

DOI: 10.5846/stxb202112063456

宗敏, 刘森, 李春林, 胡远满, 王聪. 辽宁中部城市群城市非点源污染负荷评估. 生态学报, 2022, 42(24): 10138-10149.

Zong M, Liu M, Li C L, Hu Y M, Wang C. Assessment of the urban non-point source pollutant loads in the Central Liaoning Urban Agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10138-10149.

# 辽宁中部城市群城市非点源污染负荷评估

宗 敏<sup>1,2</sup>, 刘 森<sup>2,\*</sup>, 李春林<sup>2</sup>, 胡远满<sup>2</sup>, 王 聪<sup>2,3</sup>

1 聊城大学地理与环境学院, 聊城 252000

2 中国科学院沈阳应用生态研究所, 森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016

3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**过去几十年我国经历了快速城市化过程,这使得不透水面大幅度增加,导致地表径流和洪峰流量增加,进入水体的污染物增多。城市非点源污染已成为河流水体恶化、生态系统退化的重要原因。在快速城市化过程中,城市群已成为城市化发展的新阶段。位于同一流域的各城市所产生的城市非点源污染导致城市群流域水环境问题越来越突出,成为制约城市群流域可持续发展的关键因素之一。现有的关于城市非点源的研究多集中于城市内部小尺度,对城市群大尺度的研究亟需发展。以位于浑河太子河流域的辽宁中部城市群为例,在沈阳市不同功能区和不同下垫面进行降雨径流采样,基于事件平均浓度(EMC)法和SWMM(Storm Water Management Model)模型相结合的方式,定量评估城市群流域城市非点源污染负荷。研究结果表明:路面径流中城市非点源污染物浓度、负荷量及其单位面积负荷要高于屋面径流和透水面径流。辽宁中部城市群 TP、TN、COD、TSS 的年均城市非点源污染负荷分别为 265.52、852.89、2249.71、192496.74 t/a,重金属 Cd、Ni、Pb、Cr、Cu、Zn 的年均城市非点源污染负荷分别为 347.99、9932.62、25861.29、28360.41、36068.30、138840.42 kg/a。沈阳市城市非点源污染负荷最高,但其单位面积负荷最低。研究基于更为精细的城市下垫面划分,综合考虑城市功能区划、下垫面类型和降雨强度,更为准确的评估了辽宁中部城市群流域的城市非点源污染负荷。研究能够为高度城市化流域城市非点源污染防控和水环境综合治理提供科学依据。

**关键词:**城市非点源污染;事件平均浓度;SWMM 模型;辽宁中部城市群

## Assessment of the urban non-point source pollutant loads in the Central Liaoning Urban Agglomeration

ZONG Min<sup>1</sup>, LIU Miao<sup>2,\*</sup>, LI Chunlin<sup>2</sup>, HU Yuanman<sup>2</sup>, WANG Cong<sup>2,3</sup>

1 College of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China

2 Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Chinese has experienced unprecedented urbanization over the last several decades. Rapid urbanization led to dramatic increasing of urban impervious surfaces which caused dramatically increasing of the surface runoff and peak flows. Excessive runoff volume coupled with increased peak flow can easily wash accumulated dust off impervious urban surfaces and transport it into receiving water bodies, which can seriously affect public health and threaten environmental quality. The urban non-point source (NPS) pollution has been recognized as a critical cause of water quality degradation and aquatic ecosystem deterioration. In the process of Chinese rapid urbanization, the urban agglomeration has become a new characteristic in urbanization development. Most of urban agglomerations are located in the same watershed. The superimposed effects of the urban NPS pollution caused by cities in a same basin became more and more important, playing

**基金项目:**国家自然科学基金项目(32071580, 41871192, 41730647);聊城大学基金项目(318052161)

**收稿日期:**2021-12-06; **采用日期:**2022-03-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lium@iae.ac.cn

one of the key factors restricting the sustainable development of urban agglomeration watershed. The urban NPS pollution have been widely studied at a small city or community scale, few attentions have been paid to watershed scales, especially in an urban agglomeration watershed. In this study, the Central Liaoning Urban Agglomeration in the Hun-Taizi River watershed, was chosen as the study case. The rainfall runoff data was observed in different functional zones and underlying surfaces in Shenyang city. The urban NPS pollutant loads were quantitatively estimated by coupling the event mean concentration (EMC) method and the Storm Water Management Model (SWMM). The results indicated that the EMC values, urban NPS pollutant loads and per unit area yield in road runoff were higher than those in roof runoff and pervious surface. The average annual urban NPS pollutant loads of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), chemical oxygen demand (COD) and total suspended solids (TSS) were 91.01, 280.83, 783.95 and 47212.34 t/a, separately. The average annual urban NPS pollutant loads of cadmium (Cd), nickel (Ni), lead (Pb), chromium (Cr), copper (Cu) and zinc (Zn) were 347.99, 9932.62, 25861.29, 28360.41, 36068.30 and 138840.42 kg/a, separately. Shenyang city had the highest urban NPS pollutant loads while with the lowest per unit area yield of six cities in the Central Liaoning Urban Agglomeration. In this study, a refined approach was presented to accurately estimate the urban NPS pollution by considering the different functional zones, underlying surfaces and rainfall intensities in an urban agglomeration watershed. The method was proposed in this study could provide scientific guidance for urban NPS pollution control and water environment comprehensive management in highly urbanized basins.

**Key Words:** urban non-point source pollution; event mean concentration; SWMM model; Central Liaoning Urban Agglomeration

水是人类生存和社会经济发展的重要资源,对于城市的健康发展至关重要。随着城市的不断扩张,水资源成为限制城市可持续发展的重要因素,水环境污染则进一步加剧了水资源短缺程度。近年来点源污染不断得到治理,城市非点源污染已成为河流水体恶化、生态系统退化的重要原因<sup>[1]</sup>。中国经历了快速城市化的过程,城市群逐渐形成,城市群是高度一体化和同城化的城市群体,是城市化发展到高级阶段的产物<sup>[2]</sup>。城市群经济发展快、城市化率高、人口密度大,其水环境问题则更为严峻<sup>[3-4]</sup>。位于同一流域的各个城市所产生的非点源污染,由于水的流动性和污染物的累积效应,将加剧城市群流域水环境污染,导致城市群流域水环境问题越来越突出,成为制约城市群可持续发展的瓶颈因素。因此,在城市群流域尺度上快速有效地评估城市非点源污染对城市群可持续发展具有重要意义。

现场监测和模型模拟是城市非点源污染评估的常用方法<sup>[5]</sup>。现场监测往往具有更好的可控性,可以获得第一手的监测数据,得到更可靠、更清晰的结论<sup>[6]</sup>。基于大量降雨径流监测数据的事件平均浓度(EMC)法是评估城市不同下垫面非点源污染的常用方法<sup>[7-10]</sup>。城市非点源污染具有形成机理复杂、来源模糊、发生随机和流失分散等特点,使得对其监测和评估难度较大<sup>[11-12]</sup>。但进行连续的降雨径流监测不仅需要大量的人力和物力,而且也难以实现。近年来,随着计算机和3S技术的发展,模型模拟已成为非点源污染研究的重要工具和手段。与其他城市非点源污染模型相比较,SWMM(Storm Water Management Model)模型在国内外城市非点源污染研究得到广泛应用<sup>[13-15]</sup>。

城市非点源污染负荷的自然影响因素主要包括土地利用类型(城市功能区划)、下垫面类型、降雨强度和前期干燥天数等<sup>[16]</sup>。国内外学者对城市非点源污染负荷评估的研究主要集中于对城市主要交通道路、屋顶和内部某典型小区的非点源污染负荷研究<sup>[17-19]</sup>,缺乏对城市绿地、降雨强度以及大尺度的城市非点源污染负荷研究。城市群是城市化的新阶段,其城市非点源污染更为复杂多样化。因此,在城市群流域尺度上综合考虑城市非点源污染的影响因素,更为准确地评估城市群流域的城市非点源污染是现在亟需解决的问题。

辽宁中部城市群的城市化水平较高,同时作为我国的重工业基地之一,其工业和矿产开发等活动引起的城市非点源污染对河流的水质产生了巨大影响<sup>[20]</sup>。本研究以位于浑河太子河流域的辽宁中部城市群为例,

综合考虑城市功能区划、下垫面类型和降雨强度对城市非点源污染影响,将基于降雨径流监测数据的 EMC 方法和 SWMM 模型相结合,评估辽宁中部城市群流域城市非点源污染负荷。该研究可为城市群流域城市非点源污染综合治理提供科学依据,对提高河流水质、缓解水资源矛盾和实现流域可持续发展具有重要意义。

## 1 研究区概况

本研究选取位于浑河太子河流域的辽宁中部城市群作为研究区,包含沈阳、抚顺、本溪、辽阳、鞍山和营口 6 个城市。研究区地处中国东北部、辽宁省中部,位于  $121^{\circ}57'—125^{\circ}20'E$ ,  $40^{\circ}27'—42^{\circ}19'N$  之间,建成区面积  $1141.68\text{ km}^2$  (图 1)。辽宁中部城市群属于暖温带湿润和半湿润的季风气候,多年平均气温  $5.3^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量在  $700\text{ mm}$  左右。降雨量在年内分配不均,主要集中在 6—9 月份,占全年降雨量的 60% 左右。研究区多年平均水资源总量为  $6.9\times 10^9\text{ m}^3$ ,是辽宁省最为重要的地表水资源<sup>[21]</sup>。

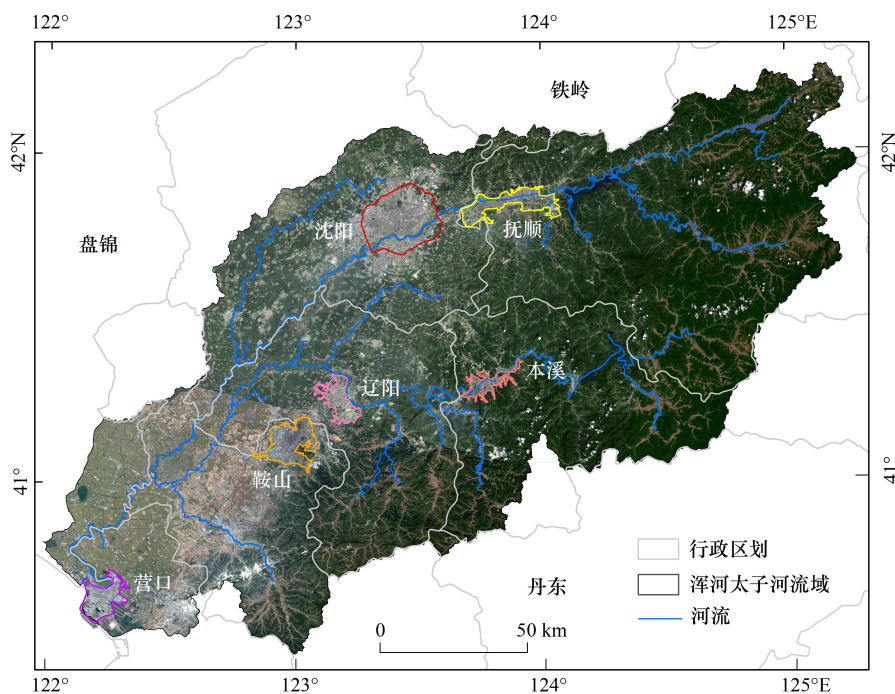


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

辽宁中部城市群 2019 年人口城镇化率为 57.84%,其经济生产总值占辽宁省经济总量的 47.3%,是东北经济的核心区。辽宁中部城市群是我国最为重要的重工业基地之一,其中鞍山、辽阳和本溪是我国较为著名的重工业城市。近年来,随着“振兴东北老工业基地”政策的提出,研究区城镇化进程不断加快,不透水面大幅度增加,城市非点源污染越来越严重。

## 2 材料与方法

### 2.1 降雨径流采样

抚顺、沈阳、本溪、辽阳、鞍山和营口 6 个城市均位于浑河太子河流域且同为温带大陆性季风气候,其空间差异不大。因此,本研究在沈阳市进行降雨径流采样,代表辽宁中部城市群 6 市的城市非点源污染的整体情况。本研究于 2018 年在沈阳市的商业区、住宅区、工业区、文教区和清洁对照区这 5 个功能区进行降雨径流采样(图 2)。

根据下垫面类型的划分,当降雨径流产生时,分别收集屋面、路面和草地降雨径流。在落水管处收集屋面

径流,在雨水篦子处收集路面径流,在草地花园的出水口处收集草地径流。当径流产生时,前 60 min,间隔 15 min 采集一次水样;60—180 min,间隔 30 min 采集一次水样;180 min 之后,间隔 60 min 采集一次水样,直到降雨停止。降雨径流采样参照《水质采样技术指导》,并用雨量筒(RainLog 2.0)记录降雨量信息。2018 年分别在 5 个功能区同时进行 3 场降雨径流采样,共收集样品 213 个,其中 7 月 8 号、8 月 14 号和 9 月 2 号分别收集样品 84 个、48 个和 81 个。

收集的样品在 24 h 内进行测样,分析指标包括 TSS、COD、TN、TP 和重金属污染物(Pb、Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn)。其中,通过重量法测定 TSS 的浓度;利用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定 TN 的浓度;使用钼酸铵分光光度法测定 TP 浓度;用重铬酸钾法测定 COD 浓度;根据电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)分析重金属污染物的浓度<sup>[22]</sup>。

## 2.2 数据收集与预处理

### (1) 建成区范围提取

根据 2017 年哨兵 2 号数据(分辨率为 10 m),通过目视解译的方式,选取建筑物最为密集的地区,勾画出辽宁中部城市群 6 市的建成区范围(图 1)。

### (2) 建成区土地利用数据解译

将哨兵 2 号数据、谷歌遥感影像数据(分辨率为 3.6 m)和道路分布线性矢量数据相结合,采用面向对象的分类方式,解译建成区土地利用数据。根据《城市用地分类与规划建设用地标准》分类体系,并结合城市下垫面的特征,进行建成区土地利用类型分类(图 3)。与野外 360 个调查点进行对比,得到建成区土地利用数据的解译精度为 88.5%,满足本研究需求。

### (3) 建成区下垫面类型划分

根据课题组之前对三维建筑解译的前期研究工作<sup>[23]</sup>,本研究采用 Brista 软件,并利用 2017 年 QuickBird 遥感影像数据(分辨率 0.61 m),提取辽宁中部城市群 6 市建成区的建筑物轮廓数据。在 ArcGIS 中,采用“Analysis Tools-Overlay-Update”工具利用建筑物轮廓数据更新建成区的土地利用数据,得到研究区的屋顶数据。根据本研究需要,根据常见的下垫面的种类将土地利用数据划分为:屋顶、道路(建筑用地扣除屋顶部分)、透水面(农田、林地、草地和裸地)和水体。由于水体并不产生非点源污染,在接下来的分析中,将不再考虑水体。

### (4) 降雨强度划分

通过国家气象数据网获取 1989—2018 年辽宁中部城市群 6 市的日降雨量数据。按照 24 小时降水量等级划分标准(GB/T 28592—2012),将降雨强度划分为小雨(0.1—9.9 mm)、中雨(10—24.9 mm)和大雨( $\geq 25$  mm)。

## 2.3 城市非点源污染负荷估算方法

一年内所有降雨形成的地表径流所携带的污染物总量称为年非点源污染负荷<sup>[24]</sup>。由于对每场降雨进行连续监测较为困难,本研究采用 EMC、降雨量、径流系数和下垫面面积的乘积计算年均城市非点源污染负荷,其计算公式如下<sup>[25]</sup>:

$$L_{i,j} = 0.001 \times \overline{EMC}_{i,j} \times \bar{P}_j \times \varphi_i \times A_i \quad (1)$$

式中,  $L_{i,j}$  是不同降雨强度、不同下垫面的年均城市非点源污染负荷(t/a);  $\overline{EMC}_{i,j}$  是不同降雨强度、不同下垫

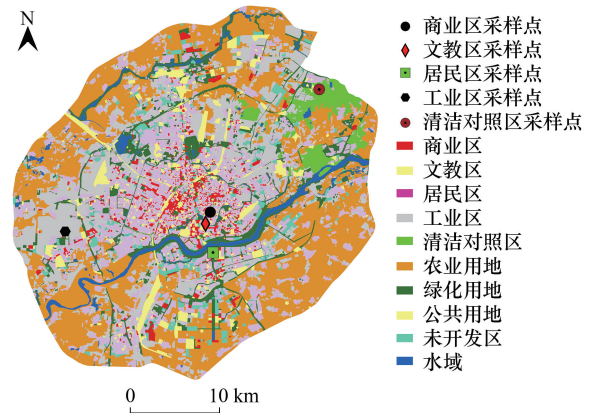


图 2 沈阳市不同功能区降雨径流采样点

Fig.2 Rainfall runoff sampling sites of different functional zones in Shenyang

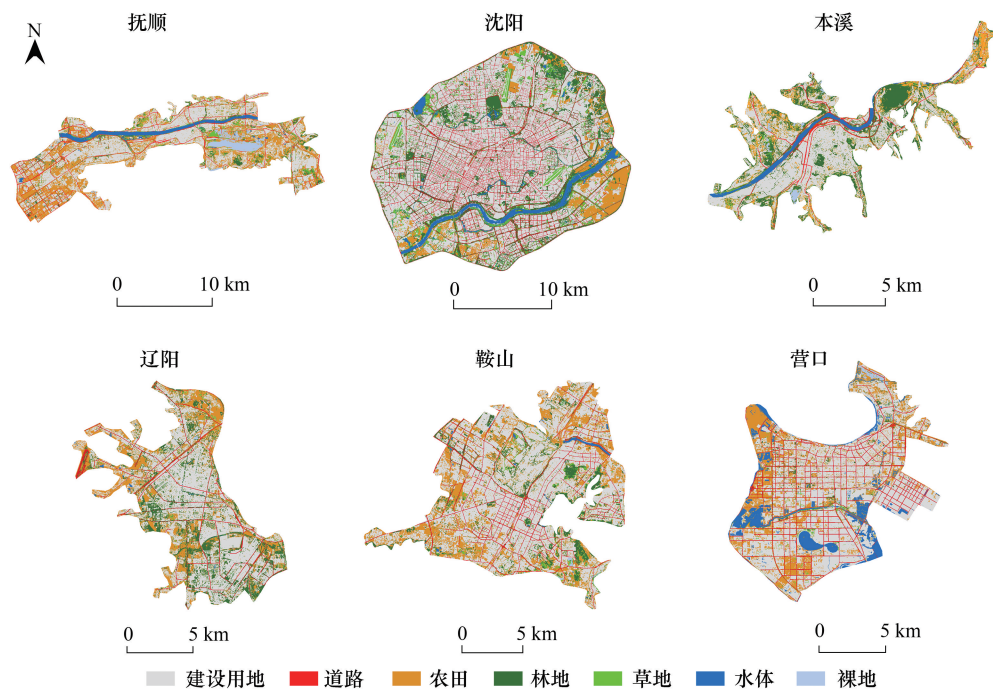


图3 辽宁中部城市群6市建成区土地利用图

Fig.3 The land use map of the built-up area of six cities in the Central Liaoning Urban Agglomeration

面的事件平均污染物浓度 ( $\text{mg/L}$ ) ;  $\bar{P}_j$  是 1989—2018 年不同降雨强度下的年均降雨量 ( $\text{mm}$ ) ;  $\varphi_i$  是不同下垫面的径流系数,其中屋面的径流系数为 0.9,路面的径流系数为 0.8,草地的径流系数为 0.15<sup>[26]</sup> ;  $A_i$  是不同下垫面的面积 ( $\text{km}^2$ ) ;  $i$  代表不同的下垫面类型,包括屋面、路面和透水面 ;  $j$  代表不同的降雨强度,为大雨、中雨和小雨。为进一步估算城市非点源污染对河流水质产生的影响,根据浑河太子河流域的相关研究,将非点源污染的人河系数取值为 0.17<sup>[27]</sup>。

通过 EMC 可以评判一场完整降雨事件过程中污染物的平均浓度。通过 2018 年收集的 3 场典型降雨和课题组 2012 年收集的 5 场典型降雨<sup>[28]</sup>,分析不同降雨强度、不同下垫面的 EMC 值。其中,EMC 的计算公式如下<sup>[29]</sup> :

$$\text{EMC} = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T C_t Q_t d_t}{\int_0^T Q_t d_t} \cong \frac{\sum C_t Q_t \Delta t}{\sum Q_t \Delta t} \quad (2)$$

式中,EMC 为事件平均污染物浓度值 ( $\text{mg/L}$ ) ;  $M$  是一场降雨事件中某种污染物的总量 ( $\text{mg}$ ) ;  $V$  是径流总量 ( $\text{L}$ ) ;  $C_t$  为某时刻污染物的浓度值 ( $\text{mg/L}$ ) ;  $Q_t$  是某时刻的径流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ;  $\Delta t$  为时间间隔 ( $\text{min}$ ) ;  $T$  是降雨径流历时 ( $\text{min}$ )。

连续的降雨径流收集较为困难,SWMM 模型可用于模拟降雨径流样品缺失下的非点源污染负荷。SWMM 模型是美国环境保护署 (EPA) 于 1971 年提出的应用于城市流域的综合水文和水质管理模型。

2018 年降雨径流实验未收集到大雨情形下和草地的降雨径流样品,导致大雨情形下的 EMC 值和草地径流的 EMC 值无法计算。采用经过率定和验证的 SWMM 模型参数 (表 1、表 2),分别构建不同功能区大雨情形和草地径流的 SWMM 模型,并采用  $R^2$  和纳什系数 (Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient,  $E_{\text{NS}}$ ) 来评估 SWMM 模型的模拟精度。大雨情形下,不同功能区屋顶和路面的 SWMM 模型的  $R^2$  和  $E_{\text{NS}}$  值为 0.67—0.95。构建的草地径流的 SWMM 模型的  $R^2$  和  $E_{\text{NS}}$  值介于 0.58—0.83 之间。经过率定和验证的 SWMM 模型可以用于城市非点源污染负荷的估算。

表 1 SWMM 模型水力参数取值

Table 1 Optimal parameters of the hydrological module in the SWMM model

| 参数名称<br>Parameters         | 最优参数<br>Optimal parameters | 参数名称<br>Parameters              | 最优参数<br>Optimal parameters |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 汇流区漫流宽度系数 Width-K          | 4                          | 管道曼宁系数 Conduit roughness        | 0.012                      |
| 不透水区曼宁系数 N-Impervious      | 0.013                      | 最大下渗率 Maximum infiltration rate | 40                         |
| 透水区曼宁系数 N-Pervious         | 0.15                       | 最小下渗率 Minimum infiltration rate | 5                          |
| 不透水区注蓄深 Destore-Impervious | 1                          | 渗透衰减常数 Decay constant           | 7                          |
| 透水区注蓄深 Destore-Pervious    | 3                          | 完全干燥所需天数 Drying time            | 7                          |

SWMM:暴雨洪水管理模型 Storm water management model

表 2 SWMM 模型水质参数取值

Table 2 Optimal parameters of the water quality module in the SWMM model

| 参数名称 Parameters              | TSS   | TN    | TP    | COD   |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 路面最大累积量 Road max buildup     | 370   | 4     | 0.2   | 96    |
| 路面累积速率常数 Road rate constant  | 0.5   | 0.7   | 0.1   | 0.2   |
| 路面冲刷系数 Road coefficient      | 0.003 | 0.07  | 0.02  | 0.002 |
| 路面冲刷指数 Road exponent         | 1.9   | 1.7   | 1.8   | 1.8   |
| 屋面最大累积量 Roof max buildup     | 300   | 2     | 0.14  | 54    |
| 屋面累积速率常数 Roof rate constant  | 0.4   | 0.5   | 0.2   | 0.3   |
| 屋面冲刷系数 Roof coefficient      | 0.005 | 0.001 | 0.003 | 0.009 |
| 屋面冲刷指数 Roof exponent         | 1.4   | 1.3   | 1.9   | 1.5   |
| 绿地最大累积量 Green max buildup    | 100   | 9     | 0.4   | 25    |
| 绿地累积速率常数 Green rate constant | 0.3   | 0.5   | 0.3   | 0.1   |
| 绿地冲刷系数 Green coefficient     | 0.005 | 0.004 | 0.001 | 0.01  |
| 绿地冲刷指数 Green exponent        | 1.6   | 1.2   | 2     | 1.3   |

TSS:总悬浮颗粒物 Total suspended solids;TN:总氮 Total nitrogen;TP:总磷 Total phosphorus;COD:化学需氧量 Chemical oxygen demand

3 结果与分析

3.1 EMC 特征分析

路面径流中的 TP、TN、COD 和 TSS 的 EMC 值大于屋面径流(图 4)。在小雨情形下 TP、TN 和 TSS 在路面径流的 EMC 值分别为 1.03、3.50、373 mg/L,在大雨情形下其 EMC 值分别为 0.7、2.25、422 mg/L,均超过《地表水环境质量标准》的 V 类地表水排放标准(TP 0.4 mg/L,TN 2.0 mg/L)(GB3838—2002)和《污水综合排放标准》中的二级排放标准(TSS 200 mg/L)(GB978—1996)。在中雨情况下,路面径流中 TSS 的 EMC 值为 1208.07 mg/L,超过国家标准的 5 倍。在小雨,中雨和大雨情形下透水面径流中 TP 的 EMC 值均超国家标准,其值分别是 0.54、1.83、0.86 mg/L。屋面径流中 TN 的 EMC 值较高,这说明大气氮沉降可能是总氮的另一主要来源。

不同降雨强度下,路面径流中重金属的污染浓度高于屋面径流(图 5)。从不同降雨强度来看,小雨情形下重金属污染物浓度最高,中雨次之,大雨的重金属污染物浓度最低。这说明随着降雨量的增大,径流量变大,降低了污染物的浓度,这可能是由于初期冲刷效应造成的。在小雨和中雨情形下,路面径流中 Pb 的 EMC 值分别为 168.28 μg/L 和 119.93 μg/L,Cr 的 EMC 值分别为 154.78 μg/L 和 107.62 μg/L,超过了《地表水环境质量标准》的 V 类地表水排放标准(100 μg/L)(GB3838—2002)。

3.2 城市非点源污染负荷及入河量

辽宁中部城市群 6 市 TP、TN、COD 和 TSS 的多年平均城市非点源污染负荷分别为 265.52、852.89、

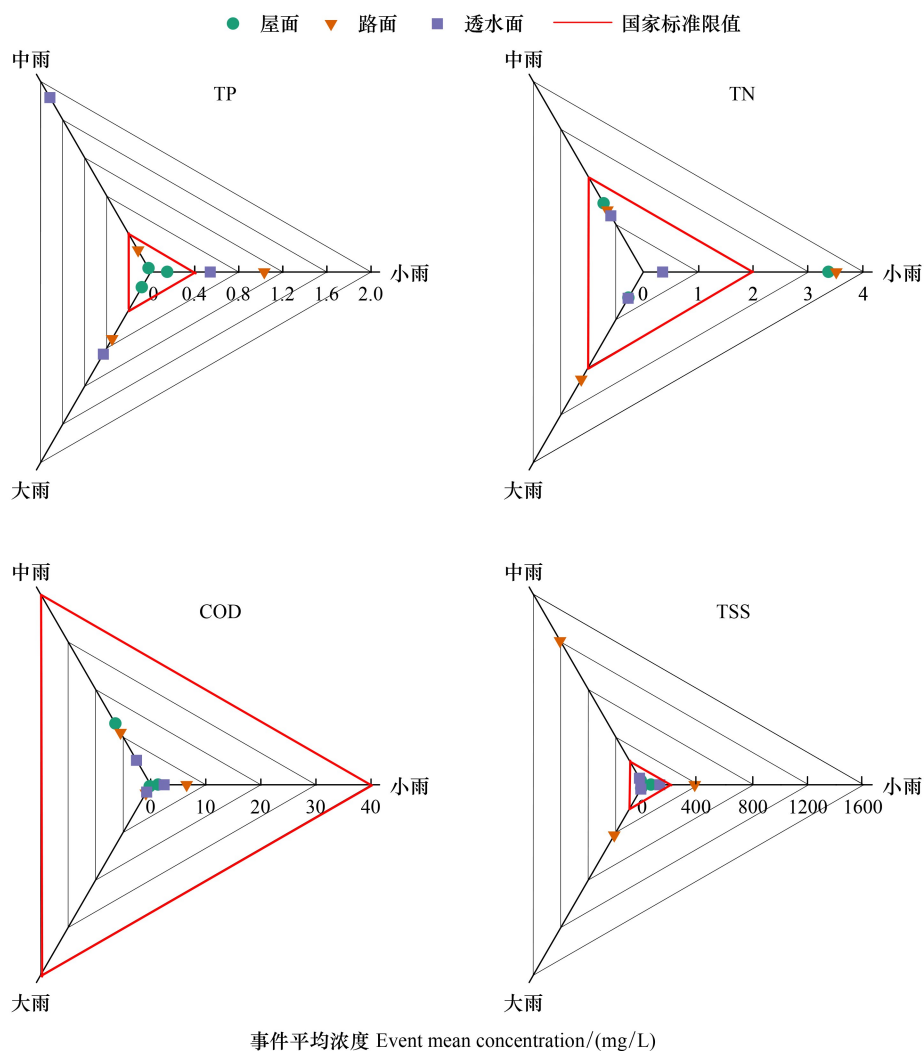


图 4 不同降雨强度和不同下垫面的污染物的 EMC 值

Fig.4 The average event mean concentration values of the non-point source pollutant constituent under different rain intensities and underlying surfaces

EMC: 事件平均浓度 Event mean concentration; TP: 总磷 Total phosphorus; TN: 总氮 Total nitrogen; COD: 化学需氧量 Chemical oxygen demand; TSS: 总悬浮颗粒物 Total suspended solids

2249.71、192496.74 t/a(表 3), 其入河量分别为 45.14、144.99、382.45、32724.45 t/a。6 市重金属 Cd、Ni、Pb、Cr、Cu 和 Zn 的多年降雨量平均城市非点源污染负荷量分别为 347.99、9932.62、25861.29、28360.41、36068.30、138840.42 kg/a, 其入河量分别为 59.16、1688.55、4396.42、4821.27、6131.61、23602.87 kg/a。

从不同下垫面的非点源污染负荷来看, 路面径流所携带的城市非点源污染负荷远大于屋面径流和透水面径流, 其城市非点源污染负荷占总污染负荷的 69% 以上。从单位面积贡献率来看, 路面径流中 TP、TN、COD 和 TSS 单位面积负荷量分别为 0.34、1.22、3.05、345.18 t/km<sup>2</sup>, 屋面径流中其单位面积负荷量分别为 0.07、0.83、2.35、20.41 t/km<sup>2</sup>, 透水面径流中其单位面积负荷量分别为 0.16、0.11、0.43、9.59 t/km<sup>2</sup>。路面径流中重金属 Cd、Ni、Pb、Cr、Cu 和 Zn 的单位面积贡献率分别为 0.62、8.07、47.91、50.7、65.46、255.48 kg/km<sup>2</sup>, 屋面径流中其单位面积负荷分别为 0.09、1.43、1.25、6.64、5.63、11.62 kg/km<sup>2</sup>。这说明, 路面径流中城市非点源污染的单位面积负荷量要远大于屋面径流和透水面径流。

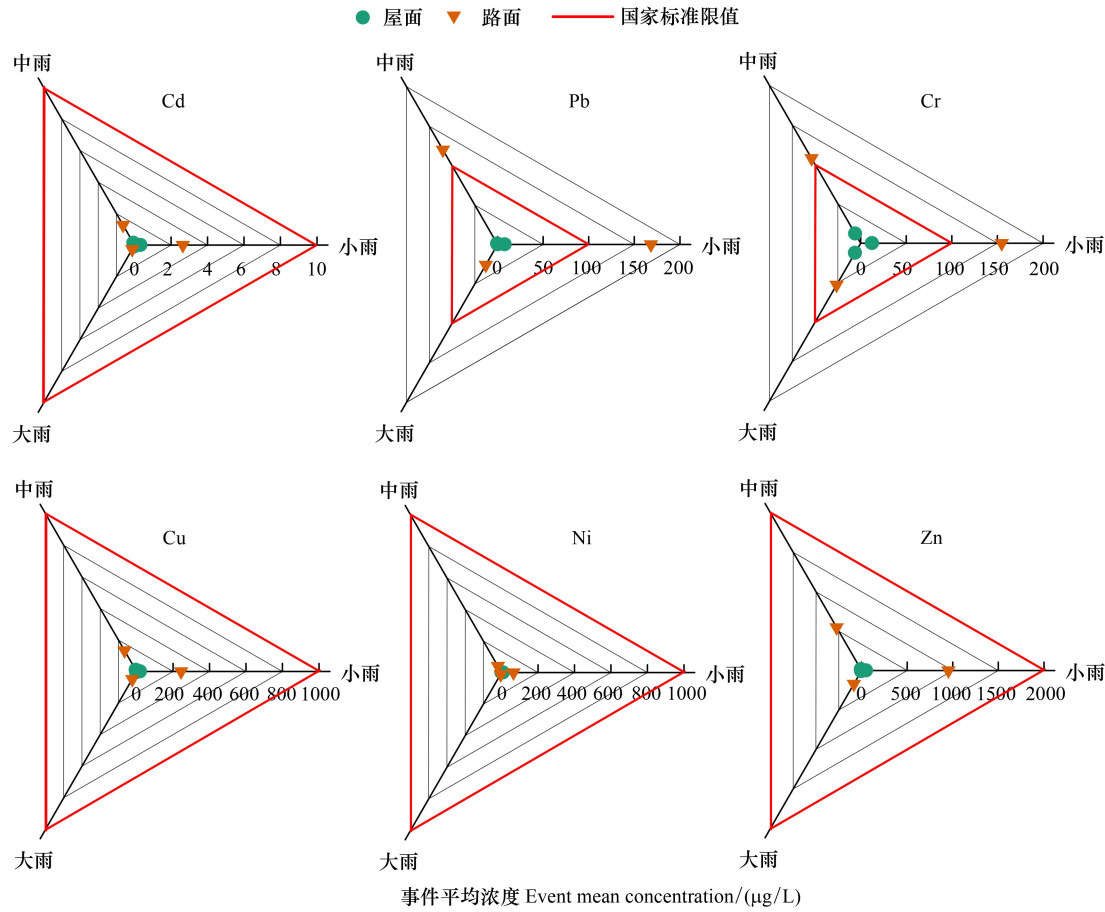


图 5 不同降雨强度和不同下垫面的重金属污染物的 EMC 值

Fig.5 The average event mean concentration values of the heavy metals under different rain intensities and underlying surfaces

表 3 不同下垫面年均城市非点源污染负荷

Table 3 The average annual urban non-point source pollutant loads under different underlying surfaces in six cities of the study area

| 污染物<br>Pollutant | 屋面<br>Roof | 路面<br>Road | 透水面<br>Pervious surface | 污染物<br>Pollutant | 屋面<br>Roof | 路面<br>Road |
|------------------|------------|------------|-------------------------|------------------|------------|------------|
| TP/t             | 12.42      | 184.22     | 68.87                   | Pb/kg            | 231.6      | 25629.69   |
| TN/t             | 153.26     | 655.23     | 44.41                   | Cr/kg            | 1233.7     | 27126.71   |
| COD/t            | 435.7      | 1631.42    | 182.58                  | Cu/kg            | 1045.83    | 35022.46   |
| TSS/t            | 3790.76    | 184669.24  | 4036.74                 | Ni/kg            | 265.93     | 9666.68    |
| Cd/kg            | 16.68      | 331.31     | —                       | Zn/kg            | 2157.2     | 136683.22  |

3.3 城市非点源污染空间分布

从辽宁中部城市群 6 市非点源污染的空间分布来看,沈阳市年均城市非点源污染负荷最大,本溪、辽阳和营口的非点源污染负荷较低(图 6、表 4)。然而,从 6 市非点源污染的单位面积贡献率来看,沈阳的单位面积贡献率最低,抚顺、鞍山的单位面积贡献率较高(图 7)。这主要是由于辽宁中部城市群 6 市的下垫面面积和降雨量不同所导致的。路面径流的城市非点源单位面积负荷要远高于屋面径流和透水面径流。沈阳路面、屋面和透水面占建成区面积的 31.1%、30.0%和 38.9%(表 5),相对于其他城市来说,沈阳市道路面积占比不高,而透水面面积较大,这是导致沈阳单位面积贡献率较低的原因。抚顺、鞍山的路面面积占各市建成区面积的 52.8%和 59.8%,其屋面面积占各市建成区面积的 6.6%和 8.4%,透水面面积较小(表 5)。然而,路面面积占比达到 67.8%的营口,其单位面积非点源污染负荷并不高的原因是由于其降雨量较低。

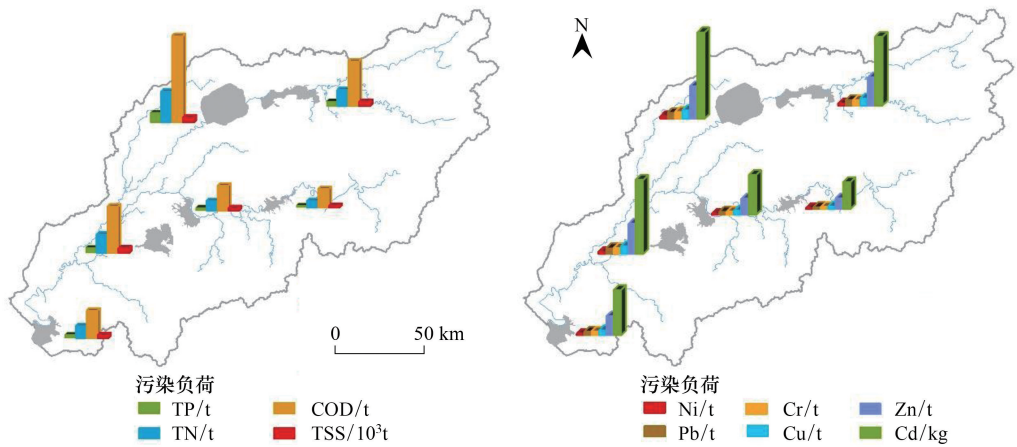


图 6 辽宁中部城市群 6 市城市非点源污染负荷空间分布图

Fig.6 The spatial distribution of the urban non-point source pollutant loads of the built-up area of six cities in the Central Liaoning Urban Agglomeration

表 4 辽宁中部城市群 6 市年均城市非点源污染负荷

Table 4 The average annual urban non-point source pollutant loads of six cities in the Central Liaoning Urban Agglomeration

| 城市 City | TP/t  | TN/t   | COD/t  | TSS/10 <sup>3</sup> t | Cd/kg | Ni/t | Pb/t | Cr/t | Cu/t | Zn/t  |
|---------|-------|--------|--------|-----------------------|-------|------|------|------|------|-------|
| 沈阳      | 91.01 | 280.83 | 783.95 | 47.21                 | 88.16 | 2.41 | 6.08 | 7.07 | 8.79 | 33.02 |
| 鞍山      | 49.54 | 166.93 | 420.57 | 41.61                 | 75.54 | 2.18 | 5.72 | 6.17 | 7.92 | 30.68 |
| 本溪      | 18.46 | 60.35  | 166.00 | 15.06                 | 27.29 | 0.78 | 2.06 | 2.19 | 2.82 | 10.96 |
| 抚顺      | 46.74 | 149.76 | 405.94 | 39.30                 | 70.19 | 2.03 | 5.36 | 5.68 | 7.32 | 28.48 |
| 辽阳      | 27.38 | 86.55  | 223.40 | 22.26                 | 40.67 | 1.17 | 3.09 | 3.29 | 4.25 | 16.54 |
| 营口      | 32.38 | 108.48 | 249.85 | 27.06                 | 46.14 | 1.36 | 3.55 | 3.95 | 4.96 | 19.17 |

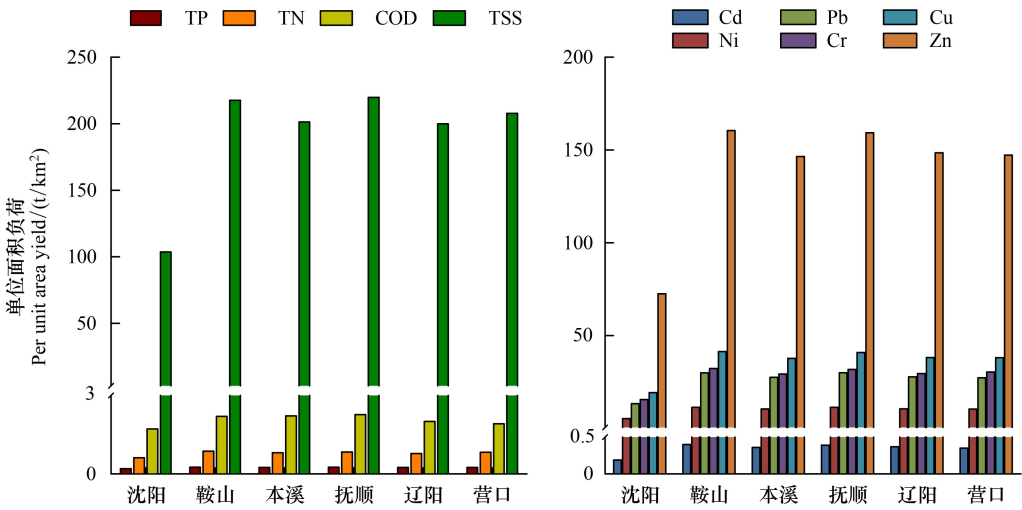


图 7 辽宁中部城市群城市非点源污染单位负荷

Fig.7 The spatial distribution of the per unit area yield of the urban non-point source pollutant loads of the built-up area in the Central Liaoning Urban Agglomeration

表 5 辽宁中部城市群 6 市各下垫面面积和降雨量

Table 5 The area of different underlying surfaces and rainfall of six cities in the Central Liaoning Urban Agglomeration

| 城市<br>City | 屋面<br>Roof/km <sup>2</sup> | 路面<br>Road/km <sup>2</sup> | 透水面<br>Pervious surface/km <sup>2</sup> | 降雨量<br>Rainfall/mm |
|------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|--------------------|
| 沈阳         | 136.59                     | 141.53                     | 177.23                                  | 671.93             |
| 鞍山         | 16.13                      | 114.33                     | 60.72                                   | 702.96             |
| 本溪         | 7.42                       | 35.87                      | 31.51                                   | 768.10             |
| 抚顺         | 11.84                      | 94.38                      | 72.60                                   | 769.97             |
| 辽阳         | 5.57                       | 60.56                      | 45.22                                   | 701.54             |
| 营口         | 8.15                       | 88.33                      | 33.72                                   | 620.71             |

4 讨论

4.1 辽宁中部城市群城市非点源污染负荷量

辽宁中部城市群 6 市道路的城市非点源污染负荷及其单位面积负荷要高于屋面和透水面,这主要与下垫面的污染程度有关。道路污染物主要来源于车辆尾气排放、车辆磨损、污染物沉降和商业活动等,其污染物来源广且累积量大;而屋面的污染物主要来源于大气沉降,污染物的累积量较少;城市中的绿地,其土壤和植物根系可以截留、过滤部分污染物。因此,道路的非点源污染负荷要高于屋面,这与北京<sup>[25]</sup>和重庆<sup>[17]</sup>的研究结果相一致(表 6)。但武汉市<sup>[30]</sup>的研究结果与我们的研究结果不一致,其研究发现武汉市屋顶的城市非点源污染单位面积负荷高于道路。造成这种不一致的原因可能与该研究区的降雨径流采样点位于武汉市动物园有关,因为其园区内禁止车辆进入,加上其屋顶降雨径流采样点有植被覆盖,增加了对大气污染物沉降的吸附能力,因此导致武汉市屋顶的城市非点源污染单位面积负荷高于道路。

辽宁中部城市群 6 市 TSS、TN、TP 和 COD 单位面积负荷量较北京<sup>[25]</sup>、重庆<sup>[17]</sup>、武汉<sup>[30]</sup>和巴黎<sup>[31]</sup>要低,其重金属污染水平则高于巴黎<sup>[31]</sup>但低于重庆<sup>[17]</sup>(表 6)。一方面可能是跟社会经济发展水平有一定的关系。近年来辽宁中部城市群矿产资源枯竭、导致经济衰落,其经济发展水平远不如北京、重庆和武汉。另一方面可能是由于地表径流是城市非点源污染的驱动力,其污染物负荷与该地的降雨量有较大的关系。重庆和武汉的年降雨在 1200 mm 以上,降雨量远高于研究区 6 市。上述原因可能是导致研究区 6 市 TSS、TN、TP、COD 和重金属的单位面积负荷量低于国内其他城市的原因。

表 6 本研究城市单位面积非点源污染负荷与其他研究结果对比

Table 6 Comparison of per unit area urban non-point source pollutant loads obtained in this study and previous publications

| 城市<br>City                           | 下垫面<br>Underlying surface | TP                | TN      | COD     | TSS     | Cd                 | Ni    | Pb    | Cr    | Cu    | Zn     |
|--------------------------------------|---------------------------|-------------------|---------|---------|---------|--------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                                      |                           | t/km <sup>2</sup> |         |         |         | kg/km <sup>2</sup> |       |       |       |       |        |
| 辽宁中部城市群                              | 道路                        | 0.34              | 1.22    | 3.05    | 345.18  | 0.62               | 18.07 | 47.91 | 50.70 | 65.46 | 255.48 |
| Central Liaoning Urban Agglomeration | 屋顶                        | 0.07              | 0.83    | 2.35    | 20.41   | 0.09               | 1.43  | 1.25  | 6.64  | 5.63  | 11.62  |
| 北京 <sup>[25]</sup>                   | 道路                        | 0.24              | 11.88   | 182.31  | 145.78  | —                  | —     | —     | —     | —     | —      |
|                                      | 屋顶                        | 0.08              | 17.05   | 127.99  | 24.02   | —                  | —     | —     | —     | —     | —      |
| 重庆 <sup>[17]</sup>                   | 道路                        | 1.0±0.8           | 8.5±4.2 | 404±204 | 589±342 | 50                 |       | 630   |       | 124   | 600    |
|                                      | 屋顶                        | 0.2±0.14          | 5.5±1.9 | 76±26   | 61±36   | 49                 | —     | 558   | —     | 80    | 320    |
| 武汉 <sup>[30]</sup>                   | 道路                        | 0.45              | 5.15    | 99.6    | 62.2    | —                  | —     | —     | —     | —     | —      |
|                                      | 屋顶                        | 0.85              | 8.8     | 83      | 72      | —                  | —     | —     | —     | —     | —      |
| 巴黎 <sup>[31]</sup>                   | —                         | —                 | 0.2     | 0.39    | 2.7     | 0.1                | —     | 1.1   | —     | 1.3   | 9.8    |

巴黎非点源污染中氮为凯氏氮(TKN)

辽宁中部城市群重金属污染水平高于巴黎<sup>[31]</sup>,这应该是与城市发展阶段、经济结构以及重金属污染物的来源有关。我国快速城市化多始于改革开放后,辽宁中部城市群的发展虽然较早,但相较于巴黎来说,其城市

发展水平远不及巴黎。现阶段,辽宁中部城市群正处于经济转型阶段,但作为我国的重工业基地之一,其第二产业仍占有较高的比重。加之,城市重金属污染物主要来源于工业排放和化石燃料燃烧以及车辆尾气排放与部件磨损。所以研究区 6 市仍然存在一定程度的重金属污染。

#### 4.2 更为准确的城市群流域城市非点源污染负荷评估方法

大量研究表明,城市功能区划、下垫面类型和降雨强度对城市非点源污染具有重要影响<sup>[16, 24, 32]</sup>。由于城市非点源污染影响因素复杂且具有地域性,其在哪个功能区、哪种下垫面下的污染情况如何,仍没有得到一致的结论<sup>[1]</sup>。现有研究在评估城市非点源污染负荷时大多对绿地和降雨强度等因素综合考虑不足<sup>[19, 25, 33—34]</sup>,这将影响城市非点源污染负荷的评估精度。我们除了综合考虑城市功能区划、下垫面类型和降雨强度等因素外,还通过更为精细的提高城市下垫面划分,提高城市非点源污染负荷的评估精度。本研究通过多源遥感数据解译辽宁中部城市群 6 市建成区的土地利用数据,并进一步提取建筑物轮廓数据,将土地利用数据和建筑物的轮廓数据相结合,把研究区 6 市的下垫面类型划分为道路、屋顶、绿地和水体。该方法能够为今后大尺度下更为精细的划分城市下垫面提供参考。通过此方法,我们得到了更为精细的城市非点源污染评估精度,这可为减缓流域城市非点源污染政策的制定提供参考。

#### 4.3 不确定性分析

本研究采用下垫面面积、EMC 值、年均降雨量和径流系数的乘积来计算城市非点源污染负荷。本研究仅在沈阳进行了降雨径流的采样,研究区其余 5 个城市均未采样,用沈阳市污染物的 EMC 值代替整个研究区的污染物浓度。这忽略了 6 个城市的空间差异性,尤其是营口市临近渤海,其大气沉降与内陆城市沈阳有较大差异,用沈阳的监测数据代替营口的污染情况,这会给城市非点源污染负荷的计算带来一些不确定性<sup>[10, 17]</sup>。此外,研究区存在的春季融雪现象,但是其采样较为困难,本研究忽略了春季融雪产生的地表径流所带来的非点源污染<sup>[35—36]</sup>。

虽然本研究存在一定的不确定性,但是基于更为精细的城市下垫面划分,通过综合考虑城市功能区划、下垫面类型和降雨强度等因素,将基于实测数据的 EMC 方法和 SWMM 模型相结合,提高了城市群流域非点源污染负荷的评估精度。该研究不仅能够帮助科研人员量化评估城市群流域城市非点源污染负荷,而且有助于流域规划者制定更为有效的非点源污染管理策略。

### 5 结论

本研究基于 2018 年和 2012 年的降雨径流实测数据、多源遥感和 GIS 技术,应用水文过程模型 SWMM,综合考虑城市功能区划、下垫面类型和降雨强度等因素,基于更为精细的城市群下垫面划分,量化评估位于浑河太子河流域的辽宁中部城市群的城市非点源污染负荷,得到的主要结论如下:

(1) 路面径流中各污染物的 EMC 值高于屋面径流和透水面径流。小雨和大雨情形下路面径流中 TP、TN 和 TSS 的 EMC 值,透水面径流中 TP 的 EMC 值,中雨情形下路面径流中 TSS 的 EMC 值以及小雨情形下屋面径流中 TN 的 EMC 值,均超过国家标准值。由于初期冲刷效应,重金属污染物的浓度随着降雨量的增大,污染物浓度降低。

(2) 从下垫面类型来看,路面径流所携带的非点源污染负荷及其单位面积负荷最高。从辽宁中部城市群 6 市的城市非点源污染负荷的空间分布来看,沈阳市的城市非点源污染负荷最大,但其单位面积负荷最低,这是由于沈阳市透水面面积较大。与其他城市相比,辽宁中部城市群 6 市 TSS、TN、TP 和 COD 污染水平不高,但存在一定程度的重金属污染。

(3) 在快速城市化背景下,城市群是城市化的新态势。本研究基于更为精细的城市下垫面划分,通过综合考虑城市功能区划、下垫面类型和降雨强度等因素,将基于实测数据的 EMC 方法和 SWMM 模型相结合,准确评估辽宁中部城市群流域城市非点源污染负荷。该研究不仅有助于科研人员在尺度上量化评估城市非点源污染负荷,而且有助于流域规划者制定科学有效的水资源管理策略,对实现流域可持续发展具有重

要意义。

#### 参考文献(References):

- [1] 李春林, 胡远满, 刘森, 徐岩岩, 孙风云. 城市非点源污染研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(2): 492-500.
- [2] Fang C L. Important progress and future direction of studies on China's urban agglomerations. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(8): 1003-1024.
- [3] 杨屹, 杨凤仪, 蔡梓萱. 黄河流域城市群资源环境承载力演变特征及驱动因素研究-以关中平原城市群为例. 环境科学学报, 2022, 42(2): 1-10.
- [4] 聂春霞, 李韧. 基于断点回归的天山北坡城市群水资源对城镇化的胁迫分析. 生态经济, 2019, 35(11): 91-98, 136.
- [5] Chen L, Dai Y, Zhi X S, Xie H, Shen Z Y. Quantifying nonpoint source emissions and their water quality responses in a complex catchment: a case study of a typical urban-rural mixed catchment. Journal of Hydrology, 2018, 559: 110-121.
- [6] Zhang L, Lu W X, Hou G L, Gao H Y, Liu H Q, Zheng Y N. Coupled analysis on land use, landscape pattern and nonpoint source pollution loads in Shitoukoumen Reservoir watershed, China. Sustainable Cities and Society, 2019, 51: 101788.
- [7] Kim G, Yur J, Kim J. Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in Daejeon City, Korea. Journal of Environmental Management, 2007, 85(1): 9-16.
- [8] 李俊奇, 毛坤, 向璐璐. 京承高速公路径流污染负荷及初期冲刷效应研究. 中国给水排水, 2010, 26(18): 59-63, 87.
- [9] Bian B, Cheng X J, Li L. Investigation of urban water quality using simulated rainfall in a medium size city of China. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 183(1/2/3/4): 217-229.
- [10] Yi Q, Li H, Lee J W, Kim Y. Erratum to "Development of EMC-based empirical model for estimating spatial distribution of pollutant loads and its application in rural areas of Korea" [J. Environ. Sci. 35(1 September 2015) 1-11. Journal of Environmental Sciences: China, 2018, 64: 353.
- [11] Wang Q R, Liu R M, Men C, Guo L J. Application of genetic algorithm to land use optimization for non-point source pollution control based on CLUE-S and SWAT. Journal of Hydrology, 2018, 560: 86-96.
- [12] Wang G B, Chen L, Huang Q, Xiao Y C, Shen Z Y. The influence of watershed subdivision level on model assessment and identification of non-point source priority management areas. Ecological Engineering, 2016, 87: 110-119.
- [13] 李春林, 刘森, 胡远满, 睢晋玲, 吴义林, 刘冲, 孙风云. 基于暴雨径流管理模型(SWMM)的海绵城市低影响开发措施控制效果模拟. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2405-2412.
- [14] 吴义林, 赵明华, 刘森, 李春林, 胡远满, 睢晋玲, 孙风云. 基于SWMM模型的沈阳典型小区非点源污染情景模拟. 生态学杂志, 2017, 36(2): 491-498.
- [15] Yang Y, Chui T F M. Incorporating external green infrastructure models into storm water management model (SWMM) simulations using interface files. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2020, 56(6): 1083-1093.
- [16] 欧阳威, 王玮, 郝芳华, 宋凯宇, 王云慧. 北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1249-1256.
- [17] Wang S M, He Q, Ai H N, Wang Z T, Zhang Q Q. Pollutant concentrations and pollution loads in stormwater runoff from different land uses in Chongqing. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(3): 502-510.
- [18] 王海邻, 曹雪莹, 任玉芬, 贺玉晓, 刘玉飞, 王思琪, 王效科, 李紫鑫. 北京城市主干道降雨径流污染负荷分析. 环境科学学报, 2019, 39(6): 1860-1867.
- [19] 付超, 苏晶, 赵海萍, 李清雪. 基于GIS的漳河上游城市非点源污染负荷估算. 水资源保护, 2020, 36(3): 60-66, 97.
- [20] Liu M, Li C L, Hu Y M, Sun F Y, Xu Y Y, Chen T. Combining CLUE-S and SWAT models to forecast land use change and non-point source pollution impact at a watershed scale in Liaoning Province, China. Chinese Geographical Science, 2014, 24(5): 540-550.
- [21] Zhao Q, Jia X B, Xia R, Lin J N, Zhang Y. A field-based method to derive macroinvertebrate benchmark for specific conductivity adapted for small data sets and demonstrated in the Hun-Tai River Basin, Northeast China. Environmental Pollution, 2016, 216: 902-910.
- [22] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [23] Liu M, Hu Y M, Li C L. Landscape metrics for three-dimensional urban building pattern recognition. Applied Geography, 2017, 87: 66-72.
- [24] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 欧阳志云, 苗鸿. 城市不同下垫面的降雨径流污染. 生态学报, 2005, 25(12): 3225-3230.
- [25] Zhi X S, Chen L, Shen Z Y. Impacts of urbanization on regional nonpoint source pollution; case study for Beijing, China. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(10): 9849-9860.
- [26] 住房城乡建设部. 海绵城市建设技术指南-低影响开发雨水系统构建. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [27] 付意成, 魏传江, 储立民, 姜尚堃. 浑太河流域水质达标控制方法研究. 中国环境监测, 2012, 28(2): 70-76.
- [28] 李春林, 刘森, 胡远满, 徐岩岩, 孙风云, 陈探. 沈阳市降雨径流初期冲刷效应. 生态学报, 2013, 33(18): 5952-5961.
- [29] 李春林, 刘森, 胡远满, 布仁仓, 孙风云, 宫继萍, 陈探. 沈阳市降雨径流污染物排放特征. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1327-1336.
- [30] Zhao J W, Shan B Q, Yin C Q. Pollutant loads of surface runoff in Wuhan City Zoo, an urban tourist area. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(4): 464-468.
- [31] Kafi M, Gasperi J, Moilleron R, Gromaire M C, Chebbo G. Spatial variability of the characteristics of combined wet weather pollutant loads in Paris. Water Research, 2008, 42(3): 539-549.
- [32] Li C L, Liu M, Hu Y M, Shi T, Qu X Q, Walter M T. Effects of urbanization on direct runoff characteristics in urban functional zones. Science of the Total Environment, 2018, 643: 301-311.
- [33] 卓慕宁, 王继增, 吴志峰, 万洪富, 李定强. 珠海城区暴雨径流污染负荷估算及其评价. 水土保持通报, 2003, 23(5): 35-38.
- [34] 张善发, 李田, 高廷耀. 上海市地表径流污染负荷研究. 中国给水排水, 2006, 22(21): 57-60, 63.
- [35] 高侯晗, 刘硕, 张美琦, 于益. 降雪量和融雪径流对地表水体污染物输出的影响. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2021, 37(4): 68-78.
- [36] 汪太明, 王业耀, 刘玉萍, 香宝, 马广文, 胡钰. 东北地区春季融雪期非点源污染负荷估算方法及应用. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 807-812.