风险,多因素下的条件重现期更能准确地反映强降雨的致灾危险性,为实现防灾减灾规划和预警提供科学依据。刘成林等^[8]提出了基于降雨特征变量的分析方法,并指出合理确定降雨特征量是防洪排涝系统设计、调度运行的关键。刘曾美等^[9]提出了基于涝区暴雨和承泄区水位的治涝标准分析方法,并用联合分布模型描述其遭遇几率。黄宁^[10]以浙江省某城区为研究对象,在分析降雨事件的基础上,对内涝风险评估方法进行了验证。

在传统的水文计算中,通常采用单变量方法估算降雨特征值,忽略了变量间的相关性,显然这不利于准确评估暴雨致灾事件^[11],对合理设定城市防洪排涝标准也有较大的影响。本文以高州市大坡站1967-2016年降雨资料为依据,应用 Copula 函数^[12]和二次重现期理论^[13-15],建立不同历时降雨组合的联合分布函数,对比分析了传统重现期和二次重现期值的差异性,并计算了3种重现期法下的设计值,分析结果可为研究区洪涝灾害防治工程设计、合理制定防洪排涝标准提供参考依据。

2 研究方法

2.1 G-H Copula 函数

Gumbel-Hougaard (G-H) Copula 函数属 Archimedean-Copula 函数中的一种^[12],它能够将多个变量的边缘分布联结起来,反映变量之间的相关关系。目前在水文领域被广泛应用。Copula 函数由于表达形式简洁易懂,且由于在其构造基于多变量的联合分布函数时可以变换多种形式,在水利工程中也被广泛应用于分析实际问题。

Gumbel-Hougaard (G-H) Copula 的表达式为:

$$C(u_1, u_2) = \exp(-((-\ln u_1)^\theta + (-\ln u_2)^\theta)^{1/\theta}), \quad \theta \in [1, \infty) \quad (1)$$

式中: θ 为函数参数; u_1 和 u_2 为边缘分布函数。

参数 θ 的估计通常采用相关性指标法,通过建

立 Kendall 秩相关系数 τ 与 θ 的关系推求 θ 的值。 τ 与 θ 的关系可由式(2)表示:

$$\tau = 1 - \frac{1}{\theta}, \quad \theta \in [1, \infty) \quad (2)$$

而 τ 可由式(3)推求:

$$\tau = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}[(x_i - x_j)(y_i - y_j)] \quad (3)$$

式中: τ 为 Kendall 秩相关系数;sign 为符号函数; (x_i, y_i) 为测点据; n 为实测序列长度。

2.2 传统重现期与二次重现期

传统重现期分为联合重现期和同现重现期,目前被水文界普遍认可。变量的重现期与它们的联合分布函数 C 相关联, C 值越大,说明发生该水文事件的可能性越小,相应的重现期就越大。

若取降雨组合序列 P_1 和 P_2 为研究对象,将边缘分布函数以式(4)表示:

$$\begin{aligned} u &= f_1(x) = P(P_1 < x); \\ v &= f_2(y) = P(P_2 < y) \end{aligned} \quad (4)$$

对于 P_1 和 P_2 其中之一超过设定阈值时的工况以式(5)表示;对于 P_1 和 P_2 两者同时超过设定阈值时的工况以式(6)表示。目前水文界称两者为联合重现期和同现重现期,同属传统重现期计算法。 P_1 和 P_2 为设定的阈值, $u, v, C(u, v)$ 意义同前:

$$\begin{aligned} T_U(u, v) &= \frac{1}{P[P_1 > x \cup P_2 > y]} \\ &= \frac{1}{1 - C(u, v)} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} T_\cap(u, v) &= \frac{1}{P[P_1 > x \cap P_2 > y]} \\ &= \frac{1}{1 - u - v + C(u, v)} \end{aligned} \quad (6)$$

值得注意的是,目前在水利工程设计中,通常选择偏保守的联合重现期确定研究对象的设计值,然而在给定重现期条件下会对应无数多组不同的变量组合,每组变量都可以对应一个危险域^[16-17],因此对于相同的重现期值,样本所对应的危险域和安全域却不相同,直接导致了危险域之间互相矛盾的现象^[17]。显然,这种定义是有缺陷的。针对同现重现期而言,这个问题依旧存在。考虑到在定义传统重现期时导致危险域不唯一的情况, SALVADORI^[13-15]提出了一种新的定义重现期的方法,将 Kendall 测度 K_c 应用在重现期定义中,令联合概率小于等于 t 使得多变量分布函数与一维分布相关联。这种定义方式从根本上解决了传统重现期法的不合理性,使得变量组合在给定重现期或风险概率

情况下有唯一危险域与之对应。函数 K_c 可用式(7)表达,式中 $t \in (0, 1)$:

$$K_c(t) = P(W \leq t) = P(C(u, v) \leq t) \quad (7)$$

K_c 测度在 Gumbel - Hougaard(G - H) Copula 函数中表达形式如下:

$$K_c(t) = t - \frac{\varphi(t)}{\varphi'(t)} = t - \frac{t \ln t}{\theta} \quad (8)$$

式中: θ 为 G - H Copula 参数, $\varphi(t) = [-\ln(t)]^\theta$ 为生成元。

因此结合重现期定义,二次重现期可表达如下:

$$T_k = \frac{1}{P(C(u, v) \geq t)} = \frac{1}{1 - K_c(t)} \quad (9)$$

考虑到二次重现期在定义危险域中的优越性,本文在对高州市暴雨致灾事件进行风险评估时采用第二重现期与传统重现期法分别计算,并就计算的设计值和误差进行了全面的对比和分析。

3 研究区域分析

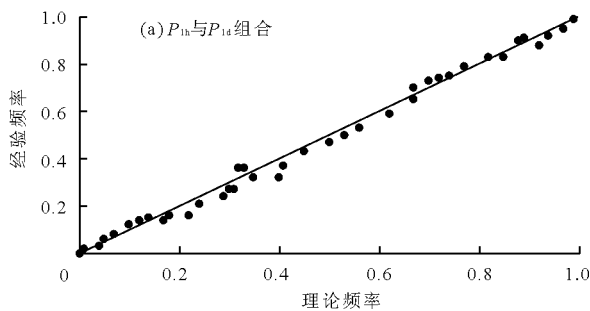
以高州市大坡站 1967 - 2016 年降雨资料为依据,选取年最大 1 h 降雨并以此时间为基准选取连续 1 d、3 d 降雨序列,建立 1 h ~ 1 d、1 h ~ 3 d 降雨组合样本。样本数据采用 P - III 型曲线频率适线,分析结果见表 1。

表 1 高州市大坡站各时段暴雨频率表 mm

历时	均值	C_v	C_s
1 h	52.49	0.25	0.75
1 d	188.93	0.31	0.72
3 d	252.60	0.51	1.78

通过式(3)计算得到 P_{1h} & P_{1d} 组合的秩相关系数 τ 为 0.454, P_{1h} & P_{3d} 组合的秩相关系数 τ 为 0.130,故两组变量间存在一定的正相关性,故分别建立降雨组合的联合分布函数,其中函数参数 θ 由 $\tau - \theta$ 关系推求:

$$P_{1h} \& P_{1d}: C(u, v) = \exp(-((- \ln u)^{1.83} + (- \ln v)^{1.83})^{1/1.83}) \quad (10)$$



$$P_{1h} \& P_{3d}: C(u, v) = \exp(-((- \ln u)^{1.15} + (- \ln v)^{1.15})^{1/1.15}) \quad (11)$$

为了确认 G - H Copula 函数是否能准确拟合变量间的相关关系,本文采用较为直观的图形分析法进行拟合优度评价^[18]。该方法将经验概率和理论概率分别标绘于同一图中,若当散点均分布在 45° 线周围时,则变量组合具有较好的相关性。变量组合的经验概率值可由 $F_{emp}(x_{i1}, x_{i2})$ 表示如下:

$$F_{emp}(x_{i1}, x_{i2}) = P(X_1 \leq x_{i1}, X_2 \leq x_{i2}) = \frac{n_i}{N + 1} \quad (12)$$

式中: N 为实测序列的总对数; n_i 为序列中小于等于 (x_{i1}, x_{i2}) 的对数。

将以上两组变量为研究对象计算得出的理论频率值和式(12)得到的经验频率值点绘于图 1 中。从图 1 可以看出, Gumbel - Hougaard Copula 构造的两组降雨序列联合分布的经验点值与理论计算值均匀分布在 45° 线附近,因此 G - H Copula 拟合效果良好。

由此建立基于 G - H Copula 函数的降雨组合在 3 种重现期下的联合分布模型和对应等值线图,并以 P_{1h} & P_{1d} 组合为例,绘于图 2。 P_{1h} & P_{3d} 联合分布特征与之相近,篇幅所限,故省略。从图 2 可见,联合重现期和二次重现期的等值线图的分布特征较相近,当取同样的降雨组合时,二次重现期的取值略大于联合重现期,相比而言,同现重现期图的分布形态较前两者有较大不同。

根据传统重现期的定义,在相同的单变量重现期条件下,联合重现期值一定小于同现重现期,且二次重现期值处于前两者之间,表 2 列出的 3 种重现期法下的降雨组合计算结果也充分反映了这种分布规律。例如在单变量条件下,取 P_{1h} 和 P_{1d} 均为 200 年一遇,则联合重现期为 169.5 a,同现重现期为 245.7 a,二次重现期为 221.0 a;取 P_{1h} 和 P_{3d} 均为 1000 年一遇,则联合重现期为 752.7 a,同现重现期为 1 121.0 a,二次重现期为 1 008.1 a。

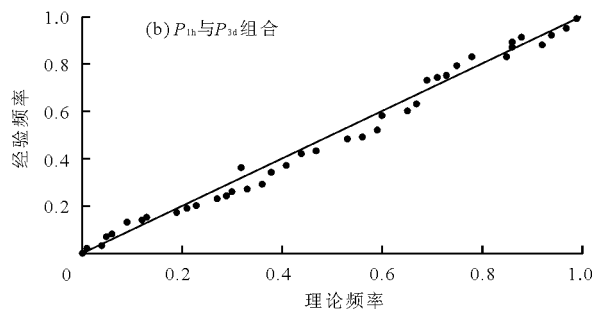


图 1 理论—经验频率拟合图

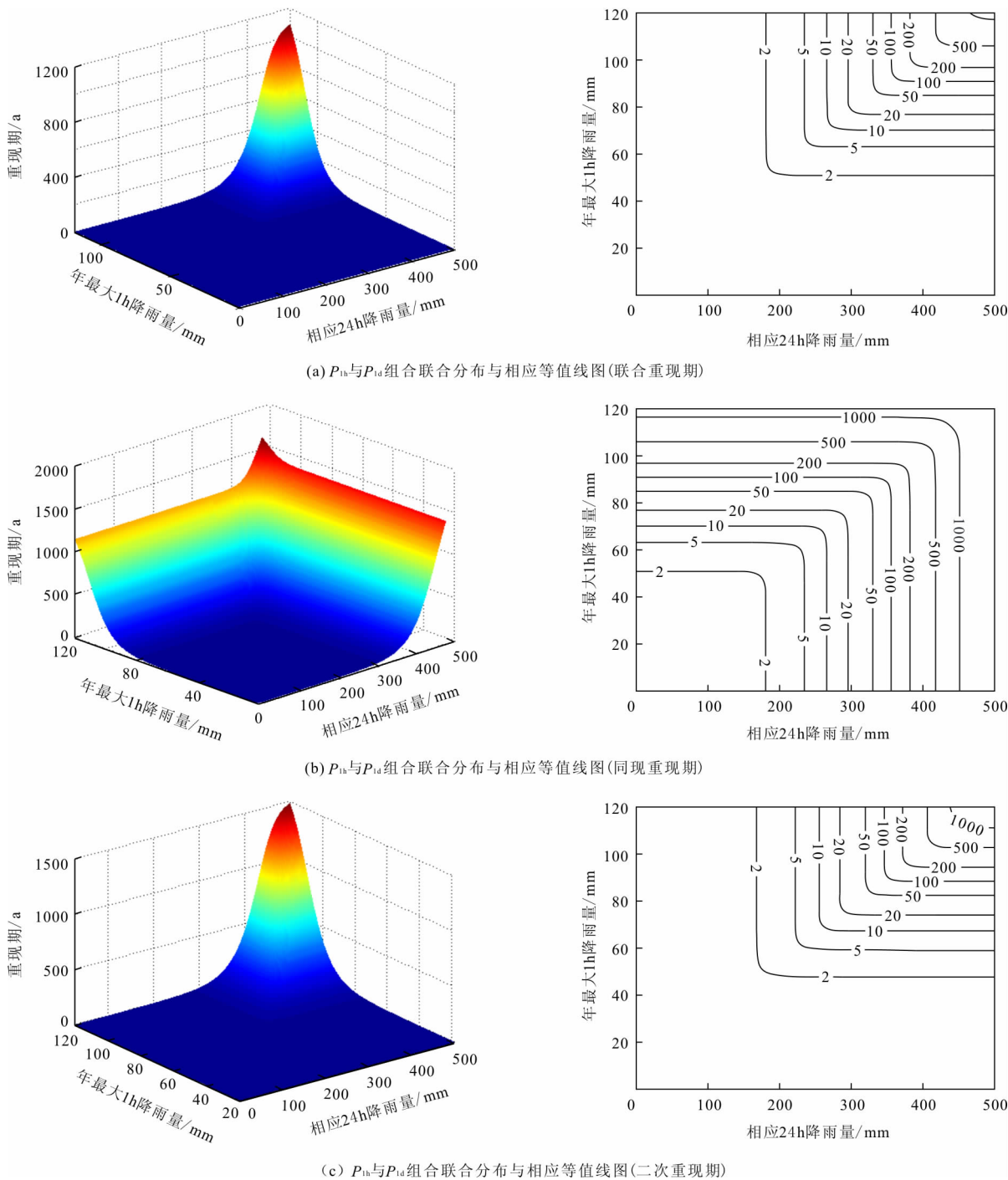


图2 不同重现期下的 P_{1h} & P_{1d} 组合联合分布与相应等值线图

在进行城市内涝防治工程设计中常常需要估算不同重现期下的降雨设计值,这对于合理确定排水管渠尺寸,实现工程效益与工程投资比最大化十分重要。在单变量的水文频率分析中,在给定的重现期下,存在唯一的设计值与之对应。但在有多个水文变量的情况下,无论重现期大小是否相同,都有无数种可能的的设计值组合。由于没有与概率函数相对应的反函数,因而无法直接获得设计值。权函数

法^[17]作为新兴的设计方法,可以与联合分布模型相结合,估算最可能出现的组合设计值:

$$(u_m, v_m) = \text{arc max } f(u, v) \tag{13}$$

$$f(u, v) = c(u, v)f_1(x)f_2(y) \tag{14}$$

式中: (u_m, v_m) 为所求降雨设计值组合; $c(u, v)$ 、 $f_1(x)$ 、 $f_2(y)$ 意义同前。

表3列出了年最大1h降雨量与连续累积1d和3d降雨组合的设计雨量。从表3中可以看出,

单变量降雨设计值分别小于和大于联合重现期与同现重现期条件下的降雨设计值,例如在 $P_{1h} & P_{1d}$ 降雨组合下,重现期取 500 年一遇时, P_{1d} 设计值为 418 mm,小于联合重现期下的设计值 423 mm,大于同现重现期下的设计值 409 mm,而基于二次重现期的设计值为 413 mm 介于以上两者之间且略小于单变量设计值,因此可以起到既满足防洪排涝设计要求,又可以降低工程经济成本的作用。

设计值的分布规律可简要概括为联合重现期 > 单变量重现期 > 二次重现期 > 同现重现期。出现以上分布规律的原因是由于联合重现期法扩大了事件的危险域,致使在同样的降雨组合下得到的危险事件发生的重现期较小,在相同的重现期条件下降雨组合的设计值较大;而同现重现期则与之相反,它缩

小了事件的危险域,过高估计了危险事件的重现期,采用此方法会使降雨设计值偏小。

表 2 不同历时降雨组合的 3 种重现期 a

重现期	$P_{1h} & P_{1d}$			$P_{1h} & P_{3d}$		
	联合	同现	二次	联合	同现	二次
1000	809.8	1176.1	1070.9	752.7	1121.0	1008.1
500	422.8	613.8	559.1	418.5	635.1	573.3
200	169.5	245.7	221.0	164.6	249.7	224.7
100	83.9	121.4	105.9	82.6	133.5	112.2
50	42.5	61.6	56.1	41.2	62.2	56.7
20	16.9	24.3	22.3	16.6	25.1	22.5
10	8.3	11.8	10.8	8.1	12.2	10.9
5	4.3	5.9	5.5	4.2	6.0	5.6

表 3 不同重现期下的降雨组合设计值

mm

重现期/ a	单变量设计值			$P_{1h} & P_{1d}$						$P_{1h} & P_{3d}$					
				联合重现期		同现重现期		二次重现期		联合重现期		同现重现期		二次重现期	
	P_{1h}	P_{1d}	P_{3d}	P_{1h}	P_{1d}	P_{1h}	P_{1d}	P_{1h}	P_{1d}	P_{1h}	P_{3d}	P_{1h}	P_{3d}	P_{1h}	P_{3d}
1000	115	451	1104	118	478	111	445	113	450	121	1148	110	1092	114	1098
500	106	418	956	109	423	104	409	105	413	111	970	100	942	104	960
200	97	383	804	99	387	95	376	96	379	101	814	93	794	96	794
100	91	357	712	93	362	89	351	90	353	94	724	88	694	90	700
50	85	333	624	87	337	83	326	84	329	89	632	82	608	84	616
20	77	297	510	79	302	75	290	76	294	80	522	73	496	76	502
10	70	268	424	73	272	67	264	69	266	74	434	66	414	69	416
5	63	236	338	66	240	61	229	62	233	67	346	60	320	62	326

表 4 列出了以 $P_{1h} & P_{1d}$ 和 $P_{1h} & P_{3d}$ 降雨组合为例,3 种重现期设计值与单变量重现期设计值的误差。在 $P_{1h} & P_{1d}$ 中,二次重现期的估算误差绝对值范围为 0.22% ~ 1.74%,最大误差均出现在重

现期 1 000 a;联合重现期和同现重现期误差范围分别为 1.04% ~ 5.99%、1.33% ~ 4.29%。在 $P_{1h} & P_{3d}$ 中,二次重现期的估算误差绝对值范围为 0.42% ~ 1.89%,同样较联合与同现法误差为小。

表 4 降雨组合设计值与单变量重现期设计值误差

%

重现期/ a	$P_{1h} & P_{1d}$						$P_{1h} & P_{3d}$					
	联合重现期		同现重现		二次重现期		联合重现期		同现重现		二次重现期	
	P_{1h}	P_{1d}	P_{1h}	P_{1d}	P_{1h}	P_{1d}	P_{1h}	P_{3d}	P_{1h}	P_{3d}	P_{1h}	P_{3d}
1000	2.61	5.99	-3.48	-1.33	-1.74	-0.22	5.22	3.89	-4.35	-1.09	-0.87	-0.54
500	2.83	1.20	-1.89	-2.15	-0.94	-1.20	4.72	1.46	-5.66	-1.46	-1.89	-0.42
200	2.06	1.04	-2.06	-1.83	-1.03	-1.04	4.12	1.24	-4.12	-1.24	-1.03	-1.24
100	2.20	1.40	-2.20	-1.68	-1.10	-1.12	3.30	1.69	-3.30	-2.53	-1.10	-1.69
50	2.35	1.20	-2.35	-2.10	-1.18	-1.20	4.71	1.28	-3.53	-2.56	-1.18	-1.28
20	2.60	1.68	-2.60	-2.36	-1.30	-1.01	3.90	2.35	-5.19	-2.75	-1.30	-1.57
10	4.29	1.49	-4.29	-1.49	-1.43	-0.75	5.71	2.36	-5.71	-2.36	-1.43	-1.89
5	4.76	1.69	-3.17	-2.97	-1.59	-1.27	6.35	2.37	-4.76	-5.33	-1.59	-3.55

4 结 论

(1) 工程设计中常常需要估算不同重现期下的降雨设计值,在考虑多个水文变量的条件下,会出现无数种可能的设计值组合。权函数法作为新兴的设计方法,可以与联合分布模型相结合,估算最可能出现的组合设计值。

(2) 以年最大1 h降雨与连续累积1 d和3 d降雨量为降雨组合,推求了基于3种重现期法下的重现期设计值与降雨设计值,通过对比和分析指出二次重现期能够有效避免对水文事件危险域过大或过小的估计。

(3) 两种传统重现期方法由于受各自定义特点的约束,造成了在考虑危险事件时对重现期和设计值的估算出现偏差。但在一些有指定设计要求的工程中,可利用传统方法定义明确这一特点,结合“或”和“且”的设计理念,合理选择最佳的估算方法。在无特定要求的工程设计中,为了尽可能真实地反映降雨事件的实际情况,一般推荐采用基于二次重现期法的估计值。

(4) 联合重现期估计设计值过大,在工程建设中偏保守,将造成施工费用偏高;同现重现期法估计的设计值过小,虽然造价较为经济,但在工程建设中存在风险。因此,为了经济合理地实施城市基础设施建设,实现防洪排涝能力最大化和施工成本最小化,二次重现期法可以作为确定排涝管渠规格等工程设计的重要参考。

参考文献:

- [1] FONTANAZZA C M, FRENI G, LA L G, et al. Uncertainty evaluation of design rainfall for urban flood risk analysis[J]. *Water Science & Technology (A Journal of the International Association on Water Pollution Research)*, 2011, 63(11): 2641 - 2650.
- [2] IPCC. *Climate change 2007: Synthesis report* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 陆桂华, 张亚洲, 肖恒, 等. 气候变化背景下蚌埠市暴雨与淮河流域上游洪水遭遇概率分析[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(1): 31 - 36.
- [4] 郭常安, 邓立鸣. 广州市中心城区内涝分析及对策[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(10): 25 - 28.
- [5] 莫建飞, 陆甲, 李艳兰, 等. 基于GIS的广西农业暴雨洪涝灾害风险评估[J]. *灾害学*, 2012, 27(1): 38 - 43.
- [6] 倪增华, 刘合香, 罗彦丽, 等. Copula函数在广西洪涝灾害的降水概率预测中的应用[J]. *气象研究与应用*, 2014, 35(2): 32 - 39.
- [7] 曹伟华, 梁旭东, 赵晗萍, 等. 基于Copula函数的北京强降雨频率及危险性分析[J]. *气象学报*, 2016, 74(5): 772 - 783.
- [8] 刘成林, 周玉文, 隋军, 等. 设计降雨特征的多变量分析方法[J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41(6): 940 - 945.
- [9] 刘曾美, 陈子燊. 基于两个致灾因子的治涝标准研究[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(3): 39 - 40 + 49.
- [10] 黄宁. 降雨事件联合概率分析及其在城市内涝风险评估中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [11] ANDRÉS - DOMENECH I, MÚNERA J C, FRANCÉS F, et al. Coupling urban event - based and catchment modelling for combined sewer overflow river impact assessment[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(10): 2057 - 2072.
- [12] SKLAR M. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges[M]. *Publ. inst. statist. univ. paris*, 1959: 229 - 231.
- [13] 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.
- [14] SALVADORI G, MICHELE C. On the use of copulas in hydrology theory and practice[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2007, 12(4): 369 - 380.
- [15] SALVADORI G. Bivariate return periods via 2 - copulas[J]. *Statistical Methodology*, 2004, 1(1 - 2): 129 - 144.
- [16] 史黎翔, 宋松柏. 基于Copula函数的两变量洪水重现期与设计值计算研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(10): 27 - 34.
- [17] 范嘉炜, 黄锦林. 基于Kendall重现期的降雨潮位风险分析[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(5): 21 - 24 + 20.
- [18] 范嘉炜, 黄锦林. 基于Copula函数的洪峰流量与洪水历时联合分布研究[J]. *中国农村水利水电*, 2017(2): 204 - 209 + 214.