

应用深层隧道储存和输送城市雨污水的思考与案例分析

张盛楠¹, 李成江², 宗绍利¹, 孟令超¹

(1. 天津大学仁爱学院 建筑工程系, 天津 301636; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

摘要: 通过建设地下深层隧道来解决城市局部洪涝及合流制溢流污染问题在我国日益受到重视。尽管深层隧道具有灵活、高效、对地表和浅层地下空间扰动小等优势,但由于其施工周期长、工程量大、投资高、运行管理维护复杂,故在对深层隧道设置方案进行决策时,必须考虑其适用条件。目前国内在此方面的研究甚少。对深层隧道适用降雨特点、地质和水文条件进行了研究,通过已建和在建工程案例分析了深层隧道适用的城市类型及地理位置,为不同城市进行隧道设置方案决策提供参考。

关键词: 深层隧道; 降雨特点; 地质水文条件; 城市类型; 地理位置

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2017)02-0013-07

Applicability Analysis of Deep Tunnels for Storing and Transporting Urban Rainwater and Sewage

ZHANG Sheng-nan¹, LI Cheng-jiang², ZONG Shao-li¹, MENG Ling-chao¹

(1. Department of Architectural Engineering, Ren'ai College of Tianjin University, Tianjin 301636, China;
2. North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

Abstract: Constructing deep tunnels to solve the problems of city's localized flooding and combined sewer overflow pollution has attracted increasing attention in China. Deep tunnels are flexible to build and have little disturbance to the surface and shallow underground space. They are also efficient in transporting extra rainwater. However, because of long construction period, huge construction quantities, high investment, complex operation, management and maintenance of deep tunnels, the applicability conditions must be considered carefully when evaluating a plan of building deep tunnels. There is little research in this area in China. The conditions suitable for building deep tunnels, including rainfall characteristics, geological and hydrological conditions were investigated, and the types of cities and the geographical positions suitable for building deep tunnels were analyzed through projects built or under construction to provide reference for decision-making of deep tunnel programs in different cities.

Key words: deep tunnel; rainfall characteristics; geological and hydrological conditions; city type; geographical position

近年来,随着我国城市规模的不断扩大,热岛效应日益凸显,加之地表硬化面积逐年增加,导致降雨多,入渗少,汇流时间加快,径流峰值增大。然而,我国排水系统设计标准偏低,管道老化破损严重,原有

排水系统已不能承受快速增加的雨水径流,导致许多城市洪涝频发。同时,暴雨引发的截流式合流制排水管道的溢流污染成为我国水环境质量改善的巨大负担,对人民的生命财产和城市的安全运行形成

了巨大威胁。

为了应对洪涝和合流制溢流(Combined Sewer Overflow, CSO)污染问题,一些发达国家早在20世纪七八十年代就开始利用城市地下深层隧道来收集、输送和转移已有排水系统无法处理的雨水径流或合流制溢流污水。作为传统的灰色市政基础设施,深层隧道多建设于深层地下40~100 m,可充分利用地下空间,迅速解决洪涝或CSO污染问题。如设计得当,深层隧道还可兼顾城市交通、河道补水等功能。由于深层隧道多采用盾构施工,对地表建筑及地下交通扰动较小,拆迁较少,可避免昂贵的土地收购费用。

然而,深层隧道技术并非适用于所有地区的雨水储存和输送。不同国家、地区的降雨特征、水文地质条件、现有排水设施和经济条件等因素都将影响深隧技术的适用性。在对隧道方案进行评估和决策时,必须认真分析城市的气候特点、控制目标、现有排水系统、地形地质及水体分布等条件,吸取国内、外深隧技术应用的经验和教训,提出更具针对性、经济合理的隧道建设方案。

1 深层隧道适用降雨特点分析

暴雨雨型的时空变化和降雨强度是直接影响城市内涝风险的重要因素。由于各地区地理位置和气候条件不同,其降雨亦呈现不同的特点和规律。不同雨型降雨对于小流域范围内洪峰流量和流量过程都有很大影响。在汇流历时内平均雨强相同的条件下,三角形雨型的洪峰比均匀雨型大30%以上^[1]。

殷水清等^[2]通过对大量降雨数据的分析,根据雨量集中位置出现在整个降雨历时过程的时间段,将雨型分为如下四种:前期集中型(I型,0~40%),中期集中型(II型,40%~60%),后期集中型(III型,60%~100%)和均匀型雨型(IV型,雨量均匀分布于整个降雨过程)。统计分析中累积降雨历时由不同降雨时段累积降雨历时除以总降雨历时而得,累积降雨量由不同降雨时段累积降雨量除以总降雨量而得。前期集中型(I型)降雨次雨量平均72.3%集中在降雨开始至40%累积降雨历时内,中期集中型(II型)次雨量平均39%集中在40%~60%累积降雨历时内,后期集中型(III型)次雨量平均61.7%集中在60%累积降雨历时至降雨结束的时段内;均匀分布型(IV型)降雨过程中雨强基本不变,累积降雨量随累积降雨历时的变化基本呈直线

特征。在我国,前期集中型降雨(I型)出现频次最高,约占47.1%,尤其在夏季,I型降雨发生频次约占夏季总降雨次数的52.2%,且多为短历时高强度降雨,平均雨强为IV型的2倍,最大30 min雨强达到2.4倍^[2]。

由于前期集中型(I型)降雨量集中,地表径流峰值较其他雨型更早出现,易引起较大的洪涝灾害,对排水系统的冲击较大。此时,诸如低影响开发(LID)的分散式小型雨水措施无法在短时间内排除大量超标雨水,而深层隧道技术则可迅速地将大量径流雨水通过深层地下隧道排放或暂时存储于蓄水设施中。故深层隧道技术更适于降雨量大且雨量集中的极端暴雨事件多发、峰值明显地区的内涝防治。

2 深层隧道适用地质、水文条件分析

深层隧道是一种利用深层地下空间的基础设施,工程规模大、施工条件复杂。因此,在隧道勘测阶段,掌握地形地貌、地质构造、岩性土质、地震、不良地质现象等工程地质条件和地下水类型、分布、埋藏深度等水文地质条件,对隧道施工的成败起着重要的甚至是决定性的作用。

在根据地质条件进行隧道位置选择时,最重要的影响因素是滑坡、崩塌、岩堆等不良地质。隧道通过滑坡地段时,将会受到突然的推力,有时会把结构物挤压破坏,或是剪切断开。隧道通过岩堆地区时,开挖极易发生坍方,给施工带来极大困难^[3]。因此,在深层隧道选址应考虑诸多因素中,地质条件往往起决定性作用,应尽量使隧道位于地质结构简单完整的地层,有利于施工,支护形式简单一致,掘进方法可不变,从而可以保证工期,节省造价,养护方便,运行安全。

在单斜构造地区,当层间的抗剪强度不足时,岩层在外力作用下将发生层间相对错动。如果隧道的位置在层间软弱面附近,极易使隧道结构受到破坏。在褶曲构造地区,背斜与向斜在隧道施工过程中,极易发生掉块或坍方,对工程产生不利影响。在断层构造地区,断层带中的断层泥强度较低,而且往往是地下水的通道,施工难度非常大^[3]。因此,在深层隧道选址定线时,应尽可能避开单斜、层间软弱面、褶曲、断层等地质构造区,以保证工程质量,减小施工难度。

在富煤矿区和瓦斯含量较高的地带,蕴藏着有害气体,如甲烷和二氧化碳。隧道开挖时,如有害气

体逸出,轻则致人窒息,重则引起爆炸,危害甚大,选择隧道位置时最好避开此地带^[4]。如必须通过煤系地层时,在施工前应对重点部位的地下有害气体进行提前导排,或在施工时通过密闭盾构机与隧道的间隙,让瓦斯气体溶于盾构机掘进的泥水中,输送至地面分离,避免瓦斯气体进入隧道。同时在隧道内加强通风措施,防止残余瓦斯气体聚集。

地下水的存在可使岩石软化,强度降低,层间夹层软化或稀释,促成层间的滑动^[4]。开挖时裂隙中的水涌入坑道,造成施工困难,并给以后的养护带来麻烦。如香港荔枝角隧道施工过程中,为防止地下水及泥土影响邻近地基和地下设施,在隧道钻挖机前端管道内增加气压,施工人员需进入高压环境工作,施工难度增加。故选择隧道时,应尽量避免从富水地区通过。必须穿过时,也要尽量把隧道置于地下水位以上的地方,或从不透水层中穿过^[4]。

综上所述,隧道选址应在工程水文地质条件实地勘测与资料收集的基础上,对各方面条件进行综合分析,尽量避免在工程地质条件较差地区采用深隧技术。深层隧道宜选在沿线地质构造简单、岩体完整稳定、单斜断层褶皱较少、水文地质条件有利、地下无有害气体、施工方便的地区。若经多种技术方案对比分析后仍需在地质条件较差的地区采用深层隧道技术时,可适当对该地区地质工程进行相应改造,并在施工过程中采取提前防护措施,避免工程事故发生。

3 深层隧道适用城市类型分析

3.1 老城区合流制地区

我国广州、美国芝加哥、英国伦敦等历史悠久的老城区,早期多采用合流制排水系统。雨季时,合流污水未经处理直接排放进入受纳水体,溢流污染严重。随着城市的发展和环境保护意识的提高,许多城市纷纷投入大量资金对老城区原有合流制排水系统进行雨污分流改造。但是老城区或中心城区发展成熟,建筑密集,浅层地下空间的利用已趋于饱和,传统的浅层改造措施往往难以实施或成本太高,很难在短期内整体提高防洪排涝和合流制溢流控制标准。而深层隧道工程可充分利用城市深层地下空间,对地面和浅层地下空间影响小;避免大量征地和拆迁,且通过一些特殊的施工方法,可降低施工对民生和环境交通的影响;同时,深层隧道还可连接现有的合流管道、调蓄池、污水处理厂等排水设施,较快

地解决城市CSO污染问题。

以我国广州为例。广州市老城区河涌多,河道长,大部分地区采用合流制排水系统。雨季溢流污染频繁,导致河涌水质不稳定。而老城区房屋密集,地下管线错综复杂,截污工程实施空间很有限,且工程涉及千家万户,整体改造难度大,雨污分流可实施性不强。2013年,广州市规划建设深层隧道排水系统,在地下40多米深处修建“一主七副”8条深层隧道,总长为86.4 km,可提供 $165.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的调蓄容积,并结合竖井建设5座排涝泵站。该隧道预期可解决老城区的内涝和CSO污染问题,将相应流域排水干渠排水标准由现在的0.5~1年一遇提高到5~10年一遇,同时可提高合流制地区污水收集系统的截流倍数,缓解合流制溢流污染和分流制地区初期雨水径流污染,大幅减少排入珠江的污染物。

在英国伦敦,由于采用截流式合流制排水体制,每逢雨季,泰晤士河沿岸合流制溢流污染严重。为改善泰晤士河水质,伦敦市相关部门对“雨污分流”、“可持续性城市排水系统”和“泰晤士隧道”3种方案进行了比选论证,研究表明,建设泰晤士隧道是影响最小、用时最少、成本最低的方案^[5,6],因此伦敦于2007年启动了泰晤士深层排水隧道工程的建设。

3.2 洪涝易发城市

近年来,暴雨引发的洪涝灾害频发,造成了巨大的生命财产损失。为应对频发的城市内涝,许多城市相继采取积水片区排水系统提标改造、河道扩挖、堤防加高等治理工程,以及海绵城市建设等绿色措施来应对雨水带来的自然灾害。对于香港和东京等易受台风侵袭,暴雨量大且集中,经济发达、建筑密集的沿海城市,绿色基础设施、低影响开发等雨水处理技术无法快速排出超标雨水,排水系统提标改造、河道扩挖等工程影响范围大,投资成本高。而地下深层隧道可在短时间内吸纳大量径流雨水,缓解城区洪涝问题。且深层隧道可以在保持现有排水系统的基础上,进行地下雨水系统的建设,工程影响范围较小,更适合积水片区的雨水系统提升改造工程。

以香港为例。香港地区年平均降雨量高达2 200 mm,港岛北部楼宇密集、地面径流量大,而其雨水排放系统大部分在数十年前建造,早年的渠道设计已不能满足现今的排洪标准,渠道老化也降低了现有排水管道的排洪能力^[7]。因此,每逢雨季,

港岛北部多个地区(如中环、上环地区)极易出现内涝导致的水浸。为减轻水浸带来的严重影响,香港渠务署经过对多个方案加以严格论证,综合考虑土地、环境、交通、民扰、工期、投资等因素后采用了隧道截流的方案,于2007年斥巨资修建港岛西雨水排放隧道。该隧道工程在半山挖掘雨水隧道截流上游高地雨水,引流绕过闹市后排海,大大提高了该地区的防洪标准。由于该工程只在半山施工,缩小了市区路面的工程范围,避免了因广泛开挖道路所造成的滋扰;且隧道采用反井建造法,由下向上钻挖建造竖井,挖出的泥石经地下隧道运走,减少了往来于地面载运泥石的工程车辆,降低了噪音和泥尘对居民生活的影响,对改善施工环境和交通状况也大有帮助。另外,隧道钻挖机开动时,隧道的爆破工程也可同步进行,大大缩短了施工时间。

日本东京也是洪涝多发易发城市。由于首都圈范围内人口众多,排水系统已远远不能适应大城市的瞬间集中大雨,原有的防洪措施是在现有的天然水路周围开掘人工水路,尽量让市内的积水通过支流流入江户川等主干流,最后流入东京湾,但是这种

措施局限性较大,费用很高。因此,日本于1992年至2006年间建造了“首都圈外围排水系统”,在地下约50 m处修建了内径为10 m左右的地下隧道,连接5个大型竖井,将收集到的雨水统一汇集到一座大型蓄水池——“调压水槽”,再通过4台大功率水泵排入一级大河流江户川。该隧道建成后,江户川流域遭水浸的房屋数量和浸水面积大幅减少,对日本埼玉县、东京都东部首都圈的防洪泄洪起到了至关重要的作用。

4 深层隧道适用的地理环境和地形分析

由于不同城市所处的地理环境不同,面临的雨洪和CSO污染问题也不一样,因此,在进行深层隧道的规划和设计过程中,应针对要解决的问题、城市的地形,并结合现有排水设施的位置、规模和作用,因地制宜,确定深层隧道系统的技术方案。

4.1 连接溢流口或污水处理厂的深层隧道

为输送污水,可沿溢流口或者污水处理厂设置深层隧道,典型的如新加坡的深层隧道阴沟系统(DTSS)、正在规划建设的广州市深层隧道排水系统以及悉尼北部隧道系统^[6-10](见图1)。

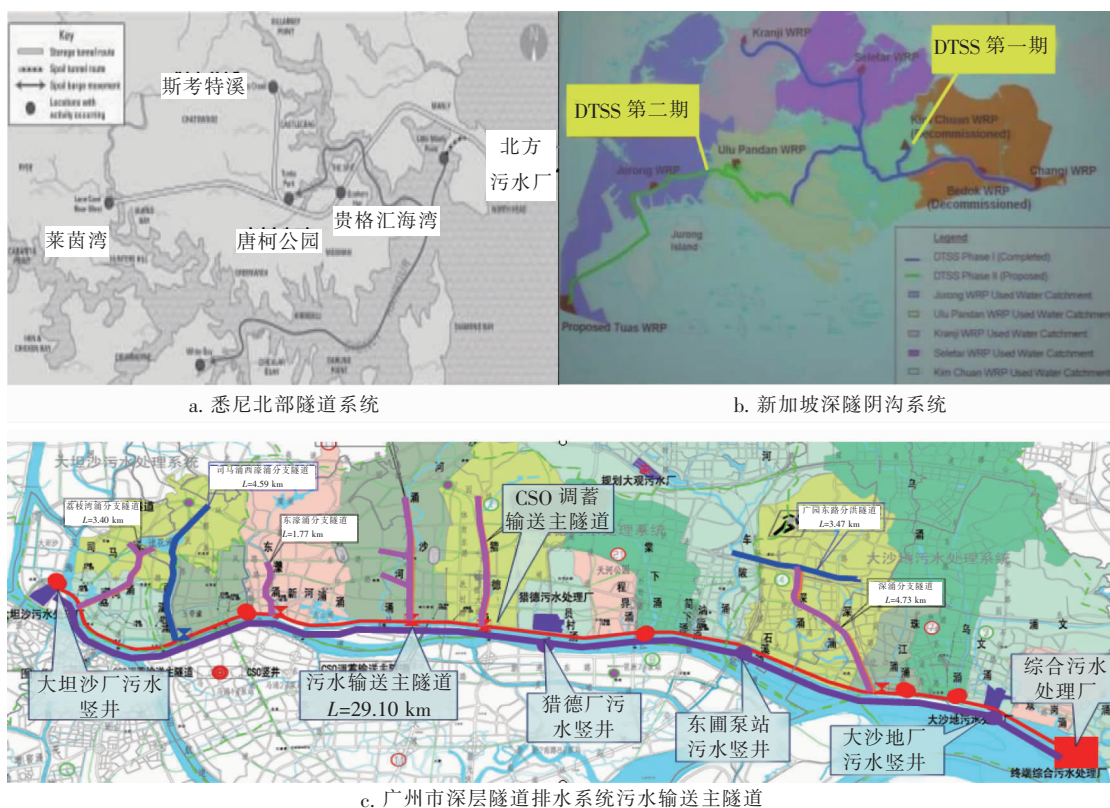


图1 污水输送隧道示意图

Fig.1 Schematic diagram of sewage transportation tunnel

在悉尼,污水管渠破损和雨水管路的不合理连接,使大量雨水渗入污水管渠造成溢流排放,悉尼港遭受严重污染^[8]。因此,悉尼市沿郊区现有排水系统修建了大型的悉尼北部隧道系统,如图1(a)所示。该隧道将莱茵湾、斯考特溪、唐柯公园、贵格汇海湾、谢利海滩等主要的溢流口和污水处理厂连接起来^[8],当污水管道达到排水容量时,溢流口可以起到“缓解阀门”的作用,将多余的污水和雨水输送至悉尼北部隧道存储,而后将污水输送至北方污水处理厂处理^[9]。

新加坡为了置换市中心原有分散的污水处理厂和泵站用地,建设了深层隧道阴沟系统(DTSS)。该系统利用连接管截流现有污水系统中的污水,并通过两条交错的深层隧道,输送污水至远离中心区的东、西两端的两个大型污水厂集中处理,最后将处理出水排入远离新加坡的深海[见图1(b)]。该项目分两个阶段建设,第一阶段包括一条长为48 km的污水隧道和樟宜污水处理厂,已于2008年完工。第一阶段完工后,逐渐关闭了新加坡东部地区原有的3座污水处理厂和45座泵站,释放了161 hm²的缓冲和设备用地,缓解了新加坡用地紧张的状况。

广州规划在珠江河道之下建设长约29.1 km的污水输送隧道[见图1(c)],收集沿途污水处理厂的污水,为将来搬迁污水处理厂,置换污水厂土地奠定基础。

该类型隧道可有效地将沿途溢流口或者污水处理厂串联起来,收集和输送沿途合流制溢流污水或城市污水至集中的污水厂处理,适用于溢流口多,溢流量大,而城市空间有限,无法沿每个溢流口设置分散的调蓄处理设施或者城区污水厂多、位置分散、占地面积大而用地紧张的地区。

4.2 垂直于主流方向的深层隧道

此类隧道多为雨洪排放隧道,通常沿主流垂直方向设置。典型的如香港荔枝角、荃湾、港岛西雨水排放隧道系统。

以荔枝角雨水排放隧道为例,香港荔枝角地区乡郊地势较高,而市区地势较为低洼。暴雨时,大量雨水瞬间沿山上已铺筑地区和斜坡流到市区,造成内涝水浸。为减少山洪和雨水对香港市区排水系统的冲击,香港政府投巨资在地下约40 m处修建了荔枝角雨水排放隧道^[11],具体如图2所示。该隧道系统在香港西九龙地区大埔道及呈祥道修建了多个进

水口、竖井和隧道,将荔枝角、长沙湾和深水埗上游高地的雨水,通过全长约3.7 km、直径为4.9 m的雨水深层隧道引流绕过闹市,最终排入维多利亚港,使流入市区排水系统的高地雨水量大大减少,有效降低了下游区域的内涝风险。

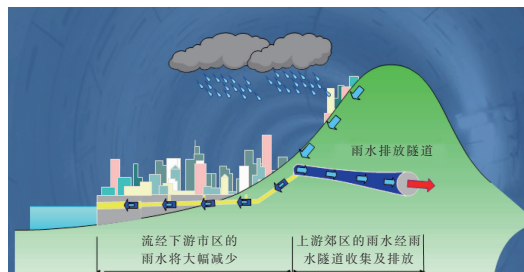


图2 香港雨水截流系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Hong Kong stormwater interception system

该类型隧道通过截流积水区域或上游山洪,降低下游区域洪涝风险^[8],一般建于暴雨量大且集中,水涝频繁且城市山地丘陵较多,主城区位于山下,地势低洼,易被山洪侵袭的地区。

4.3 河道下方设置的深层隧道

此类隧道多平行于河道或位于河道正下方,以解决河道排水能力不足或者合流制溢流污水污染问题,典型的如美国奥斯汀沃勒河排洪隧道和英国泰晤士潮汐隧道,我国广州深层隧道排水系统也规划将部分隧道建于河道下方。

为了修复洪泛区,转移暴雨洪峰流量,美国奥斯汀市于2011年开始修建沃勒河排洪隧道^[12]。该隧道沿着沃勒河修建,由长为1 707 m、直径为6.2~8.1 m的三段混凝土隧道、入口和出口设施以及溢流侧堰截水系统组成^[13](见图3),将暴雨径流通过出口设施直接输送至伯德夫人湖。工程完成后,沃勒河排洪隧道将可控制该流域百年一遇的洪水^[13]。

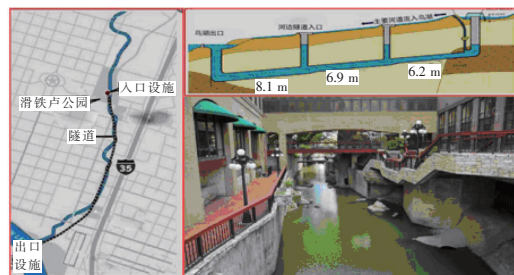
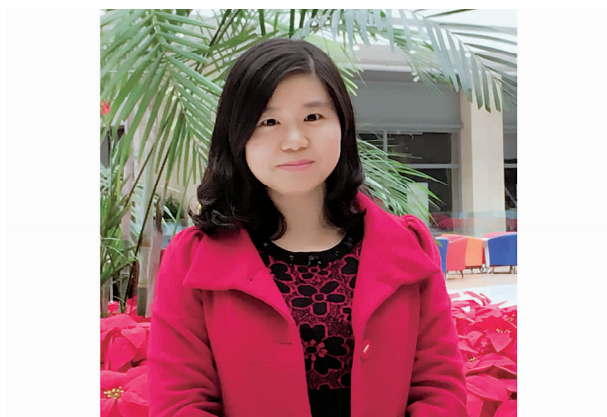


图3 奥斯汀沃勒河排洪隧道系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Waller Creek Tunnel

- [J]. 水科学进展,2014,25(5):617-624.
- [3] 李小青. 隧道工程技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [4] 霍润科. 隧道与地下工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [5] 唐磊,车伍,赵杨,等. 对我国城市建设雨洪控制隧道的思考[J]. 中国给水排水,2015,31(7):119-125.
- [6] 门绚,李冬,张杰. 国内外深隧排水系统建设状况及其启示[J]. 河北工业科技,2015,32(5):438-442.
- [7] Drainage Services Department. Design and construction of Hong Kong West Drainage Tunnel [EB/OL]. <http://www.dsd.gov.hk/others/HKWDT/eng/background.html>,2013-01-21.
- [8] 鲁朝阳,车伍,唐磊,等. 隧道在城市洪涝及合流制溢流控制中的应用[J]. 中国给水排水,2013,29(24):35-40.
- [9] Sydney Water. Northside storage tunnel-sites[EB/OL]. <http://www.sydneywater.com.au/OurSystemsandOperations/WastewaterSystems/NorthsideStorage-Tunnel/Sites.Cfm>,2012-12-16.
- [10] Auditor-General's Report Performance Audit. Sydney water corporation northside storage tunnel project[EB/OL]. http://www.audit.nsw.gov.au/ArticleDocuments/135/113_Sydney_Water_Corporation.pdf.aspxEmbed=Y,2003-07-25.
- [11] Drainage Services Department. Lai Chi Kok Drainage Tunnel[EB/OL]. <http://www.dsd.gov.hk/others/LCKDT/en/>,2013-11-19.
- [12] Marks A R,Reis B K,Hughes G. Waller creek tunnel design and elimination of entrained air blow back conditions[A]. World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability [C]. US:ASCE,2011.
- [13] Reis B K,Espey Jr W H. Waller creek tunnel project, Austin,Texas[A]. World Environmental and Water Resources Congress 2008[C]. US:ASCE,2008.
- [14] Koo D H D,Jung J K,Lee W. Sustainability applications for storm drainage systems minimizing adverse impacts of global climate change[A]. International Conference on Pipeline and Trenchless Technology [C]. US: ASCE, 2012.



作者简介:张盛楠(1984-),女,河北冀州人,硕士,讲师,主要从事给排水专业的教学及科研工作。

E-mail:shengnanzhang@126.com

收稿日期:2016-07-10

防止水源枯竭和水体污染,
保证城乡居民饮用水安全