

DOI: 10.5846/stxb201801310263

赵方凯, 杨磊, 陈利顶, 李刚, 孙龙, 李守娟. 城郊生态系统土壤安全: 问题与挑战. 生态学报, 2018, 38(12): - .

Zhao F K, Yang L, Chen L D, Li G, Sun L, Li S J. Soil security in peri-urban ecosystems: problems and challenges. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

城郊生态系统土壤安全: 问题与挑战

赵方凯^{1,2}, 杨磊¹, 陈利顶^{1,2,*}, 李刚³, 孙龙¹, 李守娟^{1,2}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

摘要: 土壤作为地球表层系统物质和能量迁移转化的关键节点, 其生态功能受到城市化快速发展的严重影响, 土壤安全面临严峻的挑战。城郊生态系统受到城市和乡村的双重影响, 具有复杂的景观结构和剧烈的动态变化, 土壤安全问题更为突出和复杂。基于文献计量学方法, 对 1990—2017 年发表的相关文献进行了统计, 梳理和总结了城郊生态系统土壤安全研究的趋势和热点问题, 对城郊生态系统中土壤安全面临的问题, 及其特殊性、复杂性进行了重点论述, 明确了当前快速城市化发展过程中城郊土壤安全研究面临的问题和挑战。建议今后的城郊生态系统土壤安全研究应加强区域尺度上的综合和不同城市发展模式下地区之间的比较, 明确城市扩张对城郊生态系统土壤安全的影响机制; 建立和完善基于“土壤安全”的城郊生态系统服务评价框架, 深入研究城郊生态系统格局—过程—服务之间的关系; 明确解析城郊土壤主要污染物来源及其复合污染状况, 并结合区域特征, 因地制宜开展科学的生态规划, 优化城郊景观格局, 提升城郊地区土壤安全与生态系统服务功能; 明确土壤安全在城郊生态系统可持续发展目标中的重要性, 建立科学合理的管理政策。

关键词: 城市化; 城郊生态系统; 土壤安全; 景观格局

Soil security in peri-urban ecosystems: problems and challenges

ZHAO Fangkai^{1,2}, YANG Lei¹, CHEN Liding^{1,2,*}, LI Gang³, SUN Long¹, LI Shoujuan^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

Abstract: Soil is considered the key connection for material and energy transfer and transformation in the Earth's surface layer. Soil's components and ecological functions have been dramatically affected by rapid urbanization in recent decades. This is especially true for peri-urban ecosystems. A peri-urban ecosystem comprises the interaction and transition zones between urban and rural or natural ecosystems. Soils in peri-urban ecosystems are identified with both urban and rural/natural ecosystems' structural and functional features, and are prone to being affected by urbanization pressures. Soils in peri-urban ecosystems provide essential life-support functions and ecosystem services for urban and rural residents, including food supply, water purification, water conservation, contamination interception, leisure and entertainment services, cultural services, and more. Under rapid urbanization, a large area of agricultural and natural landscapes are converted to urban landscapes. Soils in peri-urban ecosystems therefore tend to be significantly disturbed because of increasing human activities, which change the soil processes and reduce the quality and diversity of soil functions such as

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41571130064)

收稿日期: 2018-01-31; 修订日期: 2018-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liding@rcees.ac.cn

food production, pollution attenuation, hydrological cycling, and energy balance. The inherent conflicts between urbanization and soil security have been studied for a long time. As urbanization levels in peri-urban ecosystems have increased, soil security problems in peri-urban ecosystems have been a key issue in recent studies. This study reviews published literature concerning soil security in peri-urban ecosystems and aims to contribute to scientific understanding of the interrelations between soil security and urbanization. Statistical analysis showed that the number of published papers concerning peri-urban ecosystems rapidly increased after 2000, especially in the past 5 years. Many studies concerning soil security were focused on urbanization's influence on soil processes in urban areas, including cropland loss, food production, climate change, and other processes linked with soils. However, only a limited number of studies that focused on peri-urban areas were found. The soil security problems in peri-urban ecosystem areas were often ignored by both rural and urban ecosystems research. In this review, the particularity and complexity of soil security in peri-urban ecosystems are discussed. In summary, we suggest that future peri-urban studies should focus on the following issues: (1) exploring comparative studies at a large scale under different urban sprawl modes, (2) exploring the tradeoff of ecosystem services in the framework of soil security in peri-urban ecosystems, and perspectives on current solutions for soil security in peri-urban ecosystems are proposed, (3) exploring the sources of contaminants in soil and their co-contamination in peri-urban ecosystems, and optimizing landscape patterns to promote soil security and ecosystem services, and (4) considering the sustainable development goals of peri-urban ecosystems and highlighting the multi-dimensional role of soil security in sustainable policy and management. Because soils in peri-urban ecosystems have their own unique set of socioeconomic and ecological features, soil security should be emphasized for understanding the environmental response to global urbanization.

Key Words: urbanization; peri-urban ecosystem; soil security; landscape pattern

城市化及其区域生态安全响应是当前全球研究的热点问题之一。联合国研究报告表明,2007 年底全球城市人口已经超过 50%,至 2050 年全球将会有 96 亿人,约 50%—68%的人口将居住在城市中^[1-2]。随着城市的快速发展,城市化进程对城市及其周边生态系统造成强烈影响,由此带来的生态与环境问题日益成为人们关注的焦点。研究表明,城市化所带来的环境压力通过土地利用/土地覆被变化^[3]等方式,带来气候变化及极端气候事件增多^[4]、环境污染加剧^[5]、生物多样性降低^[6]、资源和能源短缺^[7]等一系列问题,并且在特大城市群地区,土壤生态安全问题尤为突出^[8-10]。

城郊生态系统(Peri-Urban Ecosystems)位于城市边缘地带,是城市生态系统向农业/自然生态系统的过渡区域,由于地处城市生态系统和农业/自然生态系统的过渡或转化地带,城郊生态系统兼具两者的组成特征,既有大量建成区以及公园等休闲娱乐景观,也有较大比例的农田、草地、森林、湿地等景观^[11]。城郊生态系统结构复杂,景观较为破碎,居民点之间相对较为分散,人口密度低于城市但又高于乡村。由于城郊生态系统处于过渡地带,因而城郊生态系统没有非常明确的边界。土壤是控制地球表层物质、能量和信息迁移转化的重要节点,城郊生态系统中土壤的生态过程、水文过程、生物地球化学循环过程承载着维持城市和农村生产、生活密切相关的生态系统服务^[12]。面向城市生态系统,城郊生态系统提供食物供给、水质净化、废弃物循环利用、休闲娱乐等生态系统服务,而面向农村/自然生态系统,城郊生态系统则提供产品供给等城市生态系统的部分功能。由于土壤容易受到人类活动的影响,在快速城市化过程中,城郊地区土壤安全面临着更为严峻的挑战^[13]。研究表明,全球农业用地预计需要增加 3.2—8.5 亿 hm^2 并提供超过现在一倍的食物供给,才能满足未来城市化发展的需求^[12]。然而城市扩张导致了大量优质耕地(尤其是城郊地区)的减少,从而增加了城郊农业的生产压力^[14]。另一方面,城郊生态系统由于其特殊的地理位置,使得城郊土壤更易受到城市污水、污泥、固体废弃物、废气、降尘等的污染。城郊农业为提高生产能力和资源利用效率,对城市和农村废弃物的资源和利用已经成为普遍现象,这也带来土壤重金属污染、抗生素及抗性基因污染等问题^[11, 15-16]。

虽然城市化进程中的生态环境响应及其交互作用得到了广泛关注,但是城郊生态系统及其土壤安全问题

的研究仍然较为缺乏。本文通过总结 1990—2017 年城郊生态系统文献发表的分布及其趋势,对城郊生态系统中土壤安全的研究热点进行识别,并系统综述了城郊生态系统的特征及其土壤生态系统服务,明确了城郊生态系统土壤安全问题研究面临的问题和挑战,指出其研究的重要性、必要性和紧迫性,以期为城市群生态安全和生态系统服务的提升提供理论指导。

1 研究现状及特点

1.1 城郊生态系统研究现状

1.1.1 中国的城市化进程

通过对比中国城市和农村人口变化,以及全球城市和农村人口变化可以发现^[17],从 1955—2016 年,我国城市化水平呈现稳步上升趋势,在 2011 年左右城市人口比例超过了 50%,标志着我国已全面进入城市化时代(图 1)。而人口的增长是城市化发展的重要驱动力^[18]。另外根据《中国统计年鉴》公布的我国耕地面积,以及《中国城市统计年鉴》公布的我国城市建成区面积数据,通过陈印军^[19]提出的方法对土地调查的耕地面积进行归一化处理,分别得到城市面积扩张速率及耕地面积减少速率(图 2)。结果表明,随着我国城市化的快速发展,城市面积不断增加,耕地面积则逐年减少;城市扩张速率与耕地面积减少速率呈现相似的变化趋势,并且在 2002—2003 年左右二者均达到最高值。

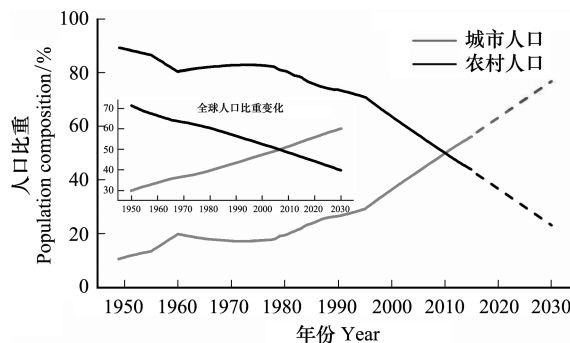


图 1 中国城市/农村人口变化及预测

Fig. 1 Temporal changes and forecast of urban and rural population from 1990 to 2030

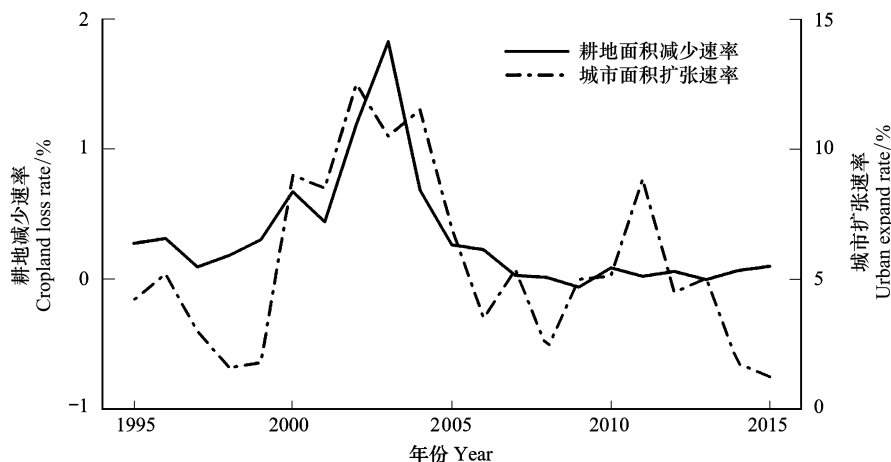


图 2 中国城市面积扩张速率及耕地面积减少速率

Fig. 2 Urban expansion rate and cultivation land loss rate in China from 1995 to 2015

1.1.2 城郊生态系统相关研究文献发表趋势

本文以 Web of Sciences 和中国知网作为主要数据库,以 peri-urban/城郊以及 soil/土壤作为关键词,检索时间跨度为 1990—2017 年,共检索到 3472 篇文献,其中城郊土壤安全相关研究共 675 篇。分别以我国城市化速率开始快速增加的 2000 年和我国全面进入城市化的 2011 年为分界线,将检索到的城郊生态系统研究文献划分为 3 个阶段(图 3)。第一阶段从 1990—2002 年,文章发表量逐年上升,但是增长趋势较为平缓,并且城郊土壤安全问题的相关研究所占比例较低;第二阶段从 2002—2011 年,文章发表量迅速上升,并且城郊土壤安全相关研究的比例也有了显著提高;第三阶段为 2011 年至今,我国全面进入城市化时代,土壤安全问题在城郊生态系统相关研究中的比例呈现一个跳跃式增长。由图 3 可以看出,2002 年以后关于城郊生态系统

及其土壤安全问题的研究迅速增加,并且城郊土壤安全研究愈加受到我国学者的重视。

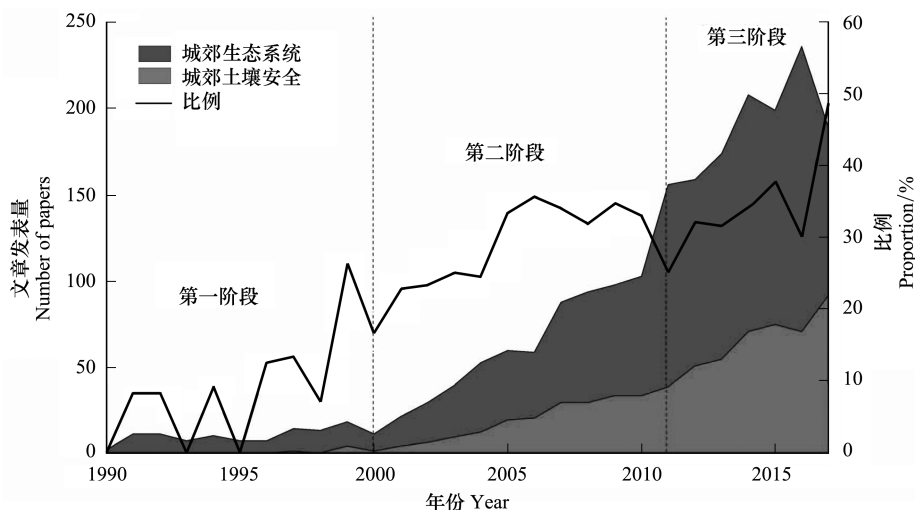


图3 城郊生态系统土壤安全文章发表量及其比例

Fig.3 Number of papers on soil security in peri-urban ecosystem and its proportion

1.1.3 城郊生态系统土壤安全研究热点

通过对相近关键词进行了归并处理,统计显示,1990—2017年城郊生态系统土壤安全问题的研究主要集中在食物安全、气候变化、生态系统服务、土壤质量、水资源安全及能源安全6个方面(图4)。其中,食物安全问题尤其受到全球学者的广泛关注。通过将6个重点研究方向的关键词进行合并整理,表1列出了各研究方向排名前五的关键词。其中,食物安全方向主要关注城郊农业生产、食物供给能力以及土地利用的影响,表明城郊生态系统在城市化的影响下,其农业生产及食物供给能力受到土地利用变化的强烈影响。另外,城郊生态系统中温室效应、碳循环、生物多样性保护、土壤肥力及污染、水源涵养及水质净化、可再生生物能源等方面也开展了大量的研究,但是在土壤安全的框架内,对其相互之间耦合关系的研究较为缺乏。

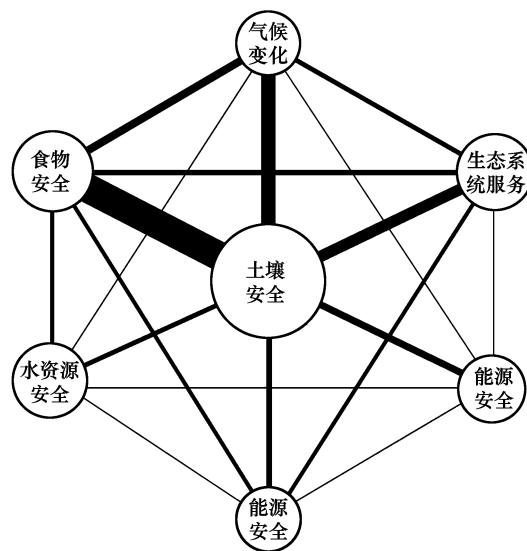


图4 城郊生态系统土壤安全研究热点分布

Fig.4 Research hotspots on soil security in peri-urban ecosystem

1.2 城郊土壤生态系统特征

1.2.1 景观格局特征

生态系统的结构、格局及其承载的过程不同,其提供的生态系统服务也不同^[20]。城市化过程能够显著改变周边生态系统结构及其过程,从而改变其承载的生态功能,最终影响相应的生态系统服务^[21]。城市化过程中城郊景观的变化及其时空格局,主要通过应用景观指数开展以下两个个方面的研究,(1)从理论方面,探索沿城市化的时空梯度景观格局变化的普遍规律,(2)从方法方面,通过景观指数结合城市化梯度,从而准确定量分析城市化的影响^[3, 22-23]。

研究表明,城市化对生态系统结构的直接影响主要表现为土地利用/覆被的变化^[17-18],而城郊生态系统由于其独特的地理位置,受到城市扩张的直接影响并且影响强烈,土地利用格局极为复杂,导致城郊区域景观多样性、复杂性及破碎化程度均高于城市生态系统和农村/自然生态系统(图5)。例如在中国台北地区,城市中心以及农村/自然生态系统的景观多样性指数约在0.2左右,而在城郊地区则高达1.4^[23]。而景观均匀度

指数则呈现相反趋势,在美国麦迪逊市,城郊区域的景观均匀度指数只有约 0.5,而城市与农村区域则达到 0.6—1.0 左右^[22]。城郊生态系统同时具有城市景观和农业景观,也具有林地、草地、湿地等景观类型,并且沿城乡梯度,随着城市化程度的提高,城市景观比例明显上升,而农业景观等其他景观类型的比例则呈现下降趋势^[22]。城郊生态系统随着城市的扩张逐渐沿着城市—乡村梯度向外推移,其景观结构也处于不断的变化之中。城郊生态系统景观类型多样、景观结构复杂,城市建成区与村镇、农田、园地、林地、水域等在空间上呈犬牙交错的分布,人类干扰强烈,具有较低的景观均匀度,景观的动态变化也最为剧烈。相比而言,城市、农业/自然生态系统均有较为均一的景观格局,斑块密度较低、最大斑块面积较高,而城郊景观的多样性和空间分布的复杂性导致其具有较高的斑块密度和较低的最大斑块面积^[22-23]。

表 1 各研究方向排名前 5 的高频关键词及其比例

Table 1 High-frequency keywords in research hotspots on soil security in peri-urban ecosystem

研究方向 Research	排名 Rank	关键词 Key words	频次 Number	比例 Proportion/%
食物安全 Food security	1	食物安全	390	3.64
	2	可持续农业	309	2.88
	3	作物及蔬菜	151	1.41
	4	生产及生产力	101	0.94
	5	土地利用及耕种	96	0.90
气候变化 Climate change	1	气候变化	190	1.77
	2	温室气体	47	0.44
	3	干旱	29	0.27
	4	全球变暖	14	0.13
	5	植被覆盖指数	11	0.10
生态系统服务 Ecosystem services	1	碳储量	96	0.90
	2	生物多样性及保护	84	0.78
	3	生态系统服务	47	0.44
	4	生物量	40	0.37
	5	农林复合生态系统	30	0.28
土壤质量 Soil quality	1	土壤肥力	82	0.77
	2	土壤有机碳	74	0.69
	3	土壤污染	58	0.54
	4	土壤退化	51	0.48
	5	营养	42	0.39
水资源安全 Water security	1	水分平衡	39	0.36
	2	水资源	32	0.30
	3	水分利用效率	32	0.30
	4	水资源管理	26	0.24
	5	水质	20	0.19
能源安全 Energy security	1	生物燃料	37	0.35
	2	能源	29	0.27
	3	生物能源	24	0.22
	4	可再生能源	10	0.09
	5	生物柴油	9	0.08

另一方面,城郊生态系统处于不断变化的过程中。随着城市化的发展,城郊生态系统逐渐向城市生态系统转变,其中的景观类型大部分转变为城市景观(大部分为居住、工业及商业用地),农田等其他景观类型逐渐减少。在城市化的“前—中—后”阶段,城郊生态系统特征与其空间变化趋势相似,景观多样性/破碎化先逐渐上升,而在城市化后期呈现下降趋势^[3, 22-23],与此同时,城郊生态系统也逐渐随着城市的扩张而向外扩

展,因而城郊生态系统的边界也非常难以确定。总体而言,城郊生态系统具有较高的景观空间异质性、复杂的景观结构以及显著的动态变化特征。

1.2.2 生态系统服务特征

城郊土壤生态系统服务与其景观组成密切相关。城市化过程通过改变城郊生态系统的景观格局,从而带来了生态过程的变化。通过改变城郊生态系统的土地利用方式、调整产业结构和增加人口密度,城市化导致其土壤物理、化学、生物性质的变化,进而改变土壤的生物地球化学循环、水分循环、养分迁移和转化、能量循环等过程,最终改变这些过程承载的生态系统服务^[15, 25-26]。综合全球多个城市的研究发现,城郊生态系统是土壤供给功能和居民需求变化最为剧烈的区域。研究表明,沿城乡梯度,能源、水资源、食物等的需求迅

速降低,而供给能力逐渐升高,尤其是在城市核心区域,几乎完全丧失了自然资源供给能力(图6)^[25, 27-28]。而在城郊区域,尤其是城市边缘区域,随着工业化和城市化的发展,大量工厂和商业设施的建设,及人口密度的显著上升,导致其对生态系统服务的供给和需求与城市区域没有显著差异;在远郊区域由于缺乏城市化干扰,其自然资源供给能力较强,而需求较低,接近于农业/自然生态系统^[27]。城市化导致的城郊土壤生态系统服务的改变,也会导致城郊区域的供需失衡,为了调节这种失衡关系,城市化过程中又增加了对城郊生态系统土壤资源的管理,进而又加剧了土壤过程的变化^[29]。例如在中国,从1990年至2015年化肥使用量增涨了75%左右,而大量氮磷钾等营养元素的输入,显著改变了土壤中营养元素循环、微生物群落以及粮食产量等^[30-31]。通过对生态系统服务的定量化描述,研究认为食物供给能力在城市化过程中损失最大。例如在北京区域,从2013—2040年其损失预计达到20.70%,约为其他生态系统服务损失的3—7倍,其中农田损失造成的食物供给能力下降约占全部的99.31%^[32]。

农业景观在城郊生态系统中占较大比例,甚至是主要景观类型,是维持城市和城郊生态系统正常运转的重要组成部分^[33-35]。农业景观中土壤主要以生产和供给功能为主,其生态系统服务会随着种植类型和利用强度的不同而存在较大的差异^[36-37]。随着城市化导致的耕地减少,大量现代农业技术被应用于城郊农业生产,以提高农业生产力,满足生产需求。例如,温室大棚被广泛应用于城郊农业生产,其也构成了城郊地区一种典型的人工农业景观,并且其相对于传统农业,食物供给能力提高了约2.3倍^[38]。另外,由于城市人口对食物多样性的需求,城郊地区相应地提供了丰富的农产品种类,例如蔬菜、粮食、肉类、蛋类及水产品等。并且由于城郊到城市的供给链较短,供给成本相对较低,使得其农产品价格相对低廉,因此城郊农业对城市生态系统的食物供给占有较大的比重。研究表明,亚洲和非洲部分城市中城郊农业提供了超过60%的叶类蔬菜,超过65%的家禽肉类产品,以及超过54%的粮食作物,并且在城市化进程中,城郊农业的食物供给能力呈现出了极大的增长趋势^[34, 39]。Chen^[31]对我国18个城市的研究发现,城郊农业提供了90%的蔬菜和50%的肉类产品。也有我国特大城市群地区的研究表明,北京城郊农业总价值估算量在2008年达到了1101亿元,其中生产功能约占28%,保证了北京40%左右的蔬菜、肉类和蛋类供给^[40];而2006年上海城郊地区食物供给总价值约为4038万元^[41]。尤其是近年来生态农业的发展,使得城郊农业的生态系统服务价值得到显著增长。除供给功能外,城郊农业也可以提供土壤保持、废弃物处理、养分物质循环、水文调节等服务。

多样的景观类型和结构使得城郊土壤能够提供更为多样的生态系统服务(图6),而在城市/农村生态系统中,均一的景观类型导致土壤生态系统服务的多样性则相对较低^[42]。除了农业土壤提供上述功能以外,城郊土壤还可以为城市生态系统提供较大比例的能源、水资源、建筑材料、休闲娱乐和文化场所。其他景观类型

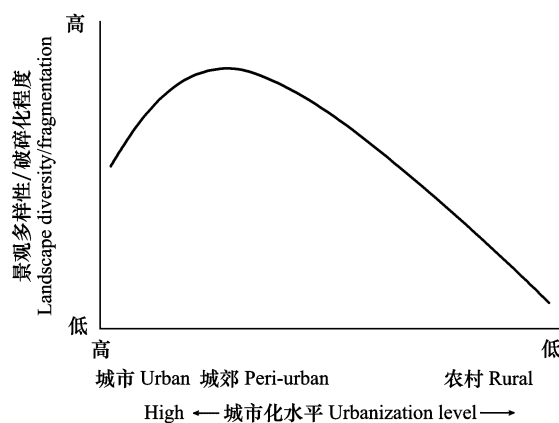


图5 城市化梯度对景观特征的影响^[3, 22-24]

Fig.5 Threshold of fragmentation and compositional diversity in relationship to the urbanization level

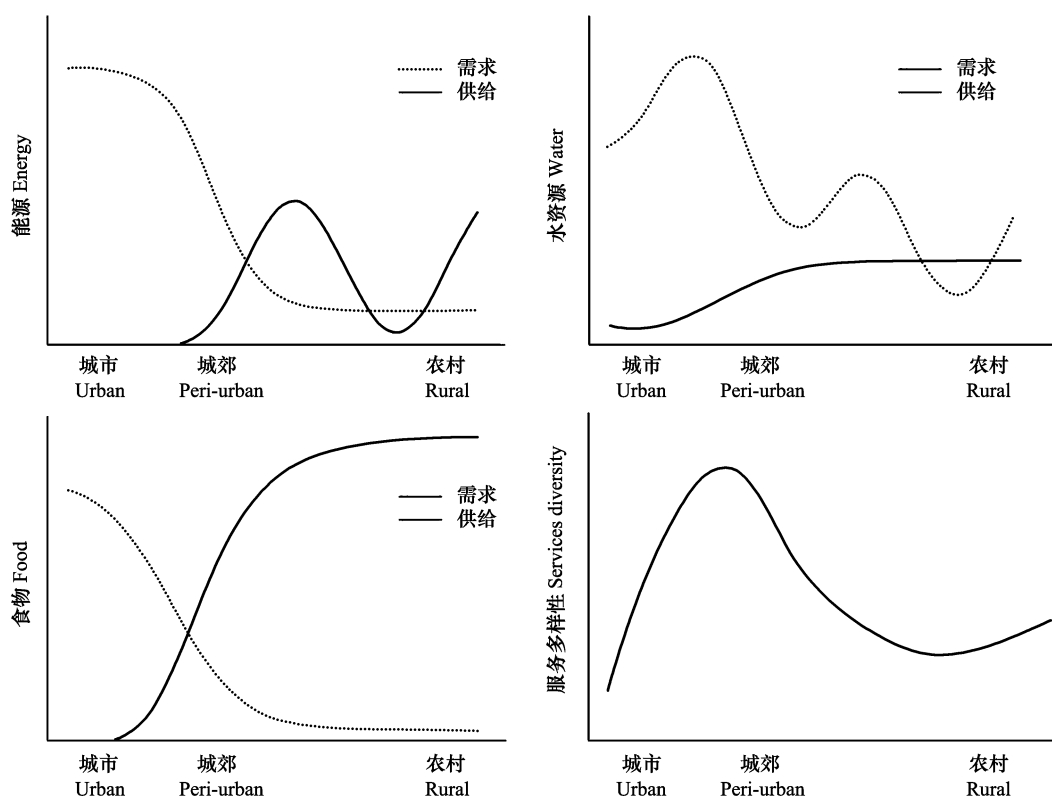
图 6 沿城乡梯度土壤生态系统服务的变化^[25, 27-28]

Fig.6 Changes of soil ecosystem services along urbanization gradient

(森林、草地、湿地等)中的土壤同样具有重要的生态功能,其生态服务价值主要体现在气候调节、固碳、水源涵养、水质净化以及生物多样性维持等方面。例如,有研究认为相比城市土壤,城郊土壤具有相对较高的固碳功能和生物多样性。这是由于城郊地区具有较大的绿地面积(公园、森林等),而且由于城市观赏花木需求较高,城郊区域大量种植外来观赏植物,拥有了较高的生物多样性;同时较高比例的绿地面积使得城郊土壤碳固定及水源涵养能力高于城市土壤^[43],并且城郊土壤的水质净化能力则与其土壤养分保留能力具有显著相关性^[42]。

2 城郊土壤安全面临的问题

由于城郊生态系统直接面对城市扩张带来的生态环境压力,面临着更为复杂的土壤安全问题,尤其是食品安全、土壤质量以及土壤污染 3 个方面,影响着城郊土壤的关键生态系统服务,与城市和农村人类生产和生活关系最为密切和直接。

2.1 食物安全问题

过去 20 年中,我国耕地减少率和城市扩张率保持较为一致的趋势(图 2),并且城市扩张所导致的耕地减少主要发生在城郊区域^[11, 44-46]。据估计,到 2030 年,全球城市扩张将导致耕地面积减少 1.8%—2.4%,在发展中国家则将达到 5%—10%,并且全球约 25%的耕地面积减少将发生在我国^[14]。尤其是我国城市化程度最高的长三角、珠三角及京津冀地区,耕地面积减少更为严重^[31]。耕地减少会导致粮食产量的下降。截至 2000 年,全球城市扩张导致粮食产量下降 3.4%—4.2%^[14]。研究表明,从 1992 年至 2015 年,我国城市扩张导致粮食产量下降了 124.5 万 t,占我国年均粮食产量的 2.2%^[30],预计到 2030 年我国城市扩张将导致粮食产量下降 8%—10%^[14]。

2.2 土壤质量问题

城郊生态系统中包括建设用地开发、采石、筑路等在内的各种城市化活动,这些均能加剧土壤侵蚀,研究

认为城市化建设阶段是土壤流失发生的主要时期,土壤侵蚀速率的空间分布从大到小依次为:城郊>城市>农村^[47]。地表不透水面的增加也极大地增加了城郊地区的雨洪风险。相较于距离较远的农业/自然生态系统,城市及城郊大量工业活动显著增加了大气酸沉降对城郊土壤的作用。例如大量 SO₂ 的排放,导致我国城市降雨观测点中,40%的降雨 pH 小于 5.6^[31],酸雨会改变一系列土壤过程,长期影响下能加速土壤退化。另一方面,与农业生态系统相似,城郊农业大量使用化肥,且其使用量逐年升高^[30],化肥中的养分元素不能全部被吸收利用,其中氮和钾的利用率为 30%—60%,磷的利用率仅为 2%—25%,大量养分流失造成非点源污染,并且长期大量施用化肥同样改变了土壤性质,强烈干扰土壤本身的物质和养分循环^[31,48]。相比于农业生态系统较长的生产周期,城郊农业为提高经济效益及满足城市食物供给需求,大量种植蔬菜等短生产期作物,频繁的耕作对土壤造成了极大的压力^[47]。在以上各种因素的长期作用下,出现了土壤肥力降低、土壤质量下降以及土壤退化等一系列问题^[49-50],城郊土壤安全受到严峻挑战。

2.3 土壤污染问题

研究表明,我国大部分污染土壤位于城郊高强度耕作区域^[31]。并且由于城郊生态系统的异质性与多样性,城郊土壤的污染来源也呈现多样化和复杂性的特征,其不仅受到农业污染源的强烈影响,也受到城市生活污染源及工业污染源的影响,这些强烈的人为干扰对城郊生态系统土壤安全造成了巨大的威胁^[51-52]。城郊农业以高效益、高效率、高生产力为目标,因而大量城市及农业废弃物被应用于城郊农业生产中,例如污水灌溉、污泥施肥、禽畜粪便施用等,使得城郊土壤成为有机废弃物的重要承载者和消化分解者。消纳废弃物、分解畜禽粪便等是城郊农业生态系统的一项独特而重要的服务。研究表明,增施有机肥不但可以减少废物处理成本,还可以改良土壤,提高土壤肥力,改善农田生态系统的养分循环,增加作物产量^[51]。但大量有机肥及城市有机废弃物的使用也导致城郊土壤出现较高的重金属、抗生素以及抗性基因污染^[53-56],并且通过植物吸收和富集,这些污染物进入食物链威胁食物安全和人类健康。调查发现,珠三角城市群城郊重金属污染土壤比例达到了 50%,并且我国主要城市中城郊生产的农产品中,约有 30% 存在重金属超标问题^[31]。另一方面,城市及城郊的部分工业生产导致了严重的大气和水体污染,并通过大气沉降、污水灌溉、地下水渗漏等加剧了城郊土壤污染,危及粮食安全^[57]。由于城郊区域具有较大面积的未利用土地,加上城市到城郊较为发达的交通系统,大部分城市废弃物被排入城郊生态系统,例如垃圾填埋场、污水处理厂等。这些废弃物含有大量并且多样的污染物,包括氮素污染物、重金属、持久性有机污染物等,能够显著改变当地土壤性质及生物地球化学循环过程,并且通过地表径流等迁移到较远的区域造成周边土壤污染^[57-58]。

3 城郊土壤安全面临的挑战

城市化给城郊生态系统带来一系列土壤安全问题,并且由于城郊生态系统特殊的景观格局和剧烈的动态变化,导致这一问题尤为特殊和复杂。

3.1 土壤供给功能及其可持续性的降低

为了保证城市生态系统的食物供给,城郊生态系统需要保持足够面积的优质耕地,但城市的发展是一个必然的趋势,城市化导致耕地面积的持续减少,降低了城郊生态系统的供给能力;同时城市人口的增加进一步加大了供给需求,增加了城郊生态系统可持续供给的压力。虽然现在交通运输业的快速发展以及全球粮食贸易能够在一定程度上弥补城郊供给能力的不足,但并不能完全平衡城市生态系统的供需问题。自从我国进入快速城市化阶段以来,粮食生产与消费量的比例逐渐降低,大量粮食进口导致自给能力迅速下降^[30]。解决城市化带来的耕地减少问题主要通过两个方面:一是提高耕作技术,增加生产力;二是扩大农田面积,例如侵占绿地、围湖造田等,但这种会严重影响其他生态系统服务功能。由于我国现有耕地扩张潜力几乎达到最大水平,根据生态系统服务的权衡与协同关系制定合理有效的土地利用政策和策略,是保证城郊生态系统土壤供给能力的重要研究方向。

3.2 土壤生态系统服务多样性的降低

随着城市化的发展,城郊生态系统景观格局趋向单一化(城镇化),而人类的需求和活动愈加多样性,这

对城郊土壤的多功能性提出了更高的要求^[59]。城市扩张不仅侵占农业景观,同样会导致生态绿地等其他景观类型面积的减少,建设用地和不透水面的增加,导致城郊生态系统中土壤的调节能力不断下降,以及洪涝灾害、热岛效应、土壤退化等风险的显著提升^[29, 33]。在满足城市发展的同时,城郊土壤提供的生态系统服务的种类和质量都大大降低。人类的干预使得城郊土壤自身及外界环境不断发生变化,因而城郊土壤生态功能维持和生产功能的提升是目前城市生态、地球关键带科学等研究的重要议题。根据沈仁芳和滕应^[13]提出的土壤安全战略,在快速城市化进程中,应以保证土壤资源安全与可持续利用为目标,从多个方面考量城郊土壤生态系统服务。由于城郊生态系统类型的多样性和时间、空间上的变化,其生态系统服务之间的平衡关系难以把握^[43]。当前,急需开展城郊土壤多种生态系统服务之间权衡与协同关系的研究,解析快速城市化影响下不同区域之间土壤生态系统服务的供需平衡关系。

3.3 土壤污染治理挑战的增加

快速城市化导致城郊生态系统中土壤环境的变化,部分地区出现严重的土壤污染及食物污染^[60],而由于城郊生态系统土壤污染来源的多样性和各种污染物之间相互作用的复杂性,导致城郊土壤兼有重金属、固体废弃物、农药化肥等多种污染源造成的综合污染问题,十分难以处理和修复。城郊生态系统处于城市生态系统和农业/自然生态系统的交错地带,城市生活污染、工业污染以及农业面源污染等交叉污染造成城郊地区土壤环境污染严重且负荷较大,城郊景观结构的复杂性更加剧了城郊土壤污染处理的难度。现有城郊土壤污染治理,大多数只是针对特定污染物,而多种污染源对城郊土壤的影响是一个复杂的整体作用,对单一污染源进行治理并不能有效地解决城郊土壤污染问题,也并不能有效提升城郊土壤安全。维持城郊土壤安全,需要针对城郊土壤中的污染物来源及其在环境中的迁移转化特征开展系统研究,解析其在环境中的空间分布特征、时间动态和生态风险,为城郊土壤生态系统服务的提升提供科学基础。

3.4 现有对策的局限性

面对城市化过程带来的城郊生态系统土壤安全问题,已有一定的应对措施,例如城郊生态农业、城郊生态系统修复及生态规划等。现代城郊农业逐渐改变其传统生产的模式,在保证生产功能的基础上,通过调整结构,发展生态农业及休闲观光农业,同时提供水土保持、水源涵养、调节气候、消纳废弃物等生态系统服务^[36]。我国现阶段城郊生态农业发展仍处于初步阶段,城郊农业的生态功能、休闲娱乐和文化功能等尚未得到充分的开发和利用,并且由于对生态农业的认识不足,部分地区仍然存在着高污染的生产模式,给当地土壤资源造成危害^[53, 61]。开展城郊生态系统修复是改善和解决城郊土壤安全问题的重要措施。这既包括与城市生态系统相连接的风景游览区以及河堤防护林等,也包括城郊森林公园、农田防护林以及库渠河滩等^[49, 62-65]。与城市相比,城郊植被重建面积较大并且相对集中,具有良好的生态和景观效益,这不仅能提高城郊生态系统的调节和支持能力(如改善区域小气候、防治污染、保持土壤、改善水源涵养、促进生物多样性保护等),还能增强城郊生物传粉能力、降低生物有害性等^[66-67]。但需要指出的是,不合理的植被重建有可能加剧城郊生态系统的压力,如单一树种的植树造林、未考虑当地水资源承载力的植被重建、生物入侵等。为解决城郊生态系统土壤安全问题,提高其作为城市生态系统缓冲区的缓冲能力,需要结合城市、城郊、乡村的功能定位及资源和生态承载力,充分考虑城郊土壤面临的关键问题,进行科学的生态规划,优化城郊景观格局,提升城郊地区土壤安全与生态系统服务功能。

4 结语

全球城市化的快速发展促进了城郊生态系统及其土壤安全的研究,其中城郊生态系统在食品安全、气候变化、生态系统服务、土壤质量、水资源和能源安全等方面获得了国内外学者的广泛关注。城郊生态系统位于城市和农业/自然生态系统的过渡地带,景观类型多样,破碎化程度高,生态系统结构和功能独特和复杂,并且具有较高的动态变化特征。受城郊景观类型和结构的影响,城郊土壤的生态系统服务类型多样。城市化过程影响了城郊地区土壤的生态过程及其承载的生态系统服务,并且其土壤安全受到城市和农业/自然生态系统

的双重影响。快速城市化过程给城郊土壤带来一系列安全问题,如耕地面积减少、食物供给功能降低,土壤中污染物来源多样且成分复杂,土壤质量下降等,但在区域尺度上和不同城市发展模式下,城郊生态系统土壤安全的研究较为缺乏;为提升城郊土壤安全及其生态系统服务,当前研究中同样需要建立和完善基于“土壤安全”的城郊生态系统服务评价框架,依据城市—城郊—乡村生态系统服务的权衡和协同关系制定合理的土地利用策略,维持和提升城郊土壤的生产功能和供给能力;明确城郊地区土壤主要污染物来源,系统开展污染物在城郊土壤中的迁移和转化过程研究,解析其复合污染状况,提升土壤安全;结合区域特征,因地制宜开展科学的生态规划,优化城郊景观格局,提升城郊地区土壤安全与生态系统服务功能,维护城市和区域生态安全;并需要进一步明确土壤安全在城郊生态系统可持续发展目标中的重要性,建立科学合理的管理政策。

参考文献 (References):

- [1] Deng X Z, Huang J K, Rozelle S, Zhang J P, Li Z H. Impact of urbanization on cultivated land changes in China. *Land Use Policy*, 2015, 45: 1-7.
- [2] Cumming G S, Buerkert A, Hoffmann E M, Schlecht E, Von Cramon-Taubadel S, Tschamtk T. Implications of agricultural transitions and urbanization for ecosystem services. *Nature*, 2014, 515(7525): 50-57.
- [3] Deng J S, Wang K, Hong Y, Qi J G. Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 92(3/4): 187-198.
- [4] Zhou L M, Dickinson R E, Tian Y H, Fang J Y, Li Q X, Kaufmann R K, Tucker C J, Myneni R B. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(26): 9540-9544.
- [5] You H Y. Impact of urbanization on pollution-related agricultural input intensity in Hubei, China. *Ecological Indicators*, 2016, 62: 249-258.
- [6] Seto K C, Güneralp B, Hutyra L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(40): 16083-16088.
- [7] Srinivasan V, Seto K C, Emerson R, Gorelick S M. The impact of urbanization on water vulnerability: a coupled human-environment system approach for Chennai, India. *Global Environmental Change*, 2013, 23(1): 229-239.
- [8] Wang S J, Ma H T, Zhao Y B. Exploring the relationship between urbanization and the eco-environment—A case study of Beijing-Tianjin-Hebei region. *Ecological Indicators*, 2014, 45: 171-183.
- [9] Zhao F J. Soil and human health. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(1): 158-158.
- [10] Li G, Sun G X, Ren Y, Luo X S, Zhu Y G. Urban soil and human health: a review. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(1): 196-215.
- [11] Zhu Y G, Reid B J, Meharg A A, Banwart S A, Fu B J. Optimizing Peri-URban Ecosystems (PURE) to re-couple urban-rural symbiosis. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 1085-1090.
- [12] 朱永官, 李刚, 张甘霖, 傅伯杰. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务. *地理学报*, 2015, 70(12): 1859-1869.
- [13] 沈仁芳, 滕应. 土壤安全的概念与我国的战略对策. *中国科学院院刊*, 2015, 30(4): 468-476.
- [14] Bren d'Amour C, Reitsma F, Baiocchi G, Barthel S, Güneralp B, Erb K H, Haberl H, Creutzig F, Seto K C. Future urban land expansion and implications for global croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(34): 8939-8944.
- [15] Peng J, Tian L, Liu Y X, Zhao M Y, Hu Y N, Wu J S. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: thresholds identification. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 706-714.
- [16] 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟. 长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征. *环境科学*, 2017, 38(12): 5237-5246.
- [17] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [18] Kleemann J, Inkoom J N, Thiel M, Shankar S, Lautenbach S, Fürst C. Peri-urban land use pattern and its relation to land use planning in Ghana, West Africa. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 165: 280-294.
- [19] 陈印军, 易小燕, 方琳娜, 杨瑞珍. 中国耕地资源与粮食增产潜力分析. *中国农业科学*, 2016, 49(6): 1117-1131.
- [20] Bastian O, Haase D, Grunewald K. Ecosystem properties, potentials and services-The EPPS conceptual framework and an urban application example. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 7-16.
- [21] Luederitz C, Brink E, Gralla F, Hermelingmeier V, Meyer M, Niven L, Panzer L, Partelow S, Rau A L, Sasaki R, Abson D J, Lang D J, Wamsler C, Von Wehrden H. A review of urban ecosystem services: six key challenges for future research. *Ecosystem Services*, 2015, 14: 98-112.
- [22] Weng Y C. Spatiotemporal changes of landscape pattern in response to urbanization. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 81(4): 341-353.

- [23] Yeh C T, Huang S L. Investigating spatiotemporal patterns of landscape diversity in response to urbanization. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 93(3/4): 151-162.
- [24] 付刚, 肖能文, 乔梦萍, 齐月, 闫冰, 刘高慧, 高晓奇, 李俊生. 北京市近二十年景观破碎化格局的时空变化. *生态学报*, 2017, 37(8): 2551-2562.
- [25] Arnaiz-Schmitz C, Schmitz M F, Herrero-Jáuregui C, Gutiérrez-Angonese J, Pineda F D, Montes C. Identifying socio-ecological networks in rural-urban gradients: diagnosis of a changing cultural landscape. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 625-635.
- [26] Sun X, Crittenden J C, Li F, Lu Z M, Dou X L. Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta Metropolitan area, USA. *Science of the Total Environment*, 2018, 622-623: 974-987.
- [27] Kroll F, Müller F, Haase D, Fohrer N. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. *Land Use Policy*, 2012, 29(3): 521-535.
- [28] Requena F. Rural-urban living and level of economic development as factors in subjective well-being. *Social Indicators Research*, 2016, 128(2): 693-708.
- [29] Zhang D, Huang Q X, He C Y, Wu J G. Impacts of urban expansion on ecosystem services in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China: a scenario analysis based on the Shared Socioeconomic Pathways. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 125: 115-130.
- [30] He C Y, Liu Z F, Xu M, Ma Q, Dou Y Y. Urban expansion brought stress to food security in China: evidence from decreased cropland net primary productivity. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 660-670.
- [31] Chen J. Rapid urbanization in China: a real challenge to soil protection and food security. *CATENA*, 2007, 69(1): 1-15.
- [32] Xie W X, Huang Q X, He C Y, Zhao X. Projecting the impacts of urban expansion on simultaneous losses of ecosystem services: a case study in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2018, 84: 183-193.
- [33] Baró F, Gómez-Baggethun E, Haase D. Ecosystem service bundles along the urban-rural gradient: insights for landscape planning and management. *Ecosystem Services*, 2017, 24: 147-159.
- [34] Pribadi D O, Pauleit S. The dynamics of peri-urban agriculture during rapid urbanization of Jabodetabek Metropolitan Area. *Land Use Policy*, 2015, 48: 13-24.
- [35] Bian Z X, Wang S, Wang Q B, Yu M, Qian F K. Effects of urban sprawl on arthropod communities in peri-urban farmed landscape in Shenbei New District, Shenyang, Liaoning Province, China. *Scientific Reports*, 2018, 8: 101.
- [36] Zasada I. Multifunctional peri-urban agriculture—A review of societal demands and the provision of goods and services by farming. *Land Use Policy*, 2011, 28(4): 639-648.
- [37] Yu D, Wang D Y, Li W B, Liu S H, Zhu Y L, Wu W J, Zhou Y H. Decreased landscape ecological security of peri-urban cultivated land following rapid urbanization: an impediment to sustainable agriculture. *Sustainability*, 2018, 10(2): 394.
- [38] Chang J, Wu X, Wang Y, Meyerson L A, Gu B J, Min Y, Xue H, Peng C H, Ge Y. Does growing vegetables in plastic greenhouses enhance regional ecosystem services beyond the food supply? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(1): 43-49.
- [39] Padgham J, Jabbour J, Dietrich K. Managing change and building resilience: a multi-stressor analysis of urban and peri-urban agriculture in Africa and Asia. *Urban Climate*, 2015, 12: 183-204.
- [40] 李洪庆, 刘黎明. 现代城郊农业功能定位和布局模式探讨——以北京市为例. *城市发展研究*, 2010, 17(8): 62-67.
- [41] Su S L, Li D L, Hu Y N, Xiao R, Zhang Y. Spatially non-stationary response of ecosystem service value changes to urbanization in Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 2014, 45: 332-339.
- [42] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [43] Radford K G, James P. Changes in the value of ecosystem services along a rural-urban gradient: a case study of Greater Manchester, UK. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 109(1): 117-127.
- [44] Simon D. Urban environments: issues on the peri-urban fringe. *Annual Review of Environment and Resources*, 2008, 33(1): 167-185.
- [45] Zhao S Q, Da L J, Tang Z Y, Fang H J, Song K, Fang J Y. Ecological consequences of rapid urban expansion: Shanghai, China. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(7): 341-346.
- [46] Tian L, Liang Y L, Zhang B. Measuring residential and industrial land use mix in the peri-urban areas of China. *Land Use Policy*, 2017, 69: 427-438.
- [47] 李桂林, 陈杰, 孙志英, 檀满枝. 城市化过程对土壤资源影响研究进展. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 234-240.
- [48] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, David M B, Drinkwater L E, Holland E, Johnes P J, Katzenberger J, Martinelli L A, Matson P A, Nziyheba G, Ojima D, Palm C A, Robertson G P, Sanchez P A, Townsend A R, Zhang F S. Nutrient imbalances in agricultural development. *Science*, 2009, 324(5934): 1519-1520.

- [49] Binns J A, Maconachie R A, Tanko A I. Water, land and health in urban and peri-urban food production; the case of Kano, Nigeria. *Land Degradation & Development*, 2003, 14(5): 431-444.
- [50] Oliver M A, Gregory P J. Soil, food security and human health; a review. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66(2): 257-276.
- [51] Midmore D J, Jansen H G P. Supplying vegetables to Asian cities: is there a case for peri-urban production? *Food Policy*, 2003, 28(1): 13-27.
- [52] 崔健, 都基众, 马宏伟, 杨泽, 李霄, 王晓光. 沈阳市城郊表层土壤有机污染评价. *生态学报*, 2012, 32(24): 7874-7882.
- [53] Li C, Chen J Y, Wang J H, Ma Z H, Han P, Luan Y X, Lu A X. Occurrence of antibiotics in soils and manures from greenhouse vegetable production bases of Beijing, China and an associated risk assessment. *Science of the Total Environment*, 2015, 521-522: 101-107.
- [54] Wong S C, Li X D, Zhang G, Qi S H, Min Y S. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China. *Environmental Pollution*, 2002, 119(1): 33-44.
- [55] Zhou Y T, Niu L L, Zhu S Y, Lu H J, Liu W P. Occurrence, abundance, and distribution of sulfonamide and tetracycline resistance genes in agricultural soils across China. *Science of the Total Environment*, 2017, 599-600: 1977-1983.
- [56] 赵方凯, 杨磊, 乔敏, 李守娟, 孙龙. 土壤中抗生素的环境行为及分布特征研究进展. *土壤*, 2017, 49(3): 428-436.
- [57] Grimm N B, Foster D, Groffman P, Grove J M, Hopkinson C S, Nadelhoffer K J, Pataki D E, Peters D P. The changing landscape: ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, 6(5): 264-272.
- [58] Pastor J, Hernández A J. Heavy metals, salts and organic residues in old solid urban waste landfills and surface waters in their discharge areas: determinants for restoring their impact. *Journal of Environmental Management*, 2012, 95(Supplement): S42-S49.
- [59] Lovell S T, Johnston D M. Creating multifunctional landscapes: how can the field of ecology inform the design of the landscape? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(4): 212-220.
- [60] Liu Y L, Wen C, Liu X J. China's food security soiled by contamination. *Science*, 2013, 339(6126): 1382-1383.
- [61] Singh S, Kumar M. Heavy metal load of soil, water and vegetables in peri-urban Delhi. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 120(1/3): 79-91.
- [62] Monkiedje A, Spiteller M, Fotio D, Sukul P. The effect of land use on soil health indicators in peri-urban agriculture in the humid forest zone of southern Cameroon. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(6): 2402-2409.
- [63] Tzoulas K, Korpela K, Venn S, Yli-Pelkonen V, Kasperczyk A, Niemela J, James P. Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: a literature review. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 81(3): 167-178.
- [64] 陈杰, 陈晶中, 檀满枝. 城市化对周边土壤资源与环境的影响. *中国人口·资源与环境*, 2002, 12(2): 72-74.
- [65] 刘兴元, 梁天刚, 陈全功. 兰州市城郊农业生态系统的服务功能及可持续发展对策. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 170-173.
- [66] Fu W, Lü Y H, Harris P, Comber A, Wu L H. Peri-urbanization may vary with vegetation restoration: a large scale regional analysis. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 29: 77-87.
- [67] Temperton V M, Higgs E, Choi Y D, Allen E, Lamb D, Lee C S, Harris J, Hobbs R J, Zedler J B. Flexible and adaptable restoration: an example from South Korea. *Restoration Ecology*, 2014, 22(3): 271-278.