

城镇绿地植被固碳量遥感测算模型的设计

周坚华^{1,*}, 胡永红², 周一凡³, 俞立中⁴

(1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 2. 上海植物园, 上海 200231;
3. 斯坦福大学地球科学学院, Stanford, CA 94305-2220 USA; 4. 华东师范大学, 上海 200062)

摘要: 城镇绿地是增加城市碳汇的积极因素之一。但城镇绿地植被结构和分布的极高空间异质性、影响植物生产力的环境压力因子的极高空间异质性等, 使城镇绿地碳汇水平估算存在很大的不确定性。为此, 提出了完全由遥感数据驱动的城镇绿地植被固碳量测算模型。它以分树种单株测算来适应城镇绿地植被结构和分布等的高异质性; 以小尺度提取影响植物生产力的主要环境压力和管养模式因子, 来适应这些因子空间分布的高异质性。该模型可以用于自动测算城镇绿地植被地上干生物量和地上净第一生产力, 它的提出对于评价城镇绿地植被的碳捕获能力和储量分布、碳汇水平、以及由此产生的对城镇地区碳循环和生态承载力等的定量影响具有重要意义。为了论证该技术框架中一些关键技术的可行性, 进行了局部试验, 并取得了一些进展。

关键词: 城镇绿地; 碳汇; 植物固碳模型; 遥感驱动

A design of carbon-sink model of urban landscape vegetation driven by remote sensing

ZHOU Jianhua^{1,*}, HU Yonghong², ZHOU Yifan³, YU Lizhong⁴

1 China Education Ministry Key Laboratory of Geographical Information Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China

2 Shanghai Botanical Garden, Shanghai 200231, China

3 School of Earth Sciences, Stanford University, CA 94305-2220 USA

4 East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract: Urban landscape vegetation is one of the positive factors in absorbing carbon in urban area. However, there remain significant uncertainties for estimating carbon sink in relation to urban landscape vegetation due to extremely high heterogeneities in structure and distribution of both urban landscape vegetation and environmental stresses on plant productivity. In this paper, we tend to discuss the necessities and difficulties of measuring captured carbon by urban landscape vegetation and estimating plant carbon sink by means of the technique of remote sensing. Then, a model driven by remote sensing named MMCC (Model of measuring captured carbon) is proposed. With MMCC, it is most likely that both the above-ground vegetation biomass (AVB) and the above-ground net primary productivity (ANPP) were measured automatically.

Here is the summary about the solutions by MMCC to some main difficulties while assessing the urban plant carbon sink. ① both the present sum and annual increase of captured carbon by urban landscape vegetation could be obtained with the algorithms of measuring AVB and ANPP respectively; ② the continuous quantification in timeliness could be fulfilled by making annual change of ANPP in the coming years predictable. The prediction is supported by such data as certain plant species and plant canopy diameters because they can be used as proxies for a certain plant's age and its ANPP in this age when the stress over the plant from its surroundings is considered; ③ considering the high heterogeneity of plant species, distribution and structure of urban landscape vegetation, the basic object measured by MMCC is an individual plant rather

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40671177)

收稿日期: 2010-04-10; **修订日期:** 2010-08-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jhzhou@geo.ecnu.edu.cn

than a plot of ecological community, as in the most existing models of assessing plant carbon sink. To adapt to the same high heterogeneity of spatial distribution of those environmental stress factors having their effects on ANPP, a small-scale ($25\text{m} \times 25\text{m}$) block is scheduled to sampling these factors; ④ with the development of MMCC fully driven by remote sensing and GIS data, the continuous quantification in spatiality can be actualized. The quick quantification can also be actualized by making all the parameters to drive MMCC acquirable by computer. Namely, all the parameters, including plant and environmental stress factors need to be collected in the field only in the modeling phase, but can be produced automatically by image recognition in its running phase.

In order to demonstrate feasibilities of some key technologies in MMCC, parts of the most difficulties were tested with some progresses achieved. For example, in identifying the nature of plant species, 14 new descriptors inductive of spectrum, texture and shape signatures have been designed. These descriptors should be up to such requirements as possessing a true physical implication relating to geometric or ecological significance, having a relatively steady segmentation threshold and being less sensitive to the differences among image types or the environmental conditions during image acquisition, and so on. This study uses decision tree with four descriptors to identify plant species and yields an error rate no more than 5.8% while comparing 25.9% by using traditional properties. Moreover, a new conception of Normalized Difference Umbra Index (NDUI) has been achieved in the present study. It is demonstrated that NDUI is a robust index for extracting pixels of trees planted at darken area and thus helpful for repairing their brightness. Another notable test is to get diameter of plant canopies with image recognition. As a result, it is initially determined that the area covered by vegetable can be plotted out into individual canopies and the average diameter of these canopies in a $25\text{m} \times 25\text{m}$ sampling block can be calculated as the image resolution is better than one meter and plant canopy density is not saturated yet. The correlation between the ratio of perimeter to area and diameter of plant canopy can be used in the calculation.

In short, MMCC of the present study is proved to be applicable for assessing quantity and distribution of captured carbon by urban landscape vegetation and its quantitative effect on carbon circulation and ecological capacity in a city.

Key Words: urban landscape vegetation; carbon sink; model of measuring AVB and ANPP; driven by remote sensing

1 概述

1.1 城镇地区碳汇研究的特殊意义

碳循环是生物圈发展健康水平的重要标志。碳源/碳汇的定性和定量分析,对于研究气候变化对生态系统的影响,决策生态系统的应对策略等具有支持作用。城市是人类生产生活最集中的区域,有研究表明人为 CO_2 排放的 97% 来自城市地区^[1]。随着城市化进程加速,城镇地区 CO_2 的排放量逐年上升。如近 15a 来,上海市能源消费碳排放量以每年 4.6% 的速率快速增长^[2]。调查城市的碳源/碳汇,研究城市化进程中的碳收支模型和预测碳平衡情况,可以为城市的低碳经济决策等提供支持。

另一方面,城市是温室气体排放最为集中的地区,Idso 等称在美国菲尼克斯市建成区近地面的 CO_2 浓度是城市外地区的 3 倍^[3]。城镇绿地是增加城市碳汇的积极因素之一。由于一定的植被每天代谢的空气量一定,在温室气体排放浓度较高的区域植树,理论上将提高植物代谢和固定 CO_2 的效率。实际测试也表明 CO_2 浓度增加 1 倍,将使草地生态系统生产力增加 26%—47%^[4];经高浓度 CO_2 处理,两种主要绿化植物的净光合速率平均提高 66.7%^[5]。从碳捕获和固定效率来说,城镇绿地植被相对于野外森林有事半功倍的作用;所以,对于城镇绿地植被固碳性能的定量研究具有特别重要的意义。

但是,迄今为止城镇绿地植被碳汇还是一个研究较少的领域。因为土地利用模式日趋复杂,由此引起的城镇绿地植被分布和结构的极高空间异质性,成为城镇绿地植被碳汇估算不确定性的主因^[6]。

1.2 碳汇水平遥感估算现状

植被第一生产力(NPP)是一种时空变化数据,它反映不同环境压力下植被生物量的增长率。因为 NPP

不宜直接测量,绝大多数研究通过野外采样建立植被的某些表观指标与 NPP 的关系,再外延到更大区域 NPP 的评估中。但由于生态系统和环境压力的时空多变性,这种外延评估往往精度不高。中科院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”对我国全国尺度 NPP 总量估算研究的比较显示,8 个参比文献 NPP 估算的最大与最小值相差 1 倍以上,6 个参比文献 NEP(净生态系统生产力)相差 10 倍以上^[4]。

要提高 NPP 评估精度,可用方法之一是增加生态群系的时空变化观测。将野外采样与遥感数据相结合是一个可行的方法。在现有技术条件下,要建立空间连续的植被碳汇估算模型,基于遥感的技术框架是可行和很有前途的。一些学者曾高度评价遥感在植被地上生物量(记为 AVB)、NPP、总第一生产力(GPP)估算中的作用,他们建议重新评估使用遥感数据作为输入参数的潜力,以建立由卫星数据驱动的 NPP/GPP 估算模型^[7-8]。

Fabio Maselli 等^[9]认为研究完全由遥感数据驱动的碳收支评估模型非常必要。MODIS 次级产品的开发团队为此做了很多工作。比如,MOD17 提供评估全球 GPP 的几种数据产品^[10]。该产品通过使用代表沙漠、苔原、热带雨林等生态群系、称为 BigFoot 样区的地面和近地面系列观测值,通过“查表”方式来外推全球 GPP。当研究区域的生态类型不在 BigFoot 表中时,用户必须以野外调查等方法补充。对于生态类型复杂、空间异质度较高的区域(比如城镇建成区),这种野外调查补充常常难以实施。许多研究证明,当不能根据生态群系类型的时空变化有效补充实际观测值时,使用 MODIS 产品估算 GPP 存在较大误差^[10-12]。另外植物光谱特性、像素异质性、背景辐射、阳高角和观测角、植物阴影、大气散射和双向反射效应等都会影响由遥感数据直接估算 GPP 的精度^[13-14],经验关系只适用于样区的当时当地,通常不能扩大到更大区域,也不能外延到不同气候区^[15-17]。

1.3 城镇地区 NPP 遥感估算

由环境过程和社会经济导致的土地景观的高度破碎和异质性给城镇地区 NPP 估算带来极大的不确定性^[6,18]。这种不确定性不但源自植物种类、分布和结构的极高空间异质性,而且源自影响 NPP 的主要环境压力因子的极高空间异质性。比如,城市绿化植物的叶片气孔密度和气孔长径会随环境胁迫程度增大而降低^[19]。所以在城镇 NPP 评估中需要使用与其环境压力因子的均质度相适应的采样尺度。而 MODIS 次级产品只适用于国家或全球尺度的 GPP 评估(e.g. MOD17 的最高空间分辨率为 250m),其空间分辨率通常不能满足城镇地区相应研究的需要。为了弥补遥感数据空间分辨率的缺陷,Milesi 等曾以城镇土地利用图中的用地变化信息,作为 NPP 估算模型的辅助参数^[20]。但由景观高度非均质引起的不确定性始终存在,这也是较少检出城镇地区 NPP 估算文献的主要原因。

本文将研究全遥感驱动的城镇绿地植被 AVB 和 ANPP 测算模型。为了适应城镇地区景观的高异质性,该模型以分树种单株测算 AVB 和 ANPP;并通过遥感与 GIS 的结合,以 25 m×25m 尺度采集主要环境压力和管养模式因子数据,作为 AVB 和 ANPP 测算模型的辅助参数。

2 模型技术框架设计

植物的生物碳储量与其干生物量之间具有简单的关系。碳储量一般取为干生物量的一半^[21],即可以由植物的干生物量直接估算植物碳储量。为了可操作,通常只测算 AVB,并据此推算植物根系和凋落物的生物量。比如将根的生物量取为地上生物量的 20%^[22],该比例已经由更多的试验数据和相关分析证实^[23-24]。对于成龄森林,凋落物的碳储量通常设为活植物地上生物量的 10%—20%^[22,25-26]。本文主要涉及城镇绿地植物 AVB 和 ANPP 的遥感自动测算,对植物根系和凋落物的生物量按有关文献推荐的比例推算。另外本文不涉及大气、土壤和水体碳库的碳收支。

碳收支模型的主流类型包括:统计模型、参数模型、过程模型。遥感技术比较适合用于参数和统计模型的参数获取,以及在过程模型中用于生态群系分类。为了使模型基本驱动参数可由遥感和 GIS 技术获取,本文的模型采取参数模型和统计模型相结合的方法。模型的主要特点是适用于城镇绿地,并全部由遥感和 GIS 数据驱动。这一设计有助于解决城镇绿地固碳性能的精确快速和时空连续定量问题。

模型的核心技术可以描述为:①通过同时给出 AVB 和 ANPP 测算模型,解决城镇绿地固碳量现状和年增

量测算问题。②通过提取树种和环境压力控制下的冠径(用来表征树龄并间接表征 ANPP 生产阶段)信息,预测未来若干年的 ANPP 年修正量,或说解决时间连续定量问题。③通过以具体树种单株测算植物固碳性能,并以 25 m×25m 采样尺度测算影响 ANPP 的主要环境压力和管养模式数据,解决在城镇地区高异质景观空间精确定量问题。④通过开发完全由遥感和 GIS 数据驱动模型,解决空间连续定量问题;并通过实现所有驱动参数的计算机自动提取,解决快速定量问题。

图 1 为该模型的技术框架示意图。根据对框架各环节的分析,不难发现该模型并不针对具体城市,即对大多数城市具有泛化性。对于山地城市,可以先采用缝隙纠正获得正射图像。另外,一旦获得最新遥感图像,考虑通过遥感图像变化探测技术检测绿地变迁信息,并对变迁区域实现自动修测和数据库更新。有关变迁自动检测的研究和实验将另文讨论。下面主要介绍框架中树种识别和环境压力计算等关键技术,并解释图中符号的含义。

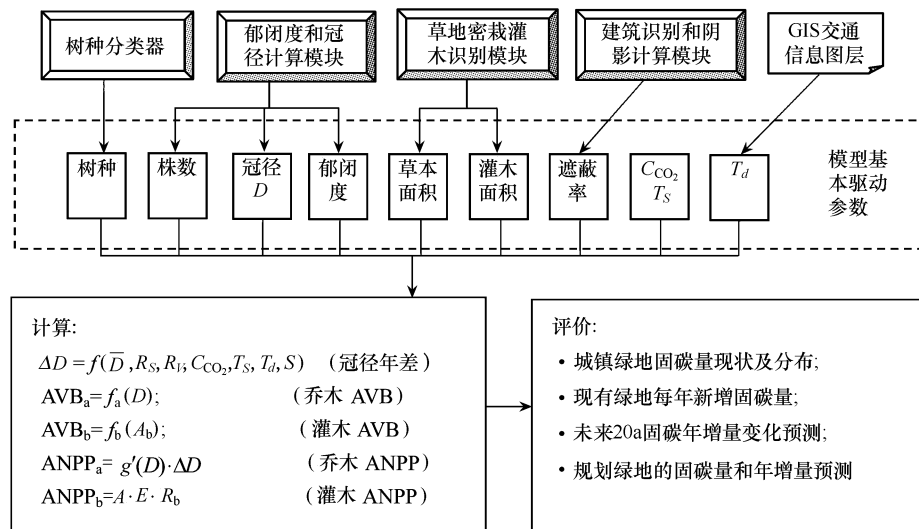


图 1 城镇绿地固碳性能遥感自动测算技术框架

Fig. 1 Technical scheme of measuring CO₂ fixed by urban landscape vegetation by means of remote sensing

下标 a, b 分别为乔木、密栽灌木

2.1 树种识别特征的数学模拟和分类器设计

一些野外调查指出不同树种的固碳性能相差较大^[27]。所以,无论从重要性还是从提取难度来看,树种都是 AVB 和 ANPP 遥感驱动测算模型的关键数据。

从检索结果来看,使用雷达/激光雷达/多光谱扫描仪数据进行树种识别时,其精度大抵只能区分树种较单一的次生林群落类别,目前报道的识别类数最高为 4 种^[28-29];另外,高密度脉冲激光扫描、高光谱数据和一些复杂信号分析技术等也被用于森林树种识别,但只能有限改善植株的可分辨度和个别树种的可检出性^[29-32]。而我国大中城市绿化覆盖占比 90% 的骨干树种的数量通常可以达到 25—30 种^[33]。所以树种自动识别成为 AVB 和 ANPP 遥感测算模型驱动参数自动提取的主要瓶颈。

这里将图 1 中的“树种分类器”细化而给出如图 2 所示的树种识别技术子框架。设计特征描述符、建立分类模型和辅助特征专家库是该子框架的关键技术。

(1) 特征描述符 遥感图像种类和获取环境条件常常具有多变性,使得不同时相、不同季节、不同传感器获得的图像呈现显著的波谱特征差异。如果采用常规波谱特征聚类/分类,一般需要根据图像获取条件,不断调整分类逻辑。所以,研究对于遥感图像种类和获取环境条件的多变性不敏感的“通用”描述符非常必要。有关试验和讨论请见 3.1。

(2) 分类模型 各识别特征的关联规则(组合、逻辑顺序、权重等)不仅取决于树种,而且取决于环境背景

(如建筑阴影等)、栽种模式(如栽种密度等)和图像获取季节和时间等,在多数情况下,这种关联规则表现出随机性、模糊性和不适宜性。为此,选择空间数据挖掘中的一些代表性概念模型和算法(e.g. 模糊集、云理论、粗集,决策树等)进行测试比较,以指导树种分类器的设计。

(3)辅助特征专家知识库 在多维特征空间分类出现不适宜性时,可以考虑启用专家知识库辅助分类。本文设计的辅助特征包括:

①拓扑邻域特征 用于描述各类别/图斑之间的相互关系(e.g. 两个树种的相邻概率等)。

②种植模式 储存绿化植物常规栽种模式,可以从现有 GIS 中获取与种植模式有关的背景信息(e.g. 根据道路缓冲区提取行道树等)。

③季节/物候 储存植物常绿、落叶、花期等季节/物候特点,以用于多时相遥感图像分类。

2.2 环境压力计算

理论上,可以根据植物冠径年差 ΔD 推算 AVB 年差,以此代理 ANPP。但乔木的 ΔD 或 ANPP 随树龄不同变化较大。同时, CO_2 环境浓度、气温、交通扬尘、建筑遮蔽等环境压力因子,以及树木郁闭度、修剪情况等管养模式因子等都可能对 ΔD 产生不同程度的影响。为此本文的模型考虑将 ΔD 设置为上述影响因子的函数,即:

$$\Delta D = f(\bar{D}, R_s, R_v, C_{\text{CO}_2}, T_s, T_d, S) \quad (1)$$

式 1 体现树龄(以 $\bar{D}$ 表征)、主要环境压力因子和管养模式因子等对 ΔD 的影响,可以通过多元分析获得函数表达式的具体形式,该多元关系的一般形式为:

$$\Delta D = a_1 \bar{D} + a_2 R_s + a_3 R_v + a_4 C_{\text{CO}_2} + a_5 T_s + a_6 T_d + a_7 S + a_8 \quad (2)$$

式中, $a_i (i = 1, 2, \dots, 7)$ 为待定系数, a_8 为常量; $\bar{D}$ 为时间移动平均冠径,指与 ΔD 获取时间相应的平均冠径; R_s 为树木郁闭度; R_v 为建筑阴影等对植物的遮蔽率; C_{CO_2} 和 T_s 分别指与 ΔD 获取时间相应的年均 CO_2 浓度和年积温记录数据; T_d 为交通扬尘密度(体现扬尘对植物呼吸的影响),它设置为植物到道路的距离 d 和道路车道数 n 的函数; S 为植物修剪因子,根据树种和绿地功能类型等决定的修剪规则确定。

为了减少野外采样量,样本数据通过 30a 阶梯遥感图像判读采样方法获得,技术流程见图 3。遥感图像判读采样为同株采样,即确定样株后,在时序阶梯图像上量取冠径,并根据遥感图像的年份计算 ΔD 和对应的 $\bar{D}$;同时量算 R_s 、 R_v 和 T_s 等数据。 C_{CO_2} 和 T_s 由大气监测和气象观测数据给出; S 根据上述修剪规则获得。

$\bar{D}$ 、 R_s 、 R_v 、 T_d 等的现状数据还考虑以“车载三维自动测绘系统”采集和测算。

3 可行性试验和讨论

这里着重讨论上述模型中几个关键技术的局部试验情况,最后还讨论一下本文模型采取单植株测算的原因。

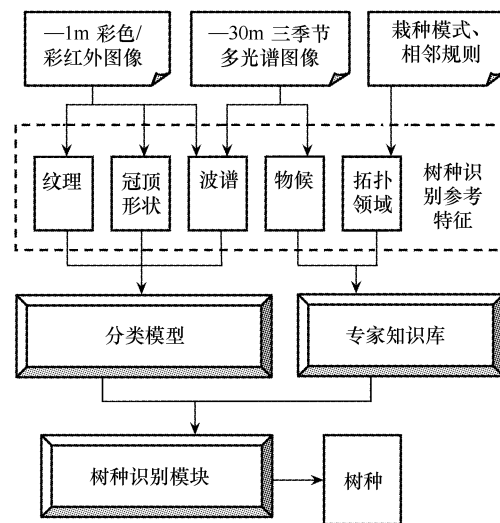


图 2 树种识别方法

Fig. 2 Scheme of plant species identification

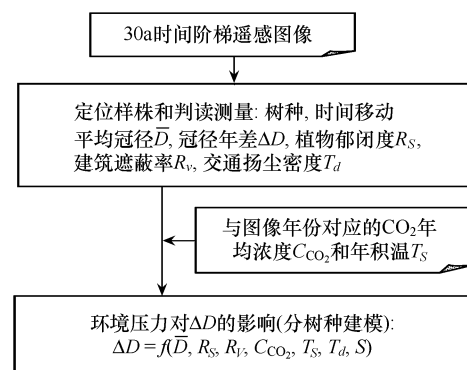


图 3 ΔD -环境压力建模

Fig. 3 Getting the relation between ΔD and surrounding stresses

3.1 树种识别特征描述符设计和分类模型测试

在归一化植被指数、灰度共生矩阵统计指标和形状

系数等经典描述符的基础上,本文又给出了归一化阴影指数、饱和度明度相对差、相对边缘点数、相对暗细节密度、相对骨架密度、加权平均冠径等 14 个新描述符(表 1)。下面分波谱、纹理和形状特征 3 个方面,以试验数据讨论这些描述符的有效性。

3.1.1 波谱特征描述符

试验表明,单个波谱分量 IR 、 R 、 $G6$ (红外、红、绿)或 H 、 S 、 I (色调、饱和度、明度)对遥感图像的类型和获取时环境条件的变化比较敏感,分割阈值通常不适定,由此导致聚类结果不稳定,或神经网络的输出没有意义。而使用一些具有组合、归一化、相对值、平滑化性质的描述符,如 $NDUI$ 和 D_{SI} 、 A_G 等,这种情况通常会有较大改善。

这里以饱和度明度相对差 D_{SI} 为例讨论之。图 3 比较了 D_{SI} 与单个波谱分量 H 、 S 、 I 对几个树种的可分辨性。试验样本取自两个季节的 12 幅遥感图像,植物种类为上海市的常见绿化树种雪松、水杉和香樟;为了增加可比性,样本均取自非阴影区。

由图 3 可见,色调 H 几乎不响应树种变化。当摒弃 H ,直接使用 S 、 I 作为特征分量时,不同树种之间仍然穿插频繁,分割阈值不易确定。但当使用二者的相对差 D_{SI} 作为特征分量时,分割阈值的稳定性大为提高。多数情况下,水杉与另外两个树种之间存在确定的分割阈值。该例表明优良的描述符可以降低分割阈值的不适定性。

表 1 遥感图像树种识别特征新数学描述符

Table 1 The new mathematical Descriptors of identifying plant species with remotely sensed image

符号 Sign	名称 Name	含义 Meaning	有效性 Validity
		波谱特征	
A_R	红波段相对亮度	$A_R = (R - R_{平均}) / R_{平均}$ ($R_{平均}$ 为红波段亮度 R 在滑动窗口区的均值,以下 $G_{平均}$ 和 $B_{平均}$ 类推)	*
A_G	绿波段相对亮度	$A_G = (G - G_{平均}) / G_{平均}$	**
A_B	蓝波段相对亮度	$A_B = (B - B_{平均}) / B_{平均}$	**
B_NDVI	单色相对植被指数	$B_NDVI = (B / IR - NDVI) / NDVI$	***
$NDUI$	归一化阴影指数	$NDUI = (S - I) / (S + I)$ (主要用于分割亮区和阴影区植被)	**
D_{SI}	饱和度明度相对差	$D_{SI} = (S - I) / S$ (S, I 分别为窗口平均饱和度和明度)	***
C_d	欠提取像素补偿集点密度	$C_d = SUM(D_{si}) / A_i$ (D_{si} 为第 i 个单元欠提取像素补偿集的点密度, D_{si} 的算法另文讨论, A_i 为第 i 个单元植被覆盖面积)	***
		纹理特征	
T	相对边缘点数	$T = S_{edge} / A_{NDVI}$ (S_{edge} 为滑动窗口区边缘点数, A_{NDVI} 是窗口区以 $NDVI > 0.18$ 提取的树冠覆盖面积)	***
QF	相对起伏度	$QF = A_{holes} / A_{NDVI}$ (A_{holes} 是滑动窗口区树冠表面小凹陷面积)	**
L_d	相对亮细节密度	$L_d = S_{light} / A_{NDVI}$ (S_{light} 是窗口区亮细节数)	**
D_d	相对暗细节密度	$D_d = S_{dark} / A_{NDVI}$ (S_{dark} 是窗口区暗细节数)	***
		形状特征	
S_K	相对骨架密度	$S_K = L_S / D$ (L_S 、 D 分别为树冠图斑的骨架长度和外轮廓直径, S_K 越大表示树冠轮廓越复杂)	***
C_V	边界起伏幅度	$C_V = A_{con} / A$ (A_{con} 为树冠图斑凸包的面积, A 为图斑面积; C_V 越大边界凹凸起伏幅度越大)	**
R_a	加权平均冠径	取当前单元内图斑的短轴相对于图斑面积的加权平均值	***

注: * 表偶尔有效, ** 表有效, *** 表有显著

3.1.2 纹理特征描述符

纹理特征是树种识别最有用的特征之一。尽管难以建立适合多数树种的纹理描述符,纹理分割的难度也很大;但由于纹理特征几乎不受遥感图像的类型和获取环境条件变化的影响,使得它的重要性在许多方面胜

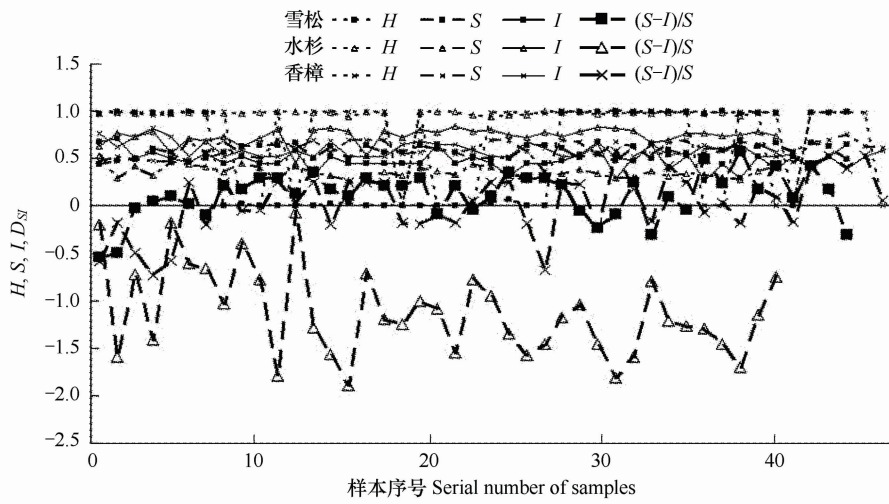


图3 H, S, I 和 D_{SI} 对几个树种的可分辨性比较

Fig.3 A comparison of the capabilities of identifying three plant species by H, S, I and D_{SI}

过波谱特征。本文在灰度共生矩阵统计量和小波分析等传统纹理特征描述符的基础上,针对树种识别的特点,又提出了相对边缘点数、相对起伏度、相对亮/暗细节密度等表征树冠表面粗糙程度的数学描述符。

下面仅以相对暗细节为例讨论之。树冠表面的微小起伏会形成细小阴影或暗细节,可以用这种暗细节的密度和平均长度等表征树冠表面粗糙度。暗细节提取利用了灰度形态滤波的概念,它通过灰度闭合和开启操作,来提取尺寸比结构元素小的暗细节,实验证明该指标能较好表征树冠的表面粗糙度。图4显示以相对暗细节作为输入特征分量之一进行综合聚类的实例。图4(a)显示暗细节分布,可见广玉兰(阔叶特征)、香樟(多头特征)具有较高的暗细节密度;而水杉(光滑外观)暗细节密度很低。

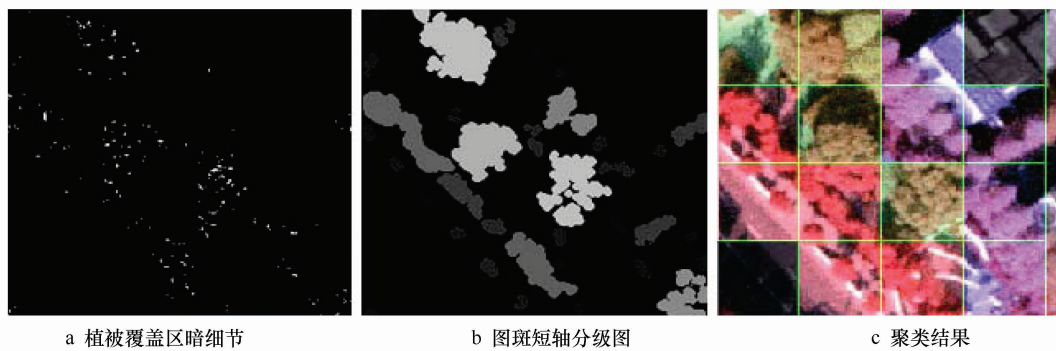


图4 四描述符组合聚类的实例

Fig.4 An instance of clustering with a combination of four descriptors

3.1.3 形状特征描述符

形状描述符对于某些树种的识别比较有效,它也是分割阈值几乎不受遥感图像类型和获取环境条件变化影响的稳定描述符。

对于冠顶亮图斑或本影暗图斑的形态,可以用基于区域或基于边界的一些形状描述符表征。如图斑面积、图斑重心、长宽比、外接矩形、长轴方向角等,是区域形状描述符的例子;又如图斑周长、角点坐标、凸包节点坐标等是边界形状描述符的例子;此外还有二者结合的形状描述符,如形状系数(通常为图斑面积与同周长正方形或圆形面积之比)等。本文根据树种识别的特点,还补充了相对骨架密度、边界起伏幅度、加权平均冠径等表征树冠投影轮廓复杂程度和树冠相对大小等新描述符。

在图4所示的聚类实例中,以加权平均冠径作为输入特征分量之一,该值通过计算图斑短轴的窗口加权

平均值给出,图 4b 以不同灰度显示图斑短轴的分级情况,以此表征冠径大小;较亮的图斑表示冠径较大,反之较小。可见在同一区域的比例尺图像中,树冠的相对大小也可以作为区分不同树种的标识。

为了检验本文数学描述符的分类精度,这里以城镇绿地树种识别为例,采用一景彩红外航空像片(图 5a),以本文数学描述符组合为特征输入矢量,组合方案与图 4 的例子相同;对照组是常规的分色亮度组合。分类模型均采用决策树。图 5b、c 比较了这两种组合方案的分类效果,因为分类图较大,为了清晰显示类别标记,图 5b、c 只取了分类结果图左上角的局部。该例先将数据空间分为有限个单元,单元总数为 $18 \times 19 (= 342)$ 个,其中植被覆盖 $\geq 10\%$ 的单元有 139 个。表 2 对照了这两种组合的分类精度。其中误分单元个数由目视判读统计,误分率指误分单元个数在有植被覆盖的 139 个单元中的占比。复合树种单元(指单个单元中包含两个或以上树种,并不分主次)的个数为 11(占 7.9%),因为更多树种以及它们之间混合的识别方法尚在研究中,本试验均将复合树种单元计入待定,并未计入误分。

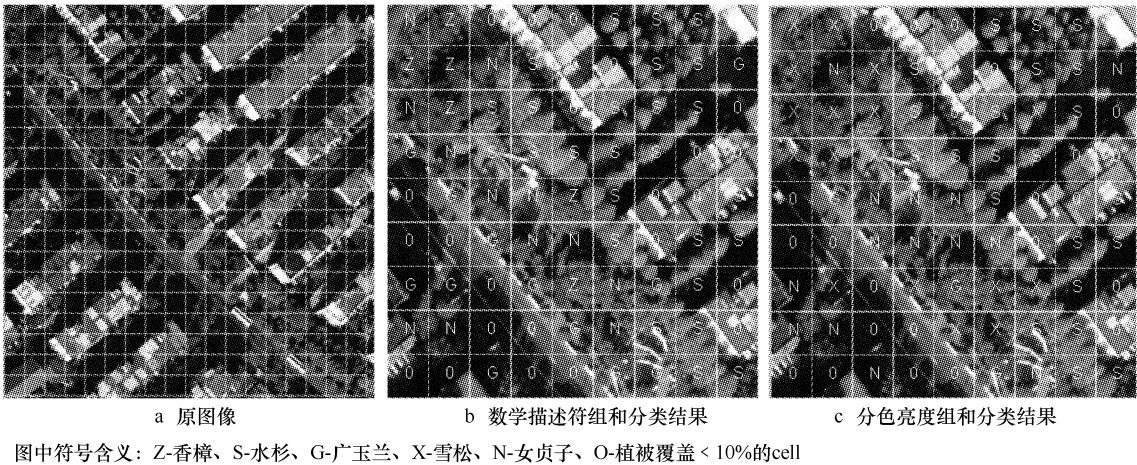


图 5 树种辨识精度比较

Fig. 5 A comparison of the identification accuracy with two different property combinations

由表 2 可见,使用本文的数学描述符组合比常规分色亮度组合误分率下降了 77%,即在描述符构成的特征空间里,分类的不确定性大大降低。关于这一点,一个合理的解释是:由于在描述符设计中融入了人类专家的知识,而形成对低层分割的约束;同时还丰富了数据粒度层次,即在单一像素粒度的基础上,增加了空间对象粒度。而在空间对象粒度层,有助于利用图斑面积、形状系数等对象整体特征。

表 2 树种辨识精度比较

Table 2 A comparison of identification accuracy

输入矢量 The input vector	数学描述符组合 With the combination of <i>NDVI</i> , <i>D_d</i> , <i>R_a</i> , and <i>C_d</i>	分色亮度组合 With the combination of spectrographic brightness
误分单元个数 the number of incorrectly identified cells	8	36
误分率 Error rate/%	5.8	25.9

结合数学描述符的设计和测试,本文还进行了分类模型的筛选和测试。图 4 显示多特征模糊聚类测试的结果,图 5 显示决策树分类结果。测试结果表明,特定分类模型只对特定树种具有优秀的分类能力;由此提示必须考虑多分类模型综合,以投票法等决策方法来设计综合分类器也许是较好的解决方案。

通过对这些描述符的测试和评价,已经实现了城镇绿地 12 个树种的自动识别,随着研究的深入,有望进一步改善这些描述符的性能;并通过同步设计和改进分类模型,来实现更多树种的识别;近期目标是实现占植株总数 90% 以上的城镇骨干绿化树种的识别,即识别的树种将接近 30 种。

3.2 冠径提取

植物冠径是一个可以从遥感图像上提取的客观量。冠径信息不仅可以用于计算冠径年差,也可以用于模

拟计算冠高,以及与覆盖面积结合求取植株数等,还可以分树种建立冠径-AVB 关系,就像根据冠径模拟计算绿量一样^[34-35]。

为了实现冠径的自动提取,本文研究小组曾试验以边界与所围图形面积的关系来描述冠径,并通过回归分析,确定树冠周长面积比 x 与冠径 y 之间具有对数相关性:

$$y = -4.4878\ln(x) + 0.1563 \quad (3)$$

该方程的 R^2 为 0.8293,是相应样本数在 99% 置信度下限值的 4.86 倍(限值为 0.1706)^[36]。它从一个角度证明了周长面积比与冠径具有很好的相关性,以这种方法提取冠径,从理论上说非常合理。并通过试验证实以该法自动测算冠径的平均中误差仅为 0.439m^[33]。

近期又对郁闭度较高的绿地植被进行了冠径自动提取试验,并对阴影区植被进行了树冠分离和提取试验(参见 3.3)。

对于郁闭度较高的植被,冠径提取的基本方法是:通过波谱和纹理特征组合的模糊聚类,初步划分树冠图斑;通过数学形态学处理,减少和消除图斑粘连;通过树冠或其本影图斑的短轴长获得冠径。对于阴影区植被,采用我们提出的归一化阴影指数($NDUI$),基本可以准确分离阴影区的乔木植株。这些试验初步认定当遥感图像的空间分辨优于 1m,植被并未达到郁闭度饱和,冠径自动提取是可行的,图 4b 显示了树冠分离和冠径计算的实例,图 6c 显示经过阴影区亮度补偿,可以显著增加阴影区树冠的可提取性。随着树种分类器研究的深入,冠径提取算法也将随之调整,冠径自动提取的精度有望进一步改善。

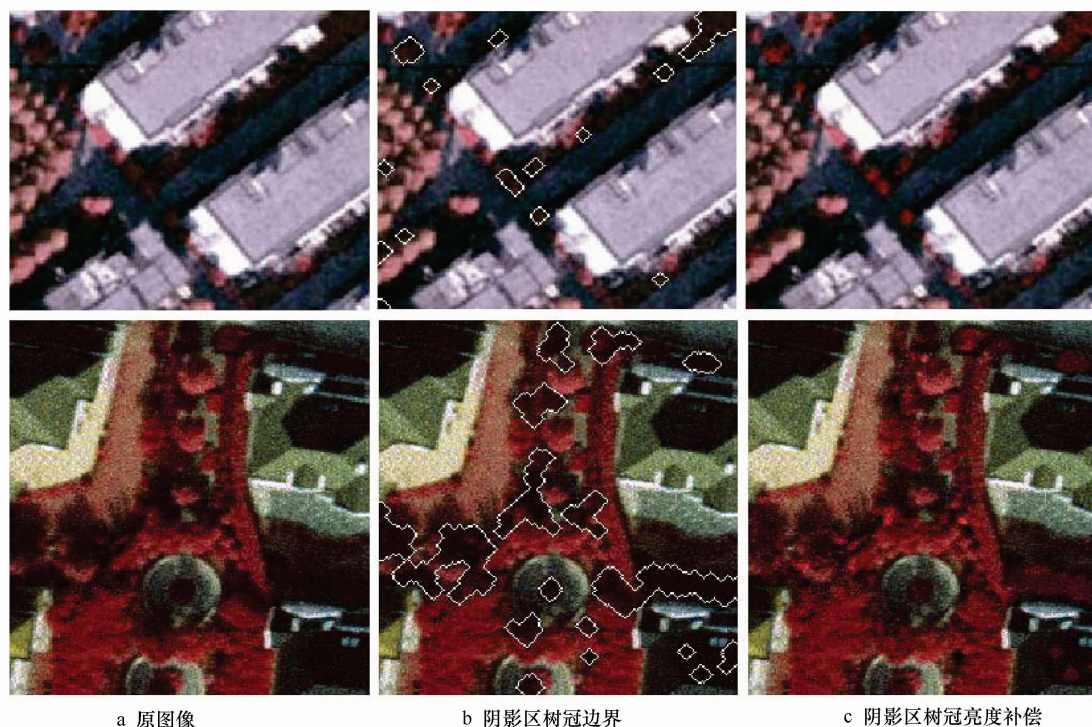


图 6 阴影区植被提取和亮度补偿实例

Fig. 6 A instance of extracting plants at darken area and repairing their brightness

对于郁闭度较高的乔木林,随着树冠不断挤紧,郁闭度达到饱和状态,此时树冠本影能够较好表达树冠的交叉程度。随着树冠越挤越紧,树冠本影逐渐消失,植株不可分,整个树林的顶部变成一个起伏逐渐减小的近似平顶。对于这种情况,可以采用郁闭度饱和的特殊 AVB 和 ANPP 计算方法。描述树冠交叉程度的参数是“郁闭饱和度”,它可以用树冠本影面积与覆盖面积之比来表征;该比值足够小,表明树冠本影消失,郁闭度达到饱和状态。对于这种郁闭度饱和或其它冠径自动提取有困难的绿地,考虑以激光雷达(Lidar)数据计算树

拟计算冠高,以及与覆盖面积结合求取植株数等,还可以分树种建立冠径-AVB 关系,就像根据冠径模拟计算绿量一样^[34-35]。

为了实现冠径的自动提取,本文研究小组曾试验以边界与所围图形面积的关系来描述冠径,并通过回归分析,确定树冠周长面积比 x 与冠径 y 之间具有对数相关性:

$$y = -4.4878\ln(x) + 0.1563 \quad (3)$$

该方程的 R^2 为 0.8293,是相应样本数在 99% 置信度下限值的 4.86 倍(限值为 0.1706)^[36]。它从一个角度证明了周长面积比与冠径具有很好的相关性,以这种方法提取冠径,从理论上说非常合理。并通过试验证实以该法自动测算冠径的平均中误差仅为 0.439m^[33]。

近期又对郁闭度较高的绿地植被进行了冠径自动提取试验,并对阴影区植被进行了树冠分离和提取试验(参见 3.3)。

对于郁闭度较高的植被,冠径提取的基本方法是:通过波谱和纹理特征组合的模糊聚类,初步划分树冠图斑;通过数学形态学处理,减少和消除图斑粘连;通过树冠或其本影图斑的短轴长获得冠径。对于阴影区植被,采用我们提出的归一化阴影指数($NDUI$),基本可以准确分离阴影区的乔木植株。这些试验初步认定当遥感图像的空间分辨优于 1m,植被并未达到郁闭度饱和,冠径自动提取是可行的,图 4b 显示了树冠分离和冠径计算的实例,图 6c 显示经过阴影区亮度补偿,可以显著增加阴影区树冠的可提取性。随着树种分类器研究的深入,冠径提取算法也将随之调整,冠径自动提取的精度有望进一步改善。

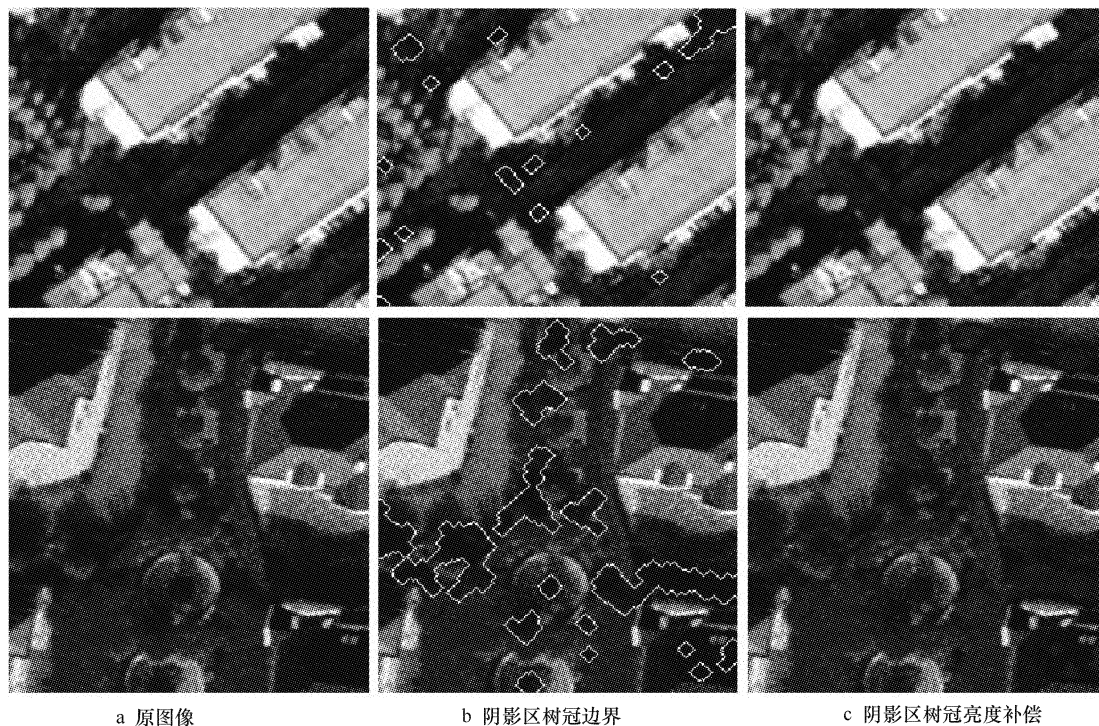


图 6 阴影区植被提取和亮度补偿实例

Fig. 6 A instance of extracting plants at darken area and repairing their brightness

对于郁闭度较高的乔木林,随着树冠不断挤紧,郁闭度达到饱和状态,此时树冠本影能够较好表达树冠的交叉程度。随着树冠越挤越紧,树冠本影逐渐消失,植株不可分,整个树林的顶部变成一个起伏逐渐减小的近似平顶。对于这种情况,可以采用郁闭度饱和的特殊 AVB 和 ANPP 计算方法。描述树冠交叉程度的参数是“郁闭饱和度”,它可以用树冠本影面积与覆盖面积之比来表征;该比值足够小,表明树冠本影消失,郁闭度达到饱和状态。对于这种郁闭度饱和或其它冠径自动提取有困难的绿地,考虑以激光雷达(Lidar)数据计算树

高,并结合树种数据计算 AVB,以部分取代冠径自动提取。

3.3 阴影区树冠分离和提取

在建筑林立的城镇建成区,其绿化地通常有约 20% 的植物处于阴影区,为了实现城镇绿地植被碳捕获模型的全遥感驱动,必须解决的基础性难题之一是分离与提取阴影区植物。为此,本文提出了归一化阴影指数 *NDUI* (normalized difference umbra index) 的概念。

$$NDUI = (S - I) / (S + I) \quad (4)$$

其中 *S* 和 *I* 分别为 *HSI* 彩色系统中的饱和度和明度分量。

当采用归一化植被指数 *NDVI* 确定植被范围后,可以通过 *NDUI* 进一步分离和提取阴影区植物。为了改善识别效果,还可以在此基础上对阴影区植被进行亮度修复。

使用 *NDUI* 可以准确分离和提取阴影区植被,是因为 *NDUI* 对于阴影区树冠覆盖范围具有稳定的阈值。这主要得益于饱和度 *S* 在暗区并不显著下降,而使阴影区植被 *S - I* 的值通常高于非阴影区;加上 *NDUI* 使用系数 $1/(S + I)$ 对 *S - I* 做了非线性拉伸,所以 *NDUI* 对遥感图像的类型和获取环境条件的变化具有很好的稳定性。

在本文的试验中,阴影区植被亮度修复在前述阴影区植被提取的基础上进行,亮度修复值的计算采用一种称为 CLAHE (contrast-limited adaptive histogram equalization)^[37] 的直方图均衡化算法。CLAHE 采用一定尺寸的滑动窗口对每个像素进行局部直方图均衡化,由此避免由于阴影区植被像素在全图像总像素中的占比较少,而受到压抑。

在对整个植被覆盖区域做 CLAHE 后,以其结果替换阴影区内的相应像素。图 5 是两组阴影区植被亮度修复的例子,由图可见,修复运算使阴影区植被获得了比较自然和接近非阴影区植被的色彩。

3.4 植物表观特征与绿量和树龄的相关性

因为在遥感图像上无法直接获得乔木胸径,所以在本文植被固碳模型的技术框架中,以冠径表征乔木的生长阶段或间接表征树龄。这部分试验是样本木地上生物量与冠径相关分析的第一步,主要分析样本木部分表观特征之间的相关性,以期给出更合理的采样分析方案,减少样本砍伐量。

该期试验以上海周边苗圃的香樟苗木为实验对象(分为一次移栽和截顶香樟苗木两种),获得径级、胸径、树高、冠径等表观特征(表 3,4),并将冠径 *C* 与胸径 *D*、绿量 *V* 和树龄 *Y* 分别做了相关性分析,给出 *C-D* (图 7a)、*C-V* (图 7b) 和 *C-Y* 关系(图 7c)。

由于上述相关分析仅出自一种植物的少数样本数据,故以下结论仅仅是初步的:*C-D* 关系的高度相关性,提示以冠径 *C* 取代胸径 *D*,作为地上生物量测算的参数是可行的。*C-V* 关系的高度相关性,提示当树种确定时,以树种信息和冠径 *C* 替代绿量 *V* 参与测算地上生物量是可行的。*C-Y* 关系的高度相关性,提示以冠径 *C* 间接表征树龄 *Y* 是可行的。

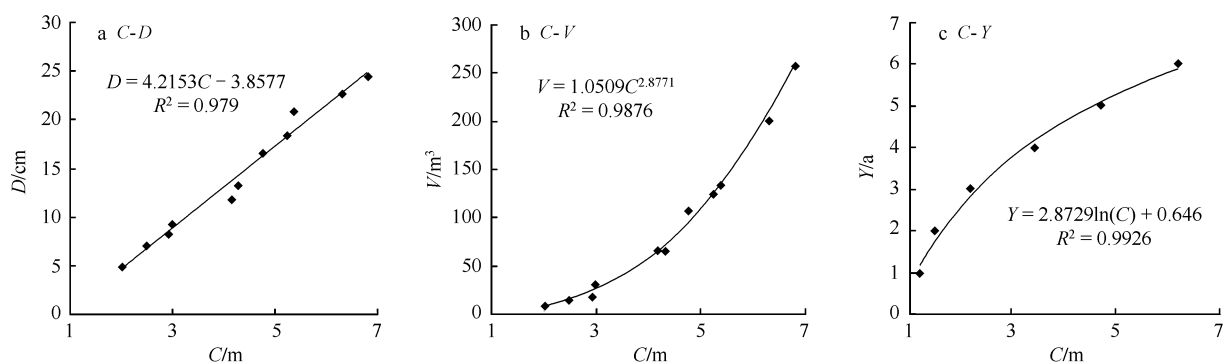


图7 冠径 *C* 与胸径 *D*、绿量 *V*、树龄 *Y* 的相关性

Fig. 7 Relation curves of *C-D*, *C-V* and *C-Y*

表 3 一次移栽香樟苗木各级标准木表现特征

Table 3 Apparent features of camphor standard wood at all levels whose seedling was transplanted once

径级 Grade of diameter	胸径 D/cm Diameter at breast height	树高 H/m Height	冠径 C/m Crown diameter,	绿量 V/m^3 * Green volume
3—5	4.9	4	2	8.377573
>5—7	7	4.5	2.5	14.7262
>7—9	8.28	3.7	2.93	16.63165
>9—11	9.24	6.1	3	28.74555
>11—13	11.78	7.3	4.19	67.10412
>13—15	13.38	7	4.28	67.14039
>15—17	16.56	9.1	4.78	108.8668
>17—19	18.4	8.6	5.27	125.0599
>19—21	20.7	8.9	5.35	133.3816
>21—23	22.61	9.6	6.3	199.5035
>23—25	24.52	10.6	6.8	256.6386

*: $V = \pi \cdot C^2 \cdot H/6$, 即按椭球体积计算

3.5 单株测算的必要性

从测算精度上看,植被碳收支评估可以分为生态群系和单株两个层面。尽管大多数模型在建模时模拟的是单植株的碳收支行为;但迄今为止的碳收支评估都是面向生态群系的。即先将生态系统分类和分别建立各自的碳收支模型,然后用它们在更大区域模拟碳收支过程或评估碳收支水平。这类研究所用生态/地理特征参数的样元尺寸一般为 $10\text{km} \times 10\text{km}^{[4]}$ 、少数为 $1\text{km} \times 1\text{km}^{[6]}$,显然城镇生态系统不可能在这样的尺度保持均质。为了适应城镇生态系统的高度

非均质性,本文的模型以具体树种单株测算植物固碳性能,以 $25\text{m} \times 25\text{m}$ 样元测算影响植物生产力的主要环境压力和管养模式数据,并着重研究在单株和小尺度样元层面如何自动提取模型的遥感驱动参数。

此外,单株测算也可以较好解决植被生物量遥感探测方法中的生物量饱和问题。近 10a 以雷达/激光雷达探测植物垂直结构的研究取得了很大进展,目前存在的主要问题是这种探测受限于生物量饱和。以雷达/激光雷达数据估算地上生物量的方法只适用于种植密度较低(植株数 $< 300/\text{hm}^2$)、低生物量水平($< 60\text{t}/\text{hm}^2$)的森林^[28,38-39]。

而采用本文的分树种单株生物量模拟测算方法,只要解决植株分离和树种识别的难点,就可以准确测算地上干生物量,而与生物量是否达到上述饱和上界无关。基于单株的精确测量被国际上认为是近 10a 来遥感植被测量的重大进展^[30],多数研究认为,细分到单株有助于提高植物分类的精度^[29]。

本文较宏观地讨论城镇绿地植被固碳量遥感测算模型技术框架的设计。需要说明的是,由于框架涉及面较宽,限于篇幅,只能尽量全面但相对简洁地介绍一些关键技术的可行性试验情况,论及部分的技术细节和一些未论及部分已经或正准备另文讨论。

4 结论

从文献检索情况来看,植被碳收支遥感研究可以清晰地分为两个层面,第一层估算植被地面生物量(AVB),第二层估算地面植被第一生产力(NPP)。本文的技术框架研究城镇地区这两个层面量值的测算技术,形成以遥感参数驱动的 AVB 和 ANPP 自动测算模型。

本文的技术框架以分树种单株测算取代现有碳收支模型中普遍使用的基于生态群系的评估,来适应城镇

表 4 截顶香樟各栽培年龄标准木表现特征

Table 4 Apparent features of head-cut camphor wood at all transplanting ages

年份 Years	胸径 D/cm Diameter at breast height	树高 H/m Height	冠径 C/m Crown diameter
1	5	3	1.2
2	8.44	3.4	1.5
3	9.87	4.6	2.17
4	12.1	6.7	3.4
5	14.33	6.6	4.71
5 +	16.2	7.2	6.2

绿地树种、分布、结构等的高异质性;以 $25\text{m} \times 25\text{m}$ 尺度提取影响 ANPP 的主要环境压力和管养模式因子,来适应这些因子空间分布的高异质性;最终给出城镇绿地固碳性能精确快速和时空连续定量的合理解决方案。不仅如此,该技术框架中的所有模型参数只在建模阶段需要野外采集,在应用和外延阶段,模型使用的所有驱动参数(包括植物种类、分布、结构、管养模式及主要环境压力因子等)均可以由计算机自动提取。

该技术框架对于多层面评价城镇绿地植被的碳储量分布、碳汇水平,以及由此产生的对城镇地区碳循环和生态承载力等的定量影响具有重要意义;并为绿化需求总量、绿地布局、层次结构和植物材料等的决策提供理论和技术支持。

致谢: 表 3 和表 4 数据由上海植物园孟超、秦俊提供,特此致谢。

References:

- [1] Svirejeva-Hopkins A, Schellnhuber H J, Pomaz V L. Urbanised territories as a specific component of the global carbon cycle. *Ecological Modeling*, 2004, 173:295-312.
- [2] Zhao M, Zhang W G, Yu L Z. Analysis of carbon emissions from energy consumption in Shanghai. *Environmental Sciences*, 2009, 22(8):984-989.
- [3] S B, Idso C D, Balling Jr R C. Seasonal and diurnal variations of near-surface atmospheric CO_2 concentration within a residential sector of the urban CO_2 dome in Phoenix, Arizona, USA. *Atmospheric Environment*, 2002, 36:1655-1660.
- [4] Huang Y, Zhou G S, Wu J S, Yan X D. The models of carbon income and expenses of the terrene ecological system in China. Beijing: Science Press, 2008.
- [5] Wang M Y, Zhao T H, Zhang W W, Guo D, He X Y, Fu S L. The effect of increasing CO_2 concentration to the photosynthesis of two species of urban vegetation in Shenyang of China. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 24(4): 470-476.
- [6] Buyantuyev A, Wu J. Urbanization alters spatiotemporal patterns of ecosystem primary production: A case study of the Phoenix metropolitan region, USA. *Journal of Arid Environment*, 2009, xxx: 1-9.
- [7] Thomas Hilker, Nicholas C Coops, Michael A, Wulder T Andrew Black, Robert D Guy. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements. *Science of the Total Environment*, 2008, 404:411-423.
- [8] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 2004, 54(6):547-60.
- [9] Fabio Maselli, Dario Papale, Nicola Puletti, Gherardo Chirici, Piermaria Corona. Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113:657-667.
- [10] Heinsch F A, Reeves M, Votava P. User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm. Website, accessed April 07 (2002). Available at: <http://www.ntsg.umd.edu/modis/MOD17UsersGuide.pdf>.
- [11] David P Turner, William D Ritts, Warren B Cohen, Stith T Gower, Maosheng Zhao, Steve W Running, Steven C Wofsy, Shawn Urbanski, Allison Dunn L, Munger J W. Scaling gross primary production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of MODIS GPP product validation. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(3):256-270.
- [12] Heinsch F A, Zhao M S, Running S W. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(7):1908-1925.
- [13] Li X W, Strahler A H. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, 23(5):705-721.
- [14] Myneni R B, Williams D L. On the relationship between fAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3):200-211.
- [15] Goward S N, Huemmrich K F. Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index-an assessment using the sail model. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 39(2):119-140.
- [16] Huemmrich K F, Goward S N. Vegetation canopy PAR absorptance and NDVI: an assessment for ten tree species with the sail model. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61(2):254-269.
- [17] Gobron N, Pinty B, Verstraete M M. Theoretical limits to the estimation of the leaf area index on the basis of visible and near-infrared remote sensing data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(6):1438-1445.
- [18] Baret F, Houles V, Guerif M. Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: the case of nitrogen management. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(4):869-880.
- [19] Zhang H, Wang X R, Wang S B. A Study on stomatal traits of platanus acerifolia under Urban Stress. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2004, 43(4):651-656.
- [20] Milesi C, Elvidge C D, Nemani R R, Running S W. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86:401-410.

- [21] Westlake D F. The biomass and productivity of glyceria maxima I. Seasonal changes in biomass. *Journal of Ecology*, 1966, 54:745-753.
- [22] Achard F, Eva H D, Stibig H J, Mayaux H J, Gallego P, Richards J, T Malingreau J P. Determination of deforestation rates of the world's human tropical forests. *Science*, 2002, 297:999-1002.
- [23] Cairns M A, Brown S, Helmer E H. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 1997, 111:1-11.
- [24] Mokany K, Raison J R, Prokushkin A S. Critical analysis of root-shoot rations in terrestrial biomes. *Global Change Biolog*, 2006, 12:84-96.
- [25] Harmon M E & Sexton J. Guidelines for measurements of woody detritus in forest ecosystems. US LTER Publication No.20 (1996) US LTER Network Office, University of Washington, Seattle, WA.
- [26] Delaney M, Brown S, Lugo A E. The quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in six life zones of Venezuela. *Biotropica*, 1998, 30:2-11.
- [27] Liu C F, Zhao S, Li L, Li X M, He X Y, Chen W. Difference analysis of carbon fixation and pollution removal of urban forest in Shenyang. *Journal of Northwest Forestry University*, 2008, 23(4):56-61.
- [28] João R Santos, Corina C Freitas, Luciana S Araujo, Luciano V Dutra, José C Mura, Fábio F Cama, Luciana S Soler, Sidnei J S Sant'Anna. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87: 482-493.
- [29] Donald G Leckie, François A Gougeon, Nicholas Walsworth, Dennis Paradine. Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85:355-369.
- [30] Tomas Brandtberg, Timothy A Warner, Rick E Landenberger, James B McGraw. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85: 290-303.
- [31] Jinkai Zhang, Benoit Rivard, Arturo Sánchez-Azofeifa, Karen Castro-Esau. Intra- and inter-class spectral variability of tropical tree species at La Selva, Costa Rica: Implications for species identification using HYDICE imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105:129-141.
- [32] Maltamo M, Packalén P, Yu X, Eerikäinen K, Hyyppä J, Pitkänen J. Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forests using laser scanner data. *Forest Ecology and Management*, 2005, 216(1/3):41-50.
- [33] Zhou Y F, Zhou J H. Study on fast method to detect and calculate living vegetation volume. *Journal of Ecology*, 2006, 26(12):4204-4211.
- [34] Zhou J H, Sun T Z. Measuring model of three-dimensional green biomass through remote sensing and estimating method of environmental benefits of urban vegetation]. *Journal of Remote Sensing*, 1995, 10(3):162-174.
- [35] Zhou J H. Theory and practice on database of three-dimensional vegetable quantity. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(1):14-23.
- [36] The editing board of mathematics handbook. *Mathematics Handbook*. Beijing: People Education Publishing Company, 1979:837-838.
- [37] Antonis P Stefanoyiannis, Lena Costaridou, Spyros Skiadopoulos. A digital equalization technique improving visualization of dense mammary gland and breast periphery in mammography. *European Journal of Radiology*, 2003, 45: 139-149.
- [38] Holly K Gibbs, Sandra Brown, John O Niles, Jonathan A Foley. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environment Research Letters*, 2007, 2 045023 (13pp).
- [39] Daniel A Zimble, David L Evans, George C Carlson, Robert C Parker, Stephen C Grado, Patrick D Gerard. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne Lidar. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87:171-182.

参考文献:

- [2] 赵敏, 张卫国, 俞立中. 上海市能源消费碳排放分析. *环境科学研究*, 2009, 22(8):984-989.
- [4] 黄耀, 周广胜, 吴金水, 延晓东. 中国陆地生态系统碳收支模型. 北京: 科学出版社, 2008.
- [5] 王美玉, 赵天宏, 张巍巍, 郭丹, 何兴元, 付士磊. CO₂ 浓度升高对两种沈阳城市森林树种光合特性的影响. *植物学通报*, 2007, 24(4): 470-476.
- [19] 张浩, 王祥荣, 王寿兵. 城市胁迫环境下的二球悬铃木叶片气孔数量特征分析. *复旦学报(自然科学版)*, 2004, 43(4): 651-656.
- [27] 刘常富, 赵爽, 李玲, 李小马, 何兴元, 陈玮. 沈阳城市森林固碳和污染物净化效益差异初探. *西北林学院学报*, 2008, 23(4): 56-61.
- [33] 周一凡, 周坚华. 绿量快速测算模式研究. *生态学报*, 2006, 26(12):4204-4211.
- [34] 周坚华, 孙天纵. 三维绿色生物量的遥感模式研究与绿化环境效益估算. *遥感学报*, 1995, 10(3):162-174.
- [35] 周坚华. 城镇绿量测算模式及信息系统. *地理学报*, 2001, 56(1):14-23.
- [36] 数学手册编写组. *数学手册*. 北京: 人民教育出版社, 1979: 837-838.