

深圳石岩水库流域降雨径流污染冲刷规律

鲁 南^{1,2}, 秦华鹏^{3,4}, 余香英^{3,4}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 深圳市水污染治理指挥部办公室, 广东 深圳 518036; 3. 北京大学(深圳)城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055; 4. 深港产学研基地深圳环境模拟与污染控制重点实验室, 广东 深圳 518057)

摘要 :以深圳市宝安区石岩水库流域为例,对流域内 6 条主要入库支流在不同雨强条件下的降雨径流和水质变化过程进行了连续同步监测,以 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为例,建立并验证了 6 个子流域非点源污染负荷累积模型和降雨径流污染物冲刷过程模型,分析和比较了各子流域非点源污染强度和污染物冲刷过程特征。监测与模型研究结果表明,7~8 d 的干旱时间能累积起流域内最大可能非点源污染负荷累积量的 80%;由于各子流域城市化程度、垃圾管理与水土保持水平不同,流域内非点源污染程度、产生原因与冲刷过程在空间上差别很大。

关键词 城市化;非点源;径流污染;冲刷规律

中图分类号:X522 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2008)04-0035-05

Characteristics of the storm runoff pollutant washout process in the Shiyan Reservoir Basin in Shenzhen

LU Nan^{1,2}, QIN Hua-peng^{3,4}, YU Xiang-ying^{3,4}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shenzhen Pollution Control Headquarter Office, Shenzhen 518036, China; 3. The Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China; 4. Shenzhen Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Shenzhen 518057, China)

Abstract :The Shiyan Reservoir Basin in the Baoan District of Shenzhen City was used as a case study of runoff pollutants' washout process and spatial variation during storm events in rapidly urbanizing basins. A buildup model of non-point source pollution (e.g., COD and $\text{NH}_3\text{-N}$) and a washout model of storm runoff pollution in six sub-basins were established and calibrated based on continuous and simultaneous monitoring data of storm runoff and water quality under varying precipitation intensity. The results show that 80% of the maximum pollution buildup can accumulate in 7-8 rainless days. Different waste management and soil and water conservation methods, as well as different urbanization levels, lead to distinctly different characteristics in pollutant washout processes in the six sub-basins.

Key words urbanization; non-point source; runoff pollution; washout characteristics

快速城市化地区经济、人口快速增长,土地被大规模迅速开发利用,但水污染治理与城市垃圾管理却相对滞后,导致非点源问题日益严重。快速城市化地区内农业与工业土地利用交错,而且各子流域的城市化水平及污染治理措施存在明显差异,导致非点源污染问题的空间分异。目前针对农村或城市非点源污染已经进行了大量研究^[1-3],但对兼有农业

与城市非点源特点的快速城市化地区的非点源污染规律研究较少。另外,初期雨水截留是控制非点源污染的一个重要措施,而截留规模与方案的设计与优化需要掌握降雨径流污染物的冲刷过程。目前对非点源污染物产生量研究较多^[2,4-7],对次降雨过程其非点源污染产生过程研究较少。因此,本文主要对快速城市化流域降雨径流污染物冲刷过程及其空

间差异进行研究,为非点源管理措施尤其是初期雨水的截留规模与方案优化提供依据和参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

深圳市宝安区正处于快速城市化进程中,石岩水库位于该区石岩街道的西北角,流域集水面积44.77 km²,多年平均径流量为3691.9万 m³。石岩水库正常蓄水位36.59 m,相应库容1690万 m³,是深圳市四大水库之一,也是宝安区最大的饮用水源之一,2000年深圳市市政府将其划分为水源保护区,一级、二级和准水源保护区面积分别为9.05 km²、28.00 km²、36.73 km²。

石岩水库流域范围内有6条主要入库支流,分别是东岸的石岩河、王家庄溪、深坑坊、白坑窝和西岸的麻布水、运牛坑(图1)。石岩水库入库支流特征见表1。东岸属石岩街道的建成区,人为活动剧烈,河流污染严重,石岩河、王家庄溪、深坑坊水质均为劣V类;西岸麻布水、运牛坑流经建成区面积相对较小,污染主要为果园、水土流失、农业等面源,水质相对较好。总体上,水源地受到强烈的社会经济活动影响,各入库支流水质均低于地表水V类标准,尤其在雨季,污染物平均浓度一般是旱季的2~4倍以上,面源污水直接入库,加重水质污染。

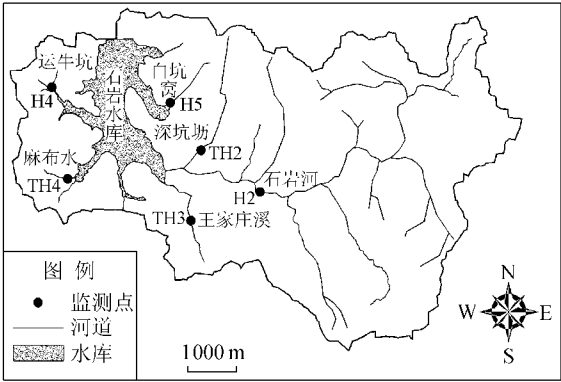


图1 石岩水库流域示意图

表1 石岩水库入库支流特征

片区	支流名称	入库位置	发源地	河长/km	集雨面积/km ²	流域内建成区面积/km ²
东岸	白坑窝	径背新村	白坑窝	1.69	1.20	0.43
	深坑坊	石岩河口	深坑坊	2.00	2.06	0.80
	石岩河	石岩河口	羊台山	9.51	26.88	8.06
	王家庄溪	信宜村	羊台山	1.90	4.90	1.63
西岸	麻布水	西岸西联	麻布	1.58	0.91	0.08
	运牛坑	阿婆髻东	运牛坑	1.39	1.20	0

2007年,深圳市市政府对石岩水库初期雨水入库污染进行截污设计,旨在保护石岩水库水源水质。因此,掌握流域降雨径流污染物累积及冲刷规律,了解各个子流域非点源污染的空间分异特征,对

于截留规模与方案的设计与优化具有重要意义。

由于石岩水库流域只有雨量资料,缺乏地表径流与水质同步监测资料,本研究于2007年2~6月起对石岩水库的主要入库河流上设置了6个监测断面(石岩河 H2、王家庄溪 TH3、深坑坊 TH2、白坑窝 H5和麻布水 TH4、运牛坑 H4),对2007年2月22日、3月19日、4月2日、6月14日4场降雨径流过程实施了降雨径流及水质的同步监测,监测的内容包括降雨量、流速、水位和水质指标(如COD、BOD₅、NH₃-N、SS、TN、TP等)。

1.2 研究方法

降雨径流冲刷地表,雨水径流挟带大量干旱时期累积的污染负荷进入水体,属典型的面源污染方式。其变化规律的研究主要集中在两个方面^[8]:①研究各种土地利用上的面源聚集量与干旱时间的关系,由污染物累积模型描述;②研究各种土地利用上的污染物冲刷规律,由污染物冲刷模型描述。

流域的污染物聚集过程可用不同的模型来表达,包括线性、非线性(通常为幂函数)、指数模型等^[9]。其中线性模型是幂函数模型的一种特殊情况,应用于城市暴雨管理模型(SWMM)的早期版本,但在实际的污染物聚集模拟中并不十分准确^[10];非线性模型比线性模型稍复杂一些,Zhang等^[4]曾对太湖宜兴梅林小流域降雨径流过程中的径流流量及其污染物浓度进行分析,分别采用非线性模型和线性模型模拟了TP、NH₃-N、NO₃-N、BOD₅、COD_{Mn}等污染物浓度与流量之间的关系。指数模型是由Sartor和Boyd利用研究区域收集到的土地利用数据对非线性模型进行校验后提出来的,最初针对的是地面固体污染负荷量和两次降雨间干旱时间的关系^[10]。线性和非线性模型通常是基于某一小流域某一种土地利用类型建立的流量与污染物浓度之间的经验方程,流域条件、土地利用方式及区域土地管理措施的差异使其运用受到限制,相比之下,指数模型因考虑了干旱时间、流域下垫面属性及累积系数等因素,反应最为准确,也最为常用,因此本文面源污染物聚集量与干旱时间的关系采用指数公式进行计算:

$$P_0 = P_{\max}(1 - e^{-C_1 t}) \quad (1)$$

式中: P_0 为0时刻(降雨产流开始时刻)集水区内污染负荷累积量/kg; $P_{\max}$ 为集水区内最大可能的面源污染聚集量/kg; C_1 为污染物聚集常数,d⁻¹;t为降雨后所经过的时间,h。

降雨径流污染模型中比较成功的大型模型有城市暴雨水管理模型(SWMM)、城市暴雨径流模型(STORM)、化学物质径流负荷与流失模型(CREAMS)以及将地理信息系统GIS结合在模型中开发出的土壤水体评价模型(SWAT)等^[3]。根据流域条件和现

有资料,本文选用 SWMM 中推荐的冲刷函数来模拟石岩水库流域面源污染规律,面源污染物冲刷规律采用径流率幂冲刷关系来表示:

W_t = C_2 q_t^{C_3} (P_0 - W_{pt}) \tag{2}

式中:W_t 为 t 时刻集水区面源污染负荷冲刷率, kg/h;q_t 为 t 时刻集水区单位面积径流率, mm/h;W_{pt} 为 0~t 时刻集水区面源污染负荷冲刷累积量, kg;C_2 为冲刷系数;C_3 为冲刷指数。

t 时刻集水区污染负荷累积量与面源污染负荷冲刷率之间的关系为

W_t = - \frac{dP_t}{dt} \tag{3}

\frac{dP_t}{dt} = - C_2 q_t^{C_3} P_t \tag{4}

式中:P_t 为 t 时刻集区内污染负荷累积量, kg。通过解微分方程(4),可得降雨径流污染物浓度表达式

C_t = \frac{C_2 P_0}{A} q_t^{C_3-1} e^{-C_2 \int_0^t q_i^{C_3} dt} = \frac{C_2 P_{max}(1 - e^{-C_1 t})}{A} q_t^{C_3-1} e^{-C_2 \int_0^t q_i^{C_3} dt} \tag{5}

式中:C_t 为 t 时刻降雨径流污染物质量浓度, mg/L。非点源污染负荷取决于降雨条件、流域土地利用方式以及下垫面的特征,其具体变化过程与降雨历时、采样时间及土地利用类型有很大的关系^[4],而径流率是关于地表径流速度和径流深度的函数,它与降雨强度、地形坡度和地表的径流长度有关^[11];另外,许多研究表明,冲刷系数因污染物种类和流域而异^[12]。这些结论均说明,研究的子流域不同,其非点源污染负荷、降雨径流污染物累积和冲刷规律亦不同。

2 研究结果

本文对石岩河、深坑坳和王家庄溪集水区选取 3 月 19 日、4 月 2 日、6 月 14 日,对麻布水、白坑窝和运牛坑集水区选取 2 月 22 日、3 月 19 日、4 月 2 日各 3 场降雨过程的水文水质同步监测数据,对冲刷模型进行模型的率定和验证。采用 3 月 19 日实测数据进行率定,其余几场降雨实测资料作为验证,选取的代表性指标为 COD 与 NH₃-N。6 个集水区的降雨

径流污染物冲刷模型的参数如表 2 所示。
图 2~图 5 给出了 6 个子流域中有代表性的降雨径流污染物冲刷模型率定和验证情况,以及累积模型的验证情况。

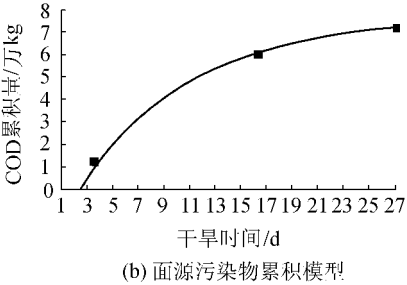
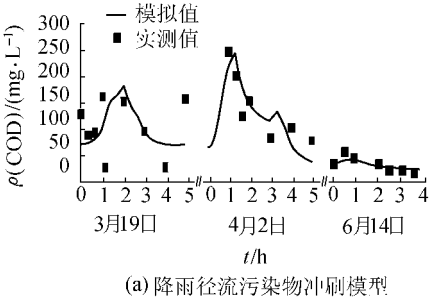


图 2 3 场降雨过程石岩河 H2 集水区 COD 模拟值与实测值比较

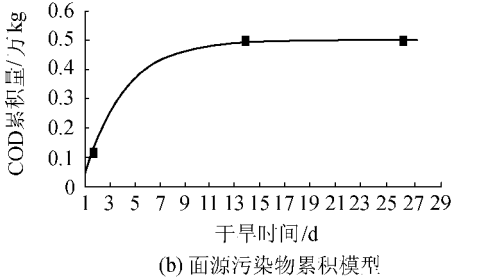
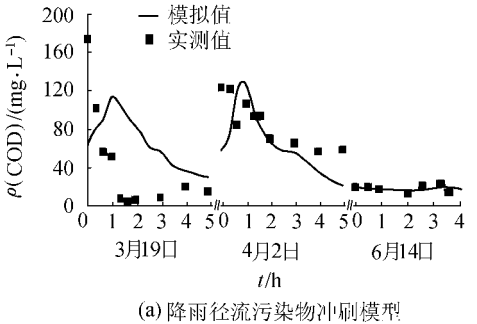
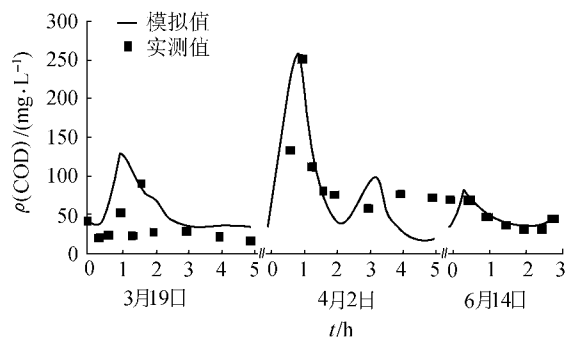


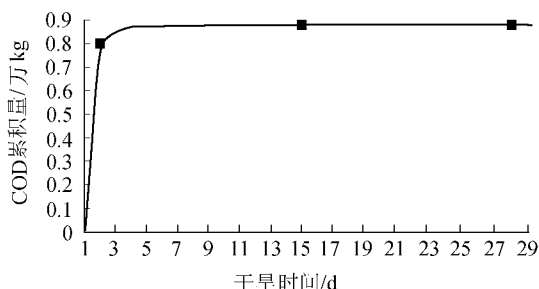
图 3 3 场降雨过程深坑坳 TH2 集水区 COD 模拟值与实测值比较

表 2 6 个集水区模型参数估值

集水区	COD					NH ₃ -N				
	P _{max} /kg (P _{max} ·A ⁻¹)(kg·km ⁻²)	C ₁	C ₂	C ₃	P _{max} /kg (P _{max} ·A ⁻¹)(kg·km ⁻²)	C ₁	C ₂	C ₃		
石岩河 H2	75 000	3 409	0.120	0.050	1.50	1 100	50	0.25	0.360	0.75
深坑坳 TH2	5 000	1 205	0.300	0.070	1.40	140	35	0.25	0.300	0.75
王家庄溪 TH3	8 800	2 316	1.599	0.038	1.70	300	79	0.35	0.090	1.10
白坑窝 H5	1 200	1 143	0.050	0.110	1.30	200	190	0.08	0.030	1.33
运牛坑 H4	6 000	16 200	0.035	0.027	1.24	300	810	0.06	0.003	0.70
麻布水 TH4	70 000	96 000	0.013	0.004	1.50	4 000	5 500	0.02	0.003	1.05

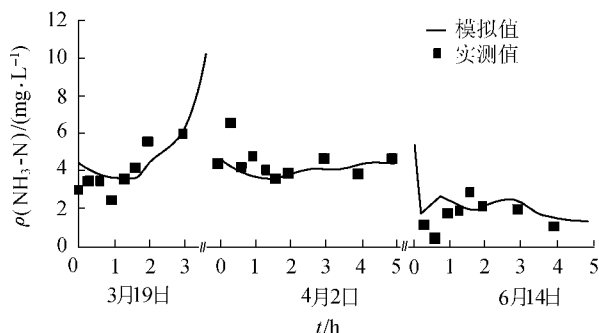


(a) 降雨径流污染物冲刷模型

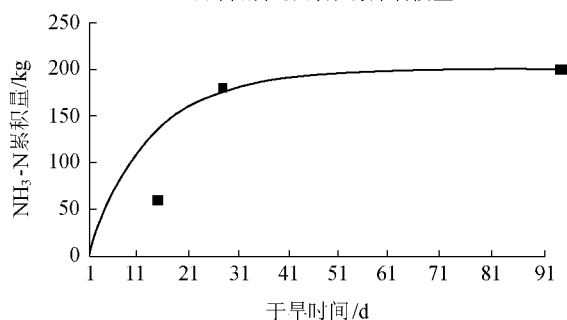


(b) 面源污染物累积模型

图4 3场降雨过程王家庄溪 TH3 集水区
COD 模拟值与实测值比较



(a) 降雨径流污染物冲刷模型



(b) 面源污染物累积模型

图5 3场降雨过程白坑窝 H5 集水区
NH₃-N 模拟值与实测值比较

3 讨论

从验证情况可以看出,大部分测量数据与降雨径流污染物冲刷模型模拟出的污染物浓度变化趋势符合较好,部分测量数据与模拟数据差较大,这可能是由于监测断面不断有随波逐流的垃圾出现,造成水质浓度在一段时间内变化较大。总体而言,径流

率幂冲刷模型可以满足模拟需求。根据本文模拟结果可以看出,面源污染负荷某场降雨结束后初期累积较快,随着干旱时间增加累积速度减小,并趋近极限值。

研究结果表明,6个子流域聚集污染物速度都非常迅速,7~8 d就能聚集起集水区最大可能面源污染聚集量的80%。

表2各个参数均具有其特殊意义,能表现出该地区的非点源污染规律。鉴于此,这里主要探讨各参数的含义,并比较子流域间规律的空间差异。

$P_{\max}/A$ 代表集区内单位面积最大污染负荷累积量,反映的是子流域内污染物源强的大小。由表2可以看出,以COD为指标,6个子流域 $P_{\max}/A$ 参数的大小排序为麻布水 TH4 > 运牛坑 H4 > 石岩河 H2 > 王家庄溪 TH3 > 深坑坊 TH2 > 白坑窝 H5,麻布水 TH4 流域的单位面积最大污染负荷是白坑窝 H5 流域的84倍;以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为指标,六者排序为麻布水 TH4 > 运牛坑 H4 > 白坑窝 H5 > 王家庄溪 TH3 > 石岩河 H2 > 深坑坊 TH2,单位面积中最大污染负荷是最小的157倍。由此可见,石岩水库流域西岸非点源负荷量远远大于东岸,而东岸4个子流域中王家庄溪 TH3 和石岩河 H2 又比另外2个子流域的负荷严重,这也与面源调查时所发现的石岩河与王家庄溪集水区乱堆放垃圾数量明显较多的现象相符。

C_1 代表污染物聚集常数,反映了集区内污染物累积速率。由参数估值表可以看出,以COD为例,王家庄溪 TH3 的聚集常数远远大于其他子流域,是最小值麻布水 TH4 的123倍;东岸 C_1 值普遍高于西岸。这说明王家庄溪等东岸子流域污染物聚集速度非常快,污染负荷一经冲走就能很快集聚,被冲刷负荷能及时地得到补充;而西岸流域的污染负荷居高不下,但降雨时只是冲刷负荷中的一部分,这与西岸土地利用以果园为主、植被覆盖较多而降雨不易冲刷有关。

C_2 为冲刷系数,反映了冲刷时污染负荷的衰减情况,一般而言,集水区的 C_2 越大,其内聚集的非点源污染物越容易(快)被冲刷干净。参数估值结果显示,以COD为指标, C_2 在6个子流域中大小排序为白坑窝 H5 > 深坑坊 TH2 > 石岩河 H2 > 王家庄溪 TH3 > 运牛坑 H4 > 麻布水 TH4,以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为指标, C_2 在6个子流域中的大小排序为石岩河 H2 > 深坑坊 TH2 > 王家庄溪 TH3 > 白坑窝 H5 > 运牛坑 H4 > 麻布水 TH4。这说明在降雨过程中,西岸流域的非点源污染物最难被冲刷干净,进一步说明植被覆盖在降雨冲刷污染物中的拦截作用;而东岸子流域中王

家庄溪最不易冲刷干净,这可能与面源调查时所发现的王家庄溪有大量垃圾藏匿于荔枝林中而不是堆放在不透水地面上有关。

C_3 为冲刷指数,在式(2)中为单位面积径流率的幂指数,它反映了降雨径流(可以用 q_t 表示)对污染物冲刷强度影响。当 C_3 较大时,冲刷强度将随 q_t 增大而迅速增大。参数估值结果显示,以 COD 为指标, C_3 在 6 个子流域中大小排序为王家庄溪 TH3 > 石岩河 H2 = 麻布水 TH4 > 深坑坊 TH2 > 白坑窝 H5 > 运牛坑 H4,以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为指标, C_3 排序为白坑窝 H5 > 王家庄溪 TH3 > 麻布水 TH4 > 石岩河 H2 = 深坑坊 TH2 > 运牛坑 H4。这说明,降雨径流对东岸集水区的污染物冲刷影响更加明显,其中王家庄溪受降雨径流影响最大,这可能与东岸集水区存在大量管理不善的城市垃圾有关。当降雨径流增加到一定量,大量的垃圾才会被冲刷出来,造成集水区污染物冲刷强度显著提高。

4 结 论

a. 石岩水库流域东岸污染强度低于西岸,但容易被冲刷,降雨径流污染物浓度高于西岸,水质较差,是石岩水库主要入库污染源。而东岸子流域中尤以王家庄溪和石岩河污染更为严重,整个流域表现出较强的空间分异的特征。

b. 子流域不同、污染物种类不同,则降雨径流污染物累积与冲刷规律亦不同,表现在模型参数上的空间差异。

c. 模型中各参数都具有其特定含义, $P_{\max}/A$ 代表集水区单位面积最大污染负荷累积量,反映的是子流域内污染物源强的大小; C_1 代表污染物聚集常数,反映了集水区单位面积内污染物累积速率; C_2 为冲刷系数,反映了冲刷时污染负荷的衰减情况; C_3 为冲刷指数,反映了降雨径流(可以用 q_t 表示)对污染物冲刷强度影响。

d. 由于各子流域非点源程度、产生原因与冲刷过程差别很大,应针对性地采取非点源管理措施(如垃圾管理与水土保持)。

e. 采用建立的模型可以较好描述各子流域非点源污染物冲刷(产生)过程规律及其分异。通过长期、连续的降雨径流资料、水量水质同步监测资料,进一步率定和验证非点源污染冲刷和累积模型,提高模型模拟精度,可以为非点源管理措施、尤其是初期雨水截留规模与方案优化较好地提供参考依据。

参考文献:

[1] 沈丹,张明亮. SWMM 模型在城市生命体水循环系统中

的应用[EB/OL].[2006-09-29]. <http://www.paper.edu.cn>.

[2] ZHUO Mu-ning, WANG Ji-zeng. Calculation of pollutant load of urban storm runoff and its estimation in Zhuhai City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 10: 35-38.

[3] CHE Wu, LIU Yan, LI Jun-qi. Characteristics of urban non-point pollution and control strategies in Beijing[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2002, 4: 5-9.

[4] ZHANG Rong-bao, YAO Qi, JI Yong. Research on non-point pollutant losing law of a typical small valley in Taihu lake basin[J]. Yellow River, 2004, 10: 38-41.

[5] 车伍,刘燕,欧岚,等.城市雨水径流面源污染负荷的计算模型[J].中国给水排水,2004,20(7):59-61.

[6] HUI Er-qing, HUANG Yu-ling, LIU De-fu. Estimation of pollution load from single rainfall runoff in Urban area[J]. Journal of China Hydrology, 2006, 5: 29-32.

[7] MISHRA S K, TYAGI J V, SINGH V P, et al. SCS-CN-based modeling of sediment yield[J]. Journal of Hydrology, 2006, 324 (1-4): 301-322.

[8] SONG Ji-qin, CHEN Hai-chuan, ZHAI Yan-yun. Research on the relationship between sewage interception ratio and water quality in the Buji River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006, 8: 27-29.

[9] AMMON D C. Urban storm water pollutant buildup and washoff relationship[D]. Gainesville: University of Florida, 1979.

[10] CHEN Jie-yun, ADAMS B J. A derived probability distribution approach to stormwater quality modeling[J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(1): 80-100.

[11] 林佩斌.深圳地区污水截流倍数研究[D].重庆:重庆大学,2007.

[12] ROESNER L A. Quality of urban runoff[C]//KIBBLE D F. Urban stormwater hydrology. Washington D C: American Geophysical Union, 1982: 161-197.

(收稿日期:2007-11-08 编辑:傅伟群)

