

# 城市地表硬化对植物生理生态的影响研究进展

赵丹, 李锋\*, 王如松

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

**摘要:** 城市地表硬化是城市发展和扩张的主要表征之一, 也是影响城市生态环境及植物生理生态的重要原因。在分析城市地表硬化引起植物生态因子变化的基础上, 重点综述了地表硬化对植物气体交换、水分平衡、养分循环等生理生态过程的影响, 归纳了不同地表硬化性质、气候季节变化、植物类型以及群落结构等因素对地表硬化景观植物生理生态影响的差异。探讨了目前该领域研究中存在的问题, 并提出今后研究建议, 以期优化城市生态用地结构, 提高城市植物的生态系统服务, 改善城市人居环境提供一定的科学依据。

**关键词:** 地表硬化; 小气候变化; 土壤; 城市植物

## Effects of ground surface hardening on plant eco-physiological processes in urban landscapes

ZHAO Dan, LI Feng\*, WANG Rusong

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

**Abstract:** Ground surface hardening is the main results of urban development and expansion. It is also an important factor affecting the urban environment and plant eco-physiological processes. With the analysis of the changes on plant ecological factors caused by ground surface hardening, this study focused on an overview of the effects of ground surface hardening on gas exchange, water balance, nutrient cycling and other eco-physiological processes of plants in urban landscapes. The variation of impacts of different hardness of ground surface hardening, changes of seasons, plants, community structure, and human factors on plant eco-physiological processes in urban landscapes was analyzed and summarized. Thus issues in previous studies were discussed, and suggestions for future research were made. This study might provide a scientific method to optimize the ecological structure of urban landscapes, enhance the plant ecosystem services and improve the living conditions in cities.

**Key Words:** ground surface hardening; micro-climate change; soil; urban plants

城市是一类以人类活动为中心的社会-经济-自然复合生态系统<sup>[1-2]</sup>。城市植物是城市自然生态系统的重要组成部分, 具有显著的生态系统服务<sup>[3]</sup>。随着城市化和工业化的进程, 城市空间的急速膨胀和强烈的人类活动明显影响着生态系统服务, 导致了城市植物的自然生态系统服务的退化<sup>[4-5]</sup>。人们已越来越认识到自然生态系统服务对于维持城市生态系统平衡和可持续发展的重要性。

地表硬化是城市化和工业化的主要表征之一。城镇化的快速发展, 使得城市的土地利用结构发生了变化, 原来以植被为主的自然景观逐渐被众多的人工建筑物质所取代<sup>[6]</sup>。不断扩大的硬化地表妨碍了土壤和大气的物质、能量交流, 对城市生态环境产生了一定的负面影响<sup>[7-8]</sup>。植物为城市生态系统提供了重要的生态系统服务, 在维持城市生态平衡和改善城市环境方面起着其他基础设施无法替代的重要作用, 越来越受到

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(70803050); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-324, 422); 国家“十一五”科技支撑计划课题(2008BAC28B04)

**收稿日期:** 2009-06-06; **修订日期:** 2009-12-14

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

国内外学者们的关注<sup>[9-10]</sup>。但由于城市地表硬化改变了城市植物的生态因子,使城市地上气候环境和地下土壤条件不能满足植物正常生长发育对于水肥气热的需求,阻碍了植物的气体交换、水分平衡、能量平衡和养分循环,严重影响了植物的正常生长发育及生态系统服务<sup>[11-13]</sup>。自然的生态系统服务受到损害,又会影响到居民的生活质量、城市的生态环境和社会经济发展。如何通过合理的生态规划与管理增强自然生态系统对人类的服务功能,已成为当前城市可持续发展的一大问题。因此,研究城市地表硬化对植物生理生态的影响及机制,对于提高植物的生态系统服务,改善城市人居环境具有重要意义。同时也能够为城市土地资源利用与规划、城市生态用地及生态安全调控提供科学依据。

## 1 城市地表硬化对植物生态因子的影响

在以人类活动为主导的城市环境中,与植物正常生长发育相关的主要生态因子包括生物因子(动物、植物、微生物)及非生物因子中的气候因子(光、温、水、气)和土壤因子(土壤的物理、化学特性)等,它们都受到人类活动的强烈干扰,与自然生态系统相比,发生了不同程度的改变,其中地表硬化是最主要的影响因素之一。

### 1.1 气候因子

城市硬化面积的不断扩大,一方面使得下垫面粗糙度增大,反射率减小,地面长波辐射损失减少,致使在同样天气条件下吸收和储存更多的太阳辐射,从而改变了城市下垫面的热力属性,是引发城市热岛效应的重要原因之一<sup>[14-17]</sup>。另一方面阻隔了大气和土壤的水分交换,使得自然降水不能渗入土壤,大部分被强制性地排入下水道,改变了城市的水平衡,使城市湿度降低。其中由水泥、柏油、砂石等建筑材料构建的城市建筑物和路面因为其热容量大,导热率高,渗透率低,总的热导性比郊区大的多,对太阳辐射的平/对流分割及多重反射吸收更为严重,对城市小气候的影响最为强烈<sup>[7,18-20]</sup>。

绿色植物通过蒸腾作用、光合作用、滞纳吸收粉尘等生理活动可以削减太阳辐射效应、改善城市小气候,起到降温增湿的效果,从而明显的缓解热岛效应<sup>[21-23]</sup>。然而,由于城市的植被覆盖率低,绿地面积较小且分布零散等原因,植物对水分和太阳光的吸收与蒸腾散热作用减弱,自然生态系统服务显著降低<sup>[24]</sup>。由于城市辐射收支和水分蒸发的差异,影响到近地面空气层的温度和湿度,从而在城市形成特殊的小气候。与周围郊区相比,城市中热通量高出 50%,温度平均高出 1—3℃,个别城市甚至达到 12℃,而湿度则有不同程度的降低<sup>[21]</sup>。

### 1.2 土壤因子

由于城市建设过程中的人为干扰,城市土壤与自然土壤相比,理化性质发生了很大的改变,加之硬化材料的覆盖,更加速了城市土壤结构及理化性质的破坏<sup>[25-27]</sup>。

城市建设施工使得城市土壤中掺入大量渣砾,石头和沙土的含量明显增加,黏土和有机质的比例减小,土壤水分的渗透和储存能力降低<sup>[9,28]</sup>。硬化铺装再加上树穴内土壤板结,使得城市土壤的容重增加、孔隙度减少<sup>[29]</sup>,阻碍了土壤气体和水分的交换。另外,地下构筑物及管道等设施占据了城市的地下空间,进一步改变了土壤固、液、气三相组成和孔隙分布状态及土壤水、气、热、养分状况<sup>[30]</sup>。

城市的下垫面以建筑物和人工铺砌的坚实路面为主,大多数为不透水层。加之人工排水系统发达,降雨后雨水很快沿屋顶、路面汇入人工排水管渠流失,阻隔了自然降水的下渗,造成地面比较干燥<sup>[31-32]</sup>。同时,地下建筑的地基扰动以及对地下水的超支开采,导致地下水位的下降,限制了地下水对城市土壤水分的补给<sup>[32-33]</sup>。地表硬化对降雨下渗和地下水补给的影响,使得城市原来土壤的水力特征发生改变,导致城市土壤水循环受阻。

而城市的硬质地面,吸热和传导热的能力很强,加之城市热岛效应,使得地下土壤得到不同程度的升温。李丽雅等<sup>[34]</sup>人通过实验测得长春市街道路面下 30 cm 处土壤温度为 25℃左右,较对照林地土壤温度高出 3—4℃。

硬化地表阻隔了树木的凋落物回归土壤,而土壤中养分的补充主要来自植物残体有机质的矿质化作用,

由于长年没有营养的补充,造成城市土壤养分匮乏<sup>[35]</sup>。硬化分割及贫瘠的水肥条件又会导致土壤动物和微生物的种类和数量下降<sup>[36]</sup>,使得矿物质的微生物分解过程受到限制,从而进一步影响了城市土壤的营养循环。

同时,城市地表硬化使得土壤盐分的扩散受阻,随树木的代谢过程越积越多,再加上人为施肥、市政工程及污水灌溉等活动更加重了城市土壤的盐渍化,加重了土壤的板结<sup>[29]</sup>。而城市化和工业化对城市土壤的硬化和改造,还使一些人工污染物特别是重金属污染物进入土壤,造成土壤污染<sup>[37-39]</sup>。

在地表硬化这一特殊人为生境下,城市土壤的理化性质及生物组成都发生了很大改变,结构破坏、土壤紧实、含水量低、通气性差、温度较高、土壤养分的有效性降低等问题不能满足植物生长对水肥气热的需求,严重影响城市植物的生态系统服务<sup>[25,31,33,40]</sup>。

### 1.3 生物因子

由于硬化地面的铺装和城市构筑物的阻隔,城市景观破碎化,土壤分布零散,面积小且孤立,与自然生态系统相比,物质循环和转化过程单调缓慢,致使土壤微生物组成发生改变,种类和数量减少,代谢降解能力降低<sup>[37,41]</sup>。而由于地表硬化所导致的环境变化及植物、动物、微生物种群之间相互作用的连锁变化也是极为显著的。比如,人类活动和建筑增加了城市中 N 沉降,城市地表硬化又会阻碍凋落物中 N 素回归土壤,阻碍了 N 素的植物、微生物固定。含氮酸性沉降物在土壤中大量沉积,不仅可以影响土壤的理化性质,而且还可以直接引起土壤动物的生长和繁殖减退甚至死亡。蚯蚓等土壤动物的数量及分布的变化又会使得土壤的形成发育和理化性质发生改变,影响到土壤生物生长的正常环境,导致土壤生物活性降低,进而又会影响到 N 素的循环。而作为植物养分的重要成分,N 素的缺乏又会直接影响植物的生长发育和生态服务功能。然而,不同类型的生物群体由于其耐受性和生存环境的不同,对于相同的硬化胁迫所作出的反应也有很大的差异性。另外,一些相互依赖而生长的植物群和动物群的生态空间由于地表硬化被分离开来,破坏了城市中的小生态<sup>[36,42]</sup>,同时也影响到城市绿色空间的联通和整个城市生态系统的稳定和可持续发展。

## 2 地表硬化对植物生理生态过程的影响

城市地表硬化引起了植物生存的地上环境和地下土壤条件的变化,直接或间接改变了植物生存所必需的温度、水分、空气、养分等生态因子。但是这些生态因子都不是孤立存在的,而是处于相互依赖的关系之中,一个因子的改变会引起其他因子的相应变化。对植物的影响也不是单独作用的,而是与其他生态因子共同的、综合地对植物发生作用。任何一个生态因子对植物的影响也是多方面的。在这些生态因子的综合作用下,城市植物的物质代谢和能量循环发生了相应的变化,主要表现在以下几个方面。

### 2.1 气体交换

城市硬化的地表像一个不透气的盖子,阻隔了大气-植物-土壤这个连续体的气体交换,使得植物的光合作用、呼吸作用、蒸腾作用等重要的生理生态过程受到影响。

地表硬化所导致的地表和空气的高温,使植物叶片的辐射负荷加重,在气孔的调控作用下,植物与大气的交换发生了改变。由于城市中硬化地面和绿地往往交错零散分布,再加上空气的流动,城市不同地表覆盖类型上面的空气温度差别不大<sup>[7]</sup>。但是硬化材质较高的吸热性和储热能力,造成地表温度明显升高,从而使得植物的叶温增高,叶空蒸汽压差(LVPD)增加,叶片气孔导度下降,影响植物和大气 CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等气体的交换<sup>[43-44]</sup>。

城市长期高温干燥的小气候条件加速了植物的水分蒸腾散失,一些木本植物在 LVPD 增长到阈值时,关闭气孔,以减少水分的蒸腾散失,从而避免导致更频繁的水分胁迫,但光合速率也随之降低<sup>[45-47]</sup>。植物气孔对不利的土壤条件有直接的前馈反应,土壤紧实、含水量低时,也会引起植物的气孔关闭<sup>[48-49]</sup>。叶片气孔开闭过程中,光合作用吸收 CO<sub>2</sub> 的过程同蒸腾作用水分消耗的过程是相反的。植物为了吸收 CO<sub>2</sub> 就必须以蒸腾作用损失水分作为代价<sup>[18]</sup>。而叶温增加对于植物蒸腾作用的影响比对光合作用更大,从而使的城市硬化条件下大部分植物的水分利用速率(光合速率/蒸腾速率)提高<sup>[50]</sup>。对于高温条件下,植物的水分散失情况,耐

寒种和耐湿种的适应机制有所不同,目前还没有一个统一的结论,有待进一步研究。

硬化压实作用使得土壤孔隙率较低,土壤中空气含量降低,根系有氧呼吸受到影响,导致根系中毒、腐烂<sup>[51-52]</sup>。在灌溉或降雨后,树坑内水分的垂直渗漏和水平扩散受阻而造成坑内积水,土壤受淹,植物根系进行无氧呼吸,使其生长发育受到限制<sup>[53]</sup>。而通过人为钻孔通气的方法,能够明显地提高土壤与大气的氣體流通,改善行道树的生长状况<sup>[54]</sup>。另外,采用透水性材料或在硬化铺装时留以空隙也是改善城市土壤透气性和植物根呼吸的有效手段。

## 2.2 水分平衡

地表硬化对植物的水分吸收、传输及散失过程都造成不同程度的阻碍,从而影响了植物的水分平衡。封闭的硬化地面水分渗透率低<sup>[35]</sup>,再加上压实作用降低了土壤的孔隙率,造成城市土壤渗透和贮存水分的能力下降。城市地表硬化导致土壤结构的改变,黏土和有机质比例的下降也是造成城市土壤保水能力下降的原因之一<sup>[28,55]</sup>。由于硬覆盖对土壤水力特征的改变,使得城市土壤的有效水减少,水势下降,植物根系的吸水速率降低<sup>[30]</sup>。同时,城市植物立地条件差,土壤硬度的增加使得植物根系扩展延伸的阻力增加,生长速度减慢,根系形态发生畸变,变短变粗,根须稀疏,进一步阻碍了根系对水分和养分的吸收<sup>[29]</sup>。

植物的气孔导度取决于土壤的有效水和空气的蒸汽压差<sup>[50]</sup>。单棵或整株的植物暴露在干燥的气候环境中时,叶片气孔会对空气湿度做出直接反应。当土壤含水量变化时,植物地上部分的敏感性比根系更强,气孔也会做出相应的调控<sup>[49]</sup>。城市地表硬化对空气温湿度和土壤水分的双重影响,严重阻碍了植物的水分蒸腾散失过程<sup>[18,28,55]</sup>,从而直接影响到大气-植物-土壤连续体的水分传输和植物的水分平衡。

## 2.3 养分循环

由于硬化地表阻隔的原因,树木的凋落物多被运走处理,打破了树木与土壤间的物质循环,致使叶片中的有效成分不能回归土壤,造成土壤养分匮乏<sup>[32]</sup>。而土壤和树木之间的营养元素通过雨水淋溶的归还量与各种地面的渗透率呈正比,对土壤营养元素的吸收也由于地面类型的差异而不同<sup>[35]</sup>。城市中有植被覆盖区域的土壤肥力和速效 N、P、K 含量明显高于无植被覆盖区域和硬化区域<sup>[38,56]</sup>,植物对于 N、P、K 3 种营养元素的循环利用效率也较高<sup>[57]</sup>。

而土壤的水热条件及其他理化性质也与植物养分的吸收有很大关系。土壤温度高使得植物根系的衰老加速,降低了细根的寿命,抑制根对养分和水分的吸收<sup>[58]</sup>。较高的土壤温度还会影响各种矿物的风化、矿物质的溶解度、土壤微生物的活动等,降低土壤有机质的氧化分解速率,进而影响城市植物的养分利用和生长发育<sup>[59]</sup>。同时,土壤硬度大、含水量低时,可溶性离子的扩散和利用效率降低,根系对养分的吸收减弱<sup>[60]</sup>。另外,城市土壤中的有效磷易与路面铺装施工时混入其中的水泥、石灰等含钙物发生化学反应,生成难溶性的磷酸盐,造成有效磷流失,树木生长所需的养分得不到满足。地面硬化使植物的养分循环受到很大影响,生长速度减缓,生态效应变差<sup>[30]</sup>。

## 2.4 其他影响

Sarah 和 Chris 对停车场中植物根周围、地表和空气中温度进行测量,结果显示,沥青路面在阳光直射下,夏季里地表土温高达 50℃ 以上,致使表层根系日灼,失去活力<sup>[12]</sup>。当植物根系感受到不利的土壤条件时又会随即对枝干发出抑制信号,影响到植物的叶面积和枝干生长<sup>[48]</sup>。其他学者通过模拟实验的方法也指出:硬化条件下植物的树高、胸径及生物量都明显降低,叶面积和比根长度较小,生长速度减慢<sup>[18,61-62]</sup>。Elizabeth 和 Azlin 通过实地测定城市植物叶绿素荧光参数认为:城市道路周边及公共娱乐场所的压实作用影响植物光合作用等生理生态反应<sup>[63]</sup>。然而,植物的光合作用受到多种因素的综合影响,在特殊的城市环境下,光照、温度、水分、养分等生态因子都发生了不同程度的改变,压实与植物光合作用之间的直接关联性还有待进一步证实。

硬化改造还会引起城市土壤的盐渍化,树木受到盐害后,春季叶片发芽延迟,叶片较小,叶缘和叶片有枯斑,呈棕色,严重时叶片干枯脱落;夏季多次萌发新梢及开花,芽干枯,严重时整枝或全株枯死<sup>[30]</sup>。盐分渗透

到植物根区,不仅影响水分渗透和离子的吸附过程<sup>[64]</sup>;过多盐分的积累,还会阻碍根部对钙、镁、磷等基本养分的吸收<sup>[32]</sup>,抑制了土壤微生物的活动,影响植物根系分布,进而影响其光合速率以及树高、径粗等生长状况<sup>[65]</sup>。而硬化覆盖造成城市土壤中重金属积累严重,可导致土壤退化、水体污染或直接毒害植物。

### 3 影响城市地表硬化与植物生理生态关系的因素

#### 3.1 硬化性质差异

地表硬化的类型、年限和范围不同,对植物的影响程度有很大差异。不同硬化类型的地面,土壤、地表、空气温度及相对湿度都有很大差异,对植物的影响程度也不同。沥青、混凝土等硬化地面,由于通气透水性较差,并且热容量大、导热性好,对植物的影响远大于石材砖和砂砾等硬化地面<sup>[7,43]</sup>。孔正红等<sup>[35]</sup>人对不同硬化类型下悬铃木物质循环的研究发现:水泥地面的降雨渗透率接近为零,对土壤营养元素循环及植物生产力的影响都明显大于水泥砖面、踏实土和花坛土。Montague 和 Kjelgren 对 6 种不同地面覆盖类型(沥青、混凝土、砾石、火山岩、松皮、草皮)下的能量通量进行分析也表明:夏季太阳辐射较强的情况下,沥青和混凝土的地表温度比草皮高 25℃,与火山岩、砂砾石等路面相比也高出 3—7℃,土壤热通量、土壤温度也都是最大,而植物的生长状况也是沥青覆盖下最差<sup>[7]</sup>。其他学者通过对比实验研究也认为通透性较好的硬化材料,对城市环境及植物生长的影响较小<sup>[18,25,52]</sup>。

城市化是急剧的土地利用变化过程,城市地表硬化的年限越长,对城市土壤的影响越大,城市土壤的退化越明显<sup>[27]</sup>。土壤中重金属的含量也随着土地利用年限的推移而加剧<sup>[64]</sup>。时间对于城市土壤物理、化学及生物性质差异的形成起着重要的作用,硬化年限较近的土壤与硬化年限久的土壤相比,容重、有机质、C/N 比、生物量含量等都有很大差异<sup>[27]</sup>。而且,植物的短期应激性和长期的适应性有很大区别,在硬化年限越长的条件下,土壤中水分和养分含量明显较低,长期生存在这样的环境中的植物已经形成了一定的适应机制。

随着硬化面积的增加,硬化效应对植物生长的地上及地下生态因子的影响程度也随之增加。一方面由于硬化面积的增加,地表对太阳辐射的吸收储存能力提高,与周围绿地的距离增加,空气流通性降低,对于地表和空气的升温贡献更大。另一方面,硬化面积越大,绿色空间之间的联通性越差,生态空间隔离程度增加,对于植物群落及土壤动物及微生物的影响也更大。但目前关于硬化面积及年限对植物影响的研究还处于定性分析阶段,缺乏定量研究。

#### 3.2 季节气候条件

不同的季节气候环境,温度及水分条件的不同,引起地表硬化对植物生理生态影响的差异。湿润的气候条件下,沥青覆盖下的挪威枫树总失水量比草皮覆盖下多 1/3;而干旱气候条件下,则是草皮覆盖下失水量更多<sup>[7,57]</sup>。对于其他树种的研究也得出了类似的结论<sup>[66-67]</sup>。

然而,在同一气候区的不同季节,地表硬化对植物的影响也存在差异性。Erin 和 Thomas 通过比较不同地表覆盖下夹竹桃在四个季节的生长状况表明:春季和夏季,草皮覆盖的条件下生长的夹竹桃与其他 3 种条件下相比,生物量多 11%,叶面积增加 16%,生长速度提高了 3%;但在秋季和冬季,草皮覆盖条件下生长的夹竹桃由于缺乏硬质材料的覆盖保暖,遭受霜冻损害,使得生物量、叶面积及生长速度明显低于其他 3 种地表类型<sup>[18]</sup>。Danielle 等对于干旱和半干旱地区的草本植物的研究结果也显示:土壤表面特征和降雨季节差异共同作用,调节着植物叶片气体交换和水分状况的动态变化<sup>[22]</sup>。

因此,硬质覆盖在缺水干旱地区有利于植物保水,在寒冷季节还能够提高植物生长后期地热,对于土壤水热传输及植物生长发育也有有利的一面,这在农业种植方面已有一定的应用<sup>[62,68]</sup>。

#### 3.3 植物类型及群落结构

不同的植物对于满足其生长的水肥气热等条件的需求不同,对于周围生态因子变化的敏感性也有一定差异<sup>[49]</sup>。地表硬化引起地表和空气温度的升高时,海棠树、柳树和枫树等大部分乔木的叶温、LVPD 及叶片气孔导度的敏感性较大,能够及时地作出响应,在硬化覆盖的条件下的水分散失量要比草皮覆盖减少,在干旱地区这种反馈反应更容易发生<sup>[45,57,67]</sup>。但是,在相同的气候季节条件下悬铃木对于地表硬化引起的小气候变化

的则做出不同的响应;硬化条件下的水分散失量与草皮覆盖条件下相比基本相同,甚至更多<sup>[7]</sup>。对于不同植物在地表硬化条件下的响应情况,不同学者的结论不尽相同,还有待根据植物功能型(C3、C4、CAM)进一步研究。

同种植物树龄不同对硬化条件的响应也不同。新栽的树木或冠层较小的树木,由于叶片比较稀疏,且根系细而短,受到地表硬化的影响更大<sup>[47]</sup>。但即使是同一棵植物,阳叶和阴叶由于暴露程度不同,受到的影响也存在差异<sup>[69]</sup>。

地表硬化对于单棵植物和聚群生长的植物的影响程度也不同。与单棵孤立生长的植物相比,聚集分布的植物,郁闭度增加,叶片截获地面长波辐射的总量增加,但是由于叶片之间的遮蔽和覆盖,暴露在外的叶片比例减少,从而使得能量负荷增加对单个植物体的影响减弱<sup>[7,47]</sup>。

#### 4 讨论

在自然环境下,生态因子变化对植物生理生态的影响及机制已有较为深入的研究,但是城市环境对植物的影响是累积性的,与自然环境的极端性有很大不同。目前,国内外关于城市地表硬化对植物生态因子的改变以及对植物生理生态的影响仍处于探索阶段,虽然也有不少研究,但由于城市硬化环境的无规律性、封闭性和多种生态因子的交互作用,使得目前的研究中还存在一些不足。

##### 4.1 研究内容与方法

目前大多数国内外学者对于城市地表硬化对于植物生理生态影响机制的研究还比较片面,大多仅仅研究地表硬化所导致城市环境某一单个方面的变化,如城市热岛效应或城市土壤性质等对植物的影响,对于地表硬化所引起城市各种环境因子的变化对城市植物的影响的综合研究还有待找到较好的方法,进一步深入研究。国外学者多侧重于地表硬化引起的城市小气候变化对植物气体交换及水分状况的影响。对于地表硬化导致城市土壤的变化对植物生理生态过程的影响也有一定研究,但相对较少。国内学者则较多的关注地表硬化对土壤通气性及水肥条件的改变,以及由此造成对植物根呼吸及物质循环等方面的影响。缺乏地表硬化引起的城市干热小气候及土壤性质等综合条件作用下对植物的影响研究。另外,目前国内外的研究基本都是聚焦于地表硬化对植物的短时期的影响,缺乏对长期影响机制的研究。

在研究方法上,国内外大多学者采用盆栽模拟的方法,即选用相同树龄的植物,通过设置和调节土壤状况和周围环境条件,从而进行半控制性的实验。这种方法可以较好地避免实际城市环境中的一些干扰因素,但是不能全面地反映实际城市硬化条件下多因子对植物的综合作用,而且盆栽大多只能反映幼苗的响应情况,不能真实地表征地表硬化对城市植物的长期作用和累积效应。也有部分学者选取典型植物和地点,实地测定环境因子和植物的生理指标,并选取草坪或裸地等地表覆盖类型下生长的同种植物进行对照,从而对比分析硬化地表对植物的影响。但是植物个体和土壤本底的差别,以及周围环境和人为因素的干扰等都对实验地点选择的合理性和结果的可靠性提出了挑战。

##### 4.2 研究展望

实验模拟和现场测定的有机结合,如何更好避免干扰因素,全面地研究地表硬化对植物生理生态的影响,将是今后相关研究重点突破的地方。另外,由地表硬化条件造成的植物地上地下多因子的变化,如何综合地影响植物的生理生态过程也有待于进一步深入研究。同时,在不同的地表硬化性质、季节气候条件以及植物种类群落结构下,进行城市地表硬化对植物生理生态影响的差异及其作用机制的深入探索,并进行长期监测和动态跟踪研究也是今后需要加强的内容。

城市是以人类活动为主的生态系统,人为因素对于植物生长的影响不可忽视。人为的污染破坏、融雪剂的使用以及栽种不当、管理不足等问题都加剧了硬化条件对植物的影响程度,影响植物的正常生长发育。然而,园林养护和人为调控对于城市植物生长状况的提高有很大帮助,通过人工浇灌及钻孔通气补充肥料等方法能够有效改善硬化条件下植物的水肥条件和通气状况,提高城市植物的生长势。同时,城市绿地规划、园林设计时,选择透水性较好的硬化材料,也能够有效的提高大气-植物-土壤这个连续体的水气交换,有利于植物

的生长发育。而在基础机理研究的基础上,将抗逆性较好的植物树种应用于城市绿化中,并结合不同植物生态活性的差异进行选种栽培,对于提高城市植物的成活率和生态服务功能有很大帮助。另外,在城市绿地设计中,综合考虑不同群落结构叶面积指数的差异和绿地的景观合理性,并配合立体绿化等措施,也是改善城市绿色空间生态服务功能的有效途径。

因此,通过研究城市地表硬化对植物生理生态的影响及其内在机制,探索城市化、工业化对于植物生态系统服务及城市生态环境的影响,具有重要的理论和现实意义,可为城市土地生态服务优化和生态用地建设提供科学依据。

#### References:

- [ 1 ] Ma S J, Wang R S. Social-economic-natural complex ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4 (1):1-9.
- [ 2 ] Wang R S, Chi J, Ouyang Z Y. Eco-integration approaches for middle and small sized cities' and towns' sustainable development. Beijing: China Meteorological Press, 2001: 25-30.
- [ 3 ] Li F, Wang R S. Evaluation, planning and prediction of ecosystem services of urban green space: A case study of Yangzhou City. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (9):1929-1936.
- [ 4 ] Urs P K, Heather G H, Marty D M. Change in ecosystem service values in the San Antonio area Texas. *Ecological Economics*, 2001, 39 (3): 333-346.
- [ 5 ] Li F, Wang R S. Method and practice for ecological planning of urban green space -Yangzhou city as the case study. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2003, 16:46-48.
- [ 6 ] Brazel S W, Selover N, Vose R, Heisler G. The tale of two climates-Baltimore and Phoenix urban LTER sites. *Climate Reseach*, 2000, 15:123-135.
- [ 7 ] Montague T, Kjelgren R. Energy Balance of six common landscape surfaces and the influence of surface properties on gas exchange of four containerized tree species. *Scientia Horticulturae*, 2004, 100 (1-4):229-249.
- [ 8 ] Hardin P J, Jensen R R. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: A Terre Haute case study. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2007, 6 (2):63-72.
- [ 9 ] Jim C Y. Managing Urban Trees and Their Soil Envelopes in a Contiguously Developed City Environment. *Environmental Management*, 2001, 28 (6):819-832.
- [ 10 ] Feng Q, Hu D, Wang S B, Li N. Study on the Impacts of Urban Environment on Urban Plant. *Journal of Anhui Agriculture*, 2007, 35(35): 11562-11565.
- [ 11 ] Tracey L S, Rorbert D B. Form and structure of maple trees in urban environments. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 46(4):191-201.
- [ 12 ] Sarah B C, Chris A M. Rhizosphere, surface, and air temperature patterns at parking lots in phoenix, Arizona, U. S. *Journal of Arboriculture*, 2004, 30 (4):245-252.
- [ 13 ] Sandrine G, Dennis M, Nico K. The role of soil and microclimatic variables in the distribution patterns of urban wasteland flora in Brussels, Belgium. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(1/2):45-55.
- [ 14 ] Gonzales S, Vapari S, Holder C, Nachabe M. Evaluation of urban soil compaction by measurement of penetration resistance. *Hortscience*, 2007, 42 (4):1005-1005.
- [ 15 ] Dos S M, Alessandro A, Gielow R. Above-ground thermal energy storage rates, trunk heat fluxes and surface energy balance in a central Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148 (7/8):917-930.
- [ 16 ] Herb W R, Janke B, Mohseni O, Stefan H G. Ground surface temperature simulation for different land covers. *Journal of Hydrology*, 2008, 356 (3/4):327-343.
- [ 17 ] Raumann C G, Cablk M E. Change in the forested and developed landscape of the Lake Tahoe basin California and Nevada, USA, 1940 —2002. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255 (8/9):3424-3439.
- [ 18 ] Erin C M, Thomas A D. The effect of urban ground cover on microclimate and growth and leaf gas exchange of oleander in Phoenix, Arizona. *Biometeorol*, 2005, 49:244-25.
- [ 19 ] Best M J, Grimmond C B, Maria G V. Evaluation of the urban tile in moses using surface energy balance observations. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 118(3):503-525.

- [20] Perry J H, Ryan R J. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic, temperatures: A Terre Haute case study. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2007, 6(2):63-72.
- [21] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108(445):1-24.
- [22] Bonnie A, Jack H, Vivian H, Gregory E, Laurie F, Jim O, Chuck H. Trees for Parking Lots and Paved Areas. Virginia Cooperative Extension, 2002: 430-028.
- [23] Andrew M, Jason B, Nigel J T. Impact of Increasing Urban Density on Local Climate: Spatial and Temporal Variations in the Surface Energy Balance in Melbourne, Australia. *American Meteorological Society*, 2007, 46(4):477-492.
- [24] Offerle B, Grimmond C, Fortuniak K, Pawlak W. Intraurban Differences of Surface Energy Fluxes in a Central European City. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2006, 45(1):125-136.
- [25] Robert R, Harold M, George S, David W, Thomas L, Beth K, Omololu J, Bianaca N. Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 88(2/4):73-80.
- [26] Stefan N, Nabil F, Li F, Chu X, Xie X. The Influence of Different Land Uses on Mineralogical and Chemical Composition and Horizonation of Urban Soil Profiles in Qingdao, China. *Soils Sediments*, 2008, 8(1):4-16.
- [27] Bryant C S, John E L, Jodi L. Johnson-Maynard. Distinguishing urban soils with physical, chemical and biological properties. *Pedobiologia*, 2005, 49(4):283-296.
- [28] Danielle D I, Travis E H, Jake F W, David G W. Leaf gas exchange and water status responses of a native and non-native grass to precipitation across contrasting soil surfaces in the Sonoran Desert. *Oecologia*, 2007, 152(3):401-413.
- [29] Wang L M, Wang W Q, Lin P. Urban Soil and Its Relationship to Landscape Planting. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2003, 16(6):180-181.
- [30] Han J H, Li C S, Huang Q P. Effects of Urban soil on garden plant growth and the improvement measures. *Chinese Garden*, 2003, 7:74-76.
- [31] Yang R Q, Tang L Q. Characteristics of the urban soil and its influence on the urban planting. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2006, 33(3):34-45.
- [32] Liu G P. Effects of the urban soil on the garden plants' growth. *Garden Building*, 2008, 2:40-41.
- [33] Zhang G L. Ecological services of urban soils in relation to urban ecosystem and environmental quality. *Eco-health*, 2005, 23(3):16-19.
- [34] Li L, Ding Y, Hou X, Zhang G. Study on the relationship between the urban soil and the weak growing tendency of the afforestation. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2006, 38(3):124-127.
- [35] Kong Z, Li S, Li Y, Ma J, Zhang H. Effects of Different Hardened Grounds on the Material Recycling of *Platanus acerifolia* wild. *Acta Agriculture Universitatis Henanensis*, 1998, 32(4):314-319.
- [36] Michelle L M, Harmas T K, Grimm N B, Hall S J, Kaye J P. Responses of soil microorganisms to resource availability in urban desert soils. *Biogeochemistry*, 2008, 87(2):143-155.
- [37] Clark H F, Brabander D J, Erdil R M. Sources, sinks, and exposure pathways of lead in urban garden soil. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 36(6):2066-2074.
- [38] Kaye J P, Majumdar A, Gries C, Buyantuyev A, Grimm N B, Hope D, Jenerette G D, Zhu W X, Baker L. Hierarchical Bayesian scaling of soil properties across urban, agricultural and desert ecosystems. *Ecological Applications*, 2008, 18(1):132-145.
- [39] Dougherty M, Dymond R L, Goetz S, Jantz C A, Goulet N. Evaluation of Impervious Surface Estimates in a Rapidly Urbanizing Watershed. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70(11):1275-1284.
- [40] Kim J E, Watanabe S, Hakim L, Nakagoshi N. Urban green spaces and soil microbial diversity in Jakarta, Indonesia. *Hikobia*, 2006, 14(4):459-468.
- [41] Lee C S, Li X, Shi W, Cheung S, Thornton L. Metal contamination in urban, suburban and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics. *Science of the Total Environment*, 2006, 356(1/3):45-61.
- [42] Jerome P, Antoine G, Nicolas P. A Concentric Analysis of the Impact of Urbanization on the Threatened European Tree Frog in an Agricultural Landscape. *Conservation Biology*, 2004, 18(6):1599-1606.
- [43] Jonsson P, Eliasson I. Urban Modification of the Surface Energy Balance in the West African Sahel: Ouagadougou, Burkina Faso. *American Meteorological Society*, 2005, 18(19):3983-3994.
- [44] Bush S E, Pataki D E, Hultine K R, West A G, Sperry J S, Ehleringer J R. Wood anatomy constrains stomatal responses to atmospheric vapor pressure deficit in irrigated urban trees. *Oecologia*, 2008, 156(1):13-20.



- [45] Kjelgren R K, Clark J R. Growth and water relations of *Liquidambar styraciflua* in an urban park and plaza. *Trees*, 1993, 7(4):195-201.
- [46] Choudhury B J, Monteith J L. Implications of stomatal response to saturation deficit for the heat balance of vegetation. *Agriculture For Meteorologic*, 1986, 36(3):215-225.
- [47] Montague T, Kjelgren R, Rupp L Larry. Surface energy balance affects gas exchange of three shrub species. *Journal of Agriculture*, 1998, 24(5):254-262.
- [48] Masle J. Growth and stomatal responses of wheat seedling to spatial and temporal variations in soil strength of bi-layered soil. *Journal of Experimental Botany*, 1998, 25:1245-1257.
- [49] Jiang G M. *Plant Physiological Ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2003: 56-78.
- [50] Hans L F, Stuart C, Thijs L P. *New York: Plant Physiological Ecology*, 2003: 35-40.
- [51] Gilman E F, Leone I A, Flower F B. Effect of soil compaction and oxygen content on vertical and horizontal root distribution. *Journal of Environmental Horticulture*, 1987, 5:33-36.
- [52] Zhou L M, Ding Y Z, Zhang G Z, Li H. Impacts of crust cover on root respiration of street trees in cities. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2004, 2(1):34-37.
- [53] Dong H Y, Jiang B S, Zhao Y. Soil Characters of Section and Nutrient and their Relationship with Plant Growth in New Urban Greening System. *Journal of Henan Agricultural University*, 2005, 39(1):35-39.
- [54] Hou X L, Ding Y Z, Wang H X. Study on the measure of boring in the rhizospheric soils to aerate for meliorating the weak growth potential of the urban tree. *Journal of Chinese Urban Soil*, 2005, 3(5):48-50.
- [55] Roger K K, James R C. Growth and water relation of *Liquidambar styraciflua* L in an urban park and plaza. *Trees*, 1993, 7(4):195-201.
- [56] Pouyat R V, Yesilonis I D, Russell A J, Neerchal N K. Soil chemical and physical properties that differentiate urban land-use and cover types. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(3):1010-1019.
- [57] Kjelgren R, Montague T. Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(1):35-41.
- [58] Hendrick R L, Pregitzer K S. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forests. *Nature*, 1993, 361:59-61.
- [59] Pariente S, Helena M Z. Effect of visitors' pressure on soil and vegetation in several different micro-environments in urban parks in Tel Aviv. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 83(4):284-293.
- [60] Clemente E P, Schaefer C E, Novias R F. Soil Compaction around *Eucalyptus grandis* roots: a micro-morphological study. *Soil Research*, 2005, 43(2):139-146.
- [61] Wen Y, Wang H X. Effects of analog hardware coverage on soil respiration and plant growth. *Journal of Educational Institute of Jilin Province*, 2006, 22(12):35-37.
- [62] Zhu W, Xie S T, Ruan A D, Bian X W. Effects of gravel mulch technology on soil erosion resistance and plant growth of river flinty slope. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3):634-640.
- [63] Elizabeth P, Azlin Y N. Measurement of soil compaction tolerance of *Lagostromia speciosa* (L.) Pers. using chlorophyll fluorescence. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2005, 3(3/4):203-208.
- [64] Yang F Y, Fan H M, Cao D L. Research for garden trees adaptable to the urban soil of Handan City. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2008, 36(11):4498-4499.
- [65] Mohedano C L, Cetina V M, Chacalo H A, Trinidad S A, Gonzalez C. Growth and post-transplanting stress of pine trees in urban saline soil. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 2005, 11(1):43-50.
- [66] Zajicek J M. Design and testing of urban landscapes for water conservation. *Journal of Arboriculture*, 1993, 19(3):1-6.
- [67] Close R E, Nguyen P V, Kielbaso J J. Urban vs. natural sugar maple growth stress symptoms and phenology in relation to site characteristics. *Journal of Arboriculture*, 1996, 22(3):144-150.
- [68] Mao X S, Zeng J H. A Study of Effects of the Concrete Mulch on Movement of Soil Water and Soil Heat Transfer. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(2):68-71.
- [69] Harris J R, Susan D D, Brian K. Nitrogen fertilization during planting and establishment of the urban forest: A collection of five studies. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2008, 7(3):195-206.

#### 参考文献:

- [1] 马世骏,王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1):1-9.

- [2] 王如松, 迟计, 欧阳志云. 中小城镇可持续发展的生态整合方法. 北京: 气象出版社, 2001: 25-30.
- [3] 李锋, 王如松. 城市绿地系统的生态服务功能评价、规划与预测研究——以扬州市为例. 生态学报, 2003, 23(9): 1929-1936.
- [5] 李锋, 王如松. 城市绿色空间生态规划的方法与实践——以扬州市为例. 城市环境与城市生态, 2003, 16: 46-48.
- [10] 冯强, 胡聘, 王绍斌, 李娜. 城市环境对城市植物影响的研究. 安徽农业科学, 2007, 35(35): 11562-11565.
- [29] 王良睦, 王文卿, 林鹏. 城市土壤与城市绿化. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 180-181.
- [30] 韩继红, 李传省, 黄秋萍. 城市土壤对园林植物生长的影响及其改善措施. 中国园林, 2003, 7: 74-76.
- [31] 杨瑞卿, 汤丽青. 城市土壤的特征及其对城市园林绿化的影响. 江苏林业科技, 2006, 33(3): 34-45.
- [32] 刘贵平. 浅谈城市土壤对园林植物生长的影响. 园林建设, 2008, 2: 40-41.
- [33] 张甘霖. 城市土壤的生态服务功能演变与城市生态环境保护. 生态健康, 2005, 23(3): 16-19.
- [34] 李丽雅, 丁蕴铮, 侯晓丽, 张广增. 城市土壤特性与绿化树生长势衰弱关系研究. 东北师大学报(自然科学版), 2006, 38(3): 124-127.
- [35] 孔正红, 李树人, 李有福, 马建平, 张惠琴. 不同硬化地面类型对城市悬铃木物质循环的影响. 河南农业大学学报, 1998, 32(4): 314-319.
- [49] 蒋高明. 植物生理生态学. 北京: 高等教育出版社, 2003: 56-78.
- [52] 邹丽敏, 丁蕴铮, 张广增, 李辉. 硬覆盖对城市街路行道树土壤呼吸的影响. 中国城市林业, 2004, 2(1): 34-37.
- [53] 董惠英, 蒋杨, 赵勇. 城市新建绿地系统的土壤剖面、养分特征及与植物生长的关系. 河南农业大学学报, 2005, 39(1): 35-39.
- [54] 侯晓丽, 丁蕴铮, 王焕新. 根际土壤实施钻孔通气法对改善行道树生长势衰弱的实验研究. 城市土壤, 2005, 3(5): 48-50.
- [61] 温洋, 王焕新. 模拟硬覆盖对土壤呼吸及植物生长影响研究. 吉林省教育学院学报, 2006, 22(12): 35-37.
- [62] 朱伟, 谢三桃, 阮爱东, 卞勋文. 碎石覆盖对河流硬质护坡土壤抗侵蚀性及植物生长的影响. 应用生态学报, 2008, 19(3): 634-640.
- [64] 杨风云, 樊会敏, 曹东林. 邯郸市园林树木对城市土壤适应性的研究. 安徽农业科学, 2008, 36(11): 4498-4499.
- [68] 毛学森, 曾江海. 硬覆盖对土壤水热传输及作物生长发育影响的试验研究. 生态学杂志, 2000, 19(2): 68-71.