

基于一次典型降雨过程形成的地面径流污染负荷研究 ——以内江城区为例

周贵尧, 谢贤健, 黄安, 谢建平, 李瑞

(内江师范学院 地理与资源科学学院, 四川 内江 641110)

摘要:选取 COD、氨氮、溶解氧、铬、铜 5 个污染指标, 利用 SCS 降雨模型模拟一次典型降雨在内江城区工矿用地、商业用地、住宅用地、交通用地、建筑用地 5 种不同土地利用方式下所形成的地面径流非点源污染特征。结果表明:一次典型降雨在内江城区产生的 COD、氨氮、溶解氧、铬和铜污染负荷浓度分别为 37.20, 0.67, 3.72, 0.01, 0.03 mg/L; 产生的 COD、氨氮、溶解氧、铬和铜污染负荷总量分别为 2 361.08, 35.20, 197.57, 1.47, 1.28 kg。在 5 种土地利用方式中, 工矿用地、商业用地、住宅用地、交通用地、建筑用地的 COD 污染负荷比例分别为 12.49%, 66.56%, 4.52%, 13.27%, 3.16%; 氨氮污染负荷比例分别为 17.35%, 41.25%, 15.03%, 14.90%, 11.47%; 溶解氧污染负荷比例分别为 20.25%, 37.93%, 23.85%, 10.11%, 7.86%; 铬污染负荷比例分别为 8.57%, 76.36%, 3.88%, 7.75%, 3.40%; 铜污染负荷比例分别为 21.95%, 21.95%, 10.39%, 39.84%, 5.86%。内江城区在一次典型降雨中, 商业用地在 5 种土地利用方式中对内江城区产生的非点源污染贡献率最大, COD 为 66.56%, 氨氮为 41.25%, 溶解氧为 37.93%, 铬为 76.36%, 铜为 21.95%。降雨径流将对研究区河道、湖泊以及河口产生短期或中长期污染。

关键词:典型降雨; 地面径流; 内江城区; 污染负荷

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)05-0158-05

Research on the Pollution Load Produced by Typical Rainfall in Urban Area —Taking Neijiang Urban Areas as an Example

ZHOU Gui-yao, XIE Xian-jian, HUANG An, XIE Jian-ping, LI Rui

(Institute Geography and Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641110, China)

Abstract: Chemical oxygen demand, ammonia nitrogen, dissolved oxygen, chromium and copper have been chosen as pollution indices in this research. In this typical rainfall in Neijiang urban area, the characteristics of nonpoint source of surface runoff formed in five distinct ways of land utilization including land for mining, commerce, residence, traffic and construction was simulated by SCS rainfall model. The results revealed in a typical rainfall of urban district the pollution load thickness of those five elements above were 37.20, 0.67, 3.72, 0.01, 0.03 mg/L, respectively. Sums of pollution load were 2 361.08, 35.20, 197.57, 1.47, 1.28 kg, respectively. As for the five different ways of land utilization, the COD pollution load contained in mining land was 12.49%, 66.56% in commercial land, 4.52% in residential land, and 13.27% in traffic land and 3.16% and in construction land. Pollution load of ammonia nitrogen was 17.35%, 41.25%, 15.03%, 14.90%, 11.47%, respectively, and pollution load of dissolved oxygen was 20.25%, 37.93%, 23.85%, 10.11%, 7.86% in the above different types of lands. Moreover, the pollution load of the other two elements including chromium and copper in those lands were 8.57%, 76.36%, 3.88%, 7.75%, 3.40% and 21.95%, 21.95%, 10.39%, 39.84%, 5.86%, respectively. As a result, we figured out that the nonpoint source produced in the land for commerce take up largest proportion in a typical rainfall and COD was 66.56%, ammonia nitrogen was 41.25%, dissolved oxygen was 37.93%, chromium was 76.36% and copper was 21.95%. Finally, we summarized that rainfall runoff would pollute the rivers, lakes and the estuaries

收稿日期: 2012-03-20

修回日期: 2012-04-21

资助项目: 四川省科技厅重点科技自筹项目(2010JY0184); 四川省教育厅青年基金(09ZB035); 内江师范学院大学生科研项目(11NSD-152); 内江师范学院地理科学专业实践教学改革“实验教学示范中心项目”(XSJ201103)

作者简介: 周贵尧(1991—), 男, 本科, 主要从事地表径流污染与控制、污染控制与资源化研究。E-mail: neu_zgy@163.com

通信作者: 谢贤健(1978—), 男, 副教授, 博士, 主要从事区域地理、区域可持续发展研究。E-mail: xxj007-14@tom.com

which we investigated, either in the short term or long term.

Key words: typical rainfall; surface runoff; Neijiang urban area; pollution load

城市土地利用方式影响到地表污染物的负荷状况,城市地面已成为非点源污染的重要污染源^[1];同时,城市土地利用改变了自然水文过程,暴雨径流冲刷地表携带大量污染物进入水体,直接造成水体污染。因此,土地利用变化不但影响区域水循环环境,也成为控制城市非点源污染的关键^[2-4]。在城市化地区,不断增加的非透水性地面和地下排水系统,不仅加速了地表径流的形成,增加其流量,提高了洪水峰值,而且也降低了接纳水体的水质,引发了水供给问题^[5],城市暴雨径流中含有诸如营养物、杀虫剂、病菌、石油、油脂、沉淀物以及重金属等许许多多的污染物,已经成为水质破坏的主要原因^[6]。

内江城区地表堆积物中含有大量污染物质,特别是化学需氧量(COD),氨氮,溶解氧,铜,铬等污染物质。降雨时,这些污染物质在地表径流的冲刷下,通过城市地表排放到河道湖泊及河口,使接纳水体的水质受到严重污染^[7]。笔者以内江城区为例,研究在一次典型降雨中内江城区不同土地利用方式产生的污染负荷指数。对类似中等城市不同土地利用方式在典型降雨过程中产生的污染负荷指数进行分析探讨。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

内江市位于四川盆地东南部,居沱江流域中游,地理位置位于东经 104°15′—105°26′,北纬 29°11′—30°02′,东西长 121.5 km,南北宽 94.7 km,全市幅员面积 4 386 km²,耕地面积 16.36 万 km²,下辖市中区、东兴区、隆昌县、资中县、威远县五个区县,2010 年年末全市总人口 425.6 万人,主城区人口 141.7 万人,全市 GDP 总产值 5 609 631 万元,主城区 GDP 总产值 2 068 845 万元。区内位于国务院重点规划建设的“成渝经济圈”腹地地带,是四川省“十二五”规划建设的特大城市之一,同时也是西南各省交通的重要交汇点,境内有成渝高速、内宜高速,成渝铁路、内昆铁路和沱江航道相互交错贯通的交通网络,素有“川中枢纽,川南咽喉”之称。

1.2 研究材料和方法

(1) 典型降雨。通常情况下,降雨量达到 5 mm 时仅能将地表完全湿润,降雨量为 5~10 mm 时可形成街道降水径流,一次性降水达到 20~25 mm(降雨历时 1 h)则可将街道地表物质完全冲刷干净。因此,将历时 1 h 左右,累计降水量为 25 mm 左右的降

水定义为一次典型降水。通常,在一次典型降雨 48 h 后街道地表物质恢复原状^[8]。

(2) 径流量。根据美国土壤保持局提出的降雨径流 SCS^[9]模型计算径流量,该模型是根据降水过程中水量平衡原理以及降雨径流之间的基本关系推出的径流曲线数值模型。

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \quad (1)$$

$$S = 25400 / C_N - 254 \quad (2)$$

式中: Q ——径流深(mm); P ——一次典型降雨量(mm); S ——径流开始后,流域内形成的最大持水量; C_N ——径流曲线值,是反映降雨前流域特征的一个综合参数,它与土壤的湿润程度、坡度、植被、土壤类型和土壤利用现状等相关。 C_N 值是一个无量纲参数,理论取值范围是 0~100,实际应用中取值范围是 40~98^[10]。只要确定 C_N 值,就可由降雨量求得径流深;再将径流深乘以研究区域的面积(A),即可求出该次暴雨的径流量。

该模型的导出过程^[11]是基于实际入渗量(F)与实际径流量(Q)之比等于集水区该场降雨前的最大可能入渗量(或潜在入渗量 S)与最大可能径流量(或潜在径流量 Q_m)之比的假定基础上建立的,即

$$F/Q = S/Q_m \quad (3)$$

式中,假定潜在径流量(Q_m)为降雨量(P)与由径流量产生的植物截留,出渗和田洼蓄水构成的出损 I_a 的差值,即:

$$Q_m = P - I_a \quad (4)$$

实际入渗量为降雨量减去出损量和径流量,即:

$$F = P - I_a - Q \quad (5)$$

将(4)式和(5)式代入(3)式,可以推出:

$$(P - I_a - Q)/Q = S/(P - I_a) \quad (6)$$

进而推知:

$$Q = (P - I_a)^2 / (S + P - I_a) \quad (7)$$

为了简化运算,通常假定集水区该场降雨的初亏损 I_a 为该场降雨前潜在入渗量的 0.2 倍,即 $I_a = 0.2S$,由此可以推出(1)式。

1.3 不同土地利用区面积的确定

为了调查在一次典型降雨中,内江城区不同下垫面所产生的降雨径流污染负荷总量,必须事先查清该地区的各种土地利用类型。本次研究所涉及的行政范围主要是乐贤和东兴两镇。利用收集到的土地利用资料和图集,在 ArcGIS 9.1 软件技术的支持下对

土地利用图进行数字化,得到内江城区土地利用分布图,获取有关该区域有关土地利用类型面积资料^[12]。

1.4 野外样品采样

根据不同城市功能区有其特定的地表堆积物的分布特点,地表堆积物累积量与土地利用状况和性质、绿化条件、交通状况以及土地裸露程度有直接关系的原则^[13],依据一次典型降水 48 h 后街道恢复原状理论,以典型性和代表性为原则,在木材加工厂、污水处理厂、汽车零配件生产厂、废旧金属回收处理厂附近,选择工矿用地;在日均人流量大,人口经济活动频繁、商业繁华地带选择商业用地;在距离市中心相对较远,绿化条件相对较好,公共基础设施健全,空气质量较好,市区居民居住较多的地区选择住宅用地;在内江市市区城市交通主干道大洲路和东桐路分别选取一个点作为交通用地采样点;将内江师范学院第五和第八教学楼选为建筑用地。记录下采样样品编号、采样地类型、采样时间以及采样地点,将样品做技术处理,妥善保存带回实验室做进一步分析测试,同时在位于内江师范院校内的气象监测站内测出内江城区当日降雨量。

1.5 室内污染浓度测试

将野外采集回来的样品分别进行 COD、氨氮、溶解氧、铬、铜的污染负荷浓度测试。其中,COD 采用重铬酸钾法测定,氨氮采用纳氏试剂光度法测定,溶解氧采用碘量法测定,重金属铬和铜采用直接吸入火焰原子法进行测定。

2 结果与分析

2.1 内江城区降雨径流模拟 SCS 计算结果

利用 SCS 模型,计算一次典型降雨内江城区不同土地利用方式即,工矿用地、商业用地、住宅用地、交通用地和建筑用地所形成的径流深。其中 CN 值根据美国国家工程手册所列的各种土地利用方式的径流曲线值结合实地调研结果将工矿用地、商业用地、住宅用地、交通用地和建筑用地的取值分别确定为 93.00,95.00,90.00,95.00,92.00。测得内江城区当日实际降水量为 28.00 mm,与典型降水相差 0.12 个百分点,可近似看成一次典型降水,计算结果如表 1 所示。

由表 1 可知,一次典型降雨中,内江城区不同土地利用方式产生的径流深不同,工矿用地、商业用地、住宅用地、交通用地、建筑用地所产生的径流深分别是 13.50,16.58,9.88,16.58,12.18。径流系数分别为 0.48,0.59,0.35,0.59,0.44。

表 1 内江城区降雨径流模拟 SCS 计算结果

参数	工矿用地	商业用地	住宅用地	交通用地	建筑用地
降雨量(P)/mm	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00
径流曲线数值(C_N)	93.00	95.00	90.00	95.00	92.00
最大持水量(S)	19.12	13.37	28.22	13.37	22.09
径流深(Q)/mm	13.50	16.58	9.88	16.58	12.18
径流系数(R)	0.48	0.59	0.35	0.59	0.44

2.2 一次典型降雨径流的污染物浓度模拟结果

2.2.1 地表堆积物污染物产生量 结合不同的土地利用方式下地表堆积物的粒级分布特征、污染物浸出浓度^[14],选取 COD、氨氮、溶解氧、铬和铜 5 个衡量指标计算出试验区单位面积污染物产生量(表 2)。

表 2 不同土地利用方式下单位面积地表

污染物	堆积物污染物产生量 $g/(m^2 \cdot d)$				
	工矿用地	商业用地	住宅用地	交通用地	建筑用地
COD	567.00	1309.82	79.04	746.10	146.16
氨氮	11.75	12.85	3.30	12.48	7.92
溶解氧	76.95	66.32	34.91	47.53	30.45
铬	0.24	1.00	0.04	0.27	0.10
铜	0.54	0.25	0.10	1.21	0.15

2.2.2 一次典型降水所产生的污染物浓度 由表 2 计算所得的不同土地利用方式下单位面积地表物污染物产生量,结合表 1 不同城市土地利用方式一次所产生的径流深。估算出在一次典型降雨过程中不同利用方式污染物的浓度及其污染程度,结果见表 3。

由表 3 可知,在一次典型降雨形成的径流污染中,工矿用地的氨氮、溶解氧、铬和铜的含量及其污染程度都是最高的,特别是溶解氧的含量高达 5.70 mg/L,是国家地表水质 V 类标准的 2.85 倍。成为降雨径流的主要污染物。在 COD 评价指标中,除住宅用地和建筑用地没有超过国家地表水质 V 类标准外,其余的三种土地利用方式均超过了国家地表水质 V 类标准。其中,商业用地是 V 类水质标准的 1.98 倍。值得注意的是,工矿用地和交通用地的铬含量都比较高,如果按照地表水质 IV 类标准进行评估的话,它们的含量将超标,对这些污染源也应该引起重视。

另外,从表 3 中还可见,对于不同的土地利用方式,在 5 个指标中,COD 的浓度都是最高的,其中,商业用地高达 79.00 mg/L,污染负荷指数为 V 类标准的 1.98 倍,但从污染负荷的角度来看,COD 并不是降雨径流产生污染物的主要来源。在 5 种土地利用方式下,一次降雨径流产生的污染负荷指数中,溶解氧是最高的。其中,工矿用地、商业用地最为明显,分别是 V 类标准的 2.85 倍和 2.00 倍,住宅用地和建筑

用地同样高于 V 类标准的 1~2 倍。因此,溶解氧是评价指标中,工矿用地的污染负荷指数最高,为 0.44,一次典型降雨形成地面污染物的主要元素。在氨氮但未超过国家地表水质标准。

表 3 一次典型降雨不同城市土地利用方式产生的污染物浓度及其污染程度

土地利用方式	指标	COD	氨氮	溶解氧	铬	铜
工矿用地	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	42.00	0.87	5.70	0.02	0.04
	污染指数	1.05	0.44	2.90	0.20	0.04
商业用地	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	79.00	0.78	4.00	0.01	0.02
	污染指数	1.98	0.39	2.00	0.10	0.02
住宅用地	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	8.00	0.33	3.53	0.00	0.01
	污染指数	0.20	0.17	1.77	0.04	0.01
交通用地	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	45.00	0.75	2.87	0.02	0.07
	污染指数	1.25	0.38	1.43	0.20	0.07
建筑用地	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	12.00	0.65	2.50	0.01	0.01
	污染指数	0.30	0.33	1.25	0.10	0.01
平均值 $\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		37.20	0.68	3.72	0.01	0.03
V 类标准值 $\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		40.00	2.00	2.00	0.10	1.00

注:国家地表水环境标准(GB3838—2002)。

2.3 污染负荷总量估算

内江城区工矿用地、商业用地、住宅用地、交通用地和建筑用地的面积采用谢贤健等人^[12]对内江城区 2009 年不同土地利用类型面积的统计结果(表 4),内江城区共有 9 种土地利用类型,工矿用地、商业用地、住宅用地、交通用地、建筑用地为主要城市用地,其余 4 种城市土地利用分别是江河湖泊泄洪用地、滞洪用地、其他已经供应尚未建成用地、未达到供地条件的用地,这 4 种土地归为城市未利用地,占城市用地总

面积的 58.15%,主要分布在内江城区边缘地带,这些地区人口相对较少、工农业经济发展较为滞后,各种点源和面源污染相对较少,对内江主城区污染影响相对较小,研究意义较小,因此,本文未对这 4 种城市土地作讨论。结合表 3 中几个污染物在 5 种主要城市土地利用下单位面积的产污量,估算在一次典型降雨所形成的径流下不同土地利用方式各自 COD、氨氮、溶解氧、铬和铜的总产值,结果见表 5。

表 4 2009 年内江市城市不同土地利用类型面积及其比例^[12]

土地利用类型	工矿用地	商业用地	交通用地	住宅用地	建筑用地	其他
面积/km ²	0.52	1.13	0.42	1.35	0.51	5.46
百分比/%	5.54	12.03	4.47	14.42	5.43	58.15

表 5 不同土地利用方式下降雨径流产生的污染负荷

污染物	项目	工矿用地	商业用地	住宅用地	交通用地	建筑用地	总计
COD	负荷/kg	294.84	1571.63	106.70	313.37	74.54	2361.08
	所占比例/%	12.49	66.56	4.52	13.27	3.16	100.00
氨氮	负荷/kg	6.11	14.52	5.30	5.24	4.04	35.20
	所占比例/%	17.35	41.25	15.03	14.90	11.47	100.00
溶解氧	负荷/kg	40.01	74.94	47.12	19.97	15.53	197.57
	所占比例/%	20.25	37.93	23.85	10.11	7.86	100.00
铬	负荷/kg	0.13	1.12	0.06	0.11	0.05	1.47
	所占比例/%	8.57	76.36	3.88	7.75	3.40	100.00
铜	负荷/kg	0.28	0.28	0.13	0.51	0.08	1.28
	所占比例/%	21.95	21.95	10.39	39.84	5.86	100.00

从表 5 中可见,在一次典型降雨中,COD 的污染负荷总量高达 2 361.08 kg,氨氮、溶解氮、铬、铜的负荷总量分别为 35.20,197.57,1.47,1.28 kg。据内江

城区气象局统计资料,内江城区近 5 a 来一次性降雨超过 28 mm 的降雨次数年平均为 6 次。据此可以估计,内江城区污染物年产量,COD 为 14 166.48 kg,

氨氮为 211.20 kg,溶解氧为 1 185.42 kg,铬为 8.82 kg,铜为 7.68 kg。从表 5 中还可知,在一次典型降雨产生的地面径流中,商业用地的污染指数是最高的,COD 为 46.56%,氨氮为 41.25%,溶解氧为 37.93%,铬为 76.36%,特别要指出的是 COD 和铬的污染指数接近于建筑用地的 20 倍。这些主要是因为商业用地基本上都是不透水面,其 COD、氨氮、溶解氧和铬的浸出浓度都很高,并且商业用地面积在 5 种土地利用方式面积中所占比例相当大,分别超出工矿用地、交通用地、建筑用地 6.49、7.56、6.60 个百分点,与面积指数最大的住宅用地仅差 2.39 个百分点。同样,工矿用地的 COD、氨氮、溶解氧的污染指数也是不容忽视的,在 5 种土地利用方式中分别列第三、第二和第三;建筑用地的氨氮、溶解氧污染指数同样值得关注,其污染负荷指数分别在五种土地利用方式中列第三和第二;交通用地的 COD、氨氮、铜污染指数贡献率分别为 13.27%、14.90%、和 39.84%,在 5 种土地利用方式中分别列第二、第三和第一。

这些溶解的或固体物质在降雨径流的淋洗和冲刷作用下,通过径流过程直接排入研究区河道、湖泊以及河口,引起受纳水体污染,直接影响人类生存的环境质量,污染饮用水源,引起水体的富营养化,破坏水生生物的生存环境,造成土壤生产能力和水质的下降,严重影响人民生产、生活质量和福利水平的高低^[15-16]。

3 结 论

在一次典型降雨形成的径流污染中, ρ_{COD} 为 37.20 mg/L, $\rho_{\text{氨氮}}$ 为 0.67 mg/L, $\rho_{\text{溶解氧}}$ 为 3.72 mg/L, $\rho_{\text{铬}}$ 为 0.01 mg/L, $\rho_{\text{铜}}$ 为 0.03 mg/L,商业用地的 COD 最大,污染负荷为 79.00 mg/L,工业用地的氨氮、溶解氧、铬的污染负荷浓度最大,分别为 0.87、5.70、0.018 mg/L;交通用地的铜污染负荷浓度最大,达到 0.07 mg/L。内江城区因降雨产生的年污染负荷量,COD 为 14 166.48 kg,氨氮为 211.20 kg,溶解氧为 1 185.42 kg,铬为 8.82 kg,铜为 7.68 kg,商业用地的污染负荷贡献率最大,其中,COD 为 66.56%,氨氮为 47.25%,溶解氧为 23.85%,铬为 76.36%。

参考文献:

- [1] Basnyat P, Teeter L D, Flynn K M, et al. Relationships between landscape characteristics and nonpoint source pollution input to coastal estuaries[J]. *Environmental Management*, 1999, 23(4): 539-549.
- [2] 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): 808-816.
- [3] 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.
- [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): 32-39.
- [5] Schueler T R. The importance of imperviousness[J]. *Watrshed Protection Techniques*, 1994(1): 100-111.
- [6] US EPA. Results of the National Urban Runoff Program[R]. Washington DC: USEPA, 1983.
- [7] 李耀初,吴淮,罗伟华. 惠阳城区降雨径流重金属污染特征研究: 重金属污染负荷计算[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(3): 57-60.
- [8] 郭林,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.
- [9] 袁作新. 流域水文模型[M]. 北京: 水利水电出版社, 1990.
- [10] 魏文秋,谢淑秦. 遥感资料在 SCS 模型产流计算中的应用[J]. *环境遥感*, 1992, 7(4): 243-250.
- [11] 徐秋宁,马孝义,娄宗科,等. 小型集水区降雨径流计算模型研究[J]. *西南农业大学学报*, 2002, 24(2): 97-107.
- [12] 谢贤健,屈小斌,兰代萍,等. 中小城市土地利用空间结构分析的尺度效应[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(7): 897-902.
- [13] William W. Urban Land Runoff Considerations-urbanization and Water Quality Control[M]. Minneapolis: American Water Resources Assn, 1995.
- [14] 李耀初,吴淮,罗伟华. 惠阳城区径流重金属污染特征研究: I. 地表堆积物重金属含量分析[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(3): 51-56.
- [15] 贺缠生,傅伯杰,陈利定. 非点源污染的管理及控制[J]. *环境科学*, 1998(5): 87-91.
- [16] 杨爱玲,朱颜明. 地表水环境非点源污染研究[J]. *环境科学进展*, 1999(5): 60-67.