

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.03.011

基于GIS的漳河上游城市非点源污染负荷估算

付超¹, 苏晶², 赵海萍¹, 李清雪¹

(1. 河北工程大学能源与环境工程学院, 河北邯郸 056038; 2. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120)

摘要:为了解漳河上游水污染成因,2017年对长治市城区典型功能区不同下垫面进行了11场降雨监测,分析了次降雨径流污染物平均浓度(EMC),采用平均浓度模型法估算了2017年漳河上游各城市非点源污染年负荷,并结合ArcGIS技术分析了各市县污染程度。结果表明:2017年,长治市城区降雨径流非点源污染较为严重;各功能区路面径流污染物的EMC值大于屋面,主要污染源为SS、COD_{Cr}、TN和重金属Cd;商业区路面SS的EMC值高达666.87 mg/L,工业区屋面Cd的EMC值是44.27 μg/L,居民区路面COD_{Cr}、TN的EMC值分别为148.69 mg/L、6.273 mg/L。长治市城区非点源TN、TP、SS、COD_{Cr}、Cd、Cu、Zn和Pb年负荷入河总量分别为5.301 t/a、0.464 t/a、267.310 t/a、177.890 t/a、0.075 t/a、0.150 t/a、0.384 t/a和0.023 t/a;3种下垫面非点源污染年负荷入河贡献率顺序为屋面、路面、绿地。从空间分布方面来看,长治市城区污染的产出最多,武乡县产出最少。

关键词:非点源污染;次降雨径流污染物平均浓度;污染负荷;空间分析;漳河上游

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)03-0060-07

Estimation of urban non-point source pollution load in upper reaches of Zhanghe River based on GIS//FU Chao¹, SU Jing², ZHAO Haiping¹, LI Qingxue¹ (1. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. China Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: In order to understand the causes of water pollution in the upper reaches of Zhanghe River, 11 rainfall monitoring were conducted on different underlying surfaces of typical functional areas in Changzhi City in 2017, and the event mean concentration (EMC) of pollutants in the runoff of each rainfall was analyzed. The annual non-point source pollution load of each city in the upper reaches of Zhanghe River in 2017 was estimated by the average concentration model method, and the pollution degree of each city and county was analyzed by using ArcGIS technology. The results show that in 2017, the non-point source pollution of rainfall runoff in Changzhi City is more serious. The EMC value of pavement runoff pollutants in each functional area is greater than that of roof, and the main pollution sources are SS, COD_{Cr}, TN and heavy metal Cd. The EMC value of SS of commercial area pavement is 666.87 mg/L, that of Cd of industrial area roof is 44.27 μg/L, and that of COD_{Cr} and TN of residential area pavement is 148.69 mg/L and 6.273 mg/L, respectively. The total annual load of non-point source TN, TP, SS, COD_{Cr}, CD, Cu, Zn and Pb in the urban area of Changzhi City is 5.301 t/a, 0.464 t/a, 267.310 t/a, 177.890 t/a, 0.075 t/a, 0.150 t/a, 0.384 t/a and 0.023 t/a, respectively. The contribution rate of non-point source pollution annual load on three kinds of underlying surface to the river is in the order from large to small of roof, pavement and green space. In terms of spatial distribution, Changzhi City has the most pollution output and Wuxiang County has the least.

Key words: non-point source pollution; EMC; pollution load; spatial analysis; upper reaches of Zhanghe River

随着点源污染控制的不断完善和城市化进程的不断推进,城市非点源污染占比日益增加,已成为城市水环境保护面临的最重要问题之一^[1-4]。

降雨是非点源污染形成的动力因素,径流携带下垫面大量污染物进入河流、湖泊等接纳水体,造成了非点源污染^[5]。非点源污染受地理气候等多种

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201401030)

作者简介:付超(1993—),女,硕士研究生,研究方向为城市水污染。E-mail:fuchao_1129@163.com

通信作者:李清雪,教授。E-mail:liqingxue_610@126.com

因素的影响,具有随机性强、分散性广、潜伏滞后和控制复杂等特点^[6]。在美国,城市非点源污染物占 COD 总量的 73%、TN 总量的 89%^[7];在南非,Mgeni 河流域污染物的 85% 来自城市非点源污染^[8]。我国城市非点源污染问题也非常严重,在太湖、滇池等重要湖泊,非点源污染对水体污染的贡献率超过 60%^[9];在北京和上海,城市雨水径流污染对中心城区水体污染的贡献率高达 50%,对其他水体污染的贡献率分别是 12% 和 20%^[10];天津城市非点源 COD、NH₃-N 入河负荷量占全市非点源污染总负荷量的 60% 左右^[11];钱钧等^[12]研究了管网分流制对秦淮河流域水体污染的贡献,得出降雨类型为中雨时,非点源污染物 COD 和 NH₃-N 入河负荷总量占水体污染负荷总量的 51% 和 48%;王昭等^[13]研究得到城市路面径流非点源污染物中重金属对水环境的污染贡献率为 35%~75%。研究城市降雨径流对水质的影响,估算非点源污染负荷量,对城市水环境综合管理和水体生态健康具有重要意义。

漳河流经山西、河北、河南 3 省,是海河流域西南部的重要支流,上游流域面积为 18 284 km² (图 1)。上游段为 3 省重要的工、农业生产用水和饮用水水源,但受人类干扰强烈,是我国水事矛盾尖锐地区之一。城镇生活污水和工业废水排放造成上游河流水质恶化,严重制约流域经济发展^[14-15]。为全面了解漳河上游水环境污染情况,本研究以漳河上游城市——长治市为研究对象,在 2017 年选取不同典型功能区不同下垫面进行降雨径流污染监测,采用平均浓度模型法估算上游城市非点源污染年负荷,并利用 ArcGIS 技术分析上游各市县污染程度,以期为漳河流域非点源污染控制提供技术支持。

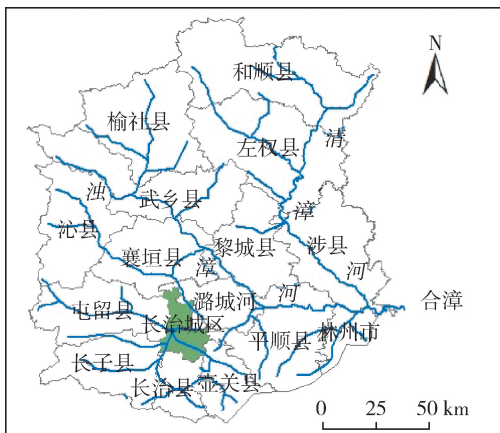


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of study area

1 研究区概况与采样

1.1 研究区概况

长治市位于山西省东南部,太行山南段,111°59'E~113°44'E,35°49'N~37°07'N,总面积 13 955 km²。长治市属暖温带半湿润大陆性季风气候,特点是冬长夏短,既无严寒也无酷暑,气候温和,雨热同季,大陆性季风相对持久,海洋性季风较弱,年平均温度为 9.7℃,降雨多集中于 6—8 月,多年平均降水量在 530 mm 以上。

1.2 采样与测定

依据长治市不同地区的土地利用类型和生产生活条件,将城区分为居民区、商业区和工业区 3 种功能区,各功能区又分为屋面、路面两种下垫面。分别在每种功能区选择 1 块典型区域作为研究对象:居民区选取梅辉坡小区(紧挨金威商城,周边相对繁华),商业区选取金威商城附近(车流量、人流量大,周边商铺众多),工业区选取高新工业园区(规模最大,主要是制造业、新材料和生物制药业)。

当降雨发生并产生径流时,屋面雨水径流在雨落管出口处用 1 000 mL 洁净聚乙烯瓶收集;路面雨水径流利用自制专用工具收集路边雨篦子处的雨水,并转移到 500 mL 洁净聚乙烯瓶中。采样频率按照“前密后疏”的原则,产生径流的前 10 min 内,每隔 5 min 采样 1 次;10~30 min,每隔 10 min 采样 1 次;30~60 min,每隔 15 min 采样 1 次;60 min 以后每隔 30 min 采样 1 次,样品采集后迅速带回实验室分析。每场降雨因降雨历时、降雨强度、采样次数不同,每次采集水样个数为 5~8 个。

选取监测指标为 COD_{Cr}、TN、TP、SS 和重金属(Cd、Cu、Pb、Zn),分析方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[16]。

1.3 降雨特征

2017 年为平水年,共监测了 11 场降雨,降雨事件的降雨特征见表 1。

2 研究方法

采用次降雨径流污染物平均浓度(event mean concentration, EMC)来评价降雨径流过程对受纳水体的影响,计算公式为

$$E_{MC} = M/V = \frac{\sum_{i=1}^k \rho_j V_j}{\sum_{i=1}^k V_j} \quad (1)$$

式中: E_{MC} 为 EMC 值,mg/L; ρ_j 为随时间变化的污染物质量浓度,mg/L; V_j 为随时间变化的径流量,L; k 为降雨场次; M 为整个降雨过程地表径流释放的污染物质总质量,mg; V 为径流总体积,L。

表1 2017年多场次降雨特征

Table 1 Characteristics of several rainfalls in 2017

降雨场次	24 h 降水量/mm	降雨类型	采样时段降水量/mm	采样时降雨持续时间/min	采样时段平均降雨强度/(mm·h ⁻¹)	前期晴天数/d
20170530号	6.8	小雨	5.9	80	4.44	7
20170621号	7.9	小雨	1.2	60	1.20	10
20170706号	6.6	小雨	2.0	95	1.26	2
20170714号	16.3	中雨	13.8	65	12.70	7
20170718号	3.3	小雨	2.4	79	1.80	4
20170727号	11.0	中雨	2.0	142	0.84	4
20170728号	15.5	中雨	3.2	150	1.28	1
20170817号	4.8	小雨	4.4	85	3.12	4
20170818号	11.3	中雨	4.4	40	6.60	1
20170826号	7.9	小雨	2.6	124	1.26	3
20170904号	1.0	小雨	1.0	96	0.60	3

采用综合径流系数法计算长治市各功能区不同下垫面径流污染物的次降雨径流加权平均质量浓度,计算公式为

$$\bar{E}_{MC} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i E_{MCi}}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (2)$$

式中: \bar{E}_{MC} 为次降雨径流污染物加权平均质量浓度,mg/L; q_i 为第*i*次降雨事件的降雨量,mm; E_{MCi} 为第*i*次降雨事件径流污染物的平均质量浓度,mg/L。

城市降雨径流污染负荷是由单场或多次降雨冲刷地表后释放的污染物总量,而排放到受纳水体的径流污染物的量有一定的随机性,有很大的误差,因此采用年径流污染负荷进行计算,公式为

$$L_x = C_r P \lambda (\Psi_r A_r \rho_r + \Psi_h A_h \rho_h + \Psi_g A_g \rho_g) \quad (3)$$

式中: L_x 为降雨径流污染物进入河流的年负荷总量,t/a; C_r 为不产生雨水径流时的降雨修正系数,取0.9; P 为年降水量,mm; λ 为城市非点源污染物随雨水径流入河系数,取0.13^[17-18]; Ψ_r 、 Ψ_h 、 Ψ_g 分别为道路、屋顶、绿地的径流系数,参考GB 50014—2006《室外排水设计规范》取 $\Psi_r = \Psi_h = 0.9$ 、 $\Psi_g = 0.15$; A_r 、 A_h 、 A_g 分别为道路、屋顶、绿地的面积,m²; ρ_r 、 ρ_h 、 ρ_g 分别为道路、屋顶、绿地径流污染物的加权平均质量浓度,mg/L。

3 结果与分析

3.1 长治市城区污染物的 EMC

采用式(1)计算长治市城区典型功能区不同下垫面各场次降雨径流污染物的 EMC 值,结果如图2所示,图中居屋代表居民区屋面,居路代表居民区路面,其他功能区 and 居民区表示类似。

从图2可以看出,不同功能区不同下垫面各场次降雨径流中 SS 的 EMC 值在 2.074 ~ 666.87 mg/L 之间,变化范围较大,最大、最小值出现在 20170714 号降雨场次商业区路面、工业区屋面;多场降雨中不同功能区 SS 的 EMC 值商业区最大、工业区最小,不

同下垫面 SS 的 EMC 值为路面大、屋面小。COD_{Cr} 的 EMC 值在 30.69 ~ 148.69 mg/L 之间,除 20170706 号降雨场次居民区屋面、商业区屋面、商业区路面外,各场降雨不同功能区不同下垫面的 EMC 值均超过 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中 V 类水标准;20170706 号降雨场次中居民区路面 COD_{Cr} 的 EMC 值达到 148.69 mg/L,超过《地表水环境质量标准》中 V 类水标准的 3.72 倍,最小值出现在商业区路面;各场次降雨不同功能区不同下垫面 COD_{Cr} 的 EMC 值波动不大,污染相对严重。TN 的 EMC 值在 0.509 ~ 6.273 mg/L 之间,最大值出现在 20170621 号降雨场次居民区路面,其 EMC 值超过《地表水环境质量标准》中 V 类水标准的 3.14 倍,最小值出现在 20170904 号降雨场次居民区屋面;居民区屋面、工业区屋面、工业区路面 TN 的 EMC 的最大值都出现在 20170621 号降雨场次,分别是 5.000 mg/L、3.918 mg/L、4.827 mg/L,分别为 V 类水标准的 2.50、1.96、2.41 倍;多场降雨监测到的不同功能区不同下垫面 TN 的 EMC 值超过 V 类水标准的接近半数,污染程度为商业区最大、居民区最小,不同下垫面的 EMC 值为路面大屋面小。TP 的 EMC 值在 0.029 ~ 0.624 mg/L 之间,最大值出现在 20170714 号降雨场次商业区路面,其 EMC 值超过 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中 V 类水标准的 1.56 倍,最小值出现在 20170718 号降雨场次商业区屋面;各场降雨不同功能区不同下垫面 TP 的 EMC 值大小顺序为商业区路面、居民区路面、工业区路面、商业区屋面、居民区屋面、工业区屋面,这与 SS 的 EMC 值规律相同;可见 TP 与 SS 具有一定的相关性,SS 是污染物的载体,而 TP 吸附在颗粒的表面被雨水冲刷形成径流汇入受纳水体;在所监测到的降雨中,只有少数几场降雨 TP 的 EMC 值超过 V 类水标准,总体水质较好。

重金属具有不可降解性和长期累积性。图2中,Cd 的 EMC 值范围是 9.65 ~ 44.27 μg/L,除 20170727 号降雨场次工业区路面外,各场降雨不同功能区路面、屋面径流其 EMC 值均超过 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中 V 类水标准;20170714 号降雨场次工业区屋面 Cd 的 EMC 值最大,是 V 类水标准的 4.43 倍,污染严重。Cu 的 EMC 值的范围是 24.43 ~ 140.40 μg/L,除 20170714 号降雨场次商业区路面、工业区路面以及 20170727 号降雨场次工业区路面外,其余均在 I 类水标准范围内。Zn 的 EMC 值范围是 67.00 ~ 290.43 μg/L,均超过 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的 I 类水标准,但是均在 II 类水标准(≤1 000 μg/L)范围内。

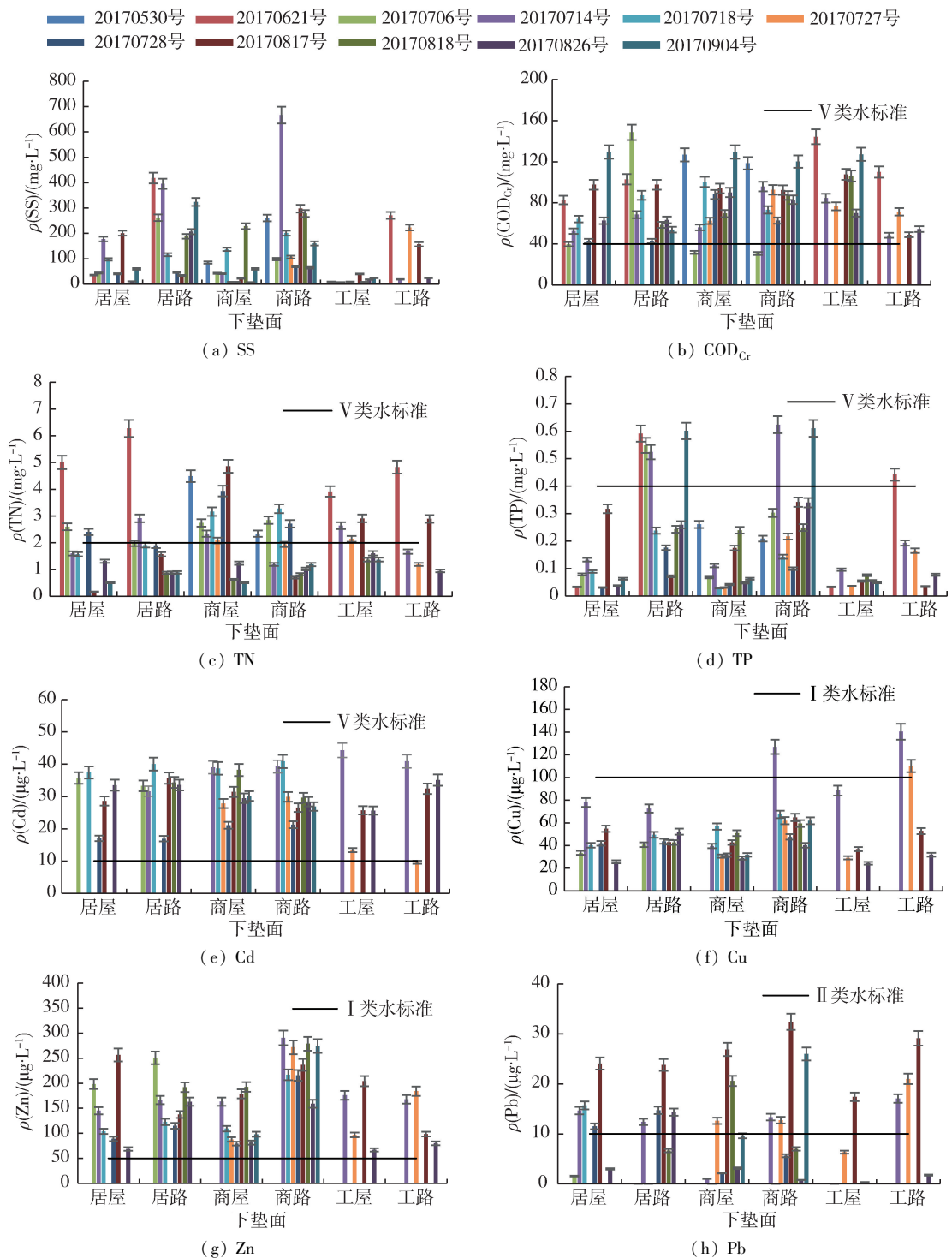


图2 2017年各场次降雨不同污染物的EMC值

Fig.2 EMC values of different pollutions of each rainfall in 2017

Pb的EMC值范围是0~32.41 μg/L,其中近一半的EMC值超过GB3838—2002《地表水环境质量标准》中Ⅱ类水标准限值。

总体来讲,长治市城区降雨径流非点源污染较为严重,主要污染源为SS、COD_{Cr}、TN和重金属Cd。对于不同的功能区,商业区径流水质相对较差,其次是居民区和工业区,各功能区路面SS、COD_{Cr}、TN和TP的EMC值明显高于屋面,这与王显海等^[19]在宁波城区和Lee等^[20]在不同功能区的结果大致

相同。长治市降雨径流中TN的EMC值低于北京^[21]、宜兴^[22]、太原^[23]等地;长治市重金属污染物Cd、Cu、Zn和Pb的EMC值均低于西安市^[24]和东莞市^[25],其Cu的EMC值在Ⅱ类水标准范围内,Zn、Pb的EMC值在Ⅲ类水标准范围内,与太原地区相似^[23]。

长治市城区不同功能区以及不同下垫面的径流污染程度不同,可能是因为径流污染物的来源不同。屋面降雨径流污染物主要来源于大气沉降;路面污染物来源于轮胎磨损、汽车尾气排放、污染物沉积、

行人和携带物等^[26];商业区径流水质较差是因为商业区位于繁华地带,人流、车辆众多,再加上道路清扫不及时等因素共同造成 SS、COD_{Cr} 等污染,而且汽车尾气排放的 NO_x 很容易造成降雨径流中氮污染。Cd 具有距离工业区越远浓度越低的特征,可能与市区、工业园区产生的大气粉尘密切相关^[27]。少数几场降雨不同污染物浓度偏高,可能与降雨强度、前期晴天数和下垫面性质有关。

3.2 长治市城区非点源污染负荷入河总量

采用式(2)(3)计算长治市城区 2017 年城市路面、屋面、绿地非点源污染物年负荷入河总量,结果见表 2。其中绿地径流污染物的 EMC 值参考与长治市污染程度类似城市的监测结果^[24,28],长治市城区各类型下垫面面积来自 2018 年《长治市统计年鉴》,2017 年降水量来自 2018 年《长治市水资源公报》。将长治市城区路面、屋面和绿地各污染物年负荷与相对应的路面、屋面和绿地面积作比值,得到城市不同下垫面各污染物输出系数,见表 3。

表 2 2017 年长治市非点源污染物年负荷入河量

Table 2 Annual load of non-point source pollutants into rivers of Changzhi City in 2017 t/a

下垫面	TN	TP	SS	COD _{Cr}	Cd	Cu	Zn	Pb
路面	0.753	0.126	92.852	29.792	0.014	0.035	0.077	0.006
屋面	4.019	0.212	128.260	137.910	0.058	0.096	0.280	0.015
绿地	0.529	0.127	46.194	10.194	0.003	0.019	0.027	0.002
合计	5.301	0.465	267.310	177.890	0.075	0.150	0.384	0.023

表 3 2017 年长治市不同下垫面各指标的输出系数

Table 3 Output coefficients of various indexes with different underlying surfaces of Changzhi City in 2017 kg/(hm²·a)

下垫面	TN	TP	SS	COD _{Cr}	Cd	Cu	Zn	Pb
路面	0.947	0.159	116.824	37.484	0.018	0.044	0.097	0.008
屋面	0.852	0.045	27.185	29.231	0.012	0.020	0.059	0.003
绿地	0.138	0.033	12.071	2.664	0.001	0.005	0.007	0.001
合计	1.937	0.237	156.080	69.379	0.031	0.069	0.163	0.012

由表 3 可知,长治市城区绿地各污染物输出系数最小,路面各污染物输出系数最大,这与下垫面类型、地表污染程度以及雨水径流特性有很大的关系。由于路面污染物累积较多,经降雨冲刷后排放至河流,造成污染物浓度偏高;屋面污染物累积量较少,径流携带的污染物较少;绿地径流污染物浓度最低,是因为污染物被土壤和植物根系的截留、吸收和吸附作用去除了一部分。相比西安城区^[29]、上海市^[30],2017 年长治市城区不同下垫面非点源污染物输出系数处于较低水平。

3.3 长治市城区非点源污染负荷入河贡献率

图 3 为 2017 年长治市典型下垫面污染物年负

荷入河贡献率。由图 3 可知,2017 年长治市城区同一下垫面不同污染物年负荷入河贡献率不同,相同污染物不同下垫面年负荷入河贡献率也不同。屋面径流中各污染物贡献率均较高,在 46%~77% 范围内,其中 TN、COD_{Cr}、Cd 贡献率在 76% 左右;路面径流各污染物贡献率范围为 14%~35%;绿地径流各污染物贡献率偏小,均在 2%~27% 范围内。3 种下垫面径流污染物入河贡献率趋势为屋面>路面>绿地,说明在入河前,绿地过滤并吸附了一部分径流污染物,使得入河污染物负荷量明显消减,而屋面和路面受材质的影响,入河污染物负荷偏高。

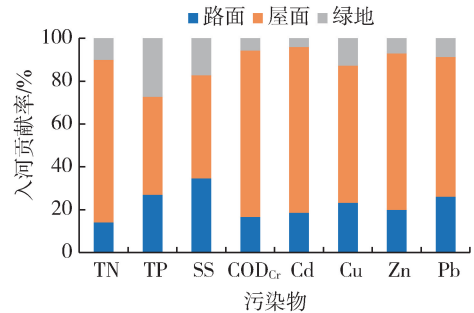


图 3 2017 年长治市典型下垫面污染物年负荷入河贡献率
Fig. 3 Contribution rate of pollutant annual load with typical underlying surfaces into rivers of Changzhi City in 2017

3.4 漳河上游城市非点源污染负荷空间分布

根据长治市城区降雨径流污染物 \bar{E}_{MC} 值,采用式(3)计算漳河上游其他城市 2017 年非点源污染年负荷量,模型计算中所需数据参考相关统计年鉴和水资源公报,利用 ArcGIS 技术显示污染物 TN、TP、SS、COD_{Cr}、Cd、Cu、Zn 和 Pb 负荷年入河量在各市县的分布,结果如图 4 所示,其中林州市不参与计算。

图 4(a)(d)(e)(g)显示,2017 年漳河上游流域非点源 TN、COD_{Cr}、Cd、Zn 污染负荷年入河量从大到小的城市依次为:长治城区、涉县、潞城市、襄垣县、长治县、和顺县、左权县、屯留县、长子县、沁县、榆社县、平顺县、黎城县、壶关县、武乡县。图 4(c)显示,SS 污染负荷年入河量从大到小的城市依次为:长治城区、涉县、潞城市、襄垣县、长治县、长子县、左权县、屯留县、和顺县、壶关县、沁县、平顺县、黎城县、榆社县、武乡县。其他不再赘述。可见,2017 年漳河上游流域各城市中长治市城区污染最为严重,主要原因是长治市城区是全市的政治经济文化中心,工业企业较多。而近些年由于长治市城镇化率的快速增加,人为活动影响使得污染物排放量加大,因此污染较其他市县严重。武乡县位于长治最北部,城市化进程较慢,交通覆盖率偏低,多以农业为主,因此城市非点源污染较少。

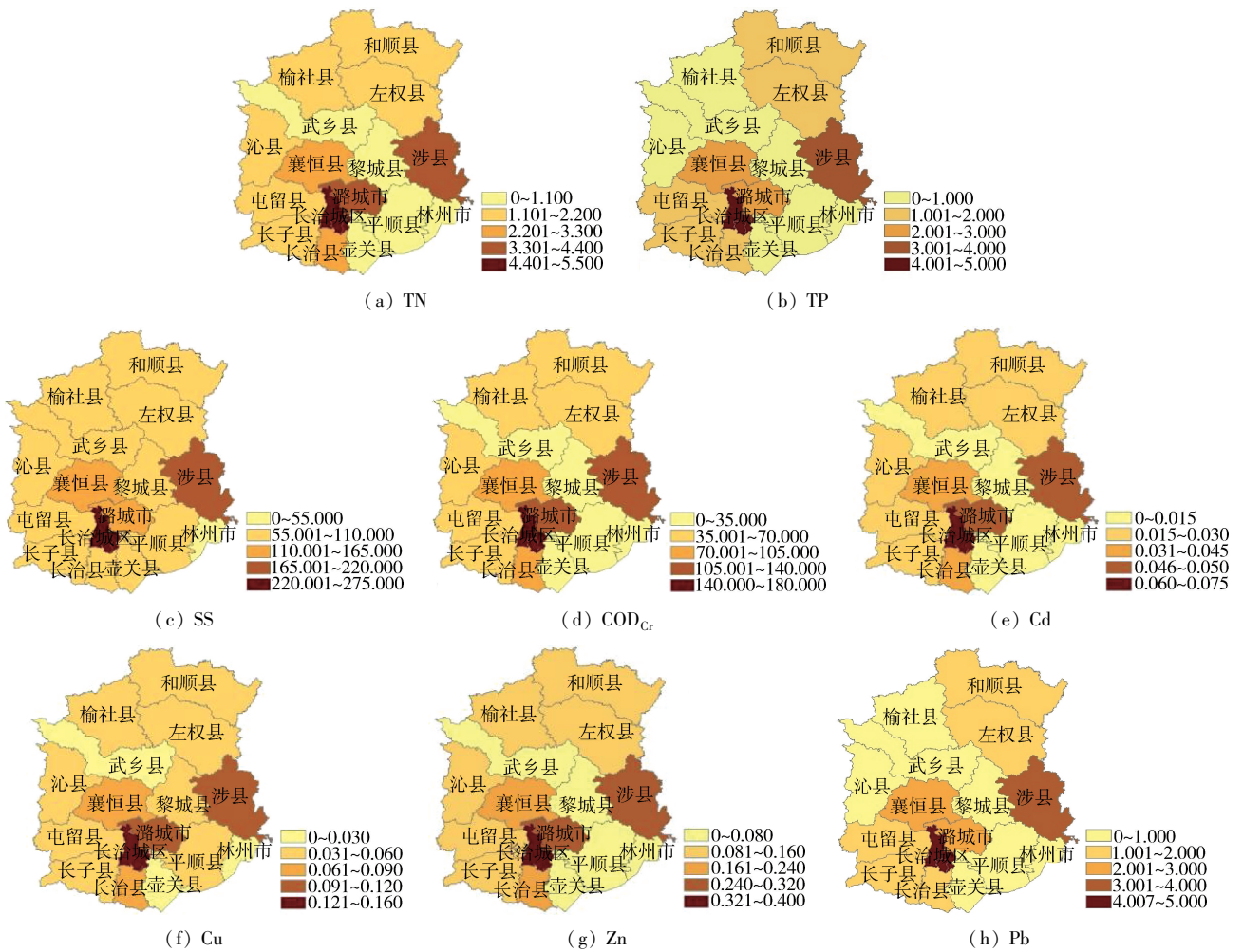


图4 2017年漳河上游各市县不同污染物年负荷入河量空间分布(单位:t/a)

Fig. 4 Spatial distribution of annual load of different pollutants into rivers in cities and counties of Zhanghe River upstream in 2017(unit: t/a)

4 结论

a. 2017年长治市城区降雨径流非点源污染较为严重,各场次降雨商业区、工业区、居民区径流污染物的EMC值路面总体高于屋面,主要污染源为SS、 COD_{Cr} 、TN和重金属Cd。

b. 2017年长治市城区非点源污染物TN、TP、SS、 COD_{Cr} 、Cd、Cu、Zn和Pb年负荷入河总量分别为5.301 t/a、0.464 t/a、267.310 t/a、177.890 t/a、0.075 t/a、0.150 t/a、0.384 t/a和0.023 t/a。长治市城区绿地污染物输出系数最小,路面污染物输出系数最大,这与下垫面类型、地表污染程度以及雨水径流特性有很大的关系。

c. 2017年长治市城区屋面径流TN、 COD_{Cr} 、Cd的入河贡献率偏高,均在76%左右。不同下垫面非点源污染物年负荷入河贡献率顺序为屋面、路面、绿地,同一下垫面不同污染物或相同污染物不同下垫面年负荷入河贡献率都不同。

d. 漳河上游流域各城市中长治市城区各污染物

入河量最大,污染最为严重,武乡县污染程度最低。

参考文献:

- [1] HUANG T L, LI X, RIJNAARTS H, et al. Effects of storm runoff on the thermal regime and water quality of a deep, stratified reservoir in a temperate monsoon zone, in Northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 485/486(13): 820-827.
- [2] TANG J Y M, ARYAL R, DELETIC A, et al. Toxicity characterization of urban storm water with bioanalytical tools[J]. Water Research, 2013, 47: 5594-5606.
- [3] 窦月芹, 吴涓, 陈众, 等. 合肥春季雨水径流污染过程及特征分析[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 86-90. (DOU Yueqin, WU Juan, CHEN Zhong, et al. Spring rain runoff pollution process and its characteristics analysis in Hefei City[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 86-90. (in Chinese))
- [4] 陈晓丽, 雷勇, 黄国如. 北江飞来峡库区流域非点源污染现状评价[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 44-48, 53. (CHEN Xiaoli, LEI Yong, HUANG Guoru. Evaluation on non-point source pollution in Feilaixia Reservoir Area of

- Beijiang River [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35 (2):44-48, 53. (in Chinese))
- [5] HUANG J, DU P, AO C, et al. Characterization of surface runoff from a subtropics urban catchment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(2):148-152.
- [6] 程静, 贾天下, 欧阳威. 基于 STELLA 和输出系数法的流域非点源负荷预测及污染控制措施 [J]. *水资源保护*, 2017, 33 (3): 74-81. (CHENG Jing, JIA Tianxia, OUYANG Wei. Prediction of non-point source load based on STELLA and export coefficient method and prevention measures [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33 (3): 74-81. (in Chinese))
- [7] ZHAI X, ZHANG Y, WANG X, et al. Non-point source pollution modelling using soil and water assessment tool and its parameter sensitivity analysis in Xin'anjiang Catchment, China [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28 (4):1627-1640.
- [8] JOY T A, MUTHUKRISHNA V K. Assessing non-point source pollution models: a review [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 27(5):1913-1922.
- [9] 张志彬, 孟庆宇, 马征. 城市面源污染的污染特征研究 [J]. *给水排水*, 2016, 52 (增刊 1): 163-167. (ZHANG Zhibin, MENG Qingyu, MA Zheng. Study on pollution characteristics of urban non-point source pollution [J]. *Water Supply and Sewerage*, 2016, 52 (Sup 1): 163-167. (in Chinese))
- [10] 何湖滨, 邓跃. 扬州市不同功能区径流污染负荷空间分布差异 [J]. *价值工程*, 2018, 37 (33): 69-71. (HE Hubin, DENG Yue. Spatial distribution differences of storm runoff pollution loads in different functional areas of Yangzhou [J]. *Value Engineering*, 2018, 37 (33): 69-71. (in Chinese))
- [11] 徐志勇. 天津市非点源污染状况调查及控制对策 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [12] 钱钧, 刘祥, 秦文浩, 等. 不同排水体制对内秦淮河污染负荷的比较分析 [J]. *安徽农业科学*, 2014, 42 (14): 4367-4370. (QIAN Jun, LIU Xiang, QIN Wenhao, et al. Comparative analysis of different drainage systems for pollution load of internal Qinhuai River [J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2014, 42(14):4367-4370. (in Chinese))
- [13] 王昭, 李娟, 李丹萍, 等. 城市路面径流重金属排放规律及初期效应研究 [J]. *环境工程*, 2017, 35 (6): 130-135. (WANG Zhao, LI Juan, LI Danping, et al. Discharge characteristics and first flush effect or road runoff in urban [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35 (6): 130-135. (in Chinese))
- [14] 韩鹏, 赵瑞霞, 储昊. 漳河上游水资源管理现状问题浅析及对策建议 [J]. *海河水利*, 2018 (3): 8-9, 11. (HAN Peng, ZHAO Ruixia, CHU Hao. Analysis on the current situation of water resources management in the upper reaches of Zhanghe River and countermeasures [J]. *Haihe Water Resources*, 2018 (3): 8-9, 11. (in Chinese))
- [15] 李屹, 周滨, 刘红磊, 等. 海河干流流域暴雨径流非点源污染负荷解析与控制策略 [J]. *安全与环境学报*, 2018, 18 (1): 230-235. (LI Yi, ZHOU Bin, LIU Honglie, et al. Analysis and control strategy of non-point source pollution load of storm runoff in the main stream of Haihe River Basin [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18 (1): 230-235. (in Chinese))
- [16] 国家环境保护总局. 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.
- [17] 张宝中. 漳河上游流域农业非点源氮污染负荷估算 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017.
- [18] 付意成, 魏传江, 臧文斌, 等. 浑太河污染物入河控制量研究 [J]. *水电能源科学*, 2010, 28 (12): 21-25. (FU Yicheng, WEI Chuanjiang, ZANG Wenbin, et al. Study on the control amount of pollutants entering the river in the Huntaihe River [J]. *Water Resources and Power*, 2010, 28 (12): 21-25. (in Chinese))
- [19] 王显海, 来庆云, 杜靖宇, 等. 宁波市城区不同下垫面降雨径流水质特征分析 [J]. *环境工程*, 2016, 34 (增刊 1): 312-316. (WANG Xianhai, LAI Qingyun, DU Jingyu, et al. Analysis on water-runoff pollutions of different underlying surfaces in Ningbo [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34 (Sup1): 312-316. (in Chinese))
- [20] LEE J H, BANG K W, KETCHUM L H, et al. First flush analysis of urban storm runoff [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 293 (1/2/3): 163-175.
- [21] 马慧雅. 北京城区降雨径流污染特征分析 [D]. 郑州: 河南大学, 2016.
- [22] 陈双. 宜兴市城市雨水径流污染特性的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [23] 来雪慧, 赵金安, 李丹, 等. 太原市工业区不同下垫面降雨径流污染特征 [J]. *水土保持通报*, 2015, 35 (6): 97-100, 105. (LAI Xuehui, ZHAO Jinan, LI Dan, et al. Pollution characteristics of runoff on different underlying surfaces in industrial area of Taiyuan City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35 (6): 97-100, 105. (in Chinese))
- [24] 吴亚刚, 陈莹, 陈望, 等. 西安市某文教区典型下垫面径流污染特征 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38 (8): 3104-3112. (WU Yagang, CHEN Ying, CHEN Wang, et al. Characteristics of runoff pollution of different underlying surfaces in typical cultural and educational area of Xi'an. [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38 (8): 3104-3112. (in Chinese))
- [25] 马英, 马邕文, 万金泉, 等. 东莞不同下垫面降雨径流污染输移规律研究 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31 (12): 1983-1990. (MA Ying, MA Yongwen, WAN Jinquan, et al. Characterization of rainfall runoff pollution transportation in different underlying surface of Dongguan City [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31 (12): 1983-1990. (in Chinese))

(下转第 97 页)

- 188-192. (LIU Jin, QIN Yujie, QIU Yanlun, et al. Advances on biomanipulation in control of eutrophic lakes [J]. Ecologic Science, 2005, 24(2): 188-192. (in Chinese))
- [24] 王琦, 高晓奇, 肖能文, 等. 滇池沉水植物的分布格局及其水环境影响因子识别[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 157-170. (WANG Qi, GAO Qiaoqi, XIAO Nengwen, et al. Distribution pattern of submerged macrophytes and its influencing factors of water environment in Lake Dianchi [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(1): 157-170. (in Chinese))
- [25] 郭怀成, 贺彬, 宋立荣, 等. 滇池流域水污染治理与富营养化控制技术研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2017: 184.
- [26] 鲁韦坤, 余凌翔, 欧晓昆, 等. 滇池蓝藻水华发生频率与气象因子的关系[J]. 湖泊科学, 2017, 29(3): 534-545. (LU Weikun, YU Lingxiang, OU Xiaokun, et al. Relationship between occurrence frequency of cyanobacteria bloom and meteorological factors in Lake Dianchi [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(3): 534-545. (in Chinese))
- [27] 郑丙辉, 彭嘉玉, 胡小贞, 等. 2017年滇池外海水质异常下降原因及对策[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(5): 465-472. (ZHENG Binghui, PENG Jiayu, HU Xiaozhen, et al. The cause for abnormal water quality deterioration of Waihai of Dianchi Lake in 2017 and the countermeasures [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2018, 8(5): 465-472. (in Chinese))
- [28] 王瑜, 刘录三, 舒俭民, 等. 穗花狐尾藻和金鱼藻对白洋淀水质影响的原位围隔试验[J]. 环境科学研究, 2012, 25(3): 270-275. (WANG Yu, LIU Lusan, SHU Jianmin, et al. Situ enclosure study on the effect of different planting densities of *Myriophyllum spicatum* and *Ceratophyllum demersum* on water quality in Baiyangdian Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(3): 270-275. (in Chinese))
- [29] XIE Dong, YU Dan, YOU Wenhua, et al. Algae mediate submerged macrophyte response to nutrient and dissolved inorganic carbon loading: a mesocosm study on different species [J]. Chemosphere, 2013, 93(7): 1301-1308.
- [30] 郭俊秀, 许秋瑾, 金相灿, 等. 不同磷质量浓度对穗花狐尾藻和轮叶黑藻生长的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29(1): 118-123. (GUO Junxiu, XU QiuJin, JIN Xiangcan, et al. Effect of phosphorus concentration on growth of *Myriophyllum spicatum* and *Hydrilla Verticillata* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(1): 118-123. (in Chinese))
- [31] 纪海婷, 谢冬, 周恒杰, 等. 沉水植物浸提液组分对三种常见附植藻类生长的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 445-453. (JI Haiting, XIE Dong, ZHOU Hengjie, et al. Influences of chemical components of water extracts from submerged macrophyte leaves on the growth of three common epiphytic algae [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(2): 445-453. (in Chinese))
- [32] 刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 等. 伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3764-3768. (LIU Dandan, LI Zhengkui, YE Zhongxiang, et al. Nitrogen uptake and denitrification study on the joint treatment of aquatic vegetation and immobilized nitrogen cycling bacteria in Taihu Lake [J]. Environmental Science, 2014, 35(10): 3764-3768. (in Chinese))
- [33] HE Jinsheng, HAN Xingguo. Ecological stoichiometry: searching for unifying principles from individuals to ecosystems [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 2-6. (收稿日期: 2019-03-18 编辑: 王芳)

(上接第 66 页)

- [26] 张千千, 李向全, 王效科, 等. 城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 352-358. (ZHANG Qianqian, LI Xiangquan, WANG Xiaoke, et al. Research advance in the characterization and Source apportionment of pollutants in urban roadway runoff [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(2): 352-358. (in Chinese))
- [27] 张春荣, 武波, 杨皓然, 等. 青岛市不同功能区降雨径流重金属的特性分析[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(5): 20-24. (ZHANG Chunrong, WU Bo, YANG Haoran, et al. Characteristic analysis of heavy metals in rainfall runoff in different functional areas of Qingdao [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2018, 30(5): 20-24. (in Chinese))
- [28] 涂振顺. 城市绿地降雨径流污染特征及监测数据的不确定性研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
- [29] 李家科, 李怀恩, 董雯, 等. 西安市城区非点源污染特性与负荷估算[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 131-138. (LI Jiake, LI Huaien, DONG Wen, et al. Estimation of non-point source pollution characteristics and loading in Xi'an urban areas [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 131-138. (in Chinese))
- [30] 何梦男, 张劲, 陈诚, 等. 上海市淀北片降雨径流过程污染时空特性分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(2): 536-545. (HE Mengnan, ZHANG Jin, CHEN Cheng, et al. Analysis of the temporal and spatial characteristics of rainfall-runoff pollution in Dianbei Basin of Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(2): 536-545. (in Chinese)) (收稿日期: 2019-05-31 编辑: 王芳)