

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201405032

修珍珍, 王斌, 杨校生, 等. 基于 InVEST 模型估算富阳市森林生态系统碳储量 [J]. 广西植物, 2016, 36(7):868-874

XIU ZZ, WANG B, YANG XS, et al. Estimating the carbon storage of Fuyang forest ecosystems based on InVEST model [J]. Guihaia, 2016, 36(7): 868-874

基于 InVEST 模型估算富阳市森林生态系统碳储量

修珍珍, 王斌*, 杨校生, 余超, 张龙, 格日乐图

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400)

摘要: 基于森林资源遥感影像数据资料和 ArcGIS10.0 软件, 以属于典型亚热带气候的富阳市为案例, 运用 InVEST-Carbon 模型对其森林生态系统碳储量进行估算, 可视化定量富阳市森林生态系统碳储量并明确其空间分布规律。结果表明: 富阳市森林生态系统碳储量分布具有明显的区域差异性, 由东向西呈现高-低-高-低的分布带规律。富阳市森林生态系统总的碳储量为 26.7437×10^6 t, 其价值量为 39.9042 亿元; 得出富阳市各类森林类型平均碳密度的高低分布为常绿阔叶林碳密度 > 针阔混交林碳密度 > 竹林碳密度 > 马尾松林碳密度 > 杉木林碳密度, 这与浙江省生态公益林各主要林型的碳密度分布规律基本一致, 得到其森林生态系统总的碳密度约为 $180.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 高于浙江省生态公益林平均碳密度和全国森林平均碳密度。与基于森林二类清查资料, 由生物量与蓄积量的关系式估算出的碳储量 (28.3780×10^6 t) 相差不大, InVEST 模型可适用于森林生态系统碳储量的总体估算。通过研究可以得出, InVEST 模型评估结果简明直观, 导入较少的数据, 将量化的森林碳储量以地图的形式表现出来。InVEST 模型还可用于对未来或多种模拟场景情况下的预测估算等, 可为政府、非盈利组织和公司企业等自然资源的管理提供决策信息, 其多功能和模块化的设计为权衡评估得失提供了有效的工具。

关键词: 碳储量, 碳密度, 森林生态系统, 富阳市

中图分类号: Q948, S718.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2016)07-0868-07

Estimating the carbon storage of Fuyang forest ecosystems based on InVEST model

XIU Zhen-Zhen, WANG Bin*, YANG Xiao-Sheng, YU Chao, ZHANG Long, GERI Le-Tu

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, China)

Abstract: The forest ecosystem carbon storage was visually quantified, and its spatial distribution was identified, based on remote sensing images data on forest resources and ArcGIS 10.0 software, Fuyang City as a case that belongs to the typical subtropical climate, making use of InVEST-Carbon models to estimate carbon stocks of the Fuyang forest ecosystems. The results showed that there were obvious regional differences about the distribution of carbon storage in Fuyang forest ecosystems from east to west which showed high-low-high-low distribution. The total carbon storage of Fuyang forest ecosystems was 26.7437 million t. And it valued 3 990.421 million yuan. The average carbon density distribution of various kinds of forest type was: evergreen broad-leaved forests > coniferous and broad-leaved mixed

收稿日期: 2014-05-14 修回日期: 2015-03-25

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAC13B02-2); 中国林业科学研究院亚热带林业研究所基本科研业务费重点项目(RISF6152) [Supported by the National Key Technology R & D program during “the 12th Five-year Period”(2012BAC13B02-2); Fundamental Research Fund of Research Institute of Subtropical Forestry of Chinese Academy of Forestry (RISF6152)]。

作者简介: 修珍珍(1987-), 女, 山东莱阳人, 硕士研究生, 主要从事森林生态服务功能评估方面的研究, (E-mail) xzzzu@163.com。

*通讯作者: 王斌, 博士, 副研究员, 主要从事生态经济评价等方面的研究, (E-mail) ylwangbin@sina.com。

forests > bamboo forest > masson pine forests > fir forests. It was roughly identical to the carbon density distribution in the major types of the Ecological Public Welfare Forest in Zhejiang Province. And we found that its total forest carbon density was about $180.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. It exceeded the Ecological Public Welfare Forest in Zhejiang Province and all over the country in carbon density. The calculated carbon density was not so far from that computed by the relation between the biomass and volume based on forest inventory data that was 28.3780 million t. The InVEST-Carbon model could be applied to the estimation of the overall forest ecosystem carbon storage. By the research it implied that the evaluation results of the InVEST model were clear and intuitive. The quantitative forest carbon was shown in form of a map by importing less data. The InVEST model could be used to the prediction of the future or multiple simulations, etc. It provides the decision-making information of the natural resources management for the government, non-profit organizations and companies. It can be an effective tool for gain and loss of balance assessment with the multifunction and modularized designation.

Key words: carbon storage, carbon density, forest ecosystems, Fuyang City

目前气候变暖已严重威胁到人类的生存和发展(王兵等, 2011)。大量的研究表明: 森林破坏已成为继化石燃料燃烧之后, 大气中 CO_2 浓度增加的第二大来源(Schimel et al, 2001)。森林生态系统作为最大的陆地生态系统(李少宁等, 2004), 其面积占全球非冰表面的 40%, 其生物量约占陆地生物量的 90%, 它贮存了陆地生态系统 76%~98% 的有机碳(林清山等, 2009), 其土壤碳储量约占全球土壤碳储量的 73%(刘华等, 2005; 徐新良等, 2007), 其碳汇功能对碳收支平衡起着不可替代的作用(Woodbury et al, 2007, 2008; 杨芝歌等, 2012)。

基于森林资源清查资料的森林碳储量估算主要是在景观、区域甚至全球的尺度上, 常常通过测定森林植被的生物量乘以生物量中碳元素的含量(0.45~0.55)推算而得(方精云等, 2006; 邓蕾等, 2011)。近年来, 出现了基于 RS 信息数据和 GIS 软件对森林植被碳储量进行绘制和分析(黄从德等, 2009)的研究, 这不仅能量化, 而且还能以制图的形式空间可视化, 但这方面的研究并不很多。InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 模型正是基于 ArcGIS 软件平台由斯坦福大学、大自然保护协会、世界自然基金会等其他机构共同开发出来, 目的是寻求最优的经济发展模式和自然资源管理, 可用以评估生态服务功能等(白杨等, 2013)。本研究以富阳市为案例, 详细介绍如何运用 InVEST 模型估算森林生态系统的碳储量, 旨在实现可视化定量富阳市森林生态系统碳储量并明确其空间分布规律, 为实现该地区及亚热带森林资源的保护和经营管理等提供参考依据, 并为类似研究提供一种有效的评估、量化和制图的模型方法。

1 研究区概况

1.1 自然条件

研究区富阳市位于浙江省西北部, 地理位置为 $29^{\circ}44' \sim 30^{\circ}12' \text{ N}$, $119^{\circ}25' \sim 120^{\circ}09' \text{ E}$ 。为朝北口的地貌, 易受北方寒流入侵, 是冬季气温较低的地域。年降水量为 1 464 mm, 年平均气温为 16.2°C , 无霜期 237 d。富阳市属亚热带季风气候, 雨量充沛, 气候温和, 日照充足, 自然条件优越, 土地肥沃。土壤为石英、长石砂岩上发育的微酸性红壤(吴亚丛等, 2013)。

1.2 森林资源状况

该地区历史上为森林地带, 顶极群落是北亚热带常绿阔叶林, 由于人们对木材、薪炭需求量的增加以及农业活动的发展, 大多天然林遭到破坏, 转化为次生林、农业用地和人工林, 现存主要是以壳斗科(Fagaceae)、樟科(Lauraceae)、山茶科(Theaceae)和木兰科(Magnoliaceae)等植物为主的次生林和以杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林、马尾松(*Pinus massoniana*)林、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)林、早竹(*Phyllostachys praecox*)林和茶(*Camellia sinensis*)园等为主的人工林(李正才, 2006)。现有林业用地面积 125.33 万 hm^2 , 有林地 146 万 hm^2 , 其中竹类面积 30.67 万 hm^2 , 毛竹林 27.0 万 hm^2 , 林木蓄积量达 223 万 m^3 , 森林覆盖率 66.8%。

2 研究方法

2.1 InVEST 碳储量模型

InVEST 模型为生态系统服务功能综合估价和



图 1 富阳市位置区域图

Fig. 1 Location of Fuyang region

权衡得失评估模型(潘韬等, 2013; Kareiva et al, 2011; Dolan, 2010)。其中, InVEST-Carbon 模型是通过使用土地利用/土地覆盖类型图(LULC)、木材收获率和收获产品降解率等数据和在四个碳库(地上碳库、地下碳库、土壤和死的有机物)里的储存量来估测储存在相关地区的现有碳储量或预测未来碳储量。土地利用/土地覆盖类型图(LULC)和四个碳库储存量是不可缺少的数据, 地上碳库包括地表以上所有活植被的碳储量; 地下碳库是指植物活的根系系统的碳储量; 土壤碳库包括土壤有机碳和矿质土壤有机碳(矿质土壤有机碳不易获得, 在本研究中不计); 死的有机物碳库包括枯立木、凋落物和倒木中的碳储量。InVEST 碳储量模型不涉及地上碳库中极不稳定的碳(如一年生农作物), 因为这些碳库相对稀少, 更新过快(杨芝歌等, 2012)。

InVEST 模型碳储量模块的基本运算原理可简化为将已分类的小班面积乘以其相对的碳密度得出碳储量, 然后把各分类的碳储量求和得出总的碳储量, 即碳储量 = $\sum(\sum \text{分类的小班面积} \times \text{碳密度})$ 。

2.2 数据剪裁

根据富阳市森林资源二类矢量图中小班面(共 18 959 个)所对应的优势树种和国家林业局进行森林资源二类清查的分类方法, 其中常绿阔叶林主要

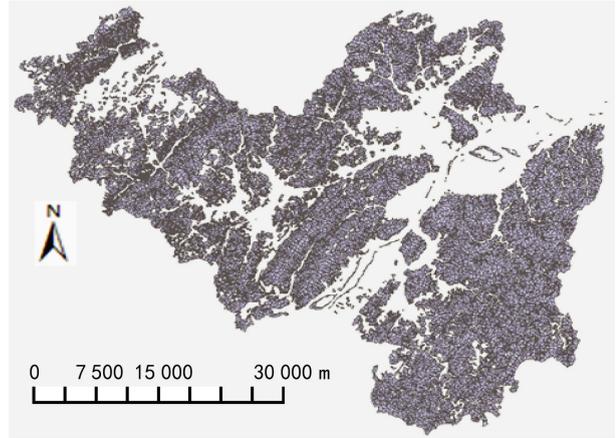


图 2 剪裁数据后的富阳森林生态系统矢量图
Fig. 2 Vector diagram of Fuyang forest ecosystems after cutting data

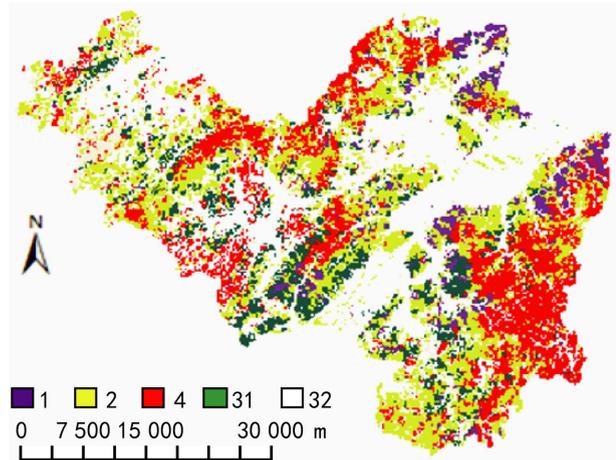


图 3 矢量栅格化的富阳森林生态系统图
Fig. 3 Raster map of Fuyang forest ecosystems

包括木荷(*Schima superb*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)等, 针阔混交林主要包括柏木(*Cupressus Linn*)、榿木(*Sassafras tsumu*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、栎类(*Quercus*)、柳杉(*Cryptomeria*)、软阔、湿地松(*Pinus elliottii*)、水杉(*Metasequoia glyptostrodoides*)、杨树(*Populus*)、硬阔等, 运用地理信息系统软件 ArcGIS10.0, 加载富阳市小班面的 shape 文件, 然后将 ArcGIS 中的数据属性表导出到 Excel 表格中, 对富阳市森林资源进行分类并删减不相关数据; 再通过 Excel 表格与 ArcGIS 属性表的连接作用, 达到数据剪裁(共 14 606 个)和分类(共 5 类)的目的, 具体见表 1 和图 2。

表 1 富阳市森林主要分类及编号

Table 1 Main forest types and codes of Fuyang

森林类型 Forest type	编号 Code	小班数(个) Number of vector cells	面积 Area (hm^2)	面积比例 Percentage (%)
常绿阔叶林 Evergreen broad- leaved forests	1	930	122 068	7.32%
针阔混交林 Coniferous and broad- leaved mixed forests	2	5 855	670 555	38.58%
竹林 Bamboo forests	4	4179	502 790	30.16%
马尾松林 Masson pine forests	31	2 145	234 341	14.06%
杉木林 Fir forests	32	1 496	137 246	8.23%

2.3 矢量栅格化

矢量栅格化是指通过 ArcGIS 软件将矢量图转换为栅格图。将上述剪裁完毕的富阳市森林资源二类矢量图的 shape 小班面,以森林类型分类为转换字段,通过 ArcToolbox 中的 to raster 工具转为栅格图,使其每一个栅格单元都有对应的土地利用/土地覆盖类型(LULC)代码。其中数据集以米投影,转换结果见栅格图 3。

2.4 参数表和数据来源

文中所用的主要数据资料为(1)2004-2008 年富阳市遥感数据资料、富阳市森林资源二类清查数据等。(2)通过查阅大量的关于富阳市森林生态系统碳储量的研究资料以及浙江省等亚热带地区的相关文献(李正才,2006;张骏等,2010),获得森林生态系统的地上碳库和土壤碳库数据;按照 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南中根茎比的缺省值进行计算,获得地下碳库数据(章银柯等,2013);根据 Delaney et al(1998)研究死的有机物碳库约为地上碳库量的 1/10,计算死的有机物碳密度(竹类除外,其他数据四舍五入保留一位有效数字);最后归纳计算得出富阳市森林生态系统四个碳库的碳密度。最后通过 Excel 必备工具箱将.xls 格式的表格转化成.dbf 格式,获得参数表,如表 2 所示,以便加载到 ArcGIS 中进行计算。

2.5 模型运算

InVEST 模型需要的原始输入数据是不同的空间数据,输出的结果也是空间图形(白杨等,2013)。

把上述数据剪裁完毕的富阳市森林生态系统小班面的栅格图 3 和.dbf 格式的参数见表 2,分别加载到 ArcGIS 软件中,然后在 ArcToolbox 中添加 InVEST 工具箱,最后通过 InVEST-Carbon 模块进行处理运算获得结果。

2.6 由生物量推算碳储量

根据富阳市森林资源二类清查资料,并根据以下蓄积量与生物量之间的函数关系(王斌等,2009),推算出碳储量。

$$B = \frac{V}{a+bV}$$

式中, B 为单位面积生物量; V 为单位面积蓄积; a 、 b 为对应植被类型常数。公式乘以碳转换系数 0.45 推算出植被碳储量,结果如表 3,土壤碳密度和死的有机物碳密度根据表 2 计算。

表 2 富阳市森林生态系统四个碳库的碳密度

Table 2 Carbon density of the 4 carbon pools in Fuyang forest ecosystems

编号 Code	地上 碳密度 Ground carbon density	地下 碳密度 Underground carbon density	土壤 碳密度 Soil organic carbon density	死的 有机物 碳密度 Dead organic carbon density	总的 碳密度 Total carbon density
1	49.3	9.9	166.9	4.9	231.0
2	38.8	7.8	142.6	3.9	193.0
4	39.5	20.1	119.0	5.3	183.9
31	27.7	5.5	131.0	2.7	167.0
32	30.1	6.0	87.5	3.2	126.8

注:碳密度单位为 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

Note: Units of carbon density is $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$.

3 结果与分析

3.1 森林碳储量的总体空间分布

通过上述 InVEST 模型处理运算得出富阳市森林生态系统总的碳储量约为 $26.7437 \times 10^6 \text{ t}$,其碳储量的总经济价值约为 39.9042 亿元(根据 InVEST 说明手册每公吨碳的价格为 43 美元计算)。并得到富阳市森林生态系统碳储量的空间分布图,颜色越深表示碳储量越高,反之,碳储量越低,如图 4。从图 4 可以看出,富阳市的东南部和中北部边缘碳储量较高,由东向西呈现高一低一高一低的分布带规律。由于碳储量的高低与植被生物量分布密切相

表 3 生物量推算碳储量一览表
Table 3 Carbon storage estimated by biomass

编号 Code	优势树种 Dominant species	生物量公式 Calculating formula of biomass	碳密度 ($t \cdot hm^{-2}$) Carbon density	碳储量 (t) Carbon storage	总碳储量 (t) Total carbon storage
1	木荷 <i>Schima superb</i>	$B = V / (0.7883 + 0.0026V)$	25.0	2 702 066.4	28 378 018.9
	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	$B = V / (0.7883 + 0.0026V)$	21.3	30 734.4	
2	柏木 <i>Cupressus Linn</i>	$B = V / (1.0202 + 0.0022V)$	32.6	253 703.0	
	檫木 <i>Sassafras tsumu</i>	$B = V / (0.5788 + 0.0020V)$	49.4	24 453.0	
	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	$B = V / (0.6539 + 0.0038V)$	47.3	320 321.8	
	栎类 <i>Quercus</i>	$B = V / (0.6539 + 0.0038V)$	21.4	7 381 895.8	
	柳杉 <i>Cryptomeria</i>	$B = V / (1.2917 + 0.0022V)$	42.1	5 572.5	
	软阔 Soft broadleaves	$B = V / (0.7883 + 0.0026V)$	27.2	58 066.6	
	湿地松 <i>Pinus elliottii</i>	$B = V / (1.4254 + 0.0004V)$	37.3	27 184.9	
	水杉 <i>Metasequoia glyptostrodoides</i>	$B = V / (1.2917 + 0.1829V)$	44.2	4 169.6	
	杨树 <i>Populus</i>	$B = V / (0.6539 + 0.0038V)$	57.8	419 086.7	
	硬阔 Hardwoods	$B = V / (0.7883 + 0.0026V)$	15.7	3 128 973.5	
31	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	$B = V / (1.4254 + 0.0004V)$	22.2	4 152 522.5	
32	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	$B = V / (1.2917 + 0.0022V)$	23.3	2 552 775.6	
4	毛竹 <i>Phyllostachys heterocycla</i>	无 None	22.4	8 026 492.6	

关(森林植被碳储量=植被生物量×转换系数),这在一定程度上可反映出富阳地表覆盖物的主要分布规律。图4中西南-东北走向的白色条带是跨越富阳市的富春江流域,富春江流域西北部的空白部分是富阳城市规划区,可看出其森林覆盖率很低。西北部主要呈灰色,说明其森林碳储量很低,可推出该地区主要是农业用地或其他非林业用地。

3.2 不同森林类型碳储量的空间分布

从图4可以看出,富阳市森林生态系统碳储量分布具有区域差异性,这不仅与人为干扰和环境因素有关,还与森林类型的分布、面积等诸多因素有关。综合图3的森林类型和图4的碳储量分布可以得出,碳储量高低顺序依次是竹林>常绿阔叶林>针阔混交林>马尾松林>杉木林,表明竹林是富阳市森林碳储量的主体。从本研究可以看出富阳市各类森

林类型平均碳密度的高低分布,常绿阔叶林碳密度>针阔混交林碳密度>竹林碳密度>马尾松林碳密度>杉木林碳密度,这与浙江省生态公益林各主要林型(不含竹林)的碳密度分布规律基本一致(张骏等,2010)。加权平均得到富阳市森林生态系统总的碳密度约为 $180.75 t \cdot hm^{-2}$,高于浙江省生态公益林平均碳密度 $164.43 t \cdot hm^{-2}$ (张骏等,2010)和全国森林平均碳密度 $41 t \cdot hm^{-2}$ (赵敏,2004),其总的碳密度约为浙江省生态公益林的1.1倍,约是全国森林碳密度的4.4倍,其碳储量约占浙江省生态公益林碳储量的8.25%。据有关研究:森林碳储量的高低与自然地理条件、森林类型、面积、森林的年龄结构等诸多因素有关(Dixon et al,1994),其中幼龄林碳储量<中龄林碳储量(刘其霞等,2005;王雪军等,2008),目前富阳市森林生态系统多以幼龄林为主,

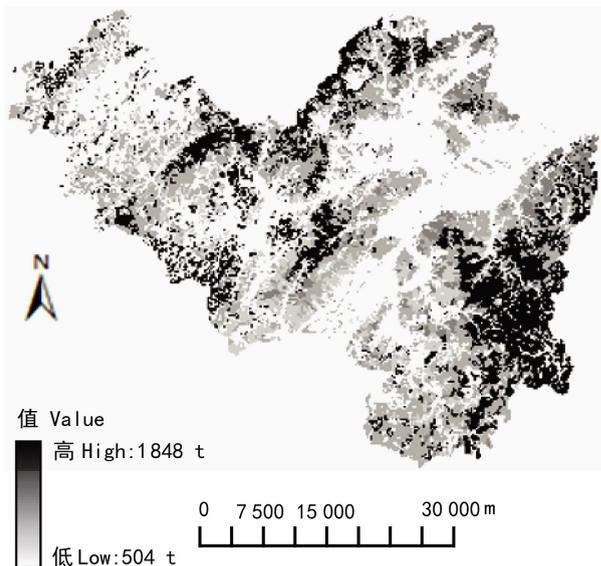


图 4 富阳市森林生态系统碳储量空间分布
Fig. 4 Space distribution of Fuyang forest ecosystems carbon storage

部分为中龄林,成熟林较少,预计未来一段时间内其森林碳储量将持续增加。

4 讨论与结论

基于富阳市森林资源遥感影像数据资料和 ArcGIS10.0 软件,运用 InVEST-Carbon 模型对其森林生态系统的碳储量进行了估算,定量可视化了富阳市森林生态系统碳储量并明确其空间分布规律。富阳市森林生态系统总的碳储量为 26.7437×10^6 t,其价值量为 39.9042 亿元。不同森林类型碳储量高低分布状况为竹林>常绿阔叶林>针阔混交林>马尾松林>杉木林;其平均碳密度为 $180.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,各森林类型平均碳密度的高低与其碳储量分布相一致(竹林除外)。通过此研究可为森林资源的管理和林业的可持续发展提供相关依据,且有助于碳循环与碳汇的研究。

基于森林二类清查资料,通过生物量与蓄积量的关系推算的碳储量与 InVEST-Carbon 模型估算的碳储量数据相差不大,碳转换系数为 0.45 时为 28.3780×10^6 t,InVEST-Carbon 模型的估算结果略微偏低,约是其结果的 1.06 倍,基本一致,可用于估算森林生态系统的碳储量,偏差可能是源于 InVEST 模型四个碳库数据,InVEST 模型是假设四个碳库密

度已知的情景估算模型,对输入的数据敏感性强。

研究同时表明,InVEST 模型将量化的森林碳储量以地图的形式表现出来,可不再用频繁的计算公式和过多的文字描述;其次,相对其他模型而言,InVEST 模型需导入的数据较少,优化了许多复杂的问题,且能够抓住重点解决问题(吴哲等,2013);此外,InVEST 模型还可用于对未来或多种模拟场景情况下的预测估算等(白杨等,2013),可为政府、非盈利组织和公司企业等自然资源的管理提供决策信息,其多功能和模块化的设计为权衡评估得失提供了有效的工具。目前,InVEST 模型还成功运用了对生物多样性、水源涵养、水质净化、土壤保持等生态系统服务功能评估的研究。

然而,本研究也存在一些不足,如需输入的空间数据难以获取;需根据实际研究情况对模型进行修改;模型碳密度数据的获取存在不确定性,极易受输入数据的影响,导致产生误差;输出结果是一个总体碳储量值和空间结果分布图,得不到各个具体森林类型的结果值等,因此 InVEST-Carbon 模型估算出的碳储量适用于总体评估和空间可视,不利于具体详细的研究。同时,由于部分数据的缺乏,本研究没有预测富阳市森林生态系统碳储量的动态变化,有待进一步研究。在今后,应充分发挥 InVEST 模型的优势并对其进一步的开发,相信该模型将会越来越受到相关科技研究人员和工作者等的重视、研究和应用。

参考文献:

- BAI Y, ZHENG H, ZHUANG CH, et al, 2013. Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian basin: based on InVEST model [J]. *Acta Ecol Sin*, 33(3): 711-717. [白杨, 郑华, 庄长伟, 等, 2013. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控 [J]. *生态学报*, 33(3): 711-717.]
- DELANEY, M, BROWN S, LUGO AE, et al, 1998. The quantity and turnover of deadwood in permanent forest plots in six life zones of Venezuela [J]. *Biotropica*, 30(1): 2-11.
- DENG L, SHANGGUAN ZP, 2011. Methods for forest carbon storage estimation based on forest inventory data [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 31(6): 143-147. [邓蕾, 上官周平, 2011. 基于森林资源清查资料的森林碳储量计量方法 [J]. *水土保持通报*, 31(6): 143-147.]
- DIXON RK, BROWN S, HOUGHTON RA, et al, 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 263: 185-190.
- DOLAN KA, 2010. Names you need to know in 2011: Natural Capital Project [EB/OL], (2010-11-01). <http://www.forbes.com/sites/kerryadolan/2010/10/29/name-you-need-to-know-natural-capital-project/>.

- FANG JY, LIU GH, ZHU B, et al, 2006. Carbon circulation of three temperate forest ecosystems in Beijing Donglingshan Mountain [J]. *Sci Chin (Ser. D) Earth Sci*,36(6):533-543. [方精云, 刘国华, 朱彪, 等, 2006. 北京东灵山三种温带森林生态系统的碳循环 [J]. *中国科学 D 辑地球科学*,36(6):533-543.]
- HUANG CD, ZHANG J, YANG WQ, et al, 2009. Spatial differentiation characteristics of forest vegetation carbon stock in Sichuan Province [J]. *Acta Ecol Sin*,29(9):5115-5121. [黄从德, 张健, 杨万勤, 等, 2009. 四川省森林植被碳储量的空间分异特征 [J]. *生态学报*,29(9):5115-5121.]
- KAREIVA P, TALLIS H, RICKETTS TH, et al, 2011. Natural capital: theory and practice of mapping ecosystem services [M]. New York: Oxford Univ Press.
- LI SN, WANG B, ZHAO GD, et al, 2004. Advance in researches on forest ecosystem services-theory and method [J]. *World For Res*,17(4):14-18. [李少宁, 王兵, 赵广东, 等, 2004. 森林生态系统服务功能研究进展——理论与方法 [J]. *世界林业研究*,17(4):14-18.]
- LI ZC, 2006. The effects of land-use change on the soil organic carbon [D]. Beijing: Chinese Academy of Forest. [李正才, 2006. 土地利用变化对土壤有机碳的影响 [D]. 北京: 中国林业科学研究院.]
- LIN QS, HONG W, 2009. Summary of research on forest carbon storage in China [J]. *Chin Agric Sci Bull*,25(6):220-224. [林清山, 洪伟, 2009. 中国森林碳储量研究综述 [J]. *中国农学通报*,25(6):220-224.]
- LIU H, LEI RD, 2005. Research methods and advances of carbon storage and balance in forest ecosystems of China [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 25(4):835-843. [刘华, 雷瑞德, 2005. 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*,25(4):835-843.]
- LIU QX, CHANG J, JIANG B, et al, 2005. The biomass of the evergreen broad-leaved ecological public-welfare forests in Zhejiang east China [J]. *Acta Ecol Sin*,25(9):2139-2143. [刘其霞, 常杰, 江波, 等, 2005. 浙江省常绿阔叶生态公益林生物量 [J]. *生态学报*,25(9):2139-2143.]
- PAN T, WU SH, DAI EF, et al, 2013. Spatiotemporal variation of water source supply service in Three River Source Area of China based on InVEST model [J]. *Chin J Appl Ecol*,24(1):183-189. [潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 等, 2013. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化 [J]. *应用生态学报*,24(1):183-189.]
- SCHIMMEL DS, HOUSE JI, HIBBARD KA, et al, 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems [J]. *Nature*,414(6860):169-172.
- WANG B, LIU MC, ZHANG B, 2009. Dynamics of net production of Chinese forest vegetation based on forest inventory data [J]. *For Res Manag*,1(3):35-43. [王斌, 刘某承, 张彪, 2009. 基于森林资源清查资料的森林植被净生产量及其动态变化研究 [J]. *林业资源管理*,1(3):35-43.]
- WANG B, YANG QP, GUO QR, et al, 2011. Carbon storage and allocation of *Phyllostachys edulis* forest and evergreen broad-leaved forest in Dagangshan Mountain, Jiangxi [J]. *Guihaia*,31(3):342-348. [王兵, 杨清培, 郭起荣, 等, 2011. 大岗山毛竹林与常绿阔叶林碳储量及分配格局 [J]. *广西植物*,31(3):342-348.]
- WANG XJ, HUANG GS, SUN YJ, et al, 2008. Forest carbon storage and dynamics in Liaoning Province from 1984 to 2000 [J]. *Acta Ecol Sin*,28(10):4757-4764. [王雪军, 黄国胜, 孙玉军, 等, 2008. 近 20 年辽宁省森林碳储量及其动态变化 [J]. *生态学报*,28(10):4757-4764.]
- WOODALL CW, HEATH LS, SMITH JE, 2008. National inventories of down and dead woody material forest carbon stocks in the United States: challenges and opportunities [J]. *For Ecol Manag*, 256(3):221-228.
- WOODBURY PB, SMITH JE, HEATH LS, 2007. Carbon sequestration in the US forest sector from 1990 to 2010 [J]. *For Ecol Manag*,241(1):14-27.
- WU YC, LI ZC, CHENG CF, et al, 2013. Effects of understory removal on forest carbon storage in *Cinnamomum camphora* plantation ecosystem [J]. *Chin J Plant Ecol*,37(2):142-149. [吴亚丛, 李正才, 程彩芳, 等, 2013. 林下植被抚育对樟人工林生态系统碳储量的影响 [J]. *植物生态学报*,37(2):142-149.]
- WU Z, CHEN X, LIU BB, et al, 2013. Research progress and application of InVEST model [J]. *Chin J Trop Agric*,33(4):58-62. [吴哲, 陈歆, 刘贝贝, 等, 2013. InVEST 模型及其应用的研究进展 [J]. *热带农业科学*,33(4):58-62.]
- XU XL, CAO MK, LI KR, 2007. Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China [J]. *Prog Geogr*,26(6):1-10. [徐新良, 曹明奎, 李克让, 2007. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究 [J]. *地理科学进展*,26(6):1-10.]
- YANG ZG, ZHOU B, YU XX, et al, 2012. Biodiversity analysis and carbon storage assessments in Beijing mountainous areas [J]. *Bull Soil Water Conserv*,32(3):42-46. [杨芝歌, 周彬, 余新晓, 等, 2012. 北京山区生物多样性分析与碳储量评估 [J]. *水土保持通报*,32(3):42-46.]
- ZHANG J, YUAN WG, GE Y, et al, 2010. Carbon storage and its sequestration potential by ecological service forest in Zhejiang [J]. *Acta Ecol Sin*,30(14):3839-3848. [张骏, 袁位高, 葛滢, 等, 2010. 浙江省生态公益林碳储量和固碳现状及潜力 [J]. *生态学报*,30(14):3839-3848.]
- ZHANG YK, MA JT, WANG E, et al, 2013. Discussion on low carbon efficient urban landscape construction thought based on carbon storage determination—a case study of West Lake scenic in Hangzhou [J]. *J Nor For Univ*,28(1):221-226. [章银柯, 马婕婷, 王恩, 等, 2013. 基于碳储量测定的低碳高效城市园林绿化建设思路探讨——以杭州西湖风景名胜为例 [J]. *西北林学院学报*,28(1):221-226.]
- ZHAO M, 2004. Study on carbon storage and balance of Chinese main forest ecosystems [D]. Beijing: Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences. [赵敏, 2004. 中国主要森林生态系统碳储量和碳收支评估 [D]. 北京: 中国科学院植物研究所.]