

# 梅州市林地土壤有机碳储量及空间分布特征<sup>\*</sup>

张中瑞 赵志明 邓智文 谢镇东 邓泽伟 朱航勇

(广东省林业科学研究院 / 广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广东 广州 510520)

**摘要** 利用森林土壤有机碳实测数据估算了梅州市土壤有机碳、碳密度及碳储量, 分析了土壤有机碳含量的空间分布格局。结果表明: 梅州市林地土壤有机碳在  $6.48\sim 10.48\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 平均值为  $8.41\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 土壤养分等级为 I 级~IV 级, 变异系数为 29%~78%, 属中等变异程度。各区(县)森林土壤有机碳含量的大小排序依次为平远县>蕉岭县>兴宁县>梅江区>大埔县>梅县区>丰顺县>五华县。梅州市土壤碳密度在  $92.78\sim 150.13\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  之间, 平均值为  $120.44\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。梅州市林地土壤总碳储量为 14 316.62 万 t, 各区(县)碳储量贡献值依次为五华县>丰顺县>大埔县>梅县区>兴宁县>蕉岭县>梅江区>平远县。梅州市林地土壤碳含量空间分布格局为东高西低, 且随着土层的加深, 有机碳含量呈逐渐减少的变化趋势。

**关键词** 梅州市; 土壤有机碳; 碳储量; 空间分布

中图分类号: S714 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2022) 02-0153-06

## Soil Organic Carbon Stocks and Spatial Distribution Characteristics of Forest Land in Meizhou City

ZHANG Zhongrui ZHAO Zhiming DENG Zhiwen  
XIE Zhendong DENG Zewei ZHU Hangyong

(Guangdong Academy of Forestry / Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

**Abstract** Forest soil organic carbon (FSC) is an important component of the global soil carbon pool of forest ecosystems. Soil organic carbon, carbon density and carbon stocks in Meizhou city were estimated using actual forest soil organic carbon measurements, and the spatial distribution pattern of soil organic carbon content was analysed. The results showed that the soil organic carbon of forest land in Meizhou city ranged from  $6.48$  to  $10.48\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , with a mean value of  $8.41\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , and the soil nutrient classes ranged from level I to level IV, with a coefficient of variation of 29% to 78%, which is a medium degree of variation. The ranking of the size of forest soil organic carbon content in each district (county) was Pingyuan county > Jiaoling county > Xingning county > Meijiang district > Tai Po county > Meixian district > Fengshun county > Wuhua county in order. Soil carbon density in Meizhou city ranged from  $92.78$  to  $150.13\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , with an average value of  $120.44\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ . The total soil carbon stock in forest land in Meizhou city was 143 166 200 t, with the contribution of each district (county) in the order of Wuhua county > Fengshun county > Tai Po county > Meixian district > Xingning county > Jiaoling county > Meijiang district > Pingyuan county. The spatial distribution pattern of soil carbon content of forest land in Meizhou city is higher in the eastern part and lower in the western part, and with the deepening of the soil layer, the organic carbon content shows a gradually decreasing trend.

**Key words** Meizhou city; soil organic carbon; carbon stock; spatial distribution

<sup>\*</sup> 基金项目: 广东省科技计划项目 (2019-07)。

第一作者: 张中瑞 (1987—), 男, 工程师, 主要从事林业经济研究, E-mail: zhangzhongrui126@126.com。

通信作者: 朱航勇 (1981—), 男, 高级工程师, 长期从事林业相关研究, E-mail: 13212810500@wo.cn。

2021 年, 中国政府作出“力争 2030 年前实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和 2060 年实现碳中和”的重大决策。陆地碳汇在中国“双碳”政策中占有举足轻重的作用, 能够为“碳中和”战略目标中的工业减排赢得时间窗口<sup>[1]</sup>。森林作为陆地生态系统的主体, 是陆地上最大的碳储库和碳吸收汇<sup>[2]</sup>, 在陆地碳汇中占据主导作用。土壤有机碳是土壤碳储量的重要组成部分, 也反映了土壤肥力状况, 能作为衡量森林土壤质量和土壤碳储量的重要指标<sup>[3-4]</sup>。我国各类型森林生态系统土壤有机碳含量存在高度的空间异质性<sup>[5-6]</sup>, 对于森林土壤碳储量估算难度较大。区域尺度森林土壤碳储量研究为广东省乃至全国森林土壤碳储量研究提供了重要参考依据。

梅州市地处五岭山脉以南, 主要由武夷山脉、莲花山脉、凤凰山脉等三列山脉组成, 土壤类型复杂多样, 林地面积达 122.38 万  $\text{hm}^2$ , 森林资源丰富。然而, 目前关于梅州市森林土壤有机碳及其空间分布情况尚未可知。因此, 本文通过对梅州市各区(县)林地土壤进行研究, 旨在分析土壤有机碳含量状况及空间分布特征, 评估其土壤有机碳储量, 以期为梅州市森林土壤肥力状况和森林碳汇的研究奠定基础, 也为制定合理的森林经营规划、水土保持措施和森林碳汇调查与监测策略提供科学依据。

## 1 研究区概况

梅州市位于广东省东北部, 坐标介于东经  $115^{\circ}18'$  至  $116^{\circ}56'$ , 北纬  $23^{\circ}23'$  至  $24^{\circ}56'$  之间, 全市行政面积 15 868.33  $\text{km}^2$ 。梅州属亚热带季风气候区, 是南亚热带和中亚热带气候区的过渡地带。梅州市各县(区、市)年平均气温为  $20.7\sim 21.5^{\circ}\text{C}$ , 气温年变化为 1 月最低, 7 月最高。梅州市地处低纬度地区, 雨水丰富, 年平均降雨量最高的丰顺县为 1 877 mm, 其他县(区、市)均在 1 534~1 684 mm 之间, 雨水丰盈且集中。梅州地处五岭山脉以南, 地势北高南低, 主要由武夷山脉、莲花山脉、凤凰山脉等三列山脉组成。梅州地处赤红壤地带, 土壤类型复杂多样, 成土母岩多为花岗岩, 小部分为玄武岩, 山地丘陵为母岩风化形成的赤红壤, 土壤普遍呈酸性; 平原为河流冲积土、坑廊为谷底冲积土、台岗阶地为洪积土。全市山地面积占 24.3%, 丘陵及台地、阶地面积占

56.6%, 平原面积占 13.7%, 河流和水库等水面积占 5.4%。

## 2 研究方法

### 2.1 土壤样点调查与样品采集

采用专题布点和空间随机布点相结合的方式, 依据土壤属性空间分布预测模型质量要求, 在梅州市林地土壤调查区域内生成抽样网格, 并进行无人机踏查及各调查专题点的高分辨率 DEM 衍生数据提取, 确定土壤样点布设位置及调查线路<sup>[7]</sup>, 共计 1 092 个样点。

将布设样点的地理坐标定位到林相图上的地籍小班, 借助 GPS 找到样点区域。根据样点布设要求信息, 如地籍号、植被类型、坡位、坡向、坡度、坐标点等, 在误差允许范围内(所在小班距离样点坐标半径 100 m 内)选择土壤发育条件稳定, 没有经过挖沟、整修等人为扰动的地方, 确定剖面点位置, 进行调查。

在每个样点挖掘 3 个土壤剖面(长 1.2~1.5 m, 宽 0.8~1.0 m, 高 1.0~1.2 m), 分 5 层取样, 由上至下依次为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm, 用环刀在各土层中部采集环刀土, 用于测定土壤容重; 另在每层均匀采集土壤(不少于 500 g), 装入密封袋带回实验室, 用于测定土壤有机碳含量。

### 2.2 样品测定方法

土壤容重采用环刀法测定<sup>[8]</sup>, 土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化法测定<sup>[9]</sup>。

### 2.3 土壤碳密度及碳储量计算

土壤碳密度及碳储量计算公式为<sup>[3, 10]</sup>:

$$S_i = C_i \times \rho_i \times d_i / 10 \quad (1)$$

$$S_C = \sum_{i=1}^n S_i \quad (2)$$

$$T_C = S_C \times A \quad (3)$$

式中:  $S_i$  为第  $i$  层土壤碳密度,  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;  $C_i$  为第  $i$  层土壤碳含量,  $\text{g}/\text{kg}$ ;  $\rho_i$  为第  $i$  层土壤容重,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $d_i$  为第  $i$  层土层厚度,  $\text{cm}$ ;  $A$  为林分面积,  $\text{hm}^2$ ;  $S_C$  为 0~100 cm 土壤总碳密度,  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;  $T_C$  为土壤总碳储量,  $\text{t}$ 。

### 2.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2019 软件进行数据处理和汇总,

应用 SPSS 25.0 软件进行统计学分析。采用单因素方差分析不同区（县）土壤有机碳含量、碳密度的差异，用 LSD 法进行显著性多重比较。把梅州市林地土壤有机碳含量换算成有机质含量，然后根据全国第二次土壤普查规定的土壤养分分级标准<sup>[11]</sup>进行评价。利用 ArcGis 10.7 进行克里金空间插值<sup>[12-14]</sup>计算得到土壤有机碳含量空间分布特征。

3 结果与分析

3.1 梅州市林地土壤有机碳描述性统计

梅州市森林土壤有机碳含量状况如表 1。由表可知，全市森林土壤有机碳含量的平均值为  $8.41\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，对应的土壤肥力等级为Ⅳ级，土壤肥力为中等。各区（县）森林土壤有机碳含量的平均值由大到小依次为平远县、蕉岭县、兴宁县、梅江区、大埔县、梅县区、丰顺县和五华县，分别为 10.48、10.2、9.46、9.19、8.43、8.14、8.11 和  $6.48\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其中平远、蕉岭、兴宁、梅江和大埔高于全市的平均水平，梅县、丰顺和五华低于全市的平均水平。各区（县）森林土壤有机碳含量的平均值对应的土壤肥力等级均为Ⅳ级，土壤肥力均为中等。各区县土壤养分等级跨幅较大，从高（Ⅰ级）到低（Ⅵ级）都有分布。梅州市各区（县）土壤有机碳含量变异系数均属于中等变异程度，其中大埔县、五华县的土壤有机碳含量

变化幅度较大，变异系数分别为 77.62%、62.8%，蕉岭县的变化幅度较小，变异系数为 29.24%，其它地区的变异系数在 45%~60% 之间。

3.2 梅州市林地土壤碳密度及碳储量

由表 2 可知，梅州市土壤碳密度平均值为  $120.44\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ，梅江区、平远县、蕉岭县、兴宁县的土壤碳密度高于全市平均水平，梅县区、丰顺县、五华县的土壤碳密度低于全市平均水平。不同区（县）间土壤碳密度差异显著，平远县、蕉岭县的土壤碳密度相对较高，分别为  $150.13\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $147.28\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ，五华县的土壤碳密度显著低于其它区（县）。梅州市各区（县）林地土壤碳密度依次为平远县>蕉岭县>兴宁县>梅江区>大埔县>梅县区>丰顺县>五华县。

梅州市林地土壤总碳储量为 14 316.62 万 t，五华县、丰顺县、大埔县和梅县区土壤碳储量相对较高，占全市碳储量的 64.58%，蕉岭县和梅江区的碳储量相对较低，碳储量贡献比分别为 7.56%、3.75%。梅州市各区（县）林地土壤碳储量依次为丰顺县>大埔县>五华县>梅县区>兴宁县>平远县>蕉岭县>梅江区。

3.3 梅州市林地土壤有机碳空间分布格局

梅州市不同土层土壤有机碳含量的空间分布如图 1 所示。L1 层（0~20 cm），梅州全境有机碳含量主要呈东高西低变化趋势，且随着土层的加深，

表 1 梅州市林地土壤有机碳状况  
Tab.1 The state of soil organic carbon on forest land in Meizhou city

| 地区<br>Region | 有机碳含量<br>/(g·kg <sup>-1</sup> )<br>Organic carbon content | 土壤养分等级<br>Soil nutrient<br>level | 最大值<br>/(g·kg <sup>-1</sup> )<br>Maximum value | 土壤养分等级<br>Soil nutrient<br>level | 最小值<br>/(g·kg <sup>-1</sup> )<br>Minimum value | 土壤养分等级<br>Soil nutrient<br>level | 变异系<br>数 /%<br>CV |
|--------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| 梅江区          | 9.19 ± 4.26ab                                             | Ⅳ                                | 21.27                                          | Ⅰ                                | 2.72                                           | Ⅵ                                | 46.43             |
| 梅县区          | 8.14 ± 4.79b                                              | Ⅳ                                | 34.05                                          | Ⅰ                                | 1.98                                           | Ⅵ                                | 58.86             |
| 平远县          | 10.48 ± 5.94a                                             | Ⅳ                                | 27.44                                          | Ⅰ                                | 1.28                                           | Ⅵ                                | 56.72             |
| 蕉岭县          | 10.28 ± 3.01a                                             | Ⅳ                                | 16.50                                          | Ⅱ                                | 4.32                                           | Ⅵ                                | 29.24             |
| 大埔县          | 8.43 ± 6.55b                                              | Ⅳ                                | 34.94                                          | Ⅰ                                | 0.88                                           | Ⅵ                                | 77.62             |
| 丰顺县          | 8.11 ± 4.15b                                              | Ⅳ                                | 23.64                                          | Ⅰ                                | 0.92                                           | Ⅵ                                | 51.16             |
| 五华县          | 6.48 ± 4.07c                                              | Ⅳ                                | 24.87                                          | Ⅰ                                | 1.36                                           | Ⅵ                                | 62.8              |
| 兴宁县          | 9.46 ± 5.34ab                                             | Ⅳ                                | 33.15                                          | Ⅰ                                | 1.57                                           | Ⅵ                                | 56.47             |
| 全市           | 8.41                                                      | Ⅳ                                | 34.94                                          | Ⅰ                                | 0.88                                           | Ⅵ                                | 60.7              |

注：不同小写字母表示不同区（县）间土壤有机碳含量的差异性（ $P<0.05$ ）。  
Note: different lowercase letters indicate the variability of soil organic carbon content among different districts (counties) ( $P<0.05$ ).

表 2 梅州市林地土壤碳密度与碳储量分布  
Tab.2 The distribution of soil carbon density and carbon stock on forest land in Meizhou City

| 地区 Region | 林分面积 / 万 hm <sup>2</sup><br>Forest area | 土壤碳密度 / (kg · m <sup>-2</sup> )<br>Soil carbon density | 土壤碳储量 / 万 t<br>Soil carbon storage | 碳储量占比 / %<br>Soil carbon storage ratio |
|-----------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|
| 梅江区       | 4.08                                    | 131.61 ± 61.1ab                                        | 536.97 ± 38.94d                    | 3.75                                   |
| 梅县区       | 18.17                                   | 116.68 ± 68.68b                                        | 2 120.06 ± 92.00bc                 | 14.81                                  |
| 平远县       | 10.76                                   | 150.13 ± 85.15a                                        | 1 615.43 ± 91.17c                  | 11.28                                  |
| 蕉岭县       | 7.35                                    | 147.28 ± 43.07a                                        | 1 082.54 ± 41.21d                  | 7.56                                   |
| 大埔县       | 19.72                                   | 120.81 ± 93.78b                                        | 2 382.45 ± 137.84ab                | 16.64                                  |
| 丰顺县       | 22.23                                   | 116.22 ± 59.46b                                        | 2 583.53 ± 89.12a                  | 18.05                                  |
| 五华县       | 23.27                                   | 92.78 ± 58.27c                                         | 2 159.08 ± 98.37b                  | 15.08                                  |
| 兴宁县       | 13.55                                   | 135.54 ± 76.54ab                                       | 1 836.56 ± 95.88c                  | 12.83                                  |
| 全市        | 119.13                                  | 120.44                                                 | 14 316.62                          | 100                                    |

注：不同小写字母表示不同区（县）间土壤有机碳密度的差异性（ $P<0.05$ ）。  
Note: different lowercase letters indicate the variability of soil organic carbon density among different districts (counties) ( $P<0.05$ ).

有机碳含量逐渐减少。东部地区有机碳含量普遍大于  $27.2\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，西部各地大部分地区有机碳含量低于  $22.8\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其他地区多在  $22.8\sim 27.2\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间。L2 层（20~40 cm），梅州全境有机碳含量主要呈东高西低变化趋势。东部地区有机碳含量普遍大于  $20.2\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，西部各地大部分地区有机碳含量低于  $14.0\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其他地区多在  $14.0\sim 20.2\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间。L3 层（40~60 cm），梅州全境有机碳含量主要呈东高西低变化趋势。东部地区有机碳含量普遍大于  $17.1\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，西部各地大部分地区有机碳含量低于  $10.4\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其他地区多在  $10.4\sim 17.1\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间。L4 层（60~80 cm），梅州全境有机碳含量主要呈东高西低变化趋势。东部地区有机碳含量普遍大于  $16.9\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，西部各地大部分地区有机碳含量低于  $10.4\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其他地区多在  $10.4\sim 16.9\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间。L5 层（80~100 cm），梅州全境有机碳含量主要呈中部高南北低变化趋势。中部地区有机碳含量普遍大于  $13.3\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，南北部各地大部分地区有机碳含量低于  $8.6\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其他地区多在  $8.6\sim 13.3\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间。

4 结论与讨论

梅州市林地土壤有机碳含量在  $6.48\sim 10.48\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间，平均值为  $8.41\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，土壤养分等级为 I 级~IV 级。梅州市各区（县）土壤有机碳

含量变异系数为 29%~78%，属中等变异程度，存在较大的差异，表现为平远县 > 蕉岭县 > 兴宁县 > 梅江区 > 大埔县 > 梅县区 > 丰顺县 > 五华县。本研究中梅州市土壤碳密度在  $92.78\sim 150.13\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  之间，平均值为  $120.44\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。远高于全国森林土壤有机碳密度<sup>[2]</sup>平均水平  $10.78\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。本研究表明，梅州市林地土壤碳含量空间分布格局为东高西地，且随着土层的加深，有机碳含量呈逐渐减少的变化趋势。森林土壤有机碳主要来源于林分凋落物的分解转化以及矿化分解<sup>[3, 15]</sup>，梅州市东北部地区地势较高，为生态保护区，相比较西南地区森林群落受人为活动影响小，森林凋落物的转化积累较高，一定程度增加了土壤有机碳来源，形成了现有的分布格局。

本研究对土壤碳储量的估算结果表明，梅州市林地土壤总碳储量为 14 316.62 万 t，各区（县）碳储量贡献值依次为丰顺县 > 大埔县 > 五华县 > 梅县区 > 兴宁县 > 平远县 > 蕉岭县 > 梅江区。森林抚育、造林等经营措施可以直接影响森林碳库，能够通过改变掉落物数量、化学性质及分解速率影响森林土壤碳库<sup>[2]</sup>。因此，有必要采取合理的森林经营模式，包括树种选择、森林抚育和森林采伐等措施以提高梅州市森林的固碳潜力，服务国家森林碳汇政策，实现碳中和目标。



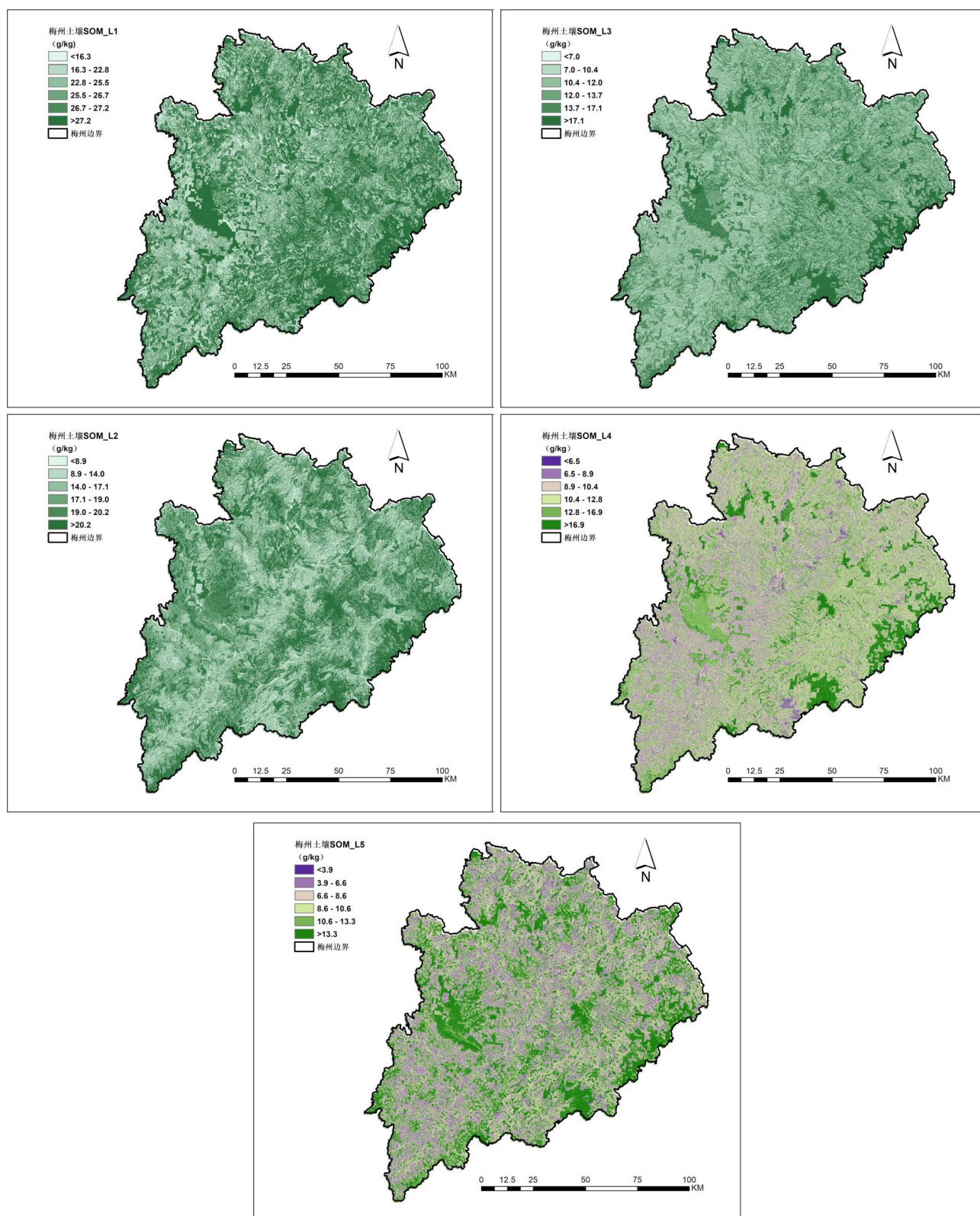


图 1 梅州市土壤有机碳空间分布

Fig.1 Spatial distribution of soil organic carbon on forest land in Meizhou city

## 参考文献

- [1] 朴世龙, 岳超, 丁金枝, 等. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用[J/OL]. 中国科学: 地球科学: 1-8 [2022-05-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5842.p.20220426.1635.002.html>.
- [2] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [3] 王艳丽, 字洪标, 程瑞希, 等. 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4096-4105.
- [4] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1217-1225.
- [5] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004(1): 35-43.
- [6] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003(1): 72-80.
- [7] 郑妍, 江瑶, 孙冬晓, 等. 华南沿海地区林地土壤养分空间异质性研究[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(6): 110-114.
- [8] 国家林业局. 森林土壤水分-物理性质的测定: LY/T 1215-1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [9] 国家林业局. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算: LY/T 1237-1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [10] 柳叶, 任悦, 高广磊, 等. 沙地樟子松人工林土壤碳氮磷储量分布特征[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(6): 27-34. DOI:10.16843/j.sswc.2021.06.004.
- [11] 全国土壤普查办公室. 全国第二次土壤普查暂行技术规程[M]. 北京: 农业出版社, 1979.
- [12] 代杰瑞, 庞绪贵, 董健, 等. 山东省土壤有机碳库及其时空变化特征[J]. 现代地质, 2017, 31(2): 386-393.
- [13] 陈利娜, 李小川, 丁晓纲, 等. 基于地统计学与GIS技术的森林土壤养分空间变异性研究[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(5): 14-21.
- [14] 杨子清, 陈平留, 刘健, 等. 基于Kriging法的森林土壤养分空间插值[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2012, 41(3): 296-300. DOI:10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.),2012.03.010.
- [15] 张广帅, 邓浩俊, 杜锬林, 等. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征: 以云南省小江流域为例[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 675-687.