

城市雨水管道径流污染控制小管截流方法研究

何洪昌¹, 车 伍¹, 王文海¹, 刘达克², 甘一萍², 邝 诺²

(1 北京建筑工程学院 城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044

2 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100038)

摘 要: 城市雨水管道径流直接排放对受纳水体水质有很大影响, 如何有效控制径流污染是我国城市尤其是污水处理率达到较高水平的城市(如北京、上海等)所面对的一个重大问题。在已建成城市区, 大范围源头径流控制措施的应用受到一定限制, 而其他常规径流污染控制措施, 如径流调蓄池因需要较大的空间条件和建设运行成本难以大量推广。介绍一种小管截流方法, 阐述其原理和特点, 探讨设计截流量、小管管径设计和确定方法等关键问题; 分析不同条件下小管截流方法对径流污染的控制效果以及需注意的一些问题。研究结果表明, 该方法结构简单、土建投资低和运行费用小, 具有较大的应用潜力。

关键词: 雨水管道; 径流污染; 污染控制措施; 小管截流

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2010)20-0053-06

Research on Branch Interception Method for Urban Storm Sewer Runoff Pollution Control

HE Hong-chang¹, CHE W u¹, WANG Wen-hai¹, LIU Da-ke², GAN Yi-ping²,
KUANG Nuo²

(1 Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044 China; 2 Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100038 China)

Abstract The direct discharge of urban storm sewer runoff has great effect on receiving water body quality. How to effectively control the runoff pollution is a serious problem in Chinese cities, especially cities with a high treatment rate of sewage, such as Beijing, Shanghai and so on. The wide implementation of source control measures is restricted in constructed cities, and other measures, like storage tank, are difficult to be widely applied due to need of larger space and high construction and operation costs. A branch interception method is proposed, and the principle and characteristics of the method are introduced. Several key problems such as design and determination of interception rate and branch diameter are discussed. The control efficiency of runoff pollution by the method as well as the points to which should be paid attention are analyzed. The results show that the method has a simple structure, low civil work investment and low operation cost, and it has great application potential.

Key words storm sewer; runoff pollution; pollution control measure; branch interception

基金项目: 北京市城市雨水系统与水环境生态技术学术创新团队项目 (HHR2011060124); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07314-007, 2010ZX07317-011)

小管截流 (在雨水利用系统中也称为小管弃流) 方法通过设置连接雨、污水管渠的小口径管道, 将雨水管中污染严重的小流量径流 (包括管道混接进入雨水管的污水) 截流至污水管中, 以降低雨水管道排放的污染负荷。该方法结构简单, 空间需求小, 建设、运行费用低。虽然国外一些学者针对小管截流方法进行了一些研究, 但在实际应用时, 小管与雨、污水管道之间的关系以及设计截流量和小管管径的确定方法等仍是有待解决的重要问题。针对上述问题进行分析, 旨在解决小管截流设计中的一些关键问题, 以期为城市雨水管道系统径流污染控制提供思路和参考。

1 小管截流方法概述

1.1 小管截流方法类型及其原理

小管截流方法在一定程度上改变了分流制排水系统的功能, 在该系统中雨水管输送雨水、冰雪融水的功能不变, 而污水管除输送市政污水外, 还输送来自雨水管道的部分污染径流, 从而成为一种新的“雨污合流管道”。

小管截流方法主要用于控制小雨产生的污染径流, 大雨时也可控制部分径流。根据对雨水管径流控制方式的不同, 小管截流方法可分为两种类型, 一种以控制初期径流为目的, 如力臂控制式截流方法和跌水式截流方法; 另一种为持续截流的堰式截流方法。其中, 力臂控制式与跌水式截流方法利用初期径流流速和流量较小而污染物含量较多的特点, 通过截流初期少量的径流达到一定的控制效果; 而堰式截流方法不仅能截流初期雨水, 亦能截流部分中、后期雨水径流。

① 力臂式小管截流方法

力臂式小管截流方法根据力学原理设计, 能响应径流量的变化, 通过力臂控制截流过程, 主要结构包括重力臂、活动阀和转轴等^[1]。其工作原理如图 1 所示。

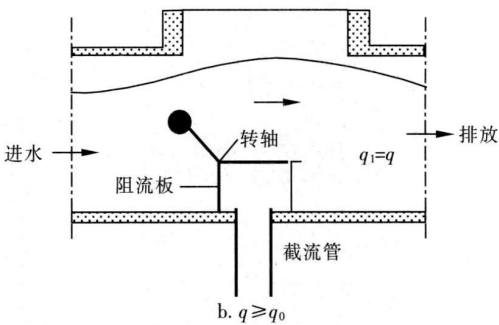
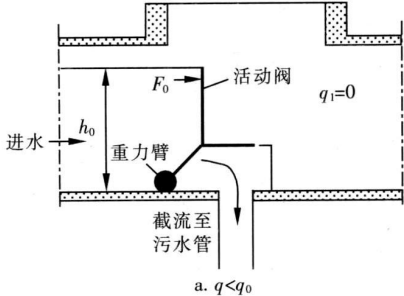


图 1 力臂控制小管截流方法示意
Fig 1 Schematic diagram of branch interception with gravity arm

在降雨初期, 雨水管的径流量 q 小于设计截流量 q_0 , 活动阀在重力臂的作用下处于竖立状态, 径流被拦截并截流至污水管; 当径流量 q 达到设计截流量 q_0 时, 径流对活动阀的压力力矩等于重力臂作用于转轴的力矩, 活动阀受力刚好处于平衡状态, 随着流量 q 的继续增大, 活动阀翻转, 阻流板落下并阻止径流进入截流管, 径流经后续雨水管排放, 当径流量随着降雨强度的变化小于 q_0 或停止时, 装置在重力的作用下自动复位, 后期的少量径流也会被截流至污水管。

② 跌水式小管截流方法

跌水式小管截流装置如图 2 所示^[2]。该方法根据雨水管内径流流速的变化控制截流过程。大雨初期 (或小雨时) 进入雨水管道的径流流速较小, 径流在重力作用下落入截流槽并被截流至污水管, 从而控制初期污染径流或小雨产生的全部径流; 随着雨强的增大, 进入雨水管的径流流量和流速增加, 径流越过截流槽并经后续雨水管排放。

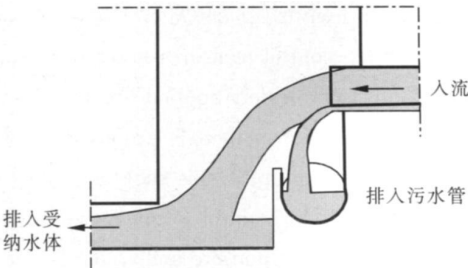


图 2 跌水式小管截流方法示意
Fig 2 Schematic diagram of cascade branch interception

③ 堰式截流方法

堰式截流方法的原理和结构更为简单, 在雨水管道适当位置 (一般可设于检查井内) 设置一个挡

水堰板(见图3)^[2],并在堰板前设置截流管。当雨水管道中径流量小于设计截流量时,径流全部被截流至污水管;当径流量超过设计截流量时,小管继续截流,同时超过的部分越过堰板经后续管渠排放。

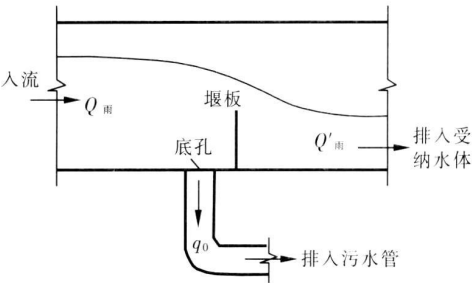


图3 堰式小管截流方法示意

Fig 3 Schematic diagram of branch interception with weir and bottom orifice

上述三种小管截流方法的截流量与雨水径流量的变化过程见图4

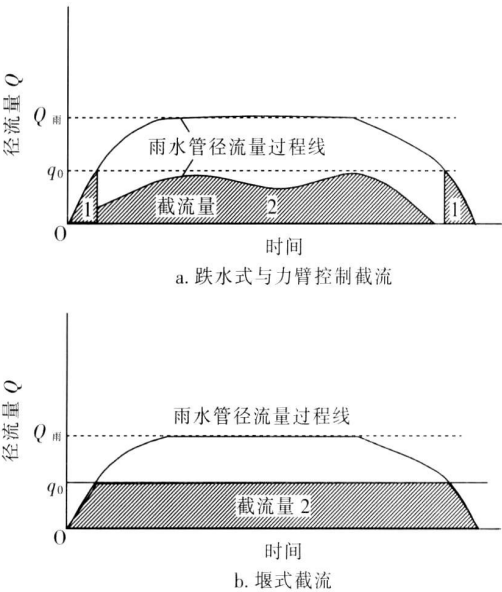


图4 小管截流方法截流量与雨水管径流量变化过程

Fig 4 Variation of branch interception quantity and runoff of storm sewer

由图4(a)可知,对于力臂控制式与跌水式小管截流方法,小雨产生的径流(阴影部分2)全部被截流至污水管;大雨产生的径流,只能将初期和后期流量不大于设计截流量 q_0 的少量径流(阴影部分1)截流至污水管。由图4(b)可知,堰式截流方法能对雨水管道的污染径流进行全程控制。显然,从截流量上堰式截流方法比力臂控制式与跌水式小管截流方法效率高。

另一方面,受所服务汇水面的卫生条件、降雨条件、管道系统布局、管道沉积物的冲刷以及雨污水管道混接等许多因素的影响,雨水管道径流污染物输送规律非常复杂,在有些条件下初期冲刷现象可能并不显著,污染物浓度峰值可能出现于中后期径流^[3~5];力臂控制式和跌水式截流方法对伴随峰流量到来的高污染径流缺乏控制能力,因而比堰式截流方法对雨水管道径流污染的控制效率更低。

此外,实际应用时还需要考虑在实际条件下流速、重力等因素对截流装置效果的影响以及装置的合理构造,这也增大了力臂控制式和跌水式截流方法的设计难度。

虽然国外学者提出小管截流概念,对小管截流方法的效果进行了分析和试验研究,但目前未见大规模应用的报道。在实际应用小管截流方法时应考虑哪些重要因素、如何确定设计截流量与小管管径以及应用时可能出现的问题等都有待明确。

1.2 小管截流方法特点分析

小管截流方法实际上形成了一种“半分流管道系统”。在这一系统中,污水管输送市政污水和来自雨水管的部分高污染径流至污水厂。此外,小管截流方法还有如下一些特点:

① 能够有效控制由雨、污水管道混接引起的雨水管非雨天排放的污水。上海有关部门对20世纪90年代建成的雨水系统的混接状况调查发现,大部分混接点位于小区内街坊管道和建筑内管道,非雨天雨水管道排放的污水流量并不大^[6]。在小区雨水管末端设置小管截流装置,可以有效截流此部分污水。

② 合理控制小雨径流量,实现对雨水管道径流污染的高效控制。以北京为例,控制重现期约为0.3年的降雨事件可控制全年86.1%的降雨径流,即使控制重现期为0.1年的降雨事件也可控制全年超过60%的降雨^[7]。由于降雨强度与重现期相关,具体应用时可按一定雨强的小雨进行设计,以实现对全年降雨一定的控制率。以上海市1998年—2000年降雨资料^[8]为例说明,统计分析结果表明,控制雨强为5.4 mm/h的降雨事件可控制全年60%的降雨量。实际应用时应收集更长年限的降雨资料进行统计分析。

③ 不需要建设调蓄或专门的径流净化设施。利用污水管道的冗余输送能力和污水厂的净化能力

来处理这部分雨水径流,不但可实现对雨水管道径流污染的控制,还能提高污水管道和污水厂的利用效率,增加污水中的碳源,亦有利于污水厂的脱氮除磷效果,节省建设和运行其他雨水控制设施的空间与费用。此外,部分雨水管道径流的瞬间进入也有利于冲洗污水管中的沉积物。

④ 堰式小管截流方法具有持续截流能力,不但能控制小雨产生的全部污染径流和中、大雨的初期径流,还能在中、大降雨径流全过程实施部分控制。

2 设计截流量及截流管径的确定

设计截流量的大小决定了对雨水管道径流污染的控制效果,是小管截流方法设计的关键参数。小管截流方法主要利用污水管的冗余输送能力,并由此决定设计截流量的上限,是设计截流量大小的限制因素。在确定设计截流量时,应先明确附近适合衔接的污水管冗余输送流量 Q_1 ;此外,还应考虑对雨水管道径流的控制效率,根据当地降雨强度与径流控制率的关系确定合理的截流量;雨污水管道的高程关系、雨水管道径流水质情况等现场条件也是需要考虑的重要因素。

2.1 污水管的冗余输送流量

我国《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)规定污水管道应按非满流设计,并规定了污水管道的最大设计充满度。因此,污水管通常存在一定的冗余输送能力,小管截流方法即短时间地利用污水管道的冗余输送能力输送截流的径流。研究表明,当管道充满度达到 0.95 时流量达到最大值 $Q_{max}^{[9]}$,根据规范设计的污水管最大设计流量 $Q_0 < Q_{max}$ 。理论上当污水达到最大设计充满度时污水管的冗余输送能力最小,为此设污水管的冗余输送能力为 Q_1 ($Q_1 = Q_{max} - Q_0$)。表 1 给出了部分管径的污水管道在不同坡度条件下的 Q_1 ,可供设计参考,亦可根据下式进行计算:

$$Q_1 = \frac{D_{\text{污}}^3}{n} \times i^{1/2} \times [f(0.95) - f(C_0)] \tag{1}$$

式中 $D_{\text{污}}$ ——污水管管径
 n ——污水管壁粗糙度
 i ——污水管水力坡度
 $f(C_0)$ ——污水管设计充满度 C_0 的函数
关于 $f(C_0)$,若 $C_0 > 0.5$ 则有:

$$f(C_0) = [\arccos(2C_0 - 1) / 4 + \sqrt{C_0 - C_0^2} \cdot$$

$$(C_0 - 0.5)]^{4/3} / [\pi - \arccos(2C_0 - 1)]^{2/3} \tag{2}$$

若 $C_0 < 0.5$ 则:

$$f(C_0) = [\arccos(1 - 2C_0) / 4 + \sqrt{C_0 - C_0^2} \cdot (0.5 - C_0)]^{4/3} / [\arccos(1 - 2C_0)]^{2/3} \tag{3}$$

表 1 不同管径污水管道最大流量、最大设计流量及冗余输送流量

Tab 1 Maximal flow, maximal design flow and redundancy transportation flow of different diameter sewers

项目	最大设计充满度 (h/D)	坡度 i	最大设计流量 Q_0 / (L·s ⁻¹)	充满度为 0.95 的流量 Q_{max} / (L·s ⁻¹)	冗余输送流量 Q_1 / (L·s ⁻¹)
DN 200	0.55	0.004	11.28	20.7	9.42
		0.005	12.61	23.14	10.49
		0.01	17.84	32.73	14.89
DN 300	0.55	0.003	28.81	52.85	24.04
		0.004	33.26	61.02	27.76
		0.005	37.19	68.22	31.03
DN 400	0.65	0.0015	56.65	80.48	23.83
		0.003	80.12	113.81	33.69
		0.005	103.43	146.93	43.50
DN 500	0.7	0.001	92.83	119.14	26.31
		0.002	131.28	168.49	37.21
		0.003	160.79	206.35	45.56
DN 700	0.7	0.001	227.70	292.23	64.53
		0.003	394.39	506.16	111.77
		0.005	509.15	653.45	144.3
DN1 000	0.75	0.001	641.98	756.49	114.51
		0.0015	786.27	926.50	140.23
		0.002	907.9	1 069.83	161.93
DN1 400	0.75	0.0005	1 113.48	1 312.08	198.60
		0.001	1 574.7	1 855.56	280.86
		0.0015	1 928.61	2 272.59	343.98

2.2 设计截流量的确定

小管截流量越大则径流污染控制效果越好,但过大的截流量会影响污水管的运行,也会减小后续污水管道的冗余输送能力,影响下游小管截流方法的应用。因此确定设计截流量除要考虑污水管的冗余输送能力外,还应考虑截流量与径流控制率的关系,合理确定设计截流量。

小管设计截流量 q_0 对应于雨水管道所服务汇水面上一定雨强的降雨事件产生的径流量 Q_0' (设 $q_0 = Q_0'$),称该雨强为设计雨强 i_0 。理论上,小于设计雨强 i_0 的降雨产生的径流可以全部被截流;大于

该雨强的降雨,超过 Q_0' 的部分流量越过截流管由雨水管继续排放。

若将一年内小管截流方法控制的径流量占全部径流量的比例称为控制率,根据当地多年降雨资料的统计分析,可以确定设计雨强和径流量控制率的统计关系(见图5)。由该曲线可确定适宜的设计雨强 i_0 ,由推理公式 $Q_e = \Psi \times i_0 \times A$ (式中 Ψ 为雨水管道汇水区的综合径流系数, A 为汇水区面积)可近似计算设计雨强 i_0 所对应的截流量 Q_e 。综合考虑污水管道的冗余输送流量 Q_1 ,即可确定小管截流方法的设计截流量 $q_0 = \min\{Q_1, Q_e\}$ 。

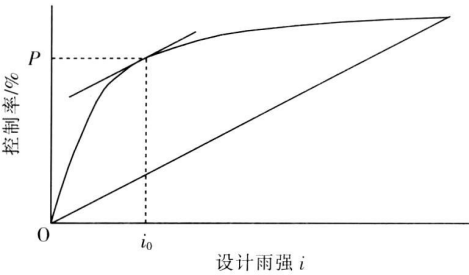


图5 降雨强度与径流控制率的关系

Fig 5 Relation between rain fall intensity and runoff control rate

需要指出的是,上述设计截流量的确定未考虑雨水管道径流水质及径流的冲刷规律等因素。如前所述,小汇水面的雨水管道径流水质通常会呈现一定的初期冲刷特性,设计截流量可根据实际条件适当减小;对于较大的管道系统,加上管道混接、管道沉积物冲刷等因素,初期冲刷现象可能不明显且径流水质较差,此时应根据条件采用较大的设计截流量。

2.3 堰式小管截流方法小管管径的合理确定

堰式小管截流方法各管道断面形式见图6。

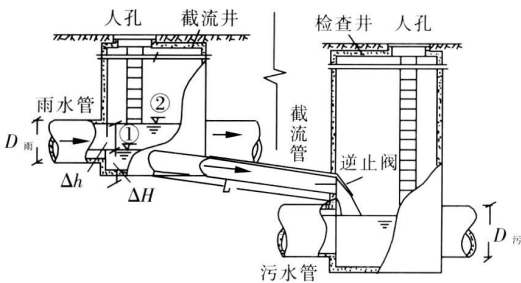


图6 小管截流方法各管道断面形式

Fig 6 Schematic diagram of sewer section for branch interception

小管截流方法主要用于控制小雨产生的径流,在这种条件下截流井中径流液面较低(见图6的液面①),径流在截流管中主要为重力流,可参考雨水管的水力计算方法,由确定的设计截流量 q_0 与截流管水力坡度等条件计算截流管管径。

但是在大雨条件下,雨水管中径流量常常超过设计截流量 q_0 ,此时截流井中径流液面可能没过截流管并在截流管内形成压力流,截流量将大于重力条件下的截流量。如果雨水管管径很大,遇到暴雨时截流井中径流水位将显著升高并产生较大的压力水头(见图6截流井中液面②及 Δh),从而使实际截流量大大增加。如果污水管的冗余输送能力较小,可能对其运行产生一定影响,因此需对截流管管径及流量进行校核。考虑到截流管的管长与管径特点,进行水力核算时应考虑局部水头损失和流速水头,以短管流水力计算方法进行校核。

另一个问题是,为防止截流管道被堵塞,当计算所得管径偏小时,可适当加大截流管的最小管径,但以不明显影响污水管正常运行为原则。此外,也可考虑在截流管入口采取滤网等防护措施。

3 问题与讨论

小管截流方法在实际应用时除需解决设计截流量的计算和截流管的管径确定方法等关键问题外,还应考虑如下几个问题:

① 截流对污水管的影响。污水管设计流量 $Q_{\text{设}}$ 是污水管设计期限终了时的最大日最大时的污水流量,实际上降雨事件与污水流量达到设计流量同时发生的概率并不大,而且降雨事件一般持续时间较短,在截流量 $\leq Q_1$ 的条件下小管截流方法一般不会影响污水管道的运行。

② 为避免污水管中的臭气进入雨水管及在不利条件下可能发生的污水倒灌,可在截流管出口设置逆止阀,在截流管不工作的状态下逆止阀封闭截流管口。

③ 如果污水管道冗余输送能力不足,在场地条件允许时,可设置一定容积的调蓄池对雨水管道径流进行调蓄,并通过小管将调蓄的径流逐渐释放至污水管道,以达到较好的径流污染的控制效果。

④ 当需要在管道沿线多处采用小管截流方法时,一方面需对各处截流装置及截流总量进行协调、合理设计,另一方面也要防止设计截流量过大而对污水厂的处理能力造成影响。应考虑雨水径流、污

水管冗余输送能力及截流条件随时间和空间的变化,合理确定污水管沿线各处的设计截流量,可借助计算机模拟方法优化雨、污水管道和污水厂系统的污染综合控制效果。

4 结语

小管截流方法实际上使分流制管道系统成为一种“半分流”状态,可以实现用少量投资减少雨水管道污染径流的直接排放负荷;同时也可以对雨水管道中混接的污水进行截流控制,对解决我国一些城市较普遍的污水混接问题较具针对性和适用性。探讨了设计截流量和小管管径的计算等问题,并对不同条件下小管截流方法的效果及潜在的问题进行了分析,但考虑到设置小管截流装置的场地实际条件的多样性以及雨水管道系统及其径流污染输送过程的复杂性,小管截流方法的实际效果和可能面临的一些其他问题还需要通过试验研究进一步验证和发现,并在实际应用中不断完善和优化。

参考文献:

- [1] Maciej M rowiec. The improved flow diverter for first flush managem ent[EB/OL]. http://documents.irevues.inist.fr/bistream/handle/2042/25425/1259_067mrowiec.pdf?sequence=1, 2007-06-28

- [2] Zaizen M, Matsumoto Y. A proposal of combined separate sewer system (CSSS)[A]. 10th International Conference on Urban Drainage[C]. Copenhagen: Environment and Resource DTU, Technical University of Denmark Section of Environment Engineering Aalborg University, 2005
- [3] 车伍,刘翠云,陈和平,等. 雨水干管污染物输送规律研究[J]. 给水排水, 2004, 30(8): 30-35
- [4] 潘国庆. 不同排水体制的污染负荷及控制措施研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2007.
- [5] 王和意,刘敏,刘巧梅,等. 城市暴雨径流初始冲刷效应和径流污染管理[J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 181-185
- [6] 朱民强,王如春. 排水管网维护中的高新技术应用[J]. 城市道桥与防洪, 2007, (5): 51-56
- [7] 潘国庆,车伍,李俊奇,等. 城镇雨水收集利用储存池优化规模的探讨[J]. 给水排水, 2008, 34(12): 42-47.
- [8] 陈嫣,张辰. 合流制排水系统溢流调蓄技术研究及应用实例分析[J]. 上海环境科学, 2006, 25(2): 63-67.
- [9] 周玉文,赵洪斌. 排水管网理论与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000

E-mail: che0812@163.com

收稿日期: 2010-05-19

(上接第 52 页)

- sewer overflow (CSO) with high speed microsand settling [A]. WEF CONFERENCE “New and Emerging Environmental Technologies and Products Conference for Wastewater Treatment and Storm Water Collection” [C]. USA: WEF, 1995
- [4] 罗启达,周克明,陈伟,等. Actiflo——一种新型高效水处理澄清工艺[J]. 净水技术, 2004, 23(1): 38-41
- [5] 龚卫俊,郑燕. Actiflo 高效沉淀工艺用于污水处理[J]. 中国给水排水, 2005, 21(10): 104-106
- [6] Sample W E, Sullivan W D. No longer under the weather - Bramerton adopts an effective combined sewer overflow control solution[J]. Pollut Eng 2002, (5): 24-27.
- [7] Keller John, Kobylinski A, Hunter G L, et al. Actiflo®: a

- year's worth of operating experience from the largest SSO System in the US [A]. Proceedings of the Water Environment Federation [C]. USA: WEFTEC, 2005.
- [8] Ponist J B, Scheiter D. Ballasted high rate clarification process removes city of Greenfield, Indiana as a CSO community [EB/OL]. http://www.knugenusa.com/eib/kryger/1/CB80vc22c0dm4663_Zuzhby.pdf 2010-03-21.

电话: (010) 59532328

E-mail: xiaohuiyou@veoliawater.com

收稿日期: 2010-05-21