

城市地表污染物累积模型研究

边 博

(江苏省环境科学研究院, 南京 210036)

摘 要:城市地表污染物为城市面源污染的重要来源,科学认识和计算地表污染物是有效控制城市面源污染的关键。从2006年3月开始,选择镇江具有代表性的土地使用类型实测城市地表污染物,研究城市地表污染物累积变化规律。研究表明:地表污染物随着晴天时间的增长逐渐趋于上限值并呈周期性变化,根据“贮存-输入-输出”平衡原理,引入污染物输入速度系数和去除速度系数,建立地表污染物累积模型,通过与实测数据拟合和其他模型对比,模型计算精度较高,计算结果可作为城市地表污染物冲刷模型的输入,从而为城市降雨径流污染的控制和治理提供科学依据。

关键词:地表污染物;平衡原理;速度系数;累积模型;冲刷模型

中图分类号:X502 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2010)06-0137-05

Modeling the Buildup of Pollutants on Urban Different Land Use Types

BIAN Bo

(Jiangsu Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China)

Abstract: Urban surface pollutant is now recognized as a major source of urban non-point pollution, thus, it is a key problem to scientifically understand and compute surface pollutants. In order to obtain the build-up law, starting in May, 2006, a study was conducted to measure surface pollutants from representative land uses types in Zhenjiang, Jiangsu Province. It is shown that surface pollutants increase to the maximum value gradually and change with the periodic variation. Based on the storage-input-output balance principle, the input speed coefficient and removal rate coefficient are introduced to establish the build-up model of surface pollutants. By fitting with the measured data and comparing with other models, the precision of the model is accurate, and the calculated results can be used as the input of the wash-off model, which provides the scientific basis for non-point source pollution control and management.

Key words: Surface pollutant, balance principle, speed coefficient, build-up model, wash-off model

城市面源污染是城市水环境的主要问题之一,降雨冲刷地表产生携有大量污染物的径流进入水体,对城市水体造成了严重危害^[1-2],因此,模拟城市面源水质对于城市面源污染管理具有重要作用。城市面源水质受到降雨特征、天气情况、功能区 and 地表

特征等因素综合影响,这些影响因素难以有效的量化,模拟污染物复杂变化的过程复杂^[3-4]。

在国外研究中,建立起了污染物在城市面源系统中迁移的概念性模式,认为地表沉积物是面源污染的主要来源。研究表明城市地表污染物排放表现

收稿日期:2010-03-18

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-002);江苏省环保厅重点科研项目(2009015);江苏省重点自然科学基金(BK2010091)

作者简介:边博(1977-),男,博士生,主要从事城市降雨径流污染研究,(E-mail)bianbo1@163.com。

为晴天累积、雨天排放的特点,即晴天时地表污染物的累积过程和雨时被雨水冲刷、脱离地面进入径流的过程^[5-6],认为污染物累积的关系可归结为线性关系、幂函数关系和双曲线关系^[7-8]。地表污染物的净累积率(输入率减损失率)并不是一个常数,其速度在初始时最快,而后逐渐降低,污染物的累积随着无雨期或清扫间隔时间的增长而呈现一些特征。城市不同的土地利用类型污染物累积速率不同,与该区的污染状况有很大关系^[9],对以时间为自变量的累积模型,污染物的累积系数为一级反应速率,污染物的累积量不是随无雨期的增长而无限增加^[10],这种变化关系可用函数关系表示,国外重要的 SWMM 模型就应用了该理论^[11]。

在中国研究中,常静研究了上海市区主要交通区及校园地表重金属的累积过程,发现符合“S”型增长曲线,具有较好拟合效果^[12]。吴春笃应用了幂函数、指数函数和饱和函数法计算了镇江地表污染物的累积量,结果表明污染物累积模型对径流污染物固体悬浮物和化学需氧量计算结果影响较小^[13]。由于影响污染物累积因素较多,且随机性较大,中国主要基于污染物累积最大限量现象和累积速率随累积时间递减线性设计累积方程,但是计算样点的复杂情况的影响较大,拟合曲线仅在于探讨累积过程,未涉及累积动态变化过程,累积模型多以简单的函数关系表示,函数关系存在一定的地域性,不具有推广性^[14]。

综上所述,关于城市地表污染物累积的研究,主要集中于发达国家,在工业类型和污染状况不同的发展中国家,研究较少。同时城市不同土地利用类型的功能分区,构成了复杂的城市区域,具有各自的特点,这些特点影响着地表污染物的分布特点和污染特征。城市地表污染物累积是一个高度随机性的过程,机理难以被精确的描述,难于用复杂的数学公式来模拟。因此,从地表污染物“贮存-输入-输出”动态平衡入手,通过质量平衡来推算污染物累积量,从而研究不同土地利用类型地表污染物累积规律,为城市降雨径流污染的成因分析,污染负荷的准确计算以及污染控制管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 功能区和采样点的选取

在研究区域内选择一块面积不大,能代表研究区域各类特征的封闭或半封闭的小试验区,监测地表污染物。城市面源污染的产生与人类的活动密不可分,由于人类活动存在差异性,其产生的污染物程

度也不一样,因此按照土地利用类型在采集样品。镇江古运河流域主城区已形成商业区、居民区、河滨公园、交通主干道等土地利用类型布局,商业区位于市中心,旁边有交通干道;居民区为老住宅区,区内道路为临时停车场;河滨公园处于老城区,毗邻城市交通要道;选取市区重要的主干道:中华路和电力路作为交通区。

1.2 地表污染物采集

2006-03 开始布点采样见图 1,采样时间远离道路清扫时段,在 1 m² 范围内,用干净的细毛刷分别采集装入样品袋。必须确保每次样品都采集于相同的路面面积和区域,地表沉积物大多分布在靠近路边坎的一定范围内,占总体质量 88% 的固体颗粒分布在距离边石的 30 cm 范围内,95.9% 分布在距离边石 50 cm 范围内^[15]。因此多在距离边坎范围较近的区域,首先设置一定面积的木质框架置于路面确保每次采集的地表灰尘面积范围一致,其次保证每次采集的路面区域一致,获得地表沉积物在无雨期的累积过程^[16-17]。

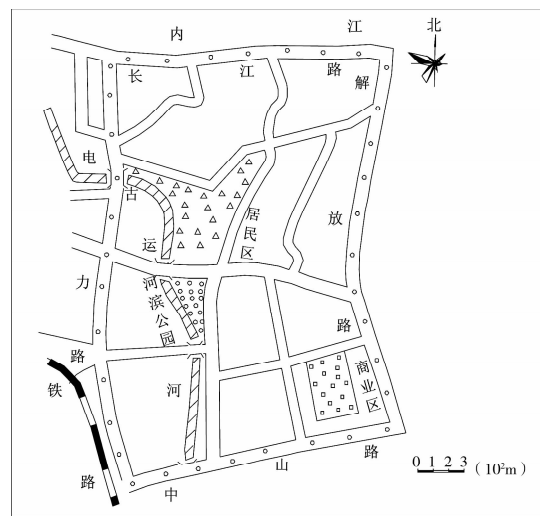


图 1 采样点分布示意图

1.3 城市地表污染物累积模型建立方法

地表污染物晴天时在地表的累积过程及雨时的冲刷过程,由于受多种因素的影响,模拟具有一定的难度,地表污染物累积基于“污染物在晴天时积累于地表,雨时被冲刷”建立。城市绝大部分地表为不透水表面,模型均以不透水地面为对象,根据“贮存-输入-输出”平衡,在不透水地面上污染物的累积量可以用简单的质量平衡公式来表示^[9]:

$$P_T = P_R + P_C \quad (1)$$

$$P_C = P_I + P_O \quad (2)$$

上式中, P_T —某区域地表污染物的总累积量; P_R —

上次降雨冲刷地表残留污染物的量; P_C —晴天污染物累积量; P_I —污染物全部输入的总和; P_O —污染物全部损失的总和。全部输入项包括大气输入、垃圾的累积、植被残体以及交通的影响等。输出主要为受风力(包括天然的和交通运输产生的风力)污染物二次悬浮、街道清扫等。对地面和路缘储存的污染物的累积和去除作用有关联的因素很多,况且许多因素的表述参数不易确定。因此,不妨将影响污染物输出过程的因素定义为污染物的去除速度参数,从而质量平衡公式表述为:

$$\frac{dP_C}{dt} = k_1MA - k_2P_C \quad (3)$$

其中 P_C 为某区域地表污染物质量随时间的累积量, g ; M 为来自于大气降尘, 交通释放等降落于某区域的污染物质量, $g/m^2 \cdot d$; A 为区域的面积, m^2 ; k_1 为污染物转化系数; k_2 为污染物的去处速度系数 d^{-1} 。

$$\int_0^{P_C} \frac{dP_C}{k_1MA - k_2P_C} = \int_0^t dt \quad (4)$$

其中 t 为前期晴天数。

$$P_C = \frac{k_1MA}{k_2} [1 - e^{(-k_2t)}] \quad (5)$$

2 结果

2.1 城市地表污染物累积模型

当前期晴天数 t 较大时, e^{-k_2t} 接近于零, 区域内污染物输入和损失达到平衡时, 地表积累的最大污染量为 $\frac{k_1MA}{k_2}$, 假设最大污染量为 $P_{max} = \frac{k_1MA}{k_2}$, 事实每次降雨都难以将地表污染物完全冲刷干净, 设最近一次降雨后地面残留污染量为 P_R , 污染物的积累速率随初期残留负荷的存在而呈比例减小, 经历时间 t 以后, 区域内地表污染物的总量可表示为:

$$P_T = P_R + (P_{max} - P_R)[1 - e^{(-k_2t)}] \quad (6)$$

当 t 较大时, 即累积时间无限延长, e^{-k_2t} 接近于零, 区域内的污染物输入和损失达到平衡时所累积的污染物的最大量为 P_{max} 。但是, 由于人为清扫和降雨情况的存在, 地表污染物的累积时间并不能无限延长, 污染物累积量也难以达到最大值 P_{max} , 而是按照清扫频率和降雨周期性增长假设, 经历 S d 后(即 1 个周期), 地表污染物的累积量达到最大 P_{max} 值, 经过上述公式的推导, 获得地表污染物累积量随时间的变化关系

$$P_T = P_{max} e^{k_2(S-t)} + \frac{k_1MA}{k_2} [e^{k_2(S-t)}] \quad (7)$$

式中: P_T 为某区域地表污染物质量随时间的累积量, g ; P_{max} 为地表污染物的周期性最大累积量, g ; M 为来自于大气降尘, 交通释放等降落于某区域的污染物质量, $g/m^2 \cdot d$; A 为区域的面积, m^2 ; k_1 为污染物转化系数; k_2 为污染物的去处速度系数 d^{-1} ; t 为前期晴天数, d ; S 为污染物达到积累最大量的周期性时间, d 。

2.2 城市地表污染物累积模型参数确定

1) 参数 P_{max} 和 S 的确定

目前, 城市环境卫生管理中, 道路和住宅小区的清扫都有一定的规定或要求, 城市道路 1 d 清扫 1~3 次(机器扫或人工扫), 对住宅小区的清扫也有 2~3 d 清扫一次。重要的道路也不定期清扫, 在未降雨情况下, 地面污染物累积总量实际在一定时间达到最大值, 其后一般不再增长, 地表污染物的累积总是呈现周期性变化, 从图 2 可以看出不同土地利用类型沉积物的累积变化关系, 可以确定最大累积量和周期时间。

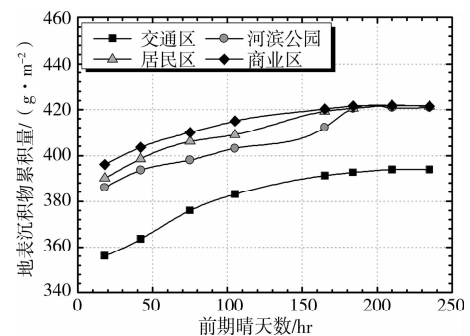


图2 地表沉积物随前期晴天数的变化关系

2) 参数 k_1M 和 k_2 的确定

式 7 为非线性函数, 函数中将参数 k_1M 合成一个参数 P_M , P_M 和 k_2 根据已知数据应用 Origin 非线性拟合出响应函数的系数, 通过 Analysis → Non-Linear Curve Fit → Advanced Fitting Tools 或者 Fitting Wizard, 高级模式还可利用 Function → new 可以自定义拟合函数。氮和磷是水体富营养化的关键因子之一, 它们在地表沉积物中含量水平是面源中氮和磷的主要来源之一, 地表沉积物作为它们的主要载体, 镇江不同土地利用类型地表沉积物中氮, 磷含量变化范围各自 2.28~6.31 mg/g, 2.76~5.1 mg/g, 商业区的地表沉积物中氮, 磷的含量最高, 通过不同土地利用类型单位面积上采集沉积物的量, 可获得不同土地利用类型单位面积污染负荷与前期晴天数的变化关系见图 3, 确定出镇江城市地表污染物的累积模型的参数值。

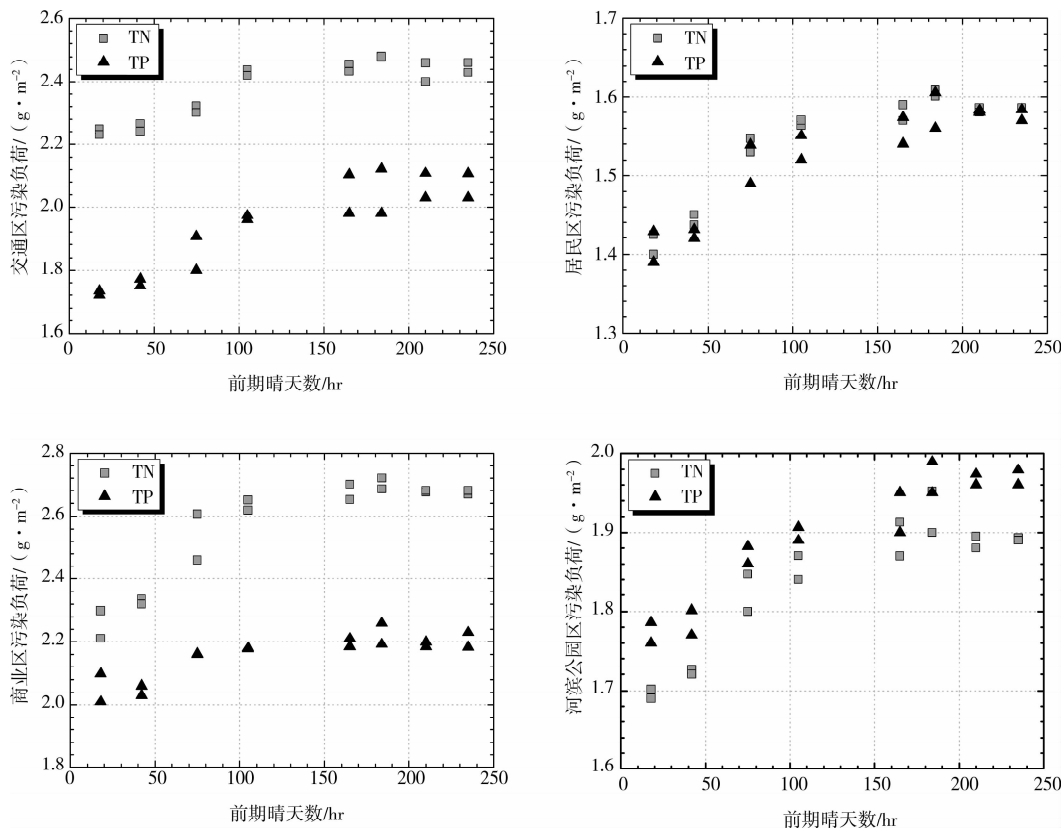


图 3 不同土地利用类型污染物负荷与前期晴天数关系

2.3 城市地表污染物累积模型与其他模型比较

城市面源水质模型基于描述污染物晴天累积，雨天排放的过程形成方程，模拟复杂变化条件下的污染物形成过程，地表污染物累积模型输出项一方面可计算污染物累积量，另一方面主要作为建立城市地表污染物冲刷模型的输入项，认为地表污染物的冲刷速率与累积污染物的量成正比，建立城市地表污染物冲刷模型。同时，国外对地表污染物的计算关系可归结为 3 种形式：即线性关系、幂函数关系和双曲线关系^[18-19]，各函数表达关系如下：

线性关系： $P_t = at + b$ ，幂函数关系： $P_t = at^b$ ，双曲线关系： $P_t = \frac{t}{a + bt}$ 。

城市地表污染物的累积率并不是一个常数，各模型参数确定较难，在实际计算地表污染物累积量时，很少比较研究不同累积模型对于研究对象的适用性，本文以地表污染物累积三种常用函数关系，模

拟实测的镇江代表性功能区(商业区和交通区)的污染负荷，不同函数关系的参数值和相关系数见表 1。由表中可知，本文建立的城市地表污染物累积方程(表 4 中 R^2 系数简写为累积)，拟合精度最好，其次是双曲线函数关系，线性关系和幂指数关系拟合进度最差，主要原因为地表污染物累积速度在初始时最快，而后逐渐降低，污染物的累积有一个上限，随着无雨期或清扫间隔时间的增长逐渐趋于上限值，而不再随时间的增加而增加，线性关系和幂指数关系是一种上限值不定的模型，在无雨期历时较长时计算不精确。不同土地利用类型污染物的累积不是无限的，会随无雨期的增长而逐渐趋于一个上限值，该文建立的城市地表污染物累积指数模型能够合理的反映地表污染物的累积特征，较准确的预测镇江市地表污染物的累积量，模型的输出可作为城市地表污染物冲刷模型输入。

表 1 不同土地利用类型地表污染物累积方程参数值

污染物	地表污染物累积方程参数			R^2				
	P_M	$k_2(1/d)$	标准差	累积	线性	幂函数	双曲线	
商业区	TN	2.616	0.1026 7	0.0126 5	0.81	0.37	0.51	0.60
	TP	2.174	0.158 2	0.020 73	0.78	0.31	0.48	0.58

续表 1

污染物	地表污染物累积方程参数			R^2				
	P_M	$k_2(1/d)$	标准差	累积	线性	幂函数	双曲线	
居民区	TN	1.560	0.126 38	0.012 78	0.78	0.31	0.39	0.61
	TP	1.541	0.132 04	0.015 68	0.80	0.26	0.41	0.57
河滨公园	TN	1.860	0.130 51	0.014 82	0.73	0.20	0.15	0.48
	TP	1.914	0.141 06	0.017 71	0.86	0.31	0.25	0.46
交通区	TN	2.401	0.146 23	0.018 95	0.82	0.36	0.53	0.62
	TP	1.982	0.106 29	0.016 72	0.83	0.34	0.51	0.56

3 结论

选择镇江具有代表性的土地使用类型,实测城市地表污染物,揭示了地表污染物累积随着晴天时间的增长逐渐趋于上限值并呈周期性变化,根据“贮存—输入—输出”平衡原理,引入污染物输入速度系数和去除速度系数,建立地表污染物累积模型,通过实测数据以及非线性拟合,确定了不同土地利用类型的污染物累积模型。

地表污染物累积指数模型与双曲线函数关系,线性关系和幂指数关系方程比较,城市地表污染物累积方程计算精度较高,能够合理的反映地表污染物的累积特征,较准确的预测镇江城市地表污染物的累积量,模型的输出可作为城市地表污染物冲刷模型输入。引入污染物输入速度系数和去处速度系数,建立了地表污染物累积指数模型。

参考文献:

- [1] BO BIAN. Particle size distribution and pollutants in road-deposited sediments in different areas of Zhenjiang, China[J]. Environ Geochem Health, 2009, 31:511-520.
- [2] HERNGREN L G, ASHANTHA A A, Godwin. Analysis of heavy metals in road-deposited sediments[J]. Analytica Chimica Acta, 2006,571: 270-278.
- [3] ZOPPOU C. Review of urban storm water models[J]. Environmental Modelling and Software, 2001, 16(3): 195-231.
- [4] CHEN J, ADAMS B J. Analytical urban storm water quality models based on pollutant buildup and washoff processes[J]. Journal of Environmental Engineering, 2006, 132(10): 1314-1330.
- [5] CHARLESWORTH S M, LEES J A. The distribution of heavy metals in deposited urban dusts and sediments, Coventry, England[J]. Environmental and Geochemistry and Health, 1999(21): 97-115.
- [6] BALL J E, JENKS R, AUBOURG D. An assessment of the availability of pollutant constituents on road surfaces[J]. Science of the Total Environment, 1998, 209:243-254.
- [7] NURDAN S, DUZGOREN-AYDIL. Sources and characteristics of lead pollution in the urban environment of Guangzhou[J]. Science of The Total Environment, 2007,385(1-3): 182-195.
- [8] CHIEW F H S, McMahan T A. Modelling runoff and diffuse pollution loads in urban areas[J]. Water Science and Technology, 1999,39(12): 241-248.
- [9] ALLEY W M, SMITH P E. Estimation of accumulation parameters for urban runoff quality modelling[J]. Water Resources Research, 1981,17(6):1657-1664.
- [10] VAZE J, FRANCIS H S. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface[J]. Urban Water, 2002,4:379-389.
- [11] TSIHRINTZIS V A, HAMID R. Modeling and management of urban stormwater runoff quality: A review[J]. Water Resources Management, 1997, 11(2): 137-164.
- [12] 常静.城市地表灰尘—降雨径流系统污染物迁移过程与环境效应[D].上海:华东师范大学,2007.
- [13] 吴春笃,汝梅,黄卫东,等.镇江城市道路雨水径流污染预测[J].中国科学技术大学学报,2008,38(4):337-341.
- [14] 陈桥,胡维平,章建宁.城市地表污染物累积和降雨径流冲刷过程研究进展[J].长江流域资源与环境,2009,18(10):992-996.
- [15] DELETIS A. B. D. W. ORR. Pollution buildup on road surfaces[J]. Journal of environmental engineering, 2005,131(1): 49-59.
- [16] VAZE, J. H. S. FRANCIS, Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface[J]. Urban Water, 2002(4):379-389.
- [17] ADACHI, K. Y. TAINOSHO, Single particle sediments characterization of size-fractionated road[J]. Applied Geochemistry, 2005,20: 849-859.
- [18] 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.
- [19] BARBE D E, CRUISE J F, MO X. Modeling the Buildup and Washoff of Pollutants on Urban Watersheds[J]. Water Resources Bulletin-AWRA, 1996,32(3): 511-519.

(编辑 胡玲)