

广东省土地利用及其变化和林业碳核算研究

吕国玮^{1,2}, 周建春³, 蔡玉梅³, 孟超⁴, 李升发^{5,6,7}, 陈伟莲^{5,6,7}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 三亚中国农业大学研究院, 三亚 572025;
3. 自然资源部国土空间规划研究中心, 北京 100812; 4. 中国土勘测规划院, 北京 100035;
5. 广东省科学院广州地理研究所, 广州 510070; 6. 广东省遥感与地理信息系统重点实验室,
广州 510070; 7. 广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广州 510070)

摘要: 土地利用及其变化和林业(LULUCF)是重要的碳源和碳汇, 探索建立高精度的LULUCF碳核算体系是推动土地低碳利用和精细管理的关键基础。本文以广东省为例, 采用库一差别法, 基于森林资源二类调查、土壤普查、土地利用等数据, 在地块尺度上系统核算了因LULUCF产生的碳源和碳汇。研究表明, 2018年广东省LULUCF碳汇为2967.3万t CO₂ a⁻¹, 其中生物量碳汇约占70%, 土壤碳汇约占30%, 提升土地植被盖度和加强林木经营是增加LULUCF碳汇最主要手段。相同地类不同地块的碳源或碳汇强度差异较大, 林地、湿地、耕地、建设用、草地等地类均可能出现跨碳源和碳汇类别的差异。土地利用“碳排放系数”为常数的碳核算方法难以满足“双碳”目标下土地利用的精细管理需要。本文提出的LULUCF碳核算综合了生物量及土壤碳库的变化, 满足履行《联合国气候变化框架公约》要求, 在全国范围具有适用性, 植被异速生长模型和土壤碳库年度变化分异图可支撑地块尺度土地利用碳源或碳汇多情景分析, 其核算结果可为土地利用和自然资源管理的低碳增汇政策制定提供参考。

关键词: 土地利用; LULUCF; 碳核算; 库一差别法; 广东省

DOI: 10.11821/dlxb202303009

1 引言

气候变化关系到人类的生存和发展。1992年《联合国气候变化框架公约》要求各缔约国按照可比性方法, 编制、更新并公布各类温室气体的人为源排放和汇清除的国家清单。联合国政府间气候变化委员会(IPCC)发布了1996年^[1]、2006年^[2]和2019年^[3]等不同版本的国家温室气体清单指南。清单核算类型包括能源^[4-7]、工业过程和产品使用^[7]、农业^[7]、土地利用及其变化和林业、废弃物5个部门。土地是陆地生态系统碳源或碳汇的自然载体, 土地利用及其变化和林业(Land Use, Land-use Change and Forestry, LULUCF)是碳源或碳汇核算(以下简称碳核算)的重要部门。2020年IPCC发布的《气候变化与土地》特别报告^[8]指出LULUCF既能成为碳源, 也能成为碳汇。例如, 2020年捷克、哈萨克斯坦、荷兰、丹麦等国LULUCF是净碳排放源, 美国、俄罗斯、澳大利亚、德国等国

收稿日期: 2022-04-08; 修订日期: 2023-02-07

基金项目: 中德国际合作项目(IATI7183770); 教育部哲学社会科学重大课题攻关项目(19JZD013); 中国土勘测规划院自然资源部土地利用重点实验室开放基金项目(2020-164-1) [Foundation: International Aid Transparency Initiative, No.7183770; Major Project of Philosophy and Social Sciences of the Ministry of Education of China, No.19JZD013; The Open Fund Project of the Key Laboratory of Land Use, Ministry of Natural Resources of China, No.2020-164-1]

作者简介: 吕国玮(1989-), 男, 重庆人, 讲师, 主要从事国土空间规划及空间经济学研究。E-mail: g.lyu@cau.edu.cn

通讯作者: 蔡玉梅(1970-), 女, 辽宁人, 研究员, 主要从事国土空间优化与治理研究。E-mail: caiyumei@263.net

LULUCF是净碳汇, LULUCF碳源或碳汇的空间异质性特征明显^[9], 存在很大不确定性, 如何整体性地碳核算并提升碳核算精度成为研究的热点。当前, 植被生物量异速生长的模拟、森林生物量碳汇的核算^[10-13]与预测^[14], 耦合遥感及地面监测技术的森林碳源碳汇核算^[15], 基于样地调查的地方化碳汇能力测算^[16-18]等是LULUCF碳核算研究的主要方向, 林地^[19-21]、草地^[22]的碳核算较成熟, 但耕地^[23]、湿地^[24]等其他土地利用类型的碳核算研究不足, 成果难以支撑所有土地利用类型的LULUCF碳核算。

作为《联合国气候变化框架公约》非附件I国家的缔约国, 中国在2020年明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标, 2021年中共中央、国务院印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》, 要求持续提升碳汇增量和碳汇能力。科学核算LULUCF碳汇并提高核算精度可为实现碳中和目标提供支撑。IPCC采纳的碳核算5个部门中, LULUCF是碳汇的主要来源, 国内符合IPCC框架的核算方法很少^[25]。例如, 研究土地整理对耕地土壤碳含量影响大小及其影响因素, 其成果因空间尺度太小而缺乏核算的参考价值^[23]。研究芦苇湿地在芦苇生长季的碳通量变化及影响因素, 其成果因核算期太短不符合LULUCF年度碳核算的规范^[24], 也缺乏参考价值。在省域、市域或流域尺度碳核算上, 基本采用土地利用“碳排放系数法”^[26-30], 该方法假定了每一类土地碳排放强度或强度区间^[31], 其碳核算的本质是土地利用结构的“碳排放系数”加权求和。其方法简单易操作, 但其碳核算结果精度不足。中国向联合国提交的历次(2004年、2012年及2017年)“气候变化国家信息通报”以及制定的《省级温室气体清单编制指南》(2011年)均遵循《IPCC国家温室气体清单指南》(1996年修订版)^[1, 32-33], 受数据和方法约束, LULUCF碳核算仅考虑了森林生物量碳库的变化, 即“森林和其他木质生物质碳储量变化”和“森林转化碳排放(燃烧、分解排放)”两部分, 未考虑土壤碳库、采伐木产品碳库及土地利用变化等部分, 难以满足LULUCF的全面核算以及“碳达峰碳中和”目标下土地利用和自然资源的精细管理需要。随着中国自然资源调查内容的丰富和精度的增加, 相关学科研究成果的进展, 为LULUCF碳核算提供了基础。探索系统性精细化的核算方法, 提高中国LULUCF碳核算的精度, 推进LULUCF低碳增汇土地利用和自然资源政策的制定, 具有重要现实意义。

本文参考IPCC关于LULUCF的国家温室气体清单指南2006年版^[2]及2019年版^[3], 采用多期土地利用、森林及土壤调查数据开展LULUCF碳核算, 旨在推进中国LULUCF碳核算方法, 支撑“双碳”目标的土地精细化管理。本文选择广东省作为研究区域, 有以下几方面的考虑。①广东省陆地地貌类型较多, 土地利用类型齐全, 包含了LULUCF碳核算的所有土地利用类型。②广东省是中国改革开放的前沿阵地, 改革开放以来建设用地快速扩张、大规模的林业工程和土地整理活动使土地利用发生了剧烈变化^[34], LULUCF产生的碳源或碳汇规模相对显著, 有利于采用“库一差别法”进行碳核算。③广东省省内社会经济发展存在较大差异, LULUCF产生的碳源或碳汇同样存在空间异质性, 具有一定典型性。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

广东省位于中国南部(20°09'N~25°31'N, 109°45'E~117°20'E), 属热带及亚热带季风气候, 据《广东自然资源年鉴2020》^[35], 广东省土地面积1797.25万hm², 其中耕地259.41万hm²、林地1001.13万hm²、园地125.72万hm²、牧草地0.31万hm²; 年平均降雨

量 1505.2 mm, 年平均气温 22.8 °C, 年日照 1766.5 h; 广东省森林面积 1052.41 万 hm², 其中林业用地上的森林面积 979.42 万 hm², 非林业用地上的森林面积 72.99 万 hm², 有林地占 86.31%, 疏林地占 0.19%, 灌木林地占 6.83%, 森林蓄积量 5.84 亿 m³, 植被优势种有杉木、马尾松、湿地松、黎蒴、木麻黄、速生相思等; 广东省社会经济发达, 土地利用强度高, 建设用地总规模 208.53 万 hm², 但省内市际差异显著, 建设用地总规模最大的广州市 19.49 万 hm², 最小的潮州市 4.49 万 hm²。

2.2 数据来源

广东省行政区划图及土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学环境数据中心 (<https://www.resdc.cn/Default.aspx>), 其中多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集^[36], 空间分辨率 0.1 km×0.1 km。广东省第四次森林资源二类调查 (2013—2016 年部分试点地市, 2017—2018 年全省域) 来源于广东省自然资源厅, 为矢量图层, 精确到林业小班尺度, 广东省有 2403557 个林业小班, 小班平均面积约 0.07 km²。全国第二次土壤普查数据广东部分 (1979—1985 年), 土壤有机碳含量、土壤容重等信息来源于世界粮农组织的 Harmonized World Soil Database^[37], 空间分辨率 0.25 km×0.25 km; 中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集广东部分^[38] (2010—2018 年), 土壤有机碳含量、土壤容重等信息来源于国家地球系统科学数据中心土壤分中心 (<http://soil.geodata.cn/>), 空间分辨率 1 km×1 km。

2.3 研究方法

2.3.1 库—差别法碳核算 用库—差别法核算 LULUCF 产生的碳源或碳汇量, 公式如下:

$$\Delta C_{LU_i} = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} + \Delta C_{LI} + \Delta C_{SO} + \Delta C_{HWP} \quad (1)$$

$$\Delta C = \frac{C_{t_2} - C_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中: ΔC_{LU_i} 是某类土地的年度碳库变化 (t C a⁻¹); C_{AB} 、 C_{BB} 是地上、地下部生物量碳库; C_{DW} 是死木碳库; C_{LI} 是枯枝落叶碳库; C_{SO} 是土壤碳库; C_{HWP} 是采伐的木产品碳库; C_{t_1} 是时间 t_1 的池内碳库量; C_{t_2} 是时间 t_2 的池内碳库量; t_1 至 t_2 时间段必须包含 2018 年。

本文重点核算生物量碳库及土壤碳库的年度变化量 (图 1), 因数据不可获得性未核算死木、枯枝落叶及采伐的木产品碳库的年度变化。该年度变化量乘以碳元素与 CO₂ 的转换系数 (44/12), 可以转换为以 CO₂ 质量计量的碳源或碳汇量。对生物量碳库的核算主要基于森林二类调查、植被异速生长模型及 IPCC 国家温室气体清单指南的参考值, 对土壤碳库的核算主要基于土壤普查及高分辨率国家土壤信息格网调查等成果。

本文参考《IPCC 国家温室气体清单指南》2006 年及 2019 年版, 各类型土地碳核算方法及数据来源汇总如表 1。

2.3.2 生物量碳库量及碳源或碳汇核算 对某一土地利用类型的土地 (表 2), 地上部及地下部生物量碳库及碳源或碳汇核算公式如下:

$$C_{(AB+BB)CO_2} = C_{AB+BB} \times (44/12) \quad (3)$$

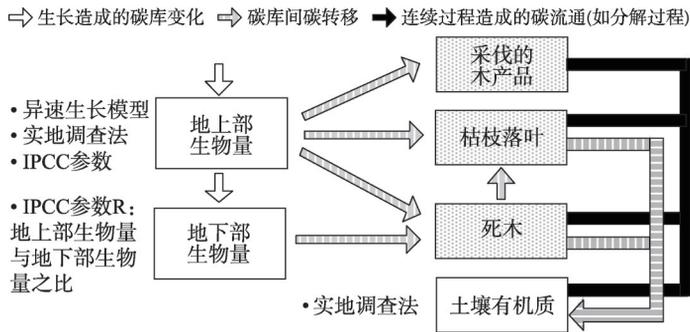
$$C_{AB+BB} = \sum (Area \times DryBioMass \times CF) \quad (4)$$

$$DryBioMass = BioMass_{AB} \times (1 + R) \quad (5)$$

$$BioMass_{AB} = Vol \times BCEF_s \quad (6)$$

$$Vol = Table(Treespec, Height, Diameter) \times OutP \quad (7)$$

$$\Delta C_{(AB+BB)CO_2} = \frac{C_{t_2(AB+BB)CO_2} - C_{t_1(AB+BB)CO_2}}{t_2 - t_1} \quad (8)$$



注：本文核算了白底框(地上部生物量、地下部生物量及土壤有机质)所示碳池的碳储量及其年度变化量(碳源或碳汇)。

图1 主要碳池碳流通及基于IPCC温室气体清单指南的核算方法

Fig. 1 Carbon flows between the major C pools and their accounting methods in accordance with IPCC guidelines

表1 土地利用及其变化以及林业的生物量、土壤碳核算方法与数据来源

Tab. 1 Accounting for annual carbon change in biomass and soil pools caused by LULUCF: Methods and data

地类	生物量碳源或碳汇量		土壤碳源或碳汇量		数据来源
	核算方法	数据时期	核算方法	数据时期	
林地	植被异速生长模型	2013—2016年 2017—2018年 2020年	土壤调查, 库一差别法	1979—1985年 2010—2018年	A, B, C, D, E, F
湿地	植被异速生长模型	2013—2016年 2017—2018年 2020年	土壤调查, 库一差别法	1979—1985年 2010—2018年	A, B, C, D, E, F
耕地	耕地“一年生”当年生物量碳源或碳汇设为0	2018年 2020年	土壤调查, 库一差别法	1979—1985年 2010—2018年	B, C, D, E
草地	草地“一年生”当年生物量碳源或碳汇设为0	2018年 2020年	土壤调查, 库一差别法	1979—1985年 2010—2018年	B, C, D, E
建设用地	建设用地当年生物量碳源或碳汇设为0	2018年 2020年	土壤调查, 库一差别法	1979—1985年 2010—2018年	B, C, D, E
林地转建设用地	森林资源二类调查, 库一差别法	2013—2016年 2017—2018年 2020年	地类转换当年土壤碳库变化不大, 当年碳源或碳汇量设为0	2018年	A, E, F
草地转建设用地	森林资源二类调查, 库一差别法	2013—2016年 2017—2018年 2020年	地类转换当年土壤碳库变化不大, 当年碳源或碳汇量设为0	2018年	A, E, F
耕地转林地	IPCC参考值, 植被异速生长模型, 库一差别法	2013—2016年 2017—2018年 2020年	地类转换当年土壤碳库变化不大, 当年碳源或碳汇量设为0	2018年	A, E, F
耕地转建设用地	IPCC参考值, 库一差别法	2018年 2020年	地类转换当年土壤碳库变化不大, 当年碳源或碳汇量设为0	2018年	E, F
其他类型土地	其他类型土地植被当年生物量碳源或碳汇设为0	2018年	土壤调查, 库一差别法	1979—1985年 2010—2018年	B, C, D, E

注：A为广东省第四次森林资源二类资源调查数据库(2013—2016年部分试点地市、2017—2018年全省域);B为全国第二次土壤普查数据广东部分(1979—1985年);C为中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集广东部分(2010—2018年);D为1979年广东省土地利用分类图;E为2018年广东省土地利用分类图;F为2020年广东省土地利用分类图。

表2 广东省LULUCF生物量碳核算方法及相关参数

Tab. 2 Accounting for annual biomass carbon change caused by LULUCF in Guangdong: Techniques and parameters

碳核算公式 及参数	用地类					
	林地、湿地	林地 转建设用地	草地转 建设用地	耕地转 建设用地	耕地 转林地	耕地、草地、 建设用地、 其他
$\Delta C_{(AB+BB)CO_2}$	公式(11)	公式(8)	公式(8)	公式(8)	公式(8)	0
$C_{t_2(AB+BB)CO_2}$		0	0	0	公式(3)、(4)	
$C_{t_1(AB+BB)CO_2}$		公式(3)(4)	公式(3)、(4)	公式(3)、(4)	公式(3)、(4)	
<i>DryBiomass</i>		林地: 公式(5)	草地: 公式(5)	耕地: <i>DryBiomass</i> =10	耕地: <i>DryBiomass</i> =10; 林地: 公式(5)	
<i>BioMass_{AB}</i>	公式(6)	林地: 公式(6)	草地: 按优 势种取值, 见表2		林地: 公式(9)	
<i>Vol</i>	公式(7)	林地: 公式(7)				
<i>B</i>	公式(9)				按广东全树种均 值取值, 见表2	
<i>VegaAge</i>	林业小班变量				<i>VegaAge</i> = $t_2 - t_1 = 2$	
<i>R</i>	若 <i>BioMass_{AB}</i> < 125, <i>R</i> =0.2; 若 <i>BioMass_{AB}</i> ≥ 125, <i>R</i> =0.24	若 <i>BioMass_{AB}</i> < 125, <i>R</i> =0.2; 若 <i>BioMass_{AB}</i> ≥125, <i>R</i> =0.24	1.6		0.2	
<i>CF</i>	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	
<i>BCEFS_s</i>	若 <i>Vol</i> ≤20, <i>BCEFS_s</i> =2.0; 若 21≤ <i>Vol</i> ≤40, <i>BCEFS_s</i> =1.0; 若 41≤ <i>Vol</i> ≤80, <i>BCEFS_s</i> =0.6; 若 <i>Vol</i> >80, <i>BCEFS_s</i> =0.4	若 <i>Vol</i> ≤20, <i>BCEFS_s</i> =2.0; 若 21≤ <i>Vol</i> ≤40, <i>BCEFS_s</i> =1.0; 若 41≤ <i>Vol</i> ≤80, <i>BCEFS_s</i> =0.6; 若 <i>Vol</i> >80, <i>BCEFS_s</i> = 0.4				
<i>Outp</i>	63%	63%				

注: *DryBiomass*、*R*、*CF*、*BCEFS_s*等值参考了《IPCC 国家温室气体清单指南》2006年版与2019年版; *B*值参考广东省本土化的植被异速生长建模结果及第四次森林二类调查均值(表2); *Outp*取值参考广东省森林资源调查常用数表、国务院批转国家林业局关于各地区年森林采伐限额审核意见国发[2005]41号; *VegaAge*、*Treespec*、*Hight*、*Diameter*等变量数值来源于广东省第四次森林二类调查结果; *BioMass_{AB}*的计算需要参考广东省森林资源调查常用数表(如广东省各林种的二元立木材积表)。

式中: $C_{(AB+BB)CO_2}$ 是以 CO_2 质量计量的生物量碳库量 ($t CO_2$); C_{AB+BB} 是生物量碳库地上部分和地下部分之和 ($t C$); *Area* 是保持相同土地利用类型的土地面积 (hm^2); *DryBioMass* 是生物量干物质密度 ($t hm^{-2}$); *CF* 是干物质的含碳比例; *BioMass_{AB}* 是植被地上干物质生物量密度 ($t hm^{-2}$); *R* 是地下部生物量与地上部生物量的比例; *Vol* 是出材蓄积量 ($m^3 hm^{-2}$); *BCEFS_s* 是将出材蓄积量转换为地上部生物量的生物量转化和扩展系数 ($t m^{-3}$); *Table* 是广东省主要树种二元立木材积表^[39], 可按 *Treespec* (植被优势种)、*Hight* (平均树高)、及 *Diameter* (平均胸径) 查阅获取优势种的立木蓄积量 ($m^3 hm^{-2}$); *OutP* 是出材率 (%); $\Delta C_{(AB+BB)CO_2}$ 是以 CO_2 计量的生物量碳汇值 ($t CO_2 a^{-1}$); $C_{t_2(AB+BB)CO_2}$

是 t_2 时期以 CO_2 质量计量的生物量碳库量 (t CO_2); $C_{t_1(AB+BB)\text{CO}_2}$ 是 t_1 时期以 CO_2 质量计量的生物量碳库量 (t CO_2); t_1 至 t_2 时间段必须包含核算年度 2018 年。

基于森林资源二类调查计算广东省植被地上生物量密度与植被平均年龄的关系。

$$\text{BioMass}_{AB} = \text{Vol} \times \text{BCEF}_s = B \times \ln(\text{VegaAge}) + \text{Interc} \quad (9)$$

$$\Delta \text{BioMass}_{AB} = \frac{B \times [\ln(\text{VegaAge} + 2) - \ln(\text{VegaAge})]}{2} \quad (10)$$

式中: BioMass_{AB} 是植被地上干物质生物量密度; VegaAge 是植被平均年龄; B 是植被地上干物质生物量密度与植被平均年龄拟合方程的系数; Interc 是拟合方程的截距, 汇总相同林业小班优势种(组)、相同植被平均年龄的植被地上干物质生物量密度的均值, 按异速生长曲线进行拟合^[40] (表 3); $\Delta \text{BioMass}_{AB}$ 是植被地上生物量密度均值的变化值。对于林地和湿地, 以 CO_2 计量的生物量碳汇值可以通过公式 (11) 核算。

$$\Delta C_{(AB+BB)\text{CO}_2} = \sum \left\{ \text{Area} \times \frac{B \times [\ln(\text{VegaAge} + 2) - \ln(\text{VegaAge})]}{2} \times (1 + R) \times \text{CF} \right\} \times (44/12) \quad (11)$$

表 3 按照植被优势种汇总的地上植被生物量密度均值与植被平均年龄的关系

Tab. 3 Relationships between average above-ground biomass density and vegetation age summarized by dominant species

植被优势种(组)	拟合公式或调查统计值(t hm^{-2})	R^2	B 值
杉木	$\text{BioMass}_{AB}=19.31 \times \ln(\text{VegaAge})-7.42$	0.74	19.31
马尾松(广东松)	$\text{BioMass}_{AB}=12.48 \times \ln(\text{VegaAge})-2.31$	0.86	12.48
湿地松(国外松)	$\text{BioMass}_{AB}=11.65 \times \ln(\text{VegaAge})+3.88$	0.78	11.65
黎蒴	$\text{BioMass}_{AB}=7.45 \times \ln(\text{VegaAge})+17.87$	0.48	7.45
木麻黄	$\text{BioMass}_{AB}=10.09 \times \ln(\text{VegaAge})+9.40$	0.49	10.09
速生相思	$\text{BioMass}_{AB}=9.30 \times \ln(\text{VegaAge})+14.30$	0.52	9.30
阔叶混交林	$\text{BioMass}_{AB}=11.10 \times \ln(\text{VegaAge})+1.73$	0.75	11.10
针阔混交林	$\text{BioMass}_{AB}=15.77 \times \ln(\text{VegaAge})-9.68$	0.72	15.77
针叶混交林	$\text{BioMass}_{AB}=15.17 \times \ln(\text{VegaAge})-5.91$	0.82	15.17
其它林产化工树	$\text{BioMass}_{AB}=18.37 \times \ln(\text{VegaAge})-12.45$	0.84	18.37
其它软阔	$\text{BioMass}_{AB}=13.30 \times \ln(\text{VegaAge})-4.42$	0.69	13.30
其它硬阔	$\text{BioMass}_{AB}=13.70 \times \ln(\text{VegaAge})-7.54$	0.75	13.70
其他无确定树种(广东全树种均值)	$\text{BioMass}_{AB}=10.39 \times \ln(\text{VegaAge})+3.45$	0.63	10.39
湿地植被组合(沿海防护林、湿地红树林)	$\text{BioMass}_{AB}=15.48 \times \ln(\text{VegaAge})+12.14$	0.43	15.48
草本(综合)	$\text{BioMass}_{AB}=2.25$		调查均值
芒箕	$\text{BioMass}_{AB}=4.79$		调查均值
蕨类	$\text{BioMass}_{AB}=2.79$		调查均值
大芒	$\text{BioMass}_{AB}=4.70$		调查均值
小芒	$\text{BioMass}_{AB}=3.31$		调查均值
杂草	$\text{BioMass}_{AB}=2.00$		调查均值

2.3.3 土壤碳库及碳源或碳汇核算 土壤碳库的变化反应在较长的时间尺度上^[41], 一般大于 20 a^[2], 按《IPCC 国家温室气体清单指南》2006 年版及 2019 年版, 可假设各个地类相互转换前后的当年土壤碳库没有变化, 本文仅核算了 1979—2018 年一直为某一类土地的土壤有机碳年均碳源或碳汇量, 其间隔期为 39 年 ($t_2 - t_1$)。

利用公式(12)可绘制1979—1985年和2010—2018年所调查的两期广东省1 km网格表层土壤有机碳地均密度图(图2、图3)。表层土壤有机碳地均密度图与广东土地利用图^[36](1979年及2018年)及行政区划图叠加,使用库—差别法(公式(12)~公式(15))^[42]可核算1979—2018年广东省各市各地类表层土壤有机碳碳源或碳汇量。依据公式(15)绘制1979—2018年以CO₂质量计量的30 cm深的表层土壤有机碳地均碳汇强度。

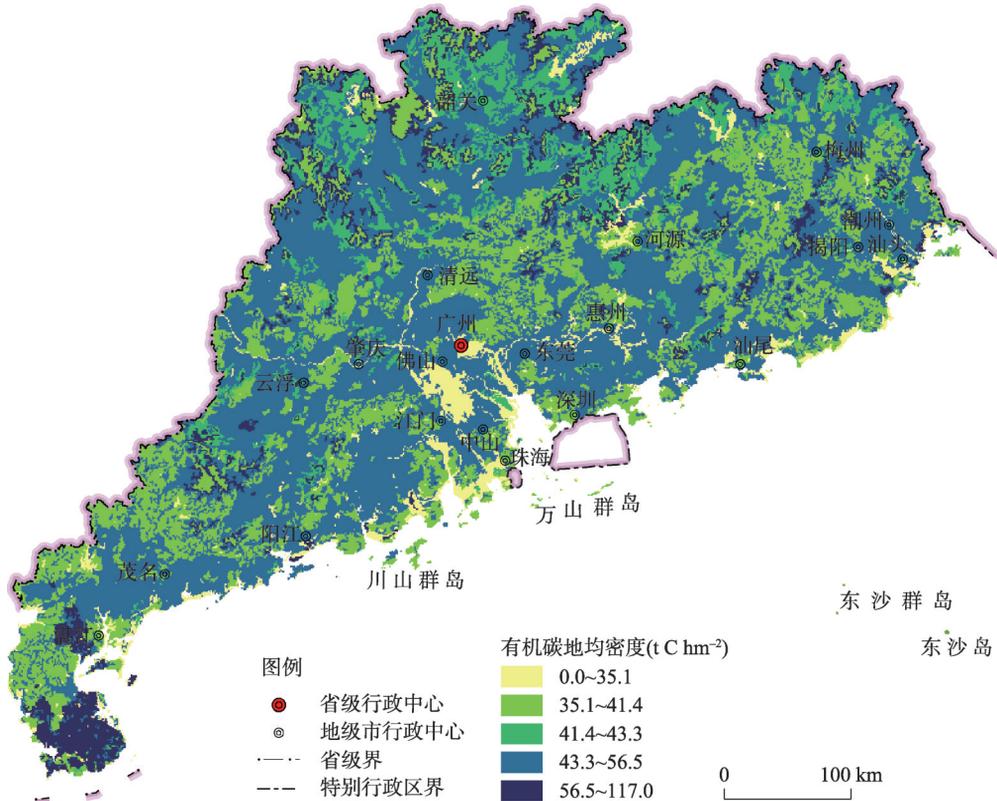
$$CDensity_{SO(d=30\text{ cm})} = 10000 \times \sum_i^n DenSo_i \times T_i \times SOC_i \quad (12)$$

$$C_{SO(d=30\text{ cm})CO_2} = CDensity_{SO(d=30\text{ cm})} \times AreaLand \times \left(\frac{44}{12}\right) \quad (13)$$

$$\Delta C_{SO(d=30\text{ cm})CO_2} = \frac{C_{t_2SO(d=30\text{ cm})CO_2} - C_{t_1SO(d=30\text{ cm})CO_2}}{t_2 - t_1} \quad (14)$$

$$\Delta C_{perArea}_{SO(d=30\text{ cm})CO_2} = \frac{C_{t_2SO(d=30\text{ cm})CO_2} - C_{t_1SO(d=30\text{ cm})CO_2}}{(t_2 - t_1) \times AreaLand} \quad (15)$$

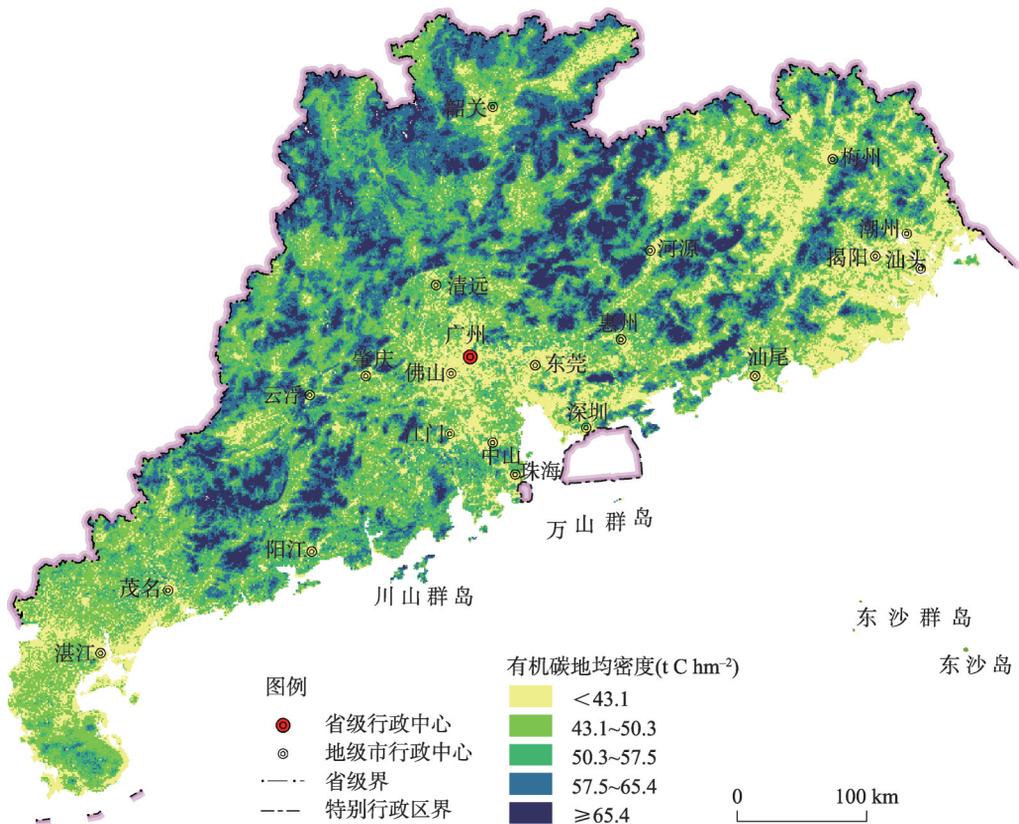
式中: $CDensity_{SO(d=30\text{ cm})}$ 是30 cm深的表层土壤有机碳地均密度 ($t\ C\ hm^{-2}$); $DenSo_i$ 是第 i 层去除 $>2\ mm$ 砾石的土壤容重 ($t\ m^{-3}$); T_i 是第 i 层土壤厚度 (m); SOC_i 是第 i 层土壤有机质含量 (%); $C_{SO(d=30\text{ cm})CO_2}$ 是以CO₂质量计量的30 cm深的表层土壤有机碳碳库量 ($t\ CO_2$); $AreaLand$ 是一直为某一地类的地块面积 (hm^2); $\Delta C_{SO(d=30\text{ cm})CO_2}$ 是1979—2018年以CO₂质量计量的30 cm深的表层土壤有机碳年均碳源或碳汇量 ($t\ CO_2\ a^{-1}$); t_2 为



注: 基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作,底图边界无修改。

图2 1979—1985年广东省表层土壤有机碳地均密度

Fig. 2 Average organic carbon stock per hectare of top soil in Guangdong from 1979 to 1985



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作,底图边界无修改。

图3 2010—2018年广东省表层土壤有机碳地均密度

Fig. 3 Average organic carbon stock per hectare of top soil in Guangdong from 2010 to 2018

2018年, t_1 为1979年, $t_2 - t_1 = 39$; $\Delta C_{perArea_{SO(d=30cm)CO_2}}$ 是1979—2018年以 CO_2 质量计量的30 cm深的表层土壤有机碳地均碳源或碳汇强度 ($t CO_2 hm^{-2} a^{-1}$), 如图4所示。

2.3.4 地均碳源或碳汇强度计算方法 LULUCF地均碳源或碳汇强度地块尺度计算公式:

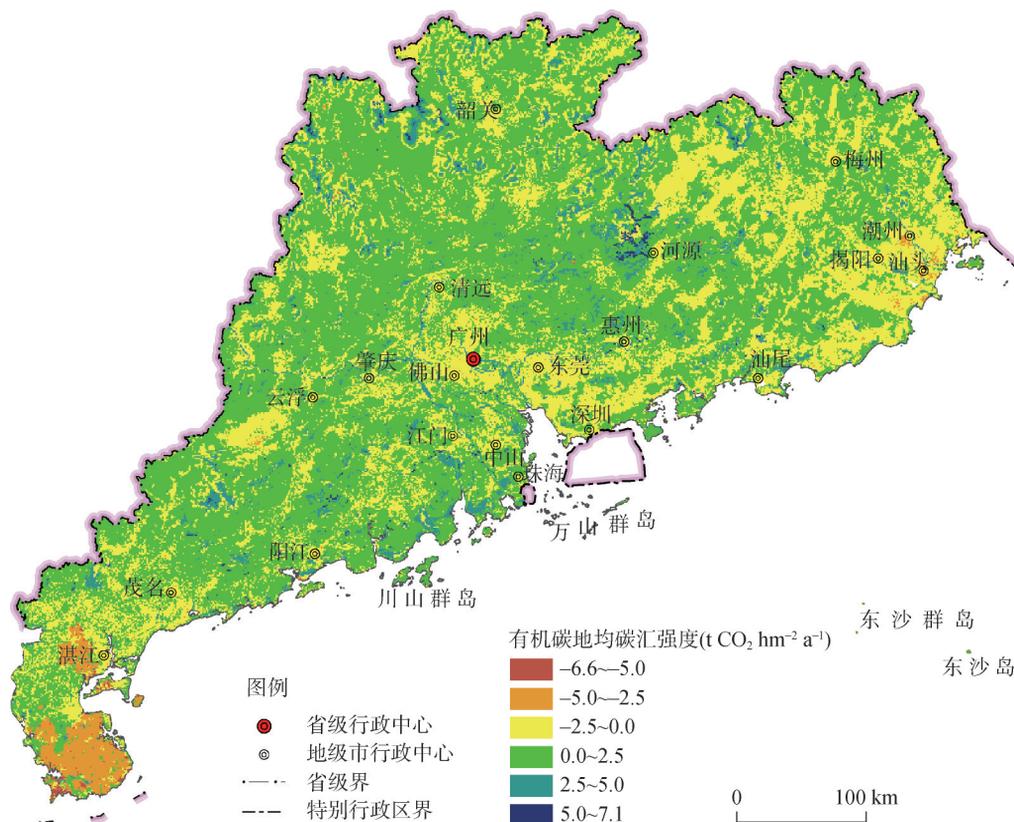
$$\Delta C_{perArea_{(AB+BB+SO)CO_2}} = \frac{\Delta C_{(AB+BB)CO_2}}{AreaLand_i} + \frac{\Delta C_{SO(d=30cm)CO_2}}{AreaLand_j} \quad (16)$$

式中, $\Delta C_{perArea_{(AB+BB+SO)CO_2}}$ 是广东省某一地块2018年因LULUCF所产生的地均碳源或碳汇强度 ($t CO_2 hm^{-2} a^{-1}$), 值为正是碳汇, 值为负是碳源; $\Delta C_{(AB+BB)CO_2}$ 是广东省某一地块2018年因LULUCF所产生的以 CO_2 计量的生物量碳源或碳汇值 ($t CO_2 a^{-1}$); $\Delta C_{SO(d=30cm)CO_2}$ 是广东省某一地块2018年因LULUCF所产生的以 CO_2 计量的表层土壤有机碳碳源或碳汇值 ($t CO_2 a^{-1}$); $AreaLand$ 是地块面积 (hm^2)。

3 结果分析

3.1 广东省LULUCF碳核算结果

从生物量碳源或碳汇看(表4), 广东省LULUCF生物量碳汇主要来源于林地碳汇及耕地转林地的碳汇, 碳排放主要来源于耕地转建设用地, 因林地转建设用地产生的碳排



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作，底图边界无修改；若地均碳汇强度为负值，即表层土壤有机碳是碳排放源。

图4 2018年广东省表层土壤有机碳地均碳汇强度

Fig. 4 Organic carbon sinks per hectare of top soil in Guangdong in 2018

放次之。其中，粤北山区的清远市、韶关市、河源市等林地面积较大的区域其林地生物量碳汇总量也较大，湛江市及茂名市因耕地转建设用地产生的年均生物量碳排量较高。

从土壤碳源或碳汇看（表5），1979—2018年，广东省林地土壤有机碳碳汇是表层土壤碳汇的主要来源，但湛江市林地表层土壤有机碳年度碳汇量为负值（ -3.0 万 $t CO_2 a^{-1}$ ），这可能跟湛江市“砍伐原始森林，大面积种植橡胶树，充分利用土地，导致土壤中有有机质逐渐降低”^[43]有关。广东省耕地和建设用地的表层土壤有机碳年均碳汇量有正值也有负值，但全省总值为负值，属于弱的碳源。耕地表层土壤有机碳年均碳汇量正负值的区域差异尤为明显，这可能与各地市农业管理、土地利用强度、水田旱地利用结构、有机肥料输入、土地退化^[2-3, 8]等空间分异有关。建设用地表层土壤有机碳年均碳汇值一般为负值（属于弱的碳源），这可能与建设用地覆盖封存的土壤有机碳在热带及亚热带季风气候下分解（图1）有关，但广州市建成区绿化覆盖率1979—2018年由23%持续增长至45%^[44]，建设用地表层土壤有机碳碳库年度变化量为正值（属于弱的碳汇），这可能与城市绿地表层土壤有枯枝落叶或死木有机碳输入，形成土壤碳汇有关。

生物量碳汇是LULUCF碳汇的主要形式，其次是土壤碳汇。广东省2018年度LULUCF碳汇年均值2967.3万 $t CO_2 a^{-1}$ ，其中生物量碳汇2120.5万 $t CO_2 a^{-1}$ ，土壤碳汇846.8万 $t CO_2 a^{-1}$ 。按地类，林地以及耕地转林地是LULUCF碳汇的最主要来源，林地转

表4 2018—2020年广东省LULUCF的生物量年均碳汇量(万t CO₂ a⁻¹)及面积(万hm²)Tab. 4 Annual averages of biomass carbon sinks (10 thousand tons of CO₂ per year) and their areas (10 thousand hectares) caused by LULUCF in Guangdong from 2018 to 2020

统计区	林地		湿地		林地转建设用地		草地转建设用地		耕地转林地		耕地转建设用地	
	碳汇	面积	碳汇	面积	碳汇	面积	碳汇	面积	碳汇	面积	碳汇	面积
广州市	43.3	22.1	0.03	0.01	-15.3	0.6	-0.2	0.02	13.4	2.8	-23.4	1.4
韶关市	337.6	110.3	0.03	0.03	-27.5	0.3	-0.5	0.05	36.9	7.7	-12.3	0.7
深圳市	6.9	4.7	0.00	0.00	-8.3	0.3	-0.1	0.01	1.4	0.3	-2.3	0.2
珠海市	3.9	3.2	0.01	0.01	-5.2	0.2	-0.3	0.03	1.2	0.2	-2.9	0.2
汕头市	6.7	2.9	0.02	0.06	-0.8	0.1	-0.3	0.03	2.6	0.5	-10.2	0.6
佛山市	16.9	5.1	0	0.02	-3.3	0.2	0.0	0.00	4.0	0.8	-16.3	1.0
江门市	107.2	31.7	0.04	0.08	-26.3	0.5	-0.3	0.03	23.9	5.0	-18.8	1.1
湛江市	63.9	11.7	0.41	0.9	-9.3	0.4	-0.1	0.01	51.0	10.6	-36.9	2.2
茂名市	113.1	43.4	0.07	0.22	-7.3	0.5	-0.1	0.01	37.4	7.8	-27.5	1.6
肇庆市	263.3	73.6	0.01	0.02	-99.1	0.4	-0.2	0.02	24.9	5.2	-10.7	0.6
惠州市	169.6	57.7	0.01	0.01	-33.1	0.6	-0.4	0.04	23.5	4.9	-17.6	1.0
梅州市	248.2	95.2	0.00	0.01	-12.0	0.3	-0.4	0.04	34.8	7.3	-9.0	0.5
汕尾市	49.8	14.8	0.03	0.2	-2.5	0.1	-0.9	0.09	7.9	1.6	-6.1	0.4
河源市	282.6	98.4	0.03	0.02	-7.3	0.3	-0.3	0.03	32.1	6.7	-4.7	0.3
阳江市	91.8	33.0	0.06	0.21	-20.7	0.3	-0.2	0.02	21.8	4.6	-11.7	0.7
清远市	302.3	102.4	0.04	0.05	-17.5	0.4	-0.5	0.05	43.1	9.0	-16.6	1
东莞市	4.7	3.0	0.00	0.00	-6.0	0.4	-0.3	0.03	1.0	0.2	-5.5	0.3
中山市	2.8	2.4	0.00	0.00	-5.5	0.2	-0.1	0.01	0.8	0.2	-5.5	0.3
潮州市	30.2	11.0	0.00	0.02	-1.6	0.1	-0.2	0.02	6.6	1.4	-8.2	0.5
揭阳市	55.7	16.5	0.01	0.01	-5.7	0.2	-0.4	0.04	11.3	2.4	-15.5	0.9
云浮市	120.2	41.8	0.00	0.00	-7.2	0.3	-0.3	0.03	17.7	3.7	-9.2	0.6
广东省	2320.9	785.3	0.80	1.88	-321.5	6.6	-6.1	0.61	397.4	82.9	-271	15.8

注:碳汇数值若为负值,则LULUCF是碳排放源。

建设用地以及耕地转建设用地是LULUCF碳源的主要来源。耕地和建设用地一般是弱碳源,草地和湿地一般为弱碳汇。

3.2 广东省LULUCF地均碳源或碳汇强度“一张图” 广东省2018年度LULUCF全省域地均碳汇强度 $1.7 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中耕地转林地(退耕还林且植树造林)的地均碳汇强度最大($4.8 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$),既有林地地均碳汇强度次之(林木生长及林地土壤有机碳累积, $3.9 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$),林地转建设用地(建设用地占用林地而毁林)的地均碳源强度最大($-48.7 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$),耕地转建设用地的地均碳源能力次之($-17.2 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。湿地($0.6 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)和草地($0.2 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)地均碳汇能力较弱,耕地($-0.1 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)和建设用地($-0.6 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)地均碳源能力较弱(表6)。

从空间分布上来看,广东省LULUCF地均碳源或碳汇强度存在较大空间分异(图5、表7)。如湛江市、江门市林地地均碳汇强度较高,珠海市、中山市林地地均碳汇强度较低;广州市湿地地均碳汇强度较高,其他地市湿地地均碳汇强度均较弱;耕地和草地地均碳汇有正值也有负值;绝大多数地市的建设用地的地均碳汇为负,即为碳源,而广州市建设用地的地均碳汇为正。

表5 1979—2018年广东省土地利用类型不变的地类土壤有机碳年均碳汇量(万 t CO₂ a⁻¹)及面积(万 hm²)
 Tab. 5 Annual averages of soil carbon sinks (10 thousand tons of CO₂ per year) and their areas (10 thousand hectares) caused by long-term land use in Guangdong from 1979 to 2018

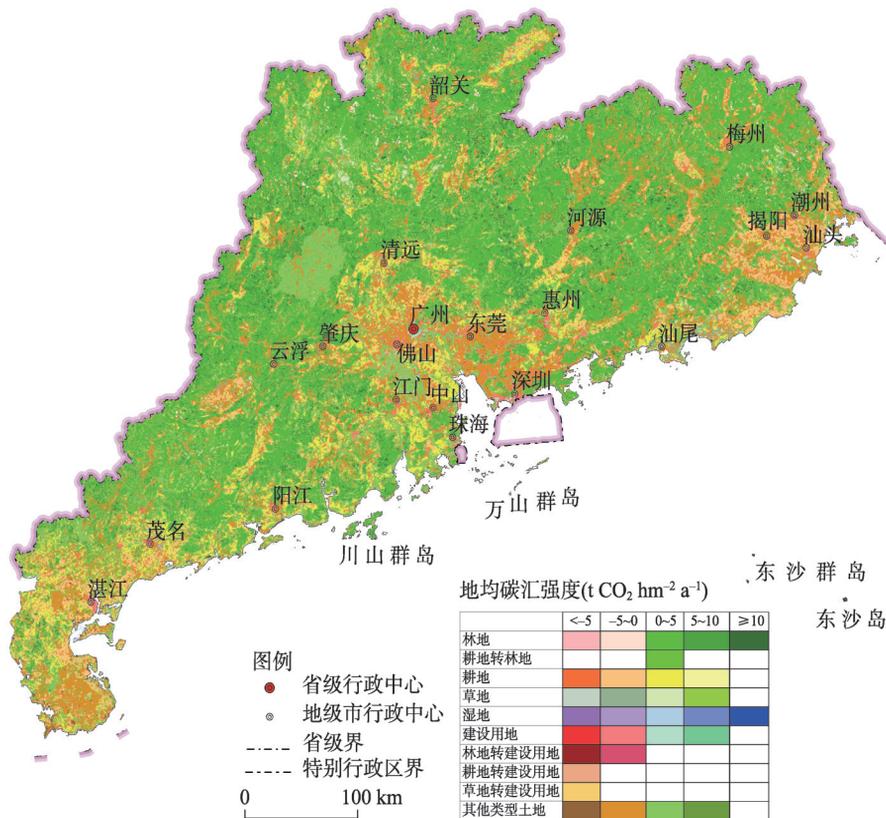
统计区	林地		耕地		草地		建设用地		湿地	
	碳汇	面积	碳汇	面积	碳汇	面积	碳汇	面积	碳汇	面积
广州市	29.3	19.9	3.9	13.6	0.1	0.1	1.0	2.7	0.00	0.00
韶关市	98.8	100.0	1.7	14.6	0.9	2.3	-0.3	0.5	0.00	0.01
深圳市	4.8	4.4	0.1	0.5	0.0	0.0	-1.6	2.0	0.00	0.00
珠海市	2.0	2.2	3.6	3.0	0.0	0.0	-0.1	0.4	0.00	0.00
汕头市	1.0	2.3	-5.3	5.3	0.0	0.4	-0.9	0.6	0.00	0.03
佛山市	4.3	4.6	0.5	6.2	0.0	0.0	-1.1	1.8	0.01	0.01
江门市	34.7	28.0	10.5	15.2	0.1	0.3	-0.4	0.9	0.00	0.02
湛江市	-3.0	7.5	-36.3	42.5	0.0	0.1	-1.1	1.1	0.02	0.26
茂名市	40.9	38.3	3.8	16.5	0.4	0.4	-0.5	0.9	0.01	0.12
肇庆市	59.7	69.4	1.7	9.9	0.1	0.4	-0.2	0.4	0.00	0.00
惠州市	67.4	54.0	2.8	15.6	0.1	0.3	-0.7	1.1	0.00	0.00
梅州市	46.0	87.4	-2.3	9.8	0.2	2.0	-0.4	0.4	0.00	0.02
汕尾市	10.9	13.0	0.7	7.9	-0.9	3.7	-0.3	0.2	0.08	0.13
河源市	82.4	91.2	-2.1	6.6	0.3	1.2	-0.3	0.2	0.00	0.00
阳江市	37.9	29.3	4.5	13.1	0.2	0.3	-0.4	0.4	0.00	0.08
清远市	104.9	93.2	5.5	19.3	3.0	4.0	-0.2	0.5	0.01	0.02
东莞市	2.5	2.5	-0.1	1.2	0.0	0.1	-1.7	1.8	0.00	0.00
中山市	2.1	2.0	3.1	3.9	0.0	0.0	-0.3	0.7	0.00	0.00
潮州市	2.1	9.1	-5.1	5.5	-0.1	0.4	-0.5	0.3	0.01	0.01
揭阳市	10.1	14.6	-7.6	12.7	0.0	0.8	-0.6	0.4	0.00	0.00
云浮市	38.0	38.5	-1.7	7.4	-0.3	0.8	-0.2	0.3	0.00	0.00
广东省	676.8	711.4	-18.1	230.3	4.1	17.6	-10.8	17.6	0.13	0.71

注：碳汇数值若为负值,则土地利用是碳排放源。

表6 2018年度广东省土地利用及其变化和林业碳汇年均值
 Tab. 6 Annual averages of carbon sinks caused by LULUCF in Guangdong in 2018

碳核算类别	面积 (万 hm ²)	生物量碳汇 (万 t CO ₂ a ⁻¹)	土壤碳汇 (万 t CO ₂ a ⁻¹)	总碳汇 (万 t CO ₂ a ⁻¹)	地均碳汇强度 (t CO ₂ hm ⁻² a ⁻¹)
林地					
生物量	785.3	2320.9	-		
土壤有机碳	711.4	-	676.8	2997.7	3.9
湿地					
生物量	1.9	0.8	-		
土壤有机碳	0.7	-	0.1	0.9	0.6
耕地	230.3	0.0	-18.1	-18.1	-0.1
草地	17.6	0.0	4.1	4.1	0.2
建设用地	17.6	0.0	-10.8	-10.8	-0.6
林地转建设用地	6.6	-321.5	0.0	-321.5	-48.7
草地转建设用地	0.6	-6.1	0.0	-6.1	-10.0
耕地转林地	82.9	397.4	0.0	397.4	4.8
耕地转建设用地	15.8	-271.0	0.0	-271.0	-17.2
其他类型土地	707.3	0.0	194.7	194.7	0.3
LULUCF 汇总	1790.8	2120.5	846.8	2967.3	1.7

注：碳汇数值若为负值,则LULUCF是碳排放源。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作,底图无修改;若地均碳汇强度为负,即LULUCF是碳排放源。

图5 2018年广东LULUCF地均碳汇强度

Fig. 5 Carbon sinks per hectare of each subcategory of LULUCF in Guangdong in 2018

4 讨论

(1) 生物量和土壤碳源或碳汇的影响因素众多、空间分异大^[2-3, 45]。以往“碳排放系数法”假定了每一类土地碳排放在不同空间都具有相同的系数^[26-30],没有考虑同一地类的空间分异。本文发现相同地类不同地块的地均碳源或碳汇强度分异较大(图5、图6),如林地既可能因林木生长及土壤有机碳累积形成较高水平的林地碳汇,也可能因林地土壤碳源高于林木生物量碳汇,形成林地碳排放源。这一结果也印证了Hong等对于林地土壤有机碳的发现^[46]。不同于土地利用“碳排放系数法”,本文以广东省为例,遵循《IPCC国家温室气体清单指南》2006年及2019年版及相应国际规范,采用库—差别法核算了地块尺度LULUCF碳源和碳汇,满足中国履行《联合国气候变化框架公约》要求,并能对标“公约”附件I国家的履约要求,具有重要的实践价值。

(2) 不同于“生态系统碳核算”^[16-17]倾向于核算“自然—社会”^[47]生态系统的全部碳源和碳汇,本文中的LULUCF碳核算更强调人为干扰或管理的LULUCF的碳源和碳汇,其核算的区域、范围、口径均小于“生态系统碳核算”,但LULUCF碳核算更加具有管理导向,更能为土地利用和自然资源管理的低碳增汇政策制定提供参考。如广东省的

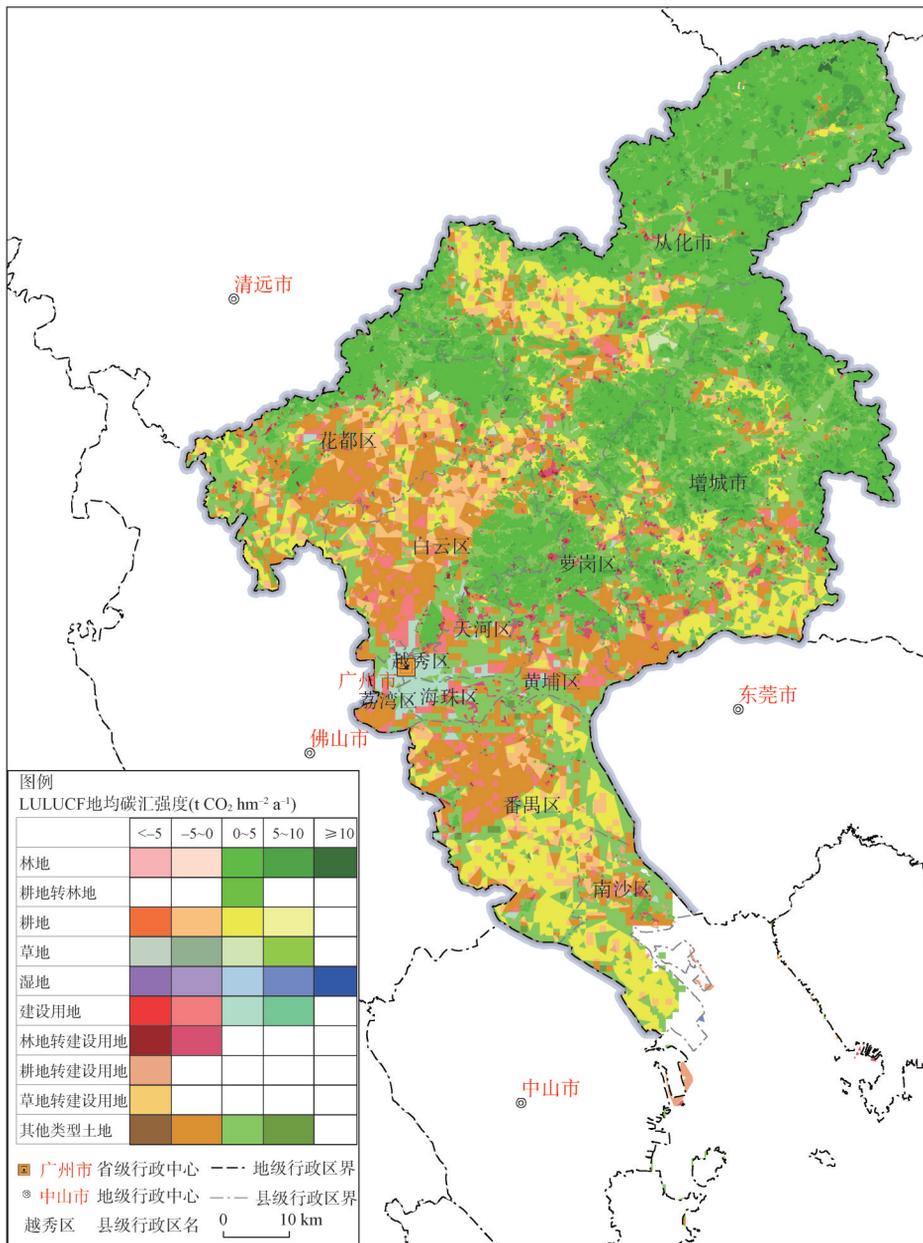
表7 2018年度广东省各地市主要土地利用及其变化和林地均碳汇强度($t CO_2 hm^{-2} a^{-1}$)
 Tab. 7 Carbon sinks per hectare of the major subcategories of LULUCF
 in each city of Guangdong in 2018 ($t CO_2 hm^{-2} a^{-1}$)

统计区	林地	湿地	耕地	草地	建设用地	林地转建设用地
广州市	3.4	3.0	0.3	1.0	0.4	-25.5
韶关市	4.0	1.1	0.1	0.4	-0.6	-91.7
深圳市	2.6	0.0	0.2	0.0	-0.8	-27.7
珠海市	2.1	0.0	1.2	0.0	-0.3	-26.0
汕头市	2.7	0.3	-1.0	0.0	-1.5	-8.0
佛山市	4.2	0.8	0.1	0.0	-0.6	-16.5
江门市	4.6	0.6	0.7	0.3	-0.4	-52.6
湛江市	5.1	0.5	-0.9	0.0	-1.0	-23.3
茂名市	3.7	0.4	0.2	1.0	-0.6	-14.6
肇庆市	4.4	0.5	0.2	0.3	-0.5	-247.8
惠州市	4.2	0.0	0.2	0.3	-0.6	-55.2
梅州市	3.1	0.2	-0.2	0.1	-1.0	-40.0
汕尾市	4.2	0.7	0.1	-0.2	-1.5	-25.0
河源市	3.8	1.5	-0.3	0.3	-1.5	-24.3
阳江市	4.1	0.3	0.3	0.7	-1.0	-69.0
清远市	4.1	1.2	0.3	0.8	-0.4	-43.8
东莞市	2.6	0.0	-0.1	0.0	-0.9	-15.0
中山市	2.2	0.0	0.8	0.0	-0.4	-27.5
潮州市	3.0	0.6	-0.9	-0.3	-1.7	-16.0
揭阳市	4.1	1.0	-0.6	0.0	-1.5	-28.5
云浮市	3.9	0.0	-0.2	-0.4	-0.7	-24.0
广东省	3.9	0.6	-0.1	0.2	-0.6	-48.7

注：碳汇数值若为负值，则LULUCF是碳排放源。

LULUCF碳核算发现杉木、林产化工树生长得较快(表2)，生物量碳汇能力较高，因此可加强高碳汇树种的培育。LULUCF碳核算发现广东省大多数树种在30~40 a林龄以后碳汇能力变弱，为形成稳定的碳汇，可有计划的采伐^[48]，加强林木年轻化经营。LULUCF碳核算发现不仅要关注转换为建设用地的土地总量，进行总量控制，还需要关注土地上的生物量碳汇强度，避免建设用地占用生物量碳汇强度高的土地。对于存量建设用地，可扩大绿地率及绿化率，形成建设用地土壤碳汇，管理上可把绿地率或绿化率作为“低碳城市”的考核指标。

(3) 本文受数据及核算方法所限，其结果存在一些不确定性。数据方面，因数据不可获得性，未核算“采伐的木产品”“枯枝落叶”及“死木”的碳源及碳汇；因森林调查与土地利用调查不完全匹配，部分地类或图斑缺失生物量信息，生物量碳源或碳汇的核算存在一定偏差；两期土壤调查的空间尺度不一致，会因尺度效应和空间再划效应产生统计误差。方法方面，采用森林二类调查的数据拟合植被生长曲线仅考虑了林地优势树种、植被平均年龄等因素，诸如立地条件、水热条件、土壤条件、人为管理措施、周边情况等可能因素^[2-3]暂未考虑；表层土壤有机碳碳源和碳汇的核算期采用了两期土壤调查间的最大时间间隔(1979—2018年)，属于土壤碳源或碳汇的保守估计。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为粤S(2018)121号的标准地图制作,底图边界无修改；若地均碳汇强度为负,即LULUCF是碳排放源。

图6 2018年度广州市LULUCF地均碳汇强度放大示例

Fig. 6 Carbon sinks per hectare of each subcategory of LULUCF in the zoomed-in case of Guangzhou in 2018

5 结论

精细化的LULUCF碳核算是“双碳”目标下土地利用和自然资源精细管理的重要基础。本文以广东省为例,采用库一差别法核算了地块尺度上的LULUCF碳源和碳汇,主要结论如下:

(1) 广东省LULUCF碳汇大部分是生物量碳汇,小部分是土壤碳汇,提升全域土地的植被盖度和加强林木经营是增加LULUCF碳汇最主要的手段。

(2) 相同地类不同地块的碳源或碳汇强度分异较大,林地、湿地、耕地、建设用地、草地等地类均可能出现跨碳源和碳汇类别的差异。土地利用“碳排放系数”为常数的碳核算方法难以满足“双碳”目标下土地利用精细管理需要。

(3) 本文提出的LULUCF碳核算方法综合了生物量及土壤碳库的变化,在全国范围具有适用性,可提高中国LULUCF碳核算的精度。植被异速生长模型和土壤有机碳地均碳源或碳汇分异图可用于地块尺度土地利用碳源或碳汇的多情景分析。其碳核算结果可为低碳增汇土地利用和自然资源管理政策的制定提供参考。

关联数据信息: 本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版,获取地址:<https://doi.org/10.3974/geodb.2023.03.01.V1>。

参考文献(References)

- [1] The Intergovernmental Panel on Climate Change. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>, 2021-01-01.
- [2] The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, 2021-01-01.
- [3] The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>, 2021-01-01.
- [4] Pan Jinghu, Zhang Yongnian. Spatiotemporal patterns of energy carbon footprint and decoupling effect in China. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 206-222. [潘竞虎, 张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应. *地理学报*, 2021, 76(1): 206-222.]
- [5] Zhao Rongqin, Yu Jiao, Xiao Liangang, et al. Carbon emissions of urban water system based on water-energy-carbon nexus. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(12): 3119-3134. [赵荣钦, 余娇, 肖连刚, 等. 基于“水—能—碳”关联的城市水系统碳排放研究. *地理学报*, 2021, 76(12): 3119-3134.]
- [6] Ma Li, Wang Jingxu, Zhang Didi, et al. Developing FFCO₂ emission inventory with high spatio-temporal resolution: Methodology and prospects. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 650-664. [马立, 王璟熙, 张迪迪, 等. 高时空分辨率FFCO₂排放清单的构建方法及研究展望. *地理学报*, 2022, 77(3): 650-664.]
- [7] Fang Kai, He Jianjian, Zhang Jiaqi. Analysis of the Bole- Taipei Line as the divide for regional coordinated development: Evidence from greenhouse gas emissions of Chinese cities. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(12): 3090-3102. [方恺, 何坚坚, 张佳琪. 博台线作为中国区域发展均衡线的佐证分析: 以城市温室气体排放为例. *地理学报*, 2021, 76(12): 3090-3102.]
- [8] The Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. <https://www.ipcc.ch/srcl/chapter/summary-for-policymakers/>, 2020-01-01.
- [9] The Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change. "GHG profiles" for individual annex I and non-annex I parties. https://di.unfccc.int/ghg_profile_annex1, 2021-06-01.
- [10] Vieilledent G, Vaudry R, Andriamanohisoa S F D, et al. A universal approach to estimate biomass and carbon stock in tropical forests using generic allometric models. *Ecological Applications*, 2012, 22(2): 572-583.
- [11] Chave J, Réjou-Méchain M, Búrquez A, et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 2014, 20(10): 3177-3190.
- [12] Xu Xinliang, Cao Mingkui, Li Kerang. Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China. *Progress in Geography*, 2007, 26(6): 1-10. [徐新良, 曹明奎, 李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究. *地理科学进展*, 2007, 26(6): 1-10.]
- [13] Romero F M B, Jacovine L A G, Ribeiro S C, et al. Allometric equations for volume, biomass, and carbon in commercial stems harvested in a managed forest in the Southwestern Amazon: A case study. *Forests*, 2020, 11(8): 874. DOI: 0.3390/f11080874.
- [14] Hu H F, Wang S P, Guo Z D, et al. The stage-classified matrix models project a significant increase in biomass carbon

- stocks in China's forests between 2005 and 2050. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11203. DOI: 10.1038/srep11203.
- [15] Jucker T, Caspersen J, Chave J, et al. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 177-190.
- [16] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *PNAS*, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [17] Tang Z Y, Xu W T, Zhou G Y, et al. Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems. *PNAS*, 2018, 115(16): 4033-4038.
- [18] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [19] Cao Xianlei, Zhang Ying. Analysis on the China certified emission reductions, economic value and its sensitivity of *Pinus Kesiya* var. *langbianensis* afforestation project in Yunnan province. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(2): 234-242. [曹先磊, 张颖. 云南思茅松碳汇造林项目减排量、经济价值及其敏感性分析. *生态环境学报*, 2017, 26(2): 234-242.]
- [20] Feng Yuan, Xiao Wenfa, Zhu Jianhua, et al. Impacts of afforestation on the carbon stocks and carbon sequestration rates of regional forest ecosystems. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(3): 281-290. [冯源, 肖文发, 朱建华, 等. 造林对区域森林生态系统碳储量和固碳速率的影响. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(3): 281-290.]
- [21] Li Chenyu, Zhu Jianhua, Zhang Feng, et al. Carbon sequestration capacity of Beijing arbor forest based on NbS. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(6): 13-22. [李宸宇, 朱建华, 张峰, 等. 基于NbS的北京市乔木林固碳能力分析. *北京林业大学学报*, 2021, 43(6): 13-22.]
- [22] Luo Wenrong, Hu Guozheng, Gao Qingzhu. Dynamic study on soil organic carbon reservoir in inner Mongolia grassland under grassland ecological management. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(12): 1588-1597. [罗文蓉, 胡国铮, 高清竹. 草地生态管理下内蒙古草地土壤有机碳库动态研究. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(12): 1588-1597.]
- [23] Zhang Shu, Jin Xiaobin, Yang Xuhong, et al. Determining and estimating impacts of farmland consolidation projects on the regional carbon effects. *Resources Science*, 2016, 38(1): 93-101. [张庶, 金晓斌, 杨绪红, 等. 农用地整治项目的碳效应分析与核算研究. *资源科学*, 2016, 38(1): 93-101.]
- [24] Wang Yongzhi, Liu Shenglin. Dynamic characteristics and influencing factors of carbon and water flux in reed wetland ecosystem in the Yellow River Delta. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(5): 949-956. [王永志, 刘胜林. 黄河三角洲芦苇湿地生态系统碳通量动态特征及其影响因素. *生态环境学报*, 2021, 30(5): 949-956.]
- [25] Guo Xiaomin, Chuai Xiaowei, Zhang Mei, et al. Spatio-temporal analysis of land-use change and the impact on terrestrial ecosystems carbon storage in Yangtze River City Group. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(2): 269-280. [郭晓敏, 揣小伟, 张梅, 等. 扬子江城市群土地利用时空变化及其对陆地生态系统碳储量的影响. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(2): 269-280.]
- [26] Wei Yanru, Chen Songlin. Spatial correlation and carbon balance zoning of land use carbon emissions in Fujian province. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5814-5824. [魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区. *生态学报*, 2021, 41(14): 5814-5824.]
- [27] Zheng Yongchao, Wen Qi. Change of land use and the carbon emission effect of Ningxia autonomous region. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(1): 207-212. [郑永超, 文琦. 宁夏自治区土地利用变化及碳排放效应. *水土保持研究*, 2020, 27(1): 207-212.]
- [28] Yang Haoran, Wu Qun. Dynamic simulation of carbon emissions from land use in Nanjing city under different policy scenarios. *Areal Research and Development*, 2021, 40(3): 121-126. [杨皓然, 吴群. 不同政策方案下的南京市土地利用碳排放动态模拟. *地域研究与开发*, 2021, 40(3): 121-126.]
- [29] Zhu Wenbo, Zhang Jingjing, Cui Yaoping, et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: A case study in Qihe River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 446-459. [朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估: 以太行山淇河流域为例. *地理学报*, 2019, 74(3): 446-459.]
- [30] Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Zheng Zeqing, et al. Land use change and its influence on carbon storage of terrestrial ecosystems in Jiangsu province. *Resources Science*, 2011, 33(10): 1932-1939. [揣小伟, 黄贤金, 郑泽庆, 等. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响. *资源科学*, 2011, 33(10): 1932-1939.]
- [31] Deng Xiangzheng, Jiang Sijian, Li Xing, et al. Dynamics of regional land uses affecting spatial heterogeneity of surface CO₂ concentration. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(4): 936-946. [邓祥征, 蒋思坚, 李星, 等. 区域土地利用影响地

- 表CO₂浓度异质性特征的动力学机制. 地理学报, 2022, 77(4): 936-946.]
- [32] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. The People's Republic of China Third national communication on climate change. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzkz/201907/P020190701762678052438.pdf>, 2019-07-01. [中国生态环境部. 中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzkz/201907/P020190701762678052438.pdf>, 2019-07-01.]
- [33] National Development and Reform Commission of China. Guidelines for greenhouse gas inventories at the provincial level of China. <http://gxdtrc.cn/h-nd-217.html>, 2021-09-24. [国家发展改革委. 省级温室气体清单编制指南(试行). <http://gxdtrc.cn/h-nd-217.html>, 2021-09-24.]
- [34] Yang Chao, Zhang Shaowei, Chen Wanxu, et al. Spatiotemporal evolution of information entropy of land use structure in Guangdong province. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 251-259. [杨超, 张少伟, 陈万旭, 等. 广东省土地利用结构信息熵时空演变特征分析. 水土保持研究, 2021, 28(6): 251-259.]
- [35] Chen Guangrong. Natural resource yearbook of Guangdong. <https://data.cnki.net/Yearbook/Single/N2021070167>, 2021-06-01. [陈光荣. 广东自然资源年鉴. <https://data.cnki.net/Yearbook/Single/N2021070167>, 2021-06-01.]
- [36] Xu Xinliang, Liu Jiyuan, Zhang Shuwen, et al. Multi-period land use and land cover remote sensing monitoring data set in China. <https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=264>, 2021-06-01. [徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC). <https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=264>, 2021-06-01.]
- [37] Nachtergaele F, Van-Velthuisen H, Verelst L. Harmonized World Soil Database. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>, 2009-01-01.
- [38] Liu feng, Zhang Ganling. The high resolution National Soil Information Grids of China (2010-2018). <http://soil.geodata.cn>, 2021-01-01. [刘峰, 张甘霖. 中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集(2010—2018). <http://soil.geodata.cn>, 2021-01-01.]
- [39] Guangdong Forestry Survey and Planning Institute. Standard volume table for main tree species in Guangdong. <https://www.renrendoc.com/paper/179392716.html>, 2021-12-27. [广东省林业调查规划院. 广东省主要树种二元立木材积表. <https://www.renrendoc.com/paper/179392716.html>, 2021-12-27.]
- [40] Cai Weixiang, Xu Li, Li Mingxu, et al. Imbalance of inter-provincial forest carbon sequestration rate (2010-2060) in China and its regulation strategy. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1808-1820. [蔡伟祥, 徐丽, 李明旭, 等. 2010—2060年中国森林生态系统固碳速率省际不平衡性及调控策略. 地理学报, 2022, 77(7): 1808-1820.]
- [41] Tong J H, Hu J H, Lu Z, et al. The impact of land use and cover change on soil organic carbon and total nitrogen storage in the Heihe River Basin: A meta-analysis. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(9): 1578-1594.
- [42] Dai Erfu, Zhai Ruixue, Ge Quansheng, et al. Topsoil organic carbon storage and its changes in Inner Mongolia grassland from the 1980s to 2010s. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(11): 1651-1660. [戴尔阜, 翟瑞雪, 葛全胜, 等. 1980s—2010s内蒙古草地表层土壤有机碳储量及其变化. 地理学报, 2014, 69(11): 1651-1660.]
- [43] Jia Lili, Zhu Xin, Zhao Yi, et al. Spatial and temporal variation of soil carbon storage and organic carbon content in Leizhou Peninsula, Guangdong province. Geology and Mineral Resources of South China, 2019, 35(3): 373-379. [贾黎黎, 朱鑫, 赵艺, 等. 雷州半岛土壤碳储量及其有机碳时空变化规律. 华南地质与矿产, 2019, 35(3): 373-379.]
- [44] Hu Zijian. China Urban Construction Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2019: 613-630. [胡子健. 中国城市建设统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2019: 613-630.]
- [45] Zhang Junhua, Zhu Lianqi, Li Guodong, et al. Spatial patterns of SOC/TN content and their significance for identifying the boundary between warm temperate and subtropical zones in China's north-south transitional zone. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(9): 2269-2282. [张俊华, 朱连奇, 李国栋, 等. 中国南北过渡带土壤碳氮空间特征及暖温带与亚热带界限. 地理学报, 2021, 76(9): 2269-2282.]
- [46] Hong S B, Yin G D, Piao S L, et al. Divergent responses of soil organic carbon to afforestation. Nature Sustainability, 2020, 3(9): 694-700.
- [47] Cui Yaoping, Li Nan, Fu Yiming, et al. Contribution of terrestrial carbon sink to future warming in China, the United States, Russia and Canada. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1): 167-177. [崔耀平, 李楠, 付一鸣, 等. 中美俄加陆域碳汇对人为增温的消减贡献. 地理学报, 2021, 76(1): 167-177.]
- [48] Zhu Jianjia, Dai Erfu, Zheng Du, et al. Characteristic of tradeoffs between timber production and carbon storage for plantation under harvesting impact: A case study of Huitong National Research Station of Forest Ecosystem. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1): 152-163. [朱建佳, 戴尔阜, 郑度, 等. 采伐影响下人工林木材生产与固碳功能权衡特征: 以湖南会同森林生态实验站为例. 地理学报, 2018, 73(1): 152-163.]

Carbon accounting for land use, land-use change and forestry in Guangdong province

LYU Guowei^{1,2}, ZHOU Jianchun³, CAI Yumei³, MENG Chao⁴,
LI Shengfa^{5,6,7}, CHEN Weilian^{5,6,7}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Sanya Institute of China Agricultural University, Sanya 572025, Hainan, China; 3. Research Center for Territory Spatial Planning, Ministry of Natural Resources, Beijing 100812, China; 4. China National Land Survey and Planning Institute, Beijing 100035, China; 5. Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China; 6. Guangdong Provincial Key Laboratory of Remote Sensing and Geographical Information System, Guangzhou 510070, China; 7. Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Land use, land-use change, and forestry, also known as LULUCF, are significant sources and sinks of carbon. A high-precision carbon accounting system for LULUCF should always be established as the primary building block for advancing low-carbon land use and sophisticated land management. This study uses the stock-difference method to account for carbon sources and sinks brought by LULUCF at the plot scale in Guangdong. According to the carbon accounting based on the surveys on soil, land use, and forest resources, Guangdong's LULUCF produced 29.673 million tons of carbon sinks in 2018, of which the biomass carbon sink contributed approximately 70% and the soil carbon sink around 30%. The major ways to increase LULUCF carbon sinks, therefore, are to increase plant cover and improve forest management. Different areas within the same land-use type have various carbon accounting values. Even within particular land-use types, such as forestland, wetland, cropland, settlements, and grassland, the carbon accounting values may fluctuate between being recognized as carbon sources and carbon sinks. In the era of reaching carbon peaking and carbon neutrality goals, it is difficult to meet the land-use management requirements with a carbon accounting technique assuming the carbon emission coefficient of every land-use type is constant. The carbon accounting of LULUCF in this study takes annual fluctuations in biomass and soil organic carbon pools into account, which complies with the United Nations Framework Convention on Climate Change criteria and is applicable on a national level in China. Meanwhile, the vegetation allometric growth model and the differentiation map of annual fluctuations of the soil carbon pool resulting from this study can be utilized to enable multi-scenario analyses of the carbon sources or sinks of lands at the plot scale. Finally, the results of the LULUCF carbon accounting offer some support for policymaking that emphasizes decreasing carbon sources and increasing carbon sinks in the management of land use and natural resources.

Keywords: land use; LULUCF; carbon accounting; stock-difference method; Guangdong province