

城市土壤的生态服务功能演变与城市生态环境保护

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

〔摘要〕 城市化是急剧的土地利用变化过程。在城市化过程中,土壤的服务功能经历明显的转变,即从维系植物生长的功能为主转变为滞留、转化和净化污染的功能为主,因此,城市土壤在城市生态系统中承担着重要的生态服务功能并起着保护城市环境的作用。城市土壤在功能转变的过程中,土壤质量也发生重要的转变,这些变化包括物理的、化学的和生物学的等方面。巨大的人为影响致使城市土壤的退化比较明显。物理退化方面主要体现在由于压实导致容重增加、水分入渗速率降低,从而使降雨时地表径流系数增加、非点源污染负荷升高,对城市水体污染产生明显的影响;化学退化方面主要体现在土壤中的有机和无机污染物含量显著增加,这一方面使土壤对生物健康直接影响的可能性增加,另一方面使土壤的吸附容量接近饱和而导致污染物的移动性提高,从而具有较高的释放潜力。城市生态系统中物质循环过程不闭合的特点,决定了城市土壤是养分和污染物末端固定者,因而城市土壤是一个人为的某些元素的地球化学“垒”(barrier)。建设健康的城市生态环境需要闭合开放状态的物质循环链条,这必然需要科学的城市土壤管理策略。

〔关键词〕 城市土壤 城市生态 城市环境 生态服务 土壤退化

〔中图分类号〕 X826 X53

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2005)03-0016-04

ECOLOGICAL SERVICES OF URBAN SOILS IN RELATION TO URBAN ECOSYSTEM AND ENVIRONMENTAL QUALITY

ZHANG Gan-lin

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

Abstract: Urbanization represents a dramatic change of land use or land cover. The service and function of soils undergo a fast change during urbanization, i.e., from that of sustaining plant growth to that of buffering, transforming and purifying pollutants. Urban soils thus are playing an important role in making a complete urban ecosystem and in protecting urban environment. Quality of urban soil changes with the transformation of soil functions, which include physical, chemical and biological aspects. Urban soils often get degraded due to the impact of heavy human activities. Physically speaking, soil degradation occurs mainly when soils are artificially compacted, which increases soil bulk density and lowers water infiltration rate, thus an increased surface runoff coefficient and a higher load of non-point source pollution to urban water system. Chemically, urban soils are often contaminated by organic and inorganic pollutants, which increase the accessibility of toxic substances to biological (including human) health and, meanwhile saturate the carrying capacity of soils and increase the mobility thus release risk of pollutants contained in soils. The loop of element translocation in urban ecosystem causes inevitably accumulation of nutrients and pollutants in urban soils, therefore urban soils are becoming a geochemical barrier of various elements. It is called to close the loop by a better management of urban soils in order to facilitate a healthy urban ecosystem.

Key Words: urban soils, urban ecology, urban environment, ecological service, soil function, soil degradation

CLC Numbers: X826 X53

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)03-0016-04

1 前言

城市是地球表层物质、能量和信息高度集中的场所,是人类大量集中居住和活动的主要地域空间。城市化是人类社会发展的必然趋势,也是一个国家走向现代化的必经阶

段。目前世界上半以上的人口生活在城市,中国的城市人口比例也已经超过了40%,但是全球城市面积占陆地面积不到2%。由于局部区域内人口的高度集中和相应的各种现代人类活动的巨大影响,城市在创造财富的同时带来了种

收稿日期:2005-01-11

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40235054)、中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-427)、江苏省基金项目(BK2004167)

作者简介:张甘霖,男,1966~;中国科学院南京土壤研究所研究员,中国科学院研究生院教授,主要从事土壤发生、土壤系统分类、土壤地球化学、城市土壤与环境的研究;E-mail: glzhang@issas.ac.cn

种生态环境问题。城市是一个特殊的生态系统,它具有生态系统的一般特征,即由物质循环和能量传递为核心构成的系统发生和发展过程。但是在城市生态系统中,人类的生产和生活活动起着至关重要的作用,所以城市生态系统是以人类为中心的自然和社会相结合的生态系统。迄今为止,在城市中的土壤很少被关注,但城市土壤却是城市生态系统的-一个重要组成部分,城市土壤退化也是城市生态环境问题中的一个关键环节。城市和城郊土壤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。它既通过食物链影响食品安全,还通过对水体、大气的影响进而影响城市环境的质量。城市居民每天呼吸的空气和饮用水的好坏,都与城市土壤存在着密切的关系。建设生态城市需要了解城市土壤的演变和质量特征,城市的可持续发展也需要良好的城市土壤管理。

2 城市土壤的生态服务功能

城市土壤是城市生态系统的重要组成部分。土壤具有多重功能,概括起来包括如下 6 个方面:(1)农业和林业生产的基础;(2)过滤、缓冲和转化能力;(3)生物基因库和繁殖场所;(4)原材料来源;(5)容纳基础设施建设;(6)构成景观并保存自然和文化遗产^[1]。城市土壤并不是一个分类学上的术语,它是出现在城市和城郊地区、受多种方式人为活动的强烈影响、原有继承特性得到强烈改变的土壤的总称。这些被人为活动改变的土壤广泛分布在公园、道路、体育场、城市河道、城郊、垃圾填埋场、废弃工厂、矿山周围,或者简单地成为建筑、街道、铁路等城市和工业设施的“基础”而处于埋藏状态。

在城市生态系统中,土壤的功能首先是维持绿色植物生长。绿地是城市生态系统的重要部分,对城市生态、自然环境和人群心理都起着重要的调节作用,而土壤是城市绿色植物的生长介质和养分的供应者。绿地土壤的质量是决定绿地建设成败的关键因子^[2]。实际上,在城市生态环境中,土壤的生产功能是次要的,而过滤、缓冲和转化能力成为关键。城市土壤吸附、滞留大量的污染物,在化学饱和之前对污染物起着净化的作用,因而城市土壤是城市污染物的汇集地和净化器。很多研究表明,城市土壤是很多元素的终端储存库。有限的城市土壤还是生态系统中分解者的最终场所,是土壤微生物的栖息地和能量的来源。总之,城市土壤通过其支持的绿色植物、微生物和自身的功能,来净化城市生态环境,对城市的可持续发展有着重要意义。

在城市发展演变的过程中,城市土壤功能的演变是伴随城市化进程出现的,这种关系可以用图 1 来说明。城市化进程中最显著的变化是城市和其辐射区域内土地利用结构的变化。很多研究定量地揭示了城市化过程中各种土地利用类型的剧烈转变过程和驱动因素,这种变化对土壤的影响主要体现在土壤功能的转变和多样化。城市化的另一个更为直接的影响是地表特征的改变,从可渗透的土壤表面到没有渗透和吸收功能的人工封闭地表,这意味着土壤的生产功能、缓冲-净化功能、景观功能等自然功能绝大部分甚至完全丧失,在城市环境中土壤最重要的水、热交换和污染物质吸收、净化作用将不再发挥。城市化的影响更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,因此城市土壤承担着容纳和净化污染物的服务功能。但在强烈的环境负荷冲击下,土壤的环境功能将面临极大的威胁,换言之,土壤的缓冲-净化环境容量已经或者将要面临被超越的危险,其结果将是长远和致命的。作为生态系统的核心组成部分,土壤的质量改变反过来又会作用于其它生态环境组分。

3 城市土壤的退化及其生态环境效应

城市土壤在服务于良好生态环境的同时,自身的质量会产生急剧的变化,甚至是严重的退化。城市土壤的退化主要表现为物理退化和化学退化两个方面。退化的城市土壤反作用于生态环境,如土壤物理压实导致的水分入渗速率下降,从而导致地表径流量增加、面源污染负荷增加,对城市水体产生明显的污染。污染加剧的城市土壤既能通过人体直接吸入的方式威胁城市人群健康,也能通过食物链对人和其它生物造成危害。环境容量饱和的土壤还存在着对水体和大气环境的威胁,这种威胁在人为扰动和人为搬运的影响下将更为突出。迄今为止,还没有对城市土壤质量及其对环境因子影响的危险性的系统评估。

3.1 城市土壤的物理退化及其影响

土壤压实是城市土壤物理退化的主要形式。土壤压实的直接后果是土壤容重增大、孔隙度减小。正常土壤的容重约为 1.30 g cm^{-3} 左右,但是大部分城市土壤的容重都高于此值。尤其是在道路附近、公园和运动场等处,土壤容重很高。如美国华盛顿中心开放公园中 30cm 表土的容重为 $1.4\sim 2.3\text{ g cm}^{-3}$,在纽约中心公园的土壤心土层容重为 $1.52\sim 1.96\text{ g cm}^{-3}$,其平均值超过 1.6 g cm^{-3} ^[3]。香港行道树土壤容重的变异范围很广,

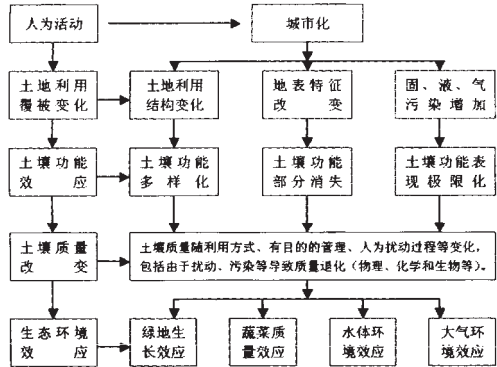


图 1 城市化过程中的土壤功能演变及其生态环境效应

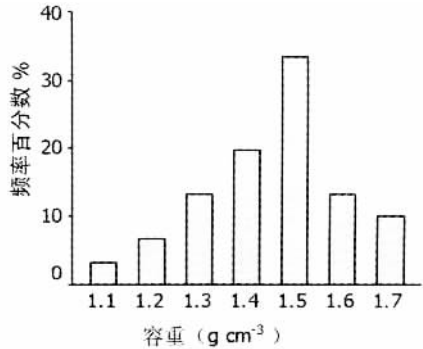


图 2 南京城市土壤的容重频率分布

达 $1.14\sim 2.63\text{ g cm}^{-3}$, 平均为 1.67 g cm^{-3} [4], 最高容重达到 2.63 g cm^{-3} , 这说明压实非常严重。南京市的研究同样表明, 80%以上的城市土壤容重在 1.40 g cm^{-3} 以上(图2)。

城市土壤的渗透性显著地低于自然土壤。城市土壤的压实严重影响了土壤的正常孔隙分配, 即总孔隙度降低、大小孔隙比例失调、大孔隙的比例大大下降。由于城市土壤通气孔隙的减少, 渗透性就变差, 饱和导水率降低, 不利于水分下渗。

孔隙的减少、渗透性能的丧失加快了地表径流的形成, 同时增加了地表径流量, 雨水直接以地表径流的方式进入河流。从图3可以看出, 由于压实的加剧, 城市土壤的径流系数从接近零升高到40%。以城市区域一半以上地表被封闭的事实说明, 土壤压实会导致降雨时洪峰提前、强度增加。从50cm深度以内的水分测算结果看, 压实使总入渗量减少了70.5%。由此看来, 入渗率降低, 阻碍了雨水通过直接进入进入地下水, 减少了地下水自然回补, 是地下水位下降和地下漏斗形成的原因之一[5]。可见, 压实影响了水循环相关或依靠水循环的其它过程。

地表径流量的增加会带来更多的土壤侵蚀和地表其它物质进入水体。在南京进行的研究表明, 地表径流水体的污染非常严重, COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量是非常高的[6]。研究表明, 自然土壤对径流水体中污染物的去除率达到50%~80%, 而且随着渗透深度的增加, 污染物的去除率增加[7]。土壤净化除了机械的纯化外, 还提供了一个化学和生物的处理过程[8]。在城市土壤环境中, 由于土壤的压实, 城市土壤失去了它本身固有的对水体和环境的物理和化学过滤、吸附和净化功能。

压实改变了土壤的固、液、气3相比, 所以土壤的容积热容量、导热率、热扩散率和温度也发生了变化。城市土壤由于压实, 土壤的容积热容量增加、导热率增加、热扩散率也增大。说明被压实的土壤可以有更多的热量传递到下层土壤, Mount[9]监测了纽约市中心公园和拉托里特公园的土壤温特征, 结果表明, 城市土壤表层年均温比邻近的林地高 $3.13\sim 11.22^\circ\text{C}$ 。这导致了城市土壤夜间产生更多的长波辐射, 是城市热岛效应的一个因素。最近的研究也表明, 城市化会导致温度上升, 城市热岛效应实际上在夜间发生[10]。

土壤被压实后还将影响到根系穿透、土壤孔隙、土壤通气性, 从而影响到土壤生物可存在的空间, 进一步影响到土壤中生物的繁衍。压实还通过改变土壤中水分、 O_2 和 CO_2 的量、氧化还原电位、微生物的种类和数量, 影响土壤中有机物质和养分的分解和转化。绿地植物的生长无疑也会受到压实的影响。

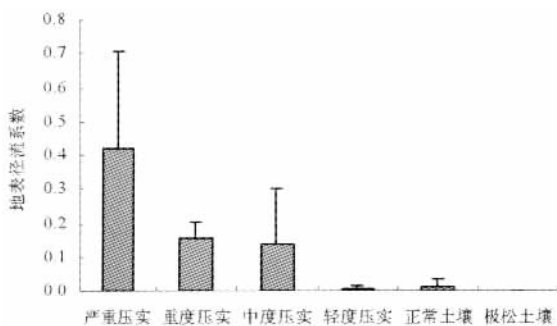


图3 不同压实程度土壤的地表径流系数变异

3.2 城市土壤的化学退化及其影响

城市土壤的化学退化突出地表现在土壤的污染上。城市土壤污染一方面影响土壤的生态服务功能, 同时污染物通过食物链传递和人体对土壤颗粒物的直接吸入而影响城市居民的健康, 因此城市土壤污染已成为公众普遍关注的问题。

城市人群受土壤污染主要有两条途径: (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。国内外许多研究表明, 城市(郊)蔬菜是城市居民受土壤污染的主要途径之一, 但是目前关于区域土壤污染风险评价的理论和方法的研究还开展得很少。城市人口高度密集, 土壤污染物可以通过扬尘和与土壤直接接触而对人体产生危害。因此, 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。

土壤化学退化产生明显的水环境效应。土壤污染物和富集的养分元素还构成对地下水水质的威胁, 如南京市的初步研究表明, 城市区域地下水中氮、磷和重金属都不同程度地超标。由于磷素在城市土壤中的明显富集, 城市土壤已经成为城市地表和地下水体中磷素的重要来源。研究表明, 土壤中磷素的移动性与其含量密切相关, 即在某一浓度范围内土壤向水体转移磷素的风险比较低, 而超过这一临界值以后, 土壤释放磷的危险性则迅速上升。图4给出了南京市城市土壤释放磷素的临界状况评价, 即当土壤有效磷超过 25 mg kg^{-1} 时, 水体中的磷含量将迅速升高。值得注意的是, 目前大部分城市和城郊土壤中的磷素含量都超过了这样的临界水平, 因此, 城市土壤在城市环境中很大程度上成为水体富营养化的重要因素。这也是城市土壤从服务功能向污染源转变的一个事例。

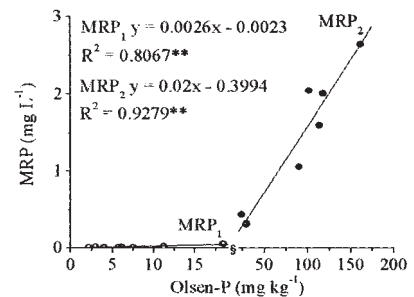


图4 城市土壤释放磷素的临界转变

4 城市生态系统物质循环障碍的土壤症结

城市生态系统是消费者占优势的生态系统, 也是分解功能不完全的生态系统[11]。城市生态系统中循环的物质来源于外界, 所以城市依赖其它生态系统而存在。图5表明了城市生态系统物质循环的特征, 在该循环中, 由于输入和输出的不平衡性, 即输入大于输出, 城市系统内部越来越趋向于物质的集中。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并且具有较长周转周期的环节。

城市生态系统这种物质循环特征对于磷这样的沉积型元素有重要的影响。磷是生命必须元素, 虽然它在地壳中的

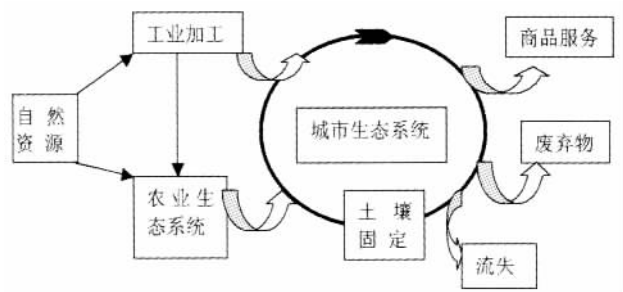


图 5 城市生态系统物质循环与城市土壤的末端固定

丰度列第 11 位，但磷总是以磷酸盐的形式存在于岩石之中，所以磷的使用通常要通过人类的开采和活化。由于这样的特点，磷是一种不可再生的自然资源。为满足全球农业生产的需要，80%的磷以化肥的形式进入全球农业生态系统，然后其中的一部分又主要以食物的形式被人类消耗。目前摩洛哥、美国和中国 3 个国家磷的开采量占全球的 2/3 以上，中国同时又是一个主要的磷肥消费国。根据可开采储量估计，全球磷素资源在未来 60~130 年将完全耗竭。因此可以预见，磷的短缺将导致粮食价格上升和供给的短缺。

但是，磷素的循环不是一个闭合的循环。在过去大规模使用磷肥的 50 年中，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，农业土壤中磷含量的提高并不十分显著。但是，有大约 2.5 亿 t 磷没有返回农业生态系统，而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。对于这部分储存在城市土壤中的磷素，其总量和形态目前都还缺少足够的研究。全球城市仅占不足 2%的全球陆地面积。在如此小的区域内磷的储存量是巨大的。与此同时，城市生态系统中的磷也通过污水进入水体，造成过去 30 年发达国家水环境的严重破坏，而现在这已经成为全球共同关心的问题。

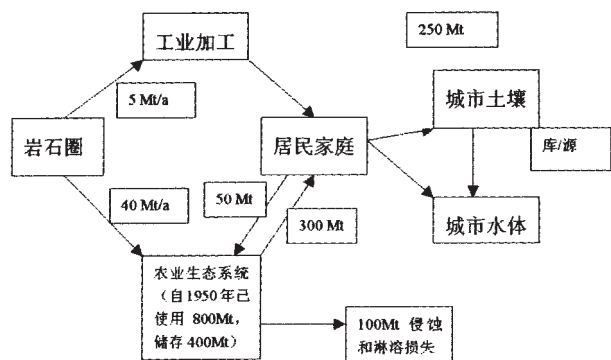


图 6 1950~2000 年期间全球磷收支基本状况

城市生态系统中磷素是以人为就地处置的方式进入城市土壤中的。在某种意义上说，城市土壤实际上一直担负着处理城市污水的服务功能。这种服务功能目前显然不能满足城市化迅速发展的需求，因为其容量已经饱和。但与此同

时，城市土壤磷素的增加必定会对水体造成潜在的威胁。由于我国很多城市历史悠久，加之迄今为止污水处理系统仍然相当匮乏，城市和周边土壤必将承担保持磷素的功能，而其潜在环境影响也不容忽视。

上述的分析不难得出这样的结论，通过科学的土壤管理，将固定在城市生态系统（城市土壤）中的磷素返还到农业生态系统中，不但可以减缓磷的耗竭、维持农业的可持续发展，同样重要的是将有效地降低水体污染的风险，创造一个健康的城市生态和一个良好的城市环境。

5 结语

城市生态系统中土壤承担着重要的服务功能，主要体现在维持植物生长和容纳污染物等方面。城市土壤演变是城市化过程中人类活动的结果，但退化的城市土壤将影响城市的生态环境质量。由于城市生态系统物质循环的特殊性，城市土壤成为某些元素的地球化学“垒”，即固定着大量的磷等元素，使元素循环出现障碍。通过人工干预来闭合开放状态下的物质循环链条，是城市生态系统良性发展的保证。

参考文献(References)

- [1] Blum W E H. Basic concepts: Degradation, Resilience, and Rehabilitation [A]. In: Lal R, Blum W H, Valentine C, Stewart B A (eds). Methods for assessment of soil degradation. Advances in Soil Science[M]. Boca Raton, New York: CRC Press, 1998. 1~16
- [2] 崔晓阳, 方怀龙. 城市绿地土壤及其管理[M]. 北京: 中国林业出版社. 2001
- [3] Bullock P, P Gregory. Soils in the urban environment Blackwell Scientific Publications[M]. Great Britain: Oxford, 1991. 1~192
- [4] Jim C Y. Soil compaction at tree-planting sites in urban Hong Kong[A]. In: D Neely, G W Watson (eds.). The Landscape Below Ground II: International Society of Arboriculture [C], Champaign, Illinois, 1998 d. 166~178
- [5] Brakensiek D L, W J Rawls. Soil containing rock fragments: effects on infiltration[J]. Catena, 1994, 23: 99~110
- [6] Zhang G L, W Burghardt, Y Lu, Z T Gong. Phosphorus-enriched soils of urban and suburban Nanjing and their effect on groundwater phosphorus [J]. J. Plant Nutr. Soil Sci, 2001, 164: 295~30
- [7] 欧岚, 车武, 汪慧贞. 城市屋面雨水绿地水平流渗透净化研究 [J]. 城市环境与城市生态, 2001, 14(6): 24~27
- [8] Sieker P, M Klein. Best management practices for stormwater-runoff with alternative methods in a large urban catchment in Berlin, Germany[J]. Wat. Sci. Tech, 1998, 38 (10): 91~97
- [9] Mount H. Temperature signatures for anthropogenic soils in New York city [A]. In: Kimble J M, et al. (ed.). Classification, Correlation and Management of Anthropogenic Soils. Proceedings-Nevada and Callifornia [C]. September 21~October 2, 1998. USDA-NRCS. National Soil Survey Center, Lincoln, NE, 1999. 137~140
- [10] Kainay E, M Cai. Impact of urbanization and land-use change on climate[J]. Nature, 2003, 423: 528~531
- [11] 宋永昌, 由文辉, 王祥荣. 城市生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社. 1998

(责任编辑 肖庆山)