

# 面向生态系统服务功能的城市绿地碳汇量估算研究

于 洋<sup>1,2</sup>, 王昕歌<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 生态系统服务功能重要性评价是国土空间“双评价”中的重要环节, 城市绿地是生态系统的重要组成部分, 在碳汇方面有很大作用。本文对城市绿地碳汇量的估算方法进行了系统地阐述, 重点展开了碳汇量估算系统的技术方法及其在城市绿地碳汇量估算中的应用, 包括规划周期不同阶段和不同空间尺度的城市绿地碳汇量估算。最后从碳汇量估算系统的技术方法、研究阶段、应用尺度, 以及对城市规划中生态系统服务功能评价的启示四个方面进行了展望, 以期推动我国城市绿地碳汇量估算和低碳城市发展。

**关键词:** 城市绿地; 碳汇量估算; 低碳城市; 生态系统服务功能

中图分类号: TU986

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0095-08

## Estimation of urban green space carbon sink for ecosystem service function

YU Yang<sup>1,2</sup>, WANG Xingge<sup>1</sup>

(1. College of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Western Green Building, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The importance evaluation on ecosystem service function is an important link in the "double evaluation" of land space. Urban green space is an important part of the ecosystem and plays an important role in carbon sink. In this paper, the estimation method of urban green space carbon sink is systematically expounded, and emphasis is laid on the technical method of carbon sink estimation system and its application in the estimation of urban green space carbon sink, including the estimation of urban green space carbon sink at different stages of planning cycle and different spatial scales. In the end, the paper prospected from the four aspects of the carbon sink estimation system: technical method, research stage, application scale, and enlightenment of ecosystem service function evaluation in urban planning, so as to promote the carbon sink estimation of urban green space and low-carbon city development in China.

**Key words:** urban green space; estimation of carbon sink; low-carbon cities; ecosystem service functions

目前全球变暖、温室效应等气候问题日趋严重, 而在国土空间“双评价”(资源环境承载力和国土空间开发适宜性的评价)中的生态系统服务功能缺少碳汇效益的评价, 城市绿地是城市生态系统的重要组成部分, 是城市中唯一的直接碳汇途径<sup>[1]</sup>, 在固碳方面有很大作用, 因此, 定量分析城市绿地的碳汇效益对国土空间“双评价”中的生态系统服务功能评价极其重要。

国内外已出现很多种技术方法对城市绿地碳汇量估算, 但大部分方法工程量大, 计算过程复杂, 并且对操作人员的专业水平要求过高<sup>[2]</sup>。本文通过碳汇量估算系统对城市绿地的碳汇效益进行估算, 可以对城市规划周期中不同阶段和不同尺度城市空间的绿地碳汇量快速估算, 以期推动我国城市绿地

碳汇量估算的发展, 推进低碳城市发展目标, 并完善国土空间“双评价”中的生态系统服务功能评价。

## 1 城市绿地碳汇量估算方法研究现状

城市绿地碳汇量估算是评价城市绿地碳汇效益的重要途径, 目前估算主要方法如下<sup>[3-9]</sup>: (1)样地勘测法, 该类方法主要通过大规模的样地勘测, 通过测试和计算将取得的实测数据转化, 最后通过公式推算出研究区域的碳汇量<sup>[10-14]</sup>; (2)同化量法, 该类方法通过仪器测定瞬时进出植物叶片的二氧化碳浓度和水分, 利用叶面积乘以植物单位时间净光合速率得到植物固碳量<sup>[15-16]</sup>; (3)微气象学法, 该类方法基于对二氧化碳通量的动态测定, 然后将相关数据代入计算公式<sup>[17-18]</sup>; (4)遥感估算法, 该类方法将

收稿日期: 2020-10-20

修改稿日期: 2021-01-16

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2018YFC0704604)

第一作者: 于洋(1970—), 女, 博士, 教授, 主要从事低碳城市方向的研究, E-mail: 694969303@qq.com

遥感影像和数学模型结合,建立植物固碳量及其影响因素的单因子或多因子的关系,从而对大尺度的城市绿地碳汇量进行估算<sup>[19]</sup>; (5)利用碳汇量估算系统,该类方法基于样地勘测提供的树木信息,模拟树木生长或直接建立树木模型,通过输入研究区域植被信息或通过遥感影像对研究区域的植被进行识别,最后对研究区域的碳汇量进行估算<sup>[20]</sup>。

## 2 碳汇量估算系统的技术方法

利用碳汇量估算系统的方法不同于生物量法等通过实地勘测或仪器测量的传统估算方法,可极大节约人力物力,使运算更加快速高效。该方法也不同于遥感估算法,遥感估算法只能测定植被的瞬时碳汇量,而碳汇量估算系统是根据植被自身属性模拟树木生长状态,增强了估算的精准度,并且操作简单,所需数据少,对技术人员的专业水平要求低,适合生态系统服务功能评价中对城市绿地碳汇量的估算需要。之后部分将对该方法包括的 Citygreen, itree, The Pathfinder 和 National tree benefit calculator 进行重点展开。

### 2.1 Citygreen 模型法

Citygreen 是一款以 GIS 和 RS 技术为基础,基于 ArcView 平台的绿地生态效益评价模型<sup>[21]</sup>,该模型不仅能评价树木的生长,还能评价树种特有的生态系统服务,包括固碳、蒸腾、减少空气污染物、减少暴雨径流、遮荫和节能作用<sup>[22]</sup>。

Citygreen 由数据库和生态效益分析两个模块构成,两个部分共同作用可以模拟植被的生长。Citygreen 数据库的植物属性部分提供了一个具有 300 多种树木信息的基础数据库,由于所提供的数据来源于美国本土各州市,所以使用该模型前必须修正一些基本参数或更新树种数据库<sup>[23]</sup>,更新时需提供树木的叶密度、树高生长率,胸径生长率,树冠形状,树叶脱落情况,最大树高等级<sup>[24]</sup>等详细资料,以便系统和模型内自带的基础树种数据库匹配,并根据异速生长模型估算每棵树木的生态效益<sup>[25]</sup>。

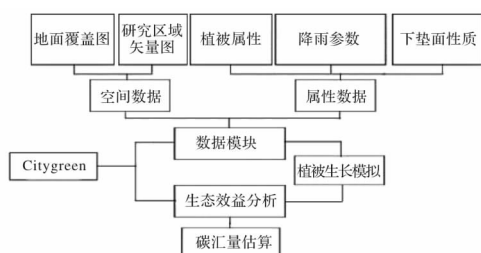


图 1 Citygreen 对城市绿地碳汇量估算的技术路线<sup>[24]</sup>

Fig. 1 Technical route of Citygreen's carbon sink estimation<sup>[24]</sup>

具体估算公式如下:

碳存储量( $t$ ) = 碳存储因子 × 植被覆盖率 × 研究区域面积;

碳吸收量( $t$ ) = 碳吸收因子 × 植被覆盖率 × 研究区域面积。

表 1 Citygreen 数据库参数数据<sup>[25]</sup>

Tab. 1 Parameter data of Citygreen database<sup>[25]</sup>

	碳储存因子	碳吸收因子
幼龄型	0.322	0.007
中龄型	0.442	0.001
混合型	0.539	0.002
平均型	0.430	0.003

### 2.2 itree 模型法

itree 是 2006 年由美国林务局开发的林业分析和生态效益评价模型。在城市绿地碳汇量估算方面,主要使用 itree-Streets 和 itree-Eco。itree-Eco 主要对整个城市森林树木种群的碳汇效益进行评估,而离散街道树木种群多使用 itree-Streets。

itree-Streets 是一种面向城市森林管理者的街道树专用分析工具,它使用树木清单数据量化树木年度效益的结构、功能和价值<sup>[26-27]</sup>。itree-Eco 则是根据现场数据、当地每小时空气污染和气象数据对城市森林结构、环境影响和社区价值对树木年度效益进行量化<sup>[28]</sup>。这两个模型都可以制作关于城市森林结构、功能和价值的表格和图表,可以以多种格式导出。表格内容不仅包括研究对象对二氧化碳的储存和封存,还包括研究对象对建筑能耗的影响和间接减少的二氧化碳排放、空气污染的去除等。

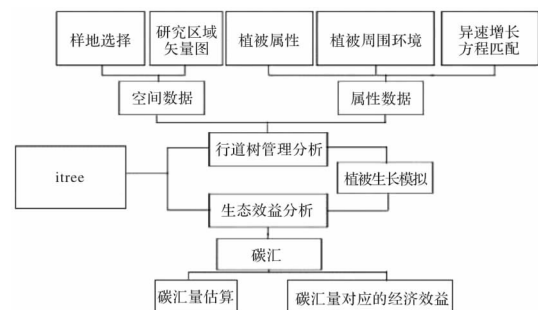


图 2 itree 对城市绿地碳汇量估算的技术路线

Fig. 2 Technical route of itree for urban green space carbon sink estimation

### 2.3 The Pathfinder 系统

The Pathfinder 是美国开发的景观碳计算系统,以网页的形式出现,它指导设计师该如何达到指定的碳排放目标,并对气候起到积极作用。

用户需要输入以下信息: (1)碳源:该系统包

括使用在景观工程中的80种不同材料,这些材料被用在铺装、墙壁、栅栏等要素中,以及这些材料从提取、制造、运输、安装、使用/维护和替换中产生的相关碳排放。此部分数据来源于加拿大雅典娜可持续材料研究所;(2)碳汇:树木、植物、湿地和某些类型的草地从大气中吸收二氧化碳,并将碳吸收到土壤中。所有用于计算树木和灌木的碳汇数据都来自美国林务局;(3)碳成本:碳成本是指在修剪树木和灌木时使用机器和肥料所产生的排放。这些排放在项目的使用期内定期发生,通常被称为“运作过程中产生的碳”,该部分数据来源于美国保护署<sup>[29]</sup>。

#### 2.4 National tree benefit calculator 模型

National tree benefit calculator 是在 itree 的基础上开发出树木效益计算器,并在操作界面,技术路线,数据输入等方面都进行了简化。National tree benefit calculator 通过树的高度和直径估算研究对象的地上生物量,然后通过换算将地上生物量转换为固碳量,对研究对象的年固碳量进行估算。该模型中研究对象的年固碳量实际上是研究对象以生物量形式储存的碳的年增量<sup>[30-32]</sup>。

#### 2.5 讨论与归纳

Citygreen 是基于样地勘测的生态效益评价模型,依据树木生长状态,对城市绿地的碳汇量进行估算,使用该系统对城市绿地碳汇量估算兼具样地勘测法的可靠和模型估算的便捷,并且所需数据较少,估算快捷简单<sup>[33]</sup>。不足在于 Citygreen 的基础数据库是根据美国本土的自然条件建立的,对城市绿地进行碳汇量估算时只是简单的考虑到树冠等因素,无法针对不同树种设定不同参数,导致最后估算结果和实际值有一定偏差<sup>[34]</sup>。itree 和 National tree benefit calculator 中的基础数据是通过植物的实地测量而得,将相关数据代入计算公式得出不同树种的碳汇量,并且可以根据生物量计算方程对植物地上和地下部分的碳汇量都做出计算,通过该系统对城市绿地碳汇量的估算结果具有很高的参考价值。并且 National tree benefit calculator 以网页形式出现,简化了 itree 在使用中的复杂程度,任何非专业人士都可以使用。itree 的不足在于系统缺乏一些树种数据,需要进行数据修正。McPherson, E Gregory 以葡萄牙里斯本市为例,对气候区匹配方法做出具体研究。通过比较研究城市和美国十六个城市的日采暖指数,空调指数,年降水量和当地常见树种数据库四个参数,建立相关性分析后得出最佳匹配结果<sup>[35]</sup>。The Pathfinder 可以对场地

内设计要素的碳排放量进行估算,完整模拟一个项目的碳排放和碳吸收情况,并对50年内项目的碳效益进行评估。Citygreen 和 itree 一般只对乔木的碳汇量进行估算,The Pathfinder 中新增了对灌木,草地的碳汇量估算。不足在于系统内对植物的碳汇量估算是根据植物的生长状态决定,没有涉及到植物种类。并且最终报告形式是以五十年为单位,若要对植被年碳汇量进行估算,需要查看系统数据。

在估算系统本土化方面, Citygreen, itree, National tree benefit calculator 中基础数据本土化的方面都有待进一步的探究和完善。The Pathfinder 则不需要进行本土化数据更正。未来研究者应更多致力于根据中国的气候条件,地理条件,植物种类等信息建立本土化的基础树种数据库,对现有估算系统进行完善。

面对不同尺度的城市绿地, National tree benefit calculator 适合对特定树种的碳汇量估算。The Pathfinder 在系统给定的地图上可以划定不同尺度的研究对象,但由于后期要输入场地设计要素的具体信息,研究区域不宜过大。itree 可以对单棵行道树和城市森林这两个不同尺度进行碳汇估算,可以通过抽样调查法估算大尺度的城市森林碳汇效益,也可以通过实地勘测对小尺度的研究区域进行全部调查。Citygreen 是基于地理信息系统和遥感影像基础上,以植物整体的覆盖率对城市森林的碳汇量进行估算,可以对城市公园碳汇效益做出评价,但由于通常使用矢量数据,分析速度较慢,并且 Citygreen 不适合单棵树木碳汇量的精确评估。

### 3 碳汇量估算系统在城市规划中的应用现状

根据目前国内外城市绿地碳汇量估算的应用研究内容,本文大致将其分为两类来阐述:规划周期中不同阶段的城市绿地碳汇量研究与不同尺度城市空间的城市绿地碳汇量研究。其中,不同城市空间的尺度包括单体建筑、街区、城市片区、城市;规划周期的不同阶段包括规划方案优化,建成环境评价,规划后期监测。

#### 3.1 不同尺度城市空间的绿地碳汇量估算

##### 3.1.1 单体建筑

单体建筑中的城市绿地包括宅前、宅后,住宅之间及建筑本身的绿地。单体建筑尺度下的城市绿地碳汇量估算多以单棵树的碳汇量为研究对象,由于植物本身具有直接碳汇能力以及通过遮荫挡风等

方式降低建筑能耗的间接碳汇能力,因此,该尺度上的城市绿地碳汇量估算不可忽略,目前对该尺度上的研究较少。National tree benefit calculator 和 The Pathfinder 都可以对单株植物的年碳汇量进行估算,适合单体建筑中的城市绿地碳汇量估算。

### 3.1.2 城市街区

城市街区中的城市绿地碳汇量估算是针对城市中某个街道或街区构成的绿地,如街头绿地,行道树等,研究者常使用 itree 对该尺度下的城市绿地碳汇量进行估算。在该尺度下,刘朋朋等<sup>[36]</sup>,张玉阳等<sup>[37]</sup>分别对杭州市西湖风景区行道树和青岛市南区行道树进行生态效益评价,并对研究对象的年碳汇量进行估算,John Blair 等<sup>[38]</sup>对悉尼一条主要铁路的代表性路段的行道树进行碳汇量估算。

### 3.1.3 城市片区

城市片区中的城市绿地碳汇量估算是针对城市中某个区域或局部的绿地,如城市森林,城市公园等, itree 和 Citygreen 都可以对该尺度下的城市绿地碳汇量进行估算。其中施健健等<sup>[39]</sup>利用 itree 对杭州花港观鱼公园内绿地的碳汇量进行估算。刘常富等<sup>[40]</sup>,黄初冬等<sup>[41]</sup>,邹涛等<sup>[42]</sup>都运用 Citygreen 对城市建成区的植被环境效益进行分析,并对市区树木碳汇量进行估算。

### 3.1.4 城市

城市中的城市绿地碳汇量估算是针对整个城市范围的全部绿地。在实际应用中,研究者多使用 Citygreen 对此尺度下的城市绿地碳汇量进行估算。Citygreen 在国际尤其是北美等国家已广泛使用,美国林务局应用此模型完成了对 200 多个城市的生态分析,如芝加哥,休斯敦,亚特兰大,丹佛<sup>[43]</sup>。

## 3.2 规划周期中不同阶段的城市绿地碳汇量估算

### 3.2.1 规划方案优化

城市中有部分碳排放是由于城市规划不当而间接产生的,因此规划者有必要在方案设计初期对城市绿地碳汇量估算,然后对方案进行低碳化处理。城市绿地的面积,空间位置,以及植物配置等都对城市绿地的碳汇效益产生影响。

在设计的概念阶段,使用者可以通过 The Pathfinder 对方案中设计元素的碳汇情况模拟(图 3),首先需要建立一个项目,选择项目类型(公园,花园,广场,街道景观,大学,绿色屋顶,混合区域,居住区,服务区,其他)和设计阶段(概念,原理图,设计开发,施工图,施工建设),其次是对研究范围进行框选,该系统提供的地图包含全世界范围。第三是对场地信息进行完善,首先要确定输

入的场地信息是现状或是设计可能性,然后对场地内的物质要素(铺装,墙壁,栅栏,现场要素,排水,地下要素),植物要素(草地,灌木,树木,湿地),运作方式(天然气动力设备,电动设备,拆除和废弃物处理,现存树木影响,土壤干扰,土壤运动)等信息进行录入。最后系统对场地内部碳汇效益的评估结果将以报告形式出现,其中包括图表和具体数据信息。

在植物选取方面,选取碳汇效益强的植物对提高城市绿地碳汇能力意义重大。National tree benefit calculator 可以对不同树种的年碳汇量做出估算,该系统会要求使用者输入植物信息和植物所处环境<sup>[44]</sup>。由于植物周边环境不同,碳汇效益也会受到影响,规划者可以根据系统估算结果,对城市绿地的空间位置和植物选取进行调整,以实现城市绿地碳汇效益最大化。Kent F. Kovacs 等<sup>[45]</sup>使用该模型对法国梧桐,樱花树,松树,梨树这四个树种的年固碳量做出评价,对该城市的低碳树种选取提供依据。

### 3.2.2 建成环境评价

规划者可以对建成环境的城市绿地碳汇量进行估算,比如对某块城市绿地的碳汇量变化进行逐年分析或者对方案中不同区域的城市绿地的碳汇量进行对比,并对其带来的生态效益做出评价。城市绿地生态系统服务功能的碳汇效益评价中,研究者多使用 Citygreen 和 itree 进行估算。中国科学院沈阳应用生态研究所是国内较早引进 Citygreen 的单位,该研究所的胡志斌等<sup>[46]</sup>以沈阳市区城市森林为研究对象,对其产生的生态效益进行了分析,结果表明,沈阳城市森林在碳汇方面的生态效益可以达到  $2.6 \times 10^7$  元左右。陈莉等<sup>[47]</sup>,凌焕然等<sup>[48]</sup>也都通过碳汇量估算系统对城市建成环境绿地的碳汇能力进行研究。

### 3.2.3 规划后期监测

规划后期会存在城市中不同区域碳分布不均衡的现象,规划者需要监测城市中的碳分布状况。首先可以将城市中的高碳空间和低碳空间与现实空间建立对应关系,然后将高碳空间和低碳空间中的城市绿地布局,城市绿地覆盖率,城市绿地碳汇量等数据进行比对分析,并从以上分析中吸取经验,归纳总结出有利于低碳城市发展的绿地模式,以期对后续城市规划进行指导。

## 4 总结与结论

城市绿地碳汇量估算以定量化方法评价城市绿

地的碳汇效益, 对科学评估城市绿地的生态效益具有十分重要的现实意义. 通过对城市绿地碳汇量估算系统方法的总结, 系统介绍了针对不同尺度和规划周期不同阶段的碳汇量估算, 为城市规划师提供了一个多尺度全周期的城市绿地碳汇量估算路线. 笔者认为未来在城市绿地碳汇量估算的研究应在以下几个方面开展:

(1)在城市绿地碳汇量估算方法的实际操作中, Citygreen, itree, National tree benefit calculator 三者在国内均已被广泛应用, The Pathfinder 是美国近年新开发的一个碳估算系统, 由于开发不久还没有展开大范围使用. 现对四种估算系统方法特点对比(表 2), 未来可以将不同方法结合对规划全周期的城市绿地碳汇量估算.

表 2 各碳汇量估算系统的特点对比

Tab. 2 Comparison of characteristics of each carbon sink estimation system

类别	Citygreen	itree	The Pathfinder	National tree benefit calculator
所需数据	植被属性, 降雨参数, 下垫面性质	植被属性(树种, 胸径, 健康状况, 冠幅), 植被周边环境(距离建筑物距离)等	植被类型(树木, 灌木, 草地), 植被数量或面积	植被属性(树种, 胸径), 植被周边环境类型(空地, 居住区, 公园等)
估算尺度	单棵行道树和城市森林的碳汇量估算	不适合单棵树木碳汇量的精确评估, 适合城市森林等大尺度的城市绿地碳汇量估算	由于要录入场地内碳汇要素的具体信息, 不适合大尺度的碳汇量估算	只能对单株植物的碳汇量进行估算
优越性	1. 所需数据较少 2. 估算快捷 3. 关注了植物间接的碳汇效益	1. 基础数据来源可靠 2. 对植被碳汇量估算全面(同时包括地上部分和地下部分的碳汇量)	1. 碳计算全面, 包括碳源, 碳汇, 碳成本三方面 2. 无需进行参数修正 3. 网页形式出现, 操作简单	在 itree 的基础上简化, 以网页形式出现, 操作简单
局限性	1. 只是简单的考虑到树冠等因素, 无法针对不同树种设定不同参数 2. 使用前需要根据本土本情况进行参数调整	当系统缺乏树种数据时, 需要进行数据修正	1. 对植物碳汇量估算未涉及植物种类 2. 最终碳汇效益评价结果是以 50 年为单位呈现	无法进行参数修正

(2)在规划周期中不同阶段的研究上, 现有城市对城市绿地碳汇量估算多集中在规划前期方案优化和建成环境评价, 对规划后期监测研究甚少. 目前大部分城市都出现城市空间碳排放分布不均匀的情况, 因此有必要着力拓展对后期监测的城市绿地碳汇研究, 从而对城市中高碳空间和低碳空间进行协调和均衡.

(3)在不同尺度城市空间的绿地研究上, 现有城市对城市绿地碳汇量估算研究多集中在大尺度上, 如城市和城市片区, 但对中小尺度的绿地, 如单体建筑和城市街区绿地的研究有所欠缺. 城市系统的复杂性对整个城市低碳化的目标推进带来困难, 我们只能对城市局部做出低碳化措施, 提高城市绿地碳汇能力是其中的重要举措, 所以日后应从中小尺度的城市绿地碳汇研究入手, 对单体建筑, 街区等城市空间的绿地碳汇量展开深入研究.

(4)在国土空间“双评价”背景下的城市规划中,

需要进行生态系统服务功能评价, 并且在省市“双评价”基础上应该进一步要求分区规划开展小尺度精细化的现状评价. 因此, 国土生态系统服务功能评价应该包括各个尺度, 比如大到省市级, 也可以小到某一块场地, 如公园, 街区等. 城市绿地的碳汇效益是重要的生态功能, 应将其考虑进生态系统服务功能评价的体系中, 形成涵盖城市规划全生命周期, 并且包括各个尺度的碳汇量估算体系(图 3).

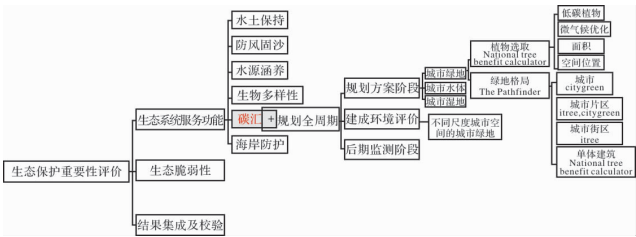


图 3 生态系统服务中碳汇与规划周期结合

Fig. 3 Integration of carbon sink and planning cycle in ecosystem services

## 参考文献 References

- [1] 王敏,石乔莎.城市高密度地区绿色碳汇效能评价指标体系及实证研究——以上海市黄浦区为例[J].中国园林, 2016, 32(8): 18-24.  
WANG Min, SHI Qiaosha. Evaluation index system and empirical research on efficiency of green carbon sink in urban high-density areas: A case study of Huangpu district, Shanghai [J]. Chinese Gardens, 2016, 32(8): 18-24.
- [2] 王敏,石乔莎.城市绿色碳汇效能影响因素及优化研究[J].中国城市林业, 2015, 13(4): 1-5.  
WANG Min, SHI Qiaosha. Study on influencing factors and optimization of urban green carbon sink efficiency[J]. Chinese Urban Forestry, 2015, 13(4): 1-5.
- [3] 冀媛媛, 罗杰威, 王婷. 建立城市绿地植物固碳量计算系统对于营造低碳景观的意义[J]. 中国园林, 2016, 32(8): 31-35.  
JI Yuanyuan, LUO Jiewei, WANG Ting. The significance of establishing the calculation system of plant carbon sequestration in urban green space for creating low-carbon landscape[J]. Chinese Gardens, 2016, 32(8): 31-35.
- [4] 张茂震. 基于森林资源清查、卫星影像数据与随机协同模拟尺度转换方法的森林碳制图[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2919-2928.  
ZHANG Maozhen. Forest carbon mapping based on forest resource inventory, satellite image data and random collaborative simulation scale conversion method [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2919-2928.
- [5] 方精云. 1981~2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007(6): 804-812.  
FANG Jingyun. Estimation of terrestrial vegetation carbon sinks in China from 1981 to 2000[J]. Science of China (Series D: Earth Sciences), 2007(6): 804-812.
- [6] 郝婷婷, 李顺龙. 黑龙江省森林碳汇潜力分析[J]. 林业经济问题, 2006(6): 519-522, 526.  
XI Tingting, LI Shunlong. Analysis of forest carbon sink potential in Heilongjiang province[J]. Journal of Forestry Economics, 2006(6): 519-522, 526.
- [7] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001(9): 967-973.  
FANG Jingyun, CHEN Anping. Dynamic changes and significance of carbon pool of forest vegetation in China [J]. Acta botanica Sinica, 2001(9): 967-973.
- [8] 王效科, 冯宗炜. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力[J]. 生态学杂志, 2000(4): 72-74.  
WANG Xiaoke, FENG Zongwei. The potential of plants to fix atmospheric carbon in Chinese forest ecosystems[J]. Journal of Ecology, 2000(4): 72-74.
- [9] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, 2001(1): 13-16.  
WANG Xiaoke, FENG Zongwei, OUYANG Zhiyun. Study on plant carbon storage and carbon density of forest ecosystems in China[J]. Journal of Applied Ecology, 2001(1): 13-16.
- [10] 聂道平, 徐德应, 王兵. 全球碳循环与森林关系的研究——问题与进展[J]. 世界林业研究, 1997(5): 34-41.  
NIE Daoping, XU Deying, WANG Bing. Research on the relationship between global Carbon cycle and forests: Problems and progress[J]. World Forestry Research, 1997(5): 34-41.
- [11] FOLEY J A. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget[J]. Tellus, 1995, B(47): 310-319.
- [12] 李意德. 我国热带天然林植被 C 贮存量的估算[J]. 林业科学研究, 1998(2): 41-47.  
LI Y D. Estimation of the storage capacity of natural tropical forest vegetation in China[J]. Journal of Forestry Science, 1998(2): 41-47.
- [13] 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.  
WANG Disheng. Study on the net carbon storage of garden green space in Beijing urban area based on biomass meter[D]. Beijing Forestry University, 2010.
- [14] LIN B, GE J. Valued forest carbon sinks: How much emissions abatement costs could be reduced in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 224: 455-464.
- [15] 陈自新. 北京城市园林绿化生态效益的研究(2)[J]. 中国园林, 1998(2): 49-52.  
CHEN Zixin. Research on ecological benefits of urban landscaping in Beijing (2)[J]. Chinese Landscape Architecture, 1998(2): 49-52.
- [16] 董延梅. 杭州花港观鱼公园 57 种园林树木固碳效益测算及应用研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2013.  
DONG Yanmei. Carbon sequestration benefit calculation and application research of 57 kinds of garden trees in Hangzhou Huagang park[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2013.
- [17] 刘允芬. 千烟洲人工针叶林 CO<sub>2</sub> 通量季节变化及其环境因子的影响[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2004 (S2): 109-117.  
LIU Yunfen. Seasonal variation of CO<sub>2</sub> flux in artificial coniferous forest in Qianyanzhou and the influence of environmental factors[J]. Science of China (Series D: Earth Sciences), 2004(S2): 109-117.
- [18] 王文杰. 基于涡度协方差法和生理生态法对落叶松林

- CO<sub>2</sub> 通量的初步研究[J]. 植物生态学报, 2007(1): 118-128.
- WANG Wenjie. Preliminary study on CO<sub>2</sub> flux in Larch forest based on the covariance method of vorticity and physiological and ecological method[J]. Journal of Plant Ecology, 2007(1): 118-128.
- [19] 孙成明. 基于 MODIS 的中国草地 NPP 综合估算模型[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 1079-1085.
- SUN Chengming. Comprehensive estimation model of NPP of grassland in China based on MODIS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1079-1085.
- [20] 殷利华, 杭天, 徐亚如. 武汉园博园蓝绿空间碳汇绩效研究[J]. 南方建筑, 2020(3): 41-48.
- YIN Lihua, HANG Tian, XU Yaru. Research on the performance of blue and green space carbon sink in Wuhan Yuanbo park[J]. Southern Architecture, 2020 (3): 41-48.
- [21] 彭立华. Citygreen 模型在南京城市绿地固碳与削减径流效益评估中的应用[J]. 应用生态学报, 2007(6): 1293-1298.
- PENG Lihua. Application of Citygreen model in the assessment of carbon sequestration and runoff reduction benefits of urban green space in Nanjing[J]. Journal of Applied Ecology, 2007(6): 1293-1298.
- [22] American Forests. Citygreen 5.0 User Manual[Z]. Washington DC: America Forests, 2002.
- [23] 张陆平. 基于 Citygreen 模型的苏州市森林生态效益评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(1): 59-62.
- ZHANG Luping. Evaluation of forest ecological benefits in Suzhou city based on Citygreen model[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2012, 36(1): 59-62.
- [24] 杜钦, 段文军, 罗盛锋. Citygreen 模型在人工林碳储量核算中的应用研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(11): 103-107, 112.
- DU Qin, DUAN Wenjun, LUO Shengfeng. Application of Citygreen model in carbon reserve accounting of plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2016, 36(11): 103-107, 112.
- [25] 张侃. 基于土地利用变化的杭州市绿地生态服务价值 Citygreen 模型评价[J]. 应用生态学报, 2006(10): 1918-1922.
- ZHANG Kan. Evaluation of the Citygreen model of ecological service value of Hangzhou greenbelt based on land use change[J]. Journal of Applied Ecology, 2006(10): 1918-1922.
- [26] MACO S E, McPherson E G. A practical approach to assessing structure, function, and value of street tree populations in small communities[J]. Journal of Arboriculture, 2003, 29(2): 84.
- [27] SIMPSON J R. Municipal forest benefits and costs in five US cities[J]. Journal of Forestry, 2005, 103: 411-416.
- [28] NOWAK D J. A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services [J]. Arboriculture & Urban Forestry, 2008, 34(6): 247-358.
- [29] PALEMA Conrad. Design for our future: The pathfinder[EB/OL]. 2020-10-09[2020-10-09]. <https://climatepositivedesign.com/>
- [30] MCHALE M R. Urban forest biomass estimates: Is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees [J]. Urban Ecosystems, 2009, 12: 95-113.
- [31] PILLSBURY N H, Reimer J L, Thompson R P. Tree volume equations for fifteen urban species in California [M]. San Luis Obispo, CA: Urban Forests Ecosystems Institute, California Polytechnic, 1998: 48-52.
- [32] NOWAK D J, Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA [J]. Environmental Pollution, 2002, 116: 381-389.
- [33] 徐容容. 基于 Citygreen 模型的绿道生态效益评价——以增城市为例[J]. 广东农业科学, 2013, 40(17): 173-176, 4.
- XU Rongrong. Evaluation of greenway ecological benefits based on Citygreen model: A case study of Zengcheng[J]. Guangdong Agricultural Science, 2013, 40(17): 173-176, 4.
- [34] 占珊, 闫文德, 田大伦. 基于 Citygreen 的城市森林生态效益评估的应用[J]. 中南林业科技大学学报, 2008(2): 137-143.
- ZHAN Shan, YAN Wende, TIAN Dalun. Application of urban forest ecological benefit assessment based on Citygreen[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2008(2): 137-143.
- [35] MCPHERSON E G. Selecting reference cities for itree streets[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 2010, 36: 230-240.
- [36] 刘朋朋. 基于 itree 模型的杭州市环西湖景区行道树生态效益分析[J]. 科技通报, 2019, 35(2): 132-137.
- LIU Pengpeng. Ecological benefit analysis of roadside trees around West lake in Hangzhou based on itree model[J]. Science and Technology Bulletin, 2019, 35(2): 132-137.
- [37] 张玉阳. 基于 itree 模型的青岛市南区行道树组成及生态效益分析[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1739-1747.



- ZHANG Yuyang. Composition and ecological benefit analysis of street trees in south district of Qingdao based on itree model[J]. *Journal of Ecology*, 2013, 32(7): 1739-1747.
- [38] BLAIR J. Greening rail infrastructure for carbon benefits[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 180(4): 1716-1724.
- [39] 施健健. 杭州花港观鱼公园森林固碳效益评估[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(5): 829-835.
- SHI Jianjian. Forest carbon sequestration benefit assessment in Hangzhou Huagang park[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, 35(5): 829-835.
- [40] 刘常富. 基于 QuickBird 和 Citygreen 的沈阳城市森林效益评价[J]. *应用生态学报*, 2008(9): 1865-1870.
- LIU Changfu. Evaluation of urban forest benefits in Shenyang based on QuickBird and Citygreen[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2008(9): 1865-1870.
- [41] 黄初冬. 基于遥感技术的通州新城区森林生态价值评估[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2008(1): 121-124.
- HUANG Chudong. Forest ecological value assessment of Tongzhou new district based on remote sensing technology[J]. *Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science edition)*, 2008(1): 121-124.
- [42] 邹涛. 生态城市建设与城市森林的综合生态价值评估[J]. *建筑学报*, 2009(2): 45-47.
- ZOU Tao. Ecological city construction and comprehensive ecological value assessment of urban forest[J]. *Journal of Architecture*, 2009(2): 45-47.
- [43] MIDDEL A, CHHETRI N, QUAY R. Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighborhoods[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(1): 178-186.
- [44] Casey trees and Davey Tree Expert Co. National tree benefit calculator[EB/OL]. 2020-10-09[2020-10-09]. <http://www.treebenefits.com/calculator/>.
- [45] KOVACS K F. The marginal cost of carbon abatement from planting street trees in New York city[J]. *Ecological Economics*, 2013, 95: 1-10.
- [46] 胡志斌. 沈阳市城市森林结构与效益分析[J]. *应用生态学报*, 2003(12): 2108-2112.
- HU Zhibin. Urban forest structure and benefit analysis in Shenyang[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003(12): 2108-2112.
- [47] 陈莉. 应用 Citygreen 模型评估深圳市绿地净化空气与固碳释氧效益[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 272-282.
- CHEN Li. Applying Citygreen model to evaluate the air purification and carbon sequestration and oxygen release benefits of Shenzhen greenbelt[J]. *Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 272-282.
- [48] 凌焕然. 近二十年来上海不同城市空间尺度绿地的生态效益[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5607-5615.
- LING Huanran. Ecological benefits of green space at different urban scales in Shanghai in recent 20 years[J]. *Journal of Ecology*, 2011, 31(19): 5607-5615.

(编辑 沈 波)