

# 园林绿地固碳能力分析与研究进展

许信旺, 方金生, 张永兰 (池州职业技术学院, 安徽池州 247000)

**摘要** 阐述了园林绿地植物的固碳能力, 包括固碳能力测定方法, 不同植物及不同形式植物配置的固碳能力, 以及园林绿地植物固碳能力的影响因素, 包括季节、大气污染物、绿地面积。探讨了园林绿地土壤碳汇, 包括土壤碳储量测定方法、土壤碳含量分布特征及其影响因素, 其中影响因素包括气候、植被类型、绿地类型、人为干扰、绿地建造时间。针对园林绿地碳循环研究的薄弱环节, 从园林绿地系统碳循环机制, 构建园林绿地碳循环模型, 园林绿地碳库的稳定性维持机制, 土壤碳循环过程与土壤水环境的耦合关系等方面, 展望了今后的研究方向。

**关键词** 园林绿地; 植被; 土壤; 固碳能力; 碳含量

中图分类号 S731.2 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)26-0058-05

## Analysis and Research Progress on the Carbon Fixation Capacity of Garden Green Space

XU Xin-wang, FANG Jin-sheng, ZHANG Yong-lan (Chizhou Vocational and Technical College, Chizhou, Anhui 247000)

**Abstract** The carbon sequestration capacity of landscape plants was described, including the determination of the carbon sequestration capacity, carbon sequestration capacity of different species and different forms of plant configuration and landscape plants, factors affecting carbon sequestration, including seasonal, atmospheric pollutants, green area. Greenland soil carbon sequestration was discussed, including factors determination method, soil carbon storage of soil carbon content distribution characteristics and influencing factors, which include climate, vegetation type, green type, human disturbance, green construction time. In view of the weak links of carbon cycle of the landscape, from the mechanism of carbon cycle of greenbelt system, construction of landscape garden green carbon cycle model, stability maintenance mechanism of carbon, soil carbon cycle and soil water environment coupling relations, discussed the research direction in the future.

**Key words** Garden green space; Vegetation; Soil; Carbon sequestration capacity; Carbon content

园林绿地是人类基于区域环境特征, 以生态学原理为指导仿造自然环境, 为满足功能性和景观性需求而构建的适宜生物存活的生态系统, 是城市生态系统的重要组成部分, 承载着调节小气候(降低气温、调节湿度、通风防风), 改善环境质量(释氧固碳、吸收有毒有害气体、吸滞粉尘、杀菌、衰减噪声、净化水体、净化土壤), 丰富生物多样性等重要功能<sup>[1]</sup>, 通过自我净化、自我消弭的生态效应, 持续稳定地吸收、减弱和消除人类生存环境中污染因子, 使环境质量达到洁净、舒适、优美、安全的要求。

随着城市化进程的加快, 土地利用方式的转变, 使生态系统内部碳循环平衡遭到破坏, 大量碳以 CO<sub>2</sub> 形式存在于大气中, 引起温室气体浓度的增加, 造成全球气候变暖, 对人类生存环境产生严重影响。如何积极应对城市气候变化, 充分发挥园林绿地碳汇功能, 将大气中的 CO<sub>2</sub> 存储于植物体内或土壤中, 实现园林绿地生态效应的最大化, 已成为园林绿地效应研究的前沿热点问题<sup>[2]</sup>。笔者探讨了园林绿地植物固碳能力, 并且展望了研究进展。

### 1 园林绿地植物固碳能力

城市自然系统具有较大的垂直碳输入和输出通量, 碳输入主要表现在植被通过光合作用获取碳的过程, 碳输出主要表现在土壤通过呼吸作用释放碳的过程<sup>[3]</sup>。两者差值如果为正则为碳汇, 为负值则为碳源<sup>[4]</sup>。

**1.1 固碳能力测定方法** 国内外诸多的研究与实践中, 广泛运用于园林绿地植物固碳量测定的方法主要包括生物量

推算法和光合速率法。①生物量推算法。依据光合作用原理, 测试现存有机体的干重来计算植物固碳量, 即每生产 1.0 kg CO<sub>2</sub>, 释放 1.2 kg O<sub>2</sub><sup>[5]</sup>。生物量推算法因相对简单、所需数据较少而被广泛采用, 但该方法不是持续进行, 属于结果分析, 且因难以准确把握干物质质量(如根部生产量及枯枝落叶难以统计), 导致计算结果不够准确<sup>[6]</sup>。②光合速率法。先测定植物的光合速率、呼吸速率及叶面积, 通过植物光合(呼吸)强度 = 植物光合(呼吸)速率 × 植物总叶面积来计算植物光合强度和呼吸强度, 两者的差值即为植物的固碳量<sup>[7]</sup>。这种方法测试工作相对繁杂, 但近年来投入使用的便携式光合作用测定仪实现了室外测算一体化, 大大提高了测定精度和工作效率, 但构建的计算模型未将植物性状与环境因素进行严格区分, 使计算精度受到一定影响。

园林绿地是城市生态系统的重要组成部分, 是一个涉及众多要素、层次复杂的系统, 在测定绿地植物固碳能力时, 应结合区域实际, 准确把握各种测定方法的特点, 合理选用。由于采用生物量推算法时能获取相对全面的数据, 且数据准确可靠<sup>[8-9]</sup>, 在测定林木、竹林及大型灌木固碳量时, 应优先选用; 因光合速率法能描绘出绿地固碳能力的动态变化, 在测定公园、居住区固碳量时, 应优先选用, 且缺少相关统计数据时, 可采用这种方法进行近似估算<sup>[10]</sup>。当今, 植物固碳量测定尚未形成统一的标准规范, 因采用的方法不同, 结果存在一定差异<sup>[11]</sup>, 这需要相关部门组织专家加强研究与实践, 制订统一的测算标准。

**1.2 固碳能力** 植物固碳能力由植物种类、株龄、叶位等因素决定<sup>[12]</sup>, 植物的固碳释氧通过叶片的光合作用实现, 单位叶面积光合速率因叶片结构、株龄与位置的不同, 差异很大<sup>[13]</sup>。

在常用的园林绿化植物中, 经测定分析, 单位叶面积日

**基金项目** 安徽省 2016 年度高校自然科学研究重点项目(KJ2016A520); 安徽省 2015 年度高校人文社科重点项目(SK2015A713)。

**作者简介** 许信旺(1962—), 男, 安徽枞阳人, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事生态经济与碳循环研究。

**收稿日期** 2017-06-30

固碳量和单位面积日固碳量差异明显,在单位叶面积日固碳能力方面,紫叶李、构树最强 $[5.02 \sim 7.86 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ ,油松、刺槐、珍珠梅、元宝枫最低 $[2.14 \sim 3.19 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ ,国槐、火炬、碧桃、栾树、紫薇、紫丁香、悬铃木、毛白杨、绦柳、大叶黄杨、白蜡居中;在单位面积日固碳能力方面,悬铃木、构树、紫叶李最高 $[12.31 \sim 43.32 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ ,紫丁香、大叶黄杨、国槐、油松、珍珠梅、绦柳最低 $[4.17 \sim 7.07 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ ,元宝枫、碧桃、紫薇、栾树、火炬树、毛白杨、白蜡、刺槐居中<sup>[14]</sup>。陈硕等<sup>[15]</sup>通过监测分析天津市常见绿化树种的单位叶面积碳汇能力,发现园林植物个体固碳能力具有一定的差异性,从大到小依次为石榴 $[1.380 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ ,枣树 $[1.341 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ ,苹果 $[0.802 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ ,悬铃木 $[0.461 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ ,白蜡 $[0.126 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ ,国槐 $[0.080 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ 。园林绿地灌木及草本植物的固碳释氧能力也存在差异,美人蕉、山茶、扶芳藤、珊瑚树最强,夹竹桃、黄馨、常春藤、石楠、四季桂、鸢尾、洒金东瀛珊瑚、红叶石楠等次之,草本植物三叶草、麦冬最弱<sup>[16]</sup>。在对常绿乔木、落叶乔木和灌木的日固碳释氧量测定分析中,常绿乔木日固碳量由大到小依次为圆柏、云杉、樟子松、油松;落叶乔木日固碳量由大到小依次为垂柳、旱柳、龙爪槐、河北杨、白蜡、新疆杨、卫矛、山杏、山桃、垂榆、合作样、国槐;灌木日固碳量由大到小依次为沙柳、暴马丁香、红宝石海棠、丁香、丛生紫叶矮樱、榆叶梅、珍珠梅、黄刺玫、地接金叶榆、连翘;且落叶阔叶乔木固碳释氧能力最大,灌木其次,常绿乔木最低<sup>[17]</sup>。

在野生地被植物中,颜色较深且偏革质的叶片因其叶绿素和花青苷含量高,有利于光能吸收,增大了光合作用速率,导致其固碳能力较强<sup>[18]</sup>。株龄较长的植物本身存储的碳量高,而幼小的植物因生长速度快,CO<sub>2</sub>年吸收量高<sup>[19]</sup>。位于植株上层、东南方位的叶片因光合速率强,其固碳能力亦较强。

园林花卉植物与乔灌木相比,由于绿量较小,其固碳量较低,但在小区域环境中,对空气质量能起到改善和调节作用,并通过碳氧平衡的调节,缓解甚至消除局部环境的缺氧状况。相同条件下,不同花卉固碳释氧能力存在差异,万寿菊、一串红、矮牵牛固碳释氧能力较强,彩叶草、四季秋海棠固碳释氧能力较弱。而且园林花卉固碳释氧能力随季节的变更而变化,8月固碳量达到高峰,5月处于低谷期<sup>[20]</sup>。

在人为配置与组合下,园林绿地可形成层次结构复杂、种类丰富的植物群落。园林绿地固碳效益价值与绿地组成中树冠覆盖率、树木数量、树木的胸径等群落要素密切相关<sup>[21]</sup>。不同植被群落类型的固碳能力差异显著,搭配适宜的乔、灌、草复层植物群落因其绿量相对更高,固碳能力比单层植物群落高出1~2倍<sup>[22-24]</sup>。在碳净贮量方面,各群落从大到小依次为乔-灌-草、灌木、草本、灌-草,在平均碳净积累速率方面,各群落从大到小依次为灌木、乔-灌-草、草本、灌-草群落<sup>[25]</sup>。

综上所述,园林绿地中不同植物的固碳释氧能力差异明

显,因此在城市绿地规划与建设中,需针对区域实际净碳源(碳汇缺口),在增大绿地面积、满足景观功能与效果的同时,优先考虑选择固碳能力强的植物,最大程度地优化植物碳汇固碳能力。同时,不同形式的植物配置可以改变园林绿地的固碳释氧能力,因此在城市绿地规划与建设中,应针对区域自然条件,加强园林植物群落配置研究,优先考虑灌木群落和乔-灌-草群落,有效地提高园林绿地的固碳能力。

**1.3 固碳能力的影响因素** 园林绿地固碳能力受植物自身因素和植物配置的影响之外<sup>[12]</sup>,还受季节、大气污染物、绿地面积等因素的影响。

**1.3.1 季节。**季节不同,太阳辐射、温度、降水及日照时间等不同。同一种植物在不同季节的光合能力不同,从而导致其固碳释氧能力存在一定差异。在不同季节,植物叶面积指数不同,夏季光合作用强,棕榈科、苏铁科植物的固碳能力强,但在秋季则较弱;而桑科榕属的植物在秋季较强,木荷的固碳能力秋季强于夏季<sup>[26]</sup>。因春夏季日照时间长、太阳辐射高,植被的固碳释氧能力强,而秋冬季低;又由于夏季温度高,植物叶片气孔工作效率下降,光合作用受到抑制,导致夏季植被的固碳释氧能力低于春季<sup>[27]</sup>。

**1.3.2 大气污染物。**植物光合作用会因大气污染物的影响而受到抑制,降低植物光合速率,从而影响植物的固碳能力。在SO<sub>2</sub>气体含量较高的环境中,植物叶片气孔因大幅关闭,导致植物固碳能力降低<sup>[28]</sup>。环境中若含有高浓度O<sub>3</sub>,导致叶片气孔关闭的同时,还会影响碳水化合物的输出,致使植物固碳能力降低<sup>[29]</sup>;植物在NO<sub>2</sub>污染环境,净光合速率下降,引起植物固碳能力降低<sup>[30]</sup>。

**1.3.3 绿地面积。**叶面积是光合强度与呼吸强度计算的重要参数之一,从区域整体角度考虑,园林绿地固碳能力的主要因素是绿地面积和绿地覆盖率,绿地固碳能力随绿地面积的变化而变化,绿地固碳量与绿地面积呈正相关<sup>[31]</sup>。绿地面积越大,绿地覆盖率越高,则园林绿地固碳能力越强。

## 2 园林绿地土壤碳汇

土壤为植物生活提供必需的营养和水分,是植物生长的基质,也是生态系统中物质与能量交换的重要场所。其有机质碳存储量的较小变化会对园林绿地固碳量产生显著影响。

园林绿地碳库主要是植物碳库和土壤碳库,其中土壤碳含量高出植被碳含量数倍以上,是园林绿地的主要碳库。北京城区园林绿地的总净碳储量为371.16万t,平均92.46 t/hm<sup>2</sup>,其中植物的净碳储量88.82万t,平均22.10 t/hm<sup>2</sup>,而土壤碳储量为282.31万t,平均70.33 t/hm<sup>2</sup>,土壤碳含量是园林植物碳含量的3.18倍,占总量的77.9%<sup>[32]</sup>;广州绿地土壤碳储量为1232.8万t,是绿地植物碳储量的9.3倍<sup>[33]</sup>;芝加哥居住区内土壤碳储量约为植被碳储量的3.8倍,占总碳储量的78.7%<sup>[34]</sup>。

### 2.1 土壤碳储量测定

**2.1.1 土壤碳储量的现状。**运用土壤剖面或钻土法采集样本,用干烧法或重铬酸钾-硫酸氧化法测定有机碳的含量<sup>[35-36]</sup>。再由点到面,建立拟合模型,计算出一定区域范围

碳储量<sup>[37]</sup>。

**2.1.2 土壤碳储量的变化。**土壤碳储量的变化由土壤中碳输入与碳排放2个因素造成,可测出2个不同时刻的土壤碳含量,根据其差值来反映土壤碳含量的变化,2个时刻间隔的时间越长,其变化越能代表变化的平均趋势,结果越可靠。空间变异性大的碳库和碳储量大而相对变化速率较小的碳库,要求较长的监测间隔时间<sup>[38]</sup>。

**2.2 土壤碳含量分布特征** 研究表明,在城市中心区、郊区与农村土壤碳含量存在差异,沿城乡梯度带呈下降趋势,即土壤碳含量与距离城市中心的距离有一定相关性。美国纽约市栎树林地表层土壤(0~10 cm)碳含量沿城乡梯度呈逐渐下降趋势,与到城市中心的距离存在一定的相关性<sup>[39]</sup>;巴尔的摩市居住区草坪与郊区天然森林0~100 cm土层碳含量,城区是郊区的1.5倍<sup>[40]</sup>;美国菲尼克斯中心区、郊区与农村地区在同一植被下土壤碳含量存在差异,石炭酸灌木(*Larrea tridentata*)丛下表层土壤(0~10和10~20 cm)碳含量比郊区和农村地区土壤碳含量高,分别是郊区和农村地区的2~4倍,沿城村梯度有呈下降趋势<sup>[41]</sup>;科罗拉多州的城区草坪土壤(0~30 cm)碳含量比天然矮草草原土壤碳含量高45%<sup>[42]</sup>。我国城市中心、郊区与农村地区土壤碳含量也存在差异,城区土壤碳储量远远大于郊区和农村地区。杭州城区、近郊和远郊区表层土壤(0~10和0~100 cm)碳含量相比较,城区土壤碳含量约为近郊与远郊区农业土壤碳含量的4.3和5.7倍<sup>[43]</sup>。经过对比分析研究,造成三者差异的原因在于土地利用格局及土壤改造过程不同,引起土壤理化生物性质产生了重要变化<sup>[44-45]</sup>,造成土壤碳含量存在一定差异。

园林绿地土壤碳含量在垂直方向上表现出递减规律,即随土层深度的增加,土壤碳含量随之递减<sup>[46-48]</sup>。长沙城市森林土壤表层碳含量最高,随着土层深度的增加而递减,平均密度是84.8 t/hm<sup>2</sup><sup>[49]</sup>。上海市区绿地土壤表层(0~10 cm)碳密度为319.8 t/hm<sup>2</sup>,土壤10~20 cm碳密度为230.8 t/hm<sup>2</sup>,明显表现出随深度的增加土壤碳含量逐渐减小<sup>[50]</sup>。美国丹佛市草坪表层土壤(0~10 cm)碳含量分别是地表下深度10~20和20~30 cm土壤碳含量的1.5和3.0倍<sup>[51]</sup>。以上结论的形成主要是该区域受人为扰动程度低,但是城市土地利用频繁变换,土壤常常会受到人类活动的强烈扰动,反复被翻动和覆盖,使以前的表层土壤被掩埋至下层,导致下部土壤碳含量较高<sup>[52-53]</sup>。德国斯图加特市受到人为扰动大的居住区和公园土壤深层土壤碳含量较高<sup>[54]</sup>。罗斯托克市浅层土壤(10~27 cm)和深层土壤(50~75 cm)的碳含量相比,浅层土壤碳含量为3.0 g/kg,而深层土壤碳含量为114.9 g/kg<sup>[55]</sup>。我国学者对绿地土壤养分特征进行研究,也得出了类似结论<sup>[56]</sup>。

**2.3 土壤碳含量变化的影响因素** 碳以有机和无机的形式储存于土壤中,土壤成为城市绿地庞大的碳储库,是城市绿色碳汇的重要组成部分。影响园林绿地土壤碳含量的主要因素有气候因子、植被类型、绿地类型、人为干扰、绿地建造时间等。

**2.3.1 气候因子。**作为环境因子组成部分的气候因子,直接影响土壤碳的蓄积与输出过程,在此过程中起主要作用的是温度和水分<sup>[57]</sup>。土壤碳含量随年均气温变化而有所改变,当气温低于10℃,年均气温≤5℃时,土壤碳平均含量为(22.49±11.20) g/kg,年均气温5~10℃时,土壤碳平均含量为(9.18±3.60) g/kg,表现为土壤碳含量随气温的升高而降低;当气温高于10℃,年均气温10~15℃时,土壤碳平均含量为(7.65±4.18) g/kg,年均气温15~20℃时,土壤碳平均含量为(14.72±6.70) g/kg,表现为土壤碳含量随气温的升高而增加;当气温高于20℃时,土壤碳含量随气温的升高变化不大<sup>[58]</sup>。土壤水分会影响其通气性,对土壤碳的矿化分解和外源碳的降解产生影响,进而影响土壤碳含量。有学者对新西兰不同气候条件的土壤与碳标注的黑麦草进行培养试验,结果表明,土壤湿度是影响碳分解周转的主要因素<sup>[59]</sup>。

**2.3.2 植被类型。**土壤与植被关系密切,土壤在为植物生长发育提供必需的营养物质的同时,植被的有机残体在土壤生物的作用下形成土壤有机质。经研究发现,蛋白质、纤维素和半纤维素、木质素在不同植被中构成比例不同,植被的有机残体在土壤中分解速率、分解产物及转化途径存在差异,导致不同植被类型的绿地土壤碳含量差异较大<sup>[58]</sup>。在多种多年生草类混合种植的土壤中,碳含量的平均值要比单一类型植被土壤碳含量高5~6倍,如果加入暖季型草,可使土壤的固碳能力提高193%,加入豆类植物,使土壤的固碳能力提高522%<sup>[60]</sup>。

**2.3.3 绿地类型。**不同功能的城市绿地土壤碳含量存在较大差异,没有一致规律。美国巴尔的摩市的公共机构区及低人口密度的居住区、公园草坪表层土壤(0~15 cm)碳含量差异较大,居住区绿地土壤碳密度为122.0 t/hm<sup>2</sup>,而公园草坪土壤碳密度为99.0 t/hm<sup>2</sup><sup>[61]</sup>。上海绿地土壤碳含量由大到小依次为公园绿地、街道绿地、道路绿地<sup>[62]</sup>;郑州绿地土壤碳含量由大到小依次为公共设施绿地、公园绿地、居住绿地、街道绿地<sup>[63]</sup>;南京市表层土壤碳含量由大到小依次为街道绿地、公共设施绿地、居住绿地、公园绿地<sup>[64]</sup>。

**2.3.4 人为干扰。**随着城市化进程的不断加快,自然植被或农业用地面积大幅减少,被城市建设用地所取代。在对城市建设用地规划与建设时,经过清表、翻动、挖除、回填、覆盖等工序,土壤的层次与结构受到人为改变,土壤碳汇能力得到增强,使土壤碳含量具有明显的富集特征<sup>[65-66]</sup>。0~10 cm土层中,福州市区人工管理绿地土壤碳含量明显高于自然绿地<sup>[67]</sup>;福州沿江芦苇湿地改建为片林、草坪后,土壤碳含量分别提高了72.0%和94.8%<sup>[68]</sup>;美国奥克兰和芝加哥的土壤碳含量与建成前比较,分别提高了4.0%和6.0%<sup>[61]</sup>。

**2.3.5 绿地建造时间。**园林绿地土壤碳含量受其建造时间的长短影响较大。园林绿地建造时间越长,根深叶茂的高大乔木就会越多,与自然群落会更加接近,群落郁闭度高,植被下的土壤环境经常保持湿润,大大增强微生物分解枯枝落叶的活性,因此,土壤碳密度越高,碳含量越大。

### 3 展望

当前,城市化进程的加快引起碳排放量的增加,受到全球的普遍关注。但在碳排放研究进程中,园林绿地碳循环研究仍处于发展阶段,尚未引起人们的足够重视,园林绿地的碳排放和碳汇尚未纳入国家碳排放清单中。国内外众多学者对园林绿地碳循环进行了研究,取得了丰富的研究成果,为后续研究奠定了坚实的理论基础。但其中部分研究成果与园林绿地碳循环的结合并不十分紧密,如现有的园林绿地碳循环模拟直接使用自然或农业生态系统碳循环模型,未建立符合绿地自身特征及影响因子的碳循环模型,难以预测受到人类活动强烈干扰的城市园林绿地对环境变化的响应。园林绿地碳循环仍是许多学科研究的前沿热点,还需要广大学者继续加强研究,充实研究成果,充分发挥园林绿地在温室气体减排、水文调节中的作用,积极应对气候变化。针对园林绿地碳循环研究诸多的薄弱环节,今后应拓展研究内容:

(1) 园林绿地系统碳循环机制。园林绿地碳库的碳循环是动态变化的过程,在探讨园林绿地碳库与生物物理因子的关系时,要深入探究其生理机制,通过物理、化学和生物反馈机制来认识碳循环与气候变化、生态系统、人类活动的相互作用与影响过程,预测气候变化及由此引起的后续响应。

(2) 构建园林绿地碳循环模型。园林绿地生态系统碳循环是一个复杂的过程,受气象因子、植被、土壤生产力及管理技术等多种因子的影响和制约,再加上人力、物力、财力和生长周期等因素的限制,仅仅依靠试验和观测数据难以获得全面、更有说服力的结论。从碳的形态(无机碳—有机碳—无机碳)、碳的贮存地点、碳含量变化与影响因子的关系构建模型,对园林绿地固碳潜力和固碳持续期进行量化,简化试验过程、加快研究进度、缩短研究周期,为定量预测园林绿地固碳持续期、饱和容量及潜力提供科学依据。

(3) 园林绿地碳库受到强烈的人为干扰,同时又可以在较短的时间尺度上进行人为调节。在园林绿地进行各种人为干扰控制试验,深入探究不同人为干扰活动及其强度对绿地碳库的影响;从不同的时间和空间尺度上探讨园林绿地碳含量变化的特征和强度,从整体和系统的角度确定不同尺度区域影响碳固定及变化的因子,为调控园林绿地碳循环及对全球气候变化的效应提供科学依据。

(4) 园林绿地碳库的稳定性维持机制。运用土壤碳含量的相对年变幅(relative annual increment, RAI)及年平均变化率(RAI绝对值)表达园林绿地碳库每年的平均变化状态及水平,获取园林绿地固碳量到达峰值的时间,以及何时达到新的稳定状态,即关注何时碳含量变化趋近于常数,从而探讨园林绿地碳库的稳定性维持机制。

(5) 土壤碳循环过程与土壤水环境的耦合关系。在生物地球化学学术思想的指导下,将土壤碳循环过程与土壤水环境耦合关系紧密结合,是当前绿地涵养水源及海绵城市研究与建设背景下的一种创新的研究途径。目前所倡导的海绵城市,目的是使城市“弹性适应”环境变化和自然灾害,强调

对城市原有生态系统的保护、生态恢复与修复、低影响开发,从加强城市绿化、推广透水性铺装和强化雨水生态管理等途径,提高城市透水率。但忽略了在雨水径流过程中经过的土壤对水质的影响,土壤有机碳在很大程度上影响着土壤结构的形成和稳定性、土壤的持水性能和植物营养的生物有效性以及土壤的缓冲性能和土壤生物多样性等,缓解和调节与土壤退化及土壤生产力有关的一系列土壤过程。因此,在对园林绿地土壤碳循环研究过程中,加强自然梯度下土壤水含量及质量的监测分析,研究土壤有机碳含量与水质量和大气气体组成之间的关系,明确土壤有机碳含量对环境的调节效应,探讨土壤性状与水生态效应的关系,明确园林绿地土壤碳循环与土壤水环境耦合关系,为实现通过“渗、滞、蓄、净、用、排”6个要素对雨水综合管理提供理论依据。

### 参考文献

- [1] 陈旭,李霖,王江. 城市绿地对热岛效应的缓解作用研究:以台州市为例[J]. 生态环境学报,2015,24(4):643-649.
- [2] 孔繁花,尹海伟,刘金勇,等. 城市绿地降温效应研究进展与展望[J]. 自然资源学报,2013,28(1):171-181.
- [3] 赵荣钦,黄贤金. 城市系统碳循环:特征、机理与理论框架[J]. 生态学报,2013,33(2):358-366.
- [4] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[C]//EGGLESTON H S, BUENDIA L, MIWA K et al. The national greenhouse gas inventories programme:Tokyo, Japan:IGES,2006.
- [5] 曹志红,许信旺,汪艳林. 皖江地区湿地生态服务价值评估[J]. 中国农学通报,2008,24(8):413-419.
- [6] 周慕云. 上海市公园绿地碳汇研究:以中山公园为例[J]. 物流工程与管理,2015,27(6):160-161.
- [7] 李辉,赵卫智. 北京5种草坪地被植物生态效益的研究[J]. 中国园林,1998,14(4):36-38.
- [8] 罗云建,王效科,张小全,等. 华北落叶松人工林生物量的估算方法[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2010,34(3):51-56.
- [9] 赵蓓,郭泉水,牛树奎,等. 雾灵山灌木生物量模型研究[J]. 广东农业科学,2012(8):61-63.
- [10] 朱凯,张倩倩,武鹏飞,等. 城市绿地碳汇核算方法及其研究进展[J]. 陕西林业科技,2015(4):34-39.
- [11] 周一凡,周坚华. 基于绿化三维量的城市生态环境评价系统[J]. 中国园林,2001(5):77-79.
- [12] 周广胜. 全球碳循环[M]. 北京:气象出版社,2003.
- [13] 张娇,施佃军,朱月清,等. 湖北地区常见绿化树种光合固碳特性[J]. 生态学报,2013,33(6):1740-1750.
- [14] 代巍.G101北京段公路绿化的温湿度调节及固碳释氧研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.
- [15] 陈硕,王琪,任志刚,等. 城市绿地碳汇能力研究[J]. 山东林业科技,2011,41(6):21-23.
- [16] 刘敏敏. 高速公路低碳绿化技术研究:公路绿化植物的固碳释氧特征及影响因素研究[D]. 上海:东华大学,2014.
- [17] 贺勇,杨仁强,曹满英,等. 鄂尔多斯市装备基地园林绿地生态效益分析[J]. 现代农业科技,2015(1):168,172.
- [18] 谭庆,童俊,戩小梅,等. 武汉31种野生地被植物的固碳释氧和降温增湿研究[J]. 中国园林,2010,26(8):93-95.
- [19] AKBARI H. Shade trees reduce building energy use and CO<sub>2</sub> emissions from power plants[J]. Environmental pollution,2002,116:119-126.
- [20] 邹丽芳. 5种园林绿化草本花卉生态功能的初步研究[D]. 长春:东北师范大学,2006.
- [21] 李亚亮,张磊. 基于City-green模型的城市绿地生态效益评价:以上海市主要公园为例[J]. 商业文化,2015(12):10-12.
- [22] 徐高福,洪利兴,柏明娥. 不同植物配置与住宅绿地类型的降温增湿效益分析[J]. 防护林科技,2009(3):3-5.
- [23] 李辉,赵卫智,谷涵泽,等. 居住区不同类型绿地释氧固碳及降温增湿作用[J]. 环境科学,1999,20(6):41-44.
- [24] 王晓明,李贞,蒋昕,等. 城市公园绿地生态效应的定量评估[J]. 植物资源与环境学报,2005,14(4):42-45.
- [25] 徐永荣,王斗天,冯宗炜,等. 天津滨海几种人工植被的碳汇作用研究[J]. 华中农业大学学报,2003,22(6):603-607.

- [26] 王忠君. 福州植物园绿量与固碳释氧效益研究[J]. 中国园林, 2010, 26(12): 1-6.
- [27] 李慧明. 广州市屋顶绿化植物的选择及生态效益研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [28] 廖飞勇, 何平, 谢瑛. SO<sub>2</sub> 对植物光合作用影响的研究进展[J]. 经济林研究, 2003, 21(3): 85-87.
- [29] THIEC D L, MANNINEN S. Ozone and water deficit reduced growth of *Aleppo pine* seedlings[J]. *Plant physiology and biochemistry*, 2003, 41(1): 55-63.
- [30] 赵磊. 大气 NO<sub>2</sub> 污染下园林植物的光谱特征及光合特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [31] 余晓敏, 李兵, 段志强, 等. 深圳市绿地固碳能力演变探讨[J]. 地理空间信息, 2015, 13(4): 140-142.
- [32] 王迪生. 基于生物量计测的北京城区园林绿地净碳储量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [33] 管东生, 陈玉娟, 黄芬芳. 广州城市绿地系统碳的贮存、分布及其在碳氧平衡中的作用[J]. 中国环境科学, 1998, 18(5): 437-441.
- [34] JO H K, MCPHERSON G E. Carbon storage and flux in urban residential greenspace [J]. *Journal of environmental management*, 1995, 45(2): 109-133.
- [35] 王绍强, 刘纪远, 于贵瑞. 中国陆地土壤有机碳蓄积量估算误差分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 797-802.
- [36] 刘华, 雷瑞德. 我国森林生态系统碳储量和碳平衡的研究方法及进展[J]. 西北植物学报, 2005, 25(4): 835-843.
- [37] 徐艳, 张凤荣, 段增强, 等. 区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨[J]. 土壤通报, 2005, 36(6): 836-839.
- [38] 张小全, 陈先刚, 武曙红. 土地利用变化和林业活动碳储量变化测定与监测中的方法学问题[J]. 生态学报, 2004, 24(9): 2068-2073.
- [39] POUYAT R V, MCDONNELL M J, PICKETT S T A. Soil characteristics of oak stands along an urban-rural land-use gradient[J]. *Journal of environmental quality*, 1995, 24(3): 516-526.
- [40] POUYAT R V, YESILONIS I D, GOLUBIEWSKI N E. A comparison of soil organic carbon stocks between residential turf grass and native soil [J]. *Urban ecosystems*, 2009, 12(1): 45-62.
- [41] KOERNER B A, KLOPATEK J M. Carbon fluxes and nitrogen availability along an urban-rural gradient in a desert landscape [J]. *Urban ecosystems*, 2010, 13(1): 1-21.
- [42] KAYE J P, MCCULLEY R L, BURKE I C. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems [J]. *Global change biology*, 2005, 11(4): 575-587.
- [43] 章明奎, 周翠. 杭州市城市土壤有机碳的积累和特性[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 19-21.
- [44] ZHANG H B, LUO Y M, WONG M H, et al. Soil organic carbon storage and changes with reduction in agricultural activities in Hong Kong [J]. *Geoderma*, 2007, 139(3/4): 412-419.
- [45] 张小磊, 何宽, 安春华, 等. 不同土地利用方式对城市土壤活性有机碳的影响: 以开封市为例[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1220-1223.
- [46] GOLUBIEWSKI N E. Urbanization increases grassland carbon pools: Effects of landscaping in Colorado's front range [J]. *Ecological applications*, 2006, 16(2): 555-571.
- [47] LORENZ K, KANDELER E. Microbial biomass and activities in urban soils in two consecutive years [J]. *Journal of plant nutrition and soil science*, 2006, 169(6): 799-808.
- [48] RACITI S M, GROFFMAN P M, JENKINS J C, et al. Accumulation of carbon and nitrogen in residential soils with different land-use histories [J]. *Ecosystems*, 2011, 14(2): 287-297.
- [49] 高述超. 长沙城市森林生态系统养分循环与碳平衡研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
- [50] 刘为华. 上海城市绿地土壤碳储量格局与理化性质研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [51] PATAKI D E, ALIG R J, FUNG A S, et al. Urban ecosystems and the North American carbon cycle [J]. *Global change biology*, 2006, 12(11): 2092-2102.
- [52] POUYAT R, GROFFMAN P, YESILONIS I, et al. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems [J]. *Environmental pollution*, 2002, 116(S1): 107-118.
- [53] 张甘霖, 何跃, 龚子同. 人为土壤有机碳的分布特征及其固定意义 [J]. 第四纪研究, 2004, 24(2): 149-159.
- [54] LORENZ K, KANDELER E. Biochemical characterization of urban soil profiles from Stuttgart, Germany [J]. *Soil biology and biochemistry*, 2005, 37(7): 1373-1385.
- [55] BEYER L, KAHLE P, KRETSCHMER H, et al. Soil organic matter composition of man-impacted urban sites in North Germany [J]. *Journal of plant nutrition and soil science*, 2001, 164(4): 359-364.
- [56] 边振兴, 王秋兵. 沈阳市公园绿地土壤养分特征的研究 [J]. 土壤通报, 2003, 34(4): 284-290.
- [57] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- [58] 许信旺. 农田土壤有机碳变化研究 [M]. 芜湖: 安徽师范大学出版社, 2011.
- [59] PARSHOTAM A, SAGGAR S, SEARLE P L, et al. Carbon residence times obtained from labelled ryegrass decomposition in soils under contrasting environmental conditions [J]. *Soil biology & biochemistry*, 2000, 32(1): 75-83.
- [60] FORNARA D A, TILMAN D. Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation [J]. *Journal of ecology*, 2008, 96(2): 314-322.
- [61] POUYAT R V, YESILONIS I D, NOWAK D J. Carbon storage by urban soils in the United States [J]. *Journal of environmental quality*, 2006, 35(4): 1566-1575.
- [62] 郝瑞军, 方海兰, 沈烈英. 上海城市绿地土壤有机碳、全氮分布特征 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(6): 49-52.
- [63] 李立平, 邢维芹, 刘顺, 等. 郑州市城市土壤理化性质 [J]. 城市环境与城市生态, 2010, 23(2): 18-22.
- [64] 何跃, 张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析 [J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 177-182.
- [65] 张伟畅, 盛浩, 钱奕琴, 等. 城市绿地碳库研究进展 [J]. 南方农业学报, 2012, 43(11): 1712-1717.
- [66] 罗中华, 毛齐正, 马克明, 等. 城市土壤碳循环与碳固持研究综述 [J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7177-7189.
- [67] 董艳, 全川, 杨玉红, 等. 福州市自然和人工管理绿地土壤有机碳含量分析 [J]. 杭州师范学院学报(自然科学版), 2007, 6(6): 440-444.
- [68] 曾宏达, 杜紫贤, 杨玉盛, 等. 城市沿江土地覆被变化对土壤有机碳和轻组有机碳的影响 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 701-706.

(上接第54页)

蒜更高, 这有利于大蒜 SOD 提取在工业和商业中的应用。综合说明偏酸性的环境确实更利于大蒜的生长, 为大蒜的水培技术提供理论依据。而且, 从试验所得数据和原始数据对比来看, 刚购买的大蒜的 SOD 活性相对较低, 但经过一段时间的水培后, SOD 活性开始升高, 说明水培大蒜的栽培方式效率高。但如果要和传统土培的方式相比较, 两者哪个更好更合适, 这还有待进一步试验探究。

#### 参考文献

- [1] 苏凤贤. 大蒜汁生物抑菌特性的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2007.
- [2] 韦智钟, 刘梦雅, 李真, 等. 大蒜内生菌的分离及其抑菌作用的研究 [J]. 黑龙江农业科学, 2013(12): 5-9.
- [3] 马丽娜, 李峰杰, 陈坚, 等. 大蒜主要活性成分及药理作用研究进展 [J]. 中国药理学通报, 2014, 30(6): 760-763.
- [4] 梅四卫, 朱涵珍. 大蒜研究进展 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(8): 154-158.
- [5] 郭世荣. 无土栽培学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [6] 徐水果. 采用无土栽培技术 改变植物种植方式 [N]. 河南科技报, 2007-11-27(008).
- [7] 王金主, 杨丹, 徐军庆, 等. 大蒜中 SOD 含量的测定 [J]. 山东食品发酵, 2011(1): 27-29.
- [8] 李艳杰, 徐树军. 水培植物养护三大秘诀 [N]. 中国花卉报, 2010-06-05(001).
- [9] 孙永君. 大蒜中 SOD 的提取研究 [J]. 化学与生物工程, 2005, 22(10): 23-25.
- [10] 王志鑫, 孔维宝. 大蒜超氧化物歧化酶(SOD)的提取及分离纯化方法研究综述 [J]. 甘肃农业科技, 2010(10): 47-49.
- [11] 赵荣立. 大蒜与长寿 [N]. 中国中医药报, 2000-10-30(004).
- [12] 廖春丽, 王福梅, 陈兰英, 等. 大蒜 SOD 最佳提取条件确定及其生长过程中 SOD 活力变化研究 [J]. 中国调味品, 2011, 36(2): 51-53.