

# 城市地表系统 POPs 多介质循环过程与模拟研究进展

刘敏\*,王兰辉 (华东师范大学资源与环境科学学院,地理信息科学教育部重点实验室,上海 200241)

**摘要:** 城市地表系统(USS)是陆地表层系统的重要组成部分,而以不透水面覆盖为主要特征的城市土地利用/覆被变化(LUCC)时空过程,打破了系统原有自然地理格局与过程,影响不同介质和界面间的物质循环与能量流动,改变 POPs 等污染物的循环过程与机理,是城市环境变化和入地相互作用的指示器与重要驱动力,是城市生态环境规划与管理保护的关键依据.本文总结了城市 LUCC 对 POPs 多介质分布迁移的影响,包括单介质中 POPs 的时空分布特征和 POPs 多介质迁移累积过程;从城市 POPs 多介质归趋模拟和基于 GIS 的城市多介质归趋模拟等方面,讨论了城市 POPs 多介质循环过程归趋模拟的主要进展;展望今后研究中需要重点解决的科学问题:基于不透水面的城市 LUCC 信息精确提取及与 POPs 排放输入等相关数据的同化集成; POPs 多介质多界面迁移、转化过程与城市 LUCC 的耦合机理;城市 LUCC 背景下 POPs 循环过程、机制的关键模型参数的构建与获取;基于 GIS 和城市 POPs 循环过程与机理的、具有高时空分辨率的城市多介质归趋模型(UMFM)的构建与应用.

**关键词:** 城市 LUCC ; 不透水面 ; GIS ; 持久性有机污染物(POPs) ; 循环过程与模拟

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2013)11-2018-09

**Research progress in multimedia cycle processes and simulation of POPs in urban surface system.** LIU Min\*, WANG Lan-hui (Key Laboratory of Geographical Information Sciences of the State Ministry of Education, College of Resources and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China). *China Environmental Science*, 2013,33(11): 2018~2026

**Abstract:** The urban surface system is an integral part of the land surface system. And the spatio-temporal processes of urban LUCC (land use/cover change), mainly featured in covered with impervious surfaces, breaking the original physical geographic patterns and processes of the system, affecting material circulation and energy flow among different media or interfaces, and changing cycles and mechanisms of POPs, act as an indicator and an important driving force of changes in the urban environment and human-land interaction, as well as the key basis for planning and management of urban environmental protection. We begin with a comprehensive summary of effects on POPs' distribution and migration of urban LUCC, involving spatio-temporal distribution of POPs in a single medium, migration and cumulative processes of POPs in multimedia. Secondly, the paper investigates the key progress in simulation of multimedia cycle processes and fate of urban POPs, including urban multimedia fate model and GIS-based urban multimedia fate model. Finally, the outlook for future research needs to focus on the following scientific problems: (i) technology of accurate retrieval of urban LUCC based on impervious surfaces and assimilation and integration of urban LUCC and POPs' emission inventory, as well as other relevant data, (ii) coupling mechanism of migration and transformation processes of POPs in multimedia and multiple interfaces, (iii) establishment and derivation of key model parameters of processes and mechanisms of cycles of POPs in the context of urban LUCC, (iv) construction and application of urban multimedia fate model with high spatio-temporal resolution based on GIS and processes and mechanisms of cycles of POPs in urban areas.

**Key words:** urban LUCC ; impervious surfaces ; GIS ; POPs ; cycle processes and simulation

城市地表系统(USS)是典型的自然 - 人文相互耦合的地域综合体,是陆地表层系统中人类活动最集中、人地相互作用最强烈的子系统,具有环境要素变异、赋存介质多样、循环过程复杂等

特性.地球生态系统将愈加受到城市发展步伐和

收稿日期: 2013-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41130525,41371451)

\* 责任作者, 教授, mliu@geo.ecnu.edu.cn

模式的影响<sup>[1]</sup>,快速城市化伴生的大规模土地利用/覆被变化(LUCC)已成为一种典型的人地系统相互作用和环境变化的重要驱动力<sup>[2]</sup>.城市化使不透水面迅速增加,形成了不同于自然地表的“城市第二自然地理格局”<sup>[3]</sup>,使污染物的循环过程和机制发生了重要改变<sup>[4]</sup>.作为支撑全球变化研究的战略措施之一,IHDP 于 2005 年末启动了“城市化与全球变化”等一系列以城市区域为着眼点的国际研究计划.其中,城市 LUCC 驱动下的物质生物地球化学循环与生态效应,已成为当前 IHDP 多学科联合攻关的核心科学问题和当今陆地表面过程研究的重要内容<sup>[2]</sup>.

持久性有机污染物(POPs)指通过多种环境介质(大气、水体、生物等)长距离迁移并长期在环境中循环转化,具有长期残留性、生物蓄积性、半挥发性和高毒性,对人类健康和生态环境具有严重危害的天然或人工合成有机污染物<sup>[5]</sup>.USS 聚集大量人流和物流,是人类工业生产和生活最集中区域,生产和排放了大量 POPs.不透水面是 USS 的重要组成部分,阻断了地表水与土壤的联系,改变了 POPs 等污染物的循环过程与机制,打破了城市区域原有地表系统的生态平衡,形成了人类纪(anthropogene)USS.以不透水面覆盖为主的城市 LUCC 时空过程对城市 POPs 跨圈层、多介质循环过程的影响机理及其相互作用与耦合机制研究,可揭示 USS 中气候、水文、土壤、生物等关键要素的变化过程及其相互作用机制对 POPs 循环过程的影响机理,为理解 USS 的复杂过程与机理提供科学依据,为全球环境变化的城市响应提供实证资料和理论依据,进而为城市管理和可持续发展服务.

在 USS 的 POPs 多介质循环过程与模拟研究中,弄清城市 LUCC 如何影响单介质中 POPs 的时空分布特征及其多介质迁移累积过程,是进行城市 POPs 多介质循环过程归趋模拟及生态健康风险评估的关键基础工作.因此,本文在深入总结国内外相关研究的基础上,首先系统分析了城市 LUCC 对 POPs 分布迁移的影响,然后讨论了城市 POPs 多介质循环过程归趋模拟的主要进展,最后展望了未来的研究趋势.

## 1 城市 LUCC 对 POPs 多介质分布迁移的影响

### 1.1 单介质中 POPs 的时空分布特征

受 USS 独特的 LUCC 时空格局与过程的直接与间接影响,POPs 的赋存介质有别于非城市化地区,主要包括大气(含气溶胶等)、沉积物、地表水(含不透水面径流)、土壤、植被和不透水面及其上的有机膜等.POPs 在城市单个介质中,往往呈现出不同的时空分布特征,空间上表现为数量与分布格局差异,时间上则蕴含迁移累积过程与循环转化规律.

城市 LUCC 形成特殊的下垫面和边界层,使城市大气中富集大量的气相和颗粒相 POPs,主要来源于城市工业、发电、交通及居民日常生活排放,其时空分布特征与城市 LUCC 密切相关.傅家谟对广州气溶胶中多环芳烃(PAHs)的分布、来源等进行了研究,指出其中普遍存在 PAHs 污染<sup>[6]</sup>.在城市中主要受交通尾气污染的户外空气中,低分子量 PAHs 主要为气态,而致癌性较强的组分则以颗粒态为主<sup>[7]</sup>.谭吉华等<sup>[8]</sup>进一步研究了广州可吸入颗粒中的 PAHs 分布,发现风速和温度等气象因素是影响其浓度的主要原因.Persoon 等则发现克利夫兰和芝加哥城市大气中多氯联苯(PCBs)的平均浓度具有显著差异,而 2 个城市不同地点间的浓度也具有很大的空间差异性,且无显著自相关<sup>[9]</sup>.尽管城市化模式及其 LUCC 时空过程对城市大气污染的影响不可忽视,但人均排放量对城市空气质量的影响更为显著<sup>[10]</sup>.

城市区域沉积物主要包括道路、广场等不透水面上的沉积物(灰尘)和河湖、排水管道中的沉积物,道路灰尘已有较多研究<sup>[11-14]</sup>.快速城市化使城市沉积物中含有多种 POPs,主要来源于大气干湿沉降、扩散和城市地表径流等.Kannan 等<sup>[15]</sup>研究了美国密歇根州内陆湖泊沉积物中 PAHs 的时空分布,发现其最高浓度出现在位于城市化流域的卡斯湖中,且 PAHs 浓度与流域人口密度在空间上呈正相关.对美国 7 个大都市区的河床沉积物中氯菊酯类农药的赋存状况和潜在来源的评估显示,对数转换的总氯菊酯类农

药浓度与城市土地利用呈显著相关<sup>[16]</sup>。

城市地表水主要表现为降水在不透水面等造成的地表径流,因雨水在降落及径流过程中,冲刷大气、植被表面、不透水面等附着的灰尘颗粒,使其含有多种 POPs,并成为城市 POPs 运输循环的重要通道。Murakami 等<sup>[17]</sup>首次报告了城市街道径流中硝基多环芳烃(NPAHs)的吸附行为,指出 NPAHs 可作为柴油车尾气颗粒物的指示器。Jiang 等<sup>[18]</sup>发现城市地表径流中的氯菊酯类农药主要负载于混凝土表面的细颗粒,并给出了城市径流中农药污染的预测方法。韩景超等<sup>[19]</sup>对温州不同城市功能区径流中 PCBs 浓度的研究表明,不同功能区含量差异不大,以五氯代 PCBs 为主,且高低氯代 PCBs 污染源不同。

城市土壤受城市化过程影响强烈,已成为 USS 中 POPs 的重要载体。各国相继开展了城市土壤 POPs 污染水平与分布特征研究<sup>[20-23]</sup>。不同城市、同一城市不同土地利用类型土壤中 POPs 含量存在明显差异<sup>[24-25]</sup>。Li 等<sup>[26]</sup>调查了北京公园土壤中有有机氯农药(OCPs)含量,发现六六六(HCHs)和滴滴涕(DDTs)浓度分别为 0.2490-197.0 和 5.942-1039ng/g, DDTs 已对一些公园土壤造成较高水平污染。而 Wong 等<sup>[27]</sup>研究了城市土壤中溴化阻燃剂(BFRs)和 OCPs 的挥发性和降解性,发现由于化学物质更加牢固地与土壤结合,其挥发性随时间推移而降低<sup>[27]</sup>。综上,城市区域新建绿地,因其土壤中可能存在的 POPs 具有更高挥发性,对人群亦有更高潜在暴露风险。

植被通过呼吸吸收大气中多种 POPs,是城市 POPs 富集的重要载体,但对城市植被中 POPs 时空分布格局、累积过程及在城市 POPs 多介质循环过程中的作用,关注不够。Müller 等研究了澳大利亚布里斯班植物叶片中 PAHs、二噁英/呋喃、PCBs 及六氯苯的含量,发现其浓度在空间上有很大差异<sup>[28]</sup>。还有一些类似研究也探讨了植物叶片中 POPs 浓度的空间差异<sup>[29-30]</sup>,但对其累积过程未作讨论,今后应加强城市植被吸收、富集 POPs 的生态毒理过程及循环机理的研究。

Diamond 等<sup>[31-32]</sup>首先发现城市不透水面上附着一层有机膜,已在其中发现 PCBs、多溴联苯

醚(PBDEs)、PAHs 等 POPs<sup>[33-35]</sup>。Wu 等<sup>[36]</sup>发现多伦多市中心不透水面上的有机膜与其中的 PCBs 总量呈相似速率的线性增长,而在多伦多东北 200km 外的农村,有机膜的增长速率与 PCBs 的含量分别低于市中心大约 7~22 倍和 12~20 倍,大约有 56~226g 的 PCBs 被覆盖在多伦多不透水面上 70nm 厚的有机膜捕获<sup>[36]</sup>。而 Gewurtz 等<sup>[37]</sup>比较了城市玻璃窗表面薄膜中的全氟烷基污染物(PFCs)的室内外、城市与农村及冬夏浓度,发现室内比室外高达 20 倍,由此判断其可能来源于室内地毯。不透水面在 USS 的土地利用类型中占有很大比例,且不透水面有机膜能够富集多种高毒性 POPs,并改变 POPs 的时空分布与循环机制,所以必须继续深化对不透水面有机膜的研究。

## 1.2 POPs 多介质迁移累积过程

USS 的 POPs 在多种环境介质中,往往表现出分布空间上的迁移转化性、危害时间上的持久累积性和循环过程上的复杂往复性等特征,迁移累积过程主要通过大气循环、水循环和大气—水循环等实现(图 1)。而以不透水面覆盖为主要特征的城市 LUCC 时空过程和高强度人类活动极大地改变了城市区域下垫面条件和边界层结构,形成独特的城市小气候,主要表现为气温高、湿度低、风速小、太阳辐射弱、能见度差和降水多。USS 的大气循环和水循环过程因此发生了极大改变,POPs 等污染物的循环过程也必然随之发生改变。因此,研究城市 LUCC 背景下 POPs 多介质迁移累积过程,对于理解城市化的环境影响和加深对 USS 的认识,具有重要意义。

城市大气中 POPs 主要通过不同气象条件下的干湿沉降、风力扩散等方式,与 USS 中的水体、不透水面、植被和土壤等进行多介质多界面迁移累积作用。Vardar 等<sup>[38]</sup>检测了美国芝加哥湖面与陆地上空大气中的 PAHs,结果显示陆地上空大气中 PAHs 含量为湖面上空的 2~4 倍,且风向对大气中 PAHs 含量有重要影响,PAHs 赋存水平从陆地向湖泊依次递减<sup>[38]</sup>。Liu 等<sup>[39]</sup>在上海城市灰尘 PAHs 迁移累积过程影响因素的研究中发现,风向能直接影响 PAHs 的空间分布趋势,夏季时大气中 PAHs 借助风向积累在西北城区,

距离较远的东南部污染源释放的 PAHs,到达中部时大部分已沉降到地表,于城市中心区形成“空心效应”.Tham 等<sup>[40]</sup>研究了日本 Higashi Hiroshima 地区气象条件对大气 PAHs 的影响,发现颗粒物中 PAHs 含量与温度、日照强度呈显著负相关,与硫氧化物、氮氧化物显著正相关,但与风速、湿度无明显相关关系. He 等<sup>[41]</sup>研究

了在不同温度下 PAHs 在城市空气-土壤界面分配的变化,发现其分配系数受温度影响很大,在 -30 和 30 相差 6 个数量级.上述研究结果中的差异表明,不同地区不同城市的气象因素对 POPs 的迁移累积过程的影响不尽相同,且具有一定的复杂性和不确定性,应该对此继续进行深入研究并加深理解.

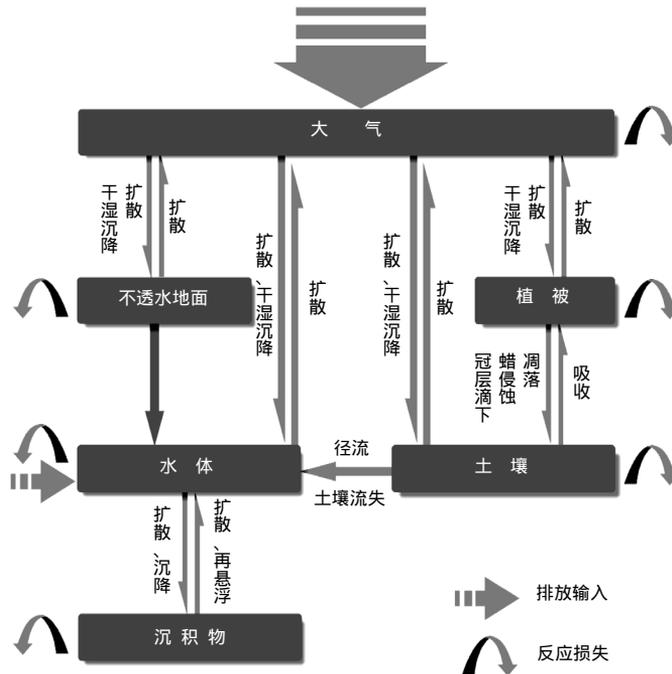


图 1 城市地表系统 POPs 多介质迁移累积过程框架

Fig.1 Framework of migration and cumulative processes of POPs in multimedia environments from USS

因不透水面广泛分布和植被较少,USS 的蒸发量、下渗都减少,而地表径流则大大增加.地表径流在城市水循环中占有重要地位,是城市 POPs 多介质迁移累积的重要载体和驱动力.城市大气、不透水面、植被和土壤等介质中累积的 POPs,都能通过降雨冲刷、地表径流等途径迁移汇集到城市排水管道和河湖等水体中,再通过扩散、沉降方式累积在沉积物中,又能通过扩散、再悬浮方式再次进入水体,形成动态平衡.Brown 等<sup>[10]</sup>分别对新西兰 Dunedin 地区汇水域暴雨径流颗粒物及道路灰尘中的 PAHs 进行了测定,发现暴雨径流中的 PAHs 主要来源于城市道路灰尘的冲刷.DiBlasi 等<sup>[42]</sup>研究了城市雨水生物截留设

施中径流的 16 种 USEPA 优先污染 PAHs 的去除和归宿,结果表明生物滞留能有效控制 PAHs 径流污染,且截获的 PAHs 在径流入口附近土壤中仅有几厘米的垂直运输.Patrolecco 等<sup>[43]</sup>研究了意大利城市水体、悬浮颗粒、沉积物和鱼体内的 PAHs,指出悬浮颗粒中的 PAHs 最高,但某些 PAHs 辛醇-水分配系数不能用于解释其在水中颗粒上的吸附能力.鉴于城市水循环过程的复杂性,必须深化对 POPs 在城市水文系统中多介质迁移累积过程与循环机理的认识.

实际上,USS 大气中的 POPs,往往先通过大气循环水平传输、扩散及干湿沉降,降落在不透水面、水体、土壤及植被表面等,经过长时间累

积形成细小的沉积颗粒或灰尘,而城市降雨冲刷过程形成的地表径流,则将这些 POPs 带入城市水文系统.借助 USS 局地的大气—水循环过程,POP<sub>s</sub> 在城市多介质环境中进行复杂往复地迁移累积,扩大了其时空影响范围及污染程度.叶有斌等<sup>[44]</sup>分析了北京城市不同道路类型的道路积尘的 PAHs、粒径及总有机碳(TOC),发现在小于 75 $\mu\text{m}$ 、75 到 214 $\mu\text{m}$  和大于 214 $\mu\text{m}$  三个粒径级中,TOC 与 PAHs 质量分数均呈现显著正相关,高比例的细颗粒及细颗粒中的 PAHs 使得道路积尘再悬浮进入大气以及随湿沉降进入地表径流的环境风险加大.总之,USS 的 POP<sub>s</sub> 多介质迁移累积过程,受城市复杂 LUCC 时空过程及高强度人类活动形成的城市区域特殊的大气(气象)、水文循环过程影响,迁移过程扩大了 POP<sub>s</sub> 的时空影响范围,而伴随迁移的不断累积转化过程则增加了 POP<sub>s</sub> 的危害时间和程度.

## 2 城市 POP<sub>s</sub> 多介质循环过程归趋模拟

### 2.1 城市 POP<sub>s</sub> 多介质归趋模拟

在复杂城市 LUCC 背景下,对 POP<sub>s</sub> 在各环境介质中的时空分布特征、迁移累积过程进行实时监测是不可行的,并且在城市 POP<sub>s</sub> 综合治理及暴露风险评估中,迫切需要了解 POP<sub>s</sub> 的多介质循环过程及其归趋状况,这促使研究者不断探索和深入 POP<sub>s</sub> 多介质归趋模拟的研究. Mackay<sup>[45]</sup>在 1979 年首先提出基于热力学理论和质量平衡方程的多介质归趋模型(multimedia fate model, MFM),因其在理解多介质环境中 POP<sub>s</sub> 等污染物行为上的有效性和准确性,已在城市、区域及全球尺度上获得广泛应用.

目前,MFM 在环境中 POP<sub>s</sub> 的模拟与预测、管理与控制决策、暴露与生态健康风险评价等多方面取得了较大进展. Mackay 等<sup>[46]</sup>成功地应用三级逸度模型,模拟 5 种 PAHs 化合物在魁北克省 Lac Saint Louis 地区的环境归趋,并评估工业、市政及大气排放的效应,为污染控制措施规划提供科学依据. Lang 等<sup>[47]</sup>利用四级逸度模型,对珠江三角洲地区不同季节大气、土壤、沉积物中的 PAHs 进行了模拟研究,结果显示气相中的 PAHs 夏季高

于冬季,但颗粒态中的 PAHs 恰好相反. Wang 等<sup>[48]</sup>利用四级逸度模型模拟了河北省土壤和空气中 PAHs 的空间和季节迁移规律,指出大气-土壤间的迁移量与土地覆盖有关,而土壤-大气的迁移量则与土壤有机质含量有关. Konstantinos<sup>[49]</sup>在逸度模型中考虑炭黑等对 PAHs 的吸附因素,根据斯德哥尔摩城市的污染实测,对模型进行了修正,指出新模型在预测沉积物中 PAHs 时会比原预测值增加 20%~30%,其平流损失的预测则会降低,炭黑的吸附作用对低环 PAHs 的预测影响较大. MFM 在不同时空尺度上表现出广泛的应用价值,能够有效提高对 PAHs 等 POP<sub>s</sub> 的模拟与预测精度,增强 POP<sub>s</sub> 的综合管理决策与生态健康风险评价能力.

城市不透水面的有机膜是城市多介质归趋模型(UMFM)中必须考虑的、特有的环境介质,在城市 POP<sub>s</sub> 多介质循环过程中起到关键作用,往往表现为 POP<sub>s</sub> 富集或多介质反应的源或汇. Diamond 等<sup>[50]</sup>基于 Mackay 的三级逸度模型,首次建立了多介质城市模型,来解释 PAHs 等半挥发性 POP<sub>s</sub> 在城市大气、地表水、沉积物、土壤、植物及不透水表面的有机膜等六种介质中的迁移规律,发现有机膜中 PAHs 含量最高,但土壤是大多数疏水性 POP<sub>s</sub> 最大的汇,不透水表面有机膜的存在有助于有机污染物通过挥发进入大气和径流冲刷进入水体. Priemer 等<sup>[51]</sup>建立了多介质城市模型(MUM),研究城市区域半挥发性有机污染物(SOCs)的动力学过程,并与森林覆盖地区中 SOC<sub>s</sub> 的环境行为进行了比较,指出在 USS 中,辛醇水分配系数小于 7.5 的 SOC<sub>s</sub> 在城市地表与空气的迁移过程受中到平流作用和光降解的影响较大,而辛醇水分配系数大于 7.5 的 SOC<sub>s</sub> 大多被雨水从地表有机膜上冲刷到地表水中. Kwanema 等<sup>[52]</sup>运用 MUM 评价了城市大气中 PAHs 多相反应的重要性,结果表明多相反应占到低挥发性 PAHs 反应损失的 75%,有机膜是低挥发性 PAHs 高效的反应汇. 汪祖丞等<sup>[53]</sup>运用 MUM 对上海 USS 各介质间 PAHs 的归趋进行了模拟,结果表明 PAHs 的浓度最高值出现在城市不透水面上的有机膜中. 然而,早期的 MFM 多是基于稳态建立的,实际上 POP<sub>s</sub> 在环境多介质中

的迁移是非稳态的。Csiszar 等<sup>[54]</sup>建立了 MUM 的非稳态逸度版本,并研究了城市不透水面有机膜的源—汇效应,结果表明,有机膜在干冷天气作为来自空气的化学物质的一个临时汇,在较温暖天气作为到空气的源,在降雨事件中则是到雨水和土壤的源。这些研究,深化了对 USS 不透水面上的有机膜在城市 POPs 多介质迁移循环过程中作用的理解,也进一步说明城市 POPs 多介质循环过程及影响机理的复杂性。

然而,城市多介质归趋模拟结果的准确性,严重依赖于实测获得的经验参数的准确性,且预测结果必然存在一定程度的不确定性<sup>[55]</sup>,在模型建立和应用过程中必须予以关注。另外,在 MFM 的计算过程中,自动误差控制方法可显著提高计算解决方案的质量,并节约计算时间<sup>[56]</sup>。

## 2.2 基于 GIS 的城市多介质归趋模拟

实际上,对于一个特定的 USS,土壤、水体、植被及不透水面等土地利用类型,往往变化很大,从而极大地影响 POPs 的环境行为和循环过程,而通用的 UMFEM 无法对城市 POPs 的时空分布差异及其归趋过程作出空间明确的描述<sup>[57]</sup>。并且,目前 USS 复杂 LUCC 时空格局与过程通过何种途径和方式影响 POPs 富集、迁移、转化和暴露的研究仍比较薄弱,POPs 的复杂循环过程与城市 LUCC 这一动态过程的相互作用与动态反馈的研究亟待开展。而 GIS 因其强大的空间数据管理与分析能力,已被广泛应用于环境建模。基于 GIS 的 UMFEM,能够在建模过程中同化集成城市 LUCC、POPs 排放清单及空间分布、地形、气候、水文等多种高分辨率空间数据,很好地解决时空变异环境中 POPs 的多介质归趋模拟,为系统研究 USS 的 LUCC 对 POPs 多介质循环过程的影响及其响应机制提供一个综合集成平台。

在区域、国家及大洲尺度上,已经有许多耦合 GIS 的 MFM 被开发,并成功应用于区域环境 POPs 的归趋模拟、预测及生态暴露风险评价。Barra 等<sup>[58]</sup>耦合 SoilFug 模型和 GIS 以在流域水平预测地表水的农药污染,获得了满意的结果,证明用该方法预测流域尺度特定地点的 POPs 的分布和归趋是可行的。Suzuki 等<sup>[59]</sup>基于 GIS 开发了具有地

理参考的多介质环境归趋模型(G-CIEMS),模型能够提供 POPs 空间分布的明确信息,并与通用模型、实测途径一起进行人口暴露风险评估,结果显示,G-CIEMS 方法与实测结果具有更好的一致性,表明该方法能够提供带有空间分布信息的更准确的暴露风险评估。Pistocchi<sup>[60]</sup>提出仅使用基础 GIS 操作(地图代数等)来评估欧洲多介质的 POPs 浓度,与作为基准的性能良好的 EMEP MSCEPOP 模型相比,该方法提供一致的预测结果。Morra 等<sup>[61]</sup>采用一个集成的、多介质、多暴露途径和多受体风险评估模型(EHHRA-GIS),能够在—个地理参考结构中管理组成人口健康风险分析的所有步骤,应用该模型对意大利墨西拿佩斯谷地区的总体人口健康风险进行了综合评估。Vizcaino 等<sup>[62]</sup>应用基于 MAPPE GIS 的多介质模型,对欧洲土壤和水域中 $\gamma$ -HCH 的空间分布及其归趋进行定量描述,监测和模拟结果表明,虽然排放量明显下降,但仍超过现行法律的规定。与通用的 MFM 相比,基于 GIS 的 MFM 在 POPs 模拟、预测及生态健康风险评估中表现出更优越的性能。

然而,由于 USS 中 LUCC 时空过程及 POPs 多介质循环过程的复杂性,基于 GIS 的 UMFEM 的研究虽已取得了一些进展,但仍处于起步阶段。Song 等<sup>[63]</sup>结合多介质逸度模型、多路径暴露模型、暴露风险关系和 GIS,提出了一个城市生态风险评估方法的研究框架,并对一个假想地区的城市生态风险进行评估,结果表明将 GIS 引入旧有方法以满足城市环境 POPs 生态风险管理的要求是可能的和可行的。Kim 等<sup>[64]</sup>则将对流-弥散-反应的偏微分方程、稳态多介质逸度模型和 GIS 结合,开发了用于城市尺度 POPs 多介质传输的空间评估和风险评估的细化的多介质归趋模型(LSRMFEM),运用该模型与实测数据和通用 MFM 的预测结果进行了比较,结果表明,模型适用于预测长期的多介质污染,且其输出的地理变异显示出相当大的生态风险的存在,而通用模型则显示较小的平均风险。Csiszar 等<sup>[65]</sup>最近耦合空间可辨的、动态版本的 MUM 和 BLFMAPS 模型,建立了 5km 栅格分辨率的空间导向的 MUM (SO-MUM),以估计城市区域 POPs 的排放和归

趋。总之,基于 GIS 的 UMF M 能够有效预测城市 LUCC 背景下的不同区域不同地表介质中 POPs 的含量及归趋行为,提高城市 POPs 生态健康风险评估的准确性。

基于 GIS 的 UMF M 的最大优势在于能够将 USS 的 POPs 时空分布特征及其多介质迁移累积过程空间化,并结合城市 LUCC、POPs 排放清单等自然、社会经济数据进行同化集成,系统探究 USS 的 POPs 多介质循环过程与影响机理,最后对 POPs 浓度变化及归趋行为作出准确评估与预测,从而给出时空明确的 POPs 的人口及生态暴露风险评估结果。

### 3 展望

城市区域在不透水面影响下,形成了有别于自然地表的人类纪 USS。在全球变化背景下,需要深入系统地加强 USS 研究,从微观和宏观上揭示城市地表过程与变化规律及其对全球变化的影响与适应机制,提出城市生态环境可持续发展的适应性规划、保护与管理对策。以不透水面覆盖为主要特征的城市 LUCC 时空过程对 POPs 循环过程的影响机理研究,是 USS 的 LUCC 时空过程及其多介质影响机理与相互作用、耦合机制的关键科学问题之一,是极其复杂的多学科交叉问题。必须采用遥感、GIS 及地球系统模拟等先进观测技术与实验手段,加强地理学、环境学、生态学、信息科学和社会科学等学科的综合集成研究。

以高强度人类扰动和快速城市化的典型城市为案例研究区域,针对城市地表特征演变,重点研究城市 LUCC 背景下大气、植被、土壤、降水、地表径流及覆盖在不透水面上的膜等介质中不同 POPs 的富集特征与时空分布规律,辨析 POPs 来源及输入途径,探讨城市 LUCC 与 POPs 源—汇信息的关系,阐明 USS 的多介质环境中 POPs 的迁移动力学过程与循环机制,揭示城市 LUCC 与 POPs 循环过程的耦合关系及 POPs 对城市 LUCC 的响应机理,在此基础上,基于 GIS 技术构建具有高时空分辨率的 UMF M,预测 USS 不同区域各介质中 POPs 的归趋行为,推演 POPs 对城市 LUCC 的响应机制,必将为保护城市生态环境与人类健

康安全提供科学依据,也将进一步推进 USS 变化机理与物质循环过程耦合研究。未来需加强以下方面的研究:基于不透水面的城市 LUCC 信息精确提取及与 POPs 排放输入等自然人文数据的同化集成;POPs 多介质多界面迁移、转化过程与城市 LUCC 的耦合机理;城市 LUCC 背景下 POPs 循环过程、机制的关键模型参数的构建与获取;基于 GIS 和城市 POPs 循环过程与机理的、具有高时空分辨率的 UMF M 的构建与应用。

### 参考文献:

- [1] Alberti M, Redman C, Wu J, Get al. Urban landscape patterns and global environmental change: Complex dynamics and emergent properties [J]. IHDP-UGEC Update Newsletter, 2006, 2: 5-7.
- [2] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities [J]. Science, 2008, 319: 756-760.
- [3] 许世远. 上海城市自然地理图集 [M]. 北京: 中华地图学社, 2004.
- [4] Diamond M L, Hodge E. Urban contaminant dynamics: from source to effect [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(11): 3796-3800.
- [5] Jones K C, Voogt P. Persistent organic pollutants (POPs): state of the science [J]. Environmental Pollution, 1999, 100: 209-221.
- [6] 傅家谟, 盛国英, 成玉, 等. 粤港澳地区大气环境中有机污染物特征与污染源追踪的初步研究 [J]. 气象与环境研究, 1997, 2(1): 16-22.
- [7] Ciganek M, Adamec V, Janosek J, et al. A combined chemical and bioassay analysis of traffic-emitted polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. The Science of the Total Environment, 2004, 334/335: 141-148.
- [8] 谭吉华, 毕新慧, 段菁春, 等. 广州市大气可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)中多环芳烃的季节变化 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(7): 855-862.
- [9] Persoon C, Peters T M, Kumar N, et al. Spatial distribution of airborne polychlorinated biphenyls in Cleveland, Ohio and Chicago, Illinois [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 44: 2797-2802.
- [10] Song J, Webb A, Parmenter B, et al. The impacts of urbanization on emissions and air quality: comparison of four visions of Austin, Texas [J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42: 7294-7300.
- [11] Brown J N, Peake B M. Sources of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater runoff [J]. Science of the Total Environment, 2006, 359: 145-155.
- [12] Boonyatumanond R, Murakami M, Wattayakorn G, et al. Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust in a

- tropical Asian mega-city, Bangkok, Thailand [J]. *Science of the Total Environment*, 2007,384:420-432.
- [13] 程书波,刘 敏,欧冬妮,等.上海市地表灰尘中 PAHs 季节变化与功能区差异 [J]. *环境科学*, 2007,28(12):2789-2793.
- [14] 程书波,刘 敏,欧冬妮,等.上海市地表灰尘中 PAHs 的来源辨析 [J]. *中国环境科学*, 2007,27(5):589-593.
- [15] Kannan K, Johnson B, Yohn S S, et al. Spatial and temporal distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Michigan inland lakes [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005,39(13):4700-4706.
- [16] Kuivila K M, Hladik M L, Ingersoll C G, et al. Occurrence and potential sources of pyrethroid insecticides in stream sediments from seven U.S. metropolitan areas [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012,46:4297-4303.
- [17] Murakami M, Yamada J, Kumata H, et al. Sorptive behavior of nitro-PAHs in street runoff and their potential as indicators of diesel vehicle exhaust particles [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008,42(4):1144-1150.
- [18] Jiang W, Gan J. Importance of fine particles in pesticide runoff from concrete surfaces and its prediction [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012,46:6028-6034.
- [19] 韩景超,毕春娟,陈振楼,等.城市不同功能区径流中 PCBs 的污染特征及毒性评价 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(3):546-552.
- [20] Tang L, Tang X Y, Zhu Y G, et al. Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils in Beijing [J]. *China Environment International*, 2005,31:822-828.
- [21] Chung M K, Hu R, Cheung K C, et al. Pollutants in Hong Kong soils: polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Chemosphere*, 2007, 67:464-473.
- [22] Jiang Y F, Wang X T, Wang F, et al. Levels, composition profiles and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil of Shanghai, China [J]. *Chemosphere*, 2009,75:1112-1118.
- [23] Liu S, Xia X, Yang L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of different land uses in Beijing, China: Distribution, sources and their correlation with the city's urbanization history [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010,177:1085-1092.
- [24] Mielke H W, Wang G, Gonzales C R, et al. PAH and metal mixtures in New Orleans soils and sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2001,281:217-227.
- [25] Yang Y, Zhang X X, Korenaga T. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soil of Tokushima, Japan [J]. *Water Air Soil Pollution*, 2002,138:51-60.
- [26] Li X, Wang W, Wang J, et al. Contamination of soils with organochlorine pesticides in urban parks in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2008,70:1660-1668.
- [27] Wong F, Kurt-Karakus P, Bidleman T F. Fate of brominated flame retardants and organochlorine pesticides in urban soil: volatility and degradation [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012,46:2668-2674.
- [28] Müller J F, Hawker D W, McLachlan M S, et al. PAHs, PCDD/Fs, PCBs and HCB in leaves from Brisbane, Australia [J]. *Chemosphere*, 2001,43:507-515.
- [29] 王雅琴,左 谦,焦杏春,等.北京大学及周边地区非取暖期植物叶片中的多环芳烃 [J]. *环境科学*, 2004,25(4):23-27.
- [30] 程书波,刘 敏,欧冬妮,等.城市不同功能区 PAHs 多介质规律研究 [J]. *环境科学*, 2008,29(2):409-412.
- [31] Law N L, Diamond M L. The role of organic films and the effect on hydrophobic organic compounds in urban areas: an hypothesis [J]. *Chemosphere*, 1998,36:2607-2620.
- [32] Diamond M L, Gingrich S E, Fertuck K, et al. Evidence for organic film on an impervious urban surface: characterization and potential teratogenic effects [J]. *Environmental Science and Technology*, 2000,34:2900-2908.
- [33] Gingrich S E, Diamond M L, Stern G A, et al. Atmospherically derived organic surface films along an urban-rural gradient [J]. *Environmental Science and Technology*, 2001,35:4031-4037.
- [34] Butt C M, Diamond M L, Truong J, et al. Spatial distribution of polybrominated diphenyl ethers in southern Ontario as measured indoor and outdoor window organic films [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004,38:724-731.
- [35] Unger M, Gustafsson O. PAHs in Stockholm window films: evaluation of the utility of window film content as indicator of PAHs in urban air [J]. *Atmospheric Environment*, 2008,42:5550-5557.
- [36] Wu R W, Harner T, Diamond M L. Evolution rates and PCB content of surface films that develop on impervious urban surfaces [J]. *Atmospheric Environment*, 2008,42:6131-6143.
- [37] Gewurtz S B, Bhavsar S P, Crozier P W, et al. Perfluoroalkyl contaminants in window film: indoor/outdoor, urban/rural, and winter/summer contamination and assessment of carpet as a possible source [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43:7317-7323.
- [38] Vardar N, Tasdemir Y, Odabasi M, et al. Characterization of atmospheric concentrations and partitioning of PAHs in the Chicago atmosphere [J]. *Science of the Total Environment*, 2004,327:163-174.
- [39] Liu M, Cheng S B, Ou D N, et al. Characterization, identification of road dust PAHs in central Shanghai areas, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007,41:8785-8795.
- [40] Tham Y W F, Takeda K, Sakugawa H. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) associated with atmospheric particles in Higashi Hiroshima, Japan: Influence of meteorological conditions and seasonal variations [J]. *Atmospheric Research*, 2008,88:224-233.

- [41] He X, Chen S, Quan X, et al. Temperature-dependence of soil/air partition coefficients for selected polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides over a temperature range of -30 to +30 [J]. *Chemosphere*, 2009,76(4):465-471.
- [42] Diblasi C J, Li H, Davis A P, et al. Removal and fate of polycyclic aromatic hydrocarbon pollutants in an urban stormwater bioretention facility [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009,43:494-502.
- [43] Patrolecco L, Ademollo N, Capri S, et al. Occurrence of priority hazardous PAHs in water, suspended particulate matter, sediment and common eels (*Anguilla anguilla*) in the urban stretch of the River Tiber (Italy) [J]. *Chemosphere*, 2010,81(11):1386-1392.
- [44] 叶友斌,张巍,王学军.北京城市道路积尘多环芳烃的粒度分布特征及其影响因素 [J]. *生态环境学报*, 2009,18(15):1788-1792.
- [45] Mackay D. *Multimedia environmental models:the fugacity approach* [M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC press, 2001.
- [46] Mackay D, Hickie B. Mass balance model of source apportionment, transport and fate of PAHs in Lac Saint Louis Quebec [J]. *Chemosphere*, 2000,41:681-692.
- [47] Lang C, Tao S, Wang X J, et al. Seasonal variation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Pearl River Delta region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007,41:8370-8379.
- [48] Wang R, Cao H, Li W, et al. Spatial and seasonal variations of polycyclic aromatic hydrocarbons in Haihe Plain, China [J]. *Environmental Pollution*, 2011,159(5):1413-1418.
- [49] Konstantinos P, Anna P, Orjan G, et al. Development of a black carbon-inclusive multi-media model: Application for PAHs in Stockholm [J]. *Chemosphere*, 2008,70:607-615.
- [50] Diamond M L, Priemer D A, Law N L. Developing a multimedia model of chemical dynamics in an urban area [J]. *Chemosphere*, 2001,44:1655-1667.
- [51] Priemer D A, Diamond M L. Application of the multimedia urban model to compare the fate of SOCs in an urban and forested watershed [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36:1004-1013.
- [52] Kwamena N A, Clarke J P, Kahan T F, et al. Assessing the importance of heterogeneous reactions of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere using the Multimedia Urban Model [J]. *Atmospheric Environment*, 2007,41:37-50.
- [53] 汪祖丞,刘敏,杨毅等.上海城区多环芳烃的多介质归趋模拟 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(6):984-990.
- [54] Csiszar S A, Diamond M L, Thibodeaux L J. Modeling urban films using a dynamic multimedia fugacity model [J]. *Chemosphere*, 2012,87:1024-1031.
- [55] Diamond M L, Melymuk L, Csiszar S A, et al. Estimation of PCB stocks, emissions, and urban fate: Will our policies reduce concentrations and exposure? [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010,44:2777-2783.
- [56] Semplice M, Ghirardello D, Morselli M, et al. Guidance on the selection of efficient computational methods for multimedia fate models [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012,46: 1616-1623.
- [57] Hollander A, Hauck M, Cousins I T, et al. Assessing the relative importance of spatial variability in emissions versus landscape properties in fate models for environmental exposure assessment of chemicals [J]. *Environmental Modeling and Assessment*, 2012,17:577-587.
- [58] Barra R, Vighi M, Maffioli G, et al. Coupling SoilFug Model and GIS for predicting pesticide pollution of surface water at watershed level [J]. *Environmental Science and Technology*, 2000,34:4425-4433.
- [59] Suzuki N, Murasawa K, Sakurai T, et al. Geo-referenced multimedia environmental fate model (G-CIEMS): model formulation and comparison to the generic model and monitoring approaches [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004,38: 5682-5693.
- [60] Pistocchi A. A GIS-based approach for modeling the fate and transport of pollutants in Europe [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008,42:3640-3647.
- [61] Morra P, Lisi R, Spadoni G, et al. The assessment of human health impact caused by industrial and civil activities in the Pace Valley of Messina [J]. *Science of the Total Environment*, 2009,407: 3712-3720.
- [62] Vizcaino P, Pistocchi A. A GIS model-based assessment of the environmental distribution of  $\gamma$ -hexachlorocyclohexane in European soils and waters [J]. *Environmental Pollution*, 2010,158: 3017-3027.
- [63] Song H M, Xu L Y. A method of urban ecological risk assessment:combining the multimedia fugacity model and GIS [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011,25:713-719.
- [64] Kim J H, Kwak B K, Shin C B, et al. Development of a local-scale spatially refined multimedia fate model (LSRMFM) for urban-scale risk assessment: model formulation, GIS-based preprocessing, and case study [J]. *Environmental Modeling and Assessment*, 2011,16:265-281.
- [65] Csiszar S A, Daggupati S M, Verkoeyen S, et al. SO-MUM: A coupled atmospheric transport and multimedia model used to predict intraurban-scale PCB and PBDE emissions and fate [J]. *Environmental Science and Technology*, 2013,47:436-445.

作者简介:刘敏(1964-),男,内蒙古土左人,教授,博士,主要从事城市环境地球化学与生态环境过程研究.发表论文 150 多篇.