

ISSN 0564-3929

# Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会  
科学出版社

主办  
出版

2015

第52卷 第5期

Vol.52 No.5



# 土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

## 目次

### 综述与评论

- 基于文献计量分析的近30年国内外土壤科学发展过程解析 ..... 宋长青 谭文峰 (957)  
土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应 ..... 吴绍华 虞燕娜 朱江等 (970)

### 研究论文

- 基于土壤系统分类的河南省土壤有机质时空变异 ..... 李玲 张少凯 吴克宁等 (979)  
皖南第四纪红土伊利石结晶度值与风化强度的关系 ..... 刘莉红 胡雪峰 叶玮等 (991)  
青海民和官亭盆地喇家遗址古耕作土壤层微形态研究 ..... 张玉柱 黄春长 庞奖励等 (1002)  
基于成像光谱技术预测氮素在土壤剖面中的垂直分布 ..... 李硕 汪善勤 史舟 (1014)  
基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测 ..... 王升 陈洪松 付智勇等 (1024)  
淮河流域地表干湿变化的时空分布特征 ..... 曹永强 徐丹 曹阳 (1031)  
神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测 ..... 郭明明 王文龙 李建明等 (1044)  
砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究 ..... 赵丹 李毅 冯浩 (1058)  
pH和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附-解吸的影响 ..... 周鑫斌 于淑慧 谢德体 (1069)  
土壤非交换性钾释放动力学特征及其生物有效性 ..... 李婷 王火焰 陈小琴等 (1078)  
生物质灰对红壤酸度的改良效果 ..... 时仁勇 李九玉 徐仁扣等 (1088)  
小麦秸秆生物炭对高氯代苯的吸附过程与机制研究 ..... 李洋 宋洋 王芳等 (1096)  
不同温度玉米秸秆生物炭对萘的吸附动力学特征与机理 ..... 张默 贾明云 卞永荣等 (1106)  
十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫毒性研究 ..... 王赢利 陈建松 阳宇翔等 (1116)  
稻草和三叶草分解对微型土壤动物群落的影响 ..... 王慧 桂娟 刘满强等 (1124)  
沿海区土壤线虫对海水入侵土壤盐渍化的响应 ..... 王诚楠 张伟东 王雪峰等 (1135)  
土壤团聚体N<sub>2</sub>O释放与反硝化微生物丰度和组成的关系 ..... 周汉昌 张文钊 刘毅等 (1144)  
基于产量、氮效率和经济效益的春玉米控释氮肥掺混比例 ..... 王寅 冯国忠 张天山等 (1153)

### 问题讨论

- 中国土壤系统分类基层单元土族建设现状与命名上存在的问题 ..... 易晨 马渝欣 杨金玲等 (1166)

### 研究简报

- 干旱与重吸水对人工藻结皮光合特性的影响 ..... 吴丽 杨红 兰书斌等 (1173)  
咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响 ..... 李从娟 唐俊妍 高培等 (1180)  
不同NaNO<sub>3</sub>浓度下可变电荷土壤铜离子解吸率的分配及影响因素 ..... 张政勤 罗文贱 陈勇等 (1188)

封面图片: 不同浓度十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫的毒性 (由王赢利提供)



DOI: 10.11766/trxb201409250488

# 土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应\*

吴绍华 虞燕娜 朱江 李保杰 周生路

(南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023)

**摘要** 土壤生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,是人类赖以生存的重要资源。全球快速城市化进程使土壤生态系统服务发生了部分不可逆转的变化。本文归纳了土壤生态系统服务定义和分类的发展过程,介绍了土壤生态系统服务量化表征方法以及GUMBO、InVEST等几种常用的评价模型,并从供给服务、调节服务、文化服务和支持服务几个方面阐述土壤生态系统服务对城市化的响应。针对土壤生态系统服务分类、建模、空间表达以及其对人为活动的响应等方面研究存在的不足,本文提出未来的研究重点方向:建立土壤生态系统服务分类体系与标准,构建基于生态过程的土壤生态系统服务量化模型,开展土壤生态系统服务制图与权衡研究,加强土壤生态系统服务对城市化的动态响应机制与过程研究。期望更多的人关注和参与土壤生态系统服务研究,并将其应用于土壤资源管理、生态文明建设等政府决策。

**关键词** 土壤生态系统服务;城市土壤;生态风险;全球变化;土地利用

**中图分类号** S154.1 **文献标识码** A

土壤生态系统是全球陆地生态系统的重要组成部分,提供了供给服务、调节功能、文化服务、支持其他系统等一系列生态系统服务<sup>[1]</sup>。土壤的形成经历了几百到几十万年的演化,是极为宝贵的自然资源。自工业革命以来,人为活动对土壤生态系统服务的影响显著加强,尤其是城市化过程深刻地影响着土壤生态系统<sup>[2]</sup>。城市蔓延致使大量的生产性土地向城镇建设用地和交通用地转变,土壤生产供给能力和调节服务下降。人口聚集、工农业发展产生的污染物质输入超出土壤的自净能力,污染物富集危害土壤生态系统健康。在城市内部土壤的封闭、压实甚至导致部分土壤生态系统功能完全消失。在全球尺度上,城市化处于快速扩张状态,当前城市人口已占世界总人口的50%,预计到2030年将超过60%<sup>[3]</sup>。城市化驱动下土壤的性质、形态、结构、功能和服务均发生了显著变化,反过来影响到城市生态系统的健康。我国正经历快速的城市化过程,深入认识土壤生态系统服务,开展城市化对土壤生态系统服务的影响研究具有重要的现实

意义。

目前,生态系统服务与城市土壤的研究均取得了丰富的成果<sup>[4-6]</sup>。但是,作为生态系统的重要组成部分,土壤生态系统服务的研究一直未得到国内外足够的重视。截至2015年5月在Web of knowledge数据库中检索到主题词含有“Ecosystem Service”的文献26 709篇,含有“Urban soil”的文献37 070篇,但是当主题词范围缩小至“Soil & ecosystem service”时,检索得到的文献只有1 053篇,而主题词为“Soil & Ecosystem Service & Urban”时,文献数量仅有340篇。可见土壤生态系统服务的相关研究仍处于起步阶段,城市化过程对土壤生态系统服务的研究还未引起足够的重视。本文结合国内外相关研究进展,从土壤生态系统服务的定义和分类、量化和空间表达及其对城市化的响应几个方面进行综述,以期引起更多的人关注土壤生态系统服务,开展人为活动与土壤生态系统服务的作用机制研究,并应用于环境保护和生态文明建设的政府决策中。

\* 国家自然科学基金项目(41001047)、江苏省国土资源厅科技计划项目(201336)资助

作者简介:吴绍华(1980—),男,浙江庆元人,博士,副教授,从事城市土壤与环境研究。E-mail: wsh@nju.edu.cn

收稿日期:2014-09-25;收到修改稿日期:2015-07-02

## 1 土壤生态系统服务的定义和分类

生态系统服务概念的形成和发展已有数十年的历史，形成了完整的理论体系，尤其是千年生态系统评价计划（Millennium Ecosystem Assessment, MEA）的实施，将生态系统服务研究推向新的高潮<sup>[7-9]</sup>。目前生态系统服务的研究方法在森林、草地、水域等部门生态系统开始了广泛的研究，但是国内外对于生态系统服务的重要组成部分——土壤生态系统服务的研究起步较晚。土壤生态系统服务的研究起于土壤自然资产和土壤生态功能的研究<sup>[10]</sup>。Daily<sup>[5]</sup>于1997年提出需要对土壤提供的生态服务功能进行更为深入的研究，并列出了六项土壤生态功能。此后，Wall、Weber、Zhang等<sup>[11-13]</sup>对Daily的土壤生态服务功能的界定进行了补充和修正。随着土壤生态功能研究的深入，越来越多的学者认识到建立完整的土壤生态系统服务框架的重要性。土壤生态系统服务之所以可从生态系统服务中独立出来研究，是基于对土壤的物质组成、结构以及物质、能量、信息流动等构成了独特自然资产的认识。土壤的特殊自然资本是提供生态系统服务的基础<sup>[14]</sup>。土壤的自然资本支撑人类社会的生产生活，为人类提供各项生态服务。因此，土壤生态系统服务可定义为土壤特殊自然资产对人类提供的福祉。

由于土壤是大气圈、水圈、生物圈和岩石圈综合作用的产物，土壤生态系统服务的提供离不开其他系统的相互支撑，土壤生态系统服务往往与其他部门生态系统服务相互交织，土壤生态系统服务的内涵界定与分类成为研究的难点。尽管土壤学家和生态学家提出了不同的土壤生态系统服务的分类建议，但是他们基于土壤生态系统服务的重要性，根据土壤与其他系统共同提供服务的贡献来划分土壤生态系统服务类型的观点是一致的<sup>[6, 11, 15]</sup>。因此，站在土壤学的视角，笔者认为生态系统服务提供贡献主要来自土壤或者离开土壤就无法提供的服务均在土壤生态系统服务的范畴内。由于MEA的生态服务分类框架受到广泛的认可，笔者利用MEA框架对土壤特殊自然资产提供的生态系统服务的分类进行归纳（图1）。土壤生态系统的供给服务指土壤为人类提供粮食生产，以及非粮食原材料、土壤矿物等资源和产品，调节服务指土壤生态系统在温度调节、温室气体固定、土壤下渗、水体

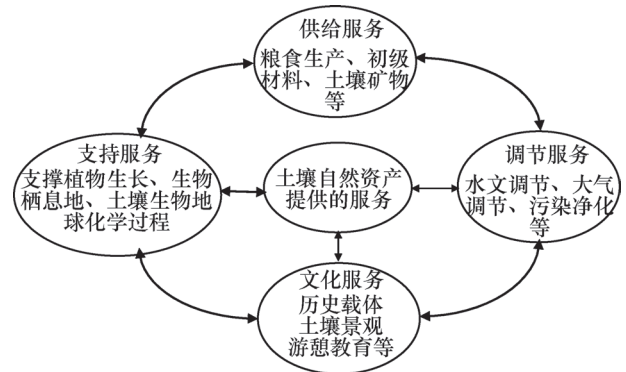


图1 土壤生态系统服务分类框架

Fig.1 Framework for classification of soil ecosystem services

净化、污染物吸纳等调节性效益。文化服务功能指土壤的文明遗产保存、提供游憩地、土壤景观、开展教育等方面的功效。支持服务指土壤生态系统产生和支撑其他服务的基础功能，包括支撑植物提供初级生产力、维持土壤生物地球化学过程、为生物多样性提供生境等。

## 2 土壤生态系统服务的量化和评价模型

### 2.1 土壤生态系统服务的量化与表征

目前生态系统服务量化与表征的方法主要有三类，分别是物质量评估法、价值量评估法和能值评估法。物质量评估法根据生态系统所提供的物质量的实际值来定量评价生态系统服务；价值量评估法则是将生态系统服务货币化，从经济学角度对生态系统服务进行评价；能值评估法将生态系统服务转化为某一种能量表示的当量。目前土壤生态服务主要利用价值量评估和物质量化方法。价值量评估法将土壤生态系统的各项服务使用统一的货币单位进行量化，易于不同服务类型和区域间的比较<sup>[6, 16]</sup>。然而，价值量评价法也存在较大的主观性，目前尚未形成公认的、适用于不同地域不同空间尺度的标准方法<sup>[17]</sup>。此外，价值量评价法只适用于部分土壤生态系统服务如生产功能可以较好地使用价值量表示，而部分调节功能以及绝大多数支持功能难以货币化。因此，相比较而言，物质的量化方法可利用生态过程模型，将生态系统服务的产品和功能用物质的单位进行表征，是土壤生态系统服务量化的适用方法。

生态系统服务量化与表征的另一个重要方向是空间制图<sup>[18]</sup>。传统的价值量化方法使用特定点位

值代表整个区域的估值,缺少考虑区域内的空间异质性。随着遥感、地理信息系统技术的发展,土地利用、土壤图、地形图等多个空间变量作为驱动因子被用于土壤生态系统服务的空间化计算和制图,推动土壤生态系统服务空间分布特征及其时间变化的可视化表达,为土地利用和生态经济政策提供更加直观的数据支持。目前生态系统服务制图研究主要包括为生态系统服务提供制图、需求制图、流动制图、权衡协同情景分析制图等<sup>[18-19]</sup>。

## 2.2 土壤生态系统服务评价模型

部分生态系统模型中的土壤模块可用于评价土壤生态系统服务。GUMBO (Global Unified Model of the Biosphere) 模型将土壤圈视为岩石圈的重要组成部分,结合土地利用/覆被变化、全球气温变化、大气二氧化碳含量、化石燃料开采、人类污染排放、世界生产总值等历史数据模拟了土壤形成的速度、土壤中碳元素和营养元素的变化通量、岩石圈的风化和侵蚀过程<sup>[20]</sup>。其土壤模块主要包括两个土壤生态系统服务:土壤形成和养分循环。GUMBO模型演示了1900—2000之间土壤形成和养分循环的物质质量、价值量以及总能源价值变化,并在五种不同情景下对2000—2100的变化趋势进行模拟。InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 模型是基于GIS平台的生态系统服务定量化评价模型<sup>[21]</sup>。其中评估土壤生态系统服务的项目包括生物多样性、碳储量、木材产量和土壤侵蚀等。此外,MIMES (Multi-scale Integrated Model of Ecosystem Services) 模型、ARIES (Artificial Intelligence for Ecosystem Services) 模型、Citygreen模型等生态系统服务评价模型包含了土壤生态系统的部分服务,可以应用于土壤生态系统服务的定量化和空间化模拟<sup>[22-26]</sup>。

独立的土壤生态系统服务评价模型发展尚处于起步阶段。LUCI (Land Utilisation and Capability Indicator) 是2013年基于GIS (Polyscape模型) 建构的生态系统服务评价软件<sup>[27]</sup>。LUCI模型探究各项土壤生态系统服务的空间协同作用及其权重,主要包括农业产值、碳吸收和碳储存、洪水、土壤侵蚀、沉积物转移、栖息地等。该模型通过模拟不同土地利用方式的土壤生态服务价值变化,并计算各项生态系统服务的空间协同作用和权重,实现在维持农业生产率前提下提高土壤固碳量、减少水土流失、改善水质、保护生物多样性等,为土地利用变

化决策提供参考。作为一个度量土壤生态系统服务价值的模型,LUCI弥补了土壤生态系统服务定量化模型的匮乏,但是其目前仍具有较大的局限性。过去针对土壤生态服务的研究着重于土壤静态属性的描述,土地利用的时间和空间变化对土壤物质组成、能量流动、结构功能的影响的研究十分有限,相关数据难以获取,该模型的数据库仍需要进一步补充和完善<sup>[28]</sup>。

## 3 土壤生态系统服务对城市化的响应

城市化是土壤生态系统变化的重要驱动力,张甘霖等<sup>[29]</sup>对城市化过程改变土壤的理性质、生物地球化学过程和生境等进行了系统的总结。但是当前开展城市化过程对土壤生态系统服务的实证研究和系统综合研究还相对少见。城市化对土壤环境的影响如何进一步的影响生态系统服务的发挥?笔者建立了驱动与反馈作用的分析框架。认为城市土地扩张、人口产业集聚,和由此产生的污染排放、人为干扰增强等构成土壤生态系统变化的驱动力;城市化的驱动下土壤的物质组成、性质和生物地球化学过程变化是生态系统服务发生变化的机理所在;进而直接影响土壤生态系统服务的产生或间接影响其他生态系统服务的供给等效应,最终又反馈到城市生态系统中,影响城市生态系统的运行。具体驱动与反馈的作用过程见图2。

针对目前尚缺少城市化过程对土壤生态系统服务影响综合研究的问题,本文主要总结了当前城市生态系统与土壤相关方面的研究进展,从供给服务、调节服务、文化服务和支持服务归纳城市土壤生态系统服务对城市化过程的响应,以期为进一步的研究提供参考。

### 3.1 供给服务

土壤生态系统的主要功能之一就是提供粮食、农作物、原材料等各项生物资源。城市土壤斑块破碎,地表封闭面积普遍达到50%以上,部分城市甚至超过70%<sup>[30]</sup>,土壤经过人为扰动、压实,大量城市建设和人类活动废弃物侵入土体,导致土壤生态系统生产粮食和原材料的能力大幅降低<sup>[31]</sup>。此外,受城市辐射的影响,城郊地区农业结构调整以适应城市生产生活的需要,耕地、林地向菜地、园地转变,城市化过程使土壤生态系统生产的产品发生变化。菲律宾碧瑶市在1988—2009年间,城市



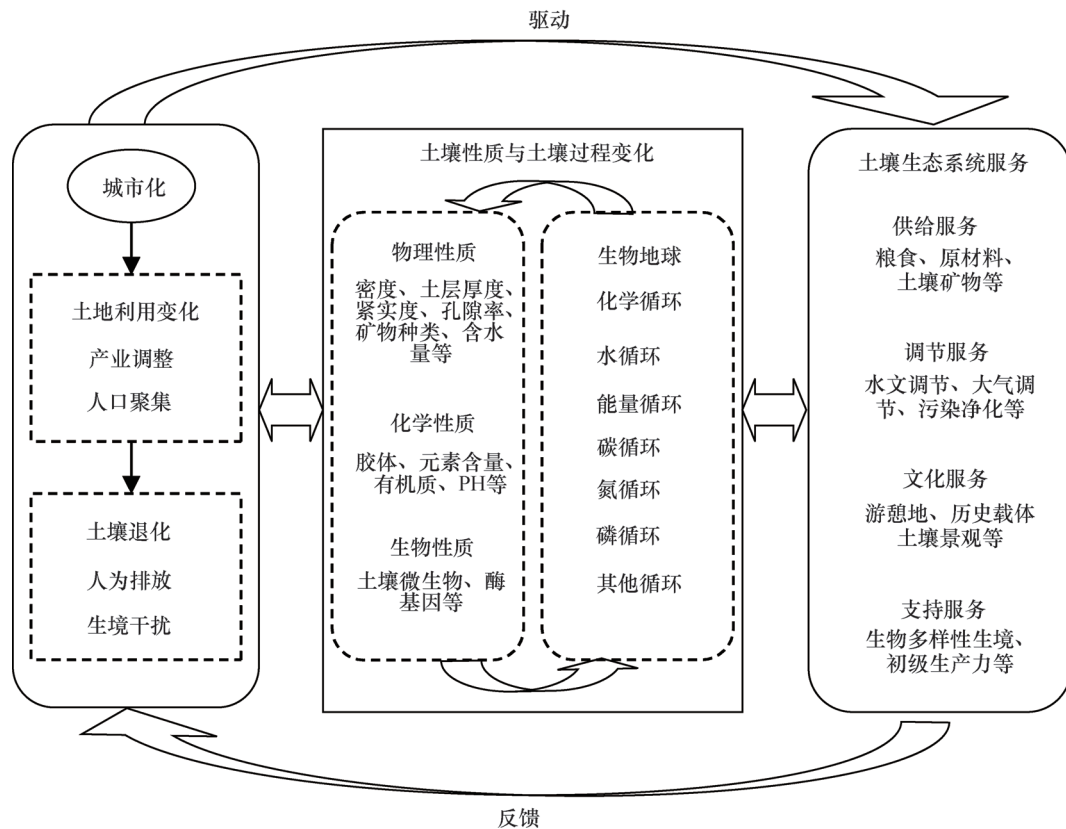


图2 城市化对土壤生态系统服务影响的驱动过程

Fig.2 Process of the effect of urbanization as driving force on soil ecosystem services

化导致生态系统服务价值下降超过60%，粮食生产价值有小幅下降<sup>[32]</sup>。厦门市生态系统服务价值中食物产品和非食物产品的价值量在2002—2007年间降幅达48.5%<sup>[33]</sup>。但也有局部地区在一定时间内随着城市化发展出现原材料生产价值提高的现象，如城市化的同时大量植树造林，林地供给服务价值提高<sup>[34]</sup>。但是在大的区域尺度和时间尺度上，城市化过程伴随着显著的粮食和原材料生产总供给服务下降。

### 3.2 水文调节服务

土壤生态系统参与调蓄地表径流、涵养水源、调节洪涝灾害、净化水体等过程，是水文调节过程的重要组成部分。城市化发展驱动下，地表不透水面增加，土壤机械压实，土体结构破坏，孔隙度减小。这些导致土壤对降水的调蓄作用减弱，城区下渗量、蒸发量、地下水补给减少，径流系数和径流深度增大<sup>[35]</sup>。城市化造成的土壤水文调节服务影响机理可用土壤—水文模型表征<sup>[36-37]</sup>。许有鹏等<sup>[38]</sup>基于Soil Conservation Service (SCS)方法模拟城市化进程中土地利用方式变化导致西苕溪流

域年径流深增加13 mm，年径流系数增加4%。土壤水文调节服务下降，增加城市洪涝灾害。Sheng等<sup>[39]</sup>对近百年洛杉矶城区扩张造成的流域洪水过程变化进行研究，发现在城市地区90%的降水形成地表径流，而郊区则只有75%，导致洛杉矶地区洪水灾害发生次数和规模大幅增加。Hollis等<sup>[40]</sup>总结前人的研究成果，得出城市化对中小规模的洪水过程影响较大，可以使小规模洪水出现次数增加数倍。

### 3.3 大气调节服务

土壤生态系统通过物质能量交换调节大气中的气体运动、能量变化和物质组成，是与大气圈联系最为紧密的生态系统之一。在城市化驱动下，土壤生态系统的大气调节功能主要发生以下几方面的变化。其一，土壤温度调节功能受到影响。城市化过程使土壤理化性质和物质能量交换的通量发生变化，封闭土壤的热容量和导热率较大，储热能力显著增强<sup>[41]</sup>，土壤生态系统服务的温度调节平衡受到破坏<sup>[42]</sup>。其二，土壤对温室气体固定和调节能力受影响。城市地区高强度的碳排放，使得城市开

放土壤有机碳含量和土壤碳通量增加<sup>[43-46]</sup>。但是大面积的城市土壤封闭阻止新鲜有机底物的输入导致土壤碳库下降,降低了土壤对温室气体的固定能力<sup>[47-49]</sup>。其三,城市土壤大面积封闭,导致土壤对污染物的吸纳和净化服务下降,污染物质直接或间接进入土壤,超出土壤的自净能力,污染物通过挥发和扬尘的方式产生二次污染<sup>[50]</sup>。

### 3.4 文化服务

文化服务是土壤生态系统服务的主要组成部分。Robinson等<sup>[14]</sup>提出土壤生态系统具有提供游憩地、历史载体保存、土壤景观、文化知识、墓园等文化服务。城市化必然导致一些自然文化服务减少甚至消失,但是为了满足城市文化生活的需要,部分土壤生态系统文化服务得到很好地开发保护。Tengberg等<sup>[51]</sup>介绍了瑞士西南部Glommen地区文化功能变化的案例研究,利用文化价值模型模拟该地区文化遗产的变化过程,发现该地区文化功能价值出现增长<sup>[52-53]</sup>。Bateman等<sup>[54]</sup>在不同的土地利用政策选择下预测英国生态系统服务变化趋势,得出娱乐功能价值发生增长。总体而言,文化服务由于其难以进行货币化、物质量化或者能值量化的特性,研究成果并不丰富。国内外大部分研究均将一种或几种较易进行量化的文化服务代替所有的土壤文化服务进行计算,其结果存在一定的偏差。

### 3.5 支持服务

土壤是陆地生态系统的支撑系统,为土壤动物和微生物提供生活场所,也为植物生长发育提供养分和空间<sup>[55-56]</sup>。城市化过程对土壤的初级生产力和生物多样性生境产生显著影响。初级生产力是土壤—植物生态系统提供人类福祉最重要的生态服务之一,土壤为植被的初级生产力提供了承载空间和养分,为生物地球化学循环提供了物质基础。城市化过程,地表硬化,导致区域初级生产力下降,改变了土壤的生物地球化学过程<sup>[57-59]</sup>。此外,土壤生态系统作为陆地生态系统中生物种类和数量最为丰富的亚系统<sup>[60]</sup>,受城市土壤封闭、压实、盐碱化、污染等影响,改变了生物多样性生境造成了城市生物多样性城市中心向郊区梯度减少<sup>[61-63]</sup>。生物多样性和土壤生态系统服务相互影响,生物多样性可以促进土壤生态系统服务的良性发展,而城市化导致的土地利用变化对生物多样性的维持造成了极大威胁<sup>[64-65]</sup>。

## 4 展望

生态系统服务评价提供了一种整合基础研究与政策制定的分析框架,在自然资源管理及生态系统保护方面得到广泛的认可。生态系统服务评价在土壤资源功能、价值显化和保护政策制定方面具有广泛的应用前景。但土壤生态系统服务分类、建模、空间表达以及对人为活动的响应等方面还存在不足,笔者认为土壤生态系统服务未来的研究重点体现在以下几个方面:(1)建立土壤生态系统服务分类体系与标准。在界定土壤生态系统服务范围,明确土壤在提供生态系统服务贡献的基础上,制定土壤生态系统服务分类体系与分类标准,推动土壤生态系统服务评价的规范化和区域可比性。(2)构建基于生态过程的土壤生态系统服务量化模型。以土壤基本的物理、化学和生物过程为基础,以土壤生态功能为核心,提出土壤生态系统服务的物质量化方法,建立适用于不同地域、不同尺度的土壤生态系统服务量化模型。(3)开展土壤生态系统服务制图与权衡研究。重视土壤生态系统服务的空间异质性分析和可视化表达。提出土壤生态系统服务权衡的分析工具,分析不同利益诉求下土壤生态系统服务的权衡和协同作用关系。(4)加强土壤生态系统服务对城市化的动态响应机制与过程研究。整合城市扩张模型和生态系统服务模型,利用空间建模技术对土壤生态系统的时空变化进行过程模拟,预测城市化影响下的土壤生态系统服务损失风险。

## 参考文献

- [1] Dominati E, Patterson M, Mackay A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 2010, 69 (9): 1858—1868
- [2] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21st century. *Science*, 2015, 348 (6235): 1261071—6
- [3] United Nations. World urbanization prospects: The 2011 revision. New York, 2012
- [4] De Groot. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 75 (3): 175—186
- [5] Daily G C. Nature's services: Societal dependence on

- natural ecosystems. Washington D C: Island Press, 1997
- [ 6 ] Costanza R, Adrge R, Degroot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387 ( 6330 ): 253—260
- [ 7 ] Holdren J P, Ehrlich P R. Human population and the global environment. *Readings in Environmental Impact*, 1974, 62 ( 3 ): 274
- [ 8 ] TEEB. The economics of ecosystems and biodiversity: Mainstreaming the economics of nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB. Malta: Progress Press, 2010
- [ 9 ] United Nations Environmental Program. Millennium ecosystem assessment ecosystems and human well-being: Synthesis. Washington D C: Island Press, 2005
- [ 10 ] Robinson D A, Hockley N, Cooper D M, et al. Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 1023—1033
- [ 11 ] Wall D H. Sustaining biodiversity and ecosystem services in soils and sediments. Washington D C: Island Press, 2004.
- [ 12 ] Weber J L. Accounting for soil in the SEEA. European Environment Agency, Rome, 2007
- [ 13 ] Zhang W, Ricketts T H, Kremen C, et al. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, 2007, 64 ( 2 ): 253—260
- [ 14 ] Robinson D A, Hockley N, Dominati E, et al. Natural capital, ecosystem services, and soil change: Why soil science must embrace an ecosystems approach. *Vadose Zone Journal*, 2012, 11 ( 1 ): 10.2136/vzj2011.0051
- [ 15 ] R Lal, K Lorenz, et al. Ecosystem services and carbon sequestration in the biosphere. Springer, 2013
- [ 16 ] 欧阳志云, 王如松. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999, 10 ( 5 ): 635—640. Ouyang Z Y, Wang R S. Ecosystem services and its ecologic economic valuation ( In Chinese ). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10 ( 5 ): 635—640
- [ 17 ] 鲁春霞, 谢高地, 肖玉, 等. 青藏高原生态系统服务功能的价值评估. *生态学报*, 2005, 24 ( 12 ): 2749—2755. Lu C X, Xie G D, Xiao Y, et al. Ecosystem diversity and economic valuation of Qinghai-Tibet Plateau ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 24 ( 12 ): 2749—2755
- [ 18 ] 张立伟, 傅伯杰. 生态系统服务制图研究进展. *生态学报*, 2014, 34 ( 2 ): 316—325. Zhang L W, Fu B J. The progress in ecosystem services mapping: A review ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 ( 2 ): 316—325
- [ 19 ] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 等. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式. *地理学报*, 2012, 66 ( 12 ): 1618—1630. Li S C, Liu J L, Zhang C Y, et al. The research trends of ecosystem services and the paradigm in geography ( In Chinese ). *Acta Geographica Sinica*, 2012, 66 ( 12 ): 1618—1630
- [ 20 ] Boumans R, Costanza R, Farley J, et al. Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the GUMBO model. *Ecological Economics*, 2002, 41 ( 3 ): 529—560
- [ 21 ] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7 ( 1 ): 4—11
- [ 22 ] 杨园园, 戴尔阜, 付华. 基于InVEST模型的生态系统服务功能价值评估研究框架. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 33 ( 3 ): 41—47. Yang Y Y, Dai E F, Fu H. The assessment framework of ecosystem service value based on INVEST model ( In Chinese ). *Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition*, 2012, 33 ( 3 ): 41—47
- [ 23 ] 陈爽, 王进. Citygreen模型在南京城市绿地固碳与削减径流效益评估中的应用. *应用生态学报*, 2007, 18 ( 6 ): 1293—1298. Chen S, Wang J. Application of Citygreen model in benefit assessment of Nanjing urban greenbelt in carbonfixation and runoff reduction ( In Chinese ). *Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 ( 6 ): 1293—1298
- [ 24 ] Taylor A F, Wiley A, Kuo F E, et al. Growing up in the inner city green spaces as places to grow. *Environment and Behavior*, 1998, 30 ( 1 ): 3—27
- [ 25 ] Bagstad K J, Villa F, Johnson G W, et al. ARIES - artificial intelligence for ecosystem services: A guide to models and data, version 1.0. ARIES Report Series, 2011
- [ 26 ] Boumans R, Costanza R. The multiscale integrated Earth Systems model ( MIMES ): The dynamics, modeling and valuation of ecosystem services. *Issues in Global Water System Research*, 2007, 2: 104—107
- [ 27 ] Jackson B, Pagella T, Sinclair F, et al. Polyscape: A GIS mapping framework providing efficient and spatially explicit landscape-scale valuation of multiple ecosystem services. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 112: 74—88
- [ 28 ] Robinson D A, Jackson B M, Clothier B E, et al. Advances in soil ecosystem services: Concepts, models, and applications for earth system life support. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12 ( 4 ): 1—13



- [29] 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 G L, 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
- [30] Scalenghe R, Marsan F A. The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 90 (1): 1—10
- [31] Rawlins B G, Harris J, Price S, et al. A review of climate change impacts on urban soil functions with examples and policy insights from England, UK. *Soil Use and Management*, 2013: 1—16
- [32] Estoque R C, Murayama Y. Examining the potential impact of land use/cover changes on the ecosystem services of Baguio City, the Philippines: A scenario-based analysis. *Applied Geography*, 2012, 35 (1): 316—326
- [33] 石龙宇, 崔胜辉, 尹锴, 等. 厦门市土地利用/覆被变化对生态系统服务的影响. 地理学报, 2010, 65 (6): 708—714. Shi L Y, Cui S H, Yin K, et al. The impact of land use/cover change on ecosystem service in Xiamen (In Chinese). *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 65 (6): 708—714
- [34] 赵丹, 李锋, 王如松. 城市土地利用变化对生态系统服务的影响——以淮北市为例. 生态学报, 2013, 33 (8): 2343—2349. Zhao D, Li F, Wang R S. Effects of land use change on ecosystem service value: A case study in Huaibei City, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (8): 2343—2349
- [35] Hundecha Y, Bárdossy A. Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology*, 2004, 292 (1): 281—295
- [36] USDA (United States Department of Agriculture Soil Conservation Service). *Urban hydrology for small watersheds//Technical Release No.55*. Colorado: Water Resources Publications, 1986: 15—17
- [37] 徐康, 吴绍华, 陈东湘, 等. 基于水文效应的城市增长边界的确定. 地理科学, 2013, 33 (8): 979—985. Xu K, Wu S H, Chen D X, et al. The urban growth boundary determination based on hydrology effect: Taking Xinminzhou as an example (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33 (8): 979—985
- [38] Xu Y P, Yin Y X, Chen Y. City development and water safety in Yangtze River Delta under the background of climate change. *China Water Resources*, 2009 (9): 42—45
- [39] Sheng J, Wilson J P. Watershed urbanization and changing flood behavior across the Los Angeles metropolitan region. *Natural Hazards*, 2009, 48 (1): 41—57
- [40] Hollis G E. The effect of urbanization on floods of different recurrence interval. *Water Resources Research*, 1975, 11 (3): 431—435
- [41] 彭少麟, 周凯, 叶有华, 等. 城市热岛效应研究进展. 生态环境, 2005, 14 (4): 574—579. Peng S L, Zhou K, Ye Y H, et al. Research progress in urban heat island (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2005, 14 (4): 574—579
- [42] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. 生态学报, 2013, 33 (4): 1042—1050. Chen L D, Sun R H, Liu H L. Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: Progresses, problems, and perspectives (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (4): 1042—1050
- [43] Pouyat R V, Yesilonis I D, Nowak D J. Carbon storage by urban soils in the United States. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35 (4): 1566—1575
- [44] Kaye J P, McCulley R L, Burke I C. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems. *Global Change Biology*, 2005, 11 (4): 575—587
- [45] 罗上华, 毛齐正, 马克明, 等. 城市土壤碳循环与碳固持研究综述. 生态学报, 2012, 32 (22): 7177—7189. Luo S H, Mao Q Z, Ma K M, et al. A review of carbon cycling and sequestration in urban soils (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (22): 7177—7189
- [46] A Koerner B, M Klopatek J. Carbon fluxes and nitrogen availability along an urban-rural gradient in a desert landscape. *Urban Ecosystems*, 2010, 13 (1): 1—21
- [47] Wei Z, Wu S, Yan X, et al. Density and stability of soil organic carbon beneath impervious surfaces in urban areas. *PloS one*, 2014, 9 (10): e109380
- [48] Wei Z, Wu S, Zhou S, et al. Soil organic carbon transformation and related properties in urban soil under impervious surfaces. *Pedosphere*, 2014, 24 (1): 56—64
- [49] Wei Z, Wu S, Zhou S, et al. Installation of impervious surface in urban areas affects microbial biomass, activity (potential C mineralization), and functional diversity of the fine earth. *Soil Research*, 2013, 51 (1): 59—67
- [50] 李玉武, 刘咸德, 李冰, 等. 绝对主因子分析法解析北京大气颗粒物中铅来源. 环境科学, 2009, 29 (12): 3310—3319. Li Y W, Liu X D, Li B, et al.

- Source apportionment of aerosol Lead in Beijing using absolute principal component analysis (In Chinese). *Chinese Journal of Environmental Science*, 2009, 29 (12): 3310—3319
- [51] Tengberg A, Fredholm S, Eliasson I, et al. Cultural ecosystem services provided by landscapes: Assessment of heritage values and identity. *Ecosystem Services*, 2012, 2: 14—26
- [52] Shamsuddin S, Sulaiman A B, Amat R C. Urban landscape factors that influenced the character of George Town, Penang Unesco World Heritage Site. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012, 50: 238—253
- [53] Stephenson J. The Cultural Values model: An integrated approach to values in landscapes. *Landscape and urban planning*, 2008, 84 (2): 127—139
- [54] Bateman I J, Harwood A R, Mace G M, et al. Bringing ecosystem services into economic decision-making: Land use in the United Kingdom. *Science*, 2013, 341 (6141): 45—50
- [55] Lavelle P, Decaëns T, Aubert M, et al. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42: S3—S15
- [56] Buee M, Reich M, Murat C, et al. 454 Pyrosequencing analyses of forest soils reveals an unexpectedly high fungal diversity. *New Phytologist*, 2009, 184 (2): 449—456
- [57] Wu S, Zhou S, Chen D, et al. Determining the contributions of urbanization and climate change to NPP variations over the last decade in the Yangtze River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 397—406
- [58] Deyong Y, Hongbo S, Peijun S, et al. How does the conversion of land cover to urban use affect net primary productivity? A case study in Shenzhen City, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149 (11): 2054—2060
- [59] Sun Z G, Yang Q, Li J L. The influence of land use and cover change on net primary productivity of middle-sized and small cities. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28 (15): 291—296
- [60] 傅声雷. 土壤生物多样性的研究概况与发展趋势. *生物多样性*, 2007, 15 (2): 109—115. Fu S L. A review and perspective on soil biodiversity research. *Biodiversity Science*, 2007, 15 (2): 109—115
- [61] 周青, 胡玉洁, 黄晓华. 城市生物多样性价值与保护. *自然杂志*, 2005, 25 (6): 340—344. Zhou Q, Hu Y J, Huang X H. The value and conservation on urban biodiversity (In Chinese). *Chinese Journal of Nature*, 2005, 25 (6): 340—344
- [62] Walker J S, Grimm N B, Briggs J M, et al. Effects of urbanization on plant species diversity in central Arizona. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7 (9): 465—470
- [63] 毛齐正, 马克明, 邬建国, 等. 城市生物多样性分布格局研究进展. *生态学报*, 2013, 33 (4): 1051—1064. Mao Q Z, Ma K M, Wu J G, et al. An overview of advances in distributional pattern of urban biodiversity (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (4): 1051—1064
- [64] 傅伯杰, 吕一河, 高光耀. 中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展. *自然杂志*, 2012, 34 (5): 261—272. Fu B J, Lü Y H, Gao G Y. Major research progresses on the ecosystem service and ecological safety of main terrestrial ecosystems in China (In Chinese). *Chinese Journal of Nature*, 2012, 34 (5): 261—272
- [65] 林先贵, 胡君利. 土壤微生物多样性的科学内涵及其生态服务功能. *土壤学报*, 2008, 45 (5): 892—900. Lin X G, Hu J L. Science connotation and ecological service function of soil microbial diversity (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (5): 892—900

## SOIL ECOSYSTEM SERVICES: CONCEPT, QUANTIFICATION AND RESPONSE TO URBANIZATION

Wu Shaohua Yu Yanna Zhu Jiang Li Baojie Zhou Shenglu

(School of Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract** Soil ecosystem is an important component of the global terrestrial ecosystem. Soil provides man with food, regulates the water and atmosphere, and supports the other ecosystems in cycling. Human beings have been relying on and will continue to have to rely on the services provided by soil for survival, while human activities have profoundly altered the soil ecosystems across the globe since the industrial revolution,

especially urbanization, of which the effect is mostly irreversible. China is right now in the process of ongoing rapid urbanization, but little attention has been paid to losing of the soil ecosystem services. It is, therefore, critically important to understand processes and mechanism of urbanization affecting soil ecosystem services for healthy urban development. For that reason, a summary is presented in this paper of development processes of the definition, classification and assessment of soil ecosystem services. Soil ecosystem services can be defined as welfares provided to human beings by soil, a specific natural capital. Monetary value and material quantity are the two major scales for quantification of ecosystem service. As quantification of material production may be done by modeling ecological processes, it is an applicable method for quantification of soil ecosystem services. Although quite a number of eco-process-based ecosystem service evaluation models, such as GUMBO, ARIES and InVEST, are available for use to evaluate soil ecosystem services, none of them is specific to evaluation of soil ecosystem services.

Urbanization processes may affect soil ecosystem services both positively and negatively, but mainly the latter. Urbanization alienates large tracts of productive land, thus leading decline of the services of supplying food, fiber, wood, etc. to the mankind. Urban pavements form an impermeable seal over the soil, blocking or hindering water exchange between the pedosphere, atmosphere and hydrosphere. Besides, it also seriously restrains the regulating service of the soil ecosystem, like water storage, carbon sequestration, pollution purification and so on. Nevertheless, urbanization is also a coin of two sides. It helps improve some local ecosystem services, like cultural services, increase in forest land area in arid regions as a result of proper urban management. Although researches were done in the past from various angles to study effects of urbanization on the supply, regulation and culture services of the ecosystem, little has been reported on comprehensive systems study on responses of soil ecosystems to rapid urbanization in service.

To make up the gap, a framework is proposed for analysis of processes and mechanisms of the soil ecosystem responding to urbanization. Loss of ecological land, population convergence and pollutant discharge are held to be the main driving forces of the changes in soil ecosystems, like changes in composition, physico-chemical and biogeochemical processes of the soil. The changes, in turn, affect the soil ecosystem producing and delivering services, which will eventually be embodied as feedback in the urban ecosystem. In view of the shortages in the research on classification and modeling of soil ecosystems, focal points are recommended for researches in future, that is, to establish a soil ecosystem service classification system with standards; to build up an eco-process based model for quantification of soil ecosystem services; to unfold researches on mapping and weighing of soil ecosystem services; and to intensify researches on mechanisms and processes of the responses of soil ecosystem services to urbanization. It is hoped that more and more people will be concerned about and involved in researches on soil ecosystem services, and that the findings of the researches will be applied to decision-making of the government on management of soil resource and construction of eco-civilization.

**Key words** Soil ecosystem services; Urban soil; Ecological risk; Global change; Land use

(责任编辑: 檀满枝)



CONTENTS

**Reviews and Comments**

- The historical venation of soil science in the past 30 years—Based on the bibliometric analysis ..... Song Changqing, Tan Wenfeng ( 968 )  
 Soil ecosystem services: Concept, quantification and response to urbanization ..... Wu Shaohua, Yu Yanna, Zhu Jiang, et al. ( 977 )

**Research Articles**

- Analysis on spatial-temporal variability of soil organic matter in Henan Province based on Soil Taxonomy ..... Li Ling, Zhang Shaokai, Wu Kening, et al. ( 989 )  
 Relationship between illite crystallinity ( IC ) value and weathering degree of Quaternary Red Clay in southern Anhui Province, Southeast China ..... Liu Lihong, Hu Xuefeng, Ye Wei, et al. ( 1000 )  
 Micromorphology of ancient plow layer of paleosol in the Lajia Ruins in the Guanting Basin, Minhe County, Qinghai Province ..... Zhang Yuzhu, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. ( 1013 )  
 Prediction of vertical distribution of soil nitrogen content in soil profile using spectral imaging technique ..... Li Shuo, Wang Shanqin, Shi Zhou ( 1022 )  
 Estimation of thickness of soil layer on typical karst hillslopes using a ground penetrating radar ..... Wang Sheng, Chen Hongsong, Fu Zhiyong, et al. ( 1030 )  
 Spatio-temporal distribution of dry-wet alteration in surface soil layer of the Huaihe River Basin ..... Cao Yongqiang, Xu Dan, Cao Yang ( 1042 )  
 Erosion on dunes of overburden and waste slag in Shenfu coalfield and prediction ..... Guo Mingming, Wang Wenlong, Li Jianming, et al. ( 1056 )  
 Dynamics of soil water evaporation from soil mulched with sand-gravels in stripe ..... Zhao Dan, Li Yi, Feng Hao ( 1067 )  
 Effect of pH and three kinds of anions on selenium absorption and desorption in purple soil ..... Zhou Xinbin, Yu Shuhui, Xie Deti ( 1076 )  
 Release kinetics and bioavailability of nonexchangeable potassium in soil ..... Li Ting, Wang Huoyan, Chen Xiaoqin, et al. ( 1086 )  
 Effects of bio-ash ameliorating red soil in acidity ..... Shi Renyong, Li Jiuyu, Xu Renkou, et al. ( 1095 )  
 Effect of wheat straw biochar on high chlorinated benzene sorption process and mechanism ..... Li Yang, Song Yang, Wang Fang, et al. ( 1104 )  
 Sorption kinetics and mechanism of naphthalene on corn-stalk-derived biochar with different pyrolysis temperature ..... Zhang Mo, Jia Mingyun, Bian Yongrong, et al. ( 1114 )  
 Toxicity of deca-brominated diphenyl ether to *Caenorhabditis elegans* ..... Wang Yingli, Chen Jiansong, Yang Yuxiang, et al. ( 1122 )  
 Effects of clover and straw decomposition on soil microfaunal community ..... Wang Hui, Gui Juan, Liu Manqiang, et al. ( 1133 )  
 Response of soil nematodes to soil salinization induced by seawater intrusion in coastal areas ..... Wang Chengnan, Zhang Weidong, Wang Xuefeng, et al. ( 1142 )  
 Relationships of N<sub>2</sub>O emission with abundance and composition of denitrifying microorganisms in soil aggregates ..... Zhou Hanchang, Zhang Wenzhao, Liu Yi, et al. ( 1151 )  
 Optimizing blending ratio of controlled release N fertilizer for spring maize based on grain yield, N efficiency, and economic benefit ..... Wang Yin, Feng Guozhong, Zhang Tianshan, et al. ( 1164 )

**Communications and Comments**

- Status quo and problems in setting-up and naming of basic taxon-Soil family in Chinese Soil Taxonomy ..... Yi Chen, Ma Yuxin, Yang Jinling, et al. ( 1172 )

**Research Notes**

- Effects of drought and rehydration on photosynthetic characteristics of artificial algal crusts ..... Wu Li, Yang Hong, Lan Shubin, et al. ( 1179 )  
 Effect of irrigation with saline water on plant root distribution and evolution of aeolian sandy soil in shelterbelts along desert highways ..... Li Congjuan, Tang Junyan, Gao Pei, et al. ( 1186 )  
 Distribution of Cu ( II ) desorption rate in variable charge soils relative to concentrations of NaNO<sub>3</sub> and its affecting factors ..... Zhang Zhengqin, Luo Wenjian, Chen Yong, et al. ( 1194 )

**Cover Picture:** Toxicity of deca-brominated diphenyl ether ( BDE-209 ) to *Caenorhabditis elegans* ( by Wang Yingli )

# 《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

## 土 壤 学 报

### Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

## ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 5 Sep., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会  
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008  
电话: 025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica  
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China  
Tel: 025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正  
主 管 中 国 科 学 院  
主 办 中 国 土 壤 学 会  
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng  
Superintended by Chinese Academy of Sciences  
Sponsored by Soil Science Society of China  
Undertaken by Institute of Soil Science,  
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社  
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司  
总发行 科 学 出 版 社  
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717  
电话: 010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company  
Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China  
Tel: 010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation  
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156