

DOI: 10.5846/stxb201112141912

毛齐正, 罗上华, 马克明, 鄢建国, 唐荣莉, 张育新, 宝乐, 张田. 城市绿地生态评价研究进展. 生态学报, 2012, 32(17): 5589–5600.

Mao Q Z, Luo S H, Ma K M, Wu J G, Tang R L, Zhang Y X, Le B, Zhang T. Research advances in ecological assessment of urban greenspace. Acta Ecologica Sinica 2012, 32(17): 5589–5600.

城市绿地生态评价研究进展

毛齐正¹, 罗上华¹, 马克明^{1,*}, 鄢建国^{2,3}, 唐荣莉¹, 张育新¹, 宝乐¹, 张田^{1,4}

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 美国亚利桑那州立大学生命科学学院和全球可持续性科学研究所, Tempe, AZ, USA

3. 内蒙古大学中美生态、能源及可持续性科学研究中心, 呼和浩特 010021; 4. 北京林业大学, 北京 100083)

摘要:城市绿地的科学评价为绿地的规划和管理提供了参考, 对人们正确认识和改造绿地建设起着重要的作用, 为城市绿地生态功能的发挥提供了重要的依据和保障。以绿地结构的评价为基础, 总结了城市绿地生态功能、服务评价、健康评价的方法和研究进展; 提出了城市绿地生态风险评价的基本方法并概括了城市绿地可持续评价的研究方向。结果显示: 当前城市绿地的生态评价在范围上逐渐从微观尺度发展到宏观尺度, 日益强调绿地的生态服务功能, 重点关注于绿地的碳储量与降温增湿功能与效益评价以及价值化研究; 城市绿地的健康评价和可持续性评价均尚处于初级的探索阶段。指出了城市绿地生态评价的关键在于评价结果在管理和规划中的应用, 在评价内容上必须关注各部分的结合, 在评价方法上应该借助基础研究的长期监测、评价的量化以及多学科交叉的渗透。

关键词:城市绿地; 生态评价; 生态功能; 生态服务; 可持续

Research advances in ecological assessment of urban greenspace

MAO Qizheng¹, LUO Shanghua¹, MA Keming^{1,*}, WU Jianguo^{2,3}, TANG Rongli¹, ZHANG Yuxin¹, BAO Le¹, ZHANG Tian^{1,4}

1 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 School of Life Sciences and Global Institute of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA

3 Sino-US Center for Conservation, Energy, and Sustainability Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

4 Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China

Abstract: Land use change, including urbanization, has resulted in a series of environment problems. As the world continues to be urbanized at an increasing pace, our urban ecosystems and landscapes must be made more sustainable through improved management practices. To achieve this goal the structure, function, and sustainability of urban green spaces must be better understood because they provide a series of ecosystem functions and services. Urban greenspace and its functions are under increasing pressures induced by urbanization, including land conversion into impervious surfaces, soil pollution, air pollution, and intense disturbances. Ecological assessment of urban green space can provide valuable information for urban planning and management, in order to protect and enhance ecosystem services of urban green spaces. Urban greenspace assessment includes several aspects. First, the structural assessment of greenspace can be carried out at multiple scales. On a local scale, structural evaluation focuses mainly on species composition and vegetation structure. With the use of GIS and remote sensing data, landscape pattern analysis of urban greenspace is often conducted at the regional scale. Here, we also review research methods and advances in the study of ecological functions, ecosystem services and sustainability of urban greenspace. Our results show that an increasing number of methods have emerged in

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAC28B01); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-T13)

收稿日期: 2011-12-14; 修订日期: 2012-06-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mkm@cees.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

recent decades for assessing the ecosystem function and services of urban green spaces on both local and landscape/regional scales. Some of the methods are quantitative and economically oriented (i. e. developed to value greenspace ecosystem services monetarily). Among numerous ecosystem functions of urban greenspace, the carbon sequestration capacity, cooling effect, and humidifying effect have received greater attention from researchers. Despite its importance for urban sustainability, ecological risk assessment of urban green spaces has been rarely studied so far. Evaluation of urban ecosystem health and sustainability is challenging, and still in its infancy, demanding more emphasis in future research. Based on the review of previous work, we propose a conceptual framework for studying and assessing urban green spaces, with a particular emphasis on humans roles in the holistic urban ecosystems. Ecological assessment of urban greenspace must be conducted periodically, with long-term monitoring systems established. Assessment and monitoring should be integrated into the management and planning of urban landscapes following an adaptive approach.

Key Words: urban green space; assessment; ecological function; ecosystem services; sustainability

城市绿地是城市生态系统的重要组成部分,发挥着重要的生态功能,为城市提供了诸多的生态服务。土地利用的转变,城市化的扩展带来了诸如热岛效应、大气污染、土壤污染、水污染、生物多样性丧失等一系列的环境问题。随着诸多环境问题的加剧,城市绿地的评价和研究在城市中的作用也日益受到重视。城市绿地的科学评价不仅有助于人们正确认识绿地,更多的是为合理的规划和管理绿地提供科学的参考价值,进而不断提高绿地的数量和质量,以为城市绿地生态功能和服务的有效发挥提供重要的理论和支持。

城市绿地评价从最初关注绿地结构和生态功能的评价,逐渐扩展到绿地的生态服务、生态健康评价以及生态风险评价,并最后发展到日益受关注的可持续性评价。目前城市绿地的研究关注较多的是城市绿地的生态功能和生态系统服务方面的评价,并有较多成熟的方法以及实践案例^[1-3]。随着城市化带来的各种环境压力的增加,各种环境胁迫对城市绿地的健康造成潜在的风险,直接降低了绿地生态服务,城市绿地的健康评价和风险评价日益受到人们的重视。城市绿地可持续评价是结合绿地健康、功能、服务、风险对绿地的综合评价,也尚处于初步研究阶段。本文介绍了城市绿地评价在结构评价、生态功能评价、生态服务评价、生态健康评价和生态风险评价在国内外取得的最新进展,初步提出了未来城市绿地的研究框架,最后概括了城市绿地生态评价研究目前存在的问题,并提出了未来城市绿地生态评价的发展趋势。

1 城市绿地生态结构评价

城市绿地生态功能的有效发挥取决于绿地的组成、结构、分布格局、规模以及管理水平等。近年来,城市绿地的生态结构评价从微观尺度逐渐发展到宏观的区域尺度。在微观尺度上,城市绿地结构的评价内容主要包括物种的组成、乔、灌、草搭配等植被结构配置;在中尺度和区域尺度上,城市绿地生态结构评价包括对绿地斑块面积、斑块特征以及绿地与其他城市要素景观格局分布的分析和评价。

在微观尺度上,对城市绿地的结构评价主要立足于^[4-5]:(1)多样性评价:较高的绿地生物多样性不仅有利于改善日益恶化的生态环境和各种生态功能的发挥,而且满足了城市居民生活娱乐和文化休闲的各种需求^[6];乔灌草的植被配置可以更好的调节气温和保持水土,而具有更高的植物多样性的绿地不仅有利于维持系统的生态平衡,保护生物多样性,更能吸引更多的居民活动和娱乐,发挥自身的生态服务与功能。所以植物的多样性指数和植被配置的多样化相关指标是城市绿地结构的主要评价指标。(2)植物适宜性评价:城市化带来的一系列生态压力如各种生物学因素和非生物学因素也要求具备各种抗性和耐性植物在城市绿地的广泛分布。城市绿地物种的筛选和结构评价应遵循“确定的地点选择确切的植物”原则^[5]。如城市道路绿化植物尤其需要选择具有较强抗污染、抗病虫害、耐盐碱和耐旱等基因型的物种,而具某些特定高浓度污染物的工厂周围绿化必须选择抗此类污染物的植物种类,所以绿地群落的植物区系特点也是绿地结构评价的重要方面。尽管如此,对城市绿地微观结构的评价尚没有把结构与功能很好的结合,如 Nowak 等发现,城市乔木的生长期、生长速率与其固碳效应有着一定的联系^[7],植物的个体特征的认识和评价可以更好的认识绿地的固

碳功能。今后,这方面的研究有待于进一步的加强。

在区域尺度上,随着生态城市和生态经济概念的引入,自 19 世纪 20 年代,国际上对城市绿地生态结构的评价直接关注于绿地的面积、绿地的人均占有量等绿地的量化指标;20 世纪 80 年代以来,我国也一直以城市人均绿地面积、绿地率和绿化覆盖率 3 项指标指导我国城市绿地的规划和建设^[8-10]。尽管如此,城市绿地生态功能的有效发挥并不仅仅在于绿地的量,还应该取决于自身的质量。20 世纪 80 年代,随着遥感、地理信息系统技术的发展和景观生态学的渗透,对城市绿地结构的评价逐渐发展到对绿地景观水平结构的评价和研究。城市绿地景观构成、景观多样性指数、景观均匀度指数、景观破碎化指数、景观连通性、景观可达性等相关指标是绿地空间结构评价的重要指标。国内,周廷刚运用景观生态学的原理,在 GIS 支持下通过宁波市城市绿地景观缀块的等级与分布、空间结构的度量的研究和分析,对该市的城市绿地景观按综合评价^[11];车生泉选取了绿地景观构成、景观破碎度、景观多样性指数、景观最小距离指数、景观连接度指数和景观分维数等景观生态学指标也对上海市建成区范围内的公园进行景观格局分析和综合评价。肖荣波等结合绿地景观格局和植被结构综合评价了武汉工业区的绿地结构,同时也评价了不同功能区绿地景观格局的差异^[12]。

城市绿地景观结构与其生态功能与服务的发挥密切相关。周志翔等同时结合了武钢厂区绿地的数目、面积、破碎化指数以及优势度的空间结构特点,评价了不同绿地结构的滞尘效应;邵天一等分析和评价了湖北省宜昌市不同绿地景观格局吸收大气 SO_2 、 NO_x 、TSP 含量的环境效应^[13];刘艳红等发现城市绿地景观格局的热环境效应随着景观破碎化程度的加剧、景观优势度降低和多样性的增加而加强,城市绿地景观的空间分布格局对其热环境效应也有着重要的影响^[14-15]。此外,诸多研究表明,城市植被的破碎化是城市生物多样性降低的主要因素^[16-17];城市植被斑块的面积大小与城市鸟类多样性存在显著的相关关系^[18-20]。可见,与绿地结构微观尺度的评价和研究相比,城市绿地的空间大尺度的结构评价更加关注于生态功能的发挥。

综上所述,城市绿地景观格局对城市生态环境产生了重要的影响。但是,城市绿地结构是绿地生态功能发挥的必要条件,对城市绿地景观格局的评价和研究最重要的在于更好的服务于生态功能,以为城市提供更有效的生态服务。当前大量研究仍然仅仅停留在对绿地的格局研究中,或者相应的评价结果与实际的规划和应用尚不能很好的结合,未来对城市绿地结构评价与实践的结合有待于进一步的加强。

2 城市绿地生态功能评价

城市绿地生态功能是指绿地在自然的生态学过程和进化过程中,直接或间接的提供和满足人类需求的能力,主要包括绿地系统的生物生产、能量流动、物质循环和信息交流等,直接体现在绿地的固碳效应、吸收污染物、降温增湿、保持水土、生物多样性保护等。城市绿地生态功能的评价不仅有利于更好保护和管理现存的绿地系统,而且对未来绿地的规划和设计有着重要的科学价值。当前,对城市绿地生态功能的评价主要包括实测研究和日益发展的计量模拟研究。

通过实测研究来评价绿地生态功能主要集中在城市小气候的绿地调节、降低热岛效应等方面。当前国内外对城市绿地调节气候生态效应的评价具备以下几个特点:在中尺度上,以城市为单位,基于 GIS 技术开展的城市绿地景观结构对城市气候调节的效应分析;在小尺度上,以绿地斑块为单位,对不同结构绿地内部的小气候效应的评价和分析;在微观尺度上,基于植物蒸腾理论,对不同植被结构的小气候效应的观测和评价分析^[21]。区域尺度上,诸多研究显示:城市植被覆盖与城市地表面温度成显著的相关关系,植被覆盖度越高,城市地表温度越低^[22-24],甚至城市绿地面积较大的城市其温度也可能低于植被覆盖较差的郊区温度^[25]。Liu 等通过对不同面积的城市公园的降温增湿效应的监测和评价发现,城市公园绿地调节小气候的能力与绿地的面积成正相关关系^[26],同时公园内部的景观格局配置如绿地不透水面的比例、水体面积、乔木覆盖度等指标也都直接影响了绿地降温增湿的生态功能效益的发挥^[27-29]。此外,不同的植被类型如森林、灌丛、草坪等冷热源效应的差异以及不同的物种本身的蒸发蒸散机制的差异都可能影响城市绿地生态效益的发挥^[30-31]。

20 世纪末,随着计量生态学的发展,对城市生态功能评价的量化研究日益增加。目前对城市绿地生态功能的量化评价研究主要集中在对城市土壤、植被碳固存的量化评估。诸多研究表明,城市土壤中的有机碳含

量明显比农业土壤和一些自然土壤高,是城市生态系统碳循环中重要的碳库之一^[32-35];而在城市有机碳库中,城市乔木有机碳库存的研究较为广泛和深入。Nowak 等首先利用 UFORE 模型分别估算和评价了美国纽约、亚特兰大、巴尔的摩等城市森林的固碳效应^[36],结果显示:全美的城市森林每年固碳大约是 22.8 M tCa^{-1} ($13.7-25.9 \text{ M tCa}^{-1}$),不同区域的碳固存呈现显著差异,如亚特兰大的城市森林每年固碳 42100 tCa^{-1} ,而巴尔的摩每年固碳为 14800 tCa^{-1} 。尽管如此,对城市乔木固碳效应的评价和研究存在很多不确定性因素,在测定方法上尚未直接对地上部分的生物量进行预测,且碳固定的预测往往集中在地上部分,而对地下根系系统的碳固定的评价和研究仍没有涉及。Brack 估算出澳大利亚堪培拉的城市森林乔木在 4a 时间里共计固定了 300000t 的碳^[37]。但是,日益升高的城市温度也影响和改变着城市绿地固碳的能力,如 Awal 等通过两种温带乔木的呼吸作用量化评价并对比了城市和乡村乔木的固碳效应,结果表明:城市过量的 CO_2 浓度和日益升高的温度加速了城市植物呼吸的速率,降低了城市植被系统的净初级生产力,进而降低城市植物的固碳能力^[38]。

城市绿地在吸收污染物、净化空气发挥着重要的生态功能。研究发现,通过大气干湿沉降,城市植被可以吸收空气中大约 50% 多环芳烃污染物 (PAH),经迁移转化并最终永久储存在土壤中,尤其是城市绿地森林、城市乔木植被类型在吸收污染物效应起着关键性的作用^[39-40]; McDonald 等结合绿地覆盖和大气污染物传输的动力学特征,估算出城市乔木覆盖增加 10% 的条件下,大气污染物 PM_{10} 浓度也相应的降低 10%,相当于每年转化并降低 110 t PM_{10} 污染物,直接为城市绿地建设和城市环境改善提供了理论依据^[41-42];此外,通过植物叶片的重金属含量来度量植物个体吸收污染物的能力,以说明城市植被在改善城市环境中的重要作用^[41]。但是,与绿地的降温增湿效应的实测研究不同,由于技术上存在诸多困难,目前城市绿地滞尘效应评价、大气污染物吸收效应等相关评价和研究多基于绿地物种个体水平的差异来探讨不同物种的功能效果^[43],尚没有上升到对绿地群落水平研究,未来这方面的研究有待进一步加强。

作为城市植物、动物的栖息地,城市绿地还担负着生物多样性保护的重要功能。对城市绿地生物多样性保护的评价和研究主要集中在对城市绿地植被生境的间接评价和绿地植被在维持城市生物多样性的机制研究中。城市景观破碎化形成了不同面积大小的相互隔离的绿地斑块,面积较小的生境斑块占据着越来越大的比重,对生物多样性保护、外来植物入侵、植物本身的传粉和进化都产生了深远的影响^[44,19,20],所以,在对绿地生物多样性保护的评价过程中,往往选择绿地面积、连接度、破碎化等指标间接评价其生态功能。城市植物资源生境的不连续性也直接影响到一些城市生物的行为,植被覆盖度的降低不仅直接影响了寄主的扩散行为,也可能改变某些植物遗传后代的选择,如物种偏向选择依靠重力传播且个体较大的种子的概率大于选择个体较小依靠空气及风力传播的种子^[46]。此外,城市绿地的自然属性也是评价生物多样性保护的重要指标^[45]。城市中半自然的绿地生境中外来物种显著高于本地物种,未来的城市绿地的管理规划将对生物多样性保护有着积极的意义^[47]。城市绿地的人为管理和规划直接导致了植被同质性特征,包括物种组成的同质性和生理生态特征的相似性,物种的同质化特征不利于植物应对未来全球气候变化的能力,所以未来城市绿地的评价中应该把植物的同质性特征也逐渐作为重要的评价指标,以指导绿地的建设。

生物多样性对城市化过程、城市景观格局转变的响应是当前城市生态研究的热点问题。但是,由于城市环境的复杂性,目前尚没有成熟的和系统的理论基础来阐明城市生物的变化机制。城市绿地的自然属性和高强度的人为干扰特征为研究城市化对生物多样性的影响提供了很好的资源平台,城市绿地格局的变化对城市动物活动的影响、植物多样性的变化和生理生态特征的变化都是未来生态学研究需要亟待解决的问题。因此,在评价城市绿地生态功能的同时,城市绿地对生物多样性的保护机制,评价不同绿地景观对保护生物多样性的贡献和差异是绿地评价的主要方面。

3 城市绿地生态服务评价

城市绿地生态服务是指绿地给人类所带来的直接或间接的服务和福祉,是绿地生态功能服务于人类的直接表现,可以直接或间接转换成一定的经济价值。城市绿地生态服务评价的量化和价值化研究是目前城市绿

地研究的热点问题。鉴于绿地生态服务的复杂性和抽象性,目前虽然没有统一的量化方法来评价城市绿地的生态服务及社会功能,但针对城市植被生态服务的量化评价方法较为多样化,总体上可分为直接量化评价和间接量化评价。

城市绿地生态服务的量化评价研究始于 20 世纪 90 年代初,McPherson 利用城市绿地结构与绿地的投入与产出的时空变化,直接评价了城市绿地的生态系统服务,为城市绿地的建设、资金投入、城市建设以及传统的绿地管理方法提供了重要的参考价值^[48]。尽管如此,城市绿地生态系统服务直接的评价应用最多的是 Nowak 等于 20 世纪 90 年代末期创建的城市森林影响模型(Urban Forest Effects,简称 UFORE)^[36,49-51],该模型首先建立在城市森林的结构调查基础上,搜集大气污染以及气候条件等相关信息,运用计算机软件量化城市森林的结构,并测算出城市森林所发挥的环境效应以及创造的经济价值,如城市绿地的固碳、大气污染物吸收、降温节能、植物 VOC 排放评测等服务。目前该模型已应用于美国的多个城市以及加拿大的多伦多和意大利西部的锡拉库扎城的绿地评价与研究。2001 年,欧洲城市研究的一项计划 Benefits of Urban Green Space (BUGS) 致力于探讨城市绿地及居民区格局的评价方法,在关注城市绿地对城市环境质量和城市愉悦度的影响的基础上,探讨并提出了城市绿地在城市规划中应用的关键措施和建议。BUGS 评价模型不仅囊括了交通污染物、大气环境质量、微气候、噪音污染、可达性和经济因素、社会满意度等绿地的生态效益、经济效益以及社会效益,而且从单个街道或公园的尺度到区域的尺度提出了城市规划中绿地的设计和布置的规划理念^[52],与之前的评价模型相比较,更突出了绿地生态服务评价与绿地规划和管理的结合。

城市绿地生态系统服务间接评价方法主要是基于影响城市生态功能发挥的各种关键因子,包括区域景观因素和小尺度的城市植被因素,通过间接评价与城市绿地生态服务密切相关的各种“指示因子”,进而量化和评估城市植被的生态功能。2011 年 Dobbs 等综合了城市绿地的生态服务功能、信息功能、生境功能、生产功能,结合了表征城市绿地功能的直接指标,如植被结构、植物多样性、土壤营养和土壤污染等生态指标,提出了间接量化城市森林生态系统服务功能(ESG)的指标体系,并指出乔木覆盖度、土壤 pH 值和土壤有机碳含量是最能表征城市森林生态服务的主要参考指标^[53]。Pataki 等构建了量化城市绿地生态服务的模型体系,提出了把生物地球化学循环的过程整合到对城市绿地的初级生产力评价中,最终量化了城市绿地在温室气体的降低、城市降雨径流截获以及大气环境质量的改善中得积极作用^[54],实现了绿地的生态功能到生态服务价值的转化。在大尺度上,诸多结构因子指标也逐渐被纳入到生态服务评价中,如绿地斑块数目、斑块面积、连接度、破碎度等一系列景观指标以间接量化城市绿地生态服务价值^[55-56]。

城市绿地的可达性、公平性是指城市绿地资源享用的可获取性与公平性,是城市环境、城市建设可持续性的重要指标,是生活居民生活环境质量评价的重要指标^[57-59]。绿地可达性评价主体往往选取一定规模的绿地,距居民区的距离是对城市绿地可达性直接评价的一种方法,居民到达绿地的时间和经济评估是绿地可达性评价的重要方面;此外,绿地可达性与城市居民的健康评价的结合是反映绿地可达性服务功能的直接手段^[60-62]。Comber 在建立 GIS 网络分析的基础上,结合绿地可达性和社会经济数据,评价并确定了城市不同社会群体对绿地的可达性需求,为量化城市绿地可达性对不同社会群体的服务评价提供了方法^[59]。在对城市绿地生态系统服务综合评价的基础上,国内俞孔坚首先将景观可达性引入了城市绿地的生态系统服务评价中。胡志斌利用 GIS 系统建立城市绿地可达性模型,以人口密度、道路分布、土地利用以及绿地面积作为模型参数,建立了城市绿地景观可达性评价模型,评价了绿地景观格局与生态服务^[63]。刘常福详细的论述了针对城市绿地可达性的研究方法和需要解决的主要问题^[64]。

除此之外,城市绿地所提供的生态服务不仅仅局限于生态的或经济的,城市绿地在城市生态系统中还担负着重要的社会功能^[65]。近年来,有关城市绿地与城市居民健康关系的研究日益增多。有研究发现,若长时间脱离自然,人类会逐渐出现一些心理疾病,并可能会直接影响到人体生理健康^[66-67];而在医院病人恢复阶段,病房内对外界绿地的可见程度会直接或间接影响到病人的康复时间和健康状态^[68];在城市居民生活环境中,绿地的比例与居民的健康水平存在显著的正相关关系,直接说明了城市绿地在城市环境中的重要地

位^[10,69]。Mitchell and Popham 强调 城市绿地自然环境与人类身体健康的密切相关主要是因为绿地在人类机体活动以及心理恢复中发挥着积极的作用^[70] 城市绿地自然空间的户外活动比其他户外活动更有利于人体健康^[71] 主要表现在人类在自然中情感的释放 认知的提高和心理的愉悦程度的提高 城市绿地自然环境对城市居民健康的积极作用应该得到城市政府部门、健康部门、城市规划者等相关部门足够的重视^[71-72]。

4 城市绿地生态风险评价

4.1 生态风险评价

生态风险是指生态系统及其组分所承担的风险 指一个种群、生态系统或整个景观的正常功能受外界胁迫 从而在目前和将来减少该系统内部某些要素或其本身的健康可能性。生态风险评价是定量预测各种风险源对生态系统产生风险的或然性以及评估该风险可接受程度的方法体系 是生态环境风险管理与决策的定量依据。生态风险评价的主要研究内容包括风险受体的危害识别 风险受体对风险源的暴露分析以及风险的表征。

4.2 城市绿地生态风险评价

城市化带来了一系列的环境问题 目前以城市为主体的生态风险评价主要集中在外来入侵种的生态风险 土壤重金属的生态风险以及土地利用变迁存在的潜在的生态风险评估。在城市生态系统中 以绿地作为风险受体 城市中复杂的生态环境作为风险来源 结合绿地健康评价的城市绿地生态风险评价鲜有研究。城市绿地在城市的发展过程中承受着巨大的环境压力 面临着一定的风险 复杂的风险来源与城市的社会经济发展密切相关。因此 在分析影响城市绿地生态功能发挥的环境压力的基础上 探索城市绿地环境健康的空间异质性 明确影响城市绿地健康的主要风险来源和风险强度 以在大尺度上合理的规划和设计绿地的选址和格局 在小尺度上选择合适的物种 保证城市绿地生态功能的有效发挥 这些都将是未来城市绿地生态风险评价的主要任务。

鉴于目前尚没有城市绿地生态风险评价的案例研究 建议其评价方法可以参照生态风险评价的通用性方法开展相应的评价和研究。城市绿地健康风险源探析和风险压力评级是绿地生态风险评价的关键部分。城市绿地生态健康的风险压力及风险来源主要有:土地利用变化 气候变化、大气污染、土壤污染、人为管理和干扰等 对城市绿地的危害主要反映在:气候变化对植物生理特征的影响和日益增加的外来物种的入侵;大气污染、土壤污染对绿地植物生理生态健康的直接危害;人为干扰对绿地的直接间接影响 尤其是城市化增加带来的绿地景观的破碎化。此外 城市绿地生态风险评价的研究方法首先应该建立在城市绿地生态功能评价和服务评价的基础上 结合城市绿地健康评价 探讨影响城市绿地生态功能发挥的主要因子 找出城市绿地主要的风险来源 明确影响绿地健康的主导因子。通过城市绿地的健康风险的暴露途径的探析 以城市绿地生态功能评价的结果为风险表征 建立城市绿地生态风险评价完整体系。以上是对城市绿地生态风险评价提出的基本的原理和方法,

5 城市绿地生态健康评价

城市绿地生态健康是绿地植被发挥生态功能的活力 抵抗各种环境压力的抗性 受损害后的恢复力以及功能可持续发挥的综合表征。城市绿地的健康不仅影响了生态功能的发挥 也直接决定着城市绿地的可持续发展。所以 对绿地健康的正确评价是城市绿地经营管理的重要的参考和依据。

从组织水平上看 城市绿地的健康包括植物个体的健康 如乔木的正常生理生长、抗病虫害抗污染的能力、植被种群的稳定性、群落的多样性以及生态系统内部的物流能流和组织水平、绿地景观格局分布的合理性等。城市绿地植被健康评价应用最多和开展最早的研究是基于城市植物个体形态学的分析和评价 这一方法较为直观并易于操作和分析。Cunning 评价了美国马里兰州五个城市行道树的健康概况 对道路乔木健康度的健康指标主要是基于乔木的冠幅和损害特征 具体的指标主要包括:乔木多样性;乔木胸径分级;树冠特征;树冠缺失^[73]。Jean Stutz 在此基础上补充了这一评价方法 分析了乔木物种分类、植被结构和病虫害特征 结合树木健康的压力来源如生物学因素(病虫害)和非生物学因素(管理或其他未知环境因素)按照健康度分级

定性的评价了美国凤凰城森林乔木的健康状况^[74]。结合城市绿地生境特点(土地利用、地面覆盖)和乔木个体的生长特性(乔木起源、生长大小),Jim 等通过南京市 6000 多个植株评价了自然因素和人为因素对城市绿地乔木健康的影响^[75];同时,Thaiutsa 等也结合绿地景观和植被结构评价了泰国曼谷道路乔木的分布^[76]。但是,对城市绿地植被个体水平的健康评价并不能直接代表整个绿地的健康水平,仅仅只能作为参考,其应用性存在很大的局限性。绿地的管理和规划还要依赖于对绿地整体健康的研究和评价。

借助地统计学方法,城市绿地的健康评价研究也从微观尺度转向宏观尺度,研究者开始从景观水平上开展对城市绿地健康的模拟和评价研究。McPherson 提出了对城市森林健康的多级、多层模拟方法,即区域尺度上植被覆盖评价依赖于遥感地统计学分析,植被结构如乔木数量的简单评价可以借助于一些经受培训的志愿者的野外调查,而对城市森林功能和环境压力的评价和强化模拟则需要建立基础研究上,依赖于专家和学者的后期建模分析^[77]。Styler 等结合城市特征和生物的相关关系,如物种的丰富度与森林斑块密度的相关性;城市森林覆盖和苔藓丰富度的强相关性,城市结构如人口密度、交通和建筑物密度的强相关性提出了用 152 个相关城市指标或生物指标来间接的评价城市森林生态系统健康的评价方法^[78]。城市绿地健康是较为抽象的概念,国内对城市绿地健康研究的案例较少,仅有肖漫按照绿地斑块面积及植被结构分级定量的评价了武汉市城市绿地健康级别^[79]。

综上,城市绿地健康评价从个体水平已经逐渐发展到区域水平,对城市绿地的管理起着直接的导向作用。但是,由于城市环境的异质性和植被的复杂性,对城市绿地个体水平的跨区域的生理生化健康评价尚没有相关的研究。近年来,遥感/地理信息系统技术在生态学研究已经得到广泛的应用,如归一化植被指数 NDVI 反映了植被的覆盖度,逐渐应用于植被生态恢复和评价中^[80-82]。尽管如此,植物叶绿素浓度、叶片含水量以及植物蒸腾等可以直接反映植物生长状态的遥感数据和信息在城市植被健康评价中尚未得到广泛的应用,今后相关的研究有待进一步加强,以利于开展城市植被健康的区域化评价和研究。

6 城市绿地可持续性评价

21 世纪初,随着城市可持续性研究的深入^[83-84],城市绿地的可持续性评价日渐受到关注。Dwyer 和 Nowak 定义了城市森林的可持续性,即保存并维持健康的植被以及生态系统,保持生态功能的持续发挥以为人类提供长期的生态服务和收益的能力^[85]。所以,从植被可持续的概念来看,城市绿地可持续性评价是对城市绿地的健康、生态功能和生态服务的可持续性的综合评价。

目前对城市绿地的可持续性评价主要集中在城市森林,且尚处于探索阶段,仅有 Clark 等对城市森林可持续展开了评价和研究。城市森林是城市绿地重要的组成部分,城市森林功能的多样性,城市森林与其他城市要素的连通性以及城市绿地动态的变化都保证了城市植被结构、功能、效益的可持续性。在内容上,城市森林可持续发展模式囊括了城市森林资源和城市植物的健康、公众的广泛认可和支持以及科学合理的管理策略。在此基础上,Clark 和 Matheny 综合了资源健康和资源管理,运用 20 个评价标准从不同尺度对美国 25 个城市森林资源展开了可持续性评价,主要包括城市森林资源评价(植被覆盖特征、乔木年龄分布、物种多样性、本地种植分布)、社会参与(个人、团体和政府参与)和森林资源管理评价(植被管理强度、植物保护强度、物种选择、资金投入等)^[86]。以上城市森林的可持续评价可以直接为城市绿地可持续评价提供重要的参考价值。

城市绿地可持续性的评价结果可直接为城市绿地管理提供重要的信息,为城市规划和建设提供一定的科学依据。随着城市可持续发展概念的提出,绿地可持续性评价在绿地的发展中将占据重要的地位。尽管如此,当前有关城市植被的可持续评价尚未涉及到生态功能以及生态服务价值的预测和研究,未来这方面的结合是可持续评价的主要任务。

7 城市绿地生态系统研究框架

区别于其他自然植被,城市绿地主要是由人为规划形成并受人类活动强烈影响的复杂系统,一方面,城市绿地为人类主体提供了诸多生态功能和生态服务效益,另一方面,城市绿地也同时承担着人类活动带来的诸

多压力。所以,在城市绿地的生态评价和研究以及未来城市绿地的规划和管理中,必须全面的考虑人为活动在城市绿地研究和评价中的决定性作用,强调人类活动在城市绿地研究中的主导作用,建立可持续的城市绿地生态发展模式,以实现城市绿地的生态功能和服务价值的最大化,以城市居民人体健康为最终目标,建立城市绿地生态评价的综合研究理论体系,全面开展城市绿地的相关研究(图1)

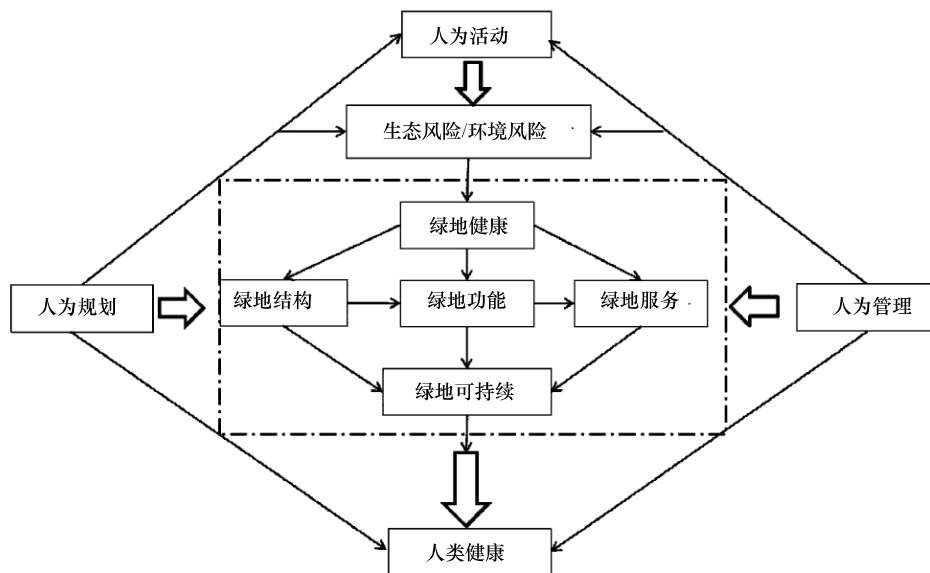


图1 城市绿地研究框架

Fig. 1 Research framework of urban green spaces

8 结论与展望

8.1 城市绿地生态综合评价体系的建立

目前,对城市绿地生态服务评价研究较多,城市绿地健康评价较少,城市绿地生态风险尚没有相关的案例,对城市绿地的综合评价尚没有一个统一的研究体系和研究范式。城市绿地生态服务、生态风险、生态健康是相互联系、相互影响、互为表里的统一整体。城市中复杂的生态风险来源影响了城市植被健康,进而影响到绿地生态服务的有效发挥。以城市绿地生态服务评价为目标,开展绿地健康评价和生态风险评价的综合评价是未来绿地生态评价研究的主导方向。在现有的评价研究基础上,建立城市绿地的综合评价体系,找出影响城市绿地健康的风险来源,明确影响城市绿地健康的关键因子,针对性地制定规划和管理措施,才能实现城市绿地生态服务的有效发挥和城市绿地可持续发展。

8.2 城市绿地生态评价的量化研究

城市绿地生态评价的量化研究是当前绿地研究的热点问题。当前,把生态功能效益间接转化成经济效益即价值化的量化研究是目前城市绿地量化评价研究的主要方法,价值化评价方法为政府制定相应的决策提供了重要的参考,为城市绿地科学规划和管理以及可持续性发展提供了重要的保证。但是,由于城市绿地植被的多级别要素和环境压力来源的复杂性特征,绿地健康评价、生态风险评价的量化鲜见有研究,未来这方面的研究需要受到研究者的关注。尽管如此,对城市绿地的量化研究方法的准确性和实用性更值得进一步的关注和区别。

8.3 城市绿地生态评价的长期监测研究

城市绿地生态功能与服务评价,生态健康评价以及生态风险评价等都需要建立在对城市绿地环境的长期实测研究基础之上。绿地结构的差异对生态效益发挥的影响,绿地植物的健康度监测,城市环境对绿地格局,绿地个体健康的影响以及人为管理导致的绿地结构和功能的变化,这些基础性的研究尤其需要受到人们的关注。城市绿地土壤碳固定的变化;气候变化对城市植物分布格局的影响,城市植物健康以及功能对环境变化的响应;本地种、外来种在城市化进程中格局的转变等一系列基础生态学研究对理解城市化过程有着

重要的意义。

8.4 城市绿地生态评价在城市规划管理中的应用

城市绿地评价可以为城市绿地的科学划和管理,实现城市绿地可持续性发展提供重要的支持。绿地的健康级别划分可以为绿地的管理策略提供重要的信息,如物种的选择、植被结构的调整等;绿地植被生态风险来源分析和风险级别的划分一方面可以为绿地缓解或者消除压力源,另一方面可以为绿地的健康制定相应的应对风险的对策,为下一步合理的规划和管理绿地提供重要的参考价值。目前城市绿地的评价成果在应用上这方面的研究还很欠缺。所以,在未来的城市绿地研究中,城市绿地评价的结果应该被纳入政府的决策中,以为城市绿地的发展提供更多资金和支持。

此外,绿地生态评价在城市可持续发展的应用要求一些重要的能够描述绿地状态的指标体系的创立和提出,以便于相关政府部门能直接利用,这可能是解决问题的有效手段,但也是当前很多评价中都存在的问题。

References:

- [1] Wendel H E W, Downs J A, Mihelcic J R. Assessing equitable access to urban green space: the role of engineered water infrastructure. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(16): 6728–6734.
- [2] Jim C Y, Chen W Y. Ecosystem services and valuation of urban forests in China. *Cities*, 2009, 26(4): 187–194.
- [3] Troy A, Wilson M A. Mapping ecosystem services: practical challenges and opportunities in linking GIS and value transfer. *Ecological Economics*, 2006, 60(2): 435–449.
- [4] Yi J. Studies on ecological structure of plant communities in urban garden & optimize and design on landscape [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2005.
- [5] Sæbø A A, Borzan Ž, Ducatillion C, Hatxistathis A A, Lagerström T T, Supuka J, García-Valdecantos J L, Rego F, van Slycken J. The selection of plant materials for street trees, park trees and urban woodland // Konijnendijk C C, Nilsson C, Randrup T, Schipperijn J. *Urban Forest and Trees*. Netherlands: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 257–280.
- [6] Sæbø A, Benedikz T, Randrup T B. Selection of trees for urban forestry in the Nordic countries. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2003, 2(2): 101–114.
- [7] Nowak D J, Stevens J C, Sisinni S M, Luley C J. Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. *Journal of Arboriculture*, 2002, 28(3): 113–122.
- [8] Ong B L. Green plot ratio: an ecological measure for architecture and urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 63(4): 197–211.
- [9] Devuyst D, Hens L. *How Green Is the City? Sustainability Assessment and the Management of Urban Environments*. New York: Columbia University Press, 2001.
- [10] Maas J, Verheij R A, Groenewegen P P, de Vries S, Spreeuwenberg P. Green space, urbanity, and health: how strong is the relation? *Journal of Epidemiology and Community Health*, 2006, 60(7): 587–592.
- [11] Zhou T G, Guo D Z. GIS-based study on spatial structure of urban greenbelt landscapes: taking Ningbo City as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 901–907.
- [12] Xiao R B, Zhou Z X, Wang P C, Ye Z Q, Guo E X, Ji G C. Landscape pattern analysis and comprehensive assessment of greenbelt in Wuhan steel & iron industrial district. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 1924–1930.
- [13] Shao T Y, Zhou Z X, Wang P C, Tang W P, Liu X Q, Hu X Y. Relationship between urban green-land landscape patterns and air pollution in the central district of Yichang city. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 691–696.
- [14] Liu Y H, Guo J P. The research of NDVI-based urban green space landscape pattern and thermal environment. *Progress in Geography*, 2009, 28(5): 798–804.
- [15] Cheng H H, Zeng H, Wang Z S, Jian X. Relationships between the types, pattern characteristics of urban green space and land surface temperature: a case study in Shenzhen special economic zone. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(3): 495–501.
- [16] Iverson L R, Cook E A. Urban forest cover of the Chicago region and its relation to household density and income. *Urban Ecosystems*, 2000, 4(2): 105–124.
- [17] Burgman M A, Keith D, Hopper S D, Widyatmoko D, Drill C. Threat syndromes and conservation of the Australian flora. *Biological Conservation*, 2007, 134(1): 73–82.
- [18] Palmer G C, Fitzsimons J A, Antos M J, White J G. Determinants of native avian richness in suburban remnant vegetation: implications for conservation planning. *Biological Conservation*, 2008, 141(9): 2329–2341.

<http://www.ecologica.cn>

- [19] Fujita A , Maeto K , Kagawa Y , Ito N. Effects of forest fragmentation on species richness and composition of ground beetles (Coleoptera: Carabidae and Brachinidae) in urban landscapes. *Entomological Science* , 2008 , 11(1) : 39–48.
- [20] Carrete M , Tella J L , Blanco G , Bertellotti M. Effects of habitat degradation on the abundance , richness and diversity of raptors across Neotropical biomes. *Biological Conservation* , 2009 , 142(10) : 2002–2011.
- [21] Lin Y D , Han X M , Wu X G , Hao X Y , Wang J , Liang F , Liang J , Wang Z H. Ecological field characteristic of green land based on urban green space structure. *Acta Ecologica Sinica* , 2006 , 26(10) : 3339–3346.
- [22] Yuan F , Bauer M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* , 2007 , 106(3) : 375–386.
- [23] Carlson T N , Traci Arthur S. The impact of land use — land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective. *Global and Planetary Change* , 2000 , 25(1/2) : 49–65.
- [24] Carlson T N , Ripley D A. On the relation between NDVI , fractional vegetation cover , and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* , 1997 , 62(3) : 241–252.
- [25] Jonsson P. Vegetation as an urban climate control in the subtropical city of Gaborone , Botswana. *International Journal of Climatology* , 2004 , 24(10) : 1307–1322.
- [26] Liu J M , Tian Y H , Zhang L B. Study on the relation of urban green space area and ecological response in Beijing City , China // Conference on Environmental Pollution and Public Health. Irvin: Sci Res Publ , Inc-Srp , 2010: 503–508.
- [27] Chang C R , Li M H , Chang S D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning* , 2007 , 80(4) : 386–395.
- [28] Su Y X , Huang G Q , Chen X Z , Chen S S. The cooling effect of Guangzhou City parks to surrounding environments. *Acta Ecologica Sinica* , 2010 , 30(18) : 4905–4918.
- [29] Baris M E , Sahin S , Yazgan M E. The contribution of trees and green spaces to the urban climate: the case of Ankara. *African Journal of Agricultural Research* , 2009 , 4(9) : 791–800.
- [30] Hao X Y , Lin Y D , Wu X G , Wang J , Liang F , Liang J. Vertical thermal characteristics analysis between different urban green land. *Acta Ecologica Sinica* , 2007 , 27(2) : 685–692.
- [31] Wu F , Li S H , Liu J M. The effects of greening , none-greening square and lawn on temperature , humidity and human comfort. *Acta Ecologica Sinica* , 2007 , 27(7) : 2964–2971.
- [32] Jo H K , McPherson E G. Carbon storage and flux in urban residential greenspace. *Journal of Environmental Management* , 1995 , 45(2) : 109–133.
- [33] Pataki D E , Alig R J , Fung A S , Golubiewski N E , Kennedy C A , McPherson E G , Nowak D J , Pouyat R V , Romero Lankao P. Urban ecosystems and the North American carbon cycle. *Global Change Biology* , 2006 , 12(11) : 2092–2102.
- [34] 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.
- [35] Churkina G , Brown D G , Keoleian G. Carbon stored in human settlements: the conterminous United States. *Global Change Biology* , 2010 , 16(1) : 135–143.
- [36] Nowak D J , Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution* , 2002 , 116(3) : 381–389.
- [37] Brack C L. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. *Environmental Pollution* , 2002 , 116(Supplement 1) : S195–S200.
- [38] Awal M A , Ohta T , Matsumoto K , Toba T , Daikoku K , Hattori S , Hiyama T , Park H. Comparing the carbon sequestration capacity of temperate deciduous forests between urban and rural landscapes in central Japan. *Urban Forestry and Urban Greening* , 2010 , 9(3) : 261–270.
- [39] Simonich S L , Hites R A. Importance of vegetation in removing polycyclic aromatic hydrocarbons from the atmosphere. *Nature* , 1994 , 370(6484) : 49–51.
- [40] Beckett K P , Freer-Smith P H , Taylor G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution* , 1998 , 99(3) : 347–360.
- [41] Gratani L , Crescente M F , Varone L. Long-term monitoring of metal pollution by urban trees. *Atmospheric Environment* , 2008 , 42(35) : 8273–8277.
- [42] Bealey W J , McDonald A G , Nemitz E , Donovan R , Dragosits U , Duffy T R , Fowler D. Estimating the reduction of urban PM₁₀ concentrations by trees within an environmental information system for planners. *Journal of Environmental Management* , 2007 , 85(1) : 44–58.
- [43] Kretinin V , Selyanina Z M. Dust retention by tree and shrub leaves and its accumulation in light chestnut soils under forest shelterbelts. *Eurasian Soil Science* , 2006 , 39(3) : 334–338.
- [44] Loram A , Tratalos J , Warren P , Gaston K J. Urban domestic gardens (X) : the extent & structure of the resource in five major cities. *Landscape*

- Ecology ,2007 ,22(4) : 601–615.
- [45] Sandström U G , Angelstam P , Mikusiński G. Ecological diversity of birds in relation to the structure of urban green space. Landscape and Urban Planning ,2006 ,77(1/2) : 39–53.
- [46] Sanderson K. Weed's seeds evolve quickly in the city. Nature news ,2008 639.
- [47] Millard A. Semi-natural vegetation and its relationship to designated urban green space at the landscape scale in Leeds ,UK. Landscape Ecology ,2008 ,23(10) : 1231–1241.
- [48] Gregory McPherson E. Accounting for benefits and costs of urban greenspace. Landscape and Urban Planning ,1992 ,22(1) : 41–51.
- [49] Nowak D J. Impact of urban forest management on air pollution and greenhouse gases // Proceedings of the 1999 Society of American Foresters National Convention. 1999 September 11–15; Portland ,OR. SAF Publ. 00–1. Bethesda ,MD: Society of American Foresters ,143–148.
- [50] Nowak D J , Crane D E. The Urban Forest Effects (UFORE) model: quantifying urban forest structure and functions. Hansen ,Mark; Burk ,Tom , eds. Integrated tools for natural resources inventories in the 21st century. Gen. Tech. Rep. NC–212. St. Paul ,MN: U. S. Dept. of Agriculture , Forest Service , North Central Forest Experiment Station ,2000 714–720.
- [51] McPherson E G , Simpson J R , Xiao Q F , Wu C X. Million trees Los Angeles canopy cover and benefit assessment. Landscape and Urban Planning ,2011 ,99(1) : 40–50.
- [52] De Ridder K , Adamec V , Bañuelos A , Bruse M , Bürger M , Damsgaard O , Dufek J , Hirsch J , Lefebvre F , Pérez-Lacorzana J M , Thierry A , Weber C. An integrated methodology to assess the benefits of urban green space. Science of the Total Environment ,2004 ,334–335: 489–497.
- [53] Dobbs C , Escobedo F J , Zipperer W C. A framework for developing urban forest ecosystem services and goods indicators. Landscape and Urban Planning ,2011 ,99(3/4) : 196–206.
- [54] Pataki D E , Carreiro M M , Cherrier J , Grulke N E , Jennings V , Pincetl S , Pouyat R V , Whitlow T H , Zipperer W C. Coupling biogeochemical cycles in urban environments: ecosystem services , green solutions , and misconceptions. Frontiers in Ecology and the Environment ,2011 ,9(1) : 27–36.
- [55] Zhou Z X , Shao T Y , Wang P C , Gao X , Xu Y R , Guo E X , Xu L H , Ye Z Q , Peng X M , Yu C J. The spatial structures and the dust retention effects of green-land types in the workshop district of wuhan iron and steel company. Acta Ecologica Sinica ,2002 ,22(12) : 2036–2040.
- [56] Zhou Z X , Shao T Y , Tang W P , Wang P C , Liu X Q , Xu Y R. The different urban green-land spatial patterns and their environmental effects: a case of the central district of Yichang city ,Hubei Province. Acta Ecologica Sinica ,2004 ,24(2) : 186–192.
- [57] Yin H W , Kong F H , Zong Y G. Accessibility and equity assessment on urban green space. Acta Ecologica Sinica ,2008 ,28(7) : 3375–3383.
- [58] Talen E , Anselin L. Assessing spatial equity: an evaluation of measures of accessibility to public playgrounds. Environment and Planning A ,1998 ,30(4) : 595–613.
- [59] Comber A , Brunson C , Green E. Using a GIS-based network analysis to determine urban greenspace accessibility for different ethnic and religious groups. Landscape and Urban Planning ,2008 ,86(1) : 103–114.
- [60] van Herzele A , Wiedemann T. A monitoring tool for the provision of accessible and attractive urban green spaces. Landscape and Urban Planning ,2003 ,63(2) : 109–126.
- [61] Nicholls S. Measuring the accessibility and equity of public parks: a case study using GIS. Managing Leisure ,2001 ,6(4) : 201–219.
- [62] Luo W , Wang F H. Measures of spatial accessibility to health care in a GIS environment: synthesis and a case study in the Chicago region. Environment and Planning B: Planning and Design ,2003 ,30(6) : 865–884.
- [63] Hu Z B , He X Y , Liu Q X , Chen W , Li Y H , Liu C F. Green space accessibility research based on gis: taking Shenyang as an example. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute ,2005 ,21(6) : 671–675.
- [64] Liu C F , Li X M , Han D. Accessibility analysis of urban parks: methods and key issues. Acta Ecologica Sinica ,2010 ,30(19) : 5381–5390.
- [65] Wu J G. Toward a landscape ecology of cities: beyond buildings , trees , and urban forests // Carreiro M M , ed. Ecology , Planning , and Management of Urban Forests: International Perspectives. New York: Springer ,2008: 10–28.
- [66] Brown L R. Eco-Economy: Building an Economy for the Earth. New York: W. W. Norton ,2001.
- [67] Kellert S R , Wilson E O. The Biophilia Hypothesis. Waxington DC: Island Press ,1995.
- [68] Ulrich R S. View through a window may influence recovery from surgery. Science ,1984 ,224(4647) : 420–421.
- [69] de Vries S , Verheij R A , Groenewegen P P , Spreeuwenberg P. Natural environments–healthy environments? An exploratory analysis of the relationship between greenspace and health. Environment and Planning A ,2003 ,35(10) : 1717–1731.
- [70] Mitchell R , Popham F. Effect of exposure to natural environment on health inequalities: an observational population study. The Lancet ,2008 ,372(9650) : 1655–1660.
- [71] Pretty P J , Peacock J , Sellens M , Griffin M. The mental and physical health outcomes of green exercise. International Journal of Environmental Health Research ,2005 ,15(5) : 319–337.

- [72] Hartig T. Green space , psychological restoration , and health inequality. *The Lancet* , 2008 , 372(9650) : 1614–1615.
- [73] Cumming A B , Galvin M F , Rabaglia R J , Cumming J R , Twardus D B. Forest health monitoring protocol applied to roadside trees in Maryland. *Journal of Arboriculture* , 2001 , 27(3) : 126–138.
- [74] Stutz J. Urban tree health in the Phoenix metropolitan area. *Phytopathology* , 2007 , 97(7) : S111–S111.
- [75] Jim C Y , Chen S S. Assessing natural and cultural determinants of urban forest quality in Nanjing (China) . *Physical Geography* , 2008 , 29(5) : 455–473.
- [76] Thaitutsa B , Puangchit L , Kjelgren R , Arunpraparut W. Urban green space , street tree and heritage large tree assessment in Bangkok , Thailand. *Urban Forestry and Urban Greening* , 2008 , 7(3) : 219–229.
- [77] McPherson E G. Monitoring urban forest health. *Environmental Monitoring and Assessment* , 1993 , 26(2/3) : 165–174.
- [78] Styers D M , Chappelka A H , Marzen L J , Somers G L. Developing a land-cover classification to select indicators of forest ecosystem health in a rapidly urbanizing landscape. *Landscape and Urban Planning* , 2010 , 94(3/4) : 158–165.
- [79] Xiao M. The Health Evaluation of Urban Green Land of Wuhan Main City Zone [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University , 2009.
- [80] Carlson T N , Ripley D A. On the relation between NDVI , fractional vegetation cover , and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* , 1997 , 62(3) : 241–252.
- [81] Pettorelli N , Vik J O , Mysterud A , Gaillard J M , Tucker C J , Stenseth N C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution* , 2005 , 20(9) : 503–510.
- [82] Gamon J A , Field C B , Goulden M L , Griffin K L , Hartley A E , Joel G , Peñuelas J , Valentini R. Relationships between NDVI , canopy structure , and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications* , 1995 , 5(1) : 28–41.
- [83] Wu J G. Urban sustainability: an inevitable goal of landscape research. *Landscape Ecology* , 2010 , 25(1) : 1–4.
- [84] Wu J G. Landscape ecology , cross-disciplinarity , and sustainability science. *Landscape Ecology* , 2006 , 21(1) : 1–4.
- [85] Dwyer J F , Nowak D J , Noble M H. Sustaining urban forests. *Journal of Arboriculture* , 2003 , 29(1) : 49–55.
- [86] Clark J R , Matheny N P. A model of urban forest sustainability: application to cities in the United States. *Journal of Arboriculture* , 1998 , 24(2) : 112–120.

参考文献:

- [4] 易军. 城市园林植物群落生态结构研究与景观优化构建 [D]. 南京: 南京林业大学 , 2005.
- [11] 周廷刚, 郭达志. 基于 GIS 的城市绿地景观空间结构研究——以宁波市为例. *生态学报* , 2003 , 23(5) : 901–907.
- [12] 肖荣波, 周志翔, 王鹏程, 叶贞清, 郭尔祥, 冀广超. 武钢工业区绿地景观格局分析及综合评价. *生态学报* , 2004 , 24(9) : 1924–1930.
- [13] 邵天一, 周志翔, 王鹏程, 唐万鹏, 刘学全, 胡兴宜. 宜昌城区绿地景观格局与大气污染的关系. *应用生态学报* , 2004 , 15(4) : 691–696.
- [14] 刘艳红, 郭晋平. 基于植被指数的太原市绿地景观格局及其热环境效应. *地理科学进展* , 2009 , 28(5) : 798–804.
- [15] 程好好, 曾辉, 汪自书, 简霞. 城市绿地类型及格局特征与地表温度的关系——以深圳特区为例. *北京大学学报: 自然科学版* , 2009 , 45(3) : 495–501.
- [21] 蔺银鼎, 韩学孟, 武小刚, 郝兴宇, 王娟, 梁锋, 梁娟, 王志红. 城市绿地空间结构对绿地生态场的影响. *生态学报* , 2006 , 26(10) : 3339–3346.
- [28] 苏泳嫻, 黄光庆, 陈修治, 陈水森. 广州市城区公园对周边环境的降温效应. *生态学报* , 2010 , 30(18) : 4905–4918.
- [30] 郝兴宇, 蔺银鼎, 武小钢, 王娟, 梁峰, 梁娟. 城市不同绿地垂直热力效应比较. *生态学报* , 2007 , 27(2) : 685–692.
- [31] 吴菲, 李树华, 刘娇妹. 林下广场、无林广场和草坪的温湿度及人体舒适度. *生态学报* , 2007 , 27(7) : 2964–2971.
- [55] 周志翔, 邵天一, 王鹏程, 高翅, 徐永荣, 郭尔祥, 徐隆辉, 叶贞清, 彭行梅, 于春杰. 武钢厂区绿地景观类型空间结构及滞尘效应. *生态学报* , 2002 , 22(12) : 2036–2040.
- [56] 周志翔, 邵天一, 唐万鹏, 王鹏程, 刘学全, 徐永荣. 城市绿地空间格局及其环境效应——以宜昌市中心城区为例. *生态学报* , 2004 , 24(2) : 186–192.
- [57] 尹海伟, 孔繁花, 宗跃光. 城市绿地可达性与公平性评价. *生态学报* , 2008 , 28(7) : 3375–3383.
- [63] 胡志斌, 何兴元, 陆庆轩, 陈玮, 李月辉, 刘常富. 基于 GIS 的绿地景观可达性研究——以沈阳市为例. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版* , 2005 , 21(6) : 671–675.
- [64] 刘常富, 李小马, 韩东. 城市公园可达性研究——方法与关键问题. *生态学报* , 2010 , 30(19) : 5381–5390.
- [79] 肖漫. 武汉市主城区城市绿地健康评价 [D]. 武汉: 华中农业大学 , 2009.