

城市土壤质量演变及其生态环境效应

张甘霖¹, 朱永官², 傅伯杰²

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 城市化是人类活动影响下自然生态系统向人工生态系统的急剧变化形式, 它引起一系列生态环境条件的改变。城市化对土壤资源的数量和质量产生深刻的影响, 包括土壤地表封闭引起的土壤生态功能彻底消失, 土壤物理性质恶化, 土壤形态学特征和演变过程深受人为作用的影响, 短程变异增加而总体多样性降低, 土壤污染加剧, 土壤养分富集等多方面。城市化过程中土地利用变化对土壤产生一系列生态环境效应, 如养分径流输出增加, 热缓冲能力下降, 污染转移危险性上升等。有必要迅速开展城市化过程中土壤质量演变及其生态环境效应的系统研究, 为我国城市可持续发展提供理论依据。

关键词: 城市化; 城市土壤; 土壤环境; 土壤质量; 生态效应; 环境效应

Quality changes of soils in urban and suburban areas and its eco-environmental impacts——A review

ZHANG Gan-Lin¹, ZHU Yong-Guan², FU Bo-Jie² (1. *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*; 2. *Research Center of Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085*). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 539~546.

Abstract: Urbanization represents one of the most striking forms of the changes of natural eco-system to man-made eco-system, which may bring about a series of changes in ecological and environmental conditions and qualities. Urbanization has a profound and far-reaching impact on the quantity and quality of soil resources, which includes aspects such as the disappearance of soil ecological functions by surface sealing; the worsening of soil physical properties; the strong influence of human activities on soil morphology and soil genesis; the increase in short-range variability and decrease in overall soil diversity, the aggravation of soil contamination and the soil nutrient enrichment. The artificially modified soils affect the ecological and environmental quality as well as the increase in pollutant load in runoff, the decrease in heat-buffering capacity and the contaminant transfer hazard. It is therefore urgent to study the quality change of soils in urban and suburban areas and its relationship with eco-environmental impacts, for the sustainable development of cities. This paper gives an overview on the following aspects.

1. Urbanization and ecological functions of urban soils

Urbanization changes the ecological functions of urban soil dramatically, it includes: a) changes in land use type and fragmentation of landscape; b) changes in the hydrological processes; c) changes in the heating

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿研究资助项目 (ISSASIP0106); 国家自然科学基金重点基金资助项目 (40235054)

收稿日期: 2002-06-10; **修订日期:** 2002-11-15

作者简介: 张甘霖 (1966~), 男, 湖北人, 博士, 研究员, 主要从事土壤资源研究。

Foundation item: Knowledge Innovation Project of CAS (No. ISSASIP0106) and National Natural Science Foundation of China (No. 40235054)

Received date: 2002-06-10; **Accepted date:** 2002-11-15

Biography: ZHANG Gan-Lin, Ph. D. Professor, Main research field: soil resource research.

buffer capacity of land surface;and d)decease in diversity of both plants and soil microbes.

2. Effects of urbanization on the quantity and quality of urban soils

Due to the construction of buildings ,roads and recreation facilities ,urbanizatin greatly reduce the area of open soil surface. In the mean time ,urbanization also results in the deterioration of soil physio-chemical and morphological properties ,pollution ,soil forming processes ,enrichment of nutrients such as nitrogen and phosphorus and severe contamination of both metals and organics .

3. Ecological impacts of soil degradation in urban areas

Degradation in urban soils results in a number of ecological impacts. Soil contamination poses long-term risks on humans through soil-plant systems and soil-atmosphere interactions. Enrichment in nutrients and changes in hydrological processes in urban areas can reduce both surface and groundwater quality.

4. Perspectives in urban soil research

Research on urban soils in China is still at the early stage ,future effort should be given to the basic understanding of the changes in soil properties under different patterns of urbanization ,risk assessment of contamination in urban soils and digital database (including soil classification)of urban soil resources for urban planning .

Key words:urbanization ; urban soils ; soil environment ; soil quality ; eco-environmental impacts

文章编号:1000-0933(2003)03-0539-08 中图分类号:Q143 文献标识码:A

环境变化条件下土壤质量的演变是关系到土壤可持续利用和区域可持续发展的重要课题。理解土壤质量演变的机制、速率和效应及其与环境条件变化的相互关系是土壤资源可持续管理的基础。人类活动导致自然生态系统向人工生态系统转变已经有数千年的历史,而城市化是其中强度最大、影响最深的过程之一。城市化是以经济高度集中、资源高强度利用、物质快速循环为标志。由人为活动导致的剧烈的环境变化驱动城市土壤质量的演变以及这种演变所带来的生态和环境效应是一个尚未系统回答的科学问题,回答这个问题也是城市可持续发展管理的科学基础。

1 城市化进程与城市土壤的生态环境功能

城市化进程在全球范围内极为迅速。随着工业文明的到来和普及,工业化的影响遍及大多数国家。1900 年至今,全球城市人口从 1.5 亿增加到现在的 22 亿,城市化程度的提高,使目前全球约有 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],10a 内世界城市人口将达到总人口的一半,现有城市规模也将继续扩大。目前我国的城市化率为 31%,到 2020 年,中国的城市化率将达到 60%,年增速率为 1.5%,且有加速的趋势。

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度改变的土壤的总称。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^[3~7]。相对于自然土壤的农业生产功能而言,在城市空间内,土壤的环境和生态功能更为受到重视。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,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^[8]。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。因此,客观上要求扩展有关城市土壤的知识,理解城市土壤特别是处理与城市土壤有关的环境问题^[6,7,9]。但长期以来由于客观的需要土壤学研究将注意力主要放在如何提高和维护土壤的生产力上,无暇顾及城市中和城市周围的土壤,有关城市土壤方面的知识很大程度上仍然是空白。为数据利用城市土壤,充分发挥其生态和环境功能,有必要采取多学科的研究方法深入研究,以更好地理解城市土壤^[10]。

城市土壤功能的演变是伴随城市化进程出现的,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。已经有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。固然土壤有容纳和净化污染的功能,但在强烈的环境负荷冲击下,土壤的功能将面临极大的威胁,换言之,土壤的缓冲—净化功能有被超越的危险,而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他生态环境组分。本文将扼要介绍城市土壤质量演变的直接和间接影响。

2 城市化对土壤资源数量和质量的影响

2.1 地表封闭和压实

人们已经注意到,由于城市区域中地表封闭的普遍出现,土壤上的生长植物、过滤水分、交换热量、净化污染物等重要生态功能部分甚至完全消失,这种不可逆的过程将“活”的土壤变成“死”的物体,使后代失去这部分资源。已有一些研究表明,由于机械压实、人为扰动、践踏等的影响,城市土壤的土壤物理性质恶化,主要体现在土壤颗粒组成极端、土壤结构受到严重毁坏、容重增加、通气和持水孔隙降低^[13,14]。在某些裸露的土壤表面常出现具阻止水分渗透的结壳层。城市土壤的压实常常影响城市树木生长,并降低渗透能力,加上地表的封闭,显著提高地表径流系数,导致降雨集中时短时间的洪涝^[15,16]。另外,由于土壤中粗骨物质的存在,土壤水分运动受到大空隙的影响,呈所谓“优势流”方式运动,增加了污染物质的下渗危险,而且其运移方式较难预测。但目前对这些物理变化的定量研究,特别是这种变化对水分入渗等土壤功能影响的定量评估未见报道。

2.2 形态特征

土壤形态学性质受到严重的人为干扰。从土壤形态学特征来看,城市土壤具有混乱的土壤剖面结构与发育形态。在城市建设过程中,由于挖掘、搬运、堆积、混合和大量废弃物填充,土壤结构与剖面发育层次十分混乱,常使人产生一种“是碎石还是土壤”的疑问^[17]。城市土壤剖面结构分异程度低,土层分异不连续,土层缺失,有的甚至发生“土层倒置”现象,即 A 层在下,B 层在上,或古土壤层在上,新土壤层在下;另外还可能有古土壤的埋藏而呈现出“双层构造”;腐殖质层被剥离或者被埋藏,其它土层破碎且没有统一的出现规律,土层深浅变异较大;土壤中人工粗骨物质较多,颗粒分布规律异常,明显不同于自然土壤;土壤可能出现特异的颜色,这种特异颜色是由于特异物质的存在或有色化学物质污染所致,而非发生学过程的结果。目前存在的不足是,这些层次的表征和其归类缺乏统一的术语和描述标准,使城市土壤的研究没有共同的交流语言。

2.3 形成过程

在土壤形成过程研究方面,明确城市土壤是分布在城市或城郊区域,经过人类活动的长期干扰或新老物质的直接“组装”^[6],并在城市特殊的环境背景下发育起来的土壤,它与自然土壤和农业土壤相比,既继承了原有自然土壤的某些特征,又有其独特的成土环境与成土过程。在城市土壤形成过程中,人为因素起主导作用。城市土壤的发生过程包括:腐殖质的积累、结构的重组、钙化、脱钙、酸化、碱化、盐化、潜育化、污染等。Kazdym & Prokofieva^[18]使用扫描电子显微镜发现方解石、石膏、赤铁矿、针铁矿、纤铁矿等新生矿物的形成。Kosse^[19]指出有必要区分人为地貌过程和人为土壤发生过程。但人为活动过程的区分及其对土壤物质来源、属性、土壤中的物理化学过程的具体影响目前还相当不明确^[11]。这些过程出现的背景、影响因素、速率以及其对土壤形态和性质的影响、在类型定义和分类中的意义等都还基本是空白。

2.4 土壤分类数据

在城市土壤分类研究方面,认识到城市土壤是在人为扰动作用以后开始形成,在发生上是新成的,土

壤的相对年龄较短。但迄今为止,世界各国还没有建立一个广为接受的关于城市土壤的分类系统。德国主要依据基质(Substrate)特性和主要形成过程来划分这些土壤^[20],而美国则仍然套用 Soil Taxonomy 的原则和方法对城市土壤分类,无疑遇到很大的问题^[21]。在中国土壤系统分类中,受人为作用的土壤归属人为土和新成土两大土纲。人为土只包括受人为活动影响的农业土壤,不包括由于城市人为土壤扰动作用而形成的城市土壤。新成土纲下包括人为新成土亚纲,它是指在矿质土表至 50cm 范围内有人为扰动层次或人为淤积物质的新成土。人为新成土亚纲续分扰动人为新成土、淤积人为新成土土类,城市土壤比较接近于人为新成土亚纲^[22]。因为潜在用途和使用者的多面性,城市土壤的分类和制图有不同于自然景观条件下的规律和模式方法,建立适合这种高度变异的土壤的分类并且能利用其指导城市土壤的制图仍然是国际土壤学界面临的一个挑战^[10]。

2.5 空间变异

城市土壤在空间上变异十分明显,在较短的距离内会出现完全不同的土壤类型。城市的兴衰发展、土地利用的改变与城市景观的变迁决定着土壤的发展史。Schleuss 等^[23]研究发现层次的出现和人为物质的丰度与居住的密度相关。城市建筑的兴建与废弃、城市地貌的改变等决定着土壤发育的起始与终结及其方向,因为底质来源、人为影响过程、自然影响过程都错综复杂,导致土壤类型繁多而且空间变异非常强烈,不象自然土壤在空间分布上有一定的规律,土壤空间异质性(heterogeneity)缺乏有效的描述和空间表达,加上过去背景信息的空缺和遗漏,给研究带来了难度。

2.6 化学性质与污染

过去一些关于城市表土的研究表明城市土壤化学性质的强烈改变和土壤污染的加剧^[24~27]是城市土壤性质发生变异的主要方面。正是因为各种途径和形式的人为影响,城市土壤性质显著偏离同地带(区域)背景土壤的特征。如因为人工酸、碱物质的影响出现极端的土壤反应,其变异范围在 3~12 之间。严重的土壤污染特别是金属污染是城市土壤的又一重要特征^[28]。有些土壤的 Zn、Pb 含量甚至高达 3000 mg/kg。城市土壤常具有特异的物质组成。如由炼钢炉渣发育的土壤含铁特异;由食品工厂废渣发育的土壤组成中则可能含硫很高。因为物质来源的不同,这些特异物质种类复杂且对土壤化学性质的影响各异。伴随工业生产和高强度农业利用进入土壤的有机污染物也成为土壤环境质量下降的重要因素^[24,27]。关于城市和城郊土壤的重金属污染状况,国内也有一些研究^[29,30]。进一步的研究应是系统性和风险评估。

关于生物学和生物化学特性方面研究不多。根据一般的形态学研究的结果,在养分富集的土壤中(如园地或城郊菜园土)土壤生物活动频繁;在受重金属或有机污染严重的土壤中则十分微弱。土壤有机质的组成和结构具有特殊性,其官能团和分子结构的表征已经得到初步的揭示^[31],但还缺乏深入和详尽的研究。

城市土壤遭受污染后,也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,Biolog 数据显示城市土壤对能源碳的消耗量和速度也明显提高^[32]。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锌、铜和镍。

2.7 养分富集

城市土壤的养分富集也是一个重要的特征。沈汉^[33]报道北京郊区菜园土壤氮、磷富集现象,Gong 等^[34]还建议使用磷的富集现象作为城市人为土的诊断标准。城市土壤的养分富集不但在蔬菜生产养分管理上有重要意义,还具有重要的水环境效应,最近 Zhang 等^[35]和卢瑛等^[36]都指出磷素富集对浅层地下水 and 地表水的可能影响,并依据土壤磷素水平评估了土壤对水体磷水平的可能影响。城郊土壤的流失也是地表水非点源污染的重要途径。

3 城市土壤质量下降的生态环境效应

3.1 土壤污染对生物效应

城市土壤质量下降产生一系列生态和环境效应。就目前我国绝大多数城市而言,郊区是重要的蔬菜供

应基地。由于城市和城市周围长期工矿业活动已导致城市与城郊土壤不同程度的污染。城市土壤污染一方面影响土壤的生态功能,同时污染物通过食物链传递和土壤颗粒物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。城市土壤污染研究涉及:污染来源、时空分布规律、源-运移-沉降模式、动力学过程及其生态环境效应。

城市人群暴露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。国内外许多研究认为表明城市(郊)蔬菜是城市居民污染暴露的主要途径之一。过去关于城市(郊)土壤污染的研究过去主要侧重研究污染物在土壤中的形态转化及其机理,城郊主要蔬菜作物污染状况的调查研究,这些研究明确我国城郊型土壤和蔬菜作物污染状况,并提出了许多有效的污染控制技术,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。从国内外研究进展来看,风险评价已日益成为环境管理的重要决策支撑。城市土壤污染风险主要依据运移模型来预测区域人群的对主要污染物的摄入量。目前大部分模型需要预先知道主要蔬菜作物污染物的浓度,而很少直接从土壤数据库来预测摄入量。最近美国学者 McBride^[37]研究表明作物中重金属的含量可以用如下方程式来预测:

$$\log (\text{Cd})_{\text{crop}}=a+b \log (\text{soil Cd})-c(\text{soil pH})$$

但是模型中 a 、 b 和 c 值随土壤性质、气候条件和作物种类而变,因此模型在实用性方面还有很大的局限性。英国研究人员 Young 等最近提出新的线性数学模型,根据土壤含镉量、pH 和有机碳几个参数来预测蔬菜中重金属的积累和富集系数,然后再根据人体对特定蔬菜的摄入量计算土壤污染的健康风险。关于这方面的研究国内还很少有报道,以城市土壤为切入点,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。

城市土壤除上述对植物(主要指蔬菜)和水环境影响外,其质量还直接决定城市绿化建设的成败^[42,43]。我国厦门也曾经因为城市土壤质量问题导致大规模城市绿化树木死亡。针对绿化树木生长要求评价城市土壤质量也是一个有重要应用意义的研究内容。

城市土壤的生态功能还体现在对辐射热能的吸收和缓冲上。由于地表封闭和土壤压实引起的土壤吸热功能消失或下降,城市土壤温度比周围自然土壤高^[44,45],加剧城市热岛效应。在城市土壤与大气质量关系方面已经有些研究,表明近程的土壤颗粒物是大气悬浮物质的重要来源^[46],因而土壤的质量状况与大气环境密切相关,城市大气可吸入颗粒物的污染程度评价及其与城市表土的关系尤其值得关注和研究。

3.2 土壤质量变化的水环境效应

城市区域内存在广泛的地表封闭与土壤压实现象,土壤水分入渗和短期储蓄缓冲功能减弱或消失^[15],地表径流系数大幅度增加,从而增加径流产生^[16]。在暴雨情况下很容易产生短时间城市洪涝灾害,类似问题在我国很多城市的局部地区经常出现。另一个方面,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^[16],导致地表水污染加剧。城市地面积水还可能导致有害生物的繁衍,从而直接影响城市居民的身体健康。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。在南京市的研究表明,城市区域地下水中氮、磷和重金属都不同程度的超标。应该在充分调查土壤的污染状况的基础上,全面评价城市土壤的水污染影响。

3.3 城市土壤与大气环境质量

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。最近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^[38]。随着汽车尾气排放的控制和能源结构的调整,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。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。评价土壤污染物直接进入人体的关键参数是污染物的生物有效性(bio-accessibility)。过去对污染物生物有效性的研究主要利用模式动物(如幼猪、大白鼠等)进行长期的剂量实验,这种方法不仅费时而且比较昂贵。近年来,国外数据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^[39]用生理溶液研究土壤中铅和砷的生物有效性可以很好地反应动物的实际吸收率。Rodriguez 和 Basta^[41]研究表

明利用生理溶液连续浸提得到的土壤中砷的生物有效性指标值与动物实验所获得的结果成显著正相关关系。从这些研究结果来看,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。这一研究方法与体系也同样适用于大气可吸入颗粒物。

4 研究展望

由于城市化过程中人为活动的强烈影响,与城市化相关的土壤质量问题正变得日益突出。近十几年来,国际上城市土壤研究日益受到重视。德国土壤学会在 1988 年成立了城市土壤工作组;美国也在纽约等城市开始了一系列有关城市土壤的研究。国际土壤学会在 1998 年正式成立了“城市、工业、矿山和交通地土壤工作组”(Working Group on Soils of Urban, Industry, Mining and Traffic Areas, WG-SUITMA),这标志着世界范围内城市土壤研究即将进入一个新的阶段。该工作组于 2000 年在德国 Essen 召开了第一届国际会议,包括中国在内的全球 41 个国家 300 多名代表出席了会议,也说明城市土壤研究在世界上的影响。城市土壤研究在世界范围内正在兴起和深化^[11,12],有些问题逐渐得以明确,但总体而言还处于起步阶段。关于城市土壤的形成、分类、质量特征和环境影响等很多问题还缺乏系统的研究,目前开展系统的城市土壤研究即使在国际上也是必要而且相当先进的。

我国城市土壤研究在 20 世纪 90 年代开始有零星工作。有一些关于城市郊区蔬菜地土壤特征和分类的以及郊区土壤重金属污染的初步研究。最近几年初步开展了一些城市土壤方面的研究,并利用国际合作的机会与 SUITMA 工作组建立了紧密的合作关系。目前有关南京城市土壤的工作已经取得一些有意义的结果^[16,35,17,36]。

根据以上对城市土壤研究进展和现状的评价,城市土壤质量及其生态环境效应是一个无论在土壤学基础理论研究还是城市土壤资源管理决策上都极为重要的研究课题,各个侧面都已经有研究工作的初步涉及,但目前尚缺乏系统的认识和研究。目前在主要城市土壤形成过程、历史和分类上还不明确,应该作为认识和了解城市土壤的基础工作。在城市化过程中,土地利用空间格局的变化是引起土壤质量变化的根本原因,必须通过解剖典型城市发展历史的方法研究城市土地利用的变化及其与土壤质量演变的关系。对城市土壤属性的空间变异规律缺乏系统的认识,变异的机制、定性和统计描述以及制图表达等,都是需要解决的科学问题。人为改变的土壤的属性表征,与自然土壤的形态学、物理、化学、矿物学等区别及其与土地利用的关系,是城市土壤研究的中心内容之一。城市土壤的污染状况及其风险评价,特别是城市(城郊)土壤-蔬菜体系中污染物的风险评价及其方法论是国际国内研究的前沿。城市土壤以及城市流域中地表径流对地表水的非点源污染贡献对和城市土壤对浅层地下水的污染负荷,是评价城市土壤的环境影响的重要方面,目前可以有条件进行定量的研究。城市土壤与大气可吸入颗粒物含量和性质的关系研究,也应该及时开展多学科的合作研究。建立综合的城市土壤质量评价方法与指标体系和城市土壤数据库,是科学管理城市土壤的重要工具。

综上所述,在我国城市化进程不断加快的形势下,及时开展系统的城市土壤质量演变及其生态环境效应研究具有重要的意义,在理论上可以探索并建立关于城市土壤的系统研究方法,拓展现代土壤学的研究范畴;在应用上为城市土壤的合理利用与管理,解决因为城市土壤质量下降导致的生态环境问题提供理论依据、基础信息和技术支撑。

References:

[1] World Resources Institute. Cities and the environment. *World resources* 1996~1997. Oxford University Press, New York, 1996. 1~30.

[2] UNPD(United Nations Population Division). *World Urbanization Prospects: The 1994 Revision*. United Nations, New York, 1995. 132~139.

[3] Bullock P and Gregory P J. *Soils in urban environment*. Blackwell Scientific Publications, London, 1991.

[4] Craul 万方数据 *Soil in Landscape Design*. John Wiely, New York, 1992.

[5] Craul P J. *Urban Soil, Application and Practices*. John Wiely & Sons, New York, 1999.

- [6] Burghardt W. *Soils in urban and industrial environments*. Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd. 1994, **157**: 205~214.
- [7] Jim C Y. Urban soil characteristics and limitations for landscape planning in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, 1998a, **40**:235~249.
- [8] CIDA(Canada International Development Agency). *An urbanized world, Statement on sustainable cities*. Ministry of Public Works and Government Services Canada, Canada. 1998.
- [9] Zhang G L, Gong Z T. Urban soil and environmental protection. *Science News Weekly*, 2000,**37**:7.
- [10] De Kimpe C R and Morel J L. Urban soil management: a growing concern. *Soil Sci.*, 2000, **165**:31~40.
- [11] Burghardt W and Dornauf C, eds. *Proceedings of 1st Conference of SUITMA*. Essen, Germany, 2000.
- [12] Zhang G L. Developments of urban soil research. *Soils*,2001,**3**(2):111~112.
- [13] NRCS Soil Quality Institute. *Soil quality test kit guide*. United States Department of Agriculture, Agriculture Research Service and Natural Resource Conservation Service. 1999. <http://www.statlab.iastate.edu/survey/SQI>.
- [14] Schuler R T, Casady W W and Raper R L. Soil compaction. Chapter 9. In: Reeder R C, ed. *MWPS special publication: Conservation tillage systems and management*, 2000.
- [15] Burghardt W, Lu Y, Zhang G L,et al. The Stage of Soil Degradation by Compaction of Different Site Uses of Nanjing City, China, In: *Proceedings of International Conference on Remade Lands 2000*, Fremantle, Western Australia 30 November-2 December, 2000.
- [16] Zhang G L, Gong Z T, Zhao W J, et al. Features of soils in urban and suburban Nanjing and their environmental effect. In: *Proceedings of 1st International Conference on Soils of Urban, Industrial, Traffic and Mining Areas*, July 12~19, 2000,Essen, Germany, 2000.
- [17] Lu Y, Gong Z T, Zhang G L. Preliminary studies on the characteristicsand classification of soils in Nanjing City. *Soils*, 2001,**33**(1):47~51.
- [18] Kazdym A, Prokofieva T. Formation of secondary minerals in ancient human-modified soils of Moscow. In: Burghardt W and Dornauf C, eds. *Proceedings of 1st Conference of SUITMA*, Essen, Germany, 2000. 295~297.
- [19] Kosse A. Pedogenesis in the urban environment. In: Burghardt W and Dornauf C eds. *Proceedings of 1st Conference of SUITMA*, Essen, Germany, 2000. 241~245.
- [20] Arbeitskreis Stadtboden. Substrate und Substratmerkmale von Boeden der Stadt- und Idustrieregebiete. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesch.*, 1998, **56**: 311~316.
- [21] Hernandez L A. New York Soil Survey Program. In: Burghardt W and Dornauf C eds. *Proceedings of 1st Conference of SUITMA*, Essen, Germany, 2000. 91~96.
- [22] Gong Z T, et al. *Chinese soil taxonomy: theory, methodologies and applications*. Science Press, Beijing, 1999.
- [23] Schleuss U, Wu Q, Blume H P. Variability of soils in urban and periurban areas in Northern Germany. *Catena*, 1998, **33**:255~270.
- [24] Jones K C, Stratford J A, Waterhouse K S. Organic contaminants in Walshsoils: polynuclear aromatic hydrocarbons. *Environ. Sci. Tech.*, 1989, **23**(5): 540~550.
- [25] Tiller K G. Urban soil contaminants in Australia. *Aust. J. Soil. Res.*, 1992, **30**: 937~957.
- [26] Jim C Y. Soil characteristics and management in an urban park in Hong Kong. *Environmental Management*, 1998b, **22**(5): 683~695.
- [27] Wilcke W, Lilienfein J, Lima S D C. Contaminants of highly weathered urban soils in Uberlandia,Brazil. *J. Plant. Nutr. Soil.Sci.*, 1999, **162**: 539~548.
- [28] Hiller D A. Characteristics of the acid buffer capacity and heavy metal behaviorin Urbic Anthrosols of the Ruhr area. *Symposium 28: Urban and Sub-urban Soils*. Proc. World Cong. Soil Science, Montpellier, France, 1998.
- [29] Zhang M, Gong Z T. Contents and distribution of some heavy metals in typical vegetable soils in China. *Acta Pedologica Sinica*, 1996,**33**(1):85~92.
- [30] Yu Z S, Meng X X. Preliminary studies on mercury in soils of some cities in northwest of China. *Environmental*

- Sciences*, 1982, **3**(5): 57~58.
- [31] Wu Q, Blume H P, Beyer L, *et al.* A method for the chracteristization of inert organic carbon in Urbic Anthrosols. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 1999, **30**(9&10): 1497~1506.
- [32] Yang Y G, Paterson E, Campbell C. Accumulation of heavy metals in urban soils and its impacts on soil microbes. *Environmental Sciences*, 2001, **22**(3): 44~48.
- [33] Shen H. Characteristics of element accumulation and transformation in vegetable soils in the suburban of Beijing. *Acta Pedologica Sinica*, 1990, **27**(1): 104~112
- [34] Gong Z T, Zhang X P, Luo G B, *et al.* Extractable phosphorus with a fimic epipedon. *Geoderma*, 1997, **75**: 289~296.
- [35] 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.
- [36] Lu Y, Gong Z T, Zhang G L. Phosphorus status in urban soils and its relation with phosphorus concentrations in ground water. *J. Applied Ecology*, 2001, **12**(5): 735~738.
- [37] McBride M B. Cadmium uptake by crops estimated from soil total Cd and pH. *Soil Science*, 2002, **167**: 62~67.
- [38] Chou Z J, Jiang D, Lu R R, *et al.* The development of single aerosol particle fingerprint database based on nuclear microprobe. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, **21**(6): 660~663.
- [39] Ruby M V. Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soil for use in human health risk assessment. *Environmental Science and Technology*, 1999, **33**: 3697~3705.
- [40] Ruby M V. Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiological based extraction test. *Environmental Science and Technology*, 1996, **30**: 422~430.
- [41] Rodriguez R R and Basta N T. An in vitro gastrointestinal method to estimate bioavailabe arsenic in contaminated soils and soil media. *Environmental Science and Technology*, 1999, **33**: 642~649.
- [42] Jim C Y. Massive tree-planting failures due to multiple soil problems. *Arboricultural Journal*, 1993a, **17**: 309~331.
- [43] Jim C Y. Soil compaction as a constraint to tree growth in tropical and subtropical urban habitats. *Environmental Conservation*, 1993b, **20**(1): 35~49.
- [44] Craul P J. The nature of urban soils: their problem and future. *Arboricultural Journal*, 1994, **18**: 275~287.
- [45] Mount H. Temperature signatures for anthropogenetic soils in New York city. In: Kimble J M, Ahrens R J and Bryant R B, eds. *Classification, Correlation and Management of Anthropogenic Soils, Proceedings - Nevada and California, Sep. 21-Oct. 2, 1998*. 137~140, USDA, National Soil Survey Center, Lincoln, NE, 1999.
- [46] Hoeke S, Burghardt W. Determination of dust flux rates and PM₁₀-concentrations on an industrial site. In: Burghardt W and Dornauf C eds. *Proceedings of 1st Conference of SUITMA*, Essen, Germany, 2000. 111~117.

参考文献:

- [9] 张甘霖, 龚子同. 城市土壤与环境保护. 科学新闻周刊, 2000, **37**: 7.
- [12] 张甘霖. 城市土壤研究的深化和发展. 土壤, 2001, **33**(2): 111~112.
- [17] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤的特性及其分类的初步研究. 土壤, 2001, **33**(1): 47~51.
- [22] 龚子同, 等. 中国土壤系统分类——理论、方法、实践. 北京: 科学出版社, 1999.
- [29] 张民, 龚子同. 我国菜园土壤中某些重金属元素的含量与分布. 土壤学报, 1996, **33**(1): 85~92.
- [30] 余中盛, 孟宪鑫. 我国东北城市土壤汞的初步研究. 环境科学, 1982, **3**(5): 57~58.
- [32] 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.
- [33] 沈汉. 京郊菜园土壤元素积累与转化特征, 土壤学报. 1990, **27**(1): 104~112.
- [36] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 城市土壤的磷素特性及其与地下水磷浓度的关系. 应用生态学报, 2001, **12**(5): 735~738.
- [38] 仇志军, 李海, 张甘霖, 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.