

城市化进程中雨水资源利用研究

芦晓峰, 孙毅, 李波, 王铁良

(沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866)

摘 要: 辽宁省是一个重工业大省, 同时也是一个水资源匮乏的省份, 全省多年人均水资源量为 860 m^3 , 是全国平均值的 $1/3$, 仅是世界平均值的 $1/12$, 随着城市化进程的日渐加快, 水资源匮乏程度也逐渐加剧。降雨时空分布不均, 水灾、旱灾频繁发生, 水资源过量开发, 地下水超采严重等是造成辽宁省水资源匮乏的主要原因。以辽宁省沈阳市为研究对象, 对沈阳市多年降雨资料进行了系统分析, 对危害性较强的暴雨进行了时间特性分析, 得出沈阳市暴雨的短历时的时间特性。利用 DPS 绘制出短历时降雨的频率曲线, 并对雨型特点进行分析。以沈阳农业大学校园为实例, 按照不同用地类型分别计算可利用量。提出了雨水利用规划, 并且进行了雨水量的计算。研究表明: 雨水资源化可以有效地缓解沈阳市用水矛盾突出的情况, 并且创造出良好的环境、生态、社会、经济效益。

关键词: 城市; 雨水资源化; 利用

中图分类号: S273.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)03-0267-05

Utilization of Rainwater Resources in the Urbanization Process

LU Xiaofeng, SUN Yi, LI Bo, WANG Tieliang

(Water Conservancy Institute of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Liaoning province is a heavy industry province, but also a water scarcity province. The annual average water quantity is 860 m^3 , which is one-third of the national average, only one-twelfth of the world average. Along with the increasing speed of urbanization, the level of water shortage also is gradually intensifying. Rainfall distribution, flood, drought, the excessive development of water resources, the over-exploited groundwater are the main reasons that cause water scarcity in Liaoning province. The object of this research is focused on Shenyang, Liaoning province. The paper analyzed the rainfall data of years in Shenyang city, analysis on a time characteristic of the strong rainstorm was carried out, the short time characteristic of the rainstorms was obtained in Shenyang, the frequency of short diachronic rainfall curve was mapped with DPS, and the hyetograph characteristics was analyzed as well. Taking campus of Shenyang Agriculture University as an example, the paper calculates the quantity of utilization of types according to the different types of land, puts forward the plan of rainwater utilization, and calculates the quantity of rainwater. The research shows that the rainwater utilization can relieve the contradiction in Shenyang effectively, and create good environmental, ecological, social and economic benefits.

Key words: urban; rainwater resources; utilization

水是生命之源, 是社会发展的不可替代的资源。随着国民经济的不断发展, 尤其是工业化和城市化的迅猛发展, 使人类赖以生存的水资源遭到了前所未有的挑战。目前全球有 12 亿人严重缺少饮用水, 每年有 2.5 亿人因为水的问题而染病, 其中 1 000 万人死亡。联合国第二次人类住区大会秘书长沃利·恩道指出: “水将是 21 世纪国际社会争论最激烈的城市问

题”^[1]。我国是一个水资源紧缺的国家, 据统计, 我国人均水资源量只有 $2\,220 \text{ m}^3$, 仅为世界人均水平的 $1/4$, 全国 600 多座大中城市中, 有近 400 座城市缺水或严重缺水, 缺水量达 $1\,600 \text{ 亿 m}^3/\text{d}$, 特别是近年来北方连续干旱, 多数城市用水告急; 南方地表水污染严重, 地下水过度开采, 节水问题再也不能小觑。由于供水不足, 城市工业每年损失高达 1 200 亿元, 并

收稿日期: 2010-12-28

修回日期: 2011-02-28

资助项目: 国家自然科学基金(50879046); 辽宁省博士启动基金(20101098); 沈阳农业大学青年基金(20081017)

作者简介: 芦晓峰(1981-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 讲师, 研究方向: 水土环境与生态工程。E-mail: lxf_flying@163.com

通信作者: 王铁良(1965-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业设施、水资源生态等方面的研究。E-mail: tieliangwang@126.com

且我国水资源分布的时间和空间分布不均匀,其中大部分在我国北方及西北干旱、半干旱地区,水资源短缺已经成为制约我国经济发展的重要因素。据预测,到 21 世纪中叶,我国的贫水状况将达到高峰。因此,如何最大限度地节流、开源,已越来越受到国内有关人士的关注。而在这些思路中,人们普遍注意的是污水回用,却忽略了水资源的另一个重要组成部分,那就是雨水资源。雨水资源化不仅是水资源开源、节流的一条有效途径,而且对生态环境的改善、水污染的控制等方面都具有重大意义^[2]。

随着社会的发展,人类不断向城市集中,我国城市的数量不断增加,规模急剧扩大。高层大型化建筑不断增加,建筑密度增大,不断增加的人口和不断加快的发展带来了一系列的问题,随着城市化的发展,不透水面积增加,导致径流系数增大,暴雨汇流迅速,径流量成倍增加,使得每年有大量的雨水资源从城市雨污水管网白白流走,这不仅浪费了大量宝贵的雨水资源,还使城市排水管网不堪重负。而另一方面,我国雨水资源丰富,年降水量达 $6.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。因此如何利用丰富的雨水资源缓解日益扩大的用水缺口,尤其是北方城市的“水荒”问题,越来越受到广泛的关注。其中城市环境的日益恶化,尤其是城市水环境的恶化是当前人们面临的最大的困难^[3]。

长期以来,被称为“无根水”的雨水多是任其排放,未加以充分利用。如果能将流失的雨水进行有效的收集和利用,必将成为解决城市水资源短缺的有效措施之一。如果合理、充分地利用雨水回灌,既可涵养地下水源,防止地面沉降,还能防洪减灾,增加土壤中的含水量,调节气候,改善城市生态环境^[4]。解决好雨水利用问题对城市社会经济可持续发展有重大意义,寻求新的雨水处置或利用方法已成为必然趋势。

1 城市化发展对水资源的影响

城市化引起了城市气候的改变,从而对城市区域的降雨产生了较大的影响。城市化过程中,在城市尤其是大城市区域,所有的气候要素都有一定程度的改变。在城市化过程中地表的改变,使地表上的辐射平衡发生变化,空气动力糙率的改变影响了空气的运动。工业和民用供热以及机动车量增加了大气中的热量,而且燃烧把水汽连同各种各样的化学物质送入大气层中。建筑物能够引起机械湍流,同时城市作为热源可导致热湍流。因此,城市建筑对空气运动能产生相当大的影响。一般来说,强风在市区减弱而微风可得到加强。因而城市与其郊区相比很少有无风的时候。而城市上空形成的凝结核、热湍流以及机械湍

流可以影响当地的云量和降雨量^[5]。

随着城市化的发展,树木、农作物、草地等面积逐步减小,工业区、商业区和居民区规模、面积不断扩大。城市化过程使相当部分的流域为不透水表面所覆盖,减少了蓄水洼地。与天然的下垫层相比,硬质化后的人工下垫层(建筑顶部、地表)的粗糙率要小得多^[6]。由于不透水地表的入渗量几乎为零,故地表径流量增加,城市化后大量天然可入渗地面成为不透水的硬质地表面,不透水地表的高径流系数使得雨水汇流速度提高,导致汇流时间缩短,城市雨水径流系数增大,雨水汇集、排出时间缩短,高峰流量增大^[7],导致洪水风险增加,雨水大量流失,雨水地下渗透量及地下水位下降,地面井泉枯竭,湖河水量减少,水分蒸发量下降,空气干燥,旱情加剧。

1.1 城市化对蒸发的影响

由于城市建设,使原来的自然陆面(包括土壤、植被、水面)蒸发变成城市建筑物广布的陆面蒸发(包括道路、广场、房屋建筑等);原来可能是土壤或植被覆盖的地面变成了不透水的道路或广场、房屋,蒸发量集中但总量很少;原来是自然河流变成了人工渠道,蒸发量相对减小^[8]。另外,由于城市人口和建筑物集中,平均气温较城市建设前略高,也影响着蒸发量大小。

1.2 城市化对降水的影响

从降水过程来看,自然条件下的降水直接降落到陆面,包括水面、地表、植物冠层;而城市覆盖区,降水多直接降落到硬化的路面、广场地面、房屋屋顶,接受降水的覆盖条件发生了变化^[9]。另外,由于城市气候发生变化,大气降水形成的过程和特征也发生变化。

1.3 城市化对下渗的影响

从下渗过程来看,由于原来透水的地面变成了不透水或透水性能弱的地面(如路面、广场、房屋),使降水下渗的可能性和下渗量大大降低。也是这些因素导致了降水形成的城市洪水比较集中(峰高、量大),地下水补给量减小,即“地表径流大、地下径流小”。

1.4 城市化对径流的影响

从径流过程来看,天然流域的径流过程主要表现为:降落到地面的降水,在蒸发、下渗、低洼蓄水条件下,多余的水分形成地表径流,向下渗入地下的水分逐渐形成地下径流。城市化导致建筑密度增加,不透水地面增加,天然排水系统改变,城市排泄生活污水和雨洪的地下管网系统的建成,城市局部小气候发生变化,会对城市的环境发生综合性潜在影响。流域的自然面貌发生改变,直接影响了雨洪过程。由于不透水地面的增加,相同降雨量在城市地区产生的径流量比农村地区要大的多,而且在城市中雨水下水道的敷设及天

然河道的改变,使雨水流向排水管网更为迅速,洪水总量也增大了,洪峰增高和峰现时间提前,径流过程线的形态与时间尺度都与自然状态显著不同^[10]。

2 沈阳市降雨分析

2.1 年降雨量分析

本文统计 1971– 2003 年沈阳市的年降雨资料,年降雨量平均值为 609.6 mm。其中年最大值出现在 1986 年达到 921 mm,最小值出现在 2000 年只有 390.3 mm,两者差值达到 2.4 倍之多。将沈阳市 1971– 2003 年年降雨量的变化趋势绘制成图 1。

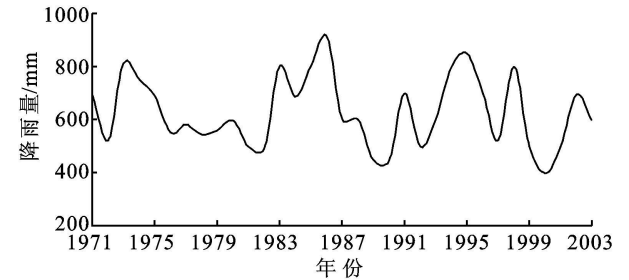


图 1 沈阳市 1971—2003 年降雨量的变化曲线

分析沈阳市的降雨资料年度范围是 1971– 2003 年,按照 24 h 雨量(图 2 所示)把降雨分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨 6 个等级。

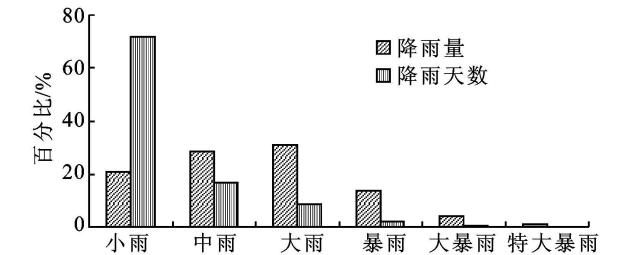


图 2 沈阳市 1971—2003 年分类降雨量与天数比例分布图

2.2 月降雨量分析

统计沈阳市 1971– 2003 年近 33 a 的月平均降雨量绘制沈阳市 1971– 2003 年月平均降雨量分布图(图 3)。从图中可以看出,沈阳市降雨量最大的两个月份是 7 月份和 8 月份,其月平均降雨量百分比分别占了 26.1%、25.7%。其余几个月的降雨量分别为 6.2%、8.0%、15.1%、11.6%、7.3%,在 6– 9 月期间的月降雨量占全年降雨量的 78.5%,而 7– 8 月平均降雨量更是占了全年降雨量的 51.8%。

通过统计沈阳市 1971– 2003 年近 33 a 的月种类降雨量与降雨天数,可以得出从 1971– 2003 年 33 a 中,沈阳市小雨、中雨和大雨在 4– 10 月份均有分布均匀,暴雨、大暴雨和特大暴雨多出现在 6– 9 两个月份。4– 10 月份均有充分的雨水收集利用,7– 8 月还应特别注意城市防洪。

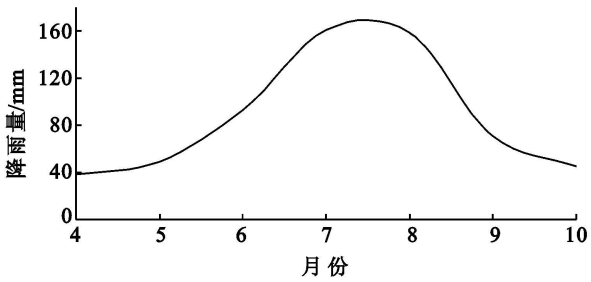


图 3 沈阳市 1971—2003 年月降雨量均值分布图

通过 1971– 2003 年 33 a 月降雨量的分析,可以看出沈阳市月降雨变化趋势,在 6– 9 月降雨量占全年降雨量的 78.5%,多数降雨都是发生在这个时间段内,而降雨的种类分布并不均匀。由此,可以得出沈阳市的月降雨量分布十分不均衡,具有明显的季节特点。这段时间也是沈阳市主要的汛期,对于雨水利用而言这段时间雨水量很大,在拥有充足雨量的同时也要面对如何解决无法利用的过剩雨量问题。

2.3 日降雨量分析

在降雨的雨量方面,1971– 2003 年共有 2 218 天降雨,日最大雨量发生在 1973 年 8 月 21 日,其间日降雨量达到了 215.2 mm。日降雨量在 10 mm 以下的小雨天数占到总降雨天数的 72.05%,降雨量占到 20.84%,虽然降雨量不是最多,但降雨日数比较多;日降雨量 10~ 25 mm 的中雨天数虽然不多,但降雨量占到 28.58%;日降雨量 25~ 50 mm 的大雨虽然天数较少,降雨量占到 31.14%;所以小到大雨将是雨水收集利用的主要对象。分析不同类型降雨的多年日降雨量,可以从中发现并且对比各个类型降雨的日分布和降雨量的特点,考察其时间分布特点。得出沈阳市暴雨集中分布在 6– 9 月,其余月份在 1971– 2003 年从未有暴雨记录,因此,沈阳市暴雨分布具有明显季节特性。

2.4 沈阳市暴雨年内分布特点

根据沈阳市 1971– 2003 年的日降雨量资料,对 24 h 降雨量超过 50 mm 的暴雨天数进行统计,如连续两日或者多日 24 h 雨量超过 50 mm,则计为一次暴雨。其间沈阳市总共出现暴雨是 99 次,平均每年 3 次,最多的年份是 1995 年 7 次。最少的年份有 1976 年、1987 年和 2000 年三年均无暴雨记录。日最大暴雨量发生在 1973 年 8 月 21 日,其间日降雨量达 215 mm。

由图 4 和图 5 可以看出暴雨发生年度次数和暴雨降雨量具有一定的波动性和随机性,暴雨次数变化趋势说明沈阳市年度暴雨的发生次数基本保持稳定;从年降雨量来看,沈阳市年降雨量呈逐渐减少的趋势,而沈阳市暴雨降雨量说明沈阳市 1971– 2003 年暴雨产生降雨量有增加的趋势,可见近年来暴雨对沈阳市防洪减灾构成了越来越大的威胁。

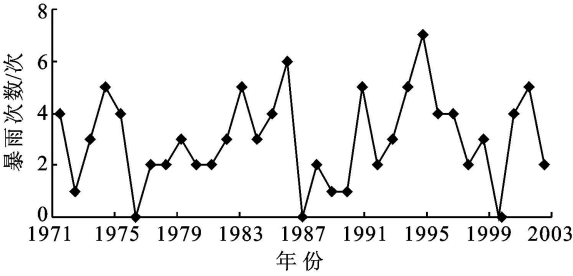


图 4 沈阳市 1971—2003 年暴雨次数

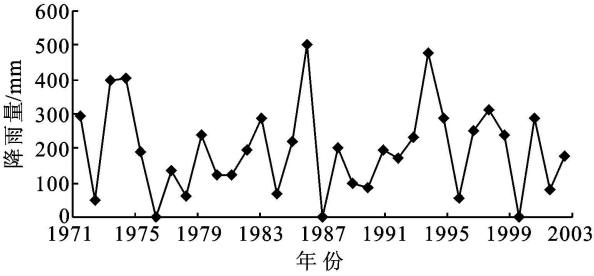


图 5 沈阳市 1971—2003 年降雨量

2.5 沈阳市暴雨量 P-Ⅲ分布

在统计分析中,假定样本来自一个正态分布的总体,然后再进行结果分析。然而资料不一定服从正态分布,即使进行数据转换,也可能难符合理想的正态分布。而 DPS 采用人机交互方式进行适线和参数调整、绘制频率曲线图可以克服这些不足。根据沈阳市 1971—2003 年暴雨资料,应用 P-Ⅲ分布进行分析,见图 6。

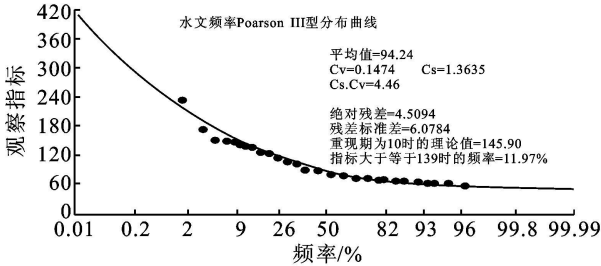


图 6 1971—2003 年各年暴雨量统计频率曲线

从图 6 中可以看出,理论值(线)和观察值(点)拟合较好,该地区暴雨量均值 94.24 mm,10 a 一遇的暴雨量为 145.90 mm,大于 139 mm 降雨量的概率是 11.97%。

3 雨水资源利用化实例分析

本研究以沈阳农业大学校园为实例研究对象,沈阳农业大学位于沈阳市东陵区,其气象水文条件与沈阳市是一致的。学校坐落在沈阳市东郊的天柱山南麓,东与名胜古迹东陵毗邻,西与沈阳城区相连,学校占地 2.2 万 hm^2 ,校园有山有水、有旱田水田、坡地和林园,校区环境幽美,景色宜人。其中大型的新建的建筑物比较多,有大型的体育场、体育馆、图书馆、办公楼等占地比较大的建筑物。

表 1 沈阳农业大学校园用地类型分布

用地类型	建筑用地	道路	绿地	其他	合计
面积	146374.7	112149.8	214149.8	483953.4	956627.7

3.2 雨水资源利用量分析

在沈阳农业大学校园内部分用水可用雨水代替,估算如下:

(1) 冲厕用水。冲厕用水具有用水量大、水质要

3.1 产流量计算

校园地表可分为透水区域和不透水区域两种。不透水区包括建筑屋顶、混凝土地面、铺装道路、铺装停车场等。透水区包括草地、农田和泥土地等^[11]。降落在城市地面的雨水除去各种损失以后,沿地面、屋面以及道路边沟进行流动,一般由雨水口排入排水管道。沈阳农业大学校园功能齐全,包括实验室、医院、食堂、家属区、教学楼、运动场、商店等所有城市典型功能区。从地表类型来看,存在大量的不透水区,如屋顶、混凝土路面、不透水砖人行道、柏油路等,也有各种类型的透水区,如绿化带、透水砖人行道等。沈阳农业大学校园各种用地具体分布见表 1。

可收集的雨水资源量根据计算出的道路、屋面、绿地等的面积,查其径流系数,根据沈阳市的多年平均年降雨量,进行计算。需注意的是:要考虑到多场雨中,降雨量小的雨不会形成地面径流,特别是非雨季的雨,因此要考虑一个季节折减系数。另外,经实验研究发现,一场雨中,初期的雨水水质是比较差的。COD 和 SS 都特别高,因此可考虑弃除。所以也应考虑一个初期弃流系数^[12]。

$$W = \alpha \cdot \beta \cdot \Psi \cdot H \cdot A$$

式中: W ——可收集水量; α ——季节折减系数,取 0.85; β ——初期其流系数,取 0.87; Ψ ——径流系数; H ——多年平均年降雨量(沈阳市多年平均降雨量为 609.6 mm,这里取整数 600 mm 化为国际单位制即 0.6 m); A ——汇流面积。经计算得出校园全年总降雨量 57.4 万 m^3 ,建筑面屋顶、道路、绿地、校园全年可收集雨量分别为 5.84 万 m^3 、4.48 万 m^3 、1.42 万 m^3 、11.75 万 m^3 。

求较低、用水量稳定的特点,是利用城市杂用水重要途径。《建筑中水设计规范(GB50336—2002)》指出,家庭住宅冲厕用水一般每天为 32~40 L/(人·d),办公楼、教学楼冲厕用水量为 15~20 L/(人·d)。在本

例中取冲厕用水: $15 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$, 2006 年 4 月, 学校现有教职工 1 830 人, 现有学生 23 440 人, 冲厕用水的人数暂取 15 000 人, 每年校园用水时间按照 10 个月 300 d 计算, 则每年冲厕用水量为: $W_c = 15000 \times 0.015 \times 300 = 67500 (\text{m}^3)$ 。

(2) 绿化用水。绿化灌溉用水主要用于补充公共或住宅绿地的蒸发、蒸腾的水分损失及植被生长所需水分。根据调查统计显示, 各地的绿化灌溉用水量, 同土壤、植被状况和养护条件有关。《城市生活居住区规划设计规范(GB50180-93)》规定用水量为: $1 \sim 2 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。在实际操作中, 一般是在非降雨日对绿地进行定时定量灌溉, 对于规划建设下沉式绿地的地区, 可适当减少无雨日的绿化灌溉。取绿化用水量为 $0.001 \text{ m}^3/\text{d}$, 由于沈阳市每年 5-9 月雨量充沛, 绿化用水量很少, 并且去除冬季无需绿化时间, 综合取得绿化用水按照年 4 个月计算, 则每年绿化需水量为: $W_1 = 214149.8 \times 0.001 \times 120 = 25697.976 \text{ m}^3$ 。

(3) 道路广场喷洒用水。道路广场喷洒用水包括道路广场保洁冲洗和干燥季节洒水两部分, 该用水量根据城市规模大小、道路广场的等级而有所不同。《城市生活居住区规划设计规范》规定, 高级住宅区的道路广场浇洒用水标准为 $1.0 \sim 1.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{次})$, 普通住宅区则为 $0.5 \sim 1.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{次})$, 每日均为一次。降雨日一般不需要冲洒。取道路广场洒水用量为 $1.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{次})$, 洒水时间按照 4 个月计算, 则每年洒水需水量为: $W_r = 112149.8 \times 0.001 \times 120 = 13457.976 \text{ m}^3$ 。

(4) 景观用水。景观、娱乐水体补水主要为了促进景观水体的流动, 同时补充蒸发等的水分损失, 以维系健康要求。娱乐、景观水体补水一般考虑使水体中的水约每周或 10 d 完全更新一次。每年校园内可收集雨水总量除去冲厕、绿化、道路洒水、蓄水池蓄水剩余的雨水量为: $W_j = 117489.32 - 67500 - 25697.976 - 13457.976 = 10833.368 \text{ m}^3$ 。

这部分雨水量可以作为景观用水、洗车用水或者环境用水等, 沈阳农业大学校园内环境优美, 克威园内的小型湿地作为一处景观用水可以使用雨水, 另外也可以建造如人工湖或者洗车厂等利用雨水资源, 它们都具有良好的社会、环境、经济综合效益。从以上分析可以看出, 沈阳农业大学校园雨水利用工程可以满足校园内的多种用水需求。

4 结论

沈阳市的月降雨量分布十分不均衡, 具有明显的季节特点; 沈阳地区日降雨量 $10 \sim 25 \text{ mm}$ 的中雨天数虽然不多, 但降雨量占到 28.58%, 日降雨量 $25 \sim 50 \text{ mm}$ 的大雨虽然天数较少, 但降雨量占到 31.14%, 所以小到大雨将是雨水收集利用的主要对象; 以沈阳农业大学为试验对象, 分析、计算了沈阳农业大学雨水资源利用个情况, 结果表明沈阳农业大学校园雨水利用工程可以满足校园内的多种用水需求。

在城市雨水利用中, 涉及到许多知识领域(如气象、水文、岩土等)和前沿科学, 且需大量降雨实测记录资料和雨水径流观测资料、试验、资金和人力等; 本文对此仅进行了部分内容的研究和探讨, 提出了一些方法和得出了一些独到的见解, 鉴于时间的限制, 有些方面和还有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 孟玉. 城市雨水的综合利用[J]. 中国资源综合利用, 2006(6): 15-17.
- [2] 侯建涛, 朱达力. 雨水回用: 我国城市水资源开发的新途径[J]. 水利天地, 2003(2): 30-31.
- [3] 刘小勇, 吴普特. 雨水资源集蓄利用研究综述[J]. 自然资源学报, 2000, 15(2): 189-193.
- [4] 任杨俊, 李建牢, 赵俊侠. 国内外雨水资源利用研究综述[J]. 水土保持学报, 2000, 14(1): 88-92.
- [5] 李树平, 黄廷林. 城市化对城市降雨径流的影响及城市雨洪控制[J]. 中国市政工程, 2002(3): 36-37.
- [6] 王紫雯, 程伟平. 城市水涝灾害的生态机理分析和思考[J]. 浙江大学学报, 2002, 36(5): 582-587.
- [7] 孙晓英, 牛争鸣, 赵廷红. 城市雨水资源化问题[J]. 西安理工大学学报, 2001, 17(2): 203-207.
- [8] Zaizen M, Tchrakaway, Matsumoto H, et al. The collection rain water from domestic adiums in Japan[J]. Urban-Water, 1999, 1: 355-359.
- [9] 刘应宗, 李明, 金雨澄. 城市排水规划中雨水资源化问题探讨[J]. 中国给水排水, 2003(12): 97-98.
- [10] 杨丽华. 城市化对城市降雨径流的影响及城市雨洪控制[J]. 陕西建筑, 2003, 29(17): 99-100.
- [11] 王铮, 郭一令. 城市雨水径流计算方法[J]. 给水排水, 2005, 31(1): 46-47.
- [12] 王俊岭, 李俊奇. 北京市某小学雨水利用案例分析[J]. 科技情报开发与经济, 2004, 14(2): 157-158.