

# 科研报告

## 苏州水网城市暴雨径流污染的研究\*

温灼如 苏逸深 刘小靖 曾桂菊

(水电部南京水文水资源研究所)

莫庆源 姚静华

万绍基

(苏州市环境监测中心站)

(苏州市市政工程养护管理处)

“苏州市水污染综合防治规划研究”总课题的要求,需要探索苏州内城暴雨径流所产生的非点源污染,即从内城河各出口输出至外城河的流量及其相应的有机污染负荷量。目前解决这一类都市雨水排水问题一般采用概念模型和水动力学模型两种途径<sup>[1-3]</sup>。我们根据苏州实际情况,建立了苏州暴雨径流

污染的概念模型。该模型是以降雨为输入,径流与污染量为输出的确定性集总系统,其响应函数为线性的水量单位线和污染负荷单位线,从而实现由净雨量转换为流量和污染负荷量的计算。该模型框图如图1所示。本模型可作为苏州暴雨排水排污设计和预测之用。

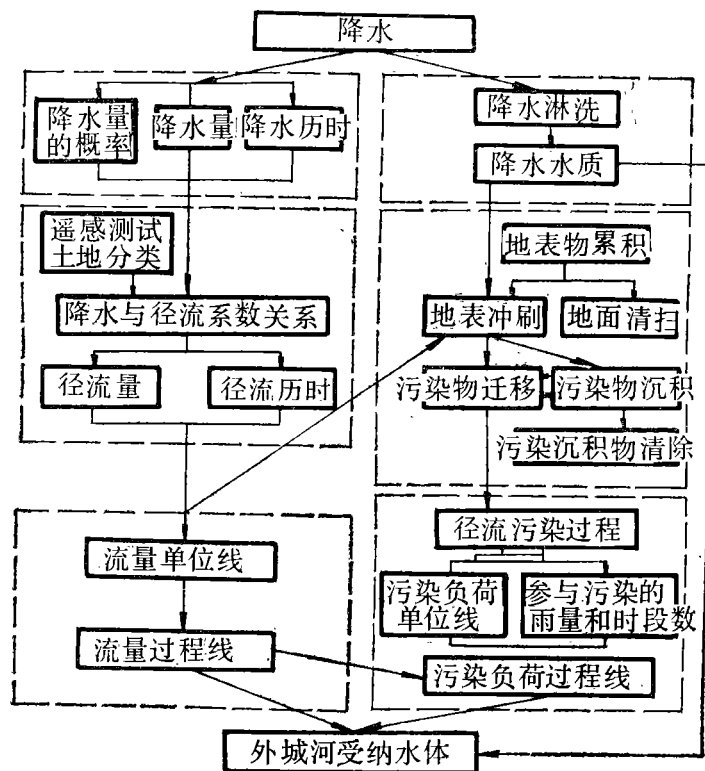


图1 苏州暴雨径流污染的概念模型框图

\* 参加本课题研究还有潘之棣、李士鸿、王国兴、蔡亚宾和王子忠同志。

## 一、暴雨径流污染的监测

苏州市内城的河网有“三横三竖和两个自流网络区”与环绕内城的外城河道紧密相连。为探索不同典型区的产流产污规律,在内城布设了四种城市功能典型试区(工业区、农业区、商业区和住宅区);针对 1984 年内城河网现状,在主要进出口处设立七个断面,监测水量和水质。利用城东的苏州市气象台和城西的苏州市环境监测中心站内的自记雨量计,实测降雨过程。在各监测断面上,同步监测水位、流量、生物化学需氧量( $BOD_5$ )、氨氮( $NH_3-N$ );典型试区加测悬浮固体(SS)内包括可溶性固体和非可溶性固体;农业区增测总磷、总氮。

根据苏州市气象台 53 年的降雨资料,经频率计算后表明: 1984 年降雨量 1072.2mm 的频率  $P = 43\%$ , 重现期  $N = 2.3$ , 属于常遇的降雨。全年降雨日数为 124 日,其中 6~9 月份为 42 日。因小雨的产流量很小,暂不考虑。如气象站预报为中雨以上( $\geq 10mm$  的降雨)立即安排监测工作,1984 年 6~9 月共监测暴雨 17 场,化验雨水水质 4 场;监测各断面水量 10 次,其中水质 5 次。此外还进行了一日连续监测旱流的水量、水质本底值。

## 二、降雨的淋洗与冲刷

降雨的淋洗和冲刷是城市径流污染重要的一环。雨水中含有各种污染物质,是随成雨云层中雨核的污染成份和城市近地面大气污染状况而变化。降雨淋洗大气中污染物起了净化大气的作用,而雨水中含有污染物质降落到地面对水体又起污染的作用。

降雨淋洗  $NH_3-N$  的量可按式(1)计算,若测定雨水中含有另一水质浓度,同理亦可按下式计算其污染量。

$$W_L = K_1 C_1 P F \quad (1)$$

式中  $W_L$  是雨水淋洗  $NH_3-N$  的量(kg);  $C_1$  是雨水中  $NH_3-N$  的浓度(mg/L);  $P$  是降雨量(mm);  $F$  是汇水面积或水面面积( $m^2$ );  $K_1$  是单位换算系数  $K_1 = 10^{-6}$ 。经我们计算降雨淋洗  $NH_3-N$  的污染负荷量,其降落在内城地表的数量为 21.68t/a,而直接降落到外城河面上有 1.01t/a。

降雨冲刷污染物的作用是与雨量、城市地表堆积垃圾量、沉积污物及其清扫方式和质量有关。苏州内城 1984 年地表清扫垃圾堆积物有 73480t, 占总堆积物量的 98.4%, 显然,如能及时进行地面清扫,则可大大减少雨水冲刷到水体中的污染物。

据分析,地表堆积物中粒径大于 2mm 的固态物质将不受雨水冲刷而移动。当降雨量大于 12.7mm 时,其地表冲刷率将达 90% 以上;若总降雨量一定,则降雨强度的变化对总固体的冲刷影响不大<sup>[4]</sup>。据苏州环卫部门统计,1984 年街道保洁面积达 90% 左右,大部分地面堆积物已被清除,剩下能被冲刷的污染物质约有 70% 是来自尘埃。有关固体冲刷情况通过收集与典型阴井淤泥试样的水质分析按式(2)估算:

$$W_c = K_2 C_2 G \quad (2)$$

式中  $W_c$  为雨水中  $BOD_5$  或  $NH_3-N$  的含量(kg/月),  $G$  为内城每月冲刷的沉积物量(kg/月),  $C_2$  为微生物氧化单位重量有机物所消耗的溶解氧或沉积物中  $NH_3-N$  的量(mg/kg),  $K_2 = 10^{-6}$ 。苏州内城 1984 年降雨冲刷夹带的固体沉积物 1225t, 其中耗氧有机物 8.36t,  $NH_3-N$  0.63t。由于城建部门及时清淤大大地减少了它对受纳水体的污染。

## 三、苏州暴雨径流污染模型模拟的方法

苏州暴雨径流污染模型的关键是如何模拟不同城市功能区及不同下垫面情况下暴雨的产流、产污规律及其降雨径流过程和相应

的各种水质污染负荷过程。

### 1. 降雨径流量的确定方法

降雨径流量的确定跟汇水面积、下垫面情况有关,由于城市地面坡度极为平缓,下水管道纵横交错,如何划分水系汇水面积是一个棘手问题,我们在城建部门协助下通过掌握一级管道系统和二级管网分布来划分内城和外城河两侧直排的汇水面积。

有关下垫面的土地利用分类是采用遥感新技术,取 1981 年 10 月 23 日陆地卫星拍摄的卫片数字兼容磁带,使用南京水文水资源研究所 DIPIX 数字图象处理系统进行解释,并将地面实况调查资料,通过视频数字化转换器输入该系统,以增强和提高卫片的分辨能力,采用监督分类法进行解释分类,得出苏州内城土地利用卫星影象分类图,如图 2 所示(原图为彩色相片,为了制版改绘不同符号表示图)。图 2 表示:水体,不透水面积(柏油和混凝土道路、楼房、广场、水泥地、码头、仓库堆料场、停车场等),半透水面积(半

透水铺石、砖和碎石道路、老式房屋),透水面积(农田、园林、公园、体育场等草地)。最后获得内城区面积为  $14.34\text{km}^2$ , 其中水面占 5.7%, 不透水面积占 34.4%, 半透水面积占 54.4%, 透水面积占 5.5%, 同时可得到上述所有地物分类的面积。

典型试区产流的计算方法是按苏州内城特点来考虑,我们选定观前街的商业区、龙兴桥的综合区、东烧香桥的农业区所监测的降雨径流资料,建立降雨与径流系数关系如图 3 所示。使用各典型试区的径流系数及其相应的土地利用分类数据,建立诸方程组如下:

$$C_s = 0.02C_0 + 0.55C_1 + 0.43C_2 \quad (3)$$

$$C_c = 0.288C_1 + 0.712C_2 \quad (4)$$

$$C_a = 0.082C_0 + 0.918C_3 \quad (5)$$

式中  $C_s$ 、 $C_c$ 、 $C_a$  分别是商业区、综合区、农业区的径流系数。  $C_0 = 1.0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  分别为水面、不透水面积、半透水面积、透水面积的径流系数。经联立求解得出  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  并与降雨建立关系如图 4 所示,其诸经验公式

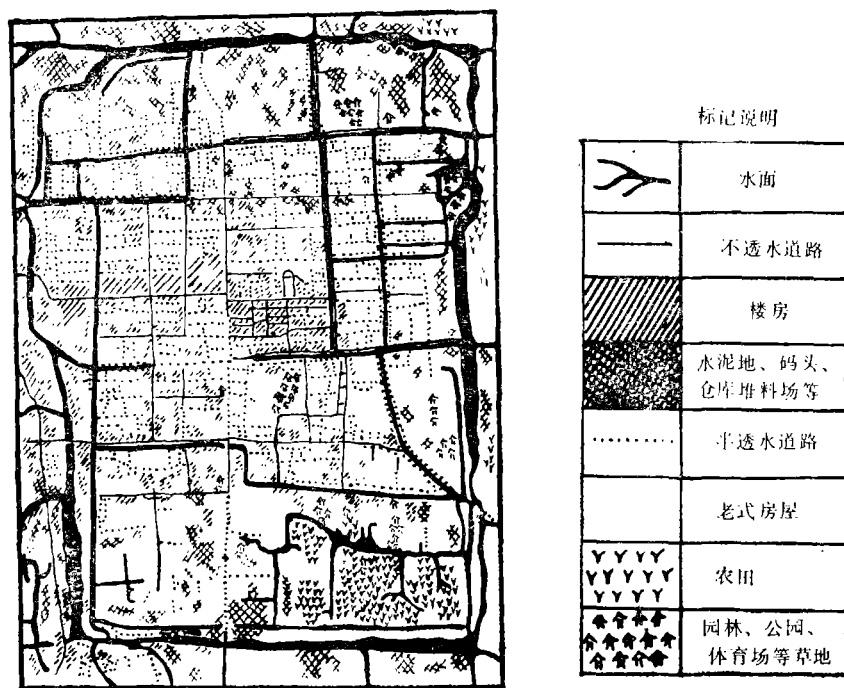


图 2 苏州市内城卫星影象分类图

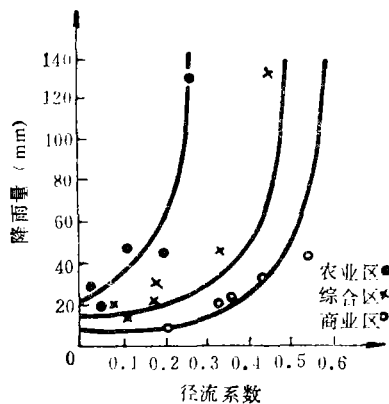


图 3 内城区典型区降雨径流系数关系图

如下:

$$C_1 = 0.4723 + 3.78 \times 10^{-3} \ln P + 6 \times 10^{-4} P - 4.8165 \times 10^{-6} P^2 \quad (6)$$

$$C_2 = 1.8081 - 0.2967 \ln P + 1.7 \times 10^{-3} P - \frac{21.0276}{P} \quad (7)$$

$$C_3 = 5.5 \times 10^{-3} \ln P - \frac{4.0277}{P} - 0.0438 \quad (8)$$

内城河各出口断面汇水面积的产流计算,可按所属范围内的土地利用情况及其面积权重,应用上述诸式或图 4 来推求相应的径流系数。同理,可得不同降雨情况下内城

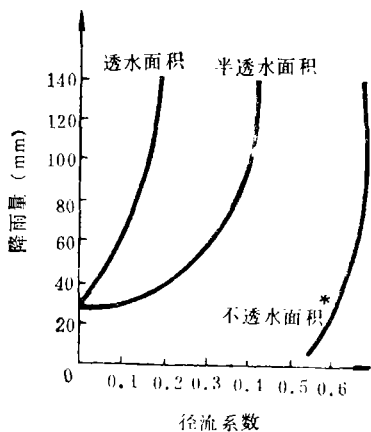


图 4 内城不同土地利用降雨径流系数关系图

\* 图 4 中不透水面积曲线包含地表不透水面积及所属的下水道至监测断面的渗漏损失,因苏州古城管道陈旧,连接不好,渗漏量较大,经验证,该关系与实际情况相符合。

河各出口断面的降雨与径流系数关系。有了降雨量资料,就可推算出各场次、日、月、年径流量和年平均流量。

## 2. 降雨径流单位线的确定和流量过程线的推求

从实测的降雨径流过程中选择降雨时段较少的一次单峰过程,扣除旱流影响,根据单位线原理应用最小二乘法在 PC-1500 微机上进行选配单位线,并用几场实测过程进行验证和调整,直至配合最佳为止,即为欲选用的 1mm 流量单位线如图 5 所示。然后,使用单位线就可推求任意降雨过程下的流量过程线。其实测与模型计算值比较如图 6 所示。

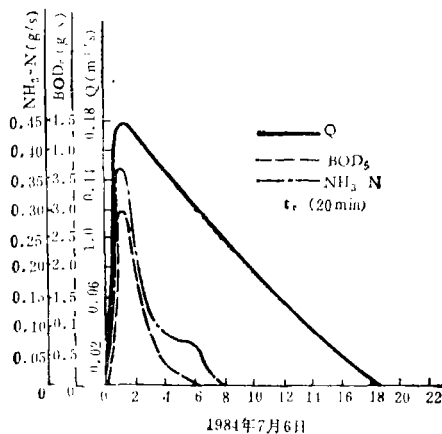


图 5 观前街 1mm 流量单位线和污染负荷单位线

## 3. 径流污染负荷单位线的确定

径流污染是暴雨径流夹带与解吸沿程的污染物质并输送到受纳水体。因此,我们可以参照水量单位线的原理推求污染负荷单位线(污染负荷率单位过程线的简称)。其做法是假定负荷量与净雨量成线性关系,选择降雨时段较少的一次实测 BOD<sub>5</sub> 或 NH<sub>3</sub>-N 污染负荷过程,扣除旱流本底的影响,推算出 BOD<sub>5</sub> 或 NH<sub>3</sub>-N 污染负荷单位线见图 5 所示。

## 4. 参与径流污染的雨量及时段数的确定

暴雨径流携带污染物的多寡与暴雨量、径流量及雨前地面污染物数量等因素有关。

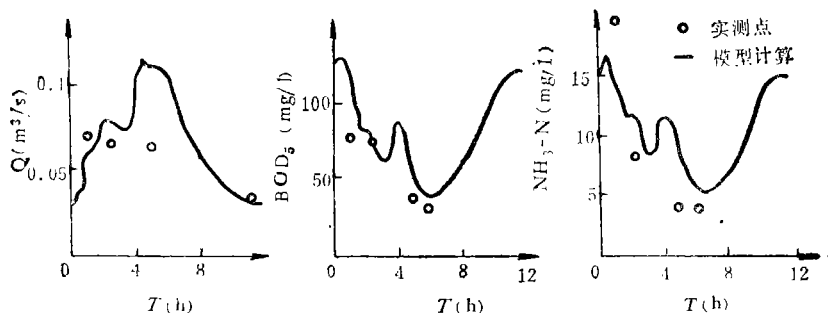


图6 1984年6月27日苏州商业区(观前街)实测与模型计算的流量、污染浓度比较

美国“水质管理规划手册”指出,当降雨量大于12.7mm时地表冲刷率将大于或等于90%<sup>[4]</sup>。这说明一场降雨中并不一定是所有降雨时段都参与冲刷污染物,决定性的往往是前面若干时段,这是水质污染负荷过程与流量过程在应用单位线方面的根本区别。因此需要探索一场降雨过程中有多少降雨量及其累积时段数参与径流污染的地表冲刷过程。首先选择不同降雨时段及相应的雨量,应用水量、污染负荷单位线进行计算得到一组计算值,然后跟实测值比较,找出偏差最小的降雨时段及相应的累积雨量,即为参与径流污染计算的雨量及其时段数。例如葑门断面经分析,当BOD<sub>5</sub>及NH<sub>3</sub>-N的偏差值最小时,降雨时段数为10个,累积雨量为30mm。

### 5. 降雨径流污染负荷过程线及其污染量的推求

根据实测降雨资料及该监测断面参与径流污染计算的累积雨量和时段数,应用水量与污染负荷单位线,在PC-1500微机上连续运算,便得到该场降雨的径流过程、污染负荷过程和各水质的浓度过程。其实测和模型计算值比较如图6所示。然后再按上述过程统计出该场降雨的径流量和污染量,而每月有若干场实测降雨过程,亦可相应地推求其径流与污染过程,则可算得月平均浓度和污染量。同理,可计算内城河各出口断面1984年6~9月份平均水质浓度和污染量。

外城河两侧范围内径流污染负荷量的计算是用典型试区的径流模数与污染模数,结合外城河两侧东、南、西、北各部分的土地利用分类和相似城市功能区所占的面积比重,进行加权计算,推算相应的径流量和污染负荷量。

按上述计算成果,可建立月水质污染量的经验方程:

$$y_B = -0.01218 + 0.2146R^{1.5} - 0.12081\ln R \quad (9)$$

$$y_N = 0.0191 + 0.0314R^{1.5} + 0.0835R^2 \quad (10)$$

$$y'_B = -1.5534 + 6.9402R - 15.2343R^{1.5} + 10.802R^2 \quad (11)$$

$$y'_N = -1.2473 + 7.0934R - 8.3481R^{1.5} + 3.1203R^2 \quad (12)$$

$$y_{TP} = 0.005249 + 0.4665R^2 \quad (13)$$

$$y_{TN} = 0.1213 + 3.676R^2 + 0.03283\ln R \quad (14)$$

式中 $y_B$ 、 $y'_B$ 为内城河和外城河两侧的BOD<sub>5</sub>月污染量(t); $y_N$ 、 $y'_N$ 分别为前述地点NH<sub>3</sub>-N月污染量(前者单位t,后者10<sup>-4</sup>t); $y_{TP}$ 、 $y_{TN}$ 为内城农业区的总磷与总氮月污染量(t);R为分析地点的月径流量(10<sup>5</sup>m<sup>3</sup>)。

使用上述经验方程可按降雨径流量插补出1984年无监测月份的污染负荷量和污染量,从而得到全年降雨径流污染量。

(下转第69页)

它作为精确的环境污染指示植物。我们从加拉森林中采集了天然植物——地衣以及杜鹃花、核桃、青岗木等,分析了其中 666、DDT、PCB<sub>1</sub> 含量,总的来讲均有富集;一般 666 比 DDT 高(见表 3)。地衣对外来影响反映显著,它含有机氯总量最高。4300 m 高山上生长的杜鹃花也受到 666、DDT 的污染,它富集的 666 总含量比 DDT 高约 15 倍。以上事实说明:这些植物不仅可以从土壤中吸收 666、DDT、PCB<sub>1</sub>, 同时还可以将它们积累于体中,从而反映了该地区环境背景。

#### 4. 家禽内脏及其它动物毛发中 666、DDT、PCB 的污染状况:

我们分析了南迦巴瓦峰地区(葛嘎、大本营、派区)家禽内脏、鸡蛋、人发、牛尾毛等样品中 666、DDT、PCB<sub>1</sub> 含量均达到 ppb 水平,比该地区水、土壤样品中的含量高,特别是鸡内脏,总有机氯含量达 116.69ppb,从地点来看,派区内采集的鸡内脏总有机氯含

量比大本营含量高,有机氯含量中 666 总量比 DDT 高 4—12 倍,DDT 也多转化为 DDE (见表 4)。

### 小 结

通过检测,首次发现西藏南迦巴瓦峰地区已被 666、DDT、PCB<sub>1</sub> 所污染。土壤、动物、植物、水等样品中有机氯含量达 ppb 级,其中所含 666 的量均较 DDT 为高,水中的 PCB<sub>1</sub> 含量极微,而其土壤和生物中的这几种残留的含量则有高低之别,有待进一步探究其原因。

### 参 考 文 献

- [1] 环境污染分析方法编辑组, 环境污染分析方法, 第 313 页, 科学出版社, 1980 年。
- [2] Tanabe, S. et al., *Chemosphere*, 12, 277(1983).
- [3] Bidleman, T. F. and Leonard, R., *Atmospheric Environ.*, 16, 5(1982).

(上接第 6 页)

### 四、结 语

水网城市暴雨径流非点源污染的研究, 国内外尚无成熟的经验可借鉴, 本文从监测站点布设与监测开始, 提出包括雨水的淋洗和冲刷作用在内的暴雨径流污染系统完整的概念模型, 初次借助于遥感新技术与典型试区相结合的方法解决了传统产流模型所不能解决的水网城市暴雨径流污染中的难题。尝试性地提出一种新方法即水质污染负荷单位线法, 用来计算缺乏水质监测资料时的污染负荷过程线及其污染量, 它已经过实测资料检验证明可以应用。本模型对城市规划与建设和环境保护等方面均有一定的实用意义。

限于监测资料较少, 一些问题有待今后进一步研究与完善。

### 参 考 文 献

- [1] Stephenson, D., *Stormwater Hydrology and Drainage, Development in Water Science*, Vol. 14, p. 16 1981.
- [2] Ontario Ministry of the Environment, *Storm Water Management Model Study*, Vol. I, Research Report No. 47, pp 46—55; Vol. II, Research Report No. 48, pp 1—42, Proctor and Redfern Ltd. and James F. MacLaren Ltd. 1976.
- [3] Wanielista, M. P., *Stormwater Management*, pp 131—160, Ann Arbor Science Publishers Inc. 1978.
- [4] Pavoni, J. L. ed., *Handbook of Water Quality Management Planning*, pp 69—71, Van Nostrand Reinhold Company 1977.