

基于雨水资源化利用的城市排水系统优化设计

刘武艺, 邵东国, 贺新春

(武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室, 湖北武汉 430072)

摘要:为解决城市日益突出的水资源危机以及现有雨洪排水系统所导致的城市水涝、城市生态环境恶化等一系列严重环境问题,提出了基于雨水资源化利用的城市雨洪排水系统优化设计方法,采取相应的工程措施,将汛期雨水“先就地利用,后排出,再蓄积调节利用”。该方法可以达到节约城市生活饮用水资源并减轻防洪压力的目的。

关键词:雨水资源化;城市排水系统;就地利用;蓄积调节利用;郑州市

中图分类号:TU992.03 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2005)02-0110-04

0 前言

城市化高速发展,使得城市人口及财产密度加大。因此,在城市雨洪排水系统规划设计过程中要基于两方面综合考虑,既应保证城市雨洪排水系统的正常运行以保障城市功能的发挥及城市安全,又应充分利用雨水资源以补给城市水源。

1 基于雨水资源化高效利用的城市雨洪排水系统优化设计模型与方法

1.1 城市雨洪排水系统设计的总体思想

收稿日期:2004-10-17

作者简介:刘武艺(1981-),男,湖北人,武汉大学水电学院在读硕士研究生,主要从事水资源配置及高效利用方面研究。

性能的影响。上面提到 Hung 和 Lin(1994)在一个类似于牛顿第 2 定律的 L-BFGS 方法基础上利用非线性搜索算法研制了一个更有效的自适应性算法 L-BFGS。S. F. Masri(1999)在应用力学研究中用自适应随机搜索技术(ARS)训练了 BPN。对 BPN 的改进的算法还有许多,这些算法各有其优点,也都有需要改进的地方。因此,为了使 BPN 能更为高效快速,我们今后还需要做更多的研究工作。

3.2 BPN 混合优化算法

基坑工程变形预测方法较多,有回归分析法、模糊理论法、灰色预测法、时间序列分析法、遗传算法(GA)、有限元分析方法(FEM)和人工神经网络法(ANN)等。传统的数值算法,譬如 FEM,应用到岩土工程研究也已有将近 20 a 的历史。FEM 预测基室试验,由于有样品扰动、施工影响和原位环境变化等因素的存在,试验结果往往缺乏代表性。周围地面沉降的方法和土壤的本构特征密不可分。本构模型中的土壤参数主要来源于实验室。在确定岩土力

基于雨水资源化高效利用的城市雨洪排水系统优化设计就是在城市排水规划设计过程中把城市排水与雨水利用综合考虑,采取相应的工程措施,将汛期雨水“先就地利用,后排出,再蓄积调节利用”的高效利用过程。具体设计思路见图 1。

城区降雨首先经就地利用设施初次利用,主要包括:(1)居民小区建立屋顶集流水窖系统。该部分蓄积雨水可作为居民冲厕、沐浴等生活杂用水水源。(2)利用大型公共场地作为滞洪区,并建立蓄积雨水池。可适当降低大型运动场、广场、停车场等公共设施地面高程,在暴雨时将其作为滞洪区,让雨水排入相应蓄水池内。(3)下沉式绿地。适当降低花坛、绿地地面高程,不仅使得其表面降雨可以充分下渗,还可将附近的屋顶、路面等不透水面积上的雨水径流

学参数的各种方法中,反分析方法应用比较广泛。传统的反分析方法通常把有限元法和数学规划结合起来,通过优化方法不断修正土体的未知参数,使得一些现场实测值与相应的数值计算值差异达到最小。这些方法需要求解待识别参数对于现场实测值的敏度,计算工作量大,程序实现复杂。岩土材料应力应变关系的具有高度非线性,应用反分析方法求岩土力学参数相当复杂,于是我们可以考虑用反分析或者其他优化算法对实验室获得的土壤参数先进行优化以获得改正的土壤参数,然后建立起一个土壤模型用 FEM 进行计算,将计算得到的结果作为神经网络训练的输入样本。最后建立适当的 BPN 模型进行分析。遗传算法、模糊算法、有限元分析、灰色预测法、回归分析法和时间序列分析法等方法与 BPN 相比有其各自的特点和长处,因此应该大胆尝试将这些算法与 BPN 有机结合,以期达到取长补短、各显优势的效果,进而发现更有效的分析和研究基坑变形性状的 BPN 算法。

导入绿地,以减少绿地灌溉用水。(4)雨水渗透设施。在城区建筑密集的区域,可建设包括渗水槽、渗水井在内的地下渗水系统,并铺设渗水型路面,以补给地下水,抑制城区地面沉降。

汛期雨水就地利用剩余部分,经地表产流、管网汇流,一部分进入人工调蓄设施蓄积,另一部分通过排水设施排出。调蓄池蓄积雨水,经雨水净化处理系统净化后,输入城市中水给水系统,作为城市用水水源。

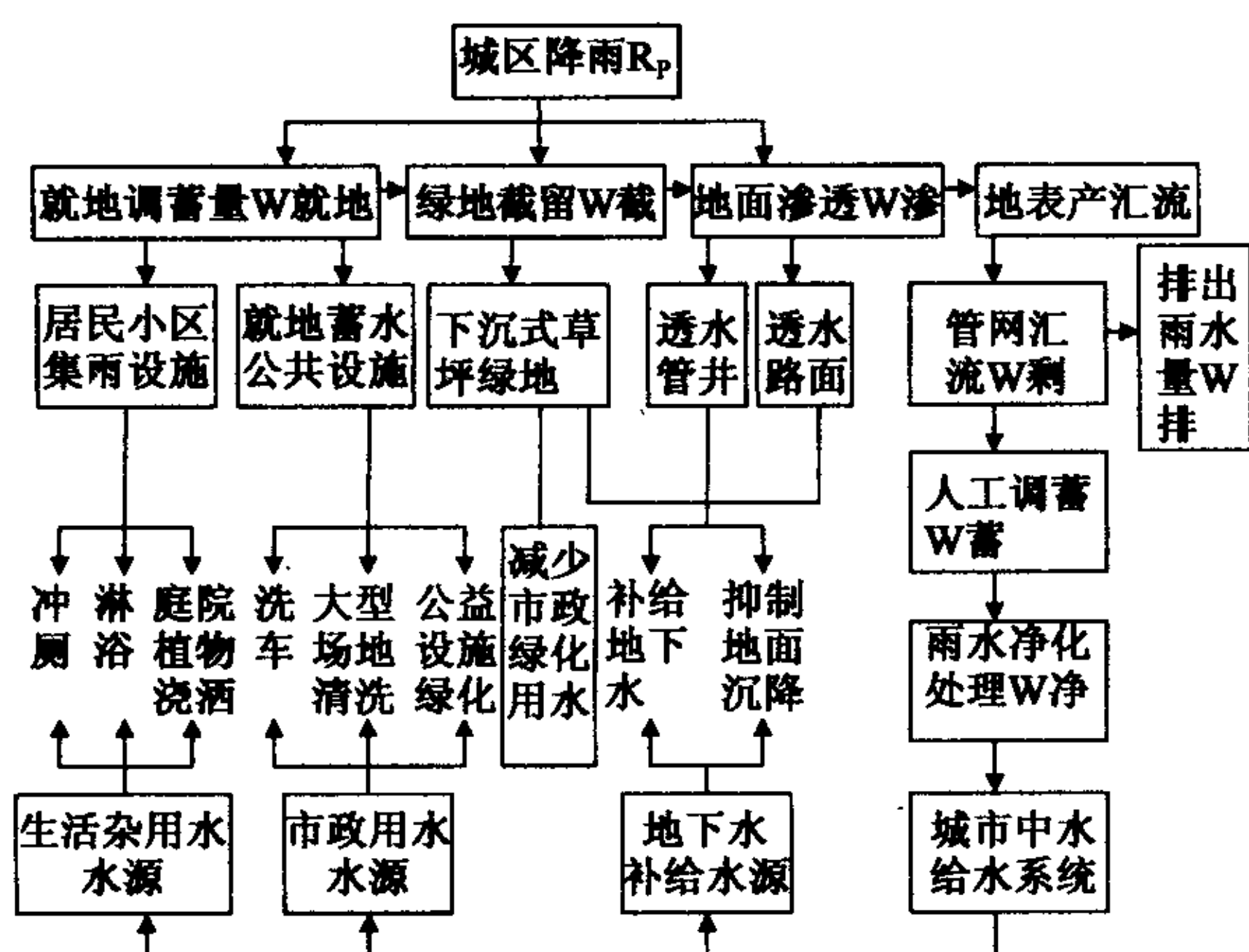


图1 基于雨水资源化利用的城市雨洪排水系统设计流程图

1.2 城市雨洪排水系统优化设计的模拟模型

1.2.1 城市雨水就地利用量计算

按照城市雨水资源化的利用方式,城市雨洪资源可利用量分为两部分:雨洪就地利用量和蓄积调节利用量。

雨洪就地利用量 $W_{就地}$ 包括居民小区屋顶集雨系统及大型公共场地蓄积雨水量 $W_{蓄}$ 、下沉式绿地截留雨水量 $W_{截}$ 以及地下渗透雨水量 $W_{渗}$ 三部分。即:

$$W_{就地} = W_{蓄} + W_{截} + W_{渗} \quad (1)$$

由于蓄积雨水资源量只与降雨量、径流系数和集水面积有关,在三部分确定后,该部分雨水资源量可按照下式计算:

$$W_{蓄} = \frac{P\Psi F}{1000K} \quad (2)$$

式中: $W_{蓄}$ 为蓄积雨水资源量(m^3); P 为集水区域的降雨量(mm); Ψ 为径流系数(屋面取 0.9,地面取 0.6~0.8); F 为所收集雨水的汇水面积(m^2),包括居民小区屋顶集雨面积及大型集雨公共场地面积(以水平投影面积计); K 为面积利用系数,一般采用 1.2。

考虑在城区建造下沉式绿地,则绿地除滞蓄绿

地本身降雨径流外,还可将屋顶或公共不透水铺装面的径流导入绿地。降雨径流导入绿地的范围可视为绿地的汇水区。汇水区的集流时间较短,为简化计算,假定其总的绿地的入流过程为绿地增加的净雨量,设汇水区流入绿地的径流系数为 α ,则绿地的总雨力为:

$$S = s(1 + \alpha \frac{F}{a}) \quad (3)$$

式中: S 为绿地和汇水区叠加的总雨力(mm/min); s 为设计暴雨雨力(mm/min); α 为汇水区径流系数,如为铺装路面取为 0.9; F 为汇水区面积(m^2); a 为绿地面积(m^2)。

绿地上的降雨以及屋顶、地面等汇水区汇入绿地的径流在绿地内有截留和下渗,初期截留和下渗量较大,后期趋于稳定。为简化计算,采用扣除平均损失强度的方法,以计算绿地的净雨量^[2]。假定平均损失强度为 μ ,主要为绿地下渗,产流历时为 t_c ,则 t_c 应满足:

$$\mu = \frac{S[(1-n)t_c + b]}{(t_c + b)^{n+1}} \quad (4)$$

式中: μ 为绿地降雨平均损失强度(mm/min),城市绿地土壤以壤土考虑,并计入其初期的人渗率比稳定的人渗率大,计算中采用 0.2~0.3 mm/min ; S 为绿地和汇水区叠加的总雨力(mm/min); n 、 b 为对应城市暴雨强度公式中的地区参数; t_c 为绿地产流历时(min)。

则一场暴雨绿地截留雨水资源量为:

$$W_{截} = 1000\mu t_c F_{绿} \quad (5)$$

式中: $F_{绿}$ 为下沉式绿地面积(km^2)。

地下渗透雨水量的计算根据渗透设施的不同采用不同的公式计算,在城市雨水资源化利用中,常采用透水铺装路面补给地下水,其计算式为:

$$W_{渗} = kfPS \quad (6)$$

式中: k 为透水铺装路面的渗透系数; f 为下层土壤的人渗率; P 为次降雨量(mm); S 为透水铺装的总面积(m^2)。

1.2.2 地表产、汇流

1.2.2.1 地表产流计算

根据城区的地形情况以及防洪排涝标准,布置雨水入水口,并划分各个雨水口节点所对应的汇水子区面积,根据下垫面条件的不同,每一子区可以分为透水区和不透水区两部分。

不透水区的降雨损失包括填洼、缝隙下渗等,产流计算采用变径流系数法即限值法,径流系数只与

降雨量和初始径流系数有关:

$$\Psi = \Psi_c - (\Psi_c - \Psi_0)e^{-CP} \quad (7)$$

式中: Ψ 为降雨过程中的径流系数; Ψ_0 为初始径流系数; Ψ_c 为最终径流系数; P 为累计雨量; C 为常数。

也可以采用美国土壤保持局(SCS)的方法计算。透水区的损失主要为下渗和洼蓄。洼蓄和不透水区类似,但洼蓄量较不透水区大。下参与天然流域类似,可采用霍顿(Horton)下渗曲线公式计算下渗率:

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt} \quad (8)$$

式中: f_c 为稳渗率, f_0 为初渗率, 下渗指数 K 等参数主要取决于土壤特性及前期干湿状况。

1.2.2.2 地表汇流计算

城市地表雨水通过雨水口节点进入排水系统, 每一雨水口承担相应汇水子区内的雨水, 因此地面汇流距离和时间一般较短。但由于城区地面覆盖种类各异, 坡度糙率差别较大, 造成坡面水流很不稳定, 难以进行精确的水力计算。目前在计算城区地表汇流时常采用面积—时间曲线法(等流时线法)以及运动波法。面积时间曲线的形状采用通用概化公式为:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \begin{cases} \frac{r_1 F}{T_c} \left(\frac{t}{T_c} \right)^{r_1-1} & 0 \leq t \leq r_A T_c \\ \frac{r_1 F}{T_c} \left(\frac{T_c - t}{T_c - r_A T_c} \right)^{r_1-1} & r_A T_c < t \leq T_c \end{cases}$$

式中: T_c 为汇流时间; F 为汇流面积; r_1 、 r_A 为参数。改变两参数可以得出各种形状面积—时间曲线。取 $r_1 = 1.25$, $r_A = 0.35$ 。

汇流时间 T_c 用运动波公式计算:

$$T_c = \left(\frac{L}{\alpha I^{m-1}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (10)$$

式中: L 为坡面水流距离; I 为计算雨强; α 、 m 是参数。

通过以上的产、汇流计算得出各个子区的净雨过程以及各雨水进口的人流过程。

1.2.3 雨水管网汇流

雨水管网的设计综合运用城建给排水方法和现有的城市雨水管道模型(SSCM)法, 以使得设计雨水管道满足雨洪排涝要求。

1.2.3.1 运用城建给排水方法对雨水管网进行初步设计^[3]

(1)结合雨水口布置情况, 进行雨水管道定线, 确定干、支管的布置。

(2)用列表算法进行雨水支管和干管的水力计算。

根据以上各雨水口地表汇流计算结果, 逐管段计算, 得出管段设计流量, 并确定各管段的管径、坡度、流速、管底标高和管道埋深值等。绘制雨水管道平面图及纵剖面图。

1.2.3.2 雨水管道系统校核模拟并得出 $W_{剩}$

城市雨水管道计算模型^[4](简称 SSCM), 由岑国平、詹道江等人所提出的。运用该模型, 按照设计暴雨过程, 在以上设计的雨水管道系统中进行次暴雨过程模拟, 以校核各雨水管段的输水能力, 并对管段设计参数加以修正。该模型运用 FORTRAN 语言编程, 最终的输出结果为出水口的流量过程, 因此可以结合出水口流量过程线, 运用曲线面积法得出就地利用后剩余的雨水资源量 $W_{剩}$ 。

1.2.3.3 雨水蓄积设施

建立蓄水调节设施, 将一部分就地利用剩余雨水资源集中起来以供综合利用。雨水蓄积利用设施主要包括: 集中调蓄池、人工湖、地下河等。蓄积调节利用量 $W_{蓄}$ 的大小需将城区可蓄积利用雨洪资源量和城市所需回用水量两者综合考虑, 既应避免因调蓄设施容量过小而造成的雨洪资源不能充分利用, 又应避免调蓄设施容量过大而造成的投资浪费。可根据城区已有降雨资料, 以及就地利用设施情况, 求出相应暴雨频率下的可蓄积雨洪资源量 $Q_{可蓄}$, 并和相应设计标准的回用需水量 $Q_{回用}$ 相比较, 取较小者为蓄积调节设施容量 $W_{蓄}$ 。

回用需水量 $Q_{回用}$ 可按照不同回用指标、回用水质和汇流流域特性等要求确定满足回用要求的不同需水量, 具体见表 1:

表 1 城区所需回用雨水资源量

回水用途	回用需水量	回水用途	回用需水量
居民生活杂用水	Q_1	洗车用水	Q_4
城区道路浇洒	Q_2	地下水补给	Q_5
绿化用水	Q_3	...	Q_j
总需水量			$Q_{回用} = \sum Q_i$

当 $W_{剩} > W_{蓄}$ 时, 需排出水量为: $W_{排} = W_{剩} - W_{蓄}$, 当 $W_{剩} < W_{蓄}$ 时, 就地利用剩余部分雨水可全部蓄积利用。

1.2.3.4 雨水净化处理

由于在雨水产、汇流过程中, 特别是初次降雨, 会夹带部分污染物, 故在雨水回用前必须经过适当的净化处理, 使其水质符合各类回用水的水质标准。

目前常用的雨水净化处理方法为渗滤, 可分为平面渗滤、低洼沼泽渗滤、旱井渗滤以及深沟渗滤

等。平面渗滤技术要求大量采用多孔或混凝土格栅铺筑材料,并使用草编、杂草区,因此该技术要求表面渗滤力必须高于设计降雨强度。低洼沼泽渗滤技术主要是利用在渗滤期间可以存留雨水的渗滤池、沟等。深沟渗滤技术是渗滤技术的延伸,地表雨水先经过多孔分流管路进入储水沟。雨水也可以先经过自然植被覆盖区去除一部分固体物。

净化后所得水量 $W_{\text{净}}$ 可按照下式计算:

$$W_{\text{净}} = W_{\text{蓄}} \cdot K \tag{1}$$

式中: K 为雨水净化处理系数,根据净化处理设施的不同, K 取值为 0.6~0.75。

1.2.3.5 雨水回用

净化处理后的雨水资源,经雨水回用管网输入城市中水给水系统参与城市给水,按照各类用水的水质要求,以及不同类用水的需求程度,依次补给城市居民生活杂用水、市政用水、雨洪回灌以补给地下水。

考虑到大多数城市的降雨,主要集中在汛期,如果单独铺设雨水回用管道利用率较低,因此可以利用城市中水回用管网进行雨水资源的输送,以节约管道建设所需投资以及运行管理、维护费用。在汛期,可以减少其他中水的处理量,主要利用中水回用管道输送雨水资源至各给水设施。

2 实例研究

郑州市郑东新区龙子湖地区为规划建设的集教学、科研、娱乐于一体的现代化城区,为了实现建设“生态城市”的目标,该区建有一环形人工湖及湖滨生态系统,其中湖体面积为 1.2 km²,调洪库容为 82.9 万 m³。位于内环的中心岛地区和外环的大学园区建筑物及排涝设施分开布置,同时考虑到雨水资源化利用,该区雨水先就地利用,后经湖滨生态绿地净化入龙子湖蓄积作为该区用水水源。现以中心岛地区为例,进行该区基于雨水资源化利用的防洪排涝系统优化设计,设计暴雨重现期为 20 年一遇。

根据《河南省中小流域设计暴雨洪水图集》提供的暴雨成果,暴雨成果如下表,暴雨频率为 5%,该区 24 h 设计暴雨量为 189 mm。

由于该区龙子湖具有调蓄雨水的功能,就地利用剩余部分雨水可经环湖湿地生态系统净化后入湖。该区采用城建给排水方法进行雨水管道设计,并运用城市雨水管道模型(SSCM 模型)对中心岛地

区的雨洪入库过程加以模拟,得出一场暴雨经湿地净化后入湖水量为 7.8 万 m³。

表 2 郑州市区 24h 设计暴雨成果表(单位:mm)

降雨 历时	统计参数			频率为 P(%)的设计值			
	均值	C_v	C_s/C_v	20	5	2	1
24h	95	0.5	3.5	126	189	230	260

表 3 龙子湖中心岛地区地面情况(单位:km²)

地面种类	面积
绿地	0.336
道路	0.1
建筑设施	0.298
公共广场	0.21
合计	0.944

表 4 中心岛地区就地利用雨水资源量计量成果表

(单位:万 m³)

就地利用方式	雨水资源量
屋顶及大型场地蓄水 $W_{\text{蓄}}$	6.2
下沉式绿地截留雨水量 $W_{\text{截}}$	1.14
地下渗透雨水量 $W_{\text{渗}}$	0.76
合计	8.1

通过以上计算结果可得,中心岛地区一场暴雨的可利用雨水资源总量为 15.9 万 m³,约占全部降雨量的 89.32%,该部分水量可作为高校园区内家属区的生活杂用水,以及市政绿化用水,可以节约大量的自来水资源,创造直接经济效益,同时可以减轻该区的城市防洪压力,减少城市防洪投资。

3 结论

本文是城市雨水资源化利用的初步成果,结合我国城市发展、水资源利用和城市防洪排涝现状,提出了基于雨水资源化高效利用的城市雨洪排水系统优化设计思路,并给出了城区降雨就地利用以及蓄积调节利用两种利用模式,以及可利用雨水资源量计算方法,同时将该方法在郑东新区龙子湖中心岛地区防洪排涝体系规划设计中成功运用,结果表明该方法可以达到节约城市生活饮用水资源并减轻防洪压力的目的。

参考文献

[1]王文远,王超.国外城市排水系统的发展与启示[J].中国给水排水,1998,14(2):45~47.
[2]钱易,刘昌明.中国城市水资源可持续开发利用[M].北京:中国水利水电出版社,2002,213~215.
[3]姚雨霖,任周宇.城市给水排水[M].北京:中国建筑工业出版社,1986.228~239.
[4]岑国平,詹道江,洪嘉年.城市雨水管道计算模型[J].中国给水排水,1993,9(1):37~40.