

中国北方城市雨水资源利用探讨

王 情^{1,2}, 张广录¹, 王晓磊^{1,2}, 徐友信^{1,2}, 张洪生^{1,2}, 谭莉梅^{1,2}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 河北 石家庄 050021; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 : 简介国内外雨水利用概况, 分析中国北方城市雨水利用的必要性和可行性, 并对几个典型的中国北方城市的年均雨水资源化潜力以及石家庄市单次强降雨产生的雨洪资源利用潜力进行了计算。计算结果表明, 北京、天津、西安、太原、郑州、石家庄、济南的年均雨水资源化潜力依次为 1.655 9、0.957 3、0.475 6、0.314 9、0.503 7、0.324 3、0.367 4 亿 m³。文末简单介绍了城市雨水综合利用的方法, 认为城市雨水的合理收集利用, 不仅能有效缓解水资源供求矛盾, 带来可观的经济效益, 还具有改善城市生态环境等功效, 具有广阔的发展前景。

关键词 : 水资源利用; 城市雨水利用; 雨水资源化; 北方城市; 中国

中图分类号 : S273.1 **文献标识码** : A **文章编号** : 1004-693X(2009)04-0086-05

Investigation on utilization of rainwater resources in North China cities

WANG Qing^{1,2}, ZHANG Guang-lu¹, WANG Xiao-lei^{1,2}, XU You-xin^{1,2}, ZHANG Hong-sheng^{1,2}, TAN Li-mei^{1,2}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract : This article summarizes the current development of rainwater utilization, and analyzes the necessity and feasibility of utilizing rainwater resources in North China cities. The average annual potential of rainfall resources was calculated for several typical cities in North China, and the potential resource of a single rainstorm was calculated for the city of Shijiazhuang. The results showed that the average annual potential of rainfall resources for Beijing, Tianjin, Xi'an, Taiyuan, Zhengzhou, and Jinan were 1.655 9, 0.957 3, 0.475 6, 0.314 9, 0.503 7, and 0.3243 (× 10⁸) m³, respectively. The methods of comprehensively utilizing rainwater were simply presented. Utilizing rainwater not only relieves the tension between water supply and demand in cities and brings considerable economic benefits, it also improves the urban eco-environment. Therefore, rainwater utilization has a bright future.

Key words : water resource utilization; urban rainwater utilization; rainfall resources; cities of North China

水是人类生存的必需资源, 水资源是城市可持续发展的保障, 而水资源紧缺现已成为世界各国关注的焦点之一。世界上有 13 个严重缺水国家, 我国是其中之一。我国北方缺水地区(包括华北、西北地区 15 个省市区)总面积达 420 万 km², 约占全国国土面积的 43.7%, 是国民经济建设的战略要地^[1], 而

这些地区水资源人均占有量仅为世界人均水平的 1/20, 接近联合国界定的极端缺水标准(小于 500 m³)^[2], 与此同时, 随着人口剧增和经济高速发展, 城市用水量却在不断增加, 水资源的供求矛盾已成为制约我国北方城市发展的瓶颈。缺水同时引发一系列城市生态环境问题, 夏季热岛效应和扬尘天

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX1-YW-08)

作者简介: 王情(1983—)女, 湖南益阳人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境信息及城市生态需水。E-mail: wangq.08b@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 张广录, 男, 研究员。E-mail: glzhang@sjziam.ac.cn

气增多,地下水超采引发地面沉降、海水入侵等等。解决缺水问题的途径如城市节水、污水回收利用、海水淡化等措施已有不少研究和应用,但由于成本高等原因影响推广。国家正投巨资修建的南水北调工程,可以有效缓解中国北方城市的水资源供需矛盾,但是调水毕竟有限,供水范围也有限,改变不了北方地区人均水资源紧缺的根本格局,而且耗资巨大,存在生态、地质等隐患。雨水作为当地的一种宝贵资源,可以作为解决城市水资源危机的开源途径之一,雨水收集利用即变废为宝,在水资源日趋紧张的今天,越来越受到重视。

1 国内外城市雨水利用概况

城市雨水利用在发达国家已逐步进入到标准化和产业化阶段。早在20世纪60年代,日本就开始收集和利用路面雨水,70年代修筑了集流面收集雨水,并开始研究雨水回灌地下水技术^[3],目前东京已经建成直径为10~12.5m的地下“河道”2km,计划建设30km,以贮存雨水^[4]。德国利用1000m²屋面雨水作为主要的冲洗水源,为公共汽车洗车已达10d^[5]。目前,德国的雨水利用技术已经进入“第三代”,雨水利用在完善的技术标准指导下广泛应用于各个领域,为城市水的可持续利用提供保障^[6]。丹麦每年能从居民屋顶收集645万m³的雨水,占居民冲洗厕所和洗衣服实际用水量的68%,相当于居民总用水量的22%^[7]。美国芝加哥城也兴建了地下隧道蓄水系统,用以解决城市防洪和雨水利用问题。美国一些地方政府还减免了雨水收集利用设备的相关税收,同时为安装雨水收集利用设施的家庭提供高达450美元的经费支持^[8]。瑞典、荷兰、德国、澳大利亚、伊朗等国,都在实施用雨水进行地下水人工补给。荷兰从20世纪50年代起,就在沿海一些城市开展了大规模的雨水人工补给地下水工程,到1990年,地下水人工补给量达到了1.8亿m³/d^[9]。非洲的索马里在集水面上铺设塑料薄膜、沥青纸、金属板等,集水效果很好。英国的“蓄水地面”和伦敦世纪圆顶雨水利用系统等等,都是城市雨水利用的成功典范^[10-11]。

我国城市雨水利用研究始于20世纪90年代,较有标志意义的事件是1996年在兰州召开的第一届全国雨水利用学术讨论会^[12],这期间西北地区雨水利用发展迅猛,取得了很好的效益,其中甘肃开展的“121”工程、“雨水集流节灌”工程、陕西省的“甘露”工程、宁夏南部的“窑窖农业”是雨水利用的代表和典型^[13]。城市雨水利用较早的典型范例有山东的长岛县、大连的獐子岛和浙江省舟山市葫芦岛等

雨水集流利用工程^[14]。近年来,大中城市的雨水利用发展较快,北京、天津、青岛、大连、南京、哈尔滨、西安、郑州等许多城市也结合自身的具体情况陆续开展了雨水利用的研究和应用。2000年,北京市水利局和德国埃森大学的示范小区雨水利用合作项目开始启动,同年正式启动“城区雨洪控制与利用示范工程”^[14];与此同时,北京市政设计院开始立项编制雨水利用设计指南。此后,北京市又陆续出台了一系列标准和规定,规范和强调雨水资源的收集利用。同年,上海等城市也出现了具有雨水利用功能的生态住宅和小区。2003年7月,天津建成节水型水利科技大厦,大厦的雨水可作为市政第二水源^[15]。2006年《深圳雨洪资源利用规划研究》通过专家评审,规划至2020年时深圳新增雨洪资源利用量将达4.9亿m³,城区雨洪可利用量为0.85亿m³^[16]。总的来说,我国的城市雨水利用在技术研究、应用推广和政策制定上已取得不少进展,但同发达国家相比仍属落后,缺乏系统性,需要更多的关注和深入研究,在应用中尚需不断完善。

2 城市雨水资源利用的必要性和可行性

2.1 必要性分析

随着城市的发展,许多城市一方面水资源严重不足,另一方面大量的雨水被直接排走,白白流失,甚至造成洪灾,雨水的利用率不到10%^[17],浪费和短缺共存。如果将城区汛期雨洪水量收集蓄积起来,在需要的时候加以利用,其效益将十分明显:一是可以减轻水资源短缺的压力,提高水资源利用效率;二是可以改善区域生态环境,减轻城市防洪排水系统压力;三是可以补充地下水,缓减地面沉降,改善地下水环境;四是有利于维持河川水量,保持城市河湖水环境。可见,城市雨水利用,将负担转变为资源,具有重大的环境、社会和经济效益,是水资源可持续利用的有效途径。

2.2 可行性分析

雨水净化处理工艺简单、费用较低,且具有长期效益。雨水中需要去除的杂质主要是尘土、地面和大气污染物,这些杂质一般都集中在刚开始的几毫米降雨量中。因此对初期的雨水直接采用弃流处理,可以去除大部分污染物,包括较小的或者可溶性污染物^[18],初期弃流后的雨水较为清洁,简单处理即可加以利用。

每年都有雨季,雨水收集利用设施一旦投入使用,每年就能有可观的雨水资源产出,且这些雨水资源产出不受其他社会和其他人为因素影响。与污水深度处理后回收利用相比,雨水收集利用具有以下

优点:一是建设投资相对较少,二是运行和后期维护较为简单易行,三是运行费用相对较低。如北京市某雨水利用工程,雨水收集基本建设投资不到200元/m³,运行费用不足0.1元/m³。而污水深度处理工程投资则达0.14~0.25万元/m³,运行费用为0.4~0.8元/m³[19]。和污水再利用以及海水淡化利用相比较,雨水利用显然更为可行。

2.3 雨水资源化潜力计算与实例分析

我国北方大部分城市地处中温带至南温带季风气候区,每年有相当数量的降雨,但降水量在时间分布上极不均匀,华北地区城市降雨主要集中在6~9月,汛期降雨量可达全年的60%~80%,容易出现洪涝灾害,而旱期却十分干燥。因此雨水资源化潜力较大。

2.3.1 城区年均可收集雨水量计算

城区年均可收集雨量受气候条件、降雨量在不同季节的分配、雨水水质情况等自然因素以及特定地区建筑物的布局和结构等其他因素的制约。对于大多数地区,各城市年均可收集雨量估算可以采用以下公式[20]:

$$Q = \psi\alpha\beta AH \quad (1)$$

式中: Q 为规划区年平均可收集雨量, m³; ψ 为平均径流系数,可通过对各汇流单元的径流系数加权平均求得,不同下垫面条件下的径流系数见表1; α 为季节折减系数, $\alpha = \text{汛期平均降雨量} / \text{年平均降雨量}$; β 为初期弃流系数, $\beta = 1 - \text{初期雨量} \times \text{年平均降雨次数} / \text{年平均降雨量}$,初期雨水污质含量较高,完全排走,同时用以维持河道和下水道污染物冲释需水; A 为集雨面积, m²; H 为年平均降雨量, m。

表1 不同下垫面条件下的径流系数[21]

地面类型	径流系数
各种屋面、混凝土和沥青地面	0.90
大块石铺砌路面和沥青表面处理的碎石路面	0.60
级配碎石路面	0.45
土砌砖石和碎石路面	0.40
非铺砌土路面	0.30
公园和绿地	0.15

结合几个典型的中国北方城市的相关资料,利用公式(1)计算各城市雨水资源化潜力(表2)。计算中,集雨面积 A 约等于城市不透水面积,计算时采用的公式为: $A = \text{建成区面积} \times (1 - \text{绿地率} - \text{水面覆盖率})$;平均径流系数 ψ 可计为城市各类不透水面的径流系数加权平均,本文计算中将其简化,因为表中列举的各城市,建成区不透水面绝大部分是各种屋面、混凝土和沥青地面,因此可以根据实际情况的细小差别估算为0.8~0.9之间;季节折减系数 α 是根据各个城市平均每年汛期降雨量总和和年均

降雨量的比值求得;初期弃流系数 β ,由于城市雨水利用技术大同小异,因此可以统一采用车武[20]等人在计算北京的雨水资源收集利用方案中的值0.87。由表2可见各城市每年都有可观的可收集雨水资源,而目前开发利用率尚低,开发潜力巨大。收集得到的雨水用于城市绿化、洗车、冲厕等,可以节省大量的自来水,这对我国北方缺水城市来说,能带来重大的资源效益和经济效益。

表2 几个中国北方城市的年均雨水资源化潜力

城市	建成区面积 A_0/km^2	不透水地面比率	平均径流系数 ψ	季节折减系数 α	初期弃流系数 β	集雨面积 A/km^2	年平均降雨量 H/m	可收集雨量 $Q/\text{亿 m}^3$
北京	770.0	0.575	0.85	0.85	0.87	442.75	0.595	1.6559
天津	460.0	0.650	0.80	0.80	0.87	299.00	0.575	0.9573
西安	247.6	0.630	0.85	0.70	0.87	155.99	0.589	0.4756
太原	177.0	0.639	0.80	0.80	0.87	113.10	0.500	0.3149
郑州	187.7	0.652	0.90	0.82	0.87	122.38	0.641	0.5037
石家庄	155.1	0.645	0.90	0.75	0.87	100.04	0.552	0.3243
济南	185.0	0.604	0.90	0.65	0.87	111.74	0.646	0.3674

注:表中各项系数源自《中国城市统计年鉴2005》和文献[22-28]以及个别网上收集的资料,其中,济南市季节折减系数较小,因为其降雨量年内分配较均匀,产流较少的小型降雨较多。

2.3.2 强降雨资源化潜力分析实例

以石家庄为例,利用2007年6月29~30日石家庄市的一次强降雨资料(表3),进行单次强降雨资源化分析。结果显示,石家庄地区一次强降雨中能收集的雨水资源就达3000万m³,而目前中国人均水资源占有量仅为2300m³。这一次强降雨所能收集的水量就相当于1万多人所占有的水资源。如果缺水城市都能利用科技手段,将每年的暴雨资源化,那可获得的水资源量是相当可观的。

表3 石家庄市单次强降雨资源化分析结果[29]

地点	降雨量/m	平均径流系数	初期弃流系数	集雨面积/ km ²	可收集雨量/亿 m ³
市区	0.06	0.9	0.87	108	0.05074
各县城	0.12	0.6	0.87	456	0.28564

3 雨水资源利用方法

城市雨水的利用涉及许多问题,包括城市雨水资源的科学管理和有效分配、污染防控、雨水作为环境用水等杂用水源的直接收集利用、使用各种渗透设施将雨水回灌地下的间接利用、城市生活小区水网系统的合理设计及其生态环境建设等方面。

3.1 收集雨水的方法

a. 地下储雨。城市地表大多为水泥、沥青等不透水地面,雨水无法下渗。可以在建筑物附近地面采用“可蓄水地面”,或利用人行道、车道、停车场等,加以改造,从而贮存、滞留雨水。Miklas Scholz[30]等人曾设计出集雨面积大致为100m²,底面积4.95m²,

周长 10m 的蓄水容器,计算了不同规模的降雨所能收集的雨水量(表 4),设计小区储雨设施时,可以借鉴其研究成果。

表 4 不同降雨所需的存储容积深度计算^[29-30]

降雨持续 时长/min	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	最大可收集 雨量(深度)/m
10	67.3	0.154
15	54.6	0.184
30	37.2	0.213
60	24.8	0.210
120	16.1	0.142

对于汛期较长雨水资源较为丰富的城市,可以在市郊或市区地势较低且负重较轻的部位,修筑较大规模的地下储水隧道或储水池(日本有类似建设,有较好的储雨减洪效果),以存城区储暴雨时小型储雨设备接纳不了的雨水,不过这一方法工程较大,成本较高。

b. 地上储雨。可以在居民小区建筑物的雨落管下端放置小型储雨容器或开设集雨坑,用于收集屋顶雨水,所得雨水可用于庭院洒水、浇灌花草,以节约自来水。这一方法适合一般居民楼、平房或四合院采用^[27]。

c. 坑塘、沟渠、河道储雨。汛期城市及市郊雨水产流量大,上述城区小规模集雨设施可能满足不了要求,而且郊区面积大,雨洪资源更为丰富。城区周边地势低洼、水量少或已经干涸的坑塘、河道、沟渠,可以设计成储雨池蓄水,其蓄水量是相当可观的。例如,河北省 1996 年发生的著名“96·8”洪水,8 月仅海河南系共产生 100.54 亿 m³ 水量,达南水北调近期工程预计调水总量的一半,其中仅入海量就达 34.88 亿 m³^[31],如果能采取相应措施,把这些入海水量疏导入干涸的洼淀和河道储存起来,到旱期再加以利用,则能大大减轻干旱季节的用水压力,或者,可以用其回灌补充地下水,使地下水位下降严重的地区水位得以回升。

3.2 引导雨水回渗地下

a. 透水地面渗透和渗水井渗透。目前城市硬化人行道多采用不透水混凝土垫底,这使雨水不能下渗。可以改用沙垫层铺底,以增加路面的雨水下渗量。例如中国国家体育馆鸟巢周边的地面就是采用石块和粗砂铺垫,下雨时雨水可以随着石块和粗砂的缝隙渗入地下,补充城市浅层地下水。降雨量较大时,也可把雨水管引入专门的渗水井渗入地下。

b. 利用草坪渗透。城市绿地、草坪是消纳雨水、增加入渗的理想场所。然而目前大多数城市绿化灌木带和草坪都用高于地面的路缘和硬化地面隔绝,使得路面的雨水从下水道排走,而不能进入草坪被吸

纳。因此,新建设规划时,绿地可以做成下凹式,与道路和广场地面相通,以汇集承接周围地面来水。

3.3 雨水资源利用实例简介

北京奥运会主会场——国家体育场的鸟巢,也修建了雨水利用系统,该系统利用设置在鸟巢钢结构屋面和地面草坪等处的上千个雨水收集口将雨水收集起来,进入地下蓄水池,这些雨水经净化,可用在跑道、道路的清洗、冲洗厕所和园林浇灌等方面。该系统年处理雨水能力 5 万 m³,据统计,该区可利用降雨量占年降雨量的 77%^[32]。又如,北京市海淀区双紫园小区建的容积为 850 m³ 的地下储雨池以及 1120 m³ 的透水地面,具有去除初雨、过滤、沉淀、收集和输送雨水等功能。仅在 2004 年 7 月 10 日暴雨期间就蓄住雨水 500 m³,这些雨水用于水景喷泉、洗车和浇灌花草等,改善环境效果显著,并且避免了小区内积水,起到了控制雨洪的作用^[33]。

4 结 语

目前我国大部分城市对雨水利用的普及程度还远远不够,其制约因素主要有:①集雨措施需要进一步研究改进,诸如高效低价集雨表面材料的研制,雨水回灌地下水技术,蓄水设施的安置、雨水高效利用模式的研究等^[28]。此外,许多城区已有的地下通讯光缆、电、热、气、污排等管网分布庞杂,雨水利用系统的修建施工需要避开这些管网,很难一蹴而就。②政府和公众对雨水利用的认识较为缺乏,对公众的节水教育不够,财政扶持力度不够。由于城市雨水利用初期投资较大,回收期较长,政府在对雨水利用工程项目上给予的财政资助较少,给雨水利用的推动和发展带来难度。因此政府应给出相应的优惠政策,要求房地产商在开发建设中引入雨水利用工程,以促进雨水利用的普及实施;同时,需要通过宣传、教育、奖励等手段,提高人们对雨水资源的认识,引导公众自觉参与这项工作。③缺乏相关法律和政策,缺少完善的法律法规保障体系,如雨水资源权责划分还没有一个明确的政策规定出台^[29]。④城市规划部门的不重视,在城市规划设计时,由于种种原因,很多情况下并未真正考虑到雨水利用设施的修建,使得在很多地方雨水利用理论上虽已经成熟,但实际上很难真正大规模实施。

在水资源等各种资源日益匮乏的今天,在地球自然生态环境日益恶化的今天,节能减排、节约各种资源已经成为国家乃至世界发展的重要任务。而城市雨水资源的收集利用和综合治理正顺应了这一要务,符合当代可持续发展理念,具有巨大发展潜力。对于水资源匮乏的中国北方城市,雨水利用亟待更

多的关注,许多问题也亟待深入研究,使雨水利用逐步形成像污水回收再利用一样的水工业的一个分支领域和市场,具有广阔的发展空间。

参考文献:

[1] 刘永进. 南水北调工程对受水区影响浅议[J]. 江苏水利, 2002(9): 28-29.

[2] 莫道清水流不断——写在世界水日之际[EB/OL]. [2007-03-21]. <http://www.chinacitywater.org/rdzt/shjshr/11690.shtml>.

[3] ZAIZCN M, TCLRAKAWA Y, MATSUMOTO H, et al. The collection of rainwater from dome stadiums in Japar[J]. Urban Water, 1999(1): 355-359.

[4] 王紫雯, 张向荣. 国外城市雨水利用技术现状简介[J]. 给水排水技术动态, 2004(4): 44-46.

[5] 王铁铭, 杜义. 城市雨水的综合利用[J]. 黑龙江环境通报, 2005, 29(2): 91-92.

[6] GANTNER K. Nachhahigkeit urbaner Regenwasserbe. Wrlschaftungsmethoden-Teil 1: Grundlagen[J]. GWF Wasser und Abwasser, 2003, 144(3): 240-247.

[7] 发达国家如何利用城市雨水[J]. 给水排水动态, 2005(5): 37.

[8] 美国 鼓励雨水收集利用[EB/OL]. [2006-9-21]. <http://www.hwcc.com.cn/nsbd/NewsDisplay.asp?id=157505>.

[9] 汤喜春. 雨洪资源利用的必要性及其措施探讨[J]. 湖南水利水电, 2005(5): 71-73.

[10] ANAYA M G, TOVAR J S. Different soil treatments for harvesting water for radish production in the Mexico valley [M]. Pro Water Harvesting Symp Phonemis AZ ARS W-22USDA, 1975: 315-320.

[11] SHIZUO Shindo. Rainfall harvesting in Volcanic Islands of Japan-Case studies of the Izu Island[C]//Proceeding of International Symposium & 2nd Chinese National Conference on Rainwater Utilization. Xuzhou, Jiangsu Province, China, 1998: 131-133.

[12] 王永磊, 姜小平, 王德民, 等. 我国城市雨水利用技术及对策[J]. 山东建筑工程学院学报, 2006, 21(2): 151-153.

[13] 刘昌明. 全国首届雨水利用学术会议暨东亚地区国际研讨会论文集[C]. 兰州: 甘肃水利水电出版社, 1998: 1-7.

[14] 杜玉柱, 菅瑞卿. 吕梁市雨水利用的潜力分析及发展对策[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2006, 18(3): 7-8.

[15] 城市雨水利用五大优势[EB/OL]. [2004-05-17]. http://www.waterheal.com/ns_detail.php?nowmenuid=374&id=1041.

[16] 深圳将利用雨洪资源增加蓄水量, 摆脱水资源短缺[EB/OL]. [2006-03-12]. <http://www.sina.com.cn>.

[17] 张韬, 晓睿. 将城市雨水利用提高到水资源保护与开发的战略高度之我见[J]. 内蒙古水利, 2005(1): 83-83.

[18] 廖日红, 顾斌杰, 丁跃元, 等. 城市雨水处理工艺与技术[J]. 水环境, 2006(4): 46-48.

[19] 王国平, 庄敏. 城市雨水利用途径及措施的探讨[J]. 能源技术与管理, 2005(1): 66-67.

[20] 曹秀芹, 车武. 城市屋面雨水收集利用系统方案设计分析[J]. 给水排水, 2002, 28(1): 13-15.

[21] 孙慧修. 排水工程·上册[K]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

[22] 宋进喜, 李怀恩, 王伯铎, 等. 西安市雨水资源化及其利用的探索[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 102-105.

[23] 奕永庆. 雨水利用的历史现状和前景[J]. 中国农村水利水电, 2004(9): 48-50.

[24] 赵建兰, 王立红. 济南市南部山区生态环境分析及对策[J]. 太原师范学院学报: 自然科学版, 2005, 4(3): 88-91.

[25] 敖登花. 浅谈城市雨水资源利用[J]. 内蒙古科技与经济, 2004, 21: 66-66.

[26] 张志华. 城市化对水文特性的影响[J]. 城市道桥与防洪, 2000(2): 28-30.

[27] 黄群贤, 刘红梅, 李海燕, 等. 石家庄市多年降水分析及雨水利用研究[J]. 河北科技大学学报, 2006(4): 332-336.

[28] 宋进喜, 李怀恩, 等. 城市雨水资源化及其生态环境效应[J]. 生态学杂志, 2003, 22(2): 32-35.

[29] 王情, 王晓磊, 张广录. 石家庄市雨水资源利用的必要性和潜力探讨[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(1): 306-308.

[30] MIKLAS Scholz. Case study: design, operation, maintenance and water quality management of sustainable storm water ponds for roof runoff[J]. Bioresource Technology, 2004, 95: 269-279.

[31] 刘惠霞. 河北省中南部“96·8”暴雨洪水特性分析[J]. 水文, 2000, 20(5): 62-65.

[32] 鸟巢安装雨洪系统——收集雨水净化后再利用[EB/OL]. [2007-5-28]. <http://www.zbeijing.com/zContent/?id=8829>.

[33] 魏永安. 城市节水与雨水利用初探[J]. 甘肃水利水电技术, 2006, 42(2): 110-113.

(收稿日期: 2007-11-15 编辑: 马敏峰)

