

论海绵城市设计评估下垫面控制雨量的计算方法

冯胜海

广西壮族自治区建筑科学研究设计院

摘要：海绵城市计算以求需增海绵设施容积规模为主，在已知目标年径流总量控制率对应总需要控制雨量的情况下，只要能正确评估下垫面控制雨量情况，就能求设施规模，而相关计算案例很少，本文就此提出可行算法，供同行参考。

关键词：海绵城市；下垫面；年径流总量控制率；径流系数

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.13.088

一、海绵城市设计计算存在的问题

海绵城市设计计算常采用《海绵城市建设技术指南》（以下简称《指南》）第四章第八节采用的容积法计算方法^[1]，笔者认为该计算方法考虑了原下垫面的径流控制雨量，但其存在计算逻辑问题（下文算法一），该算法对下垫面的径流控制雨量估值偏小。

二、海绵城市设计计算思路

为计算海绵设施规模 $V_{设施}$ ，在已知目标年径流总量控制率 Φ 的情况下，即可查年径流总量控制率对应设计降雨量关系曲线查出场地的设计降雨量 H ，该值与场地总面积 F 的乘积便可求总控制雨量的体积 $V=HF$ ，如果能计算原下垫面的控制雨量体积 $V_{下垫面}$ ，即可求出 $V_{设施}=V-V_{下垫面}$ ，因此计算 $V_{下垫面}$ 就成解题关键。

三、计算下垫面控制雨量的方案

先阐述一个重要公式：“径流系数 ψ +年径流总量控制率 $\Phi=1$ ”。这个公式在《指南》未有提及，也有同行不建议采用此公式计算^[2]，但笔者认为该公式至关重要，关键在于如何正确使用该公式。以下是计算评估原下垫面的控制雨量体积 $V_{下垫面}$ 的方法，笔者拟三种计算方法对比。

1) 第一种算法 《指南》算法，《指南》虽未直接提出原下垫面的径流控制相关算法，但推导可知，《指南》是有考虑的。《指南》计算方法中设施设计调蓄容积计算为： $V_{设施}=10H\psi F$ （式中： V —设计调蓄容积， m^3 ； H —设计降雨量， mm ； ψ —雨量综合径流系数； F —汇水面积（ ha ），本文不考虑单位换算问题，公式省去参数“10”，简化为 $V_{设施}=H\psi F$ 。为便于对本文三种算法比较，笔者统一将各个算法按计算下垫面总控制雨量容积 $V_{下垫面}$ 来做对比。以下是公式推导：

公式可换算为： $V_{设施}=\sum V_n=\sum H\psi_n F_n=H\sum \psi_n F_n=H\psi_{综} F$ （式中： $V_{设施}$ —海绵设计总调蓄容积； V_n —对每类下垫面径流控制容积； H —设计降雨量； ψ_n —每类下垫面雨量径流系数； F_n —每类下垫面汇水面积， $\psi_{综}$ —雨量综合径流系数， F —总汇水面积），以上公式结合公式“ $\psi_{综}+\Phi_{下垫面}=1$ ， $V=HF$ ”（ $\Phi_{下垫面}$ —下垫面年径流总量控制率）再推导可得： $V_{下垫面}=V-V_{设施}=HF-H\psi_{综}F=H(1-\psi_{综})F=H\Phi_{下垫面}F$ 。

表1 算法一计算步骤表

原始数据			计算步骤			
下垫面类型	径流系数	面积	1. 计算综合径流系数 $\psi_{综}$	2. 求下垫面年径流总量控制率 $\Phi_{下垫面}$	3. 根据目标年径流总量控制率 Φ 确定总控制设计降雨量 H	4. 计算下垫面总控制雨量容积 $V_{下垫面}$
下垫面1	ψ_1	F_1	加权平均法计算 $\psi_{综}=\sum \psi_n F_n / F$	$\Phi_{下垫面}=1-\psi_{综}$	查年径流总量控制率对应设计降雨量关系曲线求控制雨量值 H	$V_{下垫面}=H\Phi_{下垫面}F$
下垫面2	ψ_2	F_2				
.....				
下垫面n	ψ_n	F_n				

2) 第二种算法 通过场地内各类型下垫面的径流系数与其面积计算以加权平均法出综合径流系数 $\psi_{综}$ ，再利用上文提到的公式：“ $\psi+\Phi=1$ ”计算，则 $\Phi_{下垫面}$

$=1-\psi_{综}$ ，再根据 Φ 计算结果查关系曲线查出场地控制降雨量 $H_{下垫面}$ ，然后可求得下垫面总控制雨量容积 $V_{下垫面}=H_{下垫面}F$ 。

表2 算法二计算步骤表

原始数据			计算步骤			
下垫面类型	径流系数	面积	1. 计算综合径流系数 $\psi_{综}$	2. 计算下垫面年径流总量控制率 $\Phi_{下垫面}$	3. 查控制雨量值 $H_{下垫面}$	4. 计算下垫面总控制雨量容积 $V_{下垫面}$
下垫面1	ψ_1	F_1	加权平均法计算 $\psi_{综}=\sum \psi_n F_n / F$	$\Phi_{下垫面}=1-\psi_{综}$	查年径流总量控制率对应设计降雨量关系曲线求控制雨量值 $H_{下垫面}$	$V_{下垫面}=H_{下垫面}F$
下垫面2	ψ_2	F_2				
.....				
下垫面n	ψ_n	F_n				

3) 第三种算法 利用各类型下垫面的径流系数 ψ_n ，按公式计算每种下垫面的年径流总量控制率 $\Phi_n=1-\psi_n$ ，再根据 Φ_n 计算结果查年径流总量控制率和雨量关

系曲线查出场地控制降雨量 H_n ，然后按公式 $V_n=H_n F_n$ 求出每个类型下垫面控制的雨量体积 V_n ，再累计求出控制的总雨量 $V_{下垫面}=\sum V_n$ 。

表3 算法三计算步骤表

原始数据			计算步骤			
下垫面类型	径流系数	面积	1. 每种下垫面年径流总量控制率 Φ_n	2. 每种下垫面控制降雨量 H_n	3. 每种下垫面控制的雨量体积 V_n	4. 计算下垫面总控制雨量容积 $V_{\text{下垫面}}$
下垫面1	ψ_1	F_1	查年径流总量控制率对应设计降雨量关系曲线求控制雨量值 $H_{1\sim n}$			$V_{\text{下垫面}} = \sum V_n$
下垫面2	ψ_2	F_2				
.....				
下垫面n	ψ_n	F_n				

3) 算法比较 对比以上三种算法, 均用到公式“ $\psi + \Phi = 1$ ”及控制率对应降雨量关系曲线查询, 但顺序不同, 结果不同。算法一、二过程相仿, 都以加权平均法算综合径流系数 $\psi_{\text{综}}$, 但最后一步两者通过关系曲线查的雨量值选择不同, 笔者认为算法一最后一步计算“ $V_{\text{下垫面}} = H\Phi_{\text{下垫面}}F$ ”存在问题, 由此公式可推导得出“ $H_{\text{下垫面}} = H\Phi_{\text{下垫面}}$ ”, 因为目标径流控制雨量值 H 受人为设定

目标控制率 Φ 取值影响, 是一个变量, 因此算得 $V_{\text{下垫面}}$ 和 $H_{\text{下垫面}}$ 结果也是一个变量, 但在已知条件下 $H_{\text{下垫面}}$ 是只与下垫面孔隙率和平整度等因素有关, 是常量, 不因设定目标值改变, 这有逻辑冲突。下表试算对比可知, $V_{\text{下垫面}}$ 和 $H_{\text{下垫面}}$ 值受设计目标径流控制率 Φ 取值影响很大, 同条件下计算结果偏差很大, 证明算法一缺陷, 下文不做讨论。

表4 算法一在同条件不同目标控制率的情况下的计算

序号	总面积F	绿化面积F1	硬化场地F2	绿地径流系数 ψ_1	硬化场地径流系数 ψ_2	综合径流系数 $\psi_{\text{综}}$	计算下垫面年径流总量控制率 $\Phi_{\text{下垫面}}$	设计目标径流控制率 Φ	设计控制降雨量H (南宁)	下垫面总控制雨量容积 $V_{\text{下垫面}}$ (m ³)	下垫面控制降雨量 $H_{\text{下垫面}}$ (m)
1	10000	4000	6000	0.15	0.9	0.60	0.40	70%	22.7	64	15.9
2	10000	4000	6000	0.15	0.9	0.60	0.40	90%	54.5	196	49.1

相比前两者, 算法三则没有综合径流系数 $\psi_{\text{综}}$ 计算。笔者认为, 算法一和算法二通过加权平均算法计算综合径流系数反算出年径流总量控制率的值是不准确的。因年径流总量控制率与设计降雨量的关系函数是曲线函数, 而加权平均算法计算综合径流系数的过程是线性函数, 用线性函数模拟曲线函数的算法结果会存在很大偏差。算法三中, 原始数据未经过交叉相关的线性函数计算, 不会导致产生相对于曲线函数的变量而影响结果值准确性, 每个下垫面地块控制的雨量值是通过独立

的关系曲线查出的相应结果值, 各下垫面结果值无函数关系, 因此相加计算出总结果值的计算逻辑正确。因此算法三才是准确算法。

4) 按算法模拟计算论证 下面以采用算法二、三方法, 以同条件多数据多试算方法统计对比算法效果。原始条件为: 南宁市有一块场地, 只有径流系数为0.15的绿地和径流系数为0.9的硬化场地, 总面积10000m²不变, 绿地和硬化场地面积按1000m²幅度增减, 分别算出某种场地组合下垫面总控制雨量数据对比。

表5 按算法二的计算表 (部分数据略)

序号	总面积F (m ³)	绿化面积F1 (m ³)	硬化场地面积F2 (m ³)	绿地径流系数 ψ_1	硬化场地径流系数 ψ_2	综合径流系数 $\psi_{\text{综}}$	计算下垫面年径流总量控制率 $\Phi_{\text{下垫面}}$	查控制雨量值 $H_{\text{下垫面}}$ (mm)	下垫面总控制雨量容积 $V_{\text{下垫面}}$ (m ³)
1	10000	0	10000	0.15	0.9	0.90	0.10	1.7	17
3	10000	2000	8000	0.15	0.9	0.75	0.25	4.4	44
5	10000	4000	6000	0.15	0.9	0.60	0.40	8.0	80
7	10000	6000	4000	0.15	0.9	0.45	0.55	13.8	138
9	10000	8000	2000	0.15	0.9	0.30	0.70	22.7	227
11	10000	10000	0	0.15	0.9	0.15	0.85	40.4	404

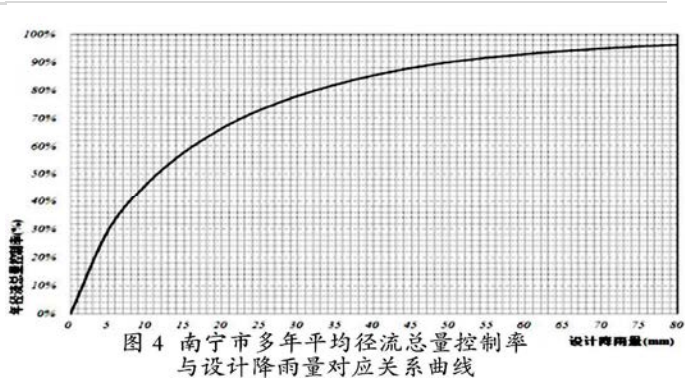
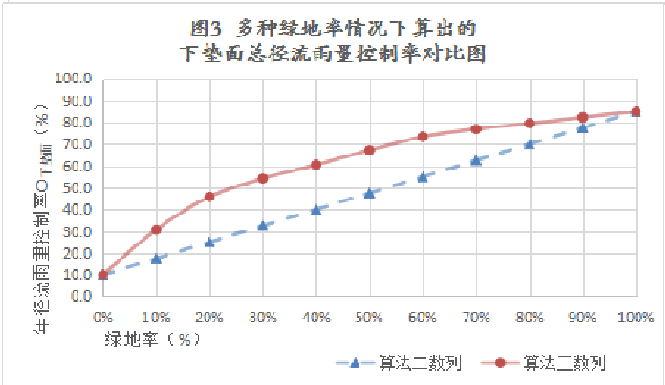
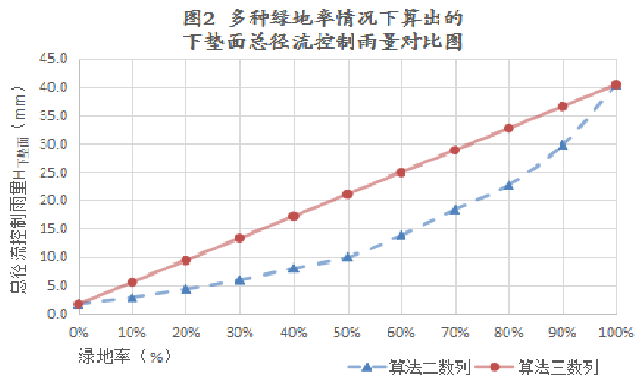
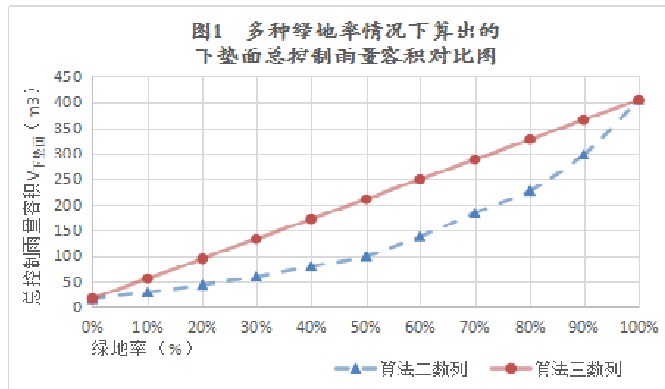
表6 按算法三的计算表 (部分数据略)

序号	总面积F (m ³)	绿化面积F1 (m ³)	硬化场地面积F2 (m ³)	绿地径流系数 ψ_1	硬化场地径流系数 ψ_2	绿地径流总量控制率 Φ_1	硬化场地径流总量控制率 Φ_2	绿地控制降雨量 H_1 (mm)	硬化场地控制降雨量 H_2 (mm)	绿地控制雨量容积 V_1 (m ³)	硬化场地控制雨量容积 V_2 (m ³)	下垫面总控制雨量容积 $V_{\text{下垫面}}$ (m ³)	实际下垫面控制降雨量 $H_{\text{下垫面}}$ (mm)	实际下垫面年径流总量控制率 $\Phi_{\text{下垫面}}$
1	10000	0	10000	0.15	0.9	0.85	0.10	40.4	1.7	0.0	17.0	17	1.7	0.10
3	10000	2000	8000	0.15	0.9	0.85	0.10	40.4	1.7	80.8	13.6	94	9.4	0.46
5	10000	4000	6000	0.15	0.9	0.85	0.10	40.4	1.7	161.6	10.2	172	17.2	0.60
7	10000	6000	4000	0.15	0.9	0.85	0.10	40.4	1.7	242.4	6.8	249	24.9	0.73
9	10000	8000	2000	0.15	0.9	0.85	0.10	40.4	1.7	323.2	3.4	327	32.7	0.80
11	10000	10000	0	0.15	0.9	0.85	0.10	40.4	1.7	404.0	0.0	404	40.4	0.85

根据以上两个表格计算情况，笔者选择关键数据形成图表。通过图表数据对比可见，随着绿地率变化，算法三的下垫面总控制降雨量和容积结果均呈线性函数关系，而算法二呈曲线函数关系（图1、图2），下垫面年径流雨量控制率的计算结果曲线却与前者相反（图3）。另外有个3个特点，一是三图的关系线都首位相连，这可以解读为，单一特点下垫面特性的情况下，两种算法均可行；二是两种算法结果值偏差很大；三是算法二控制雨量计算结果均小于算法

三。

哪个算法有问题呢？首先判断“图1、图2”，可以拟个直接算法证明，设总面积为F，绿地面积为 F_1 ，按上题则硬化场地面积为“ $F-F_1$ ”，绿地和硬化场地单位面积控制雨量值分别为定值 H_1 和 H_2 ，则场地下垫面控制的雨量容积计算公式为： $V=F_1H_1+(F-F_1)H_2$ ，由于该公式中F、 H_1 、 H_2 均为已知定值，因此容易判断此公式是V关于 F_1 的线性函数关系，因此“图1、图2”中算法三是正确的。



对于图3，这是与典型城市设计降雨量与控制率的关系曲线^[3]吻合的，我们可以以南宁市“多年平均径流总量控制率与设计降雨量对应关系曲线”^[4]作为对比参考，可见算法三的年径流雨量控制率数列是与南宁市关系曲线走势是基本一致的，虽然X轴绿地率与设计降雨量存在区别，但本计算前置条件下的绿地率与控制的降雨量是呈线性比例关系的（以上已证实“图2”结果准确），因此不对年径流雨量控制率计算结果曲线线形造成影响，证明算法三是正确的。

四、总结与建议

①算法三是正确计算评估下垫面控制雨量的方法。
②公式“ $\psi + \Phi = 1$ ”对于海绵城市计算的运用十分重要，但不宜以加权平均算法计算综合径流系数来反算年径流总量控制率（详表2算法过程），否则会低估下垫面控制雨量值，反算出的海绵设施规模要比实际大，该公式仅适用于单性质下垫面的计算（详表3算法过

程），因为年径流总量控制率与设计降雨量的关系函数是曲线函数，而加权平均算法是线性函数，算法有较大偏差。③采用精准的算法，在同样目标值下，对比《指南》算式可以适当减少建设规模就能满足要求，更有利于经济欠发达地区的海绵城市建设，全面推动海绵城市建设的步伐。

参考文献：

[1] 《海绵城市建设技术指南》2014[S]
[2] 苏定江、蒲贵兵、刘杰、刘希. 海绵城市年径流总量控制率与雨量径流系数关系探讨[J] 中国给水排水 2021, 37(6): 38-42
[3] 潘国庆, 车伍, 李俊奇, 等. 中国城市径流污染控制量及其设计降雨量[J], 中国给水排水, 2008, 24(22): 25-29
[4] 《南宁市海绵城市规划设计导则》2015[S]