◆健康保育与环境修复◆

零价铁改性生物炭对工业遗留场地土壤的固碳增汇效应

张　雪，虞　璐，李天佑，祖宇航

（北京工业大学 材料科学与工程学院，北京　100124）

［摘　要］我国工业遗留场地土壤有机碳库普遍严重损耗，已成为制约“双碳”目标落地的关键瓶颈之一。本研究以广东清远、浙江台州典型电子废弃物拆解工业遗留场地土壤为对象，通过盆栽实验构建土壤-作物全组分碳库核算体系，系统评估不同热解温度制备的零价铁改性生物炭的固碳增汇效应；同时耦合InVEST（Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs）模型建立点位实测与区域碳汇核算方法，实现材料固碳潜力从点位到农田尺度的空间量化与理论情景模拟。结果表明，700 ℃热解制备的零价铁负载生物炭固碳性能最优，可使清远和台州场地土壤有机碳含量较空白对照分别提升38.22%和108.45%，并同步显著提升地上与地下生物量碳库。固碳增益呈现显著区域分异特征，初始碳库退化越严重的场地，材料固碳提升效果越突出。本研究为工业遗留场地土壤固碳增汇提供了高效修复材料与情景评估思路，可为“双碳”目标下工业扰动场地的生态修复与碳汇提升提供科学支撑。

［关键词］改性生物炭；工业遗留场地；固碳效应；土壤有机碳；InVEST模型

［中图分类号］X53　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）08-0099-08

Carbon sequestration and sink enhancement effects of zero-valent iron-modified biochar in soils from industrial legacy sites

ZHANG Xue, YU Lu, LI Tianyou, ZU Yuhang

(*College of Materials Science and Engineering*, *Beijing University of Technology*, *Beijing* 100124, *China*)

Abstract: Severe depletion of soil organic carbon pools is prevalent in industrial legacy sites in China, which has become one of the key bottlenecks restricting the implementation of the “dual carbon” goals. Taking soils from typical electronic waste dismantling industrial legacy sites in Qingyuan, Guangdong province and Taizhou, Zhejiang province as research objects, this study constructs a soil-crop full-component carbon pool accounting system through pot experiments to systematically evaluate the carbon sequestration and sink enhancement effects of zero-valent iron-modified biochars prepared at different pyrolysis temperatures, and couples the InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) model to establish a method combining point measurements and regional carbon sink accounting, realizing the spatial quantification and theoretical scenario simulation of its carbon sequestration potential from point to farmland scale. Results show that the zero-valent iron-loaded biochar prepared at 700 ℃ exhibits the optimal carbon sequestration performance, increasing the soil organic carbon contents in Qingyuan and Taizhou sites by 38.22% and 108.45% respectively compared with the blank control, and simultaneously significantly enhancing the aboveground and belowground biomass carbon pools; The carbon sequestration gain shows significant regional differentiation, namely the more severe the initial carbon pool degradation, the more prominent the carbon sequestration improvement effect. This study provides efficient remediation materials and scenario evaluation approaches for soil carbon sequestration and sink enhancement in industrial legacy sites, and offers scientific support for the ecological restoration and carbon sink improvement of industrially disturbed sites under the “dual carbon” goals.

Key words: modified biochar; industrial legacy sites; carbon sequestration effect; soil organic carbon; InVEST model

收稿日期:2026-06-08

作者简介:张　雪(2002—　),女,山东济南人,在读硕士研究生,从事二氧化碳捕获吸附材料研究。

通信作者:虞　璐(1990—　),女,浙江舟山人,博士,副研究员,从事绿色环境修复材料研发与场地应用研究。

基金项目:北京市科技新星计划资助项目(20240484550);北京市自然科学基金资助项目(8232019)

随着我国城市化与工业化快速发展，大量工业遗留场地因长期生产活动和人为扰动，出现了严重的土壤有机碳库损耗问题[1]。这类场地的土壤结构退化与碳循环失衡，不仅削弱了陆地生态系统的固碳增汇潜力[2]，也与我国“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”[3]的“双碳”目标形成突出矛盾。工业遗留场地作为我国陆地生态系统中碳库退化最严重的用地类型之一，其土壤碳库的修复与提升，对区域碳汇增量与“双碳”目标的实现具有重要的现实意义。

生物炭是生物质在限氧条件下热解制备的富碳材料，其固有的高芳香化结构、发达孔隙结构与丰富的表面官能团[4]，使其成为土壤固碳增汇的理想材料。生物炭施入土壤后，可通过直接输入稳定外源碳、吸附固持土壤活性有机碳、优化土壤碳循环过程等多种路径，实现土壤有机碳库的长期稳定提升[5]。零价铁负载改性可进一步优化生物炭的理化结构与表面特性，现有研究已证实该改性方式可强化生物炭对土壤有机碳的固持能力[6]，在农田生态系统的固碳增汇中展现出良好的应用前景。

近年来，针对工业遗留场地等典型退化土壤，国内外学者探索了包括矿物基材料、高分子聚合物及改性生物炭在内的多种主流土壤修复材料。例如将生物炭、纳米材料等钝化剂与功能微生物联合施用，可长效降低土壤污染物的生物有效性[7]；以黄原胶和聚丙烯酰胺为代表的高分子材料能有效改善退化土壤微环境[8]；而铁改性生物炭则凭借其扩大的孔隙结构和丰富的表面含氧官能团，实现对土壤重金属和有机污染物的高效固定与降解[9]。

实际上，这类材料在实现场地土壤“脱毒”的同时，其理化特性也为土壤碳库的重建提供了得天独厚的条件。一方面，零价铁在土壤中氧化形成的铁氧化物，能够与土壤可溶性有机碳（Dissolved Organic Carbon，DOC）通过表面络合与共沉淀作用，形成高度稳定的“铁–碳复合体”，从而有效抵御微生物的矿化分解；另一方面，污染毒性的削减极大地恢复了土壤微生态活力，促进了植物生长，进而通过增加地上/地下生物量为土壤碳库提供了持续的外源碳输入。然而，在目前的工业扰动场景下，这类材料的应用评估几乎全部聚焦于其“污染削减”效应，鲜有研究系统关注并量化其在修复土壤基质的同时对“固碳增汇”的协同贡献。

尽管零价铁改性生物炭在土壤改良中展现出巨大潜力，但现有关于其固碳效应的研究仍存在明显的科学缺口：一是固碳研究场景存在局限。现有固碳潜力评估多集中于碳循环相对健康的自然农田或林地生态系统。对于工业遗留场地而言，长期的工业扰动彻底破坏了原有的土壤结构，导致土壤有机碳库遭受极度损耗。针对此类“极端碳退化”场景的固碳增汇研究仍较为匮乏，改性生物炭制备工艺对受扰动土壤固碳效应的调控规律与响应机制尚不清晰。二是固碳评估缺乏跨尺度耦合。现有研究多停留在实验室点位尺度的机制验证，尚未打通“点位实测微观碳指标”与“区域尺度宏观碳汇核算”的耦合路径，从而难以对改性生物炭在实际场地应用中的固碳潜力进行空间化、定量化的宏观情景模拟。InVEST模型是生态系统碳封存服务核算的核心工具[10]，已被广泛应用于矿山复垦、农田治理等场景的土壤碳汇潜力评估[11]，但该模型在工业遗留场地及周边受扰动农田改性生物炭固碳潜力的理论情景推演中，仍缺乏成熟的应用范式。

为系统研究不同热解温度制备的零价铁改性生物炭对工业遗留场地土壤的固碳增汇效应，本研究选取广东清远、浙江台州典型工业遗留场地的土壤为研究对象，构建了基于实测数据的土壤—作物全组分碳库核算体系，结合InVEST模型搭建点位实测数据与空间模拟的耦合方法，评估改性生物炭在场地及周边农田尺度的理论固碳潜力与空间分布特征。

1 材料与方法

1.1 实验材料

研究采用南京勤丰秸秆科技有限公司提供的玉米秸秆，供试作物为在当地农资市场购置的常规栽培小白菜种子，选取颗粒饱满、大小均一、无破损霉变的籽粒待用。实验所用化学试剂均为分析纯，包括七水合硫酸亚铁（$FeSO_4·7H_2O$）、硼氢化钠（$NaBH_4$）、尿素（$CO(NH_2)_2$）、磷酸二铵（$(NH_4)_2HPO_4$）、硫酸钾（K_2SO_4）、次氯酸钠（NaClO）、氯化钙（$CaCl_2$）。惰性材料石英砂规格为粒径0.15～0.30 mm，购自国药集团化学试剂有限公司。所有试剂均避光密封储存，使用前未进行额外纯化处理；实验过程中所用实验用水均为去离子水，满足各项实验精度要求。

供试土壤采自我国亚热带季风气候区典型电子废弃物拆解工业遗留场地，即浙江省台州市（121.4°E，28.6°N）、广东省清远市（113.1°E，23.6°N）电子废弃物拆解厂周边区域。其中浙江台州供试土壤使用环刀法测定容重均值1.3 g/cm^3[12-13]；广东清远供试土壤容重1.44 g/cm^3[14]。所有供试土壤经自然风

干、研磨过2.00 mm（10目）筛预处理，操作严格遵循《土壤环境监测技术规范》（HJ/T 166—2004），确保实验结果的准确性与可比性。

1.2　生物炭及改性材料制备

原始生物炭以玉米秸秆为原料，将秸秆用去离子水洗3遍，放入电热恒温鼓风干燥箱（DHG-9070A，上海一恒科技有限公司）60 ℃恒温干燥24 h；将烘干后的秸秆粉碎成小块，将小块秸秆分批放入破碎机进行粉碎，秸秆粉末过0.250 mm（60目）筛备用。过筛后秸秆粉末在无氧环境下采用程序升温模式处理，升温速率控制为10 ℃/min，分别在500 ℃和700 ℃下持续热解2 h，对应获得500 ℃原始炭和700 ℃原始炭。该热解程序可在保证生物炭芳香化结构稳定性的同时，保留丰富的孔隙结构与表面活性位点，是生物炭制备的通用优化工艺[15]。

改性生物炭通过化学还原法制备，具体流程为：将上述原始生物炭分别与七水合硫酸亚铁按炭铁质量比1∶2混合均匀，在25 ℃条件下置于恒温振荡器（RH-Q，常州荣华仪器制造有限公司）振荡24 h，随后经台式离心机（ThermoScientific，赛默飞世尔科技（中国）有限公司）分离获取固体组分，并以1滴/s的速率向固体组分中滴加硼氢化钠溶液进行还原反应，全程通入氮气维持无氧环境以保障反应效率。反应结束后，将产物真空冷冻干燥24 h处理，于4 ℃条件下密封保存备用。

1.3　实验方法

实验共设置6个处理组，每组3次重复，具体分组如表1所示。实验采用上口径19 cm、下口径17 cm、高17 cm的聚乙烯塑料花盆，每盆装2 kg预处理供试土壤，按组加入对应材料并混合均匀，材料添加量为土壤质量的1%（20 g），于温室陈化7 d，将中心区域土壤套上0.050 mm（300目）的尼龙袋，用于区分根际土和非根际土，期间维持土壤$w(H_2O)$为田间持水量的65%。陈化后每盆施尿素0.3 g/kg、磷酸二铵0.3 g/kg、硫酸钾0.3 g/kg作底肥，调节$w(H_2O)$至田间持水量的65%。选取饱满、均一的小白菜种子，经5%次氯酸钠消毒10 min、去离子水冲洗3次后，每盆播种8粒，置于25 ℃恒温温室培养，光照周期16 h/8 h（光/暗），光照强度300 μmol/(m²·s)。出苗7 d后间苗，每盆留长势一致幼苗2株，培养期间每2 d称量补水以维持土壤水含量，每3 d随机调整花盆位置，分别于播种后15 d的三叶期、30 d的生长期、45 d的成熟期采样分析。

土壤样品采集后立即进行可溶性有机碳（DOC）含量测定：称取5.00 g鲜土样品于100 mL离心管中，加入25 mL去离子水，在25 ℃、250 r/min恒温振荡1 h后，以3 500 r/min离心10 min；取上清液经0.45 μm滤膜过滤，滤液采用总有机碳（TOC）分析仪测定DOC含量。

表1　实验分组

Table 1　Experimental groups

分组	材料添加
K1	在500 ℃下热解的生物炭负载零价铁材料
K2	在700 ℃下热解的生物炭负载零价铁材料
K3	在500 ℃下热解的生物炭+石英砂对照组
K4	在700 ℃下热解的生物炭+石英砂对照组
K5	添加零价铁与石英砂混合物
K6	仅添加石英砂

注：材料添加量为土壤质量的1%。

1.4　模型方法与数据来源

本研究采用InVEST 3.16.2软件的碳储量模块对研究区陆地生态系统碳储量进行定量估算，它是由美国斯坦福大学、大自然保护协会和世界自然基金会联合开发，可用于评估不同土地覆被情景下生态系统服务物质量与价值量的变化[10]。该模块将陆地生态系统总碳储量划分为地上生物碳库、地下生物碳库、土壤碳库和死亡有机碳库4个核心碳库，其中地上生物碳库为地上所有存活植被（含树枝、树干、叶片等器官）中的碳储量，地下生物碳库为植物活性根系中的碳储量，土壤碳库为矿质土壤与有机土壤中的碳储量，死亡有机碳库为死亡植被及凋落物中的碳储量[16-17]。生态系统总碳储量（Ctotal）的计算公式为：

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}。\quad (1)$$

式中：C_{total}表示总碳储量；C_{above}表示地上生物碳储量；C_{below}表示地下生物碳储量；C_{soil}表示土壤碳储量；C_{dead}表示死亡有机碳储量。

土地利用类型数据采用武汉大学CLCD土地利用数据集通过ArcGIS软件进行重分类与掩膜提取，最终获得两个研究区各类土地利用类型的空间分布。

碳密度数据中农田生态系统的地上生物碳库、地下生物碳库及土壤碳库碳密度均由本研究实测数据换算得到（其中土壤碳库数据基于实测DOC数据换算），死亡有机碳库和农田外的其余所有土地利用类型的4个碳库对应的碳密度数据均提取自研究区所属两个区域的已发表研究成果[18-19]。两地区不同土地利用类型的碳密度如表2和表3所示。由

于InVEST模型碳储量模块的运行依赖于空间连续且结构完整的区域土地利用底图，为了维持区域生态系统在空间模拟上的完整性与连续性，本研究将森林、灌木丛、草地、水域、荒地、不透水面及湿地等非农田地类作为“区域静态生态本底矩阵”共同纳入模型。在不同处理组（K1至K6）的情景推演中，本研究仅对农田地类应用了盆栽实验实测的改性生物炭固碳增量参数，而其余所有非目标地类的碳密度在各组中均严格保持文献本底值不变，未纳入任何外推干预。因此，本文的空间模拟图谱是以整个区域生态系统作为宏观参照系，用以定量表征和孤立观察农田固碳增量在区域碳格局中的局部空间异质性与相对贡献率。

表2 广东省清远市不同土地利用类型的碳密度[18]

Table 2 Carbon densities of different land use types in Qingyuan city of Guangdong province t/hm²

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度
森林	35.10	7.02	99.00	4.71
灌木丛	1.40	6.02	102.60	2.48
草地	1.02	4.39	109.80	0.24
水域	0	0	0	0
冰雪区域	0	0	0	0
荒地	0	0	0	0
不透水面	1.20	0.93	12.48	0
湿地	1.22	0.54	29.03	0.16

表3 浙江省台州市不同土地利用类型的碳密度[19]

Table 3 Carbon densities of different land use types in Taizhou city of Zhejiang province t/hm²

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度
森林	36.3	7.3	125.8	3.4
灌木丛	0	0	0	0
草地	17.4	20.8	112.2	2.9
水域	0.3	0	81.1	0
冰雪区域	0	0	0	0
荒地	0	0	0	0
不透水面	16.2	3.2	73.0	0
湿地	0	0	0	63.5

土壤有机碳（Soil Organic Carbon，SOC）是评估农田生态系统固碳效应的核心指标，其含量通过原位实测的土壤可溶性有机碳进行半定量估算。DOC作为SOC库中周转最活跃的组分，其含量与SOC总量在特定土壤类型下具有稳定的定量关联[20]，该关联特征已被广泛应用于污染场地土壤有机碳库的大样本量快速评估。基于同类工业遗留污染场地土壤中DOC与SOC的稳定线性关联特征，参考已有研究针对同类型土壤确立的换算系数0.87%[20]，通过公式（2）（3）完成SOC含量的半定量估算：

$$w(\mathrm{DOC}_{干土})=\frac{成熟期鲜土w(\mathrm{DOC})}{1-土壤w(\mathrm{H_2O})};\quad(2)$$

$$土壤碳密度=\frac{w(\mathrm{DOC}_{干土})\times 土壤容重\times 土层深度\times 10}{R\times 10^6}。\quad(3)$$

本研究核心聚焦于不同修复材料处理下，土壤有机碳库的相对变化趋势与组间差异对比，所有土壤样品均采用完全一致的前处理、测定方法与换算系数，可有效消除系统偏差对组间对比结果的干扰，确保不同处理组间SOC变化规律、修复材料碳固持效应评估结果的可靠性与可比性。

地上/地下生物量碳库：作物生长状况是土壤修复效果的直观表征，测定核心指标包括根长与株高，通过直尺测量获取；鲜质量与干质量利用电子天平称量确定。地上生物碳量以小白菜22.5万株/hm²的典型种植密度为基础，利用小白菜地上部分和根部的干质量，并采用IPCC通用碳含量系数，地上部分取0.5，地下部分取0.4[21]，来获得农田生态系统地上、地下生物碳储量。

$$地上碳密度=\frac{单株地上干质量(g\cdot 株^{-1})\times 种植密度(株\cdot hm^{-2})\times 碳含量系数}{10^6};\quad(4)$$

$$地下碳密度=\frac{单株地下干质量(g\cdot 株^{-1})\times 种植密度(株\cdot hm^{-2})\times 碳含量系数}{10^6}。\quad(5)$$

死亡有机质碳库：由于盆栽实验尺度无法获取土壤死亡有机碳库的原位实测数据，本研究土壤死亡有机碳库参数采用文献调研法获取，收集已发表的学术论文[18-19]中针对浙江、广东典型农田土壤的碳库组分实测研究，选取与本研究区土壤类型、耕作方式、气候条件相近的实测均值作为模型输入参数。该方法为区域生态系统服务评估中参数赋值的通用做法，能够保证模型模拟结果的区域代表性与可靠性。

固碳效应的空间量化通过模型评估实现，将换算获得的碳库数据导入InVEST模型，结合广东清远和浙江台州标准化土地利用栅格数据，通过可视化分析呈现不同处理组的固碳空间分布特征，为固碳效应的横向对比提供直观支撑。

2 结果与讨论

2.1 碳指标

可溶性有机碳（DOC）是土壤有机碳的组成部分，虽然在土壤碳库中所占比例较小[22]，但因受

外部环境影响较大，在土壤中移动较快、易分解氧化，所以对土壤化学物质循环有着显著影响[23]，其动态变化可敏感指示土壤有机碳的固持稳定性，是评估土壤固碳效应的关键指标。

广东清远与浙江台州供试土壤在三叶期、生长期和成熟期的可溶性有机碳动态含量测定结果如图1所示。土壤可溶性有机碳含量随培养时间延长呈持续降低趋势，材料施用可有效固定土壤可溶性有机碳并抑制其分解，K1至K5处理组的可溶性有机碳降幅均显著低于空白对照组。材料对浙江台州根际土壤的固定效果更为突出，成熟期K1和K2处理组w（可溶性有机碳）分别仅下降49 mg/kg和86 mg/kg，仅为空白对照组绝对下降量的26.49%和46.49%，同期空白对照组绝对下降量达185 mg/kg。

零价铁改性生物炭对DOC的固持作用并非简单的物理吸附，而是通过化学结合形成高度稳定的铁–碳复合体。700 ℃热解制备的生物炭具有更高的芳香化程度和更发达的孔隙结构，为零价铁的负载提供了更多活性位点。零价铁在土壤中缓慢氧化生成的无定形铁氧化物，可与DOC中的羧基、羟基等官能团发生表面络合与共沉淀反应，将原本易被微生物分解的活性有机碳转化为稳定的矿物结合态有机碳。这种稳定化作用使得DOC的“表观下降量”减少，但实际上更多的活性碳被固定在土壤固相，直接贡献于SOC库的提升。这一微观机制正是K2组固碳性能最优的核心原因，也为后续InVEST模型中农田碳密度显著提升提供了坚实的实验支撑。

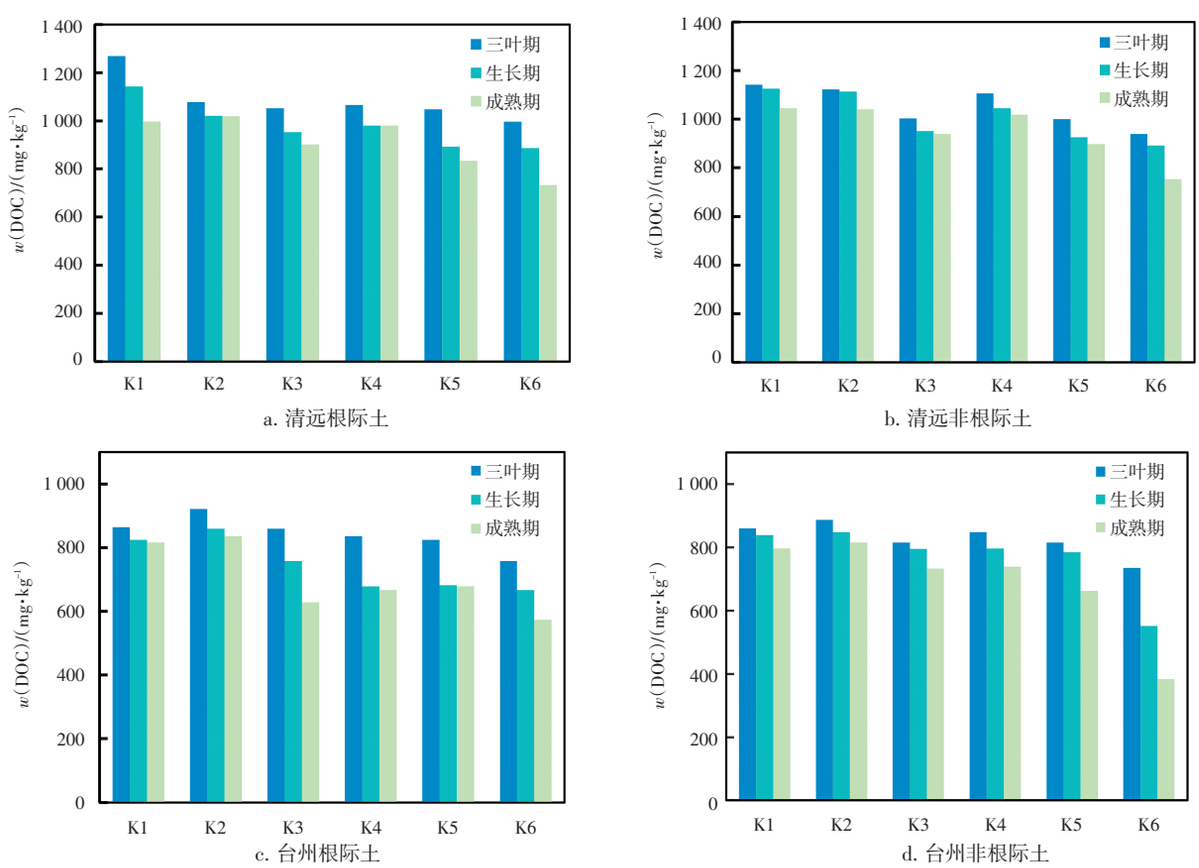

图1　土壤DOC含量在不同采样时期的动态变化

Fig. 1　Dynamic variations of soil DOC concentrations during different sampling periods

2.2　固碳效应量化与InVEST模型评估

长期工业污染扰动造成场地土壤碳库损耗，空白对照组K6在广东清远、浙江台州的农田土壤有机碳本底值分别仅为60.47 t/hm²和28.41 t/hm²，作物生物量碳库同样处于较低水平，充分反映了污染胁迫对农田生态系统固碳能力的显著削弱。生物炭及其改性材料的施用，可提升土壤有机碳库与作物生物量碳库，核心核算结果见表4。

原始生物炭施用可显著强化农田基础固碳能力。与空白对照组K6相比，广东清远K3、K4组土壤SOC分别提升24.74%和35.24%，浙江台州K3、K4组分别提升86.06%和88.00%，两地均表现为

700 ℃热解生物炭固碳效果更优。零价铁负载改性可进一步放大生物炭的固碳效应，与相同热解温度的原始生物炭相比，广东清远K1、K2组土壤SOC分别提升11.24%和2.20%，浙江台州K1、K2组分别提升9.53%和10.88%。其中K2组固碳性能最优，其SOC较空白组在广东清远提升38.22%，在浙江台州提升108.45%，地上与地下生物量碳库总量最高达空白组的6.78倍（广东清远）和7.09倍（浙江台州）。需要指出的是，该提升幅度是在盆栽控温控水、无自然淋溶损耗的最优条件下获得的理论峰值，在实际田间复杂环境中，其增量效果可能存在一定程度的折减。

表4 两地区不同处理组农田生态系统碳储量特征

Table 4 Characteristics of carbon stock in cropland ecosystems under different treatment groups in the two study regions t/hm²

处理组	土壤碳密度		地上碳密度		地下碳密度		死亡有机物碳密度	
	清远	台州	清远	台州	清远	台州	清远[18]	台州[19]
K1	83.91	57.90	1.55	4.33	1.31	2.13	0	2.4
K2	83.58	59.22	2.36	6.08	3.20	3.06	0	2.4
K3	75.43	52.86	1.47	1.87	1.11	1.14	0	2.4
K4	81.78	53.41	1.41	2.45	0.87	1.29	0	2.4
K5	71.96	48.11	0.90	0.91	0.33	0.50	0	2.4
K6	60.47	28.41	0.46	0.87	0.36	0.42	0	2.4

土地利用类型是驱动InVEST模型土壤碳模块运行的核心输入参数，其分类精度与空间分辨率直接决定了区域碳储量模拟结果的可靠性与空间表达能力。本研究采用武汉大学发布的2023年中国土地覆盖数据集（CLCD）作为基础数据源，该数据集基于多时相Landsat遥感影像与深度学习算法构建，空间分辨率为30 m，总体分类精度超过90%，已被广泛应用于国内生态系统服务评估、土地利用变化分析等领域。基于ArcGIS 10.8平台对原始数据进行预处理，依次完成研究区边界掩膜提取与土地利用类型重分类操作。结合研究区实际土地覆盖特征与InVEST模型输入要求，将原始30类土地覆盖系统归并为农田、森林、灌木丛、草地、水域、荒地和不透水面7个一级类型。为将盆栽点位实验结果拓展至区域尺度，验证改性生物炭的实际固碳应用潜力，本研究结合浙江台州与广东清远标准化土地利用栅格数据，通过InVEST模型土壤碳模块完成固碳效应的空间量化模拟，各处理组的农田区域总碳密度模拟结果如表5所示。

表 5 InVEST模型固碳效应模拟结果

Table 5 Simulation results of carbon sequestration effects based on the InVEST model t/hm²

处理组	清远总碳密度	台州总碳密度
K1	85.37	67.23
K2	88.54	71.29
K3	79.78	55.53
K4	84.02	57.64
K5	71.37	52.34
K6	60.73	37.02

两地模拟结果呈现高度一致的固碳效应梯度提升规律，区域总碳密度水平与材料固碳效能呈显著正相关。空白对照组（K6）中，广东清远与浙江台州的区域总碳密度分别仅为60.73 t/hm²和37.02 t/hm²，直观反映了长期电子废弃物拆解活动对区域生态系统碳库的整体破坏作用，且台州场地的初始碳库退化程度更为严重，与盆栽实验的土壤本底实测结果完全吻合。

原始生物炭处理组（K3、K4）可实现区域总碳密度的基础提升。与空白对照组K6相比，500 ℃热解生物炭处理组（K3）可使广东清远、浙江台州总碳密度分别提升31.4%和50.0%；700 ℃热解生物炭处理组（K4）对应提升幅度分别为38.3%和55.7%。两地均表现为700 ℃热解生物炭的固碳提升效果显著优于500 ℃处理，证实热解温度对生物炭固碳效应的调控规律在两个典型污染区域具有一致性。

零价铁负载改性对固碳效应的强化作用更为突出，改性生物炭处理组（K1、K2）可进一步驱动区域生态系统总碳储量的整体攀升。与相同热解温度的原始生物炭相比，广东清远K1、K2组总碳密度分别提升7.0%和5.4%，浙江台州K1、K2组分别提升21.1%和23.7%，零价铁负载改性对固碳的增益效应在初始碳库退化更严重的台州场地表现得更为显著。综合来看，两地均以700 ℃热解、炭铁质量比1∶2制备的改性生物炭（K2处理组）固碳增益最优，其总碳密度较空白组在广东清远提升45.8%，在浙江台州提升92.6%。

浙江与广东两地改性生物炭固碳效率的显著差异，深受土壤碳饱和亏缺（Carbon Saturation Deficit）与铁–碳耦合（Fe-C Coupling）机制的共同调控。首先，土壤理化性质决定了其对有机碳的最大保护容量，实际碳储量与该容量的差值即为“碳饱和亏缺”，亏缺越大的土壤固持新增碳的潜力越

高[24-25]。台州土壤本底碳密度为28.41 t/hm²，清远为60.47 t/hm²，前者较后者低53.02%，意味着其具有更大的碳捕获空间。另外，零价铁氧化生成的无定形铁氧化物比表面积大，通过吸附和共沉淀为有机碳提供了核心矿物载体[26]。相比较而言，在碳亏缺严重的台州土壤中，大量新增的铁结合位点与少量活性碳结合，形成了极低碳铁质量比的复合微环境，低碳铁比的铁结合态有机碳在面对微生物还原时稳定性更高，更难被释放矿化[26]。综上，台州场地巨大的碳饱和亏缺赋予了其对新增碳的极高捕获潜力，叠加零价铁诱导形成的低碳铁质量比强稳定固持效应，共同介导了台州远高于清远场地的固碳倍增机制。

从微观驱动机制来看，InVEST模型模拟的区域总碳密度提升，核心源于改性生物炭对农田土壤活性碳的强效固持作用。如2.1节所述，零价铁改性有效抑制了土壤DOC的快速氧化分解，通过形成稳定铁–碳复合体将活性有机碳转化为长效稳定的SOC，这一微观稳定化作用在区域尺度核算中，即直观转化为农田碳密度的显著提升，并最终拉高区域生态系统的整体总碳密度水平。从碳固持的内在机制进一步验证，Liu等[27]研究证实，热解制备过程中外源铁可通过铁氧化物的物理屏障与化学键合作用阻断小分子碳释放，使生物炭的碳保留率较原始炭提高12.2%～44.5%，综合碳稳定性后的最终碳封存率最高可达60.6%。本研究中，700 ℃零价铁改性生物炭在两地土壤中的SOC密度较同温度原始生物炭分别进一步提升了2.20%和10.88%，该结果与“铁负载强化碳结构稳定性、抵御微生物矿化”的理论机制高度吻合，印证了零价铁改性在固持活性碳、提升土壤碳汇持久性方面的核心优势。

为进一步评估本研究零价铁改性生物炭的固碳潜力，将其与近期同类研究结果进行横向量化对比。本研究中，700 ℃热解的零价铁改性生物炭使重度退化的工业遗留场地土壤有机碳最高提升达108.45%。相比之下，Wu等[28]采用水稻秸秆生物炭处理，使得供试土壤有机碳提升幅度随施用量升高从16.4%增至45.2%；Niu等[29]采用铁改性苹果木生物炭处理，使城市绿地SOC较空白对照组提升约104.62%；Qiu等[30]采用500 ℃限氧热解木屑生物炭处理，使磺胺嘧啶污染土壤SOC较空白对照组提升约81%。横向对比表明，针对碳库严重受损的极端扰动土壤，本研究制备的零价铁改性生物炭展现出更为突出的固碳弹性与增汇效能。

尽管该材料在受控条件下固碳性能优异，但其实际工程应用仍存在明显局限性。Yun等[31]开展的两年期田间研究表明，受土壤碳固持容量阈值、生物炭颗粒物理分异与自然矿化损耗等因素共同影响，常规生物炭的实际碳保留率（CRR）会随施用量增加，由61.6%显著折减至25.1%。本研究中108.45%的SOC增幅极值及InVEST模型模拟的区域碳密度峰值，均基于无自然淋溶的理想盆栽与情景假设条件。面对工业遗留场地复杂的野外气象、地表径流及长期环境胁迫，铁–碳复合体结构的长期抗淋溶性与实际碳损耗折减率，尚需依托长期原位田间试验做进一步的量化与修正。

3　结论

（1）生物炭施用可显著提升工业遗留场地农田生态系统碳库储量，零价铁改性进一步放大了固碳增汇效应。700 ℃改性生物炭处理下，浙江台州、广东清远农田土壤有机碳储量较空白组分别提升108.45%和38.22%，地上与地下生物量碳库总量最高达空白组的7.09倍和6.78倍。

（2）材料固碳增益呈现显著的区域分异特征，初始碳库损耗越严重的场地，改性生物炭的固碳提升效果越突出，证实该材料在严重碳退化工业遗留场地中具备更优的应用潜力。

（3）InVEST模型空间模拟基于盆栽可控条件的理论情景推演，初步建立了工业遗留场地及周边污染农田改性生物炭固碳潜力的评估思路，其实际规模化工程应用的效能仍需未来田间中试的进一步验证。

4　研究局限性与展望

本研究旨在初步构建工业遗留场地土壤固碳潜力的评估思路，但受限于实验条件与模型参数，仍存在一定的局限性：一是DOC向SOC的换算采用单一经验系数，未考虑改性材料孔隙吸附等界面作用对二者分配比例的影响；二是受限于InVEST模型的静态参数设定，死亡有机质碳库统一采用文献固定均值，割裂了生物量增长通过凋落物、根系周转向土壤碳库传递的动态过程，无法真实表征凋落物增加带来的固碳增益，最终在一定程度上低估了改性材料的实际总固碳潜力；三是存在尺度外推与空间模拟偏差，盆栽可控环境下的模拟结果偏向理想状态，难以直接适配大尺度野外的复杂环境，且核心区固碳参数的等效空间外推也无法实现全域绝对碳汇的精准核算。

后续研究可采用重铬酸钾氧化法实测SOC值，

以修正换算系数，引入动态碳循环模型耦合生物量与土壤碳库的传递过程，优化碳库动态核算；细化不同退化梯度土壤的差异化固碳响应参数，缩小空间模拟与实际工程间的误差；开展长期田间中试，客观验证该技术在真实复杂场地环境中的固碳增汇效能。

[参考文献]

[1] Xu Fangjin, Zhao Shaqing, Li Shuangcheng. Dynamic responses of soil organic carbon to urbanization: a global perspective[J]. Global Change Biology, 2024, 30(11): e17573.

[2] 雷少刚,王维忠,李园园,等.北方大型露天矿区土壤有机碳库扰动与恢复研究[J].煤炭科学技术,2023,51(12):100-109.
Lei Shaogang, Wang Weizhong, Li Yuanyuan, et al. Study on disturbance and restoration of soil organic carbon pool in large-scale open-pit mining areas in Northern China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 100-109.

[3] 李政,张东杰,潘玲颖,等."双碳"目标下我国能源低碳转型路径及建议[J].动力工程学报,2021,41(11):905-909,971.
Li Zheng, Zhang Dongjie, Pan Lingying, et al. Low-carbon transition of China's energy sector and suggestions with the "carbon-peak and carbon-neutrality" target[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(11): 905-909,971.

[4] Biswal B K, Balasubramanian R. Use of biomass-derived biochar as a sustainable material for carbon sequestration in soil: recent advancements and future perspectives [J]. npj Materials Sustainability, 2025, 3(1): 1-27.

[5] Wei Yang, Gary F, Dana M, et al. Impact of biochar on greenhouse gas emissions and soil carbon sequestration in corn grown under drip Irrigation with mulching[J]. Science of the Total Environment, 2020, 729: 138752.

[6] Duan Xun, Yu Xiaofei, Li Zhe, et al. Iron-bound organic carbon is conserved in the rhizosphere soil of freshwater wetlands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 149: 107949.

[7] 谢江雁,王子豪,梁红怡,等.微生物修复镉污染设施土壤:机制、技术与应用前景[J/OL].生态与农村环境学报,1-22. http://doi.org//0.19741/j.issn.1673-4831.2025.0373.
Xie Jiangyan, Wang Zihao, Liang Hongyi, et al. Mechanisms, technologies, and application prospects of microbial remediation of cadmium-contaminated greenhouse soils [J/OL]. Journal of Ecology and Rural Environment, 1-22. http://doi.org//0.19741/j.issn.1673-4831.2025.0373.

[8] 乔聪,赵三欣,侯雅东,等.高分子材料对矿区土壤及植物生态修复的影响和机理研究[J].矿产综合利用,2025,46(5):196-203.
Qiao Cong, Zhao Sanxin, Hou Yadong, et al. Effects of soil fixing polymer materials on the adaptability of herbaceous plants in dryland soil[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(5): 196-203.

[9] 宋佩佩,马文静,王军,等.铁改性生物炭的制备及其在重金属污染土壤修复技术中的应用进展[J].环境工程学报,2022,16(12):4018-4036.
Song Peipei, Ma Wenjing, Wang Jun, et al. Preparation of iron-modified biochar and its application in heavy metal contaminated soils [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(12): 4018-4036.

[10] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4-11.

[11] Shi Xiaoliang, Zhang Jie, Liu Simin, et al. Impact of land use change on carbon storage in the middle reaches of the Yellow River, China[J]. Journal of Arid Land, 2025, 17(2): 167-181.

[12] 王丽丽,周通,李柱,等.土壤紧实度对伴矿景天生长及镉锌吸收性的影响研究[J].土壤,2017,49(5):951-957.
Wang Lili, Zhou Tong, Li Zhu, et al. Effects of Soil Compaction on Phytoextraction of Cadmium and Zinc Polluted Soils by Sedum plumbizincicola[J]. Soils, 2017, 49(5): 951-957.

[13] 姚自力.基于薯土梳刷分离的轻量化番薯收获机设计与试验研究[D].杭州：浙江农林大学，2024.
Yao Zili. Design and experimental study of lightweight sweet potato harvester based on potato soil combing and brushing separation[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2024.

[14] 吕德鹏,张思毅,贺斌,等.粤北红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤大孔隙与水分入渗特征研究[J].土壤通报,2023,54(6):1290-1298.
Lv Depeng, Zhang Siyi, He Bin, et al. Characteristics of Soil Macropore and Water Infiltration under Different Land Use in Hilly Red Soil Region of Northern Guangdong [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(6): 1290-1298.

[15] Li Lidong, Long A, Fossum B, et al. Effects of pyrolysis temperature and feedstock type on biochar characteristics pertinent to soil carbon and soil health: a meta-analysis[J]. Soil Use and Management, 2023, 39(1): 43-52.

[16] 刘冠,李国庆,李洁,等.基于InVEST模型的1999—2016年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J].干旱区研究,2021,38(1):267-274.
Liu Guan, Li Guoqing, Li Jie, et al. Study on change in carbon storage and its spatial pattern in Mata Watershed from 1999 to 2016 based on InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 267-274.

[17] Imran M, Din N U. Geospatially mapping carbon stock for mountainous forest classes using InVEST model and Sentinel-2 data: A case of Bagrote valley in the Karakoram range[J].Arabian Journal of Geosciences,2021,14(9): 1-12.

[18] 唐娇华,李智琦,潘勇军.广州市土地利用变化与碳储量模拟——基于PLUS-InVEST模型分析[J].中国城市林业,2024,22(4):61-68.
Tang Jiaohua, Li Zhiqi, Pan Yongjun. Simulation of Land Use Change and Carbon Storage in Guangzhou Based on the PLUS-InVEST Model [J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2024, 22(4): 61-68.

[19] 徐彩瑶,任燕,孔凡斌.浙江省土地利用变化对生态系统固碳服务的影响及其预测[J].应用生态学报,2023,34(6):1610-1620.
Xu Caiyao, Ren Yan, Kong Fanbin. Impacts and prediction of land use change on ecosystem carbon sequestration in Zhejiang Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(6): 1610-1620.

（下转第119页）