

基于克里金插值法的湖南省慈利县森林碳储量专题图研究

杜雪¹, 王景弟², 白彦锋³, 杜志⁴, 孟京辉^{1*}

(1. 北京林业大学 国家林业和草原局森林经营工程技术研究中心, 北京 100083; 2. 湖南省慈利县林业局, 湖南 慈利 427200;
3. 中国林业科学研究院 林业研究所, 北京 100091; 4. 国家林业和草原局 中南调查规划设计院, 湖南 长沙 410014)

摘要: 基于2014年湖南省慈利县森林资源二类调查的结果, 利用生物量换算因子连续函数法以及不同森林类型的碳含量, 求得慈利县森林碳储量, 并利用地统计学中普通克里金(Kriging)插值的方法, 基于最优的半变异函数绘制湖南省慈利县森林碳密度分布专题图。结果表明, 在6种常用的半变异函数中, 指数模型作为半变异函数的预测精度较高, 决定系数(R^2)为0.756, 残差平方和(SSR)为0.0007, 很好地反映了研究区森林碳密度的空间结构特征, 结果显示慈利县的中北部、西南部和东部的碳密度较高, 大于 $18.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其余地方的碳密度较低, 小于 $15.77 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。插值结果显示, 碳密度在 $11.19 \sim 14.33 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的面积最大, 达到慈利县总面积的22%; 其次为 $18.84 \sim 21.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 达到全县总面积的16.35%; 碳密度在 $14.33 \sim 15.77 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以及 $17.40 \sim 18.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的面积较少, 分别占到全县总面积的13.54%和11.58%; 碳密度大于 $28.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的面积最少, 仅占1.76%。可见慈利县主要林分的碳密度还是处于较低水平, 林分质量差, 不能有效地发挥森林固碳功能, 需要开展科学经营改善林分结构与树种组成, 实现固碳能力的提升。研究湖南省慈利县森林植被碳储量、碳密度及其地理空间区域分布特征, 为慈利县森林碳汇经营、林业碳汇核算和政府科学决策提供科学依据。

关键词: 碳储量; 普通克里金; 块金系数; 森林经营

中图分类号: S757.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2022)01-0198-07

Development of Thematic Map of Forest Carbon Storage Based on Kriging Interpolation Method in Cili County, Hunan Province

DU Xue¹, WANG Jing-di², BAI Yan-feng³, DU Zhi⁴, MENG Jing-hui^{1*}

(1. Research Center of Forest Management Engineering of National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Forestry Bureau of Cili County, Cili 427200, Hunan, China;

3. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

4. Central South Inventory and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Changsha 410014, Hunan, China)

Abstract: In this study, we investigated forest carbon storage, forest carbon density and their geographic spatial distributions in Cili County, Hunan Province, with the objective of providing scientific basis for forest carbon sink management, forestry carbon sink accounting and government decision-making. Based on the forest resource and planning inventory in Cili in 2014, we first calculated the forest carbon storage of the county by using the variable biomass expansion factor function method based on carbon content of different forest types. By using the ordinary Kriging interpolation method, the thematic map of forest carbon density distribution in the county was produced based on the optimal semi-variation. Among the six kinds of semi-variation functions in common use, the exponential model exhibited higher prediction accuracy as a

收稿日期: 2021-03-05 修回日期: 2021-05-08

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0505604)。

第一作者: 杜雪。研究方向: 森林生长收获与模型模拟。E-mail: duxue0331@163.com

* 通信作者: 孟京辉, 博士, 副教授。研究方向: 森林经营与管理。E-mail: Jmeng@bjfu.edu.cn

semi-variation function, with the determination coefficient (R^2) of 0.756 and the sum of squares of residuals (SSR) of 0.000 7, and hence could well represent the spatial structure characteristics of forest carbon density in the study area. Our results showed that the carbon density in the north-central, southwestern, and eastern parts the county was relatively high, above $18.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$, while the carbon density in other places was relatively low, below $15.77 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$. The interpolation results indicated that the carbon density was the largest in the range of $11.19 - 14.33 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$, which represented 22% of the total area of the county, followed by the range of $18.84 - 21.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$, which accounted for 16.35% of the total. The carbon densities in the range of $14.33 - 15.77 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$ and $17.40 - 18.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$ were low, accounting for 13.54% and 11.58% of the total, respectively. The area with carbon density greater than $28.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$ was the least, accounting for only 1.76%. It can be concluded that the forest carbon density in Cili County is still at a low level. Meanwhile, the quality of the stands is also poor, which hinders forest carbon sequestration ability. Therefore, it is necessary to carry out scientific management to improve forest structure and species composition, so as to enhance the carbon sequestration capacity.

Key words: carbon storage; ordinary Kriging; Nugget/Sill ratio; forest management

森林生态系统作为陆地生态系统中最大的碳库,其碳储量约占陆地生态系统的 $2/3$ ^[1-2]。因此,森林在维持全球碳平衡、减缓气候变化和大气 CO_2 浓度升高中起到不可替代的作用^[2-4]。估算国家和区域的森林碳储量,对于科学开展国际碳汇贸易,正确履行京都议定书以及评估应对气候变化能力等方面具有重要的意义^[5-7]。国家森林资源连续清查数据以及森林资源二类调查被广泛应用于大尺度森林生物量和碳储量估算。例如,矫兴杰等^[8]利用山东省一类调查数据,开展了山东省赤松林碳储量动态研究;曾双贝等^[9]基于二类调查数据,对湖南省邵阳县大龙洞林场的碳储量进行了估算。此外,为了实现森林蓄积到森林生物量以及森林生物量到森林碳储量的转化,国内外开展了大量的相关转化方法及转换系数方面的研究工作。例如 J. Fang *et al*^[10]、刘国华等^[11]以及方精云等^[12]建立了主要树种(组)蓄积量转换生物量的方法及其对应参数。其中,基于森林资源清查数据估计生物量的方法包括平均生物量法^[13-14](MBM)、生物量转换因子法^[15-16](BEF)和生物量换算因子连续函数法^[10,12](BEFF),这些方法在森林生物量和碳储量的研究中被广泛使用^[17]。

近些年来,中国实施了天然林资源保护、退耕还林(草)、三北防护林体系工程等一系列林业生态工程,各地区森林面积迅速增加,森林质量不断提升,森林固碳量稳步增加^[2,18]。因此,及时准确地预估县域尺度或森林经营单位尺度的森林固碳量显得尤为必要。

基于抽样调查技术,以区域森林为抽样总体,在一定精度及置信度的控制的前提下,抽取一定数量的空间样本,对区域碳储量进行预测。由于样本的

抽取基于抽样统计学原理,因此不会出现典型抽样所带来估计量的偏倚,能够客观地预测区域碳储量的特征值^[19-20]。在森林经营过程中,人们更多地关注碳储量在某个区域的连续性分布情况,而不是仅仅关注其均值及总值等少数离散变量。因此,森林碳储量的区域性连续分布的确定显得至关重要。地统计学中的空间插值技术可以实现从少数的点数据到区域的面数据的拓展,而且样本点数量越多,分布范围均匀,其插值结果就更接近真实的情况^[21-22]。因此,空间插值技术广泛应用于区域碳储量分布的研究^[23-24]。克里金(Kriging)插值法是该方法的最基本核心,可以运用线性加权的方法对特定变量进行局部最优估计^[25-26]。可以最大限度地利用空间取样时的信息并考虑样点之间的位置关系,有效避免系统误差的出现,并且能提供估计的误差和精度^[21,27]。因此,该方法广泛应用于地质学、气象学、土壤学、遥感等许多研究领域,常被用于区域生物量、碳储量制图^[28-30]。

本研究基于 2014 年湖南省慈利县森林资源二类调查数据,结合地统计学的方法,研究湖南省慈利县 2014 年森林植被碳储量、碳密度及其地理空间区域分布特征,并最终专题图形式呈现。期待能够为慈利县森林碳汇经营、林业碳汇核算和政府科学决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

慈利县位于湖南省北部、澧水中游,隶属湖南省张家界市,地理坐标 $110^{\circ}27'35'' - 111^{\circ}20'00''\text{E}$, $29^{\circ}04'00'' - 29^{\circ}41'56''\text{N}$, 县内东西走向长 72.2 km, 南北走向宽 69 km, 总面积 $3\,480 \text{ km}^2$ ^[31-33]。位于武陵

山区腹地,是武陵山区与洞庭湖平原的过渡地带^[33-34]。该县地形以山地、山原为主,地势西北高、东南低^[35]。慈利县为亚热带季风湿润气候,气候温和,光照充足,雨量充沛,年平均气温 16.8℃,年降水量 1 390 mm,无霜期 267.6 d,相对湿度 76.1%^[33-34]。慈利县物种资源非常丰富,种类繁多,木本植物约有 600 多种,隶属于 87 科 215 属。森林资源丰富,森林覆盖率达 66.53%,森林蓄积为

772.82 万 m³,主要森林植被类型有常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿和落叶阔叶混交林、常绿杉松针叶林等^[33,36]。

1.2 数据来源

采用的基础数据来源于湖南省慈利县 2014 年森林资源二类调查的数据。共选取乔木林小班 905 个,每个小班有标准地 1 块,较均匀的分布于慈利县区域内(图 1)。

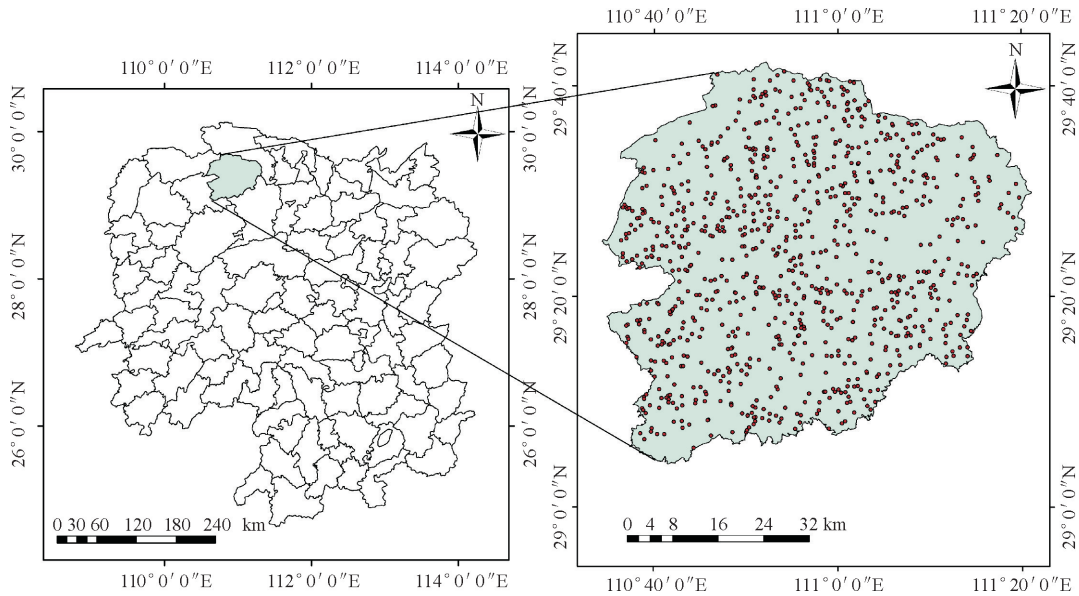


图 1 慈利县选取样地分布

Fig. 1 Distribution map of selected plots in Cili County

1.3 研究方法

1.3.1 各森林类型生物量及碳储量估算 大量森林实测生物量与蓄积量的研究发现,生物量与蓄积量二者之间存在良好的回归关系^[11,37],以建立生物量与蓄积量关系为基础的方法广泛应用于森林生物量的估计^[10,37]。本研究中森林生物量估计采用生物量换算因子连续函数法^[10],利用不同森林类型的单位面积蓄积量 $V(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$ 估算该森林类型的单位面积生物量 $B(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$ 。而各森林类型的单位面积碳储量 $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$ 即碳密度,用单位面积生物量 $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$ 乘以其平均碳质量分数 $(\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$ 。

慈利县的森林类型主要有马尾松(*Pinus massoniana*)林,以火炬松(*P. taeda*)和湿地松(*P. elliotii*)为主的其他松林、杉木林、三杉林(柳杉、落羽杉、水杉林)、柏木林、杨树林和以栎类(*Quercus* spp.)、樟类(*Cinnamomum* spp.)、楠类(*Phoebe*

spp.)等为主的阔叶林。各乔木林类型生物量与蓄积量回归方程见表 1^[10,12],各乔木林类型的森林植被的平均碳含量见表 2^[38-39],对于三杉林的碳含量采用杉木林的碳含量来估算其单位面积碳储量。

表 1 各乔木林类型生物量与蓄积量回归方程^[10,12]

Table 1 Regression equation of biomass and stock volume for each forest type^[10,12]

乔木林类型	生物量-蓄积量 回归方程	相关系数
马尾松林	$B=0.510\ 1V+1.0451$	0.92
其他松林	$B=0.516\ 8V+33.2378$	0.97
杉木林	$B=0.399\ 9V+22.5410$	0.97
三杉林	$B=0.415\ 8V+41.3318$	0.94
柏木林	$B=0.612\ 9V+26.1451$	0.98
杨树林	$B=0.475\ 4V+30.6034$	0.93
阔叶林	$B=1.035\ 7V+8.0591$	0.91

注: B 为生物量/t; V 为蓄积量/m³。

表 2 湖南省现有森林植被的算术平均碳质量分数^[38-39]

Table 2 Average carbon content of existing forest vegetation in Hunan Province^[38-39]

(g · g⁻¹)

乔木林类型	马尾松林	湿地松林	杉木林	柏木林	杨树林	阔叶林
平均值	0.520	0.515	0.508	0.551	0.494	0.498
标准差	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03

1.3.2 普通克里金(Kriging)插值 地统计学是以区域化变量理论为基础建立的,变异函数是其最基本的函数,通过变异函数来确定变量因子的空间变异程度及空间变异尺度^[40-41]。克里金(Kriging)方法的基本原理就是通过空间上规则分布的样点数据,来估计空间上其他未观测位置的数据,因此需要拟合一个经验性半变异函数模型来反映空间数据的相关特性,进而获得权重进行预测^[42-43]。最基本的半变异函数的计算公式^[40-41]如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i+h) - z(x_i)]^2 \quad (1)$$

式中: h 为样本间距; $N(h)$ 是在空间上分隔距离为 h 时的样本点对数; $z(x_i)$ 和 $z(x_i+h)$ 分别为点 x_i 和与 x_i+h 处的变量值; $\gamma(h)$ 为所有滞后距离为 h 的点对的半方差值,随着样本间距 h 的增大,由一个非零值达到相对稳定的常数值。

本研究利用 R3.6.3 拟合半变异函数并计算块金值、基台值、偏基台值和变程等参数,选择决定系数(R^2)最大和残差平方和(SSR)最小的模型作为最优的半变异函数^[44-45],基于最优的半变异函数利用 ArcGIS 10.6 绘制湖南省慈利县森林碳密度分布专题图。决定系数(R^2)最大和残差平方和(SSR,公式中用 S_{SR} 表示)的计算公式如下^[46-47]:

$$S_{SR} = \sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2 \quad (2)$$

表 3 不同半变异函数理论模型的拟合参数

Table 3 The fitting parameters of different semi-variogram theoretical models

理论模型	块金值	基台值	偏基台值	块金系数/%	变程/m	R^2	RSS
圆模型	0.040	0.203	0.163	19.7	232.7	0.638	0.0011
球状模型	0.040	0.203	0.163	19.7	265.6	0.638	0.0011
指数模型	0.040	0.205	0.165	19.6	127.0	0.756	0.0007
高斯模型	0.040	0.203	0.163	19.7	127.2	0.639	0.0011
线性模型	0.040	0.203	0.163	19.7	195.6	0.638	0.0011
Pentaspherical 模型	0.040	0.203	0.163	19.7	322.3	0.638	0.0011

插值得到的慈利县森林碳储量空间分布图与已有的 2014 年慈利县二类调查所得包含所有乔木林地林分类型信息的矢量图进行联合分析,统计不同林分类型的碳密度区间信息,得到图 3。统计可得,慈利县乔木林总面积为 188 304.9 hm^2 ,乔木林面积占慈利县总面积的 53.95%,不同乔木林的面积差距较大,由大到小依次为:阔叶林、马尾松林、杉木林、柏木林、其他松林、杨树林、三杉林。由图 3 可知,插值得到的结果中,碳密度在 11.19~14.33 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的总林分面积最大,为 45 107.6 hm^2 ;其次是 18.84~21.98 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,为 29 428.5 hm^2 ;大于 28.83 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的总林分面积最小,为 3 208.0 hm^2 。约 1/4 的马尾松林、杉木林以及阔叶林都在

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - \bar{Z})^2} \quad (3)$$

式中: $Z^*(x_i)$ 为空间点 x_i 处插值计算得到的估计值; $Z(x_i)$ 为空间点 x_i 处的实测值; \bar{Z} 为 i 个实测值的平均值。

2 结果与分析

2.1 碳储量的空间结构特征

对 905 个标准地的碳密度数据进行半变异函数的拟合,由表 3 可知,在 6 种常用的半变异函数中,圆模型、球状模型、高斯模型、线性模型和 Pentaspherical 模型的模拟效率差别不大。相比而言,指数模型的決定系数 R^2 最大,残差平方和 RSS 最小,为最优模型。所以使用普通克里格方法对慈利县单位面积碳储量进行插值分析时,选用指数模型进行拟合。6 种半变异函数模型的块金系数均小于 25%,表明单位面积碳储量具有较强的空间自相关,适合进行克里金插值分析。

2.2 慈利县碳储量专题图

利用指数模型作为半变异函数进行慈利县碳储量专题图的制作,插值结果见图 2。由图 2 可知,慈利县的中北部、西南部和东部的碳密度较高,高于 18.84 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其余地方的碳密度较低,低于 15.77 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

11.19~14.33 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 碳密度内;柏木林碳密度在 14.33~15.77 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的面积最大,占到 18%;其他松林、三杉林、杨树林的总面积很小。可以看出,林分的碳密度总体还是处于较低水平,林分质量有待进一步提升。

3 结论与讨论

3.1 碳储量的空间结构特征

圆模型(Circle)、球状模型(Spherical)、指数模型(Exponential)、高斯模型(Gaussian)、线性模型(Linear)、Pentaspherical 模型 6 种常用的半变异函数理论模型中,指数模型作为半变异函数的模拟效率最高,为最优模型。指数模型作为最优模型,在以

往对区域碳密度和碳储量的研究中比较常见,例如,张佳佳等^[40]的研究表明指数模型对浙江省森林凋落物碳密度空间变异拟合度最高,叶光志等^[48]对米易县的研究以及王海宾等^[49]对北京市密云县的研究均表明指数模型为研究区单位面积蓄积的最优半变异函数。

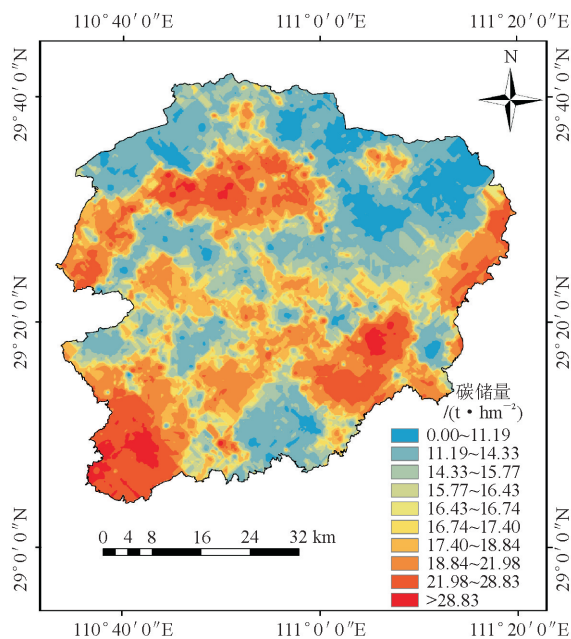


图2 慈利县森林碳储量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution map of forest carbon storage in Cili County

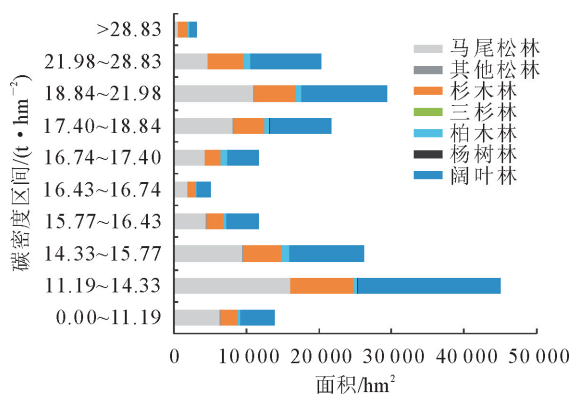


图3 慈利县各林分类型的碳密度

Fig. 3 Carbon density of different stand types in Cili County

本研究中,6种半变异函数模型的块金系数均小于25%,表明慈利县乔木林碳密度具有较强的空间自相关。块金系数小说明由随机因素引起的空间变异程度越小,结构性因素在空间异质性中的作用越大^[22,48],块金系数越大表示系统内某一随机因素的影响不可忽略^[40,50-52]。我们的研究中块金系数为19.6%,小于25%,说明慈利县森林碳密度具有较强的空间相关性,森林碳密度的空间异质性主要是由结构性因素引起的,人为干扰等随机因素的影

响较小。这可能是因为慈利县的森林以严格保护或者仅可抚育性采伐的生态公益林为主^[36],因此受到的人为干扰相对较小。2014年慈利县公益林面积达128 616.8 hm²,占慈利县林地面积的52.17%,占慈利县总面积的36.96%^[33]。

3.2 慈利县固碳专题图

由慈利县森林碳储量分布,中间由西部至东北部贯穿慈利县的区域碳密度较低。此区域是湖南省四大河流之一的澧水流经地,也是慈利县重要的交通路线353国道和长张高速途经地,周围居民区聚集,森林面积少,人为干扰大,固碳能力低。慈利县北部和南部碳密度低的区域也是乡镇居民聚居地,森林面积小,且受人为干扰多一些,因此固碳能力较低。而碳密度较高的区域大都是人烟稀少的山区森林区域,人为干扰少,森林面积和蓄积均较高。

插值结果显示,碳密度在11.19~14.33 t · hm⁻²的总林分面积最大,为45 107.6 hm²;其次是18.84~21.98 t · hm⁻²,为29 428.5 hm²;大于28.83 t · hm⁻²的总林分面积最小,为3 208.0 hm²。慈利县的阔叶林占乔木林总面积的40%,马尾松林占35%,杉木林占20%,其他林分只占4%;约1/4的马尾松林、杉木林以及阔叶林都在11.19~14.33 t · hm⁻²碳密度区间内,可见慈利县主要林分的碳密度还是处于较低水平。这说明上述林分类型由于林分质量差,不能有效发挥森林固碳功能,需要开展科学经营改善林分结构与树种组成,实现固碳能力的提升。例如,对于阔叶林需要逐步增加固碳能力强的实生树,淘汰固碳能力差的萌生树。对于马尾松与杉木人工林,可以开展近自然化改造,增加固碳能力强的慢生阔叶树种,改善林分结构,提高生物多样性,进而提升森林固碳功能。

基于2014年湖南省慈利县森林资源二类调查的结果,结合地统计学中普通克里金插值的方法,研究慈利县森林植被碳密度及其地理空间区域分布特征。研究结果表明块金系数为19.6%,说明慈利县碳储量具有较高程度的空间自相关。最终运用指数模型进行克里金插值,得到了慈利县森林碳密度分布图。研究结果可以为湖南省慈利县森林碳汇经营管理提供理论依据,而且为慈利县碳汇核算及林地一张图的更新提供支持。但是,由于标准地中只有乔木层中直径大于5.0 cm的林木参与计数,因此本研究森林植被碳储量估算仅包括乔木部分,没有包括灌木层、草本层、枯枝落叶层、土壤层的碳储量。建议今后的调查样地增加地上草本、灌木层的调查,完善慈利县碳储量估计。本研究在较小的县域尺度上对碳储量进行了研究,为慈利县制作了碳储量专

题图,为该县以森林固碳能力提升为目的的精准经营提供了依据。但是,碳储量和碳密度的研究只在较大尺度上的宏观研究才更有实际意义。因此,在数据获取的前提下,有必要开展大尺度的森林碳储量和碳密度研究,为区域森林经营规划提供依据。

参考文献:

- [1] GRAETZ D A. Biogeochemistry: an analysis of global change[M]. California: Academic Press Inc., 1992.
- [2] 李雷达,方晰,李斌,等. 湖南省2014年森林植被碳储量、碳密度及其区域空间分布格局[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(1): 69-77.
LI L D, FANG X, LI B, *et al.* Forest vegetation carbon storage, carbon density and spatial distribution pattern in 2014 in Hunan Province[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2017, 37(1): 69-77. (in Chinese)
- [3] 刘曦乔,梁萌杰,陈龙池,等. 湖南省森林生态系统碳储量、碳密度及其空间分布[J]. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2385-2393.
LIU X Q, LIANG M J, CHEN L C, *et al.* Carbon storage, carbon density and spatial distribution of forest ecosystems in Hunan Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(9): 2385-2393. (in Chinese)
- [4] 杨万勤,张健,胡庭兴. 森林土壤生态学[M]. 成都: 四川出版集团, 2006.
- [5] 刘金山,张万林,杨帆,等. 区域森林植被碳汇估算及前景分析[J]. 中南林业调查规划, 2012, 31(4): 65-68.
LIU J S, ZHANG W L, YANG F, *et al.* Methods and future prospects of regional forest vegetation carbon sequestration estimation[J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2012, 31(4): 65-68. (in Chinese)
- [6] 刘金山,张万林,杨传金,等. 森林碳库及碳汇监测概述[J]. 中南林业调查规划, 2012, 31(1): 61-65.
LIU J S, ZHANG W L, YANG C J, *et al.* An overview on monitoring of forest carbon pool and carbon sink[J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2012, 31(1): 61-65. (in Chinese)
- [7] 王敏,李贵才,仲国庆,等. 区域尺度上森林生态系统碳储量的估算方法分析[J]. 林业资源管理, 2010(2): 107-112.
WANG M, LI G C, ZHONG G Q, *et al.* Integrating ecosystem process models, remote sensing and ground based observations for regional-scale analysis of the carbon storage[J]. Forest Resources Management, 2010(2): 107-112. (in Chinese)
- [8] 矫兴杰,杜楠楠,王志蛟,等. 山东省赤松林碳储量动态研究[J]. 山东林业科技, 2016, 46(3): 63-68.
- [9] 曾双贝,杜宗义,吴亮. 基于森林资源规划设计调查数据的碳储量估算及经营措施建议—以昭阳区大龙洞国营林场为例[J]. 林业建设, 2017(3): 52-55.
- [10] FANG J, CHEN A, PENG C, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [11] 刘国华,傅伯杰,方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
LIU G H, FU B J, FANG J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 733-740. (in Chinese)
- [12] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [13] BROWN S, LUGO A E. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes [J]. Science, 1984, 223(4642): 1290-1293.
- [14] BROWN S, GILLESPIE A J R, LUGO A E. Biomass estimation methods for tropical forests with application to forest inventory data [J]. Forest Science, 1989, 35(4): 881-902.
- [15] BROWN S. Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of Brazilian Amazon [J]. Interciencia, 1992, 17(1): 8-18.
- [16] BIRDSEY R A, PLANTINGA A J, HEATH L S. Past and prospective carbon storage in united states forests [J]. Forest Ecology & Management, 1993, 58(59): 33-40.
- [17] 张茂震,王广兴,刘安兴. 基于森林资源连续清查资料估算的浙江省森林生物量及生产力[J]. 林业科学, 2009, 45(9): 13-17.
ZHANG M Z, WANG G X, LIU A X. Estimation of forest biomass and net primary production for Zhejiang Province based on continuous forest resources inventory[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(9): 13-17. (in Chinese)
- [18] 王湘龙. 广东省第四次森林资源二类调查主要结果分析[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(1): 73-77.
- [19] 张佳佳,傅伟军,杜群,等. 地形和采样数量对浙江省森林凋落物碳密度插值精度的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2241-2247.
- [20] 杨士凯,周运超,黄磊,等. 杉木成熟林土壤容重空间变异特征[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(1): 30-38.
- [21] 赵文洁. 大兴安岭主要森林类型碳密度空间分布研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [22] 齐国翠. 祁连山哈溪林乔木林碳储量空间分布及变异特征[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [23] 孙钰森. 基于GWRK模型的帽儿山地区森林碳储量空间分布[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [24] 潘萍,孙玉军,欧阳勋志,等. 江西省马尾松林生态系统碳密度空间变异特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1885-1892.
PAN P, SUN Y J, OUYANG X Z, *et al.* Spatial variation of carbon density in *Pinus massoniana* forest in Jiangxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(6): 1885-1892. (in Chinese)
- [25] 姜春雷. 克里格插值的加速和参数优化及其应用[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2016.
- [26] 何红艳. 青藏高原森林生产力格局及对气候变化响应的模拟[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
- [27] 戴前石,胡觉,李建军. 基于连清数据的湖南森林碳密度估计及变化特征分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2017, 41(4): 129-135.
DAI Q S, HU J, LI J J. Estimation and analysis of variation characteristic of forest carbon density in Hunan Province using continuous forest inventory data[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2017, 41(4): 129-135. (in Chinese)
- [28] 刘文娟,安瑞平,连晋姣. 宁夏参考作物蒸散量的时空变化特征分析[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 69-73.

- LIU W J, AN R P, LIAN J J. Temporal-spatial characteristics of reference crop evapotranspiration in Ningxia[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1): 69-73. (in Chinese)
- [29] 王舒菲, 曹银贵, 白中科, 等. 黄土露天矿区排土场重构土壤质地空间特征研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(6): 40-51.
- WANG S F, CAO Y G, BAI Z K, *et al.* Spatial characteristics of reconstructed soil texture in dumping site of loess open-pit mining area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(6): 40-51. (in Chinese)
- [30] 林宜鸿, 何中声, 杨素慧, 等. 永泰县夏季空气负氧离子空间异质性研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 82-88.
- LIN Y H, HE Z S, YANG S H, *et al.* Spatial heterogeneity of summer air negative oxygen ions in Yongtai County[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(6): 82-88. (in Chinese)
- [31] 向珊. 慈利县土地利用/覆被时空变化及其驱动力研究[D]. 吉首: 吉首大学, 2017.
- [32] 龙维, 王育坚, 王景弟, 等. 慈利县重点公益林生态系统服务功能评估[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(5): 39-48.
- LONG W, WANG Y J, WANG J D, *et al.* Evaluation of ecosystem service function of key non-commercial forest in Cili County[J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2019, 35(5): 39-48. (in Chinese)
- [33] 慈利县林业局. 湖南省慈利县“十二五”森林资源二类调查报告[R]. 张家界: 慈利县林业局, 2014.
- [34] 张雄一, 王盈丽, 董贤斌, 等. 基于土地利用变化的慈利县生态系统服务价值研究[J]. 湖南农业科学, 2020(1): 39-44, 48.
- [35] 陈毅烽. 慈利县杜仲资源调查与优树选择 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
- [36] 王建军, 孟京辉, 葛方兴, 等. 基于森林功能分区的经营小班划分研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(3): 165-170.
- WANG J J, MENG J H, GE F X, *et al.* Division of small management classes based on forest functional zoning[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(3): 165-170. (in Chinese)
- [37] 李斌. 湖南省森林生态系统碳储量动态及其碳吸存潜力 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [38] 尹少华, 周文朋. 湖南省森林碳汇估算与评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(7): 136-139, 144.
- YIN S H, ZHOU W P. Estimation and evaluation of Hunan forest carbon sinks[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2013, 33(7): 136-139, 144. (in Chinese)
- [39] 李斌, 方晰, 田大伦, 等. 湖南省现有森林植被主要树种的碳含量[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(1): 71-78.
- LI B, FANG X, TIAN D L, *et al.* Studies on carbon concentration of main forest vegetation tree species in Hunan Province[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2015, 35(1): 71-78. (in Chinese)
- [40] 张佳佳, 傅伟军, 杜群, 等. 浙江省森林凋落物碳密度空间变异特征[J]. 林业科学, 2014, 50(2): 8-13.
- ZHANG J J, FU W J, DU Q, *et al.* Spatial variability characteristics of carbon densities in the forest litter in Zhejiang Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(2): 8-13. (in Chinese)
- [41] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [42] 张峰, 杜群, 葛宏立, 等. 基于地统计学和 CFI 样地的浙江省森林碳空间分布研究[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5275-5286.
- ZHANG F, DU Q, GE H L, *et al.* Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province with geostatistics based on CFI sample plots[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5275-5286. (in Chinese)
- [43] 张玥. 基于 GIS 的黑河市森林碳储量空间分布特征研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [44] WANG Y Q, ZHANG X C, HUANG C Q. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China [J]. Geoderma, 2009, 150(1/2): 141-149.
- [45] LIU Z P, SHAO M A, WANG Y Q. Spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the entire Loess Plateau region of China [J]. Geoderma, 2013, 197: 67-78.
- [46] 汪青静, 许崇育, 陈华. 克里金日降水插值的不同变异函数比较分析[J]. 水资源研究, 2016, 5(5): 469-477.
- [47] 孟露. 基于地统计学的大兴安岭塔河林业局主要森林类型生物量空间分布 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- [48] 叶光志, 魏圣钊, 张国先, 等. 基于地统计学的米易县单位面积蓄积空间格局分析[J]. 四川林业科技, 2019, 40(6): 71-74.
- [49] 王海宾, 彭道黎, 范应龙, 等. 基于辅助信息的森林蓄积量空间模拟[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 283-289.
- [50] 刘湘南, 黄方, 王平. GIS 空间分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [51] 张吕成, 张一帆, 董灵波. 基于 landsat TM 数据的大兴安岭森林景观空间格局及其关联性[J]. 森林工程, 2021, 37(6): 1-9.
- ZHANG L C, ZHANG Y F, DONG L B. Spatial pattern and correlation of forest landscape in daxing'an mountains based on landsat TM data[J]. Forest Engineering, 2021, 37(6): 1-9. (in Chinese)
- [52] 张京, 徐雁南. 基于 web AppBuilder 的县级森林资源管理系统构建[J]. 森林工程, 2020, 36(4): 38-44.
- ZHANG J, XU Y N. Construction of county forest resource management system based on web AppBuilder[J]. Forest Engineering, 2020, 36(4): 38-44. (in Chinese)