

西安市非点源污染负荷估算

齐苑儒^{1,2}, 李怀恩¹, 李家科¹, 秦耀民¹

(1. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

摘要 在有限资料条件下, 首先通过 Erdas 软件生成研究区域的土地利用图, 在 Arcgis 支持下统计不同土地利用类型的面积, 其次选取西安市周边 4 个雨量站的降雨量数据的平均值作为 2005 年的降雨量, 采用 SCS 径流曲线模型计算 2005 年的年净雨量, 然后求出 2005 年西安市的年径流量, 最后根据研究区域内 COD、TN、SS 以及 TP 等污染物的平均浓度, 估算出它们的负荷量。结果表明: 西安市 2005 年污染物负荷量分别为 COD 14 794.7 t、TN 1 233.0 t、SS 52 426.3 t、TP 61.7 t。

关键词 城市非点源; 降雨径流; SCS 模型; 污染负荷; 西安市

中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** 1004-693X(2010)01-0009-04

Estimation of Xi 'an urban non-point source pollution load

QI Yuan-ru^{1,2}, LI Huai-en¹, LI Jia-ke¹, QIN Yao-min¹

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology, Ministry of Education, Xi 'an University of Technology, Xi 'an 710048, China; 2. Shaanxi Investigation and Design Institute of Water Conservancy and Electric Power, Xi 'an 710001, China)

Abstract : Under a condition of having limited data, land use graphs of a study region were generated with the software Erdas, with the support of ArcGIS, and statistics of the different land use of areas were calculated. Then, average values of the data from four rainfall stations around Xi 'an were selected and taken as rainfall data for 2005. The SCS runoff curve model was used to calculate the total net precipitation for 2005, and the annual runoff volume of Xi 'an was also calculated. Finally, according to the mean concentrations of the COD, TN, SS, and TP, the pollution load was estimated in the study region in Xi 'an. The estimated results showed that there were 14 794.7 tons of COD, 1 233.0 tons of TN, 52 426.3 tons of SS, and 61.7 tons of TP, respectively, in 2005.

Key words : urban non-point source; rainfall runoff; SCS model; pollution load; Xi 'an City

城市非点源污染是指城市降雨径流淋洗与冲刷大气和汇水面各种污染物引起的受纳水体的污染, 是城市水环境污染的重要因素^[1]。因此, 狭义上的城市非点源污染即指城市降雨径流污染, 它是城市非点源污染的最主要形式^[2]。城市地表径流污染主要指在降雨过程中, 雨水及所形成的径流流经城镇地面, 如商业区、街道、停车场等, 聚集一系列的污染物如原油、盐分、氮、磷、有毒物质及杂物, 随之进入河流或湖泊, 污染地表水或地下水体^[3-4]。

美国环保署(USEPA)已把城市地表径流列为导

致全美河流和湖泊污染的第三大污染源^[5]。国外学者关于水环境治理的研究认为即使点源污染完全被控制而忽略非点源污染, 特别是城市降雨径流污染, 受纳水体的水质仍然不会改善^[6-7]。因此, 城市降雨径流污染负荷的定量化研究是城市非点源污染控制的重要环节之一^[8]。

目前, 对于西安市城市降雨径流污染方面的研究, 有赵剑强等^[9-10]于 1998 年在西安市南二环路中段机动车道一侧雨水口进行的采样分析和 2000 年降雨期间对西安至临潼高速公路 浐河大桥桥面径

流排水水量及水质进行的等时间间隔连续采样分析。研究了各污染因子之间的相关性和路面径流污染物排放规律及其对河流水质的影响。笔者在总结已有研究成果的基础上,在有限资料条件下,根据西安市基本情况,采用 SCS 径流曲线模型对 2005 年西安市三环以内主城区的降雨径流污染负荷进行估算。

1 SCS 径流曲线模型

1.1 SCS 径流曲线模型的原理

美国水土保持局提出的 SCS 径流曲线数值方程 (curve number equation)^[11] 是一种较好的小型集水区径流计算方法。该模型综合考虑了流域降雨、土壤类型、土地利用方式及管理水平、前期土壤湿润状况与径流间的关系。SCS 模型结构简单、参数少、可以用于无水文资料的地区或缺乏水文资料的小流域及城市的水文预报。SCS 径流曲线方程计算公式为：

$$q = \begin{cases} \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} & (P \geq I_a) \\ 0 & (P < I_a) \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \left(\frac{25400}{C_N} \right) - 254 \quad (2)$$

式中： q 为 1 次净雨量，mm； S 为可能最大滞留量，mm； P 为 1 次降雨量，mm； I_a 为初损量，mm； C_N 为径流曲线数值，与土壤植被有关，是一个无量纲参数。

由于 I_a 不易准确测定，SCS 建立了经验公式： $I_a = 0.2S$ ，则得到最常见的径流方程：

$$q = \begin{cases} \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & (P \geq I_a) \\ 0 & (P < I_a) \end{cases} \quad (3)$$

1.2 C_N 值的确定方法

C_N 值是 SCS 模型的主要参数，用于描述降雨—径流关系的参数，反映了流域下垫面单元的产流能力。根据模型含义， C_N 值为土地利用类型、土壤类型、前期土壤湿润程度等下垫面因素的函数。一般在降雨一定的条件下，产流量较大的土地利用类型、土壤类型、前期土壤湿润程度，其 C_N 值较大，反之亦然。 C_N 值根据降水量、土地利用特征及径流深相关的经验方法建立，其取值范围为 25 ~ 98，表示土地表面状况、土地利用功能或土壤渗透率及前期土壤湿度 (USDA1986)。

土壤含水饱和度 S 的确定是在美国水土保持局归纳了 3000 多种土壤类型的资料，按渗透性将其分类：A 类 (透水)、B 类 (较透水)、C 类 (较不透水)、D 类 (接近不透水)，并制作出城市区域 C_N 值表 (表 1)^[12]。

SCS 模型考虑前期降水对径流的影响，引入了前期降水指数 AMC (antecedent moisture condition)，其计算公式为：

$$AMC = \sum_{i=1}^5 P_i \quad (4)$$

式中： P_i 为最近 5 d 来的降水量，mm。

表 1 SCS 提供的城市区域 C_N 值

不同土地利用类型	C_N			
	A	B	C	D
居 住 区	77	85	90	92
	61	75	83	87
	57	72	81	86
商 业 区	89	92	94	95
工 业 区	81	88	91	93
草坪、公园、高尔夫球场、公墓等	好的草地 (覆盖度 > 75%)	39	61	74
	草地 (覆盖度 50% ~ 75%)	49	69	79
	贫乏的草地 (覆盖度 < 50%)	68	79	86
街道与道路	铺面并有路缘石和雨水沟	98	98	98
	卵石和砾石路	76	85	89

根据前期降水指数，将土壤前期降水分条件划分为 I (干燥)、II (中等)、III (湿润) 3 种类型，见表 2。在这里，I、III 条件下的 C_N 值可按式 (5)、(6)^[13] 进行修正 ($C_{N II}$) 可查表 1 得到)：

AMC_I ：

$$C_{N I} = C_{N II} (2.234 - 0.01334 C_{N II}) \quad (5)$$

AMC_{III} ：

$$C_{N III} = C_{N II} (0.4036 + 0.0059 C_{N II}) \quad (6)$$

表 2 前期土壤湿度条件确定标准

前期土壤湿度条件	5 日前期降雨量/mm	
	休眠期	生长季
I	< 13	< 36
II	13 ~ 28	36 ~ 53
III	> 28	> 53

1.3 径流量计算

产流区域里某一次降雨的径流量按照式 (7) 进行计算：

$$V = 10^3 qA \quad (7)$$

式中： V 为该次降雨的径流量，m³； A 为产流面积，km²； q 为该次的净雨量，mm。

2 西安市非点源污染物负荷估算

2.1 土地利用类型的划分

通过 Erdas 软件对西安市 Quickbird 卫星遥感影像进行校正、解译，生成研究区的土地利用图，在 Arcgis 支持下对土地利用图不同土地利用类型进行面积统计，得出西安市三环以内主城区不同土地利用类型的面积，见表 3。

2.2 径流量计算

地表径流污染是暴雨径流携带与解吸沿程污染物并输送至受纳水体的现象 ,暴雨径流携带污染物的多寡与降雨量、径流量及降雨前地表污染物累积量等因素有关。

表 3 西安市不同土地利用类型

土地利用类型	占地面积/hm ²	占地比例/%
居住用地	11 224	37
道路广场用地	2 580	8
工业用地	3 348	11
建设用地	2 677	9
绿地	2 987	10
未利用地	7 780	25
总 计	30 597	100

2.2.1 西安市多年降水情况

西安市多年平均降雨量为 583.7 mm^[14] ,降水量及径流量年内、年际变化较大 ,汛期 7~10 月 4 个月降水量占全市年降水量的 60% ,径流量占全市年径流量的 50% ,降雨多为短历时暴雨。

选取 2005 年西安市周围的马渡王、西渠、咸阳、斗门等 4 个雨量站的降水量进行平均计算 ,得到 2005 年西安市的降水量为 587.5 mm ,这一数据接近于多年平均水平 ,具有一定的代表性。虽然 2005 年降水天数为 108 d ,但有 70 d 的降水量小于 5 mm。据资料报道、实验和降水观测 ,通常情况下 ,当降水量达到 5 mm 时 ,其降水量仅能将地表完全湿润 ,5~10 mm 时则可形成街道降水径流^[15]。因此 ,2005 年西安市的有效降水有 38 场 ,有效降水量为 508.5 mm ,占全年的 87% ,结果见表 4。

表 4 2005 年西安市的有效降水量 mm

日期	降水量	日期	降水量	日期	降水量
02-17	6.6	07-02	12.9	09-24	8.4
04-08	8.8	07-17	9.4	09-27	6.0
04-18	6.0	07-21	8.7	09-28	20.2
05-04	13.2	07-27	7.1	09-29	29.3
05-12	5.9	07-30	9.6	09-30	25.9
05-15	16.1	08-01	33.2	10-01	40.0
05-16	15.3	08-06	7.9	10-02	22.3
05-30	11.0	08-15	17.2	10-05	8.3
06-04	8.1	08-16	16.4	10-06	5.8
06-05	19.6	08-18	30.9	10-19	5.3
06-08	7.9	08-19	8.1	10-20	7.7
06-09	5.8	09-15	5.7	10-26	7.6
06-24	12.7	09-20	17.6		

2.2.2 暴雨地表径流量的计算

城市径流污染负荷的估算 ,先要计算降雨径流量。C_N 值的选择 ,一方面依据式(5)(6)和表 2 ,另一方面也考虑城市土地渗透率 ,笔者根据西安市土地利用现状确定 C_N 值 ,结果见表 5。其中 ,在确定

土壤湿润程度的过程中 ,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3 种情况下降雨分别为 30 场、2 场、6 场 ,采用 SCS 模型计算不同土地利用地类型在不同前期降水水分条件下的次净雨量 ,并通过全年累加获得年净水量并计算径流系数 ,结果见表 6。

表 5 不同前期降水条件下的 C_N 值

土地利用类型	C _N		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
居住用地	87	94	97
道路广场用地	95	98	99
工业用地	85	93	97
建设用地	89	95	98
绿 地	54	74	87
未利用地	66	82	91

表 6 不同土地利用类型的年净水量和径流系数

土地利用类型	年净水量/mm	径流系数
居住用地	435.8	0.86
道路广场用地	369.3	0.73
工业用地	221.0	0.43
建设用地	255.0	0.50
绿地	27.4	0.05
未利用地	48.4	0.10

将表 6 中 2005 年西安市降水径流系数与文献[16]进行对比(表 7) ,说明计算结果比较合理。

表 7 不同覆盖面的径流系数

地面种类	径流系数(建议值)		
	最小	最大	平均
屋盖	0.7	1.0	0.90
沥青与沥青砼路面	0.7	0.95	0.85
砾石道路与广场	0.15	0.40	0.30
精工填缝的块石路面	0.6	0.97	0.80
黑色碎石(沥青处理的)路面			0.60
公园、花园、菜园、草畦	0.05	0.24	0.15
田地、牧场、树林	0.00	0.25	0.10
无草的光地面	0.10	0.30	0.20

将西安市城市土地利用面积乘以各土地利用类型的年净水量 ,即可计算出各土地利用类型的年径流总量 ,见表 8。

表 8 不同土地利用类型的径流总量

土地利用类型	土地面积/hm ²	年净水量/mm	年径流总量/万 m ³	径流模数/(万 m ³ ·km ⁻² ·a ⁻¹)
居住用地	11 224	435.8	4 891.44	43.58
道路广场用地	2 580	369.3	952.84	36.93
工业用地	3 348	221.0	739.96	22.10
建设用地	2 677	255.0	682.68	25.50
绿地	2 987	27.4	81.84	2.74
未利用地	7 780	48.4	376.55	4.84
总 量	30 597		7 725.31	

2.3 污染物负荷量计算

2.3.1 污染指标的浓度

由于缺乏 2005 年不同土地利用类型地表径流

污染物浓度资料,所以,污染物浓度值根据黄亚伟^[17]提供的西安市东南西北4个方位(2006年5~9月)的雨水排水口的4次采样分析结果,选用化学需氧量(COD)、总氮(TN)、悬浮固体(SS)以及总磷(TP)等作为西安市降雨径流污染负荷估算评价指标。由于监测次数有限,很难通过降水量和降水强度相关分析确定有代表性的径流污染物浓度。但是,由于在降雨径流试验选择过程中已经在一定程度上考虑了采样点的典型性。因此,研究中将4个典型排水口在历次降雨过程中各污染物的平均浓度的算术平均值作为城市降雨径流污染负荷估算的依据,结果见表9。

表 9 径流污染物的算术平均值				mg/L
污染指标	ρ (COD)	ρ (TN)	ρ (SS)	ρ (TP)
质量浓度	191.51	15.96	678.63	0.799

通过与美国不同地区雨水水质(表10)^[17],以及北京城区不同汇水面雨水径流污染物平均浓度(表11)^[18]比较后,表明笔者在表9中对污染物浓度值的处理结果与美国和北京城区的研究成果相当,可以作为西安市城市降雨径流污染负荷估算的依据。同时,也证明了不同城市和地域间雨水径流水质的统计结果无明显区别^[19]。

表 10 美国不同地区雨水水质与城市污水水质对比							
年份	城市	ρ(COD)		ρ(SS)		ρ(TN)	ρ(TP)
		平均值	范围	平均值	范围	平均值	平均值
1965	安阿泊 密歇根州			2 080	650 ~ 11 900	3.5	1.70
1969	华盛顿 哥伦比亚地区	335	29 ~ 1 154	1 697	130 ~ 11 280	2.1	0.40
1969	得梅图 艾奥瓦州			505	95 ~ 1 035	2.2	0.87
1968	达勒姆 北卡罗来纳州	224	40 ~ 660				0.18

表 11 北京城区不同汇水面雨水径流污染物平均质量浓度				
污染指标	屋面雨水		路面雨水	
	沥青油毡屋面/ (mg·L ⁻¹)	瓦屋面/ (mg·L ⁻¹)	平均值/ (mg·L ⁻¹)	变化系数
ρ (COD)	328.00	123.00	582.00	0.5~2.0
ρ (SS)	136.00	136.00	734.00	0.5~2.0
ρ (TP)	0.94	—	0.8~1.0	0.5~2.0
ρ (TN)	9.80	—	0.8~1.5	0.5~2.0

2.3.2 负荷量估算

由于降雨径流过程中径流量与污染物浓度随降雨历时不断变化,具有很强的随机性,因此地表径流污染量可以采用下式计算^[20]

$$W_T = \int_{t_0}^{t_e} C_t V_t dt \tag{9}$$

式中: C_t 为 t 时刻地表径流污染物浓度; V_t 为 t 时刻地表径流; t_0 和 t_e 分别为年初和年末时刻。

但是,由于缺少流量和浓度的同步监测资料,只能采用地表径流污染物的平均浓度计算。因此,将式(9)简化为:

$$W_T = C_M \int_{t_0}^{t_e} V_t dt = C_M W_s \tag{10}$$

式中: C_M 为地表径流的平均浓度; W_s 为年地表径流总量。

通过式(10)计算出2005年西安市各污染负荷量,SS、COD、TN、TP的污染负荷量分别为52 426.3 t、14 794.7 t、1 233.0 t、61.7 t。同时,上述污染物的输出系数分别为485.9 kg/(hm²·a)、40.5 kg/(hm²·a)、1 721.9 kg/(hm²·a)、2.0 kg/(hm²·a),参照国内一些学者对输出系数的研究成果,例如,李怀恩等^[20-21]在香港非点源污染的初步研究中计算了香港地区COD、TN、TP的综合输出系数分别是318.9 kg/(hm²·a)、40.4 kg/(hm²·a)、6.9 kg/(hm²·a);梁常德等^[22]在对三峡库区非点源氮磷负荷研究中确定城镇用地的TN、TP的输出系数分别为13 kg/(hm²·a)、1.8 kg/(hm²·a);刘瑞民等^[23]在研究长江上游非点源污染负荷中估算出重庆市TN、TP分别达到31.05 kg/(hm²·a)、1.58 kg/(hm²·a),可见本文中的COD、TN、TP输出系数的计算结果在已有研究成果范围内。

3 结 语

笔者根据西安市不同土地利用类型以及2005年全年的日降雨量,应用SCS模型对西安市2005年的降雨径流污染负荷进行了估算,得到以下结论。

a. 根据SCS模型对西安市降雨径流污染负荷的估算结果,认为SCS模型可以应用在城市非点源水质监测资料缺乏的地区,SCS模型是研究土地利用变化对流域径流过程影响作用的可行方法。

b. 以土壤前期降水水分为条件对主要参数 C_N 值进行了调整,使结果更趋合理,应用SCS径流曲线方程分别计算了38场降雨的净雨量,累加以后即是各个土地利用类型的年净水量。土地利用类型的不同,使得污染负荷不同,这对研究城市非点源污染的控制有重要意义。

c. 2005年西安市的降雨量采用了周边4个雨量站降雨量的平均值;其次,由于缺乏不同土地利用类型污染物浓度的同步监测资料,所以各污染物的浓度值借鉴了文献^[17]的研究结果,估算结果表明:2005年西安市年径流总量为7 725.31万m³;SS、COD、TN、TP的污染负荷量分别为52 426.3 t、14 794.7 t、1 233.0 t、61.7 t。
(下转第74页)

natural and modified clinoptilolite zeolites[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry ,2008 ,275(3):503-508.

[2]董秉直 ,夏丽华 ,高乃云 .有机物对沸石去除氨氮的影响[J].水处理技术 2005 31(8):10-13.

[3]谢华林 ,李立波 .改性沸石对重金属离子吸附性能的试验研究[J].非金属矿 2005 28(1):47-49.

[4]李曼尼 ,刘晓飞 ,江雅新 ,等 .改性斜发沸石在水处理中的应用[J].环境化学 2007 28(1):21-26.

[5]程有普 ,闻建平 ,杨素亮 .天然沸石活化及除氟性能[J].化学工业与工程 2006 23(3):236-239.

[6]MALEKPOUR A ,MILLANI M R ,KHEIRKHAH M. Synthesis and characterization of a NaA zeolite membrane and its applications for desalination of radioactive solutions[J]. Desalination 2008 225 :199-208.

[7]ERDOĞAN B , SAKIZC M , YÖRÜKOĞULLAR E. Characterization and ethylene adsorption of natural and modified clinoptilolites[J]. Applied Surface Science ,2008 ,254 :2450-2457.

[8]GB/T 7479—1987 水质铵的测定 纳氏试剂比色法[S].

[9]AKSU Z. Determination of the equilibrium , kinetic and thermodynamic parameters of the batch biosorption of lead (II) ions onto *Chlorella vulgaris*[J]. Process Biochemistry ,2002 38(1):89-99.

[10]王立平 ,李淑新 ,王亚茹 ,等 .化学反应速率和活化能测定微型实验初探[J].化学教育 2005 ,11 :54-56.

[11]陈淑云 ,白云 ,王海军 .泥炭处理含铬废水的研究[J].东北师范大学学报 :自然科学版 ,1994 20(4):123-128.

(收稿日期 2008-08-19 编辑 高渭文)

(上接第 12 页)

参考文献 :

[1]林积泉 ,马俊杰 ,王伯铎 ,等 .城市非点源污染及其防治研究[J].环境科学与技术 2004(27):63-65.

[2]张瑜英 ,孙美云 ,李占斌 .城市非点源污染研究进展与展望[J].人民黄河 2006 28(3):42-43.

[3]贺缠生 ,傅伯杰 ,陈利顶 .非点源污染的管理及控制[J].环境科学 ,1998 ,19(5):87-91.

[4]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):32-38.

[5]US EPA. National Water Quality Inventory. Report to Congress Executive Summary[R]. Washington D C :US EPA. 1995 :344.

[6]PATRICK L B ,TERESA H S. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes ,loads ,and pollutant concentrations from watersheds in the twin cities metropolitan area ,Minnesota , USA[J]. Water Research 2002 36(7):1743-1757.

[7]LEE J G ,HEANEY J P ,LAI Fu-hsiung. Optimization of integrated urban wet-weather control strategies[J]. Journal of Water Resource Planning and Management ,2005 ,131(4):307-315.

[8]李立青 ,尹澄清 ,何庆慈 ,等 .武汉市城区降雨径流污染负荷对受纳水体的贡献[J].中国环境科学 2007 27(3):312-316.

[9]赵剑强 ,刘珊 ,刘英聆 ,等 .城市路面径流雨水水质特性分析[J].西安公路交通大学学报 ,1999 ,19(S1):31-33.

[10]赵剑强 ,刘珊 ,邱立萍 ,等 .高速公路路面径流水质特性及排污规律[J].中国环境科学 2001 21(5):445-448.

[11]BUDHENDRA B ,JON H ,BERNIE E ,et al. Assessing watershed-scale , long-term hydrologic impacts of land-use change using a GIS-NPS model[J]. Environmental Management 2000(6):643-658.

[12]刘兰岚 .上海市中心城区土地利用变化对径流的影响及其水环境效应研究[D].上海 :华东师范大学 2007.

[13]王晓燕 ,王晓峰 ,汪清平 ,等 .北京密云水库小流域非点源污染负荷估算[J].地理科学 2004 24(2):227-231.

[14]刘跃峰 ,余兴 ,徐小红 ,等 .西安自然降水资源特征研究[J].陕西气象 ,1998(4):12-13.

[15]郭琳 ,曾光明 ,程运林 .城市街道地表物特性分析[J].中国环境监测 2003 ,19(6):40-42.

[16]西安市水电局 .西安市实用水文手册[R].西安 :西安市水电局 ,1988 63.

[17]黄亚伟 .西安市城市雨水利用可行性与技术方案研究[D].西安 :西安建筑科技大学 2006.

[18]张媛 .兰州市区地表径流污染初探[D].兰州 :兰州大学 2006.

[19]车伍 ,刘燕 ,李俊奇 .国内外城市雨水水质及污染控制[J].给水排水 2003 29(10):38-42.

[20]李怀恩 .估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J].环境科学学报 2000 20(4):397-400.

[21]LI H E ,LEE J H W ,KOENIG A ,et al. Nutrient load estimation in nonpoint source pollution of Hong Kong region[J]. Water Science & Technology 2005 51(3-4):209-216.

[22]梁常德 ,龙天渝 ,李继承 ,等 .三峡库区非点源氮磷负荷研究[J].长江流域资源与环境 2007 ,16(1):26-30.

[23]刘瑞民 ,沈珍瑶 ,丁晓雯 ,等 .应用输出系数模型估算长江上游非点源污染负荷[J].农业环境科学学报 2008 ,27(2):677-682.

(收稿日期 2009-09-07 编辑 高渭文)