

城市土壤环境问题及其研究进展*

张甘霖[†] 赵玉国 杨金玲 赵文君 龚子同

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所),南京 210008)

摘要 城市土壤是保护城市环境的一个重要生态屏障,城市土壤的退化过程实质上是其“自我牺牲”地发挥生态服务功能从而导致自身质量下降的过程,因此其自身常常存在各种各样的环境问题。除了压实等物理退化过程之外,多种与人为活动有关的元素的富集、不同程度的重金属和有机污染是城市土壤环境问题最主要的方面。城市土壤重金属污染的主要特点是污染的出现没有明显的空间连续性,污染元素以 Cu、Zn、Pb 和 Hg 等元素为主,而其他重金属富集程度相对较低。在城市发展过程中,重金属污染不只是现代过程,根据城市发展的历史,经常会出现历史污染。城市土壤常含有相对富集的多环芳烃,环数在 2~6 之间,并以 2~4 环 PAHs 为主,说明其具有很强的燃烧来源背景。

迄今为止,城市土壤污染研究主要集中于三个方面:对于城市土壤污染物来源、现状及扩散方式的认识;污染对生态环境和健康的影响和风险评价;城市土壤的良性利用和管理调控手段。退化的城市土壤对水、气环境和生物活动以及人体健康都存在显著的影响,不同的城市功能区土壤在环境质量上有明显的区别。目前对于城市土壤污染的环境容量和临界阈值、污染物质迁移、传播动力学、水土气生交互影响、污染的生物效应等方面有待于更深入和全面的研究,这对建立科学的城市土壤污染风险评估体系、控制城市土壤污染、实现城市土壤的良性管理都具有重要的意义。

关键词 城市土壤;土壤环境;土壤退化;土壤污染;重金属;有机污染物

中图分类号 X53; X131.3 **文献标识码** A

目前全球约有 45% 的人口生活在城市,在发达国家则高达 70% 以上^[1]。发展中国家的城市化趋势还在继续^[2],预计 10 年内世界城市人口将达到总人口的 1/2,现有城市规模也将继续扩大。目前我国的城市化率为 40%,到 2020 年,中国的城市化率将达到 60%,今后一段时间内年增速率超过一个百分点,且有加速的趋势。城市化对土壤的影响首先体现在污染物的大量产生和转移上。全球范围内只有不到 2% 的地表为城市所覆盖,但 80% 的工业和生活污染物来源于城市,这其中的很大一部分污染物都直接或间接地进入城市和周边地区的土壤生态系统中。在废物处理设施仍然不敷需要的绝大多数地区,城市及其周边土壤依然发挥着重要的容纳和净化污染物的功能,在强烈的环境负荷冲击下,土壤的服务功能面临极大的威胁,换言之,土壤的缓冲-净化功能将接近极限并有被超过的危险,因而将导致严重土壤污染的产生,而其结果将是长远和危险的。

从 20 世纪 90 年代到现在,全球范围内对于城市土壤的关注越来越多^[3]。城市化过程导致城市土壤的物理性状、化学性质、生物特征显著改变。到目前为止,虽然很少有关此类危害的发现和报道,但基于对元素、物质行为的认识,以及对城市下垫面物质运移交换过程的研究,城市土壤污染潜在的不良后果却被普遍认同:城市和城郊土壤既直接紧密地接触密集的城市人群,涉及众多生命的健康和安全,又通过食物链影响食品安全,还通过对水体、大气的影晌进而影响城市环境的质量^[4]。城市居民每天呼吸的空气和饮用水质量的好坏,都与城市土壤存在着密切的关系。城市土壤是城市生态系统的重要组成部分,是城市绿色植物的生长介质和养分的供应者,是土壤微生物的栖息地和能量的来源,是城市污染物的汇集地和净化器,对城市的可持续发展有着重要意义。目前,不同学科都注意到城市土壤环境问题^[3],这些研究从不同的方面获得了对城市土壤变化和环境问题的新认识。

* 国家自然科学基金重点项目(40235054)和中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-427)资助

[†] 通讯作者, E-mail: glzhang@issas.ac.cn

作者简介:张甘霖(1966~),男,博士,研究员,从事土壤地理和土壤与环境变化研究

收稿日期:2006-05-31;收到修改稿日期:2006-10-09

城市土壤环境问题是在城市环境中土壤变化的结果,由强烈人为活动影响导致的这种变化通常可以归结为城市环境中的土壤退化,包括物理退化和化学退化等主要途径。

1 城市土壤物理退化

城市土壤的物质组成受城市人为活动的深刻影响。在城市环境中,无所不在的大于 2 mm 的粗骨物质的存在是城市土壤的重要特点,而这些粗骨物质既有异地搬运侵入的自然岩石碎屑,更多的是人工物质如混凝土、砖块等^[5]。粗骨物质的存在影响土壤水分的运动,使其更多地以优势流 (preferential flow) 的方式进行,导致污染物的传输过程更容易实现,而土壤的过滤功能不能充分发挥,土壤污染对地下水质量的影响可能更直接。

城市土壤另一个与环境相关的物理问题是普遍存在的压实现象^[6]。压实主要体现在土壤容重增大、孔隙度减低和紧实度增加^[7],如南京市的土壤容重在 $1.14 \sim 1.70 \text{ g cm}^{-3}$ 之间,大部分土壤表层容重超过了植物生长所需要的理想值;Jim 对香港的行道树的土壤容重进行了测定,容重从 $1.14 \sim 2.63 \text{ g cm}^{-3}$,平均为 1.67 g cm^{-3} ,也说明压实严重^[5]。城市土壤压实的原因是多样的,一般地,路边行道树和绿化带的土壤大多是由于机械要求而进行有意识的压实,而在公园、道路边等公共绿地,土壤压实主要是人为践踏的影响所致。在土壤含水量较高的情况下,无论是机械还是人为践踏都会导致严重的压实现象。雨水打击也能形成压实和结皮,径流的选择性侵蚀过程(带走小颗粒留下粉粒和砂粒)能增加孔隙的密闭效应,增加土壤容重。建筑点由于建筑材料的堆放和重型机械等而被压实。建筑点的机械震动、车轮和践踏是引起压实的主要原因。在城市建设中有许多客土现象,如果外来紧实土壤没有经过疏松就使用,也将保留压实的后果^[8]。Jim 等研究香港行道树的客土平均总孔隙度为 36.6% (24.8% ~ 59.2%),可见,客土也可能存在压实严重的问题^[9]。

土壤压实是土壤物理退化的一种非常重要的形式。土壤被压实后,结构破坏,孔隙减少,容重增加,土壤透气性、水分渗透性及饱和导水率减小,土壤有效水含量减少,水分调节能力下降^[10];土壤强度相应增加,树木根系的穿透性阻力增大;压实也导致了土壤中矿物质与水的接触面积减小, O_2 和 CO_2 的扩

散变慢。由于这些因素的结合,土壤压实将对城市生态系统产生不良的影响:(1)减少地下水的自然回灌;(2)增加地表径流量,降雨的径流洪峰也将加快、加大;(3)增加地表河流的污染物负荷;(4)对城市气候参数的负面影响,如加剧热岛效应;(5)影响土壤中的温度、微生物活动和养分转化;(6)植物的生长受到严重影响,根系活力变弱,根系量少,树木的成活率降低,寿命缩短。这些环境因素对城市生态都将产生不良影响,降低人们的生活质量,也不利于城市的持续发展。

2 城市土壤化学退化

城市土壤在城市物质循环过程中扮演着终端接纳者的角色,因而是多种与人为活动相关的废物的汇,这些终端产物主要是人类生活的排泄物和生产的废弃物。迄今已有很多的研究表明,城市土壤中物质聚集主要包括以磷素富集为主的养分积累、以重金属和有机物污染为代表的污染物积累。

2.1 城市土壤磷素富集和富营养化

磷是生命元素,所有生命形式都需要磷素的维持。城市生态系统中磷素循环的基本格局是,农业生态系统中植物(作物)吸收土壤中的磷素,人类摄取植物体(或通过动物)所提供的磷素营养,经新陈代谢重新进入环境,主要是以有机肥施用的方式进入以蔬菜为主的生产环节。由于城市人口的高度密集,大量养分元素进入城市生态系统。集中于城市生态系统的物质有两个主要的出路,一是通过人工或自然输出过程,转移至城市之外,如废弃物的输出和污水的排放;二是滞留在城市土壤之中,因为土壤是很多循环过程的终端,至少是一个相对稳定具有较长周转周期的环节。在过去大规模使用磷肥的 50 年中,全球总共约 10 亿 t 的磷被开采使用,其中绝大部分(约 8 亿 t)进入农业土壤中,由于全球农业土地面积的巨大,加上通过收获方式的输出,农业土壤中磷含量的提高并不十分显著。据估算,有大约 2.5 亿 t 磷没有返回农业生态系统,这其中相当大的一部分进入城市生态系统中。人类消费——其中主要是城市人口消费(因为全球范围内 50% 以上的人口生活在城市)的磷有相当一部分仍然固定在城市生态系统——主要是城市土壤中^[11]。考虑到全球城市相对比例不足 2% 的陆地面积,在如此小的区域内磷的储存量是巨大的。

针对南京城市土壤的研究表明,全磷可以高达

15 g kg⁻¹,而 0.5 mol L⁻¹ NaHCO₃提取的磷可以高达 400 mg kg⁻¹,除少数新近被搬运至城市的异地土壤外,大部分城市土壤具有明显高于农业土壤的磷含量,并且在许多历史悠久的城市中,土壤磷素的富集随着城市的建立就已经开始^[12]。城市土壤磷素含量具有向外降低的空间梯度,表明随着城市化的进程,土壤磷素富集的区域将进一步在空间上扩散^[13]。土壤中高浓度的磷素对环境产生很大威胁,根据南京市城市土壤的研究表明,当磷素的含量超过某一警戒值的时候,磷素向环境的释放量会骤增^[14],对城市水体存在潜在的风险。

实际上,除了磷素以外,其他的养分元素如氮也在城市和城郊土壤中富集,如土壤中硝酸盐态氮经常性地在土壤中,虽然其驻留时间并不长,但由于存在大量的输入,所以这种积累总是能够维持,与此相伴的是土壤盐分浓度较高。总之,城市土壤处于一种养分积累状况比较明显的“富营养”状态。

2.2 城市土壤重金属污染

城市土壤中重金属含量主要受母质和外源输入两个因素控制。目前很多的研究结果表明,城市土壤中重金属含量一般比周围农业土壤和森林土壤要高,城市化过程加强了土壤重金属的外源输入速率^[15~19]。城市土壤的外源重金属主要来源于家庭活动、废弃物处理、交通运输、采矿和冶炼、制造业、发电厂、化石燃料燃烧等^[15,17]。其中,Pb主要来源于含铅汽油的燃烧排放如机动车尾气。机动车轮胎中含有添加剂 Zn,轮胎磨损产生的含 Zn 粉尘是城市土壤中 Zn 的主要来源^[20]。研究表明交通是城市土壤中 Cu、Zn、Pb 污染的主要来源^[21]。

对于香港和广州城市土壤的研究表明,交通和工业活动是造成城市土壤重金属含量普遍比近郊土壤高的主要因素^[22,23]。城市土壤 Hg 污染的主要来源是 Hg 工业生产过程中(如金属冶炼、水泥生产、玻璃、陶瓷等)失散的 Hg 蒸汽、燃料燃烧过程中排入大气的 Hg。

不同地区城市土壤中重金属的来源、含量也不同。卢瑛等发现南京城市土壤中 Fe、Ni、Co、V 元素主要来源于原土壤物质,Cu、Zn、Pb、Cr 元素主要来源于人为输入^[24]。在泰国曼谷和巴西 Uberlândia 等城市的研究表明,土壤中,Cr、Fe、Mn、Ni 来源于母质,而 Cd、Cu、Pb、Zn 来源于人为的输入^[25,26]。意大利巴勒莫市的绿地和公园土中 Pb、Zn、Cu 和 Hg 分别为背景值的 4.6 倍、1.1 倍、1.9 倍和 9.7 倍,数理统计分析表明 Pb、Zn、Cu、Sb 和 Hg 是外源污染带来

的,而 Mn、Ni、Co、Cr、V 和 Cd 是来自于母质^[16]。城市土壤重金属化学形态中非残余态的比例较高,表明它可能具有更高的生物危险性^[24]。大量的城市土壤研究表明,城市土壤重金属污染主要涉及 Cu、Zn、Pb 和 Hg,这几种元素是典型的“城市重金属”,而其他元素的富集并不明显。

各种功能区表层土壤重金属污染只是城市土壤污染的一个方面,这些重金属主要是现代交通和工业过程造成的,但过去很少注意到的是,城市在历史演化过程中也经常造成土壤的污染,这些污染一般出现在深部,成为古代城市发展过程中金属加工发展历史的一个重要记录^[27]。可以说,从历史上的有城市工业开始形成的时期,就已经存在城市土壤的污染,只是在近年来人们才开始认识到这个问题^[28]。实质上城市土壤在很大程度上是类似于污泥的“固体废弃物”,它既包含大量的磷素等植物营养成分,同时还含有比较高的重金属,特别是 Cu、Zn、Pb。在目前的城市建设中,经常大规模地置换城市土壤,而对这些土壤物质缺乏应有的环境风险评估,这是非常值得注意的问题,因为被置换的城市土壤很有可能成为其他地方(如郊区)的污染源。

2.3 城市土壤中的有机污染物

持久性或难降解有机污染物(POPs)和持久性或难降解有毒化合物(PTS)^[29]都属于挥发性和半挥发性有机污染物。它们通过挥发、淋溶和由浓度梯度产生的扩散等在城市土壤中迁移或逸入空气、水体中,对大气、水体、生态系统和人类的生命造成极大危害^[30]。土壤是 PAHs(多环芳烃)重要的汇,主要来源于废弃物的处理和大气中的沉降,此外还有防腐油的使用、燃料的溢出和工业废水等。人类活动是环境中 PAHs 的主要来源,包括化石和生物质燃料的燃烧和废物的处理(垃圾焚化等)^[26],近 100~150 年来,土壤 PAHs 的浓度在不断增加,尤其是城市地区^[31]。由于陆地中的 PAHs 主要通过废弃物处理和大气沉降两种方式输入,因此,土壤中的 PAHs 含量首先决定于废弃物和大气中的含量,其次因土壤性质影响进入土壤中的 PAHs 的行为和转化。PCBs(多氯联苯)是一类人工合成的化合物,是重要的工业原料,土壤是 PCBs 主要的汇,如英国土壤中 PCBs 占环境总量的 93.1%^[32]。

Krauss 等研究发现,城市土壤中的多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)、多氯联萘(PCNs)等持久性或难降解有机污染物在工业区和居住区花园绿地附近的含量较高,是农田土壤中含量的几倍,并呈现

从中心城区向郊区逐渐递减的趋势^[33]。对天津市区和郊区土壤中的10种PAHs研究发现,市区是土壤PAHs含量超标最严重的地区,其中二环萘(Nap)的超标程度最严重,强致癌物质苯并芘的超标的情况也不容乐观^[34]。有机污染物的产生及其在环境中的迁移过程将在很大程度上影响其浓度空间自相关性的方向和范围大小。

最近针对北京城市土壤的研究表明^[35],土壤中的PAHs含量在366~27 825 ng g⁻¹之间,芳烃环数在2~6之间。在全部PAHs中,2~4环的占主要部分,根据土壤中PAHs的分子结构特点,说明北京城市土壤的PAHs具有很强的燃烧来源背景。PAHs总量与土壤有机碳含量有显著的相关性,说明土壤有机碳是影响PAHs吸附的主要因素。

城市土壤也具有明显高的黑碳^[36],在不同的城市功能区中,以道路边土壤黑碳含量最高,并且其中黑碳与土壤有机碳的比例也比较高,其他城市区域如公园、学校等,黑碳的绝对含量和与其土壤有机碳的相对比例变化比较大,说明黑碳来源的多源性。

3 城市土壤污染物输入模式

参照景观要素的概念,依据污染源类型和污染物传播方式的不同,可将城市土壤污染物质的外源输入过程划分为三种模式:

斑块(点)污染(点状污染):如非烟气排放的废弃物处理、垃圾填埋、采矿、制造业等,形成一些有限范围的离散污染斑块。有烟气排放的工矿企业所造成的土壤重金属污染也可以归入此类,不同的是,该类污染源除了形成一个污染程度较高的斑块外,还对周边更大的范围有梯度递减的污染影响。在不同城市功能区内,由于污染源的密度和分布模式不同,造成了不同功能区土壤污染物含量的差异。南京城市工业区土壤中Cu、Zn、Pb、Cd的含量最高,其次为居民区和商业区^[37,38]。吴新民等发现南京城市不同功能区土壤重金属间依存关系各不相同,反映其重金属来源的途径存在差异。在矿冶区,土壤各元素间依存关系不明显,反映该区土壤重金属来源受所在地企业性质的影响而各不相同,在城市中心的居民区,土壤各元素间依存关系显著,反映该区土壤重金属来源途径相同,以生活废弃物为主要特征,其他各功能区土壤也都有其独特的重金属来源途径^[39]。张辉等研究了某铬厂厂区范围污染叠加量已达背景值含量的4.4倍,污染以车间烟囱为中心,

形成直径范围达1.5 km的污染斑块^[40]。

廊道污染(带状污染):如道路网沿线土壤接纳汽车尾气沉降而形成的污染廊道、排水道两侧的土壤富集工业和生活污水中的无机有机污染物而形成的污染廊道。公路两侧土壤中铅的含量与到公路边沿的距离符合高斯衰减分布模型,公路两侧土壤中铅的99%以上累积量分布在50 m的范围内^[41]。在乌鲁木齐市交通密集易形成堵车的路段,土壤中重金属富集的量较高,在交通顺畅或车流量少的路段,土壤中重金属含量相对较低^[42]。以公路交通为代表的廊道污染,随着垂直于公路的水平距离的增加,公路两侧的污染物含量总体趋势逐渐降低^[43]。意大利那不勒斯市的研究表明,城市土壤中Cu、Pb和Zn含量从1974年至1999年是明显增高的,特别是在工业区和道路两旁这种增高更明显^[44]。在北京市的研究也表明道路边土壤具有明显的PAHs污染,而汽车尾气可能是其主要的来源^[35]。上述污染类型主要与“廊道”结构的污染源有关,在空间中表现出明显的带状模式,并随垂直于廊道的距离呈现不同规律的渐减分布特征。

基质污染(面源污染):由于地面扬尘、工业排烟、汽车尾气以及其他各种化石燃料燃烧等在城市区域形成弥散的污染性气团,其中污染物质沉降于城市和周边土壤中,形成基质污染类型。基质污染程度往往随城区距离增大而减少。沿纽约市140 km长的“城区-郊区-农区”森林生态样带,土壤中Cu、Ni、Pb的含量随着该区与市中心距离的增加而降低,且城区土壤中的Cu、Ni、Pb含量分别是农区土壤中含量的4倍、2倍、2倍^[45]。香港与广州城市土壤中的重金属含量分布也表现出类似的特征,即城区土壤所有的重金属平均含量最高,而城郊的农业土壤(果园、菜园、作物土壤)和公园土壤居中,林地土壤含量则最低^[18,23]。城市表层土壤中Cu、Zn、Pb、Mn等重金属的含量与它们在大气降尘中多年含量均值具有一定的相关性^[34]。

虽然从空间结构类型上,城市和工业区土壤的污染可以划分成不同的类型,但在现实的环境中各种模式经常交叉出现,这将使污染来源的辨识更加困难。

4 城市土壤污染的危害和风险

尽管人们已经熟知重金属和有机污染物对生态环境、人体健康的危害,但是在城市环境条件下,城

市土壤中污染物的风险评估、污染物迁移动力学、土壤中的污染物进入人体的转移途径和输入强度都有待于深入研究。城市土壤在城市环境保护中实际上扮演了一个生态屏障的作用^[46],但反过来,退化了的的城市土壤也可能对水、气和生物构成一定的危害。

污染物含量的高低过去一直都被看作是土壤污染程度的一个重要指标。当化学相的概念被引入到环境科学领域后,人们才逐渐地认识到污染物在环境中的行为和作用,如活动性、生物可利用性、毒性等,因此仅仅用总量来预测和解释是不确切的^[47]。重金属元素因其在土壤中的结合形态不同,其环境效应、生物效应也不尽相同,对重金属形态的区分能够了解其来源、评价重金属的移动性和生物有效性^[48]。单一提取法和多级连续提取法被广泛地应用于城市土壤重金属有效性研究^[49,50]。由于重金属有效性受到多因素的影响,如全量高低、有机质含量、pH值等,不同区域、不同元素的有效性差别很大^[15,17,24]。城市土壤往往趋于碱化,水溶和交换态重金属元素含量低,土壤重金属向地下水的淋溶程度比酸性土壤弱。同时,有机结合态所占的比例一般比较高,生物有效性较同地区农村土壤要高^[22,25,51]。

对于生态环境的其他三个要素水、气、生物,城市土壤的污染影响了其生态功能的发挥和生物的健康^[11]。

4.1 土壤污染的水环境效应

在城市区域,土壤既发挥着水体净化器的功能,过滤吸纳降雨和径流中的污染物质,同时,由于在长期的城市化过程中积聚了大量的污染物质,对水体也构成了污染威胁。因此,开展城市土壤的环境容量研究,对于城市土壤污染风险的科学评估是很有必要的。对南京城市土壤磷吸附-解吸实验发现,淋洗条件下,Olsen-P 高于 25 mg kg^{-1} 时,土壤释放磷速率迅速提高^[14,52]。而南京城市土壤 Olsen-P 平均含量约 64 mg kg^{-1} ,这对地表水和地下水的富营养化是一个威胁^[53]。在南京市初步研究表明,城市区域地下水中氮、磷和重金属都不同程度的超标。城市区域内普遍的土壤压实,这致使土壤的孔隙度降低,含水量减少,土壤水库的库容严重萎缩,土壤水分入渗和短期储蓄缓冲功能减弱或消失,增加了城市洪涝灾害的几率^[10]。同时水分入渗量的减少降低了土壤的净化能力,增强了污染物表聚现象,径流携带的污染物负荷(包括颗粒物、铵氮、有机污染物、重金属等)增加,导致地表水污染加剧。

4.2 土壤污染对城市空气的影响

通过核探针研究大气颗粒物的指纹特征,表明上海市大气颗粒物中大约有 31% 来自土壤扬尘^[54]。由于城内土壤扬尘污染物携带量高,传播高度低,对人体健康危害尤甚。我国城市建设日新月异,可以预计土壤扬尘仍将继续成为我国城市大气污染的主要来源。目前对于土壤起尘条件、传播及控制手段研究很少,随着城市化的加快导致大量人口的集中居住,污染物以土壤颗粒直接进入人体的污染风险评价越来越受到重视。有机污染物和重金属 Hg 的直接挥发也是城市土壤影响空气质量的一个重要方面。

4.3 土壤污染的生物效应

城市土壤污染的生物效应,主要体现在对人体健康的影响方面。目前还没有发现城区土壤污染对园林绿化植物的影响结果报道。Kennette 等研究了加拿大蒙特利尔市严重污染的城市土壤中蚯蚓对重金属元素 Cu、Pb 和 Zn 的积累试验,认为蚯蚓的体内组织能大量吸收重金属,城市区域的蚯蚓的数量与重金属污染程度关系不明显^[55]。城市土壤遭受污染后,可导致土壤微生物特性的显著变化。在英国 Aberdeen 的一项研究表明,与农业土壤相比,城市土壤的微生物的基底呼吸作用明显增强,但微生物生物量却显著降低,微生物的一些生理生态参数值明显升高,对能源碳的消耗量和速度也明显提高^[56]。通过主成分分析显示,土壤中有效态铅是控制城市与农业土壤微生物特征差异的主要因素,其次为有效态和有机态的 Zn、Cu 和 Ni。针对南京市不同功能区土壤的对比研究表明,微生物量以公共绿地、风景区较高,以新开发区和交通商业区为最低。主成分分析表明,脲酶活性、微生物量碳、过氧化氢酶活性对公因子的贡献最大。与自然土壤相比,南京城市土壤碳氮比、 C_{mic}/C_{org} 变化范围均增大,表明土壤微生物区系受到人为活动较大的干扰^[57]。

城市土壤污染对人体产生危害主要有两条途径:(1)城郊土壤-蔬菜系统中污染物的积累与食物链传递;(2)人体对土壤或尘土的直接吸入。国内外许多研究认为城市(郊)蔬菜是城市居民污染暴露的主要途径之一^[58]。通过对居民一个阶段的蔬菜摄入量调查和蔬菜中污染物含量分析,可以建立运移模型来预测区域人群对主要污染物的摄入量。系统研究土壤污染通过食物链对人体健康风险的评价体系,对我国污染土壤管理和农产品安全生产具有重要的理论价值和实际指导意义。由于实验条件和技

术手段的限制,人体对尘土直接吸入而产生污染危害的研究报道还很少,但儿童血液中 Pb 含量等间接结果表明,污染的城市土壤扬尘是影响人体健康的重要因素^[59,60]。特别是在污染的土壤中,不同颗粒级别富集程度存在差别,例如研究发现在 Pb 细颗粒中相对富集,这可能是导致儿童通过呼吸吸收 Pb 从而导致血液 Pb 含量升高的重要原因,因为细颗粒土壤更容易成为扬尘被呼吸摄入^[62]。为了评价城市土壤污染的生物有效性,近年来国外开始研究模拟人体和动物胃液(生理溶液)作为浸提剂来评价污染物的生物有效性,可以较好地反映动物的实际吸收率,用生理溶液作为特定的浸提剂可以有效地评价土壤污染物的健康风险^[63,64]。要真正评估土壤污染的健康风险,关于土壤扬尘条件、扬尘密度、范围、人体摄入量的研究也是必须的,但目前还没有此类研究的报道。

5 小 结

城市土壤是城市生态环境的重要屏障,因而也是最先并最持久地接受污染物的场所。城市土壤通过自身的“牺牲”——特别是其环境质量的降低——来实现对城市环境和城市人群的保护。对于城市土壤的污染控制,目前还有很多知识空白,主流的研究还停留在对于城市土壤污染的认识和调查。大量的研究表明城市区域内存在明显的土壤污染,但是这种污染对生态环境和生物健康的影响途径、作用机理和危害程度仍然缺乏深入的认识。因此,迫切需要对城市土壤污染的环境容量和临界阈值,污染物质迁移、传播动力学,水土气生交互影响,污染的生物效应等方面进行更深入和全面的研究,这对建立科学的污染风险评估体系是非常重要的,土壤污染的控制和城市土壤的良性管理也有赖于此。

参 考 文 献

- [1] World Resources Institute. Cities and the Environment. New York: World Resources 1996 ~ 1997, Oxford University Press, 1996. 1 ~ 30
- [2] UNPD (United Nations Population Division). World Urbanization Prospects: The 1994 Revision. New York: United Nations, 1995. 132 ~ 139
- [3] De Kinpe C R, Morel J L. Urban soil management: A growing concern. *Soil Science*, 2000, 165: 31 ~ 40
- [4] CIDA (Canada International Development Agency). An Urbanized World, Statement on Sustainable Cities. Ministry of Public Works and Government Services, Canada, 1998
- [5] Jim C Y. Soil compaction at tree-planting sites in urban Hong Kong. In: Neely D, Watson G W. eds. *The Landscape Below Ground II: International Society of Arboriculture*, Champaign, Illinois, 1998. 166 ~ 178
- [6] 杨金玲,汪景宽,张甘霖. 城市土壤的压实退化及其环境效应. *土壤通报*, 2004, 35 (6): 688 ~ 694. Yang J L, Wang J K, Zhang G L. The compaction degradation in urban soil and its environmental impacts (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35 (6): 688 ~ 694
- [7] 杨金玲,张甘霖,赵玉国,等. 土壤压实指标在城市土壤中的应用与比较. *农业工程学报*, 2005, 21 (5): 51 ~ 55. Yang J L, Zhang G L, Zhao Y G, et al. Application and comparison of soil compaction indexes in the evaluation of urban soils (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21 (5): 51 ~ 55
- [8] Jim C Y. Soil compaction as a constraint to tree growth in tropical & subtropical urban habitats. *Environmental Conservation*, 1993, 20 (1): 35 ~ 49
- [9] Jim C Y, Judith Y Y NG. Soil porosity and associated properties at roadside tree pits in urban Hong Kong. In: Burghardt W, Dornauf C. eds. *First International Conference on Soils of Urban, Industrial, Traffic and Mining Areas*. Essen, Germany: University of Essen, Germany, 2000. 51 ~ 56
- [10] 杨金玲,张甘霖,赵玉国,等. 城市土壤压实对土壤水分特征的影响——以南京市为例. *土壤学报*, 2006, 43 (1): 33 ~ 38. Yang J L, Zhang G L, Zhao Y G, et al. Effect of compaction on soil water characteristics—A case study of Nanjing (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (1): 33 ~ 38
- [11] 张甘霖. 城市土壤的生态服务功能演变与城市生态环境保护. *科技导报*, 2005, 25 (3): 16 ~ 19. Zhang G L. Ecological services of urban soils in relation to urban ecosystem and environmental quality (In Chinese). *Science & Technology Review*, 2005, 25 (3): 16 ~ 19
- [12] Zhang G L, Burghardt W, Lu Y, et al. Phosphorus-enriched soils of urban and suburban Nanjing and their effect on groundwater phosphorus. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2001, 164: 295 ~ 301
- [13] Zhang M K. Phosphorus accumulation in soils along an urban-rural land use gradient in Hangzhou, southeast China. *Communication in Soil and Plant Analysis*, 2004, 35 (5/6): 819 ~ 833
- [14] Zhang G L, Burghardt W, Yang J L. Chemical criteria to assess risk of phosphorus leaching from urban soils. *Pedosphere*, 2005, 15 (1): 72 ~ 77
- [15] Stroganova M, Myagkova A, Prokofieva T, et al. Soil of Moscow and urban environment. Moscow: Russian Federation Press, 1998. 1 ~ 171
- [16] Manta D S, Angelone M, Bellanca A, et al. Heavy metals in urban soils: A case study from the city of Palermo (Sicily), Italy. *Science of the Total Environment*, 2002, 300 (1/3): 229 ~ 243
- [17] Tiller K G. Urban soil contamination in Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 1992, 30 (6): 937 ~ 957
- [18] 陈同斌,黄铭洪,黄焕忠,等. 香港土壤中的重金属含量及其污染现状. *地理学报*, 1997, 52 (3): 228 ~ 236. Chen T B, Huang M

- H, Huang H Z, *et al.* A study on heavy metal pollution in soils in Hong Kong (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(3): 228 ~ 236
- [19] Lu Y, Gong Z T, Zhang G L, *et al.* Concentrations and chemical speciations of Cu, Zn, Pb and Cr of urban soils in Nanjing, China. *Geoderma*, 2003, 115(1/2): 101 ~ 111
- [20] 刘廷良,高松武次郎,左濂裕之.日本城市土壤的重金属污染.环境科学学报,1996,9(2):47~51. Liu T L, Takamatsu T, Sase H. Study on soil pollution with heavy metals in some Japanese cities (In Chinese). *Research of Environmental Sciences*, 1996, 9(2): 47 ~ 51
- [21] Sanka M, Strnad M, Vondra J, *et al.* Sources of soil and plant contamination in an urban environment and possible assessment methods. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1995, 59: 327 ~ 343
- [22] Li X D, Poon C N, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(11/12): 1361 ~ 1368
- [23] 管东生,陈玉娟,阮国标.广州城市及近郊土壤重金属含量特征及人类活动的影响.中山大学学报(自然科学版),2001,40(4):93~96. Guan D S, Chen Y J, Yuan G B. Study on heavy metal concentrations and the impact of human activity on them in urban and suburb soils of Guangzhou (In Chinese). *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2001, 40(4): 93 ~ 96
- [24] 卢瑛,龚子同,张甘霖.南京城市土壤中重金属的化学形态分布.环境化学,2003,22(2):131~136. Lu Y, Gong Z T, Zhang G L. The chemical speciation of heavy metals of urban soil in Nanjing (In Chinese). *Environmental Chemistry*, 2003, 22(2): 131 ~ 136
- [25] Wilcke W, Muller S, Kanchanakool N, *et al.* Urban soil contamination in Bangkok: Heavy metal and aluminium partitioning in topsoils. *Geoderma*, 1998, 86(3/4): 211 ~ 228
- [26] Wilcke W, Lillierfein J, Lima S D C, *et al.* Contamination of highly weathered urban soils in Uberlândia, Brazil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1999, 162(5): 539 ~ 548
- [27] Zhang G L, Yang F G, Zhao Y G, *et al.* Historical change of heavy metals in urban soils of Nanjing, China during the past 20 centuries. *Environmental International*, 2005, 31(6): 913 ~ 919
- [28] 杨凤根,张甘霖,龚子同,等.南京市历史文化层中土壤重金属元素的分布规律初探.第四纪研究,2004,24(2):203~212. Yang F G, Zhang G L, Gong Z T, *et al.* Distribution of heavy metals in cultural layers of urban soils in Nanjing (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2004, 24(2): 203 ~ 212
- [29] 汤鸿霄.环境纳米污染物与微界面水质过程.环境科学学报,2003,23(2):146~155. Tang H X. Environmental Nano-Pollutants (ENP) and their micro-interfacial processes on the aquatic particles (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(2): 146 ~ 155
- [30] 薛强,梁冰,刘晓丽.有机污染物在土壤中迁移转化的研究进展.土壤与环境,2002,11(1):90~93. Xue Q, Liang B, Liu X L. Progress on organic contaminant transport and transform in soil (In Chinese). *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(1): 90 ~ 93
- [31] 丁克强,骆永明.多环芳烃污染土壤的生物修复.土壤,2001,4:169~178. Ding K Q, Luo Y M. The bio-rehabilitation of soils polluted with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) (In Chinese). *Soils*, 2001, 4: 169 ~ 178
- [32] Harrad S J, Sewart A P, Alcock R, *et al.* Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the British environment: Sinks, sources and temporal trends. *Environmental Pollution*, 1994, 85: 131 ~ 146
- [33] Krauss M, Wilcke W. Polychlorinated naphthalenes in urban soils: Analysis, concentrations, and relation to other persistent organic pollutants. *Environmental Pollution*, 2003, 122: 75 ~ 89
- [34] Tyutyunik Y G. Dependence of the content of heavy metals in urban soils on atmospheric pollution. *Eurasian Soil Science*, 1993, 25(4): 18 ~ 21
- [35] Tang L L, Tang X Y, Zhu Y G, *et al.* Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils in Beijing, China. *Environment International*, 2005, 31: 822 ~ 828
- [36] 何跃,张甘霖.城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析.土壤学报,2006,43(2):177~182. He Y, Zhang G L. Concentration and sources of organic carbon and black carbon of urban soils in Nanjing (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2): 177 ~ 182
- [37] 张孝飞,林玉锁,俞飞,等.城市典型工业区土壤重金属污染状况研究.长江流域资源与环境,2005,14(4):512~515. Zhang X F, Lin Y S, Yu F, *et al.* Pollution of heavy metals in urban soils of typical industrial and surrounding residential area in Nanjing City (In Chinese). *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(4): 512 ~ 515
- [38] 卢瑛,龚子同,张甘霖,等.南京城市土壤重金属含量及其影响因素.应用生态学报,2004,15(1):123~126. Lu Y, Gong Z T, Zhang G L, *et al.* Heavy metal concentration in Nanjing urban soils and their affecting factors (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 123 ~ 126
- [39] 吴新民,潘根兴.城市不同功能区土壤重金属分布初探.土壤学报,2005,42(3):513~517. Wu X M, Pan G X. Distribution of heavy metals in urban soil different in functional zone (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 513 ~ 517
- [40] 张辉,马东升.南京某合金厂土壤铬污染研究.中国环境科学,1997,17(1):80~83. Zhang H, Ma D S. Chromium contamination in the soil from an alloy steel factory in Nanjing (In Chinese). *China Environmental Science*, 1997, 17(1): 80 ~ 83
- [41] 王斌,丁桑岚.公路两侧土壤中铅的分布规律研究.重庆环境科学,1998,20(4):53~55. Wang B, Ding S L. A study on the lead distribution in soil along the highway (In Chinese). *Chongqing Environmental Science*, 1998, 20(4): 53 ~ 55
- [42] 菲尔汗·汉杰尔,潘丽英,陈勇,等.汽车废气中的铅对城市土壤污染状况调查.干旱环境监测,2002,16(3):154~155. Hanjier F, Pan L Y, Chen Y, *et al.* Impact of Pb in automobile tail gas on soil pollution (In Chinese). *Arid Environmental Monitoring*, 2002, 16(3): 154 ~ 155
- [43] 王金达,刘景双,于君宝,等.沈阳市城区土壤和灰尘中铅的分布特征.中国环境科学,2003,23(3):300~304. Wang J D, Liu J S, Yu J B, *et al.* The distribution character of lead in soil and dust in urban region of Shenyang City (In Chinese). *China Environmental*

- Science, 2003, 23(3): 300 ~ 304
- [44] Imperato M, Adamo P, Naimo D, *et al.* Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy). *Environmental Pollution*, 2003, 124(2): 247 ~ 256
- [45] Pouyat R V, McDonnell M J. Heavy metal accumulations in forest soils along an urban-rural gradient in Southeastern New York, USA. *Water, Air & Soil Pollution*, 1991, (57/58): 797 ~ 807
- [46] 张甘霖, 吴运金, 龚子同. 城市土壤—城市环境保护的生态屏障. *自然杂志*, 2006, 28(4): 205 ~ 209. Zhang GL, Wu YJ, Gong Z T. Urban soils: An ecological protector of urban environment (In Chinese). *Chinese Journal of Nature*, 2006, 28(4): 205 ~ 209
- [47] 党志, 刘丛强, 尚爱安. 矿区土壤中重金属活动性评估方法的研究进展. *地球科学进展*, 2001, 16(1): 86 ~ 91. Dang Z, Liu C Q, Shang A A. Review of the mobility and bioavailability of heavy metals in the soil contaminated by mining (In Chinese). *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(1): 86 ~ 91
- [48] Tack F M G, Verloo M G. Chemical speciation and fractionation in soil and sediment metal analysis: A review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1995, 59(2/4): 225 ~ 238
- [49] Tessier A, Campbell P G, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844 ~ 851
- [50] Querauville P H, Rauret G, Griepik B. Conclusions of the workshop: Single and sequential extraction in sediments and soils. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1993, 51: 231 ~ 235
- [51] Hiller D A. Characteristics of the acid buffer capacity and heavy metal behavior in Urban Anthrosols of Ruhr area. In: *Proceedings 16th World Congress of Soil Science, Montpellier, France, 20 ~ 26 August 1998, Symposium 28*
- [52] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤磷的形态和吸附-解吸特征. *土壤通报*, 2003, 34(1): 40 ~ 43. Lu Y, Gong Z T, Zhang GL. Phosphorus forms and adsorption-desorption characteristics of urban soils in Nanjing (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(1): 40 ~ 43
- [53] 张甘霖, 卢瑛, 龚子同, 等. 南京城市土壤某些元素的富集特征及其对浅层地下水的影 响. *第四纪研究*, 2003, 23(4): 446 ~ 455. Zhang GL, Lu Y, Gong Z T, *et al.* Enrichment of some elements in urban soils of Nanjing and its impact on groundwater (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2003, 23(4): 446 ~ 455
- [54] 仇志军, 姜达, 陆荣荣, 等. 基于核探针研究的大气气溶胶单颗粒指纹数据库的研制. *环境科学学报*, 2001, 21(6): 660 ~ 663. Qiu Z J, Jiang D, Lu R R, *et al.* The development of single aerosol particle fingerprint database based on nuclear microprobe (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(6): 660 ~ 663
- [55] Kennette D, Hendershot W, Tomlin A, *et al.* Uptake of trace metals by the earthworm *Lumbricus terrestris* L. in urban contaminated soils. *Applied Soil Ecology*, 2002, 19(2): 191 ~ 198
- [56] 杨元根, Paterson E, Campbell C. 城市土壤中重金属元素的积累及其微生物效应. *环境科学*, 2001, 22(3): 44 ~ 48. Yang Y G, Paterson E, Campbell C. Accumulation of heavy metals in urban soils and impacts on microorganisms (In Chinese). *Environmental Science*, 2001, 22(3): 44 ~ 48
- [57] 王焕华, 李恋卿, 潘根兴, 等. 南京市不同功能城区表土微生物碳氮与酶活性分析. *生态学杂志*, 2005, 24(3): 273 ~ 277. Wang H H, Li L Q, Pan G X, *et al.* Topsoil microbial carbon and nitrogen activity of different city zones in Nanjing (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(3): 273 ~ 277
- [58] 张甘霖, 朱永官, 傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应. *生态学报*, 2003, 23(3): 539 ~ 546. Zhang GL, Zhu Y G, Fu B J. Quality changes of soils in urban and suburban areas and its eco-environmental impacts—A review (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 539 ~ 546
- [59] Calabrese EJ, Stanek EJ, James R C, *et al.* Soil ingestion: A concern for acute toxicity in children. *Environ. Health Perspect*, 1997, 105: 1354 ~ 1358
- [60] 蒋海燕, 刘敏, 黄沈发, 等. 城市土壤污染研究现状与趋势. *安全与环境学报*, 2004, 14(5): 73 ~ 77. Jiang H Y, Liu M, Huang S F, *et al.* Status quo and trend of urban soil contamination research (In Chinese). *Journal of Safety and Environment*, 2004, 14(5): 73 ~ 77
- [61] Ruby M V, Davis A, Schoof R, *et al.* Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(2): 422 ~ 430
- [62] Wang H H, Li L Q, Wu X M, *et al.* Distribution of Cu and Pb in particle size fractions of urban soils from different city zones of Nanjing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(3): 482 ~ 487
- [63] Oomen A G, Töls J, Sips A J A M, *et al.* Lead speciation in artificial human digestive fluid. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, 44(1): 107 ~ 115
- [64] Yamada A, Ono Y, Kida A, *et al.* Evaluation of bioavailability of heavy metals in soil by in vitro screening test. *Chemistry Letters*, 2003, 32(5): 472 ~ 473

URBAN SOIL ENVIRONMENT ISSUES AND RESEARCH PROGRESSES

Zhang Ganlin[†] Zhao Yuguo Yang Jinling Zhao Wenjun Gong Zitong

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Urban soils act functionally as an ecological screen in protecting urban environment. Their degradation, however, is in essence a process of providing ecological services, such as sink of all kinds of pollutants, at the cost of their own quali-

ty. Therefore, as a result, they often come across a variety of environmental problems. Besides physical degradation, such as compaction, enrichment of various elements associated with human activities, heavy metals, and organic pollution are the major problems with urban soil environment. The main features of urban soil contamination are characterized firstly by strong accumulation of so-called 'urban elements' such as Cu, Zn, Pb and Hg, but less of other heavy metals; and secondly by spatial isolation, which means the contamination is not spatially continuous. During the process of urban development, heavy metal contamination of urban soils happens not only nowadays, but also did in the past, especially when primitive mining and metal processing prevailed. Furthermore, urban soils are often polluted by organic pollutants, especially polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), with roadsides and industrial sites being the major vulnerable areas. PAHs therein have normally 2 ~ 6 rings and predominantly 2 ~ 4 rings, strongly suggesting their pyrogenic background, including motor vehicles, industrial activities and coal burning.

So far, studies on urban soil contamination and other related environmental problems have concentrated mainly on three aspects, firstly source, status and diffusion patterns of urban soil contamination; secondly impact and risk assessment of soil contamination on environment, ecology and biological health; thirdly better use and management of urban soils. More researches are expected in the coming near future on environmental capacity of urban soils, threshold values and dynamics of translocation of these contaminants, interactions between soil, water and organisms, and biological effects of pollution. These studies are important to the establishment of a science-based risk assessment system for urban soil environment, soil pollution control and better management of urban soils and environment.

Key words Urban soils; Soil environment; Soil degradation; Soil contamination; Heavy metals; Organic pollutants