

低影响开发设计中容积法应用探讨

苏定江^{1,2}, 靳俊伟^{1,2}, 刘亭役^{1,2}

(1. 重庆市市政设计研究院, 重庆 400030; 2. 重庆市海绵城市建设工程技术研究中心, 重庆 400030)

摘要: 从我国低影响开发中容积法的内涵着手, 指出容积法需实现径流总量和径流污染双重控制, 并与美国的低影响开发、澳大利亚的水敏性城市设计中容积法的应用进行了比较, 分析了其异同点。同时对我国低影响开发中容积法的径流系数取值、城市绿地径流控制以及年雨量径流系数与年径流总量控制率的关系等进行了探讨, 最后通过实际案例试算表明, 下垫面直接采用“1-年雨量径流系数”作为年径流总量控制率时, 其径流污染削减率有可能不达标。

关键词: 低影响开发; 容积法; 年雨量径流系数; 年径流总量控制率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)17-0128-06

Discussion on Application of Volumetric Method in Low Impact Development Design

SU Ding-jiang^{1,2}, JIN Jun-wei^{1,2}, LIU Ting-yi^{1,2}

(1. Chongqing Municipal Research Institute of Design, Chongqing 400030, China; 2. Sponge City Engineering Technology Research Center of Chongqing, Chongqing 400030, China)

Abstract: Focusing on the connotation of volumetric method in low impact development in China, it was pointed out that the volumetric method needed to achieve the dual control of runoff volume and runoff pollution, and it was compared with the application of volumetric method in low impact development in the United States and water sensitive urban design in Australia. At the same time, the value of runoff coefficient of volumetric method, the control of urban green land runoff, and the relationship between annual rainfall runoff coefficient and volume capture ratio of annual rainfall in the low impact development of China were discussed. Finally, the actual case calculation showed that when the underlying surfaces directly used the “1 - annual rainfall runoff coefficient” as the volume capture ratio of annual rainfall, the runoff pollution reduction rate might not reach the standard.

Key words: low impact development; volumetric method; annual rainfall runoff coefficient; volume capture ratio of annual rainfall

低影响开发(LID)是我国海绵城市建设的重要组成部分,目前在重庆市的LID设计中对年径流总量控制率及其相应的容积法应用存在一些争议,为此,笔者对LID设计中容积法的应用进行了探讨。

1 容积法的内涵

1.1 容积法的由来

住建部2014年颁发的《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》(简称《海

绵指南》)中首次详细介绍了容积法的应用,其描述如下:低影响开发设施以径流总量和径流污染为控制目标进行设计时,设施具有的调蓄容积一般应满足“单位面积控制容积”的指标要求。设计调蓄容积一般采用容积法进行计算,计算公式如下:

$$V = 10H\varphi F \quad (1)$$

式中: V 为设计调蓄容积, m^3 ; H 为设计降雨量,根据年径流总量控制率确定, mm ; φ 为综合雨量径流系数; F 为汇水面积, hm^2 。

1.2 容积法的内涵

城市快速发展主要带来了两个方面的雨水问题:一是雨水水量方面,城市下垫面不透水面的增加造成地表雨水下渗量减少,影响了原有的水文状态,同时城市对雨水的滞蓄作用减弱,雨水产汇流速度加快,容易形成局部内涝;二是雨水水质方面,城市下垫面的污染物随雨水冲刷进入城市水体而形成面源污染,造成或加速了城市水体水质的恶化。低影响开发主要是从源头来解决城市雨水问题,应实现径流总量和径流污染双重控制,以期维持城市原有的水文状态并削减雨水带来的面源污染。

径流总量和径流污染的控制有着共同的实现途径即径流体积控制^[1],径流体积控制通过具有一定有效容积的低影响开发设施来实现,这是容积法的内涵所在。应进行控制的径流进入到低影响开发设施内部有效容积中暂时储存后再缓排(包括下渗过程),减弱了下垫面不透水率增加而导致的地表产汇流加快现象,实现了对自然水文状态的模拟,体现了径流总量控制。如果低影响开发设施在雨水缓排过程中同时还具有较强的径流污染削减功能(如生物滞留设施等),那么在控制径流总量的同时也削减了径流污染,实现了径流总量和径流污染控制的统一;如果低影响开发设施在雨水缓排过程中不具备削减径流污染的功能(如普通雨水缓排池等,忽略自然沉淀作用),那么只实现了径流总量控制,要实现径流污染削减目标,还需要额外配置径流污染削减措施或容积。因此,低影响开发中应优先采用兼具径流总量控制和径流污染削减的设施。

2 容积法在国外的应用

2.1 美国纽约州

2.1.1 容积法的应用

美国纽约州采用容积法计算的是水质控制容积 WQ_v (water quality volume)^[2],计算方式与我国的容

积法相似。为方便与我国的计算方法对比,对其公式进行了单位换算,如下所示:

$$WQ_v = 10H_2R_vF \quad (2)$$

式中: H_2 为纽约州设计降雨量,采用90%年降雨场次控制率对应的降雨量, mm ; R_v 为体积径流系数, $R_v = 0.05 + 0.0009I$, I 为不透水下垫面的百分比。

纽约州的 WQ_v 计算公式与我国的容积法计算公式的主要差别体现在设计降雨量和径流系数两个方面。

2.1.2 设计降雨量对比

美国纽约州采用90%年降雨场次控制率对应的降雨量作为设计降雨量,根据地区的不同,其取值在25.4~38.1 mm之间^[2]。为方便与重庆主城区比较,根据重庆渝北气象站2003年—2013年的实际降雨数据,统计重庆主城区的降雨场次分布(扣除了降雨量<2 mm的降雨场次)。结果表明,降雨量>2 mm的降雨共890场,其中,2 mm<降雨量≤18.1 mm的降雨共726场,占比为81.6%;2 mm<降雨量≤21.9 mm的降雨共752场,占比为84.5%;2 mm<降雨量≤25.1 mm的降雨共780场,占比为87.6%;2 mm<降雨量≤26.8 mm的降雨共790场,占比为88.8%;2 mm<降雨量≤30.0 mm的降雨共807场,占比为90.7%;2 mm<降雨量≤33.4 mm的降雨共817场,占比为91.8%。

将同一设计降雨量对应的年降雨场次控制率与年径流总量控制率进行对比,结果如表1所示。

表1 重庆主城区年降雨场次控制率与年径流总量控制率对比

Tab.1 Comparison of annual rainfall times control rate and volume capture ratio of annual rainfall in main urban area of Chongqing

设计降雨量/mm	18.1	21.9	25.1	26.8	30.0	33.4
年降雨场次控制率/%	81.6	84.5	87.6	88.8	90.7	91.8
年径流总量控制率/%	70	75	79	80	83	85

由表1可知,重庆主城区如采用70%~80%的年径流总量控制率作为控制指标时,对应的设计降雨量为18.1~26.8 mm,对应的年降雨场次控制率为81.6%~88.8%。年降雨场次控制率与年径流总量控制率的最终目的都是用来确定设计降雨量,从而计算出径流控制容积。因此在设计降雨量取值方法上,我国(采用年径流总量控制率)和美国(采用年降雨场次控制率)在内涵上是一致的,并且年

径流总量控制率(或年降雨场次控制率)与设计降雨量是不可分割的,设计降雨量是年径流总量控制率落地的载体。

2.1.3 径流系数对比

美国纽约州的径流系数根据下垫面中的不透水面比例计算得出,分析其计算公式可知,不透水下垫面的径流系数取值为0.95,透水下垫面的径流系数为0.05。按此径流系数取值,采用加权平均的方式计算下垫面综合径流系数,结果如下: $R = 0.05(1 - I/100) + 0.95I/100 = 0.05 + 0.009I$ 。由此可知,美国纽约州低影响开发采用的容积法中的径流系数也是采用加权平均方式计算得来,与我国综合径流系数的计算方法一致,只不过进行加权平均的径流系数只有透水下垫面和不透水下垫面两种。

我国目前的下垫面分类较多,未按照下垫面是否透水进行划分,各种下垫面的径流系数多为经验值,其中绿地可视为透水下垫面,其取值一般为0.15,屋面可视为不透水下垫面,其取值一般为0.85^[3]。按此取值将我国与美国纽约州不同比例透水下垫面综合径流系数进行对比,结果见表2。

表2 径流系数对比

Tab. 2 Comparison of runoff coefficient

下垫面编号	下垫面组成		R_v	R	R_v/R
	透水占比	不透水占比			
1	0	1	0.95	0.85	1.12
2	0.1	0.9	0.86	0.78	1.10
3	0.2	0.8	0.77	0.71	1.08
4	0.3	0.7	0.68	0.64	1.06
5	0.4	0.6	0.59	0.57	1.04
6	0.5	0.5	0.50	0.50	1.00
7	0.6	0.4	0.41	0.43	0.95
8	0.7	0.3	0.32	0.36	0.89
9	0.8	0.2	0.23	0.29	0.79
10	0.9	0.1	0.14	0.22	0.64
11	1	0	0.05	0.15	0.33

从表2可以看出,美国纽约州更侧重于对不透水下垫面的径流控制;采用我国现有的径流系数取值,在透水下垫面占比为10%~70%时,我国综合径流系数计算值与纽约州相差在±10%以内;在透水下垫面占比为80%~90%时,我国综合径流系数计算值比纽约州的大26%~57%,在该类下垫面情况下我国的标准将高于美国纽约州的标准。

我国现有的径流系数多为暴雨情况下的经验取

值,主要用于峰值流量的计算,低影响开发中的容积法主要是对中小降雨径流的控制,中小降雨情况下的径流系数理应小于暴雨情况。根据孔花的试验结果,绿地在50 mm人工模拟降雨条件下不产生地表径流^[4],与我国相关规范中绿地径流系数的取值为0.1~0.2有所差异^[3]。综上,建议低影响开发的容积法计算中透水下垫面(绿地、透水铺装等)径流系数取值应在我国现有规范的基础上下调,宜为0.05,不透水下垫面径流系数取值可沿用现有规范的取值即0.85~0.95,并宜取最大值0.95,同时为避免与现有规范中计算暴雨流量采用的径流系数发生混淆,可只规定透水下垫面和不透水下垫面的径流系数,下垫面的综合径流系数采用加权平均方式确定。

2.2 澳大利亚墨尔本

澳大利亚墨尔本地区只对不透水下垫面提出了径流控制要求,对于透水下垫面未做要求。墨尔本的《水敏性城市设计规程:雨水》^[5]中,通过模型计算结果直接给出了生物滞留设施占不透水面的面积比例、TSS去除率及生物滞留设施深度三者的关系图,设计时只依照关系图,根据对TSS的去除要求,搭配选取生物滞留设施占不透水面的面积比例以及生物滞留设施的深度,如图1所示。其中,生物滞留设施占不透水面的面积比例控制在2%以内,生物滞留设施的有效深度取值为0~300 mm。

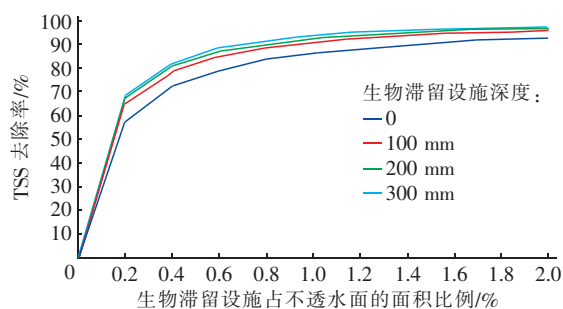


图1 不透水面的面积比例、TSS去除率及生物滞留设施深度的关系

Fig. 1 Relationship among impervious area ratio, TSS removal rate and depth of biological detention facilities

TSS的去除依靠具有一定容积的生物滞留设施实现,依旧可看作是容积法的应用。由于图1中未出现设计降雨量,如按照2%的不透水面积占比、300 mm的生物滞留设施水深、0.85的不透水面径流系数进行反算,墨尔本地区水敏性城市设计采用的设计降雨量最大值约为7 mm,TSS去除率可达到

96%。

2.3 国外经验总结分析

纽约州为低影响开发代表性区域,墨尔本为水敏性城市代表性区域,从纽约州和墨尔本的经验来看,其雨水水质控制均采用了容积法。两地区均强调对不透水下垫面的径流污染控制,区别在于是否对透水性下垫面进行控制以及设计降雨量的取值。纽约州透水下垫面要进行径流容积控制,径流系数为0.05,而墨尔本对透水下垫面没有要求;同时,纽约州的设计降雨量(约为25.4 mm)远大于墨尔本地区的设计降雨量(最大约为7 mm)。笔者认为这正好反映了城市雨水控制的特性,由于其开发强度不同,故其对雨水的控制标准也不同。纽约州开发强度大,人为活动对下垫面的污染较大,因此透水和不透水下垫面均需要进行径流控制,设计降雨量取值较大;而墨尔本开发强度小,自然环境容量相对更大,故只对不透水下垫面做出了径流控制要求,设计降雨量取值较小。因此,采用容积法时,透水下垫面是否进行径流污染控制、设计降雨量取值范围等均应结合当地实际情况确定。

3 我国低影响开发中容积法的应用

3.1 低影响开发中的径流系数

目前国内水文专业和城市排水专业的径流系数含义有所不同,其取值也存在差异,应区别对待。水文专业所指径流一般为总径流量,包括了地表径流及地下径流两部分,其径流系数为一定汇水面积内总径流量与降雨量的比值。城市排水专业所指径流一般为地表径流,其径流系数为一定汇水面积内地表径流总量与降雨量的比值^[4]。

低影响开发主要是对地表径流总量和径流污染的控制,对雨水入渗后形成的壤中流、地下径流并未提出明显控制要求,故低影响开发中的径流应为地表径流,径流系数也应明确为地表径流系数,与城市排水专业径流系数含义一致,不能和水文专业的径流系数混为一谈。

3.2 城市区域透水下垫面的径流污染控制

透水下垫面主要包括绿地和透水铺装两种类型,目前,我国关于绿地雨水径流污染的研究报道较少,关于绿地径流污染的资料汇总如表3所示。可知,我国城市绿地的径流污染物平均浓度接近或超过地表水Ⅴ类标准,其中又以总氮或氨氮超标为主。关于透水铺装的径流污染未见文献报道,但透水铺

装较绿地有更多的人为活动污染,定性分析其径流污染物应不会低于绿地。由此可见,我国目前绿地和透水铺装径流污染也不容忽视,应纳入径流污染控制范围。

表3 绿地雨水径流污染物浓度

Tab.3 Concentration of green land rainfall runoff pollutants

项目	径流水质	参考文献
澳门	公园绿地小流域的TN、TP均超出地表水Ⅴ类标准2倍多	[6]
厦门	城市绿地降雨径流的主要污染物为COD、TP、NO ₃ ⁻ -N,其场次降雨污染物平均浓度(EMC)分别为60.48~165.77、0.44~0.96、1.18~7.16 mg/L,降雨径流初始冲刷效应不明显	[7]
北京	绿地径流水质属于地表水Ⅴ类标准,主要是NH ₃ -N超标	[8]
北京	草坪的径流水质较差,COD、TN、TP平均浓度超过了地表水Ⅴ类标准,平均径流浓度分别为120、6.8、0.74 mg/L	[9]
重庆	绿地的降雨径流污染物平均浓度未超过地表水Ⅴ类标准,但初期冲刷效应明显	[10]

3.3 年雨量径流系数与年径流总量控制率的关系

在不同的前期晴天数、降雨雨强、坡度等条件下,同一类下垫面的径流系数均有差别,但在工程设计中为便于计算,通常同一类下垫面径流系数会赋予一个定值。根据径流系数的定义,可得出年径流量等于年降雨量乘以径流系数,在此前提下,未采用容积法的下垫面可近似采用“1-年雨量径流系数”作为其名义上的年径流总量控制率。但需要注意的是,此种情况下仅包含了径流总量的控制,未包含径流污染的削减,如还有径流污染削减的要求,仅靠“1-年雨量径流系数”达到名义上的年径流总量控制率而不采用额外的径流污染控制措施是不可行的。下面以具体案例的试算结果来加以说明。

某居住地块面积为28 915 m²,要求年径流总量控制率达到70%、年径流污染削减率达到50%,下垫面主要包括普通绿地、透水铺装、硬质铺装A、绿色屋面、硬质铺装B,面积分别为15 479、3 832、3 240、4 452、1 912 m²。

情形一:仅考虑该项目年径流总量控制率名义上的达标,其中硬质铺装A不进行径流控制,即不采用容积法,而直接采用“1-年雨量径流系数”作为年径流总量控制率,项目的年径流总量控制率采用各种下垫面的加权平均(简称“局部容积法”),结果如表4所示。

表 4 情形一条件下的年径流总量控制率计算

Tab. 4 Calculation of volume capture ratio of annual rainfall
in case one

项 目	面积/ m ²	径流 系数	年径流总量 控制率/%	设计降雨 量/mm	径流控制 容积/m ³
普通绿地	15 076	0.15	85	—	—
透水铺装	3 832	0.15	85	—	—
硬质铺装 A	3 240	0.85	15	—	—
绿色屋面	4 452	0.30	70	—	—
硬质铺装 B	1 912	0.85	80	26.8	57
雨水花园	403	1			
合计	28 915		74		57

为便于进行年径流污染削减率的计算,进行以下假设:①径流污染物浓度取值。雨水径流存在明显的初期冲刷现象,越接近源头,初期冲刷现象越明显,故初期雨水的污染物浓度明显高于后期雨水,但为了便于计算,假定径流雨水的污染物浓度为均值,采用 EMC 值。假定硬地的径流污染物平均浓度取值为绿地的 3 倍^[10],绿地径流污染物(以 SS 计)取值为 80 mg/L,硬地取值为 240 mg/L。②年降雨量取值为 1 000 mm。③雨水花园径流污染物削减率为 75%。年径流污染削减率的计算结果见表 5。

表 5 情形一条件下的年径流污染削减率计算

Tab. 5 Calculation of volume capture ratio of annual rainfall
runoff pollution in case one

项目	年降雨量/mm	径流系数	径流量/m ³	径流污染浓度/(mg·L ⁻¹)	径流污染物总量/kg	径流污染削减量/kg	年径流污染削减率/%
普通绿地	1 000	0.15	2 261	80	181	0	0
透水铺装	1 000	0.15	575	80	46	0	0
硬质铺装 A	1 000	0.85	2 916	240	700	0	0
绿色屋面	1 000	0.30	1 336	240	321	0	0
硬质铺装 B	1 000	0.85	1 721	240	413	248	60
雨水花园	1 000	1	403	0	0	0	0
合计					1 661	248	15

情形一的计算结果表明,采用局部容积法时,在年径流总量控制率名义上达标时,年径流污染削减率不能满足要求,未能实现径流总量和径流污染双

重控制。
情形二:所有下垫面均采用《海绵指南》推荐的容积法计算(简称“全局容积法”),项目的年径流总量控制率采用各下垫面的加权平均,结果见表 6。

表 6 情形二条件下的年径流总量控制率计算

Tab. 6 Calculation of volume capture ratio of annual rainfall
in case two

项 目	面积/ m ²	径流 系数	年径流总量 控制率/%	设计降雨 量/mm	径流控制 容积/m ³
普通绿地	14 576	0.15	70	18.1	133
透水铺装	3 832	0.15			
硬质铺装 A	3 240	0.85			
绿色屋面	4 452	0.30			
雨水花园	500	1	70	18.1	37
硬质铺装 B	1 912	0.85			
雨水花园	403	1			
合计	28 915		70		170

当雨水花园径流污染物削减率为 75% 时,年径流污染削减率 = 70% × 75% = 52.5%。

情形二的计算结果表明,采用全局容积法时,在年径流总量控制率达标时,年径流污染削减率也能满足要求,实现了径流总量和径流污染的双重控制。

由上述计算结果可以看出,未采用容积法的下垫面,采用“1 - 年雨量径流系数”作为年径流总量控制率时,未考虑径流污染削减问题,在年径流总量控制率名义上达标时,其径流污染削减率有可能不达标,不能实现径流总量和径流污染的双重控制,故容积法计算时应采用全局容积法。

4 结论与建议

① 我国低影响开发中的径流控制包含径流总量和径流污染双重控制,低影响开发中应优先采用能够同时实现径流总量控制和径流污染削减的设施,其规模可采用容积法计算。

② 低影响开发中容积法所采用的径流系数为地表径流系数,我国目前绿地等透水下垫面的径流系数是在暴雨情况下的经验取值,用在容积法上取值偏大,建议容积法中只规定透水下垫面和不透水下垫面的径流系数,透水下垫面的径流系数宜为 0.05,不透水下垫面的径流系数宜为 0.95,下垫面的综合径流系数采用加权平均方式确定。

③ 我国低影响开发中城市绿地、透水铺装建议纳入径流污染控制范围。

④ 未采用容积法的下垫面,采用“1-年雨径流系数”作为年径流总量控制率时,未考虑径流污染削减,在年径流总量控制率名义上达标时,其径流污染削减率有可能不达标,不能实现径流总量和径流污染的双重控制。

参考文献:

- [1] 王文亮,李俊奇,车伍,等. 雨水径流总量控制目标确定与落地的若干问题探讨[J]. 给水排水,2016,42(10):61-69.
Wang Wenliang, Li Junqi, Che Wu, *et al.* Discussion on some problems in the determination and realization of total rainwater runoff flow rate control [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(10): 61-69 (in Chinese).
- [2] New York Center Watershed Protection. Stormwater Management Design Manual [M]. Albany: New York State Department of Environmental Conservation, 2015.
- [3] GB 50014—2006, 室外排水设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
GB 50014-2006, Code for Design of Outdoor Wastewater Engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 2016 (in Chinese).
- [4] 孔花. 山地城市绿地和水泥道路径流系数的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
Kong Hua. Study on the Runoff Coefficient of Mountain Urban Greenland and Cement Road [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012 (in Chinese).
- [5] Melbourne Water. WSUD Engineering Procedures: Stormwater [M]. Melbourne: CSIRO Publishing, 2005.
- [6] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市小流域地表径流污染特征分析[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1753-1755.
Huang Jinliang, Du Pengfei, Ou Zhidan, *et al.* Characterization of urban surface runoff in two urban catchments in Macau [J]. Environmental Science, 2006, 27(9): 1753-1755 (in Chinese).
- [7] 黄金良, 涂振顺, 杜鹏飞. 城市绿地降雨径流污染特征对比研究: 以澳门与厦门为例[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3515-3518.
Huang Jinliang, Tu Zhenshun, Du Pengfei. Comparative study on characteristics of urban rainfall runoff from two urban lawn catchments in Macau and Xiamen [J]. Environmental Science, 2009, 30(12): 3515-3518 (in Chinese).
- [8] 侯立柱, 丁跃元, 冯绍元, 等. 北京城区不同下垫面的雨水径流水质比较[J]. 中国给水排水, 2006, 22(23): 35-38.
Hou Lizhu, Ding Yueyuan, Feng Shaoyuan, *et al.* Comparison of water quality of rainwater runoff from different underlying surfaces in Beijing City [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(23): 35-38 (in Chinese).
- [9] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3225-3228.
Ren Yufen, Wang Xiaoke, Han Bing, *et al.* Chemical analysis on stormwater-runoff pollution of different underlying urban surfaces [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3225-3228 (in Chinese).
- [10] 颜文涛, 韩易, 何强. 山地城市径流污染特征分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(3): 137-140.
Yan Wentao, Han Yi, He Qiang. Characterization of stormwater runoff pollution in mountain city [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(3): 137-140 (in Chinese).



作者简介: 苏定江(1979-), 男, 重庆人, 硕士, 高级工程师, 长期从事低影响开发、市政给排水方面的研究工作。

E-mail: 21105107@qq.com

收稿日期: 2018-02-21