

基于模型模拟的城市非点源污染控制措施设计

郭青海^{1, 2}, 杨柳³, 马克明^{1*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要: 目前针对城市小流域进行非点源污染控制措施去污效果的模拟研究处于起步阶段. 利用 L-THIA 模型模拟武汉市汉阳地区三角湖流域 2 个小汇水单元(Sj1、Sj2)不同土地利用类型上的非点源污染物累积量, 模拟得出 1 次典型降雨前 Sj1 和 Sj2 中污染物总量分别为 1.82×10^4 kg、 1.38×10^5 kg. 基于“源-汇”和格局与过程相互作用理论, 针对降雨前 2 h 内产生的径流, 从源、污染物迁移过程和汇 3 个阶段采取绿色屋顶、草地、多孔路面、渗透渠、植被过滤带和湿塘等多种 BMPs 及其组合, 进行去污效果模拟. 结果显示经系列化 BMPs 处理后进入三角湖的污染物质占 Sj1、Sj2 总污染物质的 14.65% 和 6.57%, 控制措施效果比较明显. 在流域或区域尺度上, 利用 L-THIA 模型可以在工程建设之前进行效果预测模拟, 以减少不必要的风险.

关键词: 城市非点源污染; L-THIA 模型; 最佳管理措施; 汉阳

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)11-2425-07

L-THIA-based Management Design for Controlling Urban Non-point Source Pollution

GUO Qing-hai^{1, 2}, YANG Liu³, MA Ke-ming¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: L-THIA Model was used to simulate the amounts of NPS pollutants in 2 catchments of Sanjiao watershed (Sj1, Sj2) in Hanyang district, and the total simulated amount of NPS loads in Sj1 and Sj2 were 1.82×10^4 kg, 1.38×10^5 kg, respectively. Based on the theory of “resource-sink” and interaction of pattern with process, a series of BMPs, including green roof, grassland, porous pavement, infiltration trench, vegetative filter strip and wet pond, were optimized, and effects of BMPs were simulated along the surface runoff pathway. The results show that total pollutants outputs entering Sj1 and Sj2 account for 14.65% and 6.57%, respectively. Combining L-THIA model and BMPs in series is a proper measure for non-point source pollution control and urban development planning at watershed or region scale.

Key words: urban non-point source pollution; L-THIA model; best management practices; Hanyang

城市非点源污染是伴随城市快速发展而出现的新问题. 与农业非点源污染比较, 城市暴雨径流作为污染物迁移的主要驱动力, 是造成城市水体污染的主要原因^[1-7]. 国内外相关研究表明城市土地利用不仅是非点源污染产生的根源, 也是污染物迁移的媒介, 土地利用及其变化对非点源污染存在显著影响^[8-14]. 城市不透水下垫面的增加以及地下排水管道系统的建设, 使得城市非点源污染有别于农业非点源污染, 且控制难度更大. 目前, 控制污染物质进入水体的方法主要是最佳管理措施(best management practices, BMPs)在污染物产生的源和地表径流的迁移过程中截流并处理污染物^[15, 16]. 现阶段城市非点源污染控制效果方面的研究多集中在地表污染物累积负荷实测以及土地利用变化所造成的非点源污染负荷量变化^[17-22], 而在流域或小汇水单元内进行控制措施的去污效果评估却不多.

应用模型模拟非点源污染负荷以及管理措施效果, 常见的模型有 AGNPS^[23]、ANSWERS 模型^[24]、SWAT 模型^[25]、暴雨管理模型(SWMM)^[26]等. 目前, 多数模型被引入到农业非点源污染控制中, 而在城市非点源污染控制方面研究得比较少^[27-29]. 在国外, L-THIA 模型已经被应用于土地规划和水资源管理, 尤其是在评估土地利用变化所带来的水文和非点源污染负荷变化以及土地利用的中长期发展规划中^[30-33]. 除此之外, 土地利用变换模型与环境影响评价模型的结合使用, 以预测未来城市土地利用变换及其所可能引发的环境影响, 例如 Tang 等^[34]便利

收稿日期: 2006-11-28; 修订日期: 2007-03-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601022); 国家自然科学基金委创新群体项目(40321101)

作者简介: 郭青海(1980~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市景观生态规划和非点源污染控制, E-mail: gqhsanmei@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: mkm@rcees.ac.cn

用 LTM 与 L-THIA 模型模拟 Muskegon 河流域 1995、2020 和 2040 年城市用地结构变化并评估其所造成的非点源污染负荷变化.然而在流域或小汇水单元尺度上,并未量化模拟所采取的非点源污染控制措施去除效果.

本文在总结已有研究的基础上^[17-21, 35, 36],基于“源-汇”理论和格局和过程相互作用的原理,以武汉市汉阳地区三角湖流域 2 个小汇水单元为例,利用 L-THIA 模型^[37, 38]模拟小汇水单元不同土地利用类型上的非点源污染物累积量,并结合三角湖流域现有城市用地格局,调整或引入新的 BMPs,量化管理措施的组合效果.旨在通过模拟探讨小汇水单元尺度上具体景观类型中,非点源污染控制措施设计及其去污效果.

1 研究区概况

汉阳区位于湖北省武汉市西南(图 1),地理位置 114°30′~114°17′E, 30°25′~30°36′N.汉阳区属北亚热带季风性湿润气候,多年平均气温 15.8~17.8℃,年平均降水量为 1 150~1 450 mm,降雨集中在每年 4~9 月,大暴雨多集中在 6、7 月份.三角湖湖泊面积 237.92 hm²,流域面积 1 123.56 hm².近 5 a 三角湖流域不透水地面积增加迅速,从 1998 年的 23.83% 增加到 2003 年的 68.66%,主要在于江汉大学新校区坐落在三角湖畔,以及沿湖周边度假村、高级住宅小区的建设.湖水水质检测为 V 类.



图 1 研究区域位置
Fig.1 Location of research area

三角湖流域土地利用类型包括沟渠、塘、农田、林地、天然草地、农村居民区、城市居民区、商业用地、工矿用地、教育用地、非透水性道路、公共设施、

平整地和滩地等 14 种类型.本研究对象是小汇水单元 Sj1 和 Sj2(图 2、3).Sj1 面积 148.56 hm²,有 7 种用地类型,Sj2 面积 512.70 hm²,有 14 种有地类型(表 1).Sj1 以农田、塘等农业用地为主,塘和农田面积占 Sj1 陆地面积的 78.86%;城市居民用地、商业用地、工矿用地、非透水路、公共设施及平整地等城市用地类型多集中在 Sj2 出现.

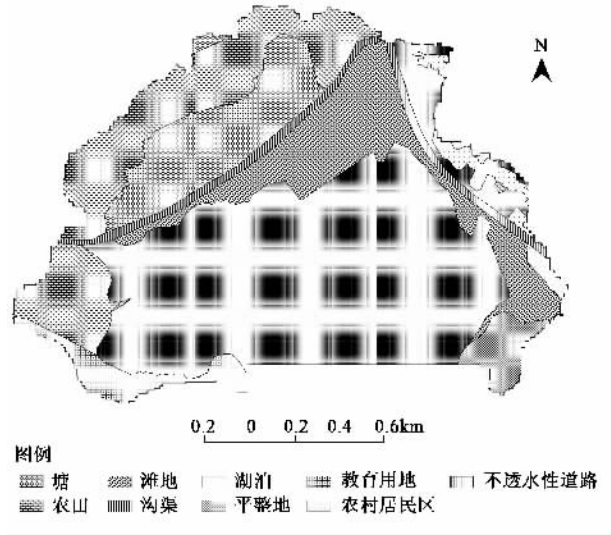


图 2 Sj1 小汇水单元土地利用分类
Fig.2 Land use classification of Sj1

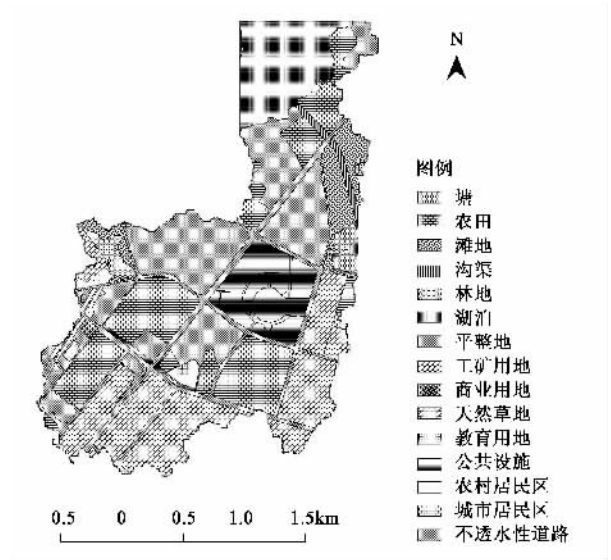


图 3 Sj2 小汇水单元土地利用分类
Fig.3 Land use classification of Sj2

2 研究方法

2.1 研究思路

城市非点源污染物迁移过程分为 3 个阶段,即

表 1 Sj1 和 Sj2 小汇水单元用地面积比例¹⁾/%

Table 1 Proportion of land use types in Sj1 and Sj2/%

小汇水单元	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	合计
Sj1	3.62	45.82	33.04			4.37				5.90	2.61		4.64		100.00
Sj2	0.91	2.94	0.06	0.15	0.02	1.13	21.57	0.27	21.84	0.83	10.62	9.49	24.98	5.21	100.00

1)A 为沟渠,B 为塘,C 为农田,D 为林地,E 为天然草地,F 为农村居民区,G 为城市居民区,H 为商业用地,I 为工矿用地,J 为教育用地,K 为非透水性道路,L 为公共设施,M 为平整地,N 为滩地

“源-过程-汇”(图 4).流域尺度上,陆地用地类型为污染源,经雨水冲刷通过地表径流和地下管网进入湖泊.具体到小汇水单元尺度,由于用地类型的空间分布存在差异,造成一些用地类型起到“源”的作用,一些用地类型起到“汇”的作用^[15].另一方面,不透水下垫面的增加使得城市污染物质吸收与释放平衡遭到破坏,起到“汇”作用的用地类型所能吸收的污染物质远远低于在自然或半自然状态,造成过多的污染物随径流进入水体.因此,控制非点源污染物进入湖泊的途径有 2 种:1 种是在源头减少污染物的释放,另 1 种是在迁移过程中截流、除去污染物.

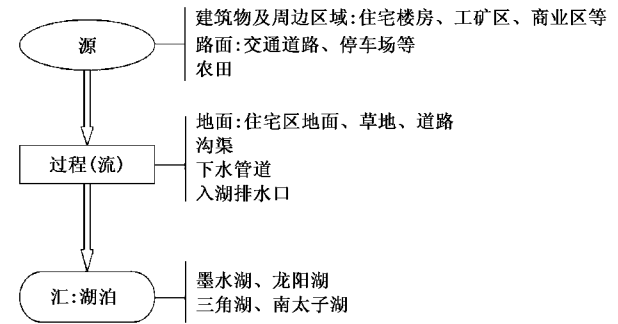


图 4 污染物迁移过程

Fig.4 Diffuse of pollutants

本研究考虑到地表污染物累积量由 2 部分组成,一是前一次典型降雨或几次少量降雨后残存于地表的污染物,另一是前次降雨与此次降雨间隔期所产生的污染物.当 1 次典型降雨发生时,汉阳地区累积污染物在 1.5~2.0 h 内基本冲刷干净,然而部分污染物在其迁移过程中会被滞留于某些用地类型中,径流携带的污染物占地表总污染物的 90% 以上^[21].因此本研究针对一场暴雨 2.0 h 内的径流进行控制治理,模拟 90% 地表累计污染物的控制效果.

2.2 BMPs 设计

从污染物产生的源和污染物迁移过程(图 4)采用较成熟的即经济又简便的 BMPs 方法(图 5)及其组合(系列化最佳管理措施, BMPs in series)^[39, 40]. Sj1 以农业用地类型为主,主要类型为农田和滩地,其非

点源污染侧重于农业非点源污染. Sj1 中滩地面积较大,且与三角湖紧邻,采用植被过滤带进行控制比较合适. Sj2 城市化水平逐年提高,突出体现为新式居民住宅区和江汉大学新校区的建成.地表径流污染物经雨水冲刷后流经各种 BMPs 后进入排水管道,最后在入湖排水口处采用湿塘或人工湿地等措施吸收污染物质.以城市居民住宅小区为例,根据降雨径流迁移过程,控制措施设计如下:第 1 步是在以家庭庭院或楼层为单元上的控制措施,每栋楼房的前后开放空间置有渗透性较强的草地,此处雨水可被过滤和渗透;经过草地后流入雨水储存池(或渗透池),此处将部分物质沉淀并再次进行渗透,最后通过管道排入邻近沟渠或通过排水管道进入湖泊.整个过程将草地、渗透池和湿地连接起来,形成完整的治理链.此外,尽可能增加小区透水性地面,减小地表径流量.

对于市政交通道路这类不透水性路面,在道路两边增加渗透性较强的渗透沟渠,经处理的雨水进入雨水管网.而在地表径流可以直接进入三角湖的湖泊周边地带,设置植被过滤带和湿塘以消减污染物质.

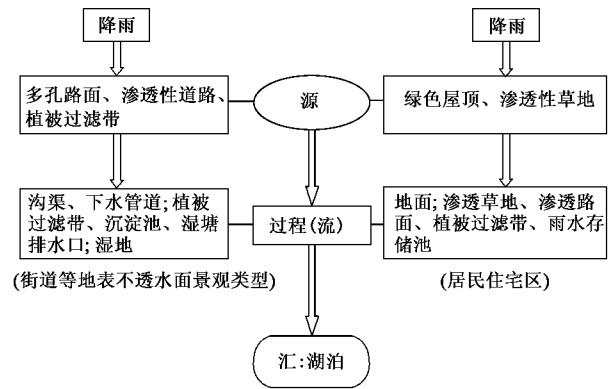


图 5 系列化管理措施

Fig.5 Sketch map of BMPs in series

2.3 L-THIA 模型

L-THIA 模型全称为长期水文影响评价模型(long-term hydrologic impacts assessment of land use

changes model), 该模型以 Arcview 为平台, 作为其中的 1 个扩展模块, 其运算核心为 CN 法^[41]. 某一土地利用类型(不同土地利用类型的 CN 值不同)的径流深、降雨深之间的关系以及 L-THIA 模型数据输入和运行可参见文献[41].

将汉阳地区长时期的气候、土壤和土地利用数据输入模型, 计算该区域的年均径流量和非点源污染负荷. 本研究选取 TN、TP、TSS、BOD、COD 和 Zn 等 6 种污染物进行污染物负荷模拟.

表 2 管理措施去污效果¹⁾

Table 2 Effects of BMPs		
措施	作用	去除效果
草地	1. 作为径流去污的预处理; 2. 替代灌丛、排水管道, 在房屋和道路旁控制径流	TSS: 76%, TP: 49%, TN: 30%, NO _x : 67%, Zn: 44%
多孔路面	1. 减弱径流量和流速; 2. 无需额外土地耗费	TSS: 95%, TP: 65%, TN: 83%, Zn: 99%
渗透池/渠	1. 减弱径流量和流速; 2. 对颗粒物污染物除去较高;	TSS: 100%, TP: 42%, TN: 42%, NO _x : 82%
植被过滤带	1. 一种预处理; 2. 减缓径流速率, 去除颗粒污染物; 3. 提供较理想的野生生境	TSS: 81%, TP: 34%, TN: 84%, NO _x : 31%, Zn: 71%
湿塘	1. 减弱洪峰径流; 2. 聚集、积淀颗粒污染物	TSS: 80%, TP: 51%, TN: 33%, NO _x : 43%, Zn: 66%

1)数据来源于文献[44]

3 结果与分析

L-THIA 模型模拟 Sj1 和 Sj2 中用地类型上的非点源污染负荷量, 其 90% 的污染负荷量见表 3.

Sj1 除了农田中的 6 种非点源污染物负荷高于 Sj2 外, 城市居民区、农村居民区和工矿用地上的各污染物负荷量均低于 Sj2; 2 个小汇水单元内草地上

2.4 BMPs 去污效果

本研究采用草地、多孔路面、渗透池/渠、植被过滤带和湿塘等 5 种工程类 BMPs(表 2). 5 ~ 30 m 宽的植被过滤带能够达到保护湖泊水质的目标^[42]. 占流域面积 1% ~ 5% 的湿地或者湿塘可以去除大部分的过境营养物质^[43], Sj1 中湿地和湿塘的建立面积是 1.49 ~ 7.43 hm², Sj2 中湿地和湿塘的建立面积是 5.13 ~ 25.64 hm². 各种 BMPs 的具体设计和去污效果可参见文献[44].

的各污染物负荷量相接近. Sj1 污染物总量为 1.82 × 10⁴ kg; Sj2 城市化进程日趋强烈, 6 类污染物在土地利用类型上的污染负荷总量为 1.38 × 10⁵ kg. 以 1 次典型暴雨径流携带 90% 的地表污染量计, Sj1 和 Sj2 被径流所携带的污染物总量分别为 1.64 × 10⁴ kg 和 1.25 × 10⁵ kg.

3.1 “源”处污染物负荷量及去除效果

表 3 Sj1、Sj2 用地类型上 90% 的非点源污染负荷¹⁾/kg

Table 3 90% NPS loads on land use types of Sj1 & Sj2/kg							
小汇水单元	用地类型	TN	TP	TSS	Zn	BOD	COD
Sj1	农田	100.00	29.54	2 431.85	0.36	90.91	0.00
	草地	11.15	0.16	15.94	0.10	7.97	0.00
	城市居民区	15.59	4.88	351.10	0.68	218.37	423.88
	农村居民区	21.51	6.74	484.66	0.95	301.43	585.14
	工矿用地	21.23	4.72	1 019.52	4.13	44.07	766.75
	总计	169.48	46.04	4 303.07	6.22	662.75	1 775.77
Sj2	农田	1.47	0.43	35.60	0.005 3	1.33	0.00
	草地	10.31	0.14	14.73	0.088	7.36	0.00
	城市居民区	645.58	202.19	14 543.32	28.38	9 045.23	17 558.39
	农村居民区	15.42	4.83	347.32	0.68	216.02	419.32
	工矿用地	757.82	168.41	36 387.55	147.36	8 420.27	27 365.83
	商业用地	57.06	13.63	2 363.21	7.67	979.34	4 939.33
	林地	0.027	0.000 38	0.036	0.000 23	0.018	0.00
	总计	1 487.69	389.63	53 691.77	184.18	18 669.57	50 282.87

1)COD 和 BOD 的去除率以表 2 中的氮氧化合物(NO_x)去除效果来表示

农田、城市居民区、农村居民区、工矿用地和商业用地是城市非点源污染物产生的源. S_{j1} 中农田、城市居民区、农村居民区和工矿用地等 4 种用地类型 90% 污染物负荷总量为 6 928.01 kg, 其中农田占 38.29%, 工矿用地占 26.85%, 农村居民区和城市居民区较低, 分别占到 20.21% 和 14.64% (表 3). 而在 S_{j2} 中作为源的用地类型除去农田、城市居民区、农村居民区和工矿用地外, 还包括商业用地. S_{j2} 上 90% 污染物总量为 1.25×10^5 kg, 其中工矿用地和城市居民区的污染物负荷最高, 分别占到污染物总量的 58.75% 和 33.71%, 商业用地、农村居民区和农

田的污染物负荷量较低(表 3).

三角湖流域中城市居民区多为住宅小区, 控制措施采用绿色屋顶、渗透性草地和多孔路面; 农村居民区多为庭院式房屋, 设置为绿色屋顶、多孔路面和草地; 工矿用地则在径流迁移末端采用渗透渠; 农田分布在临近湖泊的区域, 直接进入湖泊的径流多发生在这个区域; 植被过滤带和湿塘不仅应用于农田非点源污染物的控制, 也是整个控制措施治理的末端措施. S_{j1} 和 S_{j2}“源”处用地类型上的 BMPs 设计和去除效果见表 4.

S_{j1} 中采取的措施组合可除去大约 35.34% ~

表 4 S_{j1}、S_{j2} 土地利用类型治理措施
Table 4 BMPs in S_{j1} & S_{j2}

小汇水单元	土地利用类型	措施	去除污染量/kg
S _{j1}	城市居民区	绿色屋顶 + 草地 + 多孔路面	795.61
		绿色屋顶 + 草地 + 多孔路面 + 渗透渠	974.77
	农村居民区	绿色屋顶 + 多孔路面 + 草地	1 098.28
		草地 + 渗透渠	1 799.93
	农田	植被过滤带	2 092.28
		植被过滤带 + 湿塘	2 504.19
S _{j2}	城市居民区	绿色屋顶 + 草地 + 多孔路面	32 956.31
		绿色屋顶 + 草地 + 多孔路面 + 渗透渠	40 377.19
	农村居民区	绿色屋顶 + 多孔路面 + 草地	787.06
		草地 + 渗透渠	70 681.54
	商业用地	多孔路面 + 草地	6 369.46
		植被过滤带	30.64
	农田	植被过滤带 + 湿塘	36.67

38.94% 的污染物, 其中在城市居民区中可除去 4.86% ~ 5.95% 的污染物, 农村居民区中可除去 6.71%, 工矿用地中可除去 10.99%, 农田中可除去 12.78% ~ 15.29%. S_{j2} 采取的各项措施, 可除去大约 88.99% ~ 94.96% 污染物, 其中在工矿用地中去除量最高, 可除去 56.76% 的污染物, 在城市居民区中可除去 26.46% ~ 32.42%, 农村居民区中除去 0.63%, 商业用地中可除去 5.11%, 农田中可除去 0.02% ~ 0.03% .

3.2 “过程”和“汇”处的污染物负荷量及去除效果模拟

在入湖排水口处, 湿塘和植被过滤带作为末端处理措施(表 5). S_{j1} 经多种措施处理后最终进入三角湖的污染物总量为 289.01 kg, 占小汇水单元总污染量的 14.65%. S_{j2} 最终进入三角湖的污染物总量为 3 672.78 kg, 占 S_{j2} 总污染量的 6.57% .

4 讨论

末端措施处理前, S_{j1} 除去 38.94% 非点源污染

表 5 S_{j1}、S_{j2} 末端治理效果

Table 5 Effects of practices at the end of S_{j1} & S_{j2}

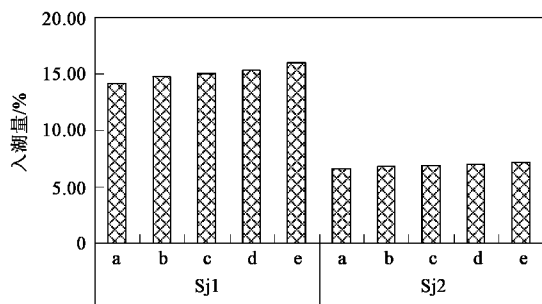
小汇水单元	类型	措施	去除污染量/kg
S _{j1}	草地(滩地)	植被过滤带	24.87
	排水口	湿塘	272.31
S _{j2}	草地(滩地) + 排水口	湿塘	2 780.95

物, 经植被过滤带和湿塘处理后进入三角湖的污染量为总污染量的 14.65%, 去除率达 46.41% . 在以农业用地类型为主的 S_{j1} 中, 作为末端处理的植被过滤带和湿塘是必要的控制措施. 在以城市用地类型为主的 S_{j2} 中, 植被过滤带和湿塘的建立也是必要的, 尽管“源”与“过程”处已除去 94.96% 的污染物, 然而仍然有 6 421.08 kg 污染物进入下一过程; 经湿塘处理后, 则有 2 780.95 kg 污染物最终进入三角湖, 除去约一半的污染物. 另一方面, 2 个小汇水单元中污染物迁移方式略有不同, S_{j1} 中临近湖泊区域的径流经过滩地直接进入湖泊, 而其他“源”处的非点源污染物则通过城市地下管网进入湖泊; S_{j2} 由

于不透水下垫面的面积比例较高,径流基本上通过地下管网进入三角湖,因此 2 个汇水单元末端处理措施存在差别.此外,植被过滤带和湿塘的设置集中在临湖区域,滩地和农田是这一区域的主要用地类型,控制措施与其它用地类型间存在一定的竞争关系,控制措施的设置必然导致农田面积的减少,然而三角湖风景区的建立使得这一矛盾在本研究中得以解决.

本研究的非点源污染控制措施可以纳入汉阳地区正在逐步建立的各级公共绿地体系.多孔路面已经在城市居民区得到广泛应用,然而本研究所模拟的不同实施强度下多孔路面的最终去污效果并不存在明显差异(图 6).渗透渠对于非点源污染物去除有显著作用.以城市居民区为例,Sj1 中设置渗透渠比未设置渗透渠时多除去了 81.85% 的污染物,在 Sj2 中多除去 81.74% 污染物.渗透渠是非点源污染控制的一个必要措施.

绿色屋顶的建设,主要作用在于增加城市绿色空间,减轻城市地下管网的水量负荷.尽管绿色屋顶能够显著地减少暴雨高峰期的径流量^[45],然而对大气沉降所形成的屋顶非点源污染去除效果,现阶段国内外进行的研究鲜见.通常绿色屋顶与其它控制措施结合使用,因此本研究对于居民住宅区的非点源污染控制措施设计依然添加绿色屋顶,但是未应用于去除效果模拟中.



图中 a 指多孔路面 100% 实施, b 指 66.67%, c 指 50%, d 指 33.33%, e 指不实施多孔路面

图 6 多孔路面不同实施强度下污染物入湖量

Fig.6 Amount of total pollutants entering the lake under five porous pavement conditions

利用实测数据对模型进行校准并验证其模拟预测的有效性是非常重要的.尽管已有许多学者对 L-THIA 模型有效性验证进行了大量的研究^[46~48],然而至今尚未能精确地用实测数据来验证 L-THIA 模型的有效性.由于本研究主要目的是模拟污染物负

荷量,应用于非点源污染控制规划管理以及长期城市土地利用规划,因此为了能够为因土地利用变化而引起的长期水体非点源污染影响提供有用信息,本研究不得不允许这一缺憾的存在.

5 结论

(1)在污染物迁移的“源”阶段,城市用地类型上的 BMPs 设计如下:城市居民区采取绿色屋顶 + 草地(+多孔路面)+渗透渠,农村居民地采取绿色屋顶 + 多孔路面 + 草地,商业用地采取多孔路面 + 草地,工矿用地采取草地 + 渗透渠,而农田则采用植被过滤带 + 湿塘.作为末端处理措施,植被过滤带和湿塘的去污效果明显.不管是在农业用地为主的小汇水单元中还是以城市用地为主的小汇水单元中,植被过滤带和湿塘都是必要的非点源污染控制措施.

(2)L-THIA 模型与系列化 BMPs 相结合,可以模拟控制规划所要采取的最佳管理措施去污效果.尤其在流域或区域尺度上,由于工程比较繁杂,尽可能在工程建设之前进行效果预测,减少不必要的风险,给决策系统提供强有力支持.

参考文献:

- [1] 施为光. 城市降雨径流长期污染负荷模型的探讨[J]. 城市环境与城市生态, 1993, 6(2): 6~10.
- [2] 宫莹,阮晓红,胡晓东. 我国城市地表水环境非点源污染的研究进展[J]. 中国给水排水, 2003, 19(3): 21~23.
- [3] Schiff K C, Allen M J, Zeng E Y, et al. Southern California[J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, 41: 76~93.
- [4] Grant S B, Sanders B F, Boehm A B, et al. Generation of enterococci bacteria in a coastal saltwater marsh and its impact on surf zone water quality[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(12): 2407~2416.
- [5] Jiang S, Noble R, Chu W P. Human adenoviruses and coliphages in urban runoff impacted coastal waters of Southern California[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, 67: 179~184.
- [6] Dwight R H, Semenza J C, Baker D B, et al. Association of urban runoff with coastal water quality in Orange country, California[J]. Water Environment Research, 2002, 74(1): 82~90.
- [7] Bay S, Jones B H, Schiff K, et al. Water quality impacts of stormwater discharges to Santa Monica Bay [J]. Marine Environmental Research, 2003, 56: 205~223.
- [8] 陈利顶,傅伯杰,张淑荣,等. 异质景观中非点源污染动态变化比较研究[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 808~806.
- [9] 梁涛,王浩,张秀梅,等. 不同土地类型下重金属随暴雨径流迁移过程及速率对比[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1756~1760.
- [10] Tong S T Y. The hydrologic effects of urban land use: A case study of the Little River Basin[J]. Landscape & Urban Planning, 1990, 19: 99~105.

- [11] Gburek W J, Folmar G J. Flow and chemical contributions to streamflow in an upland watershed: a baseflow survey[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, **217**: 1 ~ 18.
- [12] León L F, Soulis E D, Kouwen N, *et al.* Nonpoint source pollution: a distributed water quality modeling approach[J]. *Water Research*, 2001, **35**(4): 997 ~ 1007.
- [13] Brezonik P L, Stadelmann T H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Miniesota, USA [J]. *Water Research*, 2002, **36**: 1743 ~ 1757.
- [14] 郭青海, 马克明, 杨柳. 城市非点源污染的主要来源及分类控制对策[J]. *环境科学*, 2006, **27**(11): 2170 ~ 2175.
- [15] 陈利顶, 傅博杰, 徐建英, 等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数[J]. *生态学报*, 2003, **23**(11): 2406 ~ 2413.
- [16] Reeves R L, Grant S B, Mrse R D, *et al.* Scaling and management of fecal indicator bacteria in runoff from a coastal urban watershed in Southern California [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**: 2637 ~ 2648.
- [17] 施为光. 街道地表物的累积与污染特征——以成都市为例[J]. *环境科学*, 1991, **12**(3): 18 ~ 23.
- [18] 车武, 汪慧珍, 任超, 等. 北京城区屋面雨水污染及利用研究[J]. *中国给水排水*, 2001, **17**(6): 57 ~ 61.
- [19] 赵剑强, 闫敏, 刘珊, 等. 城市路面径流污染的调查[J]. *中国给水排水*, 2001, **17**(1): 33 ~ 35.
- [20] 郭琳, 曾光明, 程运林. 城市街道地表物特征分析[J]. *中国环境监测*, 2003, **19**(6): 40 ~ 42.
- [21] 何庆慈, 李立青, 孔玲莉, 等. 武汉市汉阳区的暴雨径流污染特征[J]. *中国给水排水*, 2005, **21**(2): 101 ~ 103.
- [22] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 茅坪河流域非点源污染负荷模拟[J]. *环境科学*, 2006, **27**(11): 2176 ~ 2181.
- [23] Young R A, Onstad C A, Bosch D, *et al.* AGNPS: A non-point source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, **44**(2): 168 ~ 173.
- [24] Beasley K B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1980, **23**(4): 938 ~ 944.
- [25] Arnold J G, Williams J R, Srinivasan R, *et al.* SWAT-Soil and water assessment tool-user manual [R]. Agricultural Research Service. Grassland, Soil and Water Research Lab, US Department of Agriculture, 1994.
- [26] Huber W C, Dickinson R E. Storm water management model version 4: User's manual [M]. US Environmental Protection Agency, 1988. 569.
- [27] 张玉珍, 陈能汪, 曹文志, 等. 南方丘陵地区农业小流域最佳管理措施模拟评价[J]. *资源科学*, 2005, **27**(6): 151 ~ 155.
- [28] 曹文志, 洪华生, 张玉珍, 等. AGNPS 在我国东南亚热带地区的检验[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(4): 537 ~ 540.
- [29] Hipp J A, Ogunseitan O, Lejano R, *et al.* Optimization of stormwater filtration at the urban/watershed interface [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40** (15): 4794 ~ 4801.
- [30] Bhaduri B, Minner M, Tatalovich S, *et al.* Long-term hydrologic impact of urbanization : a tale of two models [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2001, **127**: 13 ~ 19.
- [31] Minner M, Harbor J, Happold S, *et al.* Cost apportionment for a storm water management system: differential burdens on landowners from hydrologic and area-based approaches[J]. *Applied Geographic Studies*, 1998, **2**: 247 ~ 260.
- [32] Grove M, Harbor J, Engel B, *et al.* Impacts of urbanization on surface hydrology, Little Eagle Creek, Indiana, and analysis of L-THIA model sensitivity to data resolution[J]. *Physical Geography*, 2001, **22**: 135 ~ 153.
- [33] Kim Y, Engel B A, Lim K J, *et al.* Runoff impacts of land-use change in Indian River Lagoon watershed[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, **7** (3): 245 ~ 251.
- [34] Tang Z, Engel B A, Pijanowski B C, *et al.* Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale [J]. *Journal of Environmental Management*, 2005, **76**: 35 ~ 45.
- [35] Gromaire-Mertz M C, Gamaud S, Gonzalez A, *et al.* Characterisation of urban runoff pollution in Paris[J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39** (2): 1 ~ 8.
- [36] Vaze J, Chiew F H S. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface[J]. *Urban Water*, 2002, **4**: 379 ~ 389.
- [37] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响[J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 32 ~ 39.
- [38] Bhaduri B, Harbor J, Engel B A, *et al.* Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land use change using a GIS-NPS model[J]. *Environmental Management*, 2000, **26** (6): 643 ~ 658.
- [39] 郭青海, 马克明, 赵景柱, 等. 城市非点源污染控制的景观生态学途径[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(5): 977 ~ 981.
- [40] Barr Engineering Company. BMPs in Series. In: Barr Engineering Co. Urban Small Sites Best Management Practice Manual-Stormwater BMPs for Cold Climates [M]. Minnesota: Minnesota Council Environmental Services, 2001. 3221 ~ 3226.
- [41] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 汉阳非点源污染控制区划[J]. *环境科学*, 2006, **27**(1): 31 ~ 36.
- [42] 高超, 朱继业, 窦俭怡, 等. 基于非点源污染控制的景观格局优化方法与原则[J]. *生态学报*, 2004, **24**(1): 109 ~ 116.
- [43] Hey D L, Barrett K R, Biegen C. The hydrology of four experimental constructed marshes [J]. *Ecological Engineering*, 1994, **3**: 319 ~ 343.
- [44] US EPA Office of Water. National Management Measures to Control Nonpoint Source Pollution from Urban Areas[R]. 2005.
- [45] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, **77**(3): 217 ~ 226.
- [46] Bhaduri B, Grove M, Lowry C, *et al.* Assessing long-term hydrologic effects of land use change[J]. *Journal of the American Water Works Association*, 1997, **89**(11): 94 ~ 106.
- [47] Minner M, Harbor J, Happold S, *et al.* Cost apportionment for a storm water management system: differential burdens on landowners from hydrologic and area-based approaches[J]. *Applied Geographic Studies*, 1998, **2**: 247 ~ 260.
- [48] Leitch C, Harbor J. Impacts of land use change on freshwater runoff into the near-coastal zone, Holetown Watershed, Barbados: Comparisons of long-term to single-storm effects[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, **3**: 584 ~ 592.