

不同土地利用格局对降雨径流污染影响研究

魏职宾,何国羽,陈前虎

(浙江工业大学 建筑工程学院,杭州 310014)

摘要: 当点源污染得到有效控制时,非点源污染就成为影响地表水质的主要因素之一。以杭州市地形图和谷歌地图为基础,借助 AutoCAD 和湘源控规 5.0 软件,绘制出杭州市 7 个典型控规单元的土地利用现状图,通过 SPSS 软件分析了单元内部土地利用格局指标对道路降雨径流污染物的影响。研究表明:非交通性道路公交车站点密度和非交通性道路网密度的提高,对于改善道路径流起到决定性的作用;合理的土地利用结构,能够有效抑制机动车出行并起到改善道路径流水质的作用。最后,对于减少城市非点源污染,提出防治城市道路非点源污染的相关建议。

关键词: 土地利用结构;道路交通结构;径流污染;相关关系;水质指标

中图分类号: TU984.191;X522

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2014)06-0443-08

Research on influence of different land use patterns on rainfall runoff pollution

WEI Zhibin, HE Guoyu, CHEN Qianhu

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: When the point pollution source has been effectively controlled, the non-point pollution source becomes one of the main factors influencing the water quality of surface water. Based on the topographic map of Hangzhou and the Google maps, using the AutoCAD software and Xiangyuan regulatory 5.0 software, the current land utilization situation of seven typical regulatory units in Hangzhou city is presented. By the software SPSS, the influence of the indexes of inner land utilization structure on the runoff pollution from road rainfall is analyzed. The study shows that the density of both the bus station site and the road network on non-traffic roads plays a decisive role in improving the road runoff. A reasonable land utilization structure effectively inhibits the motorized mobility and improves the water quality of road runoff. Thus, relevant suggestions for the prevention and cure of the urban non-point pollution source are put forward.

收稿日期: 2014-10-12

作者简介: 魏职宾(1988—),男,安徽省定远人,硕士研究生,研究方向为城市土地利用与水环境优化。

Key words: land use structure; road traffic structure; runoff pollution; correlation; water quality parameters

随着城市的发展和居民收入水平的不断提高,城市交通逐渐形成了以小汽车为主导的混合通勤结构,然而机动车保有量的迅猛增长已经超过了城市道路交通设施的承载能力,由此带来的交通拥堵和地表径流污染日益严重。在城市点源污染得到有效控制后,非点源污染就成为影响地表水质的主要因素^[1]。路面作为城市硬铺地的主要形式之一,在雨水的冲刷下,道路上的有机物、悬浮颗粒、营养盐、多环芳烃和重金属等污染物质直接随地表径流排入城市受纳水体,从而引发水体富营养化和水生态系统破坏,并可通过皮肤吸收、吞食和吸入等途径进入机体,危害人体健康^[2-5]。

自 20 世纪 60 年代中期以来,国际社会就意识到城市地表径流是城市内河水体的主要污染源之一。欧美等国家更加重视结合城市道路径流污染物的特征而制定城市管控措施,道路径流污染已逐渐发展成为一个具有自身特征且相对独立的研究领域^[6]。中国自 20 世纪 80 年代中期开始城市非点源污染的研究工作,现有的国内外研究主要从不同的尺度和视角探究关于污染物来源与排放特征^[7-10]、道路重金属污染特征^[11-12]、土地利用与河流水质相关关系^[13-16]、不同下垫面降雨径流水质特征^[17-19]、基于遥感和 GIS 景观格局与水文效应的关系^[20-21],这些研究初步分析了道路径流中污染物种类特征及其相关关系,但尚未触及土地利用格局对道路降雨径流污染影响的相关研究。

在前人研究的基础上,本研究选取杭州市 7 个典型的控规单元,分析了单元内部道路交通结构和土地利用结构对道路径流污染物的影响程度,旨在通过土地利用格局优化途径,为城市非点源污染控制和水环境治理提供相关依据。

1 研究方法

以谷歌地图和杭州市地形图为基础,通过现场实际校勘,将单元内土地利用类型主要划分为交通性道路、非交通性道路、商业用地和住宅用地。采用 AutoCAD 和湘源控规 5.0 软件绘制并计算出 7 个单元土地利用现状图(图 1)。运用统计软件 SPSS 进行聚类分析、相关性分析和回归分析,研究揭示土地利用格局对道路降雨径流污染物的影响。

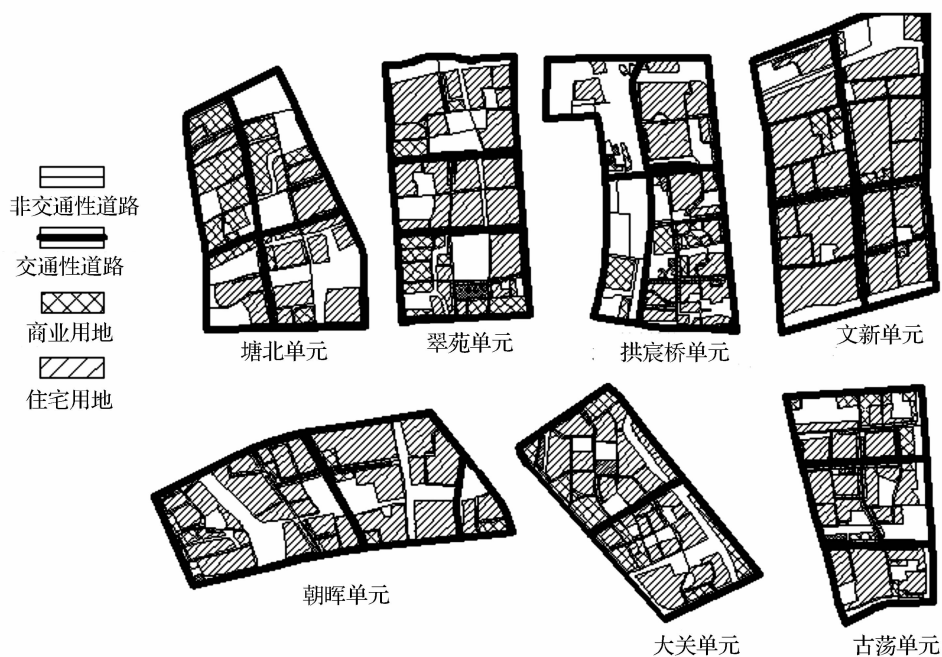


图 1 土地利用现状图

Fig. 1 Current land use map

1.1 研究单元概况

本研究主要选取了杭州市文新、塘北、翠苑、古荡、朝晖、大关和拱宸桥7个控规管理单元。其中文新和塘北单元为新兴的城市住宅区块,单元内部功能相对单一,周边商业和公共活动空间配套比例不均衡,交通性道路网比较发达且公交线网集中在交通性道路上,潮汐式的跨区通勤交通明显。翠苑、古荡、朝晖和大关单元为老城区代表,单元内部路网密度都比较高,非交通性路网相对发达,周边公交线网大部分集中在交通性道路上,沿街商业比例较高,但内部缺少适于步行化的公共区域空间,社区临近商业配套不均衡,从而在一定程度上刺激了机动化出行。拱宸桥单元为成熟的城市住宅区块,单元内部路网密度相对较高且支路网发达,一定数量的非交通性道路公交站点和通而不畅的非交通性道路有效地抑制了机动化出行,从而为步行化创造了良好的环境;同时,拱宸桥单元本身拥有多类型和规模化的步行休闲空间网络,包括运河两侧的滨水休闲长廊、桥西历史街区、运河广场和社区公园等,形成了极具人气的城市公共休闲活动区域,均衡的商住比和非交通性道路沿街商铺为居民的就近出行购物提供了便利。

1.2 城市土地利用格局指标概念

在土地利用现状图的基础上,选取路网密度、非交通性道路网密度、交通性道路网密度、交通性道路公交站点密度、非交通性道路公交站点密度、商住比和非交通性道路沿街商铺长度比7个指标来表征研究街区的土地利用格局特征。

1)路网密度:测度街区整体可达性水平,路网密度=街区道路总长度/街区面积。

2)非交通性道路网密度:主要为支路(不包括宅前小路),红线宽度4~20 m,以出入街区内部交通为主,车流量较小,测度非机动化出行环境,非交通性道路网密度=非交通性道路总长/街区面积。

3)交通性道路网密度:主要为城市快速路、主干路和次干路,一般红线宽度在20 m以上,以穿越街区的过境交通为主,测度机动化出行环境,交通性道路网密度=交通性道路总长/街区面积。

4)交通性道路公交站点密度:测度交通性道路公共交通的供给水平,交通性道路公交站点密度=交通性道路公交站点个数/街区面积。

5)非交通性道路公交站点密度:测度非交通性道路公共交通的供给水平,非交通性道路公交站点密度=非交通性道路公交站点个数/街区面积。

6)商住比:测度用地功能的混合度,商住比=商业用地面积/住宅用地面积。

7)非交通性道路沿街商铺长度比:测度街道临近商业配套程度,非交通性道路沿街商铺长度比=非交通性道路有沿街商铺的长度/非交通性道路总长度。

1.3 城市土地利用格局指标数据

7个单元的城市土地利用格局指标数据汇总见表1。

表1 土地利用格局指标

Table 1 Land use patterns indicators

单元	区块面积/ km ²	商住比/ (km ² · km ⁻²)	非交通性道路 沿街商铺长度 比/(km · km ⁻¹)	路网密度/ (km · km ⁻²)	非交通性 道路网密度/ (km · km ⁻²)	交通性道 路网密度/ (km · km ⁻²)	交通性道路 公交站点密度/ (个 · km ⁻²)	非交通性道路 公交站点密度/ (个 · km ⁻²)
文新	2.8	0.12	0.06	5.95	2.15	3.8	10.00	0
塘北	2.1	0.96	0.34	7.48	3.15	4.33	9.05	0
翠苑	2.0	0.44	0.13	9.04	5.06	3.98	9.75	2.50
古荡	1.7	0.33	0.20	8.36	4.64	3.72	8.53	1.18
朝晖	2.4	0.16	0.26	7.00	3.60	3.4	7.92	2.50
大关	1.7	0.40	0.14	8.42	4.74	3.68	6.47	1.18
拱宸桥	2.2	0.38	0.22	9.10	4.43	4.67	6.36	3.18

注:1)沿街商铺长度比以道路两边都有商业的计算,一边有的取一半计算;2)因与内部单元共用,每个单元周围的公交站点和非交通性道路在计算时都取一半计算。

1.4 样本采集及指标选取分析

1.4.1 样品采集

本研究中,采样点均位于研究单元内部非交通性道路上,每个单元内部设置 4 个采样点,如图 2 所示。在连续晴天 7 d 以上同一场降雨 10 min 形成径流后,用 1 L 聚乙烯采样瓶在非交通性道路汇集径流的雨水篦口处进行采样,同时用 1 L 聚乙烯采样盆在各个单元中间内部空旷处采集一瓶自然雨水作为本次试验的对照组。水质数据选用 2014 年平水期(3—4 月)和丰水期(5—7 月)的采样数据,每个单元选取丰水期和平水期多个样本的平均值作为径流污染水质指标。

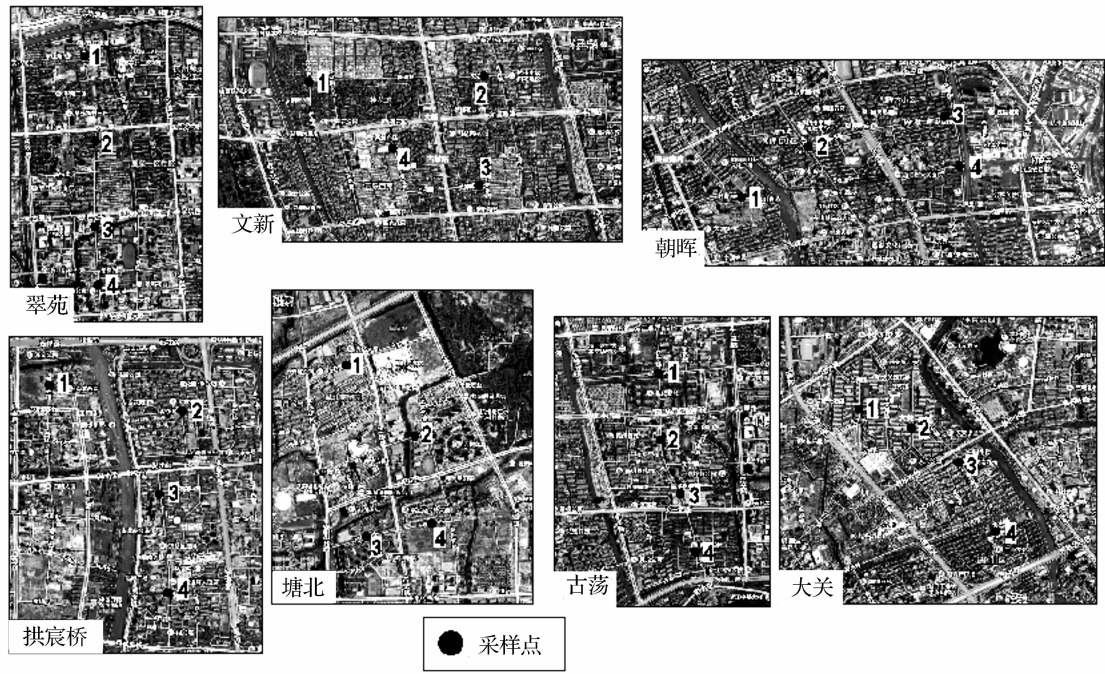


图 2 研究区块及取水点分布图

Fig. 2 Area studied and sampling plots for water pollution

1.4.2 指标的选取及分析

研究中,水质指标主要选取 SS(悬浮固体)质量浓度、COD(化学需氧量)、TN(总氮)和 Pb(铅)质量浓度 4 个关键指标来表征样品。水样采集后送至实验室,在规定的 24 h 内按照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[22]的要求检测出 7 个单元共 28 个水质参数,具体数据见表 2。

表 2 研究区域水质情况

Table 2 Water quality of area studied (mg · L⁻¹)

序号	单元	道路雨水				天然雨水			
		Pb	SS	CODcr	TN	Pb	SS	CODcr	TN
1	文新	0.168	517	187	2.37	ND	6.82	28.31	1.87
2	塘北	0.131	477	178	2.72	ND	6.76	27.73	1.77
3	翠苑	0.109	345	121	2.38	ND	6.65	27.89	1.73
4	古荡	0.102	388	108	2.29	ND	6.31	26.62	1.69
5	朝晖	0.125	439	120	2.54	ND	6.52	27.33	1.79
6	大关	0.128	396	149	2.33	ND	6.34	28.91	1.73
7	拱宸桥	0.093	278	111	2.30	ND	6.08	28.94	1.71
地表水Ⅴ类水标准 (GB 3838—2002)		0.1	400 [#]	40	2				

注:ND 为未检测出;[#]地表水环境质量标准(GB 3838—2002)中没有对 SS 质量浓度的具体规定,本研究采用污水综合排放三级标准(GB 8978—1996)中对 SS 质量浓度的规定标准代替。

1.5 道路水质指标的空间分布特征

对道路初期降雨径流水质数据与自然降水水质数据的比较,可以得出道路初期径流除了拱宸桥单元水质相对较好外,其他单元污染均较为严重,其中 SS、Pb 和 COD 来自于道路雨水,而 TN 主要来自于大气沉降。研究采用 SPSS 系统聚类分析的方法对道路初期降雨径流主要污染物进行聚类分析。聚类分析是通过聚类分析树形图中变量间的距离来表示不同因素之间相似性的大小,以此进行采样点的空间相似性分析,聚类结果如图 3 所示。由图 3 可知,当所有采样点聚为 3 组时,文新和塘北单元为第一组;翠苑、古荡、朝晖和大关单元为第二组;拱宸桥单元为第三组。通过结合具体水质数据分析可得:第一组属于重污染区,第二组属于中度污染区,第三组属于低污染区。

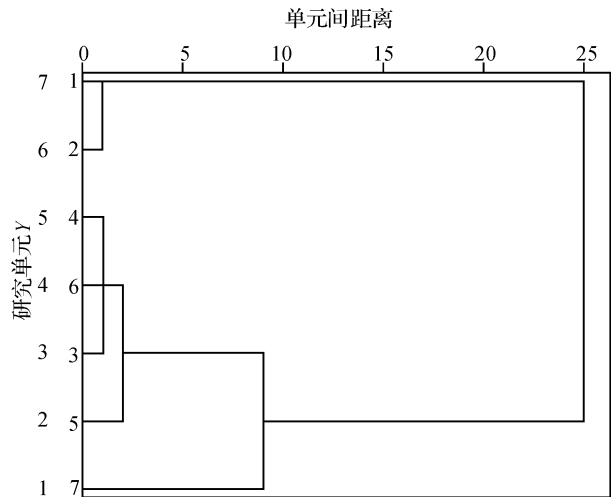


图 3 7 个监测单元水质指标平均值聚类结果

Fig. 3 Average clustering results of water quality parameters at seven units monitored

1.6 道路交通结构对污染物指标的影响分析

通过对 7 个单元水质指标与对应的道路交通结构指标的 Pearson 相关分析(表 3),可见非交通性道路网密度和路网密度与 SS、Pb 和 COD 呈较强的负相关性,表明随着非交通性道路网密度的提高,污染物质量浓度逐渐降低;也就是说,非交通性道路网密度的提高能够有效抑制机动车出行,进而减轻降雨初期径流污染。高密度路网提高了各单元之间的可达性,有效地分散了车流,从而降低了降雨初期径流的污染。交通性道路公交站点密度与水质指标之间呈低度相关,表明交通性道路上的公交站点对于改善道路初期径流污染没有起到决定性的作用,而非交通性道路公交站点密度和水质指标之间却存在较好的负相关性。

表 3 道路交通结构指标与径流污染物之间的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficient between road traffic structure index and runoff pollutants

Pearson 相关性	COD _{Cr}	Pb	SS	TN
非交通性道路网密度	-0.773*	-0.830*	-0.826*	-0.461
非交通性道路公交站点密度	-0.845*	-0.733	-0.832*	-0.359
交通性道路公交站点密度	0.423	0.487	0.570	0.293
路网密度	-0.692	-0.888**	-0.917**	-0.397

注:* 表示显著水平在 0.05;** 表示显著水平在 0.01。

1.7 土地利用结构指标对水质指标的影响分析

将土地利用结构指标与污染物指标进行聚类分析,并生成近似矩阵(表 4)。近似矩阵中距离越短说明二者之间的相似程度越高,通过近似矩阵可以看出商住比和非交通性道路沿街商铺长度比与 TN、Pb 的质量浓度之间存在较高的相似性,说明土地利用结构对降雨初期径流水质有一定的作用及影响。结合具体土地利用结构数据可以看出,文新和塘北单元居住社区与临近就业的不均衡在一定程度上刺激了机动车出行,导致了过多的 Pb 和 TN 的排放,加重了初期径流水质污染。尤其是过高的商业办公用地比例,提高了硬铺率,增加了初期地表径流,进一步恶化了径流水质。由于杭州市内小区绿化率较高,降雨时加剧了雨水对土壤中氮元素的冲刷程度,致使初期降雨径流中 TN 的质量浓度明显增大。在一定范围内,非交通性道路沿街商铺的提高,能够促进居民就近步行购物,有效抑制机动车的通勤。但是,随着沿街商铺比例的不断提高,很可能吸引其他组团居民的涌入,加上道路两侧设置有商铺,客观上限制了机动车的通行能力,使得 Pb 和 TN 的排放量明显增大;同时,机动车通勤数量的减少,在很大程度上降低了 SS 的质量浓度。

表 4 聚类分析生成近似矩阵

Table 4 Approximate matrix produced in cluster analysis

土地利用结构指标	CODcr	Pb	SS	TN
商住比	141 075.209	1.009	1 188 941.409	28.841
非交通性道路沿街商铺长度比	141 509.212	0.100	1 190 115.532	34.752

1.8 污染物指标之间的相关性分析

由降雨初期径流污染物指标之间的相关性分析可知(表 5),COD 和 Pb 的质量浓度与 SS 的相关系数分别达到 $R=0.801$ 、 0.893 。可能原因是降雨初期,径流中的 SS 颗粒物粒径较小,对 COD 和 Pb 具有较强的吸附能力。TN 与其他污染物之间的相关性不强,可能原因是大气的流动性导致了空间区域的差别性不大。

表 5 路面降雨径流主要污染指标的 Pearson 相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficient between major road rainfall runoff pollution index

	CODcr	Pb	SS	TN
CODcr	1			
Pb	0.878**	1		
SS	0.801*	0.893**	1	
TN	0.464	0.294	0.537	1

注:*表示显著水平在 0.05;**表示显著水平在 0.01。

2 土地利用格局指标与水质指标之间的回归分析

为了进一步明确土地利用格局与降雨初期径流污染物之间的关系,以 SS 质量浓度来表征道路交通结构对径流污染的影响趋势,分别以路网密度、非交通性道路网密度和非交通性道路公交站点密度为自变量,同时以 Pb 质量浓度来表征非交通性道路沿街商铺长度对径流污染物的影响程度。分别采用 SPSS 曲线回归分析的方法,结合地表水环境 V 类水标准(取 SS 质量浓度 400 mg/L)做曲线拟合,取 R^2 最大时对应的函数作为最佳拟合函数,得到各自的拟合曲线(图 4)与方程(表 6)。

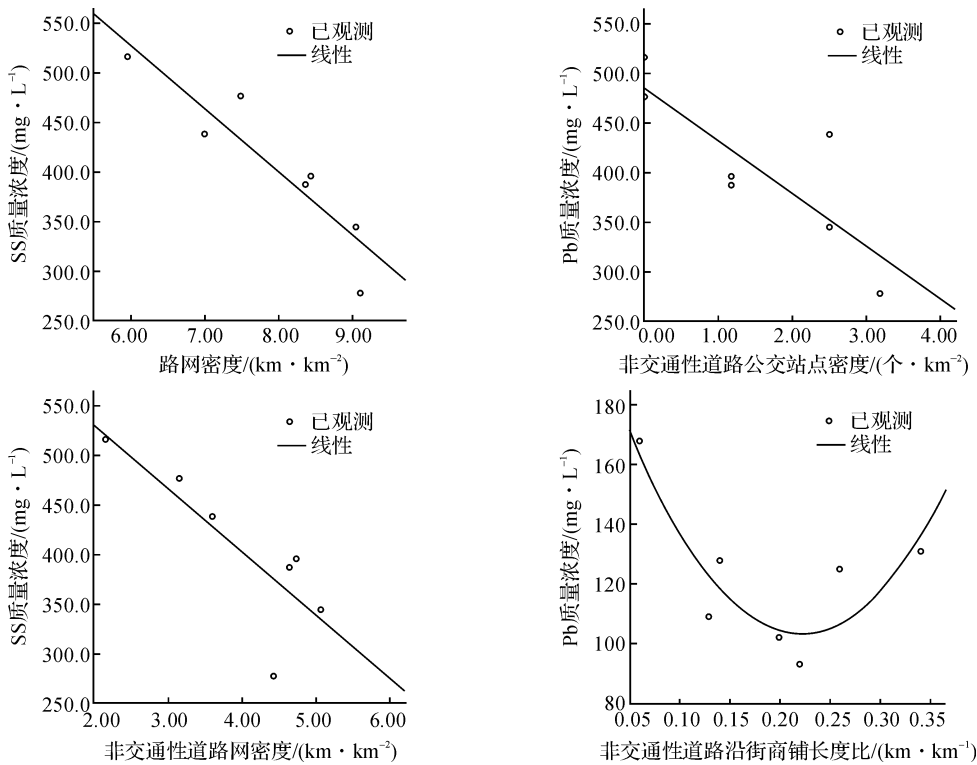


图 4 土地利用格局指标与水质指标拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves between land use patterns and water quality index

表 6 土地利用格局指标与水质指标拟合相关结果

Table 6 Fitting result between land use patterns and water quality index

指标	最佳拟合曲线方程	R^2 最大值	地表水Ⅴ类水 标准对应值
路网密度/($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)	$y = -63.991x + 911.699$	0.841	7.99
非交通性道路公交站点密度/($\text{个} \cdot \text{km}^{-2}$)	$y = -53.225x + 485.855$	0.692	1.61
非交通性道路网密度/($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)	$y = -63.626x + 658.127$	0.682	4.06
非交通性道路沿街商铺长度比/($\text{km} \cdot \text{km}^{-1}$)	$y = 2.345x^2 - 1.037x + 0.218$	0.792	0.22(最低值)

回归分析结果表明:以文新和塘北单元为代表的新城模式即“宽马路、大街坊”和土地利用结构的不合理,是加重其径流污染的重要原因;而以朝晖和翠苑单元等为代表的老城模式即“窄马路、小街坊”和相对合理的土地利用结构,是缓解径流污染的重要因素;拱宸桥单元作为成熟的住宅区块即通而不畅的道路交通布局和合理的土地利用结构,是优化径流水质的关键。

根据本研究得出最佳拟合曲线方程,要达到地表水Ⅴ类水标准,路网密度至少要达到 $7.99 \text{ km}/\text{km}^2$,非交通性道路网密度至少要达到 $4.06 \text{ km}/\text{km}^2$,非交通性道路公交站点密度要达到 $1.61 \text{ 个}/\text{km}^2$ 。当非交通性道路沿街商铺长度比达到 0.22 时,Pb 质量浓度最低。

3 减少城市非点源污染的建议

城市道路交通结构和土地利用结构的不合理,导致过多的机动车涌入城市道路,这已成为加重城市非点源污染负荷的首要源头,就此笔者提出以下建议。

3.1 建立以居住社区为主导的公共交通体系

结合大型居住社区通勤需求,使公交站点深入社区内部,真正达到近似“点对点”的交通可达性模式。将公交站点更多地设置在非交通性道路上;同时,增大社区与商业区的公交通勤比例,促使人们放下“方向盘”,选择公共交通出行。

3.2 利用经济杠杆实现对机动化出行的交通管制

在交通高峰期拥堵时段,对进入主城区的小汽车征收交通拥堵费,控制小汽车在城市中的使用频率,并且对在非交通性道路上停车,实行按时按区域阶梯式收费管制,以“公交优先”来引导调整通勤结构比例,真正实现公交化跑赢机动化,创造一个良好的适宜居住的生活环境。

3.3 优化土地利用结构

使土地开发与公共交通有机结合,提高土地混合利用程度,实现区域职住均衡,减少跨组团交通出行。大力发展城市轨道交通建设,形成以公交车站为点,以轨道交通为线,以非交通性道路网覆盖为面,点线面相结合的道路交通和土地利用新形态。

4 结 语

值得指出的是,本研究尺度在 2 km^2 左右,尽管研究中道路交通结构和土地利用结构与道路径流水质之间表现出较好的相关性和相似性,但是,影响道路径流水质的因素是复杂的且具有一定的时空性,如:样本数量、研究尺度、区域特征、降雨强度和道路清扫等。本文只是从道路交通结构和土地利用结构的视角进行分析,因此,本研究有待进一步修正与完善。

参考文献:

[1] Brezonik L P, Stadelmann T H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twins Cities metropolitan area, Minnesota, USA[J]. Water Research,2002, 36(7):1743-1757.

- [2] Field R, Pitt R E. Urban storm-induced discharge impacts: US Environmental Protection Agency research program review [J]. *Water Science and Technology*, 1990, 22(10/11): 1-7.
- [3] Sartor J D, Boyd G B. Water pollution aspects of street surface contaminants[Z]. Washington, D C : United States Environmental Protection Agency, 1972.
- [4] Deletic A, Orr D W. Pollution build up on road surfaces[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, 131(1): 49-59.
- [5] Chen T B, Wong J W, Zhou H Y, et al. Assessment of trace metal distribution and contamination in surface soils of Hong Kong[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 96(1): 61-68.
- [6] Zabel T, Milne I, McKay G. Approaches adopted by the European Union and selected member states for the control of urban pollution[J]. *Urban Water*, 2001, 3(1/2): 25-32.
- [7] Gromaire M C, Garnaud S, Saad M, et al. Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers[J]. *Water Research*, 2001, 35(2): 521-531.
- [8] Krejci V, Dauber L, Novak B, et al. Contribution of different sources to pollutant loads in combined sewers[C]// *Proceeding 4th International Conference on Urban Storm Drainage*. Lausanne, Switzerland: s. n., 1987: 34-39.
- [9] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 城市降水径流的污染来源与排放特征研究进展[J]. *水科学进展*, 2006, 17(2): 288-294.
- [10] 张巍, 张树才, 岳大攀, 等. 北京城市道路地表径流中 PAHs 的污染特征研究[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(1): 160-167.
- [11] 李崇, 李法云, 张营, 等. 沈阳市街道灰尘中重金属的空间分布特征研究[J]. *生态环境*, 2008, 17(2): 560-564.
- [12] 史兴民, 王建辉. 咸阳市区街道灰尘重金属污染及评价[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(3): 435-440.
- [13] 孙金华, 曹晓峰, 黄艺. 滇池流域土地利用对入湖河水质的影响[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(12): 2052-2057.
- [14] 郭青海, 马克明, 张易. 城市土地利用异质性对湖泊水质的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 776-787.
- [15] 夏靓, 李云梅, 王桥, 等. 基于遥感的无锡市土地利用与过境水质响应关系的研究[J]. *地理科学*, 2010, 30(1): 129-133.
- [16] 官宝红, 李君, 曾爱斌, 等. 杭州市城市土地利用对河流水质的影响[J]. *资源科学*, 2008, 30(6): 857-863.
- [17] 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. 城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(3): 607-612.
- [18] 欧阳威, 王玮, 郝芳华, 等. 北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(9): 1249-1256.
- [19] 车武, 汪慧贞, 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.
- [20] 车越, 杨凯, 范群杰, 等. 黄浦江上游水源地水环境演变规律及其影响因素研究[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 163-170.
- [21] 王瑶, 石爱军. 北京市土地利用分布与水质响应空间关系研究[J]. *中国环境监测*, 2012, 28(3): 58-62.
- [22] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.