

雨水干管污染物输送规律研究

车 伍¹ 刘翠云¹ 陈和平² 李俊奇¹ 余 苹¹

(1 北京建筑工程学院城市建设系,北京 100044; 2 深圳市进出口检验检疫局,深圳 518000)

摘要 根据城市汇水面源头污染物的径流冲刷规律,进一步从理论上推导分析了降雨径流通过任意多个雨水口汇入雨水干管后的污染物输送数学模型及规律,并结合现场取样分析数据对输送规律进行了验证,分析了部分实测数据与理论模型存在一定偏差的原因。基本掌握了城市雨水管系中污染物的输送规律,为进一步研究有效的控制措施提供了理论和试验依据。

关键词 雨水干管 径流污染物 数学模型 输送规律

Research on pollutant transportation of storm water sewer

Che Wu¹, Liu Cui-yun¹, Chen He-ping², Li Jun-qi¹, Yu Ping¹

(1. Department of Urban Construction and Engineering, Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Shenzhen Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Based on flush model of runoff on urban non-point pollutants, it is deduced a mathematical model, which explains the regularity of contaminants transportation in storm-water sewer, and demonstrated the model by monitoring site samples. Reasons of a little difference between the model and some test results are analyzed. General regularity of contaminants transportation in urban storm-water sewer is basically mastered. It provides a theoretical and practical basis for developing effective control measures.

Keywords: Storm-water sewer; Runoff contaminants; Mathematical model; Transportation regularity

0 前言

城镇排水系统采用雨、污分流排水体制的一个重要目的就是为避免采用合流排水体制时,雨季的合流污水溢流污染水体,这是我国许多城市水污染控制的一项重要的重要举措。从理论上讲,分流制排水系统可以让污水通过污水管网完全进入处理厂而不受雨水的影响,从而减少合流制雨季溢流的污染,有利于污水处理厂的稳定运行。雨水也不会被城市污水污染,而是沿雨水排洪系统进入城市水体。我国许多新建城市或城区,如深圳、上海浦东都采用了分流制排水系统,许多城市也有将旧的合流制管道系统逐步改造成分流制的规划设想。

但事实证明,城市雨水也有相当程度的污染,尤

其是初期雨水,COD含量甚至高达2 000 mg/L以上,大大超过城市生活污水的浓度,其他一些污染指标也可达到较高的污染浓度^[1]。即城市雨水直接排入接纳水体,同样会造成水体的严重污染。因此,一些发达国家近二十年来把城市雨水污染控制放到十分重要的地位^[1~4]。城市雨水径流污染控制对北京、上海等大城市或现代化程度较高的城市,以及一些重要水体已显得越来越重要。

作者曾对城市汇水面源头污染物的径流冲刷规律及相应的源头污染控制进行了研究分析^[1,5~7]。但对城市雨水污染仅依靠源头控制远远不够,尤其对已建城区和现有排水系统,需要从源头、输送中途和终端采取各种控制措施才可能奏效。因此,有必

要对雨水干管中的污染物输送规律进行研究,以制定有效的中途或终端污染控制策略和技术措施。

1 理论分析

1.1 建立数学模型

从城市汇水面源头污染物的径流冲刷规律得知^[5],在每个雨水口处的源头冲刷规律一般符合:

$$C_t = C_0 e^{-kt} \quad (1)$$

式中 C_0 ——初始径流中的污染物浓度,mg/L;

C_t ——径流过程中 t 时刻的污染物浓度,mg/L;

k ——综合冲刷系数(经验值),表征降雨强度、汇水面性质和污染物性状等综合影响因素, min^{-1} ;

t ——降雨历时,min。

为建立雨水干管污染物输送规律的数学模型,对雨水管做以下假设:

(1) 管系有 n 个雨水口,每个雨水口的雨水流到干管任意断面的时间分别为 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$,且数值各不相等,可以认为 $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ (见图 1)。

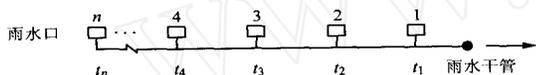


图 1 雨水干管假定模型

(2) 每个雨水口的雨水地面集流时间相等,均为 T 。

(3) 雨水流量按雨水管道系统合理化公式计算:

$$Q = qF$$

式中 q ——径流系数;

F ——汇水面积, 10^4 m^2 ;

q ——设计暴雨强度, $\text{L}/(\text{s} \cdot 10^4 \text{ m}^2)$,一般表达式为:

$$q = \frac{167 A_1 (1 + C \lg P)}{(t + b)^n} \quad (2)$$

(4) 每个雨水口的初始径流浓度和汇水面积相同,分别为 C_0 和 A 。

在某时刻 t ,雨水从雨水口 i 流到干管任意断面对应的是历时为 $t - t_i$ 时的径流,即对于雨水口 i ,它流到干管任意断面的浓度(C_i)及流量(Q_i)为:

$$C_i = C_0 e^{-k(t-t_i)}$$

$$Q_i = F K_i \frac{167 A_1 (1 + C \lg P)}{(t + b - t_i)^n}$$

式中 当 $(t - t_i) < T$ (T 为雨水口的雨水地面集水时间,min)时, $K_i = (t - t_i) / T$,

当 $(t - t_i) \geq T$ 时, $K_i = 1$ 。

根据物料平衡原理,得到任一时刻 t 时,干管任意断面的 C_t 为:

$$C_t = \frac{C_{t_1} Q_{t_1} + C_{t_2} Q_{t_2} + \dots + C_{t_i} Q_{t_i}}{(Q_{t_1} + Q_{t_2} + \dots + Q_{t_i})}$$

当 $t_i < t < t_{i+1}$ 时, $i = 1, 2, \dots, n$;

$$C_t = \frac{C_{t_1} Q_{t_1} + C_{t_2} Q_{t_2} + \dots + C_{t_n} Q_{t_n}}{(Q_{t_1} + Q_{t_2} + \dots + Q_{t_n})}$$

当 $t \geq t_n$ 时。

整理得:

$$C_t = C_0 \left[e^{-k(t-t_1)} (t + b - t_1)^{-n} K_1 + \dots + e^{-k(t-t_i)} (t + b - t_i)^{-n} K_i \right] / \left[(t + b - t_1)^{-n} K_1 + \dots + (t + b - t_i)^{-n} K_i \right]$$

当 $t_i < t < t_{i+1}$ 时;

$$C_t = C_0 \frac{e^{-k(t-t_i)} (t + b - t_i)^{-n} K_i}{(t + b - t_i)^{-n} K_i}$$

当 $t \geq t_n$ 时。 (3)

以北京为例,暴雨强度公式中 $b = 8, n = 0.711$,代入上式,得到在任一时刻 t 时干管任意断面的 C_t 为:

$$C_t = C_0 \left[e^{-k(t-t_1)} (t + 8 - t_1)^{-0.711} K_1 + \dots + e^{-k(t-t_i)} (t + 8 - t_i)^{-0.711} K_i \right] / \left[(t + 8 - t_1)^{-0.711} K_1 + \dots + (t + 8 - t_i)^{-0.711} K_i \right]$$

当 $t_i < t < t_{i+1}$ 时;

$$C_t = C_0 \frac{e^{-k(t-t_i)} (t + 8 - t_i)^{-0.711} K_i}{(t + 8 - t_i)^{-0.711} K_i}$$

当 $t \geq t_n$ 时。 (4)

1.2 分析

1.2.1 一般输送规律

以北京为例,用 VB 语言对该数学模型编程,代

入如下假设条件:重现期 $P=0.2 a$,综合冲刷系数 k 取 $0.03^{[2]}$,各雨水口的雨水地面集水时间 $T=6 \text{ min}$,COD 初始浓度 $C_0=2\ 000 \text{ mg/L}$,第一个雨水口到干管某断面的时间 $t_1=2 \text{ min}$ 。可得出雨水口数目 n 分别为 5,20,40 的 COD~ t 曲线见图 2。当管系中的雨水口为枝状分布或有更多的雨水口时,也可得到类似的变化规律。

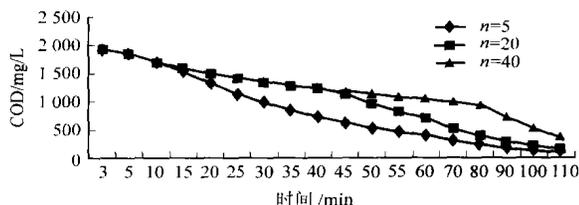


图2 雨水干管中污染物浓度变化

图2反映了在其他条件相同时,雨水口数目变化时,雨水干管中污染物浓度随时间的变化趋势。

图2中从上至下三条曲线在初期一致,随着时间的延长出现偏差。从图2可知,雨水口数目越多(管系越大),污染物浓度下降的速率越小。但无论雨水口数目如何,雨水干管中污染物浓度随降雨时间的延长呈下降趋势,并且,当雨水口数目足够小时(例如, $n=5$),整条曲线平滑下降,与一个雨水口处的源头污染物冲刷规律基本一致。

1.2.2 受随机因素影响时输送规律的变化

上述规律是在各雨水口初始浓度 C_0 相同,且降雨强度逐渐减小时得出的一般输送规律。但考虑到由于地面污染条件的不同,各雨水口处的 C_0 可能不同,或者由于管道内沉积的污染物和降雨强度等随机变化时,输送规律可能有所不同。这里以 C_0 发生变化为例。

假定雨水口数目 $n=5$ 时,前2个雨水口的初始浓度 $C_0=2\ 000 \text{ mg/L}$,后3个雨水口 $C_0=3\ 000 \text{ mg/L}$ 。 $n=20$ 时,前9个雨水口的初始浓度 $C_0=$

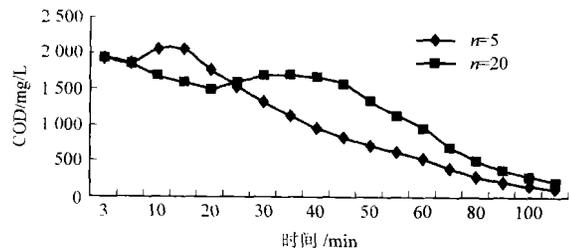


图3 初始浓度不同时雨水干管中污染物浓度变化

$2\ 000 \text{ mg/L}$,后11个雨水口 $C_0=3\ 000 \text{ mg/L}$ 。其余参数均与图2相同,可得到图3所示雨水干管污染物浓度变化曲线。

从图3可看出,当各雨水口初始浓度不同时,污染物浓度变化曲线不是平滑地下降,而出现了上下波动,在某些时刻会出现新的峰值。显然,峰值的出现时间和大小与各雨水口的浓度分布有关。但总的趋势仍然是逐渐下降的,而且由于新的峰值的出现,下降曲线已看不出明显的拐点。

同理,降雨强度的随机变化也会导致曲线的波动,而与一般输送规律有所不同。

以上只是对假定条件下的分析,由于实际情况下许多复杂的影响因素,与数学模型的假设条件不完全符合,曲线或输送规律会发生不同的变化,具体情况会比较复杂,需要进一步探讨。

2 试验研究

下面通过试验研究来分析验证数学模型描述的实际输送规律。

2.1 取样点和取样方法

取样地点1:在北京城区某街道选定一处检查井并作为取样地点,该检查井为小区和街道雨水管汇入雨水干管处。具体取的是来自某居民小区雨水干管(直径400 mm)的雨水,包含了该小区各个雨水口的雨水。

取样地点2:小月河某雨水干管总出口,直径为1 000 mm。

降雨时,从径流开始时取样。取样的时间间隔视降雨强度、管道内流量大小而定。一般,降雨强度小,管道内流速慢时,间隔时间长;反之,降雨强度大,管道内流速快时,则间隔时间小。尽可能使水样能反映出整个输送过程的规律。

把已接水样按顺序放置,观察颜色、浑浊度,当后期水样浓度已很低,颜色、浑浊度相接近,已无大的变化,则可以停止取样。

对所取水样测定 COD, TN, TP, 浊度等指标。

2.2 试验结果分析

2.2.1 一般规律

经过2003年8场次降雨过程水样的结果分析,发现雨水干管污染物浓度的变化规律主要表现为:污染物浓度随时间变化在总体上呈下降趋势,这与

模型所示规律相符合。但有时,污染物浓度在下降的过程中会上下波动,随着降雨的持续,浓度逐渐降低,最后趋于平缓。

下面结合几次典型的试验数据来分析。

图4所示为2003年8月5日雨水干管COD、浊度、TP变化曲线。这场雨降雨历时短(48 min),但降雨强度大(平均降雨强度0.12 mm/min),雨水干管在降雨9 min后出现水流。从图中可看出,COD、浊度和TP的变化从总体上呈下降趋势,较好地符合了数学模型描述的冲刷规律。初期COD、浊度、TP均明显下降,随后出现两次波动。随着降雨的持续,浓度趋于平缓。这与实际情况中各雨水口初始浓度不同和降雨强度的变化均有关,与理论分析的图3所示规律类似。

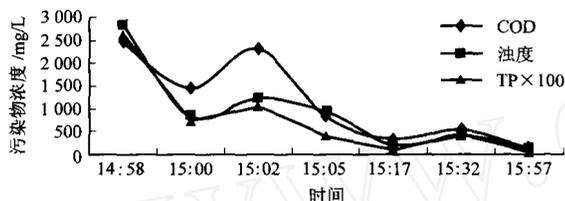


图4 实际雨水干管COD、浊度、TP变化曲线(8月5日)

图5所示为2003年7月27日雨水干管COD、浊度变化曲线。降雨从上午11:20开始,在11:55左右雨水干管出现水流,到下午14:20结束,在整个降雨期间,降雨强度都较小(平均为0.024 mm/min)。由于强度小,冲刷输送动力都较弱,曲线变化比较平缓。

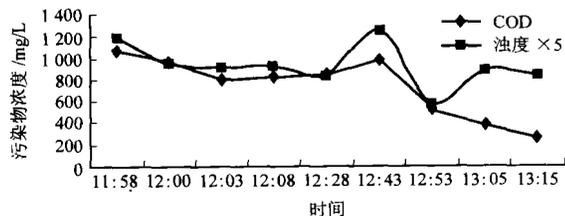


图5 雨水干管COD、浊度变化曲线(7月27日)

初期径流COD为1069 mg/L,然后缓慢下降,在降雨开始后的45 min时(12:43)COD出现一个波峰,为982 mg/L。峰值后继续呈下降趋势,最终达到250 mg/L左右。由于在此次降雨的前一天(7月26日)出现一次小强度降雨(降雨量为3.1 mm),因此这一次降雨的COD的初始值和峰值都不是很大。浊度的变化也基本有同样的趋势,初期值为

239 NTU,随后下降,在12:43时出现一个波峰,为250 NTU,然后在小幅度波动中持续下降。也较好地符合理论分析曲线图3所描述的输送规律。

图6为2003年9月22日小月河雨水干管COD、浊度、TN、TP变化曲线。此次降雨历时85 min,强度大,平均为0.24 mm/min。从图中可看出COD、浊度的变化呈明显下降趋势,符合理论模型所示的一般规律。TP在0.9~2.7 mg/L之间,TN在9.5~40 mg/L之间,尤其是TP浓度较小,加上测定误差等随机因素,浓度变化趋势不明显。

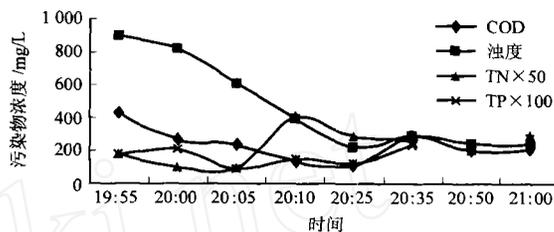


图6 小月河雨水干管COD、浊度、TN、TP变化曲线(9月22日)

从上述分析看,降雨过程中,雨水干管污染物浓度在总体上呈下降趋势。这可以作如下解释:最近的雨水口径流首先到达干管某段面,雨水中包含的是大量初期冲刷的地面有机物,且浓度就是该雨水口初期污染物浓度,随着降雨的持续,后续雨水口的径流相继到达,但都被前面雨水口的后期低浓度径流混合稀释,浓度下降,如果后续雨水口有较高的初期浓度,干管径流就会出现中后期波峰。地面和管道中的污染物随降雨进程被雨水冲刷带走,污染物浓度逐渐减小,最终趋于平缓。

实际条件下,降雨强度的变化,地面污染的不均匀性等都是各种随机影响因素。

2.2.2 影响因素

比较试验结果与理论模型会发现,虽然试验数据总的趋势基本符合理论模型,但仍存在一定偏差。

这是由于自然降雨是一个非常随机的过程,实际条件也非常复杂,都会与模型推导的假定条件不同。污染物浓度的变化与降雨强度、降雨的间隔时间、地形地貌、地质条件、地面和管道内污染物状况等都有关系。

2.2.2.1 降雨强度的影响

在取得的试验数据中,雨水干管径流污染物浓度常常出现一个或多个明显的波峰,经分析,实际降

雨强度的变化是最明显的影响因素之一。数学模型中,一场特定降雨的降雨强度随降雨历时逐渐减小,实际情况的降雨强度变化却是随机的。

图7给出8月5日不同降雨历时段对应的平均降雨强度。对比图4和图7,图4中15:02和15:32的峰值,分别与图7中14:55左右和15:25~15:30降雨强度的增大有关。

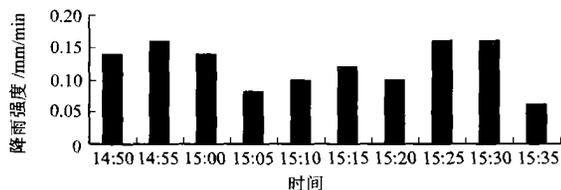


图7 8月5日降雨强度变化

图8和图9可以更明显地反映降雨强度的影响。图8为7月19日降雨后期雨水干管COD,浊度,TN,TP变化曲线,图9为相应时段的平均降雨强度。可发现图8中16:45时4项污染指标的峰值与图9中16:38时降雨强度的增大有直接关系。在降雨过程中降雨强度突然增大,使冲刷动能增大到足以将路面和管道残留的固体颗粒物质冲走,因而使浓度突然增大,出现明显波峰。并且,降雨强度的增大与波峰的出现之间有一个时间差。

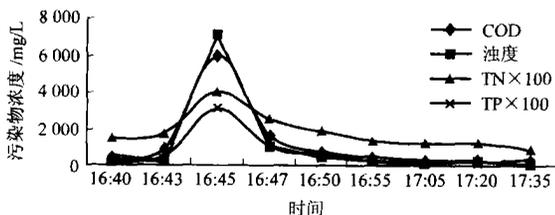


图8 7月19日雨水干管COD,浊度,TN,TP变化曲线

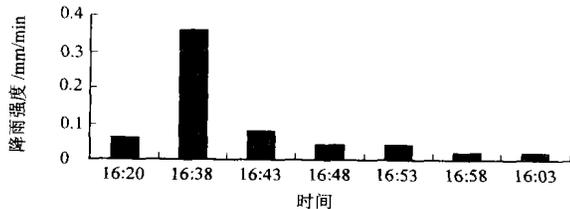


图9 7月19日降雨强度变化

2.2.2.2 雨水口初始浓度的影响

实际情形中,各个雨水口的初始浓度差别可能较大,由于各个雨水口的污染物到达雨水干管某一断面的时间前后不等。其中,污染物浓度较大的雨水口的雨水到达干管断面的时间可能不是在最初,

而是在后面某一时刻,这样可能会导致雨水干管的污染物浓度出现起伏。图4~图6中污染物浓度曲线的波动除了与降雨强度的变化有关外,还受到各雨水口初始浓度不等的影响。数学模型分析可清楚地表明这种影响(见图3)。

2.2.2.3 其他因素的影响

自然降雨是一个随机过程,影响雨水干管污染物输送规律的因素很多,其他例如各雨水口的雨水流到干管任意断面的时间 t_i 的不同、汇水面的不均匀、人类活动、试验取样误差等等。

另外值得一提的是,无论是源头冲刷分析还是干管输送规律分析,取样时,如果没有取到初期径流,就会得出完全不同的研究结论,影响对雨水径流污染物冲刷和输送规律的正确认识,这也是一些研究者得到不同研究结论的主要原因之一。

3 结论与讨论

根据试验和理论分析,可初步确定雨水干管污染物输送规律如下:

(1) 推导的数学模型从理论上证明:无论雨水口数目多少,从降雨开始,雨水干管中污染物浓度随时间变化总体呈逐渐下降趋势。当其他条件相同时,雨水口数目越大,管系越长,污染物浓度下降的速率越小。

(2) 降雨过程中,雨水干管污染物浓度在总体上呈下降趋势的规律从试验结果中也得到了很好的证明。从实践和理论两方面验证了雨水干管中污染物的输送规律。

(3) 影响雨水干管污染物输送规律的因素很多,本文从理论和试验分析了两个主要影响因素:初始浓度 C_0 和降雨强度 q 的影响。当各雨水口初始浓度 C_0 不同,或者降雨强度 q 随机变化时,污染物浓度在下降过程中会出现波动,产生新的峰值,但随着降雨的持续,浓度逐渐降低,最后趋于平缓。

根据掌握的污染物浓度变化规律,可进一步研究雨水干管径流污染物的有效控制措施,以实现高效率控制分流制排水系统干管径流排放对水体造成的污染。

参考文献

- 1 车武,刘燕,李俊奇. 国内外城市雨水水质及污染控制. 给水排水, 2003, 29(10): 38~42

加氯系统防结冰防回水改造

孙学东

(保定中法供水有限公司,保定 071000)

摘要 对于给水厂其加氯氧化消毒环节非常重要,但在北方地区,加氯系统结冰和回水现象时有发生,影响了这一环节的稳定运行。分析了问题产生的原因,并提出了改造服务水系统,改进水射器的解决方案。

关键词 加氯 水射器 结冰 回水 改造

0 概述

保定市地表水厂于2000年6月建成投产,原水通过65 km长的输水管道取自西大洋水库,取水口位于黄海高程107 m的库底,入厂水管道为两条DN1200钢制管道,入厂水温在2~17℃之间。夏秋季水质恶化,氨氮和硫化氢以及锰含量较高,水厂需要投加十几mg/L的氯气进行氧化消毒。水厂的加氯系统由加氯机、氯瓶间和预加氯、前加氯以及后加氯等三处水射器负压投加点通过地下管道构成。

预加氯的投加点设在进入厂区的管道上,超前前加氯285 m,采用WT的2可调喉管式水射器(1=2.54 cm),压力服务水就地取用流量24 m³/h,扬程40 m的水泵。单线最大投量960 kg/d。

前加氯的投加点设在配水井前的静态混合器上,同样采用WT的2可调喉管式水射器,单线最大投量675 kg/d;压力服务水是通过一条直径为

DN100的专用管道取自出厂管网,总长约470 m。起始端压力平均为0.4 MPa左右。

后加氯的投加点设在滤站至清水池的管道上,采用的是WT的1固定水射器,单线最大投量225 kg/d,压力服务水与前加氯共用。

原设计还在滤站设置了3台服务水补充泵与加氯服务水管相连, $Q=7.2$ m³/h, $H=40$ m。目的是当出厂水压力不足时向服务水管路补充水量,操作方式为现场手动。

1 问题介绍

经过水厂三年多的运行实践,发现加氯系统存在一些问题,其中最常见的是加氯水射器常常发生结冰和回水现象,严重地影响着水处理的稳定运行。

(1)在夏初秋末,前加氯2水射器在加氯量提升到450 kg/d以上时,水射器内部容易出现结冰现象,堵塞氯气通道,造成少加氯或加不上氯,而且无

- 2 Gordon England. Pollutant loading analysis for stormwater retrofitting in Melbourne beach, florida. Stormwater, 2002, 3(5): 33~38
- 3 Thomas R Decker, Qizhong "George" Guo. Site assessment for a stormwater detention basin water-quality retrofit. Stormwater, 2003, 4(3): 41~46
- 4 Darlene Snow. Sampling, monitoring, detection and analysis. Stormwater, 2003, 4(3): 36~40
- 5 W Che, Y Liu, J Q Li. Flush Model of Runoff on Urban Non-Point Source Pollutants and Analysis. Water and Environmental Management Series, Water in China. Edited by P A Wilderer, J Zhu, N Schwarzenbeck. IWA Publishing, 2003. 143~150
- 6 Che Wu, etc. The quality and major influencing factors of runoff in

beijing's urban area. 10th international Conference on Rainwater Catchment Systems. Fakt and IRCSA/ Europe. Mannheim (Germany), 2001. 13~16

- 7 Che wu, Li junqi, Liu yan, Wang wenhai. First Flush Control for Urban Rainwater Harvest Systems. 11th international Conference on Rainwater Catchment Systems. Mexico. Proceedings, August 2003. 25~29

通讯处:100044 北京展览馆路1号

电话:(010)68322407

E-mail:chewu812@sina.com

收稿日期:2004-3-1