

基于多维视角的“城市病”诊断分析及其风险 预估研究进展与发展趋势

王晓玥, 李双成*

(北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京大学土地科学中心, 北京 100871)

摘要:特大城市群地区“城市病”问题是目前国内外相关研究的热点问题。全面认识城镇化与生态环境之间复杂的互动关系, 才能对特大城市群地区“城市病”进行机理性剖析, 并建立“城市病”病情诊断与风险预估的方法和技术体系。本文围绕“‘城市病’病因分析—‘城市病’病情诊断—‘城市病’风险预估”的研究主线, 基于多维视角评述了“城市病”诊断分析及风险预估的研究进展, 并提出了目前国内外研究中存在的主要问题, 包括“城市病”的形成机理尚不清晰、对“城市病”的诊断多停留在表面、“城市病”风险预估研究不平衡、研究尺度单一。最后对研究趋势进行了展望: 研究方向上, 城镇化与生态环境的交互作用研究将持续深入, 微观过程与城市整体机能及表象内在联系的综合研究将得到强化, 生态系统服务研究将在“城市病”诊断分析及风险预估发挥更大作用; 研究方法上, 数据获取与模型构建技术的发展将有助于推动城市问题的综合研究。

关键词:城市病; 城镇化; 诊断分析; 风险预估; 进展与展望

1 引言

城镇化是伴随工业化发展、非农产业在城镇集聚、农村人口向城镇集中的自然历史过程, 是人类社会发展的客观趋势, 是国家现代化的重要标志(中共中央等, 2014)。自改革开放以来, 中国城镇化进入了高速发展通道, 2015年中国城镇化率已达56.1%, 预计到2020年将超过60%(中共中央等, 2014)。与此同时, 城市群已经成为中国城市与区域空间组织的重要形式。据报道, 中国将在未来重点培养建设5个国家级的大城市群、9个区域性的中等城市群和6个地区性的小城市群(方创琳, 2015), 这些地区将成为中国经济发展格局中最具活力和潜力的核心地区, 主宰着中国经济发展的命脉(刘晓丽等, 2008)。

但是, 城镇化是一种强烈的地表人类活动过程, 城镇化对资源及生态环境可能产生剧烈影响,

而这种影响反过来又可能对城镇化进程形成约束(李双成等, 2009)。“城市病”是一种城市问题的形象描述, 意即城市生态系统的结构、功能等出现了问题, 城市功能无法正常实现, 对城市的社会经济发展产生了阻碍因素。美国著名城市地理学家Northam(1979)认为, 城市化水平从30%~70%是城市化快速提升期, 也是“城市病”高发期。近年来, 中国城镇化发展与资源及生态环境的矛盾开始激化, “城市病”已经影响到一些特大城市群地区的可持续发展。2013年3月, 《京津冀发展报告(2013)——承载力测度与对策》蓝皮书披露: 京津冀地区水源枯竭、垃圾围城、雾霾肆虐、交通拥堵、人口超载所带来的不良后果正在逐渐显现。在《国家新型城镇化规划(2014-2020)》提出的六大必须解决的突出问题中, 有4项与环境资源密切相关, 充分反映了生态环境与资源问题是中国城镇化发展的重大短板和约束条件。

收稿日期: 2016-07; 修订日期: 2016-11。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41590843) [Foundation: Major Projects of the National Natural Science Foundation of China, No.41590843]。

作者简介: 王晓玥(1992-), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事城市生态系统服务研究, E-mail: 934447393@qq.com。

通讯作者: 李双成(1961-), 男, 河北平山人, 教授, 主要从事生态系统服务研究, E-mail: scl@urban.pku.edu.cn。

引用格式: 王晓玥, 李双成. 2017. 基于多维视角的“城市病”诊断分析及其风险预估研究进展与发展趋势[J]. 地理科学进展, 36(2): 231-243.
[Wang X Y, Li S C. 2017. Progress and prospects of diagnostic analysis and risk prediction of urban problems based on multiple perspectives[J]. Progress in Geography, 36(2): 231-243.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.02.009

社会需求极大地刺激了科学研究。国际上,2013年国际地理联合会(International Geographical Union)成立大都市工作组(Megacity Taskforce),吁请地理学家参与解决大都市问题,尤其关注全球环境变化和经济全球化下中低收入国家的大都市问题。德国海姆霍茨环境研究中心(Helmholtz Centre for Environmental Research)的“风险生境的城市(Risk Habitat Megacities)”计划,聚焦拉丁美洲地区的城市可持续发展。国际科学联盟发布的“未来地球2025愿景(Future Earth 2025 Vision)”,将“城市化建设”列为“未来地球”研究计划中重要研究领域。在中国,2013年9月,中国科学技术协会在北京组织了“未来地球在中国”国际会议,确认了在中国需要优先解决的、与可持续性能力建设相关的问题,其中将“亚洲城市化对区域环境、社会影响研究,以及健康的相互作用关系”列入研究议题,表明了对“城市病”问题研究的重要性。本文评述了“城市病”诊断分析及其风险预估的研究进展和存在问题,并对研究趋势进行展望,以期对“城市病”相关研究有所裨益,进而为保障中国新型城镇化战略的顺利实施,实现区域生态安全和社会经济可持续发展提供科学支撑。

2 国内外主要研究进展

“城市病”作为城市快速发展过程中资源环境与社会经济发展不协调的主要表现,长期以来受到国内外学者的广泛关注。下文将回顾和总结国内外近年来研究所取得的主要成果和进展。国内研究通过在“中国知网(CNKI)”平台分别检索主题为“城市病”“城市化与生态环境”“城市代谢”“城市生态系统”“生态风险”的中文文献获得;国外研究通过在 Web of Science 平台分别检索主题为“urban problems”“urban crisis”“urban heat island”“urban

land use”“urban pollution”“urban metabolism”“urban ecosystem service”“ecological risk”的英文文献获得;时间均截至2016年。对检索结果进行去重处理,得到中文文献5987篇,英文文献4930篇。

2.1 “城市病”的病因分析

国内外对“城市病”的病因分析主要从城镇化与生态环境交互耦合的胁迫与约束、城市代谢失调、生态系统服务供给不足3个视角进行(表1)。

2.1.1 城镇化与生态环境交互耦合的胁迫与约束

城镇化与生态环境交互耦合的胁迫与约束是城市病产生的原因之一(黄金川等, 2003),理清两者的交互耦合机制是“城市病”病因分析中的重要内容。国外研究中,城镇化与生态环境交互作用方面,Grossman等(1995)应用计量经济学方法,以42个发达国家的面板数据进行实证分析,揭示了随着城市经济水平的提高,城市生态环境质量呈现倒“U”型的演变规律,提出了著名的环境库兹涅茨曲线(EKC)假设。随后,运用环境库兹涅茨曲线对不同国家或地区的城市实证分析成为持续研究热点(Bruvoll et al, 2003; Paudel et al, 2005; Brajer et al, 2008)。Al-Mulali等(2012)使用调整的最小二乘法回归方程分析了全球7个地区1980-2008年期间城镇化与能源消费和二氧化碳排放之间长期的双向关系,结果表明,有84%的国家呈现长期的正向性,仅有16%的国家呈负向关系。城镇化对生态环境胁迫作用方面,大量研究围绕城镇化进程中下垫面改变的生态效应而展开。一方面,城镇化对自然生态系统的侵占,导致景观破碎化,并对生物多样性和生态系统服务产生负面影响(Niemelä et al, 2011; Seto et al, 2011);另一方面,城镇化进程通过改变下垫面性质、反照率和蒸散发而对城市气候和热环境产生显著影响(Oke, 1988; Santamouris et al, 2001),其中城市热岛效应及其成因研究最引人注目(Oleson et al, 2011)。近年来,中国城镇化过程中

表1 “城市病”病因分析的3种视角比较
Tab.1 Three perspectives of urban problem analyses

研究视角	基本思路与方法	研究数据	研究尺度	不足与局限
城镇化与生态环境交互耦合	运用统计分析方法、耦合协调度模型,分析城镇化与生态环境的交互胁迫作用和耦合关系	统计数据、遥感影像数据	城市	城镇化对自然系统多要素(水、土、能源等)的胁迫作用、生态环境对城镇化过程的约束作用、城镇化与生态环境耦合机理研究较少
城市代谢	通过跟踪城市系统中物质或能量的输入、转换、输出过程,探讨城市系统代谢特征及其驱动因素	统计数据	国家、城市	所需数据量大,数据精度高,很多城市 and 地区现有数据难以满足
生态系统服务	运用生态足迹、生态系统服务足迹模型揭示人类需求和自然承载力之间的差距以及这种差距所产生的生态环境影响	统计数据、遥感影像数据	地区、城市	缺乏对社会经济系统与生态系统服务耦合过程及其机制的研究

对于资源环境的胁迫作用,也引起了国外学者的关注。Güneralp等(2008)以中国深圳市为例,建立系统动力学模型模拟城市增长的驱动力及其在土地利用、空气污染以及能源和水资源需求方面的环境效应。Haas等(2014)以京津冀、长三角和珠三角为案例区,运用景观指数和生态系统服务概念研究了土地利用变化和城镇化发展带来的环境效应。结果表明,快速的城镇化导致了自然生态系统面积下降、景观破碎以及生态系统服务价值的显著降低。

国内学者研究主要集中在城镇化与生态环境耦合关系和胁迫作用2个方面。在城镇化与生态环境耦合关系的探索上,王如松(1988)利用生态协调原理的正负反馈和限制因子定律,揭示了城镇化演进与生态环境间存在着反馈和限制性机理,并由此总结出了城市生长契合S型规律。一些学者基于现代复杂科学理论视角,将城市化与生态环境之间关系视为城市化与生态环境交互耦合系统,提出了城市化与生态环境交互耦合系统满足的基本定律以及城市化与生态环境交互耦合过程中的不同阶段,刻画了城市化与生态环境之间交互耦合的动态关系(黄金川等, 2003; 方创琳等, 2006; 乔标等, 2006)。实证研究中,先后有学者引入物理学中的耦合协调度模型测度城市化与生态环境耦合协调性(宋学锋等, 2005; 孙平军等, 2012; 王少剑等, 2015),并对中国区域城市化与生态环境耦合关系进行了关联分析(刘耀彬等, 2005)。在城镇化与生态环境胁迫作用方面,周忠学(2011)总结了城市化对生态系统服务影响的机制,指出在西北河谷平原地区城市化对气候调节、土壤形成与保护、废物处理、食物生产等服务的负面影响比较显著。Tao等(2015)通过样带分析得出:常州市从城市中心到城市边缘碳储存逐渐增加,且按照当前趋势,城市扩张将显著减少绿色空间,使碳储存进一步减少。一些学者基于二级CES生产函数及城市化增长函数构建了资源环境对经济增长的“尾效”模型,揭示了土地、能源、水资源和环境污染对城市化进程的约束(刘耀彬等, 2011; 张琳等, 2011; 赵胤慧等, 2013)。

2.1.2 城市代谢失调

城市代谢(Urban Metabolism)的概念最早由Wolman(1965)提出,他将城市类比成一个生态系统,指出城市通过物质、能量输入和产品、废物输出的代谢过程来维持系统的运转和稳定。随后的几十年里,城市代谢的内涵被进一步丰富和拓展。

Kennedy等(2007)对城市代谢研究进行了回顾,提出城市代谢过程可看作是城市中一切技术与社会经济过程的总和,它带来城市发展和能量生产,同时也可以消弭废弃物。城市代谢失调是“城市病”产生的重要原因之一,通过对控制城市代谢过程的内部机制的分析,可以确定代谢失调的因素,为“城市病”诊治提供直接支持。

国际上,已有不少学者在全球不同地区、不同城市开展了城市代谢研究。Schulz(2007)基于不同时期的物质代谢,研究了新加坡快速工业化和城市转型带来的环境问题,发现国内物质消费扩张仍与经济增长密切相关。Zucaro等(2014)以意大利罗马市为例,运用能值核算方法量化了输入到城市系统的环境、物质和能源要素,通过分解分析(Decomposition Analysis)识别其城市系统运行和演进的主要驱动力。结果表明,外来不可更新资源和人口增加是1962-2008年罗马可持续性降低的主要原因。随着研究的不断深入,城市代谢模型不再局限于早期的“黑箱”分析(Zhang, 2013),系统动力学(Lei et al, 2008; Lee et al, 2009; Liu G Y et al, 2012)与生态网络分析(Chen S Q et al, 2012; Li et al, 2012; Wu et al, 2016)、投入—产出分析(Chen et al, 2010; Liu H et al, 2012)等相继引入城市代谢模拟,揭示了城市代谢过程的功能和层次关系,从机理上识别城市代谢的失调因素。近年来,一些新的分析策略应用于城市系统代谢研究。Goldstein等(2013)融合UM和生命周期评价(UM—LCA),用于定量研究城市的环境效应。Chen等(2015)提出城市关系(Urban Nexus, UN)研究范式,用于处理不同尺度的能量和物质流耦合的问题,成为揭示城市代谢因子(能源、水等)相互关系的有用工具。Zhang等(2016)基于LUCC构建了一个空间外显的碳代谢模型,进而识别网络内部碳代谢结构、功能和关系的空间异质性,解决了传统城市系统代谢研究不具空间特征的问题。

在国内,关于城市整体代谢特征的研究已应用于北京(张妍等, 2007a; 刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 2013; 宋涛等, 2015)、广州(吴玉琴等, 2011)、深圳(张妍等, 2007b)、厦门(王进等, 2014)和大连(刘耕源, 杨志峰, 陈彬等, 2013)等多个城市。一些学者通过对城市新陈代谢效率机制的分析识别了引发城市代谢失调(即“城市病”)的因素。如宋涛等(2013)运用能值理论及数据包络分析方法(DEA)系统研究了中国31个城市的新陈代谢效率特征,得出产业结构、城市化、经济发展和人口集聚要素对城

市新陈代谢效率具有较为显著的正面影响。黄永斌等(2015)通过能值分析研究宁夏石嘴山市代谢效率不断下降的原因,发现城市经济效率持续下降而资源效率与环境效率并未得到有效提升是根本动因。此外,土地利用变化的新陈代谢响应也是国内研究的重要方面。黄贤金等(2006)构建了区域土地利用变化的物质代谢驱动力模型,研究得到土地利用强度每提高10%,物质代谢通量将提高5.62%,物质代谢效率提高5.03%。刘勇(2010)通过对城市形态与城市物质代谢效率的相关性分析,得出较低的城市集中度,较高的斑块曲折度和破碎度,以及较低的城市开放空间率,通常导致较低的城市物质代谢效率。王磊等(2015)以天津市为例,将土地利用与城市物质流动研究相结合,认为建设用地数量与强度变化对天津市物质输入与输出端代谢规模的增加起着决定性作用。

2.1.3 生态系统服务供给不足

生态系统服务是生态系统形成和维持人类赖以生存和发展的环境条件的基础(Daily, 1997),也是促进城市可持续发展的重要途径(毛齐正等, 2015)。而随着人口集聚和经济活动的增强,人类对自然系统的扰动增加,大量生态用地被占用和破坏,生态系统服务总量下降,人地矛盾愈发突出。研究表明,中国超大城市人均生态系统服务呈弱化趋势,尤以水文调节和粮食生产服务减弱最为严重(程琳等, 2011),越来越多的城市需要城市以外的生态系统为其提供大量赖以生存的产品和服务。城市生态系统服务的不足对城市健康和居民福祉带来极大挑战,也是诱发“城市病”的原因之一。

近年来,不少学者关注于城市对生态系统的依赖和占用,以揭示“城市病”现象背后的资源环境原因。Folke等(1997)研究估算,波罗的海地区29个大城市占用的生态系统总面积是城市本身面积的565~1130倍,生态系统维持城市规模的能力正日益变得有限。Xie等(2014)引入生态足迹距离概念对北京市食物生态足迹的扩展进行测算,结果显示:2008-2012年期间,北京市食物生态足迹距离从567 km增长到677 km,城市对外部生态资源的依赖范围和距离持续增大,依赖程度也持续上升。在Burkhard等(2012)提出生态系统服务足迹概念之后,一些学者遵循该概念框架,构建了不同的服务足迹计算模型。Gao等(2014)构建了淡水供给生态系统服务足迹模型并应用于京津冀地区,研究得出有16.8%的地区面临较大的淡水资源压力。焦雯珺

等(2014)提出基于废弃物吸纳服务的足迹模型,并对太湖流域上游常州市和湖州市水污染物排放的环境影响进行评估,研究结论为:就水污染物吸纳而言,当地水环境处于不可持续状态。然而,无论是生态足迹还是生态系统服务足迹模型,对“城市病”病因分析都仅停留在表象,即仅定量描述了人类需求和自然承载力之间的差距,而尚未从生态系统服务与经济社会耦合过程角度对“城市病”病因开展机理分析。Cumming等(2014)在《Nature》上通过构建概念框架分析了人类社会在农业转型和城市化进程中对于自然生态系统服务的依存和作用,提出了以生态系统服务为驱动力的“绿环(Green-loop)”状态和以非生态系统服务为驱动力“红环(Red-loop)”状态;并指出,城镇化过程中人口的聚集、对自然生态系统的占用和破坏,极大地耗用了生态系统服务,增加了落入“红环”陷阱的可能;还专门对北京市从绿环到红环转换的可能性进行了分析,对中国城镇化进程中可能遇到的生态环境问题有一定的警示作用。

对比“城市病”病因分析的3个视角可知,城镇化与生态环境交互耦合视角多基于统计方法和模型展开分析;生态系统服务视角则更长于对表象的描述,均缺乏对耦合过程及机制的研究;城市代谢视角通过跟踪城市系统中物质或能量的输入、转换、输出过程,探讨城市系统代谢特征及其驱动因素,一定程度上能够从机理上识别引发“城市病”的病因,但对生态—经济过程的刻画还不够深入,且由于其所需数据量大、数据精度高,很多城市 and 地区现有数据难以满足研究需要。

2.2 “城市病”的病情诊断

“城市病”带来巨大的负面效应,因此,对“城市病”的诊断和评价是“城市病”研究中的重要组成部分。目前“城市病”的诊断途径可分2类:一是建立指标体系,应用不同的统计方法,计算城市健康状况的数值;二是将城市视为一个生命机体,应用生态热力学指标测度其代谢和健康状况(表2)。

2.2.1 基于指标体系的城市健康评价

在“城市病”指标评价工作方面,郭秀锐等(2002)提出活力、组织结构、恢复力、生态系统功能的维持、人群健康状况5个城市生态系统健康的评价要素,根据每个要素内涵构建城市生态系统健康评价指标体系,并明确了相应的健康标准,采用模糊数学方法建立评价模型。胡廷兰等(2005)从复合生态系统理论出发,基于城市亚系统发展水平和协

表2 “城市病”病情诊断方法比较

Tab.2 Two diagnostic methods of urban problems

诊断方法	诊断理念	诊断思路	诊断模型与指标	诊断结果
基于指标体系的城市健康评价	还原论	将城市系统分解成几个子系统,通过子系统统计指标的组合得到城市的总体健康程度	构建综合评价数学模型和指标体系,指标选取和权重设置存在主观性	研究之间可比性较差
基于生态热力学指标的代谢测度	系统论	将城市视为一个生命机体,应用生态热力学指标测度其代谢和健康状况	引入已有的或改进的能值、烟值等生态热力学指标来描述城市健康状况	研究之间具有可比性

调度2个方面,构建整合合距离指数和协调指数的城市生态系统健康指数评价模型,并以宁波市为例进行了实例分析。苏美蓉等(2006)利用集对分析方法,将评价城市生态系统健康状况的多个指标系统合成一个与最优评价集的相对贴适度,用于描述城市生态系统健康状况。郁亚娟等(2008)提出了承载力、支持力、吸引力、延续力和发展力五大城市生态系统健康功能,将“城市病”的各项病症与城市功能相联系,构建了“城市病”诊断和城市生态系统健康的评价体系,并以北京市为例进行了“城市病”的单因子诊断和城市生态系统健康评价,阐明了北京市发生“城市病”的原因。石忆邵(2014)提出了由人口拥挤、交通拥堵、环境污染与风险、住房贫困四个方面组成的测度“城市病”的指标体系,通过对北京、上海、广州3个城市实证分析表明,在“城市病”总指数方面,北京>上海>广州。李天健(2014)从自然资源短缺、生态环境污染、城市交通拥堵、居民生活困难、公共资源紧张及公共安全弱化6个“城市病”的主要表征入手,共选取48个指标,运用主成分分析法,对2006-2010年北京市“城市病”的演变进行分类评价和综合评价。结果表明,北京市城市病的综合情况以及其中的自然资源短缺、公共资源紧张、公共安全弱化这3个方面均逐年好转,而城市交通拥堵和居民生活困难2个方面呈恶化趋势,生态环境恶化状况先好转后恶化。

2.2.2 基于生态热力学指标的代谢测度

在城市有机体代谢评价工作方面,Balocco等(2004)应用生命周期理论,使用2个烟值指数测度了城市区域的可持续性。Conke等(2015)应用城市代谢理论分析了巴西库里蒂巴市2000-2010年物质和能量使用状况,以判断城市可持续发展状况。Nielsen等(2015)通过分析丹麦萨姆索岛能源、公共、私营经济、农业、工业、商业和贸易6个社会部门的烟值输入和输出以及环境提供服务的支撑作用,表明由烟值分析构建的可持续发展指数能清晰地判定萨姆索岛未来的发展方向。姜昧茗(2007)把烟值理论应用于城市系统演化机理的研究,对中国典

型城市资源消耗进行了核算和预测。季曦(2008)在城市截面数据研究的基础上,深入到城市内部系统,进行流网络分析,拓展了城市生态系统热力学演化特征研究。刘耕源等(2008)将能值分析理论引入到城市生态系统健康研究,采用活力、组织结构、恢复力和服务功能维持构建了城市健康能值指标(EUEHI)。李恒等(2011)将城市健康能值指标(EUEHI)加以改进,构建了改进的城市生态系统健康指数(IEUEHI),并用于合肥市生态系统的健康评价。近年来,一些新指数相继提出并应用于城市系统代谢和健康研究。Inostroza(2014)模仿生态学中的生物量(biomass)概念,提出了一个用于测度城市系统物质累积过程的新指数,将其命名为“Technomass”,并以哥伦比亚的波哥大(Bogotá)市为例进行了物质积累和速率的实证研究,结果表明,这一指数提供了联系城市形态和代谢行为的可能性,弥补了城市规划、城市代谢和物质流分析的空缺。Kennedy等(2014)提出一个多层的指标集用于测度大城市群的代谢和健康状况,包括对大城市群的界定(城市边界、城市组成、人口和经济)、物质流(水、废物、物质和各种类型的能源)、各种供给服务和公共管治行为的效用对于城市代谢的影响。

对比这2种“城市病”病情诊断方法可知,前者基于还原论思想,将城市系统分解成几个子系统,通过子系统统计指标的组合得到城市的总体健康程度,由于其指标选取和权重设置存在主观性,研究之间可比性较差;后者基于系统论思想,将城市视为一个生命机体,应用已有的或改进的能值、烟值等生态热力学指标测度其代谢和健康状况,研究之间具有一定的可比性。

2.3 “城市病”的风险预估

城镇化地区自然和社会经济要素高度聚集,是各类风险的多发地。对“城市病”进行风险预估,就是估计城镇化过程中城市生态环境要素、生态过程与生态格局、生态系统服务发生不利变化,以及对人居环境产生不良影响的可能性(王美娥等,2014),进而采取有效的风险管理对策,保证可持续发展。

2.3.1 单一风险预估

根据风险源的差异,可将“城市病”风险大致分为自然灾害风险、环境污染风险和生态系统退化风险(张小飞等, 2011)。

在全球气候变化大背景下,洪涝和干旱等成为困扰城市的主要自然灾害因素,相关研究也围绕该命题展开。例如,Cheng(2013)应用社会—生态系统研究框架,构建了社会脆弱性指数(Social Vulnerability Index),评价了美国马萨诸塞州查理士河流域城市化和气候变化诱发的洪涝灾害风险,并对未来(2030年)的洪涝灾害风险进行了预估。Aerts等(2014)运用专门用于城市灾害风险评价的洪灾风险概率评价模型,评估了世界沿海特大城市的洪涝风险及其损失,并提出了减少城市脆弱性增加恢复力的对策。金冬梅等(2005)从城市干旱缺水的致灾因子危险性、承灾体的暴露性与脆弱性和防旱抗旱能力等方面着手,建立了城市干旱缺水风险评价模型,并利用城市干旱缺水风险指数(UDRI)对城市干旱缺水风险程度进行评价。罗军刚等(2008)则将风险率、脆弱性、可恢复性、事故周期和风险度作为区域水资源短缺风险的评价指标,并将信息论中的熵值理论应用于西安市水资源短缺的风险评价,建立了基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型。对比国内外研究发现,国外一些学者已在预估城市自然灾害风险的基础上,对城市自然灾害带来的经济损失开展了评估;国内研究则集中在基于风险指数的相对风险评价方面,对风险带来的损失研究不足。

在环境污染风险研究方面,由于人类是城市最重要的风险受体,人体健康状况是传统的环境污染风险评价中重要的评价终点。例如,谢元博等(2013)设定了北京市能源消费的高、中、低3种约束情景,通过LEAP模型预测了全市至2020年的能源消费量和4种主要大气污染物的排放强度,并运用泊松回归模型对3种情景下主城区居民受这4种大气污染物的暴露危害而导致的健康风险进行了评估。随着研究的发展,环境污染风险评价终点更多集中到城市社会—生态系统水平上。例如Tixier等(2011)评述了城市雨水池塘的生态风险评估方法及其局限性,并提出了生态质量目标和相应生态学评价工具的概念框架。刘家宏等(2012)将模糊故障树模型以及综合影响指数模型共同应用于河流突发性水污染风险评价,建立了由区域整体到河流单元的多尺度评价模式,并以北部湾经济区为例进行了

水污染风险评估。王彬武(2015)从人地关系视角切入,构建了土壤重金属社会—生态系统综合风险管理框架,以北京市为例分析了土壤重金属积累的时空变异特征及其与土地利用格局的关系,开展了区域土壤重金属风险分区与防控对策研究。

在生态退化风险研究方面,基于生态系统服务的风险评估可以较好地反映以人类为核心的城市及城市生态系统所受到的危害(王美娥等, 2014),能增强评估对决策的支持力,因而成为当前研究的热点和前沿。理论研究方面,Munns等(2009)提出将生态风险评价运用于传统的自然资源损害评估,用生态系统服务的损失表征生态风险。Villamagna等(2013)构建了生态系统服务能力、生态压力、服务需求和服务流之间相互作用的理论框架,探讨了不同情景下生态系统服务可持续利用存在的风险程度。案例研究方面,Xu等(2016)通过运用GWML-CA模型模拟土地利用变化,集成生态系统服务评价模型对中国太湖流域生态系统服务的退化风险进行了评估。研究认为,快速的土地利用变化增加了生态系统服务的退化风险,2010-2020年间退化严重的区域将集中在太湖流域的小城市和欠发达城市。然而,基于生态系统服务评价生态退化风险的方法尚未成熟,不少研究还停留在理论探讨阶段,需要构建更为综合的生态退化风险评价模型以模拟不同情景对生态系统的影响,同时需要加强生态退化风险的不确定性分析,发挥生态退化风险研究在风险管理中的作用。

2.3.2 综合风险预估

由于“城市病”风险具有多风险源、多风险受体、复杂暴露途径等特点(徐丽芬等, 2010),近年来已有不少学者将关注点从单一风险评价转移到多风险源、多过程、多风险受体的综合风险评价研究。

国内学者以研究城市综合风险评价为主,多采用综合指数法及其改进方法综合多个风险因素指标进行定量化评价。例如,符娟林等(2008)以河西走廊为例,从资源、生态和环境3个方面构建了城市化进程中的生态环境预警指标体系,运用模糊物元理论建立了城市化进程中的生态预警模型。安佑志(2011)构建了基于多生态风险源、多生态风险受体、多生态风险效应的上海城市生态风险评价指标体系,运用模糊数学模型评价了上海城市生态风险。龚艳冰(2012)从资源风险、生态风险及环境风险3个方面评价城市化进程中的生态风险,采用熵权法确定各个指标权重,借助于正态云模型定量描

述单指标条件下待评价城市的生态风险等级。方创琳等(2015)采用系统分析方法和综合指数评价法,从资源、生态环境、经济和社会4个方面构建了中国城市脆弱性综合测度指标体系并确定测度标准值,对中国地级以上城市脆弱性及其空间分异进行了总体评价。

国外学者在传统的综合风险评价基础上(Burton et al, 2002; Moraes et al, 2004; Chen Q Y et al, 2012),更多地基于风险机理的模型应用于“城市病”风险预估(Chen, 2013)。与此同时,国外研究更加注重风险预估与城市规划、管理的联系,探究政府和个人对风险的适应机制,提出具体的管理和应对方式。日本京都大学防灾所的Okada等(2004)提出的城市化进程中综合灾害风险管理的“塔模型”,明确了综合协调城市各要素间的关系在城市综合灾害风险管理中的重要性。Wamsler等(2013)基于适应气候变化风险的城市规划理论和实践,识别了气候弹性城市的基本特征,在成因、短期和长期效应以及灾后响应和恢复等方面考虑灾害的生命周期,分析了气候灾害、城市形态和城市规划过程之间的相互关系。Heinrichs等(2012)以圣地亚哥为案例区,通过分析风险要素,阐述了大都市区风险的形成机制,评价了风险范围和严重程度,并提出了应对风险的管理策略。

3 研究存在问题

3.1 “城市病”的形成机理尚不清晰

当前,基于城镇化与生态环境交互耦合视角对“城市病”多运用统计分析方法和数学物理模型进行定量研究,未能从过程和机理上对“城市病”的形成提出更好的解释,而且由于对复杂系统认知仍然有限,加之缺乏综合模型的构建,导致城镇化过程对自然系统多要素的综合影响研究较少;生态足迹、生态系统服务足迹模型则更侧重于刻画人类需求和自然承载力之间总量上的差距,缺乏对多尺度下不同主体行为与生态系统服务之间内在联系的认识,致使生态系统服务研究没有与社会经济系统进行实质性整合分析;城市代谢理论把城市类比为—个生命有机体,近年来通过将网络分析引入城市代谢模拟中,揭示城市代谢过程的功能和层次关系,一定程度上解决了从机理上诊断“城市病”的难题,但由于该方法所需数据量大、数据精度高,很多城市和地区现有数据难以满足需要。

3.2 对“城市病”的诊断多停留在表象

基于指标体系的城市健康评价的研究模式可归纳为指标选取、权重确定、模型求算总指数的三段式,对“城市病”的诊断往往停留在表象。此外,不同案例中指标选取各不相同,研究结果的横向可比性较差。基于生态热力学指标的城市代谢测度则从系统物质循环与能量流动的角度切入,能较好地反映城市整体机能情况,但与城市内部生态过程、经济过程和社会过程相联系较弱,在诊断过程中仍存在局限性。

3.3 “城市病”风险预估研究不平衡

在城市未来可能面临的风险研究方面,由于对城镇化与自然系统多要素间的交互作用机制尚不清楚,导致大量研究集中于单一风险预估方面,对城市综合风险研究不够;而在城市综合风险预估研究方面,对城市脆弱性研究较多,对城市自身的恢复力研究不够,尤其缺乏城市风险治理机制创新方面的研究。

3.4 研究尺度较为单一

由于当前统计数据多按照行政单元统计且各行政单元间统计口径不一致,已有的研究多集中在城市尺度,主要研究城市内部各种组分和要素的状态特征和物质循环与能量流动,鲜有以城市为基本尺度的向上和向下多个尺度的研究,尤其缺乏在城市群尺度上城市之间物质、能量和信息等方面相互流动与作用的研究。随着中国城镇化进程的加快,城市群内部的协调发展问题日益凸显。由于自然资源和生态环境要素分布的非行政区特性,亟需在城市群尺度上明晰城镇化与生态环境的交互胁迫或增益等耦合关系,进而为新型城镇化进程健康发展提供科学依据。

4 研究展望

综合分析已有的研究工作,根据未来的发展需求,对“城市病”诊断分析及风险预估领域的研究趋势提出如下展望。

4.1 研究方向

(1) 城镇化与生态环境的交互作用研究将持续深入。目前在城镇化影响城市局地气候、植被动态、土壤组成、大气污染、水文过程、生物多样性等方面的研究仍将持续;同时,城市地区的生物地球化学过程如碳、氮循环研究正在兴起,未来将会成为研究热点。与此同步,生态环境对城镇化过程的

影响尤其是制约作用研究水平将会进一步提升。

(2) 微观过程与城市整体机能及内在联系的综合研究将会得到强化。目前,在微观层面,不同学科对城市内部自然过程、经济过程和社会过程的研究已有一些积累,尤其是在自然科学领域,对于城市内部的水、土、气、生等过程研究成果已较丰富。如何把这些过程整合起来进行统一分析,以及多种过程耦合与城市整体机能的关系将是下一阶段研究重点。其中,由于城市代谢研究具有网络分析和指标综合等方面的优势,将其应用于“城市病”诊断与风险预估研究可作为其中的一个重要方向。从学科发展来看,在现代系统科学理论指导下,综合运用地理学、生态学、环境科学、经济学和社会学等多科学知识和方法,深入认识城镇化与生态环境交互作用的内在机理,进而为“城市病”的诊断分析和风险预估奠定基础,是未来重要的学科发展方向。

(3) 生态系统服务研究将在“城市病”诊断及风险预估中发挥更大作用。城市生态系统服务作为连接生态系统和人类福祉的载体,对城市的健康发展必不可少,在建设生态城市、低碳城市 and 海绵城市背景下,通过合理布局和管治等途径,提升城市的生态系统服务,对于防治“城市病”,降低各种风险具有重要作用。具体来说,可从以下几方面进行研究:①通过城市生态系统过程研究,明晰单一生态系统服务类型的形成机制和传输过程,为城市内涝、灰霾效应、热岛效应、水体污染与富营养化等备受关注的“城市病”提供新的解决思路与科学方法;②通过权衡/协同分析,研究城市不同生态系统服务间的此消彼长或相互增益关系,并探究形成权衡/协同的原因,为筛选旨在提升生态系统服务水平的绿色空间建设和规划技术提供支撑;③建立包括生态系统服务在内的“城市病”诊断和风险预估指标体系。未来应系统分析城镇化与生态系统服务交互作用机理,将生态系统服务纳入“城市病”的病情诊断和风险预估的评价模型体系的准则层,在指标层中增加生态系统服务的类型和数量等指标。这方面研究成果可为城市绿色基础设施建设、城市规划等提供科学基础。

4.2 数据获取与模型技术

数据是研究城市问题的最基本的前提条件,也是制约当前城市研究的重要方面。在城市研究中,除了传统的数据源如各种统计、资源清查以及中低分辨率遥感数据外,数据获取呈现实时性和高分辨的发展趋势。移动通讯数据传输技术、网络技术和

时态数据库技术的发展,使大量采集具有空间位置的实时数据成为可能。以代表真实地理实体的点状数据(POI)为例,随着网络地图与基于位置服务(LBS)的发展,POI广泛应用于交通和人流动态监测以及大型公共活动安全保障等方面。各种遥感平台(尤其是无人机)及其传感器的快速发展,使得各种高清分辨率的遥感影像获取逐渐便捷,并应用于城市各种基础设施和土地利用类型的时空动态监测等。但对于城市问题研究来说,技术难点和关键在于如何有效地整合多源数据,深度挖掘其中的信息。进行实时与静态、自然与社会经济以及不同分辨率之间的多源不同属性间的数据融合,并利用机器学习等技术挖掘出与城市问题有关的信息是未来的发展方向。

模型是定量诊断“城市病”及其风险程度不可或缺的研究途径。目前在城市研究的某些属性方面,模型构建取得了较大进展。以城市生态系统服务模拟为例,诸如 Citygreen、UFORE、I-Trees 和 STRATUM 等模型虽较为成熟,但仍缺乏研究城市问题更为综合的模型。下一阶段,建构更具综合性的城市和城市群尺度的系统动力学和智能体模型是其发展方向。另外,随着人工智能和大数据技术的快速发展,深度学习技术因其能够发现并刻画问题内部复杂结构特征,将在城市问题研究中发挥更大作用。尤其是深度网络通过学习能够在海量的多源数据中挖掘出特定信息,这对研究复杂的城市问题无疑是极为有益的技术。

综上所述,“城市病”诊断及风险预估研究已不再停留在静态指标评估阶段,而是更加关注不同层次要素的交互耦合作用,更加注重微观过程与整体机能的内在联系,更加重视城市生态系统服务的指征作用,更加需要大数据与综合模型的应用。这一变化趋势将需要不同学科领域甚至是跨学科领域的研究加入到“城市病”问题研究中来。在此过程中,以系统综合分析见长的地理学将会发挥越来越大的作用。与此同时,“城市病”研究也有助于提升自然和社会经济系统的集成分析水平,进而推动地理综合研究进程,为地理学的核心命题——人地关系研究提供重要的实践领域。

参考文献(References)

- 安佑志. 2011. 基于GIS的城市生态风险评价: 以上海市为例 [D]. 上海: 上海师范大学. [An Y Z. 2011. The urban ecological risk assessment based on GIS: A case study of

- Shanghai[D]. Shanghai, China: Shanghai Normal University.]
- 程琳, 李锋, 邓华锋. 2011. 中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变[J]. 生态学报, 31(20): 6194-6203. [Cheng L, Li F, Deng H F. 2011. Dynamics of land use and its ecosystem services in China's megacities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 31(20): 6194-6203.]
- 方创琳. 2015. 科学选择与分级培育适应新常态发展的中国城市群[J]. 中国科学院院刊, 30(2): 127-136. [Fang C L. 2015. Scientific selection and grading cultivation of China's urban agglomeration adaptive to new normal in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 30(2): 127-136.]
- 方创琳, 王岩. 2015. 中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征[J]. 地理学报, 70(2): 234-247. [Fang C L, Wang Y. 2015. A comprehensive assessment of urban vulnerability and its spatial differentiation in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 70(2): 234-247.]
- 方创琳, 杨玉梅. 2006. 城市化与生态环境交互耦合系统的基本定律[J]. 干旱区地理, 29(1): 1-8. [Fang C L, Yang Y M. 2006. Basic laws of the interactive coupling system of urbanization and ecological environment[J]. *Arid Land Geography*, 29(1): 1-8.]
- 符娟林, 乔标. 2008. 基于模糊物元的城市化生态预警模型及应用[J]. 地球科学进展, 23(9): 990-995. [Fu J L, Qiao B. 2008. Ecological early-warning model and its application in the process of urbanization based on fuzzy matter element theory[J]. *Advances in Earth Science*, 23(9): 990-995.]
- 龚艳冰. 2012. 基于正态云模型和熵权的河西走廊城市化生态风险综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 26(5): 169-174. [Gong Y B. 2012. Comprehensive assessment on ecological risk of Hexi Corridor urbanization based on normal cloud model and entropy weight[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 26(5): 169-174.]
- 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 2002. 城市生态系统健康评价初探[J]. 中国环境科学, 22(6): 525-529. [Guo X R, Yang J R, Mao X Q. 2002. Primary studies on urban ecosystem health assessment[J]. *China Environmental Science*, 22(6): 525-529.]
- 胡廷兰, 杨志峰, 何孟常, 等. 2005. 一种城市生态系统健康评价方法及其应用[J]. 环境科学学报, 25(2): 269-274. [Hu T L, Yang Z F, He M C, et al. 2005. An urban ecosystem health assessment method and its application[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(2): 269-274.]
- 黄金川, 方创琳. 2003. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J]. 地理研究, 22(2): 211-220. [Huang J C, Fang C L. 2003. Analysis of coupling mechanism and rules between urbanization and eco-environment[J]. *Geographical Research*, 22(2): 211-220.]
- 黄贤金, 于术桐, 马其芳, 等. 2006. 区域土地利用变化的物质代谢响应初步研究[J]. 自然资源学报, 21(1): 1-8. [Huang X J, Yu S T, Ma Q F, et al. 2006. Studies on material metabolism response of regional land use change[J]. *Journal of Natural Resources*, 21(1): 1-8.]
- 黄永斌, 董锁成, 李泽红. 2015. 基于能值分析的资源型城市新陈代谢水平评价: 以石嘴山市为例[J]. 资源科学, 37(8): 1621-1628. [Huang Y B, Dong S C, Li Z H. 2015. Urban metabolism evaluation of resource-based cities using emergy synthesis: A case study in Shizuishan City[J]. *Resources Science*, 37(8): 1621-1628.]
- 季曦. 2008. 生态经济的热力学熵值理论及其在城市系统模拟和调控中的应用[D]. 北京: 北京大学. [Ji X. 2008. Theory of embodied cosmic exergy of ecological economics and ecological thermodynamics and its application in urban ecosystem modeling and regulation[D]. Beijing, China: Peking University.]
- 姜昧茗. 2007. 城市系统演化的生态热力学熵值分析[D]. 北京: 北京大学. [Jiang M M. 2007. Embodied cosmic exergy analysis for urban ecosystem[D]. Beijing, China: Peking University.]
- 焦雯珊, 闵庆文, 李文华, 等. 2014. 基于生态系统服务的生态足迹模型构建与应用[J]. 资源科学, 36(11): 2392-2400. [Jiao W J, Min Q W, Li W H, et al. 2014. Development and application of ecosystem-service-based ecological footprint models[J]. *Resources Science*, 36(11): 2392-2400.]
- 金冬梅, 张继权, 韩俊山. 2005. 吉林省城市干旱缺水风险评价体系与模型研究[J]. 自然灾害学报, 14(6): 100-104. [Jin D M, Zhang J Q, Han J S. 2005. Risk assessment system and model research on urban drought and water shortage in Jilin Province[J]. *Journal of Natural Disasters*, 14(6): 100-104.]
- 李恒, 黄民生, 姚玲, 等. 2011. 基于能值分析的合肥城市生态系统健康动态评价[J]. 生态学杂志, 30(1): 183-188. [Li H, Huang M S, Yao L, et al. 2011. Dynamic assessment of urban ecosystem health in Hefei City based on emergy analysis[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 30(1): 183-188.]
- 李双成, 赵志强, 王仰麟. 2009. 中国城市化过程及其资源与生态环境效应机制[J]. 地理科学进展, 28(1): 63-70. [Li S C, Zhao Z Q, Wang Y L. 2009. Urbanization process and effects of natural resource and environment in China: Research trends and future directions[J]. *Progress in Geography*, 28(1): 63-70.]
- 李天健. 2014. 城市病评价指标体系构建与应用: 以北京市为例[J]. 城市规划, 38(8): 41-47. [Li T J. 2014. Construction and application of the evaluation indicator system for urban disease: A case study of Beijing[J]. *City Planning Review*, 38(8): 41-47.]
- 刘耕源, 杨志峰, 陈彬. 2013. 基于能值分析方法的都市代谢过程: 案例研究[J]. 生态学报, 33(16): 5078-5089. [Liu G Y, Yang Z F, Chen B. 2013. Urban metabolism process based on emergy synthesis: A case study of Beijing[J]. *Ac-*

- ta Ecologica Sinica, 33(16): 5078-5089.]
- 刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 等. 2008. 基于能值分析的城市生态系统健康评价: 以包头市为例[J]. 生态学报, 28(4): 1720-1728. [Liu G Y, Yang Z F, Chen B, et al. 2008. Emergy-based urban ecosystem health assessment: A case study of Baotou City[J]. Acta Ecologica Sinica, 28(4): 1720-1728.]
- 刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 等. 2013. 基于生态网络的城市代谢结构模拟研究: 以大连市为例[J]. 生态学报, 33(18): 5926-5934. [Liu G Y, Yang Z F, Chen B, et al. 2013. Study of urban metabolic structure based on ecological network: A case study of Dalian[J]. Acta Ecologica Sinica, 33(18): 5926-5934.]
- 刘家宏, 胡剑, 褚俊英, 等. 2012. 缺资料地区河流突发性水污染多尺度风险评价[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 52(6): 830-835. [Liu J H, Hu J, Chu J Y, et al. 2012. Multi-scale risk assessment of accidental water pollution events in ungauged river basins[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 52(6): 830-835.]
- 刘晓丽, 方创琳. 2008. 城市群资源环境承载力研究进展及展望[J]. 地理科学进展, 27(5): 35-42. [Liu X L, Fang C L. 2008. Progress and prospect of study on carrying capacity of resource and environment of city clusters[J]. Progress in Geography, 27(5): 35-42.]
- 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 2005. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析[J]. 地理学报, 60(2): 237-247. [Liu Y B, Li R D, Song X F. 2005. Grey associative analysis of regional urbanization and eco-environment coupling in China[J]. Acta Geographica Sinica, 60(2): 237-247.]
- 刘耀彬, 杨新梅. 2011. 基于内生经济增长理论的城市化进程中资源环境“尾效”分析[J]. 中国人口·资源与环境, 21(2): 24-30. [Liu Y B, Yang X M. 2011. Analysis on resources consumption drag of urbanization based on endogenous growth model[J]. China Population, Resources and Environment, 21(2): 24-30.]
- 刘勇. 2010. 城市形态与城市物质代谢效率的相关性分析[J]. 城市发展研究, 17(6): 27-31. [Liu Y. 2010. Analyzing the relationship between urban form and urban material metabolism efficiency[J]. Urban Studies, 17(6): 27-31.]
- 罗军刚, 解建仓, 阮本清. 2008. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用[J]. 水利学报, 39(9): 1092-1097, 1104. [Luo J G, Xie J C, Ruan B Q. 2008. Fuzzy comprehensive assessment model for water shortage risk based on entropy weight[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 39(9): 1092-1097, 1104.]
- 毛齐正, 黄甘霖, 邬建国. 2015. 城市生态系统服务研究综述[J]. 应用生态学报, 26(4): 1023-1033. [Mao Q Z, Huang G L, Wu J G. 2015. Urban ecosystem services: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 26(4): 1023-1033.]
- 乔标, 方创琳, 黄金川. 2006. 干旱区城市化与生态环境交互耦合的规律性及其验证[J]. 生态学报, 26(7): 2183-2190. [Qiao B, Fang C L, Huang J C. 2006. The coupling law and its validation of the interaction between urbanization and eco-environment in arid area[J]. Acta Ecologica Sinica, 26(7): 2183-2190.]
- 石忆邵. 2014. 中国“城市病”的测度指标体系及其实证分析[J]. 经济地理, 34(10): 1-6. [Shi Y S. 2014. Measurement index system and empirical analysis of China's urban diseases[J]. Economic Geography, 34(10): 1-6.]
- 宋涛, 蔡建明, 杜姗姗, 等. 2015. 基于能值分析的北京城市新陈代谢研究[J]. 干旱区资源与环境, 29(1): 37-42. [Song T, Cai J M, Du S S, et al. 2015. Emergy analysis of urban metabolism in Beijing[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 29(1): 37-42.]
- 宋涛, 蔡建明, 倪攀, 等. 2013. 基于能值和DEA的中国城市新陈代谢效率分析[J]. 资源科学, 35(11): 2166-2173. [Song T, Cai J M, Ni P, et al. 2013. Chinese urban metabolic efficiencies based on emergy and DEA[J]. Resources Science, 35(11): 2166-2173.]
- 宋学锋, 刘耀彬. 2005. 城市化与生态环境的耦合度模型及其应用[J]. 科技导报, 23(5): 31-33. [Song X F, Liu Y B. 2005. Coupling degree model of urbanization and ecological environment and its application[J]. Science & Technology Review, 23(5): 31-33.]
- 苏美蓉, 杨志峰, 王红瑞, 等. 2006. 一种城市生态系统健康评价方法及其应用[J]. 环境科学学报, 26(12): 2072-2079. [Su M R, Yang Z F, Wang H R, et al. 2006. A kind of method and its application for urban ecosystem health assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26(12): 2072-2079.]
- 孙平军, 丁四保, 修春亮. 2012. 北京市人口—经济—空间城市化耦合协调性分析[J]. 城市规划, 36(5): 38-45. [Sun P J, Ding S B, Xiu C L. 2012. Analysis of the coordination of population-economy-space in Beijing[J]. City Planning Review, 36(5): 38-45.]
- 王彬武. 2015. 基于社会—生态系统框架的土壤重金属风险分区与防控对策研究[D]. 北京: 中国农业大学. [Wang B W. 2015. Risk zoning and countermeasure of soil heavy metal based on the social-ecological systems[D]. Beijing, China: China Agricultural University.]
- 王进, 齐涛. 2014. 食物源CNP的城市代谢特征: 以厦门市为例[J]. 生态学报, 34(21): 6366-6378. [Wang J, Lin T. 2014. Characterizing the urban metabolism of food-sourced carbon, nitrogen, and phosphorous: A case study of Xiamen[J]. Acta Ecologica Sinica, 34(21): 6366-6378.]
- 王磊, 赖迪辉, 李慧明. 2015. 城市土地利用变化的物质代谢效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 29(10): 14-19. [Wang L, Lai D H, Li H M. 2015. Material metabolism effects of land use change[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 29(10): 14-19.]
- 王美娥, 陈卫平, 彭驰. 2014. 城市生态风险评价研究进展[J]. 应用生态学报, 25(3): 911-918. [Wang M E, Chen W P, Peng C. 2014. Urban ecological risk assessment: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 25(3): 911-

- 918.]
- 王如松. 1988. 高效·和谐: 城市生态调控原则和方法[M]. 长沙: 湖南教育出版社. [Wang R S. 1988. Gaoxiao, hexie: Chengshi shengtai tiaokong yuanze he fangfa[M]. Changsha, China: Hunan Education Publishing House.]
- 王少剑, 方创琳, 王洋. 2015. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度[J]. 生态学报, 35(7): 2244-2254. [Wang S J, Fang C L, Wang Y. 2015. Quantitative investigation of the interactive coupling relationship between urbanization and eco-environment[J]. Acta Ecologica Sinica, 35(7): 2244-2254.]
- 吴玉琴, 严茂超. 2011. 广州城市代谢效率的模拟分析[J]. 资源科学, 33(8): 1555-1562. [Wu Y Q, Yan M C. 2011. Simulation analysis of urban metabolic efficiency in Guangzhou City[J]. Resources Science, 33(8): 1555-1562.]
- 谢元博, 李巍. 2013. 基于能源—环境情景模拟的北京市大气污染对居民健康风险评价研究[J]. 环境科学学报, 33(6): 1763-1770. [Xie Y B, Li W. 2013. Health risk assessment of Beijing residents in exposure of air pollution based on environmental simulation of energy consumption scenarios[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(6): 1763-1770.]
- 徐丽芬, 许学工, 卢亚灵, 等. 2010. 基于自然灾害的北京幅综合生态风险评价[J]. 生态环境学报, 19(11): 2607-2612. [Xu L F, Xu X G, Lu Y L, et al. 2010. Integrated ecological risk assessment of J-50 based on natural disasters risk source[J]. Ecology and Environmental Sciences, 19(11): 2607-2612.]
- 郁亚娟, 郭怀成, 刘永, 等. 2008. 城市病诊断与城市生态系统健康评价[J]. 生态学报, 28(4): 1736-1747. [Yu Y J, Guo H C, Liu Y, et al. 2008. Syndromic city illnesses diagnosis and urban ecosystem health assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 28(4): 1736-1747.]
- 张琳, 李娟, 李影. 2011. 土地资源对中国城市化进程的阻力分析[J]. 华东经济管理, 25(12): 30-33. [Zhang L, Li J, Li Y. 2011. Analysis of growth resistance of China's urbanization caused by land resource[J]. East China Economic Management, 25(12): 30-33.]
- 张小飞, 王如松, 李正国, 等. 2011. 城市综合生态风险评价: 以淮北市城区为例[J]. 生态学报, 31(20): 6204-6214. [Zhang X F, Wang R S, Li Z G, et al. 2011. Comprehensive assessment of urban ecological risks: The case of Huaibei City[J]. Acta Ecologica Sinica, 31(20): 6204-6214.]
- 张妍, 杨志峰. 2007a. 北京城市物质代谢的能值分析与生态效率评估[J]. 环境科学学报, 27(11): 1892-1899. [Zhang Y, Yang Z F. 2007a. Emergy analysis of urban material metabolism and evaluation of eco-efficiency in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 27(11): 1892-1899.]
- 张妍, 杨志峰. 2007b. 城市物质代谢的生态效率: 以深圳市为例[J]. 生态学报, 27(8): 3124-3131. [Zhang Y, Yang Z F. 2007b. Eco-efficiency of urban material metabolism: A case study of Shenzhen[J]. Acta Ecologica Sinica, 27(8): 3124-3131.]
- 赵胤慧, 王文迪, 宋艺航, 等. 2013. 能源约束对北京城市化进程影响的计量经济模型[J]. 水电能源科学, 31(2): 236-239. [Zhao Y H, Wang W D, Song Y H, et al. 2013. Econometric model for restriction of Beijing urbanization process under energy constraint[J]. Water Resources and Power, 31(2): 236-239.]
- 中共中央, 国务院. 2014. 国家新型城镇化规划(2014-2020年)[EB/OL]. 新华社, 2014-03-16 [2016-07-19]. http://www.gov.cn/zhengce/2014-03/16/content_2640075.htm. [CPC Central Committee, the State Council. 2014. Guojia xinxing chengzhenhua guihua (2014-2020)[EB/OL]. Xinhua News Agency, 2014-03-16 [2016-07-19]. http://www.gov.cn/zhengce/2014-03/16/content_2640075.htm.]
- 周忠学. 2011. 城市化对生态系统服务功能的影响机制探讨与实证研究[J]. 水土保持研究, 18(5): 32-38. [Zhou Z X. 2011. Conceptual mechanism model of impact of urbanization on ecosystem service and case study[J]. Research of Soil and Water Conservation, 18(5): 32-38.]
- Aerts J C J H, Botzen W J W, Emanuel K, et al. 2014. Evaluating flood resilience strategies for coastal megacities[J]. Science, 344: 473-475.
- Al-Mulali U, Sab C N B C, Fereidouni H G. 2012. Exploring the bi-directional long run relationship between urbanization, energy consumption, and carbon dioxide emission[J]. Energy, 46(1): 156-167.
- Balocco C, Papeschi S, Grazzini G, et al. 2004. Using exergy to analyze the sustainability of an urban area[J]. Ecological Economics, 48(2): 231-244.
- Brajer V, Mead R W, Xiao F. 2008. Health benefits of tunneling through the Chinese environmental Kuznets curve (EKC)[J]. Ecological Economics, 66(4): 674-686.
- Bruvold A, Medin H. 2003. Factors behind the environmental Kuznets curve. A decomposition of the changes in air pollution[J]. Environmental and Resource Economics, 24(1): 27-48.
- Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. 2012. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. Ecological Indicators, 21: 17-29.
- Burton G A, Chapman P M, Smith E P. 2002. Weight-of-evidence approaches for assessing ecosystem impairment[J]. Human and Ecological Risk Assessment an International Journal, 8(7): 1657-1673.
- Chen B, Chen S Q. 2015. Urban metabolism and nexus[J]. Ecological Informatics, 26: 1-2.
- Chen G Q, Zhang B. 2010. Greenhouse gas emissions in China 2007: Inventory and input-output analysis[J]. Energy Policy, 38(10): 6180-6193.
- Chen Q Y, Liu J L, Ho K C, et al. 2012. Development of a relative risk model for evaluating ecological risk of water environment in the Haihe River Basin estuary area[J]. Science of the Total Environment, 420: 79-89.

- Chen S Q, Chen B. 2012. Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions: A case study of Vienna, Austria[J]. *Environmental Science & Technology*, 46(8): 4498-4506.
- Cheng C. 2013. Social vulnerability, green infrastructure, urbanization and climate change-induced flooding: A risk assessment for the Charles River watershed, Massachusetts, USA [D]. Boston, MA: University of Massachusetts Amherst.
- Conke L S, Ferreira T L. 2015. Urban metabolism: Measuring the city's contribution to sustainable development[J]. *Environmental Pollution*, 202: 146-152.
- Cumming G S, Buerkert A, Hoffmann E M, et al. 2014. Implications of agricultural transitions and urbanization for ecosystem services[J]. *Nature*, 515: 50-57.
- Daily G C. 1997. *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*[M]. Washington DC: Island Press.
- Folke C, Jansson Å, Larsson J, et al. 1997. Ecosystem appropriation by cities[J]. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 26(3): 167-172.
- Gao Y, Feng Z, Li Y, et al. 2014. Freshwater ecosystem service footprint model: A model to evaluate regional freshwater sustainable development: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei, China[J]. *Ecological Indicators*, 39: 1-9.
- Goldstein B, Birkved M, Quitau M B, et al. 2013. Quantification of urban metabolism through coupling with the life cycle assessment framework: Concept development and case study[J]. *Environmental Research Letters*, 8(3): 035024.
- Grossman G M, Krueger A B. 1995. Economic growth and the environment[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2): 353-377.
- Güneralp B, Seto K C. 2008. Environmental impacts of urban growth from an integrated dynamic perspective: A case study of Shenzhen, South China[J]. *Global Environmental Change*, 18(4): 720-735.
- Haas J, Ban Y F. 2014. Urban growth and environmental impacts in Jing-Jin-Ji, the Yangtze, River Delta and the Pearl River Delta[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30: 42-55.
- Heinrichs D, Krellenberg K, Hansjürgens B. 2012. Introduction: Megacities in Latin America as risk habitat[M]//Heinrichs D, Krellenberg K, Hansjürgens B, et al. *Risk habitat megacity*. Berlin & Heidelberg, Germany: Springer-Verlag: 3-17.
- Inostroza L. 2014. Measuring urban ecosystem functions through 'Technomass': A novel indicator to assess urban metabolism[J]. *Ecological Indicators*, 42: 10-19.
- Kennedy C, Cuddihy J, Engel-Yan J. 2007. The changing metabolism of cities[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2): 43-59.
- Kennedy C, Stewart I D, Ibrahim N, et al. 2014. Developing a multi-layered indicator set for urban metabolism studies in megacities[J]. *Ecological Indicators*, 47: 7-15.
- Lee C L, Huang S L, Chan S L. 2009. Synthesis and spatial dynamics of socio-economic metabolism and land use change of Taipei metropolitan region[J]. *Ecological Modelling*, 220(21): 2940-2959.
- Lei K, Wang Z S. 2008. Emergy synthesis and simulation for Macao[J]. *Energy*, 33(4): 613-625.
- Li S S, Zhang Y, Yang Z F, et al. 2012. Ecological relationship analysis of the urban metabolic system of Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 170: 169-176.
- Liu G Y, Yang Z F, Chen B. 2012. Emergy-based urban dynamic modeling of long-run resource consumption, economic growth and environmental impact: Conceptual considerations and calibration[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 13: 1179-1188.
- Liu H, Zhang Y. 2012. Ecological network analysis of urban metabolism based on input-output table[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 13: 1616-1623.
- Moraes R, Molander S. 2004. A procedure for ecological tiered assessment of risks (PETAR) [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 10(2): 349-371.
- Munns Jr W R, Helm R C, Adams W J, et al. 2009. Translating ecological risk to ecosystem service loss[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 5(4): 500-514.
- Nielsen S N, Jørgensen S E. 2015. Sustainability analysis of a society based on exergy studies: A case study of the island of Samsø (Denmark) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 96: 12-29.
- Niemelä J, Breuste J, Elmqvist T, et al. 2011. *Urban ecology: Patterns, processes, and applications*[M]. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Northam R M. 1979. *Urban geography*[M]. New York: John Wiley & Sons.
- Okada N. 2004. Urban diagnosis and integrated disaster risk management[J]. *Journal of Natural Disaster Science*, 26(2): 49-54.
- Oke T R. 1988. The urban energy balance[J]. *Progress in Physical Geography*, 12(4): 471-508.
- Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. 2011. An examination of urban heat island characteristics in a global climate model[J]. *International Journal of Climatology*, 31(12): 1848-1865.
- Paudel K P, Zapata H, Susanto D. 2005. An empirical test of environmental Kuznets curve for water pollution[J]. *Environmental and Resource Economics*, 31(3): 325-348.
- Santamouris M, Papanikolaou N, Livada I, et al. 2001. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings[J]. *Solar Energy*, 70(3): 201-216.
- Schulz N B. 2007. The direct material inputs into Singapore's development[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2): 117-131.
- Seto K C, Fragkias M, Güneralp B, et al. 2011. A meta-analysis of global urban land expansion[J]. *PLoS One*, 6(8): e23777.

- Tao Y, Li F, Liu X S, et al. 2015. Variation in ecosystem services across an urbanization gradient: A study of terrestrial carbon stocks from Changzhou, China[J]. *Ecological Modelling*, 318: 210-216.
- Tixier G, Lafont M, Grapentine L, et al. 2011. Ecological risk assessment of urban stormwater ponds: Literature review and proposal of a new conceptual approach providing ecological quality goals and the associated bioassessment tools [J]. *Ecological Indicators*, 11(6): 1497-1506.
- Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. 2013. Capacity, pressure, demand, and flow: A conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery[J]. *Ecological Complexity*, 15: 114-121.
- Wamsler C, Brink E, Rivera C. 2013. Planning for climate change in urban areas: From theory to practice[J]. *Journal of Cleaner Production*, 50: 68-81.
- Wolman A. 1965. The metabolism of cities[J]. *Scientific American*, 213(3): 179-190.
- Wu B, Zeng W H, Chen H H, et al. 2016. Grey water footprint combined with ecological network analysis for assessing regional water quality metabolism[J]. *Journal of Cleaner Production*, 112: 3138-3151.
- Xie G D, Chen W H, Cao S Y, et al. 2014. The outward extension of an ecological footprint in city expansion: The case of Beijing[J]. *Sustainability*, 6(12): 9371-9386.
- Xu X B, Yang G S, Yan Y, et al. 2016. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020[J]. *Science of the Total Environment*, 554-555: 7-16.
- Zhang Y. 2013. Urban metabolism: A review of research methodologies[J]. *Environmental Pollution*, 178: 463-473.
- Zhang Y, Xia L L, Fath B D, et al. 2016. Development of a spatially explicit network model of urban metabolism and analysis of the distribution of ecological relationships: Case study of Beijing, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 112: 4304-4317.
- Zucaro A, Ripa M, Mellino S, et al. 2014. Urban resource use and environmental performance indicators. An application of decomposition analysis[J]. *Ecological Indicators*, 47: 16-25.

Progress and prospects of diagnostic analysis and risk prediction of urban problems based on multiple perspectives

WANG Xiaoyue, LI Shuangcheng*

(Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Center of Land Science of Peking University, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Due to the dynamic, interactive, and coupling relationship between urbanization and the ecological environment in urban areas, the study of urban problem in megacities is becoming increasingly complex and has become a hotspot area of research in China and internationally. A comprehensive understanding of the complex interaction between urbanization and the ecological environment is beneficial for revealing the mechanism and developing methods and techniques of diagnostic analysis and risk prediction of urban problems in megacity regions. Focusing on the questions of causes-diagnosis-risk prediction of urban problems, this article reviewed the progress of studies on diagnostic analysis and risk prediction of urban problems from multidimensional perspectives and identified the research trend. First, we summarized the causes of urban problems from three theoretical perspectives, including the coupling and coercing mechanism between urbanization and environment, urban metabolism disorder, and loss of ecosystem services. Then, we reviewed the two approaches of urban problem diagnosis: assessment of urban health by index; and measurement of urban metabolism by ecological thermodynamic indicators. Third, we reviewed the research on risk prediction of urban problems from single risks and comprehensive risk. Finally, we identified several key issues and potential research directions based on the existing studies. Further study should be improved with regard to data acquisition and model simulation in order to study urban or urban agglomeration problems comprehensively. Such research will facilitate comprehensive geographic study and provide an important practical method for the study of human-environment relationship.

Key words: urban problem; urbanization; diagnostic analysis; risk prediction; progress and prospect