

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.03.041

CSTR:32311.14.rswc.2026.03.041

段承龙, 贺毓桓, 刘鹏, 等. 湖南酸性岩溶耕地土壤对外源钙碳添加的响应[J]. 水土保持研究, 2026, 33(3):229-238.

Duan Chenglong, He Yuhuan, Liu Peng, et al. Response of acidic karst farmland soil in Hunan to exogenous calcium and carbon addition[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(3):229-238.

湖南酸性岩溶耕地土壤对外源钙碳添加的响应

段承龙¹, 贺毓桓¹, 刘鹏¹, 曾根¹, 张灵嘉¹, 袁红^{1,2}, 盛浩¹

(1. 湖南农业大学资源学院, 长沙 410128; 2. 自然资源部

广西岩溶动力学重点实验室中国地质科学院; 岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: [目的] 针对湖南岩溶耕地土壤钙碳失衡与酸化加剧问题, 探究外源钙碳添加对不同酸度岩溶土壤的调控路径与响应机制, 为岩溶区耕地质量定向改良提供理论依据。[方法] 采取野外取样分析与室内培养相结合的方法, 在湖南典型岩溶分布区挖掘耕地标准剖面 20 个, 共 93 个样品, 测定土壤 pH 值, 构建不同酸度序列, 从中选取典型酸性碱性岩溶耕层土壤进行恒温培养对比试验, 设置 5 种钙碳组合处理: 对照, 不加任何外源添加物(CK); 5%OM+5%CaCO₃(T₂); 1%OM+5%CaCO₃(T₃); 5%OM+1%CaCO₃(T₄); 1%OM+1%CaCO₃(T₅), 对培养过程各阶段土壤 pH、全钙、有机碳及可溶性有机碳、氮活性养分含量进行了检测分析。[结果] 外源钙碳添加整体上促进了岩溶耕地 SOC 和全钙含量提升, 碱性土壤 T₂ 处理 SOC 最高, 达 47.79 g/kg, 酸性土壤 T₄ 处理 SOC 最高, 达 43.83 g/kg, 但高碳输入处理后期 SOC 分解加快, 碳库稳定性下降; 全钙含量随钙添加量提升显著增加, 酸性土壤 T₂, T₃ 处理较 CK 提升 39~49, 40~49 倍, 碱性土壤 T₂, T₃ 提升 1.3~2.22, 1.31~2.83 倍($p < 0.05$); Ca/C 及 DOC, DON 等活性组分呈现异质化特征, DOC 在碱性土壤 T₄ 处理与酸性土壤 T₂ 处理激发效应最强, DON 整体呈下降趋势; 酸性土壤 pH 显著提升($p < 0.05$), T₂ 处理 28 d 时升至 7.83, 碱性土壤各处理 pH 变化不大。[结论] 外源钙碳添加能够有效改善岩溶区耕地土壤酸化, 补充钙库, 促进有机碳固持, 但不同酸度土壤对钙碳添加的响应存在分异性与阶段性。建议酸化岩溶土壤优选高钙低碳配比以同步提升 pH 和 SOC 稳定性, 钙碳互作是岩溶耕地酸化调控的核心路径, 优化钙碳管理以促进岩溶耕地质量提升和碳固持。

关键词: 岩溶区; 钙碳互作; 土壤酸化; 耕地

中图分类号: S156

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0229-10

Response of acidic karst farmland soil in Hunan to exogenous calcium and carbon addition

Duan Chenglong¹, He Yuhuan¹, Liu Peng¹, Zeng Gen¹, Zhang Lingjia¹, Yuan Hong^{1,2}, Sheng Hao¹

(1. College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] To address the problems of soil calcium-carbon imbalance and intensified acidification in karst farmland, this study aims to investigate the regulatory pathways and response mechanisms of exogenous calcium and carbon addition on karst farmland soil with different acidity levels, providing a theoretical basis for targeted improvement of farmland quality in karst regions. [Methods] Using a combination of field sampling analysis and laboratory incubation, twenty standard farmland profiles were excavated from a typical karst area in Hunan, yielding a total of 93 samples. Soil pH was measured to construct different acidity sequences, and typical acidic and alkaline karst cultivated-layer soil samples were then selected for comparative constant-temperature

收稿日期: 2025-07-29

修回日期: 2025-08-24

接受日期: 2025-09-08

资助项目: 自然资源部广西岩溶动力学重点实验室开放基金(KDL&Guangxi202010); 科技部国家重点研发计划(2022YFD1700103-306); 湖南省教育厅重点项目(23A0185)。

第一作者: 段承龙(2000—), 男, 湖南洪江人, 硕士研究生, 专业方向为岩溶土壤质量演变。E-mail: 18397304552@163.com

通信作者: 袁红(1982—), 女, 湖南宁乡人, 博士, 副教授, 主要从事土壤质量演变研究。E-mail: brandyuan@163.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

incubation experiments. Five calcium-carbon combination treatments were set: control with no exogenous addition (CK); 5% organic matter (OM) + 5% CaCO₃ (T₂); 1% OM + 5% CaCO₃ (T₃); 5% OM + 1% CaCO₃ (T₄); and 1% OM + 1% CaCO₃ (T₅). Soil pH, total calcium, organic carbon, soluble organic carbon, and active nitrogen nutrient contents were detected and analyzed at each stage of the incubation process. [Results] Exogenous calcium and carbon addition generally promoted the increase of soil organic carbon (SOC) and total calcium content in karst farmland. The SOC content was highest in alkaline soil under T₂ treatment (47.79 g/kg) and highest in acidic soil under T₄ treatment (43.83 g/kg). However, high carbon input treatments accelerated SOC decomposition in later stages, reducing carbon pool stability. Total calcium content significantly increased with calcium addition. Compared with the CK treatment, T₂ and T₃ treatments increased total calcium content by 39~49 and 40~49 times in acidic soil, respectively, whereas in alkaline soil, T₂ and T₃ increased it by 1.3~2.22 and 1.31~2.83 times ($p < 0.05$). The Ca/C ratio and active components such as dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) exhibited heterogeneous characteristics. DOC showed the strongest priming effect in alkaline soil under T₄ treatment and in acidic soil under T₂ treatment, and DON generally showed a declining trend. The pH of acidic soil increased significantly ($p < 0.05$), reaching 7.83 at 28 d under T₂ treatment, while the pH of alkaline soil under each treatment showed little change. [Conclusion] Exogenous calcium and carbon addition can effectively mitigate soil acidification in karst farmlands, replenish calcium pools, and promote organic carbon sequestration. However, the responses of soil with different acidity levels to calcium and carbon addition exhibit variability and stage-specific characteristics. It is recommended that acidic karst soil prioritize a high-calcium and low-carbon ratio to simultaneously improve pH and SOC stability. Calcium-carbon interaction is the key pathway for regulating acidification in karst farmland, and optimizing calcium-carbon management can promote the improvement of karst farmland quality and carbon sequestration.

Keywords: karst region; calcium-carbon interaction; soil acidification; farmland

耕地是人类赖以生存和发展的物质基础,具有农业生产、空间承载以及环境保护等多种功能,关系国家和社会稳定,是保障粮食安全和国民经济高质量发展的宝贵资源^[1]。耕地土壤酸化是全球土壤退化的主要形式,也是当前广大南方地区所面临的突出土壤环境问题之一,表现为土壤pH值不断降低、土壤交换性酸不断增加^[2],对农产品安全和农业可持续发展构成了严峻威胁。岩溶生态系统是热带、亚热带地区受岩溶环境制约的生态系统,碳酸盐岩类经溶蚀风化后形成石灰土。岩溶环境的独特性赋予了石灰(岩)土独特而复杂的成土过程,虽然成土机理至今尚未完全清楚,但岩溶作用对石灰岩土壤的形成和演变产生了深远的影响,其具有富钙偏碱的地球化学特点已成为共识^[3]。中国岩溶区面积344.3万km²,占国土面积的1/3以上。其中,西南地区岩溶面积约41.1万km²,是世界上三大岩溶分布中心,同时也是世界最大的岩溶连续带^[4]。作为最脆弱的生态系统之一,岩溶区界面对环境变化非常敏感,生态容量低,抗灾能力差,人为影响剧烈,是我国土壤酸化最为严重的区域之一^[5]。特别是喀斯特丘陵山区,由于复杂多变的自然条件,土壤异质性高,土

壤贫瘠、分布破碎、植物生长困难^[6],易利用的土地资源分布极不均衡,耕地资源相较于平原更为宝贵,面临着人地关系紧张的基础性矛盾。

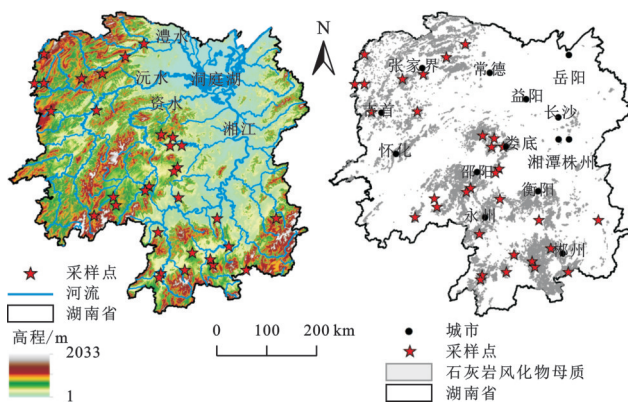
岩溶地区岩溶动力系统的物质循环以碳(C)、水(H₂O)、钙(Ca)为基本特征。钙是岩溶生态系统中最常见的生态元素,其富存、迁移与岩溶耕地土壤质量密切相关,在土壤的酸碱性演化及有机碳的积累上发挥着重要的作用^[7]。目前,基于外源钙碳添加对提高土壤质量的重要性,已开展了大量研究工作。通过添加石灰增加酸性土壤养分释放早在40年前已有研究^[8],外源有机质对土壤有机碳激发效应的研究也屡见不鲜^[9-10]。岩溶耕地土壤的酸碱平衡成为保障土壤质量的主要驱动力,钙与有机碳是维系岩溶耕地土壤生态系统平衡的关键。近年来关于钙(碳酸钙)对土壤有机碳的转化与积累关系研究受到关注,如胡乐宁等^[11]通过添加外源有机质和碳酸钙的土壤培养试验研究探讨了钙与有机碳的关系及钙在喀斯特土壤有机碳转化与积累中的作用。葛云辉等^[12]通过外源钙碳的添加探讨了桂西北石灰土土壤有机碳矿化对外源有机物质和碳酸钙的响应。但针对外源钙碳添加对岩溶耕地土壤酸化及抑酸途径及效应研究相对较少。

由于不合理的耕作、过度种植、化肥的大量使用,湖南省的土壤酸化现象严重,耕地土壤pH平均值从第二次土壤普查时的6.5下降到了当前的6.0。湖南土壤大面积酸化是湖南省粮食产能受限的主要因素,尽管石灰岩风化物是碱性母岩,其上发育的岩溶土壤具有中性和碱性特征,但由于以上自然环境与人为耕作等因素影响,岩溶耕地土壤酸化现象日趋严重,岩溶区土壤Ca元素平衡失调问题值得深究。本研究以不同酸度条件下湖南典型岩溶耕地土壤为研究对象,通过添加外源有机物料与碳酸钙的土壤恒温培养试验,研究不同酸度条件下湖南岩溶耕地土壤对外源钙碳添加的响应机制,探寻钙碳互作的路径与抑酸机理,旨在为湖南岩溶耕地质量保育、保障粮食安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究样品采自湖南省典型岩溶分布区,土壤母质为石灰岩风化物(图1)。湖南省地处北亚热带,属于亚热带季风湿润气候,年平均气温16~18℃,年平均降水量1200~1800mm,具有“气候湿润、四季分明、雨水集中”的特点。湖南省岩溶区总面积549.64万 hm^2 ,占全省国土总面积的25.95%,主要集中在张家界、邵阳、郴州等湘西北、湘中偏西南和湘南地区,这三大片区在地形地貌上分属于丘峰—溶盆与溶洼、峡谷山原;丘峰—溶洼与溶盆、低山与丘陵;丘峰与峰林—溶盆与溶洼、丘陵平原岩溶地貌类型。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2024)0650号的标准地图制作,底图未做修改。

图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of study area

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与分析 按土壤野外调查采样标准,在典型岩溶区选择合适的采样点,挖掘土壤剖面,深至地表以下150cm或到(准)石质接触面或诊

断表下层的下部边界。按照土系野外土壤描述与采样规范,详细记录土壤剖面各发生层的形态学特征,按剖面形态特征划分土壤发生层次,从下往上,采集室内分析土样1.5~2.0kg。应用环刀法从上往下采集原状土,分析土壤容重、土壤含水量,计算土壤孔隙度。本研究在湖南典型岩溶分布区挖掘耕地剖面20个,所选取的土壤采样点分布及信息见图1和表1。所采集的发生层土壤样品,将其带入室内自然风干,研磨后,分别过10目、60目和100目筛子,混合后进行保存,并作记号,用于测定土壤基本理化性质。不同酸度条件土壤基本理化性质见表2。

在野外调查室内分析试验的基础上,选取典型酸/碱性耕层土壤进行外源钙碳添加互作培养试验。培养试验酸性耕层土样选自样点HY02,碱性耕层土样选自样点LD02,不同酸度条件培养试验土壤基本理化性质见表3。

1.2.2 土壤培养试验 对选取的酸性和碱性岩溶耕层土样去除有机质后再定量添加有机质与碳酸钙粉末,添加的输入性外源有机物质为破碎处理后的研究区地表枯枝落叶。进行为期28d的恒温培养,研究不同酸度条件下湖南岩溶耕地土壤对外源钙碳添加的响应机制。

土壤有机质的去除^[13]:将3000g风干土样置于10个5L的塑料烧杯中,以土液比为1:5的比例沿杯壁缓慢添加 H_2O_2 ,用玻璃棒搅拌均匀,使溶液与样品充分反应,直到不再观察到气泡产生。每个土样充分反应后静置7d以上直至反应完全后风干取出。所有土样研磨至 $<0.25\text{mm}$,用于室内恒温培养试验。

室内恒温培养:对去除有机质后的土样设置5个处理,3次重复,共30个培养瓶。培养试验处理设计如下:(1)对照(CK),不加任何外源添加物;(2)每kg土中添加枯枝落叶粉末50g+碳酸钙粉末50g(T_2);每1kg土中添加枯枝落叶粉末10g+碳酸钙粉末50g(T_3);每1kg土中添加枯枝落叶粉末50g+碳酸钙粉末10g(T_4);每1kg土中添加枯枝落叶粉末10g+碳酸钙粉末10g(T_5)。在温度25℃的黑暗条件下,恒温培养28d。每天换气15min,并通过称重补充培养瓶内水分以保证瓶中湿度,保持试验土壤相对含水量为40%。于培养后5d,14d,28d取样测定各阶段土壤pH、可溶性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)、可溶性有机氮(Dissolved Organic Nitrogen, DON)、有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)以及土壤全钙等项目。

1.3 测定内容及方法

土壤基本理化性质参照《土壤农业化学分析》等资

料采用常规分析方法^[14]。土壤溶解性有机碳、氮采用去离子水浸提,分别用总有机碳分析仪器(TOC-V系列CPH/CPN型号,岛津公司,日本)和连续流动分析仪测定(AA3型号,布朗卢比公司,德国)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010, Origin 2021 及 SPSS 23.0 等软件进行数据处理以及作图。多重比较用 Duncan 法 ($p < 0.05$)。

表 1 采样点具体地址及其相关信息

Table 1 Specific locations and related information of sampling sites

剖面	采样地点	海拔/m	经度 E/(°)	纬度 N/(°)	土地利用方式	植被覆盖度/%
ZJJ02	慈利县	284	110.9	29.3	退耕灌木林地	40~80
ZJJ03	永定区	510	110.4	29.0	水改旱	40
XX04	龙山县	1236	109.3	28.8	退耕草地	≥80
XX05	保靖县	365	109.4	28.8	退耕灌木林地	≥80
XX09	吉首市	606	109.5	28.3	水田	≥80
XX12	龙山县	550	109.4	29.3	水田	≥80
CZ04	临武县	404	112.5	25.5	退耕灌木林地	≥70
CZ05	嘉禾县	255	112.5	25.6	退耕灌木林地	60
CZ11	桂阳县	205	112.7	25.8	水田	≥80
SY04	城步县	462	110.3	26.4	退耕灌木林地	≥80%
SY11	邵东市	254	111.7	27.2	水田	40~80
SY13	邵阳县	259	111.2	26.8	水田	≥80
YZ08	新田县	380	112.1	25.8	退耕针阔林地	≥70
YZ10	祁阳市	117	111.8	26.7	水田	≥80
YZ11	零陵区	131	111.5	26.1	水田	≥80
LD01	涟源市	174	111.7	27.7	退耕乔木林地	40~80
LD05	娄星区	146	111.9	27.7	水田	40~80
LD02	新化县	440	111.5	27.9	退耕乔木林地	40~80
ZZ05	炎陵县	263	113.7	26.4	退耕灌木林地	30
HY02	常宁县	92	112.6	26.4	退耕乔木林地	40~80

表 2 不同酸度条件下野外调查土壤基本理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of field-investigated soil under different acidity levels

酸度分级	强酸性	弱中酸性	中性	碱性
土壤 pH 值	3.94±0.24	5.57±0.45	6.92±0.26	7.77±0.15
有机碳/(g·kg ⁻¹)	9.30±10.85	12.12±6.91	16.74±10.01	14.16±10.19
CEC/(cmol(+)·kg ⁻¹)	19.35±6.83	14.13±3.69	18.94±3.79	11.75±5.69
砂粒/%	73.97±63.13	117.44±67.46	95.47±68.93	157.28±27.78
粉粒/%	300.94±140.42	570.28±100.09	542.12±126.43	620.86±38.55
黏粒/%	625.06±176.98	312.20±73.28	362.41±129.72	221.71±25.38
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.93±0.57	0.96±0.42	1.41±0.67	1.42±0.87
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.41±0.13	0.80±0.46	0.55±0.19	0.38±0.11
全钾/(g·kg ⁻¹)	16.46±5.83	13.30±4.55	15.65±3.92	10.94±2.52
全钙/(g·kg ⁻¹)	0.33±0.29	0.86±0.28	22.13±27.96	61.51±55.83

表 3 培养试验选用土壤的基本理化性质

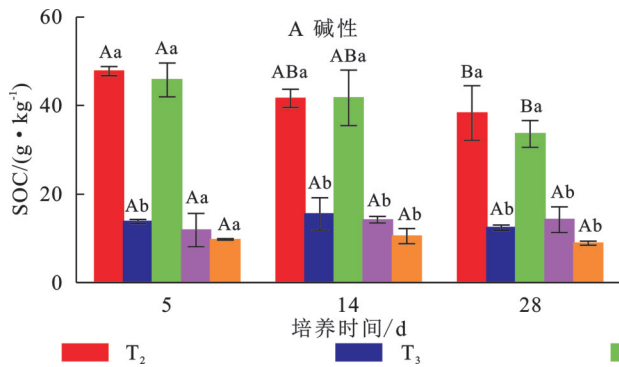
Table 3 Basic physicochemical properties of selected soil in incubation experiment

性质	土壤 pH 值	有机碳/(g·kg ⁻¹)	CEC/(cmol(+)·kg ⁻¹)	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)	全钙/(g·kg ⁻¹)
酸性	4.38	12.82	18.4	10	212	778	1.19	0.45	13.54	0.04
碱性	7.62	11.66	14.2	555	211	234	1.11	0.30	6.17	7.74

2 结果与分析

2.1 不同酸度条件下岩溶土壤有机碳对外源钙、碳的响应特征

由图2A可知,人为添加不同量有机无机物质对碱性岩溶耕作层土壤有机碳(SOC)含量产生了不同影响。各处理SOC含量表现为 $T_2 > T_4 > T_3 > T_5 > CK$ 的趋势。在等量添加1%有机质的处理中, T_3 组SOC含量($12.39 \pm 0.62 \sim 15.47 \pm 3.66$ g/kg)高于 T_5 组SOC含量($11.88 \pm 3.80 \sim 14.21 \pm 2.88$ g/kg),随着培育时间的增长,碱性耕层土壤中 T_3 和 T_5 同CK组变化趋势相似,SOC含量有增加趋势,其中 T_3 和 T_5 组的增幅分别为12.43%与19.35%,后期动力不足,土壤退化后质量不稳定;在等量添加5%有机质的处理中,高钙的 T_2 组SOC含量($38.35 \pm 6.19 \sim 47.79 \pm$



1.03 g/kg)同样也高于低钙 T_4 ($33.62 \pm 2.05 \sim 45.81 \pm 3.78$ g/kg),并随着培育时间的增长,碱性耕层土壤中 T_2 和 T_4 处理SOC含量呈显著性下降趋势($p < 0.05$),其下降幅度分别为19.72%与26.61%。

由图2B可知,人为添加不同量有机无机物质对酸性耕层土壤有机碳含量的变化趋势为 $T_4 > T_2 > T_3 > T_5 > CK$ 。在等量添加1%有机质的处理中, T_3 组SOC含量($10.03 \pm 1.13 \sim 12.15 \pm 1.64$ g/kg)高于 T_5 组SOC含量($10.19 \pm 3.17 \sim 11.65 \pm 1.87$ g/kg);在等量添加5%有机质的处理中, T_4 组SOC含量($35.35 \pm 0.38 \sim 43.83 \pm 3.01$ g/kg)高于 T_2 ($35.27 \pm 0.6 \sim 36.6 \pm 1.81$ g/kg)。其中五组处理土壤有机碳含量均在培养至中期(14 d)时有增加趋势,其增幅分别为 T_2 (3.77%)、 T_3 (5.93%)、 T_4 (22.81%)、 T_5 (14.33%)、CK(44.05%),培养后期动力不足,土壤退化后质量不稳定。

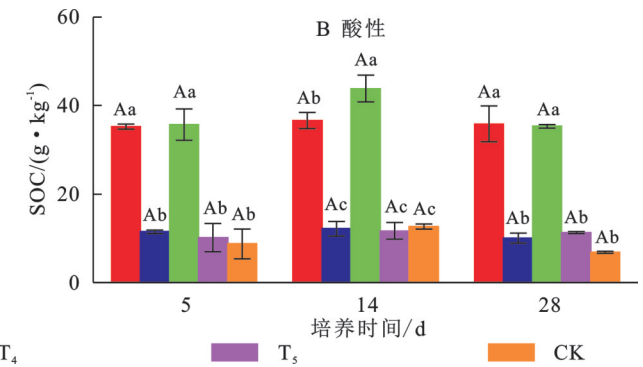


图2 岩溶土壤总有机碳含量变化

Fig. 2 Variations in total organic carbon content in karst soil

2.2 不同酸度条件下岩溶土壤全钙对外源钙、碳的响应特征

外源施入有机无机物料对土壤中全钙含量的影响呈现显著差异(图3A,图3B)。碱性耕层土壤的全钙含量为($7.01 \pm 0.86 \sim 28.01 \pm 2.55$ g/kg),由图可以看出不同处理的碱性土壤全钙随着培养时间呈阶段异质性变化趋势。与CK处理相比,施加外源钙碳提高了土壤中全钙的含量, T_2 处理在第5天时,其全钙含量较CK处理显著提高了213.29% ($p < 0.05$),在培养至第14天与第28天时其全钙含量较CK处理显著提高了225.19%与131.04% ($p < 0.05$); T_3 处理的土壤全钙含量同 T_2 处理变化趋势一致,在各个培养时期土壤全钙含量始终高于CK处理,且差异均达到了显著水平($p < 0.05$),各培养时期分别提高了230.09%,283.26%与131.04%; T_4 与 T_5 同样也是在各培养时期土壤全钙含量始终高于CK处理,但差异没有达到显著水平。在添加等量5% $CaCO_3$ 和不同量有机质粉末的 T_2 与 T_3 处理中,其土壤全钙含量在培养至第28天时分别下降了24.51%与29.83%;

低量 $CaCO_3$ 添加量,土壤有机碳含量下降,且下降幅度高于高量添加; T_4 与 T_5 处理中(1% $CaCO_3$),其土壤全钙含量在培养至第28天时分别下降了29.68%与25.63%。酸性耕层土壤的全钙含量为($0.04 \pm 0 \sim 1.99 \pm 0.19$ g/kg),由图3B可以看出不同处理的酸性土壤全钙随着培养时间呈阶段异质性变化趋势。 T_2 处理在第5天,第14天,第28天,其全钙含量较CK处理显著提高了49,46,39倍左右; T_3 处理的土壤全钙含量同 T_2 处理变化趋势一致,在各个培养时期土壤全钙含量始终高于CK处理,且差异均达到了显著性水平($p < 0.05$),各培养时期分别提高了49,40,48倍左右; T_4 与 T_5 在各个培养时期土壤全钙含量的增加量远低于 T_2 与 T_3 ,较CK处理仅提高了2.8,2,3.2倍与2.5,2,2.7倍左右。在添加等量5% $CaCO_3$ 和不同量的有机质粉末的 T_2 与 T_3 处理中,其土壤全钙含量在培养至第28天时分别下降了1.89%与3.02%;在添加等量1% $CaCO_3$ 和不同量的有机质粉末的 T_4 与 T_5 处理中,其土壤全钙含量在培养至第28天时变化不明显。

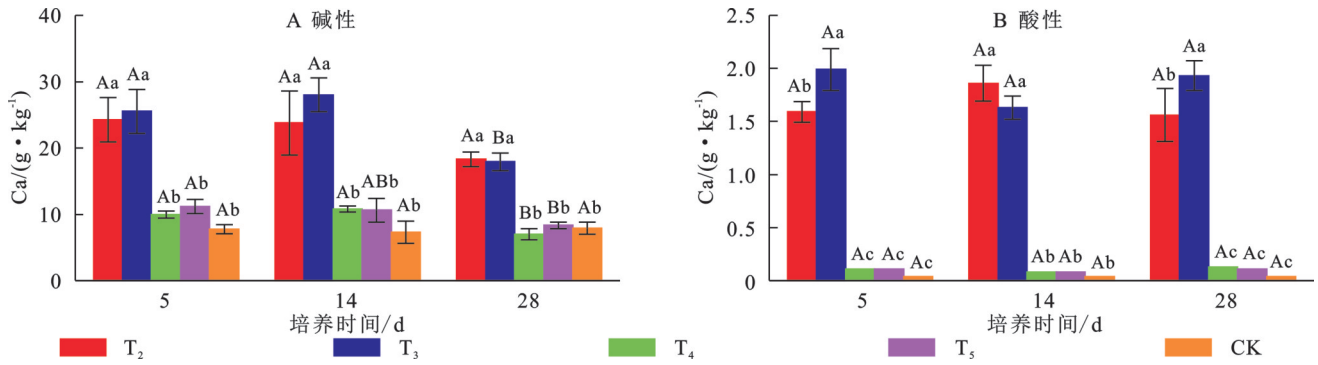


图 3 岩溶土壤全钙含量变化

Fig. 3 Variations in total calcium content in karst soil

2.3 不同酸度条件下岩溶土壤活性养分对外源钙、碳的响应特征

2.3.1 土壤可溶性有机碳特征 碱性耕层土壤在培养的第 5 天,不同处理 T_2, T_3, T_4, T_5 土壤 DOC 含量较 CK 相比分别提高了 0.123 g/kg, 0.05 g/kg, 0.215 g/kg, 0.043 g/kg, 其中 T_4 处理增幅最大; 在培养的第 14 天,不同处理 T_2, T_3, T_4, T_5 土壤可 DOC 含量较 CK 相比分别提高了 0.095 g/kg, 0.025 g/kg, 0.154 g/kg, 0.021 g/kg, 其中 T_4 处理增幅最大; 在培养的第 28 天,不同处理 T_2, T_3, T_4, T_5 土壤 DOC 含量较 CK 相比分别提高了 0.099 g/kg, 0.068 g/kg, 0.105 g/kg,

0.057 g/kg 其中 T_4 处理增幅最大(图 4A)。由此可见 T_4 处理对碱性表层土壤中 DOC 的激发效应更强。

酸性耕层土壤在培养的第 5 天,不同处理 T_2, T_3, T_4, T_5 土壤 DOC 含量较 CK 相比分别提高了 0.124 g/kg, 0.06 g/kg, 0.126 g/kg, 0.022 g/kg, 其中 T_4 处理增幅最大; 在培养的第 14 天,不同处理 T_2, T_3, T_4, T_5 土壤 DOC 含量较 CK 相比分别提高了 0.203 g/kg, 0.13 g/kg, 0.162 g/kg, 0.141 g/kg, 其中 T_2 处理增幅最大; 在培养的第 28 天,不同处理 T_2, T_4, T_5 土壤 DOC 含量较 CK 相比分别提高了 0.056 g/kg, 0.012 g/kg, 0.03 g/kg, 其中 T_2 处理增幅最大(图 4B)。

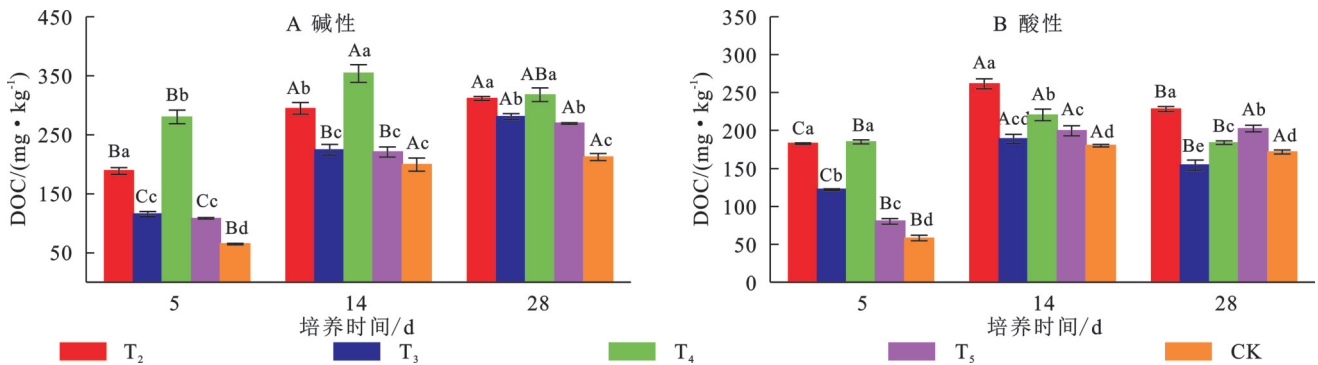


图 4 岩溶土壤可溶性有机碳特征

Fig. 4 Characteristics of dissolved organic carbon (DOC) in karst soil

2.3.2 土壤可溶性有机氮特征 在碱性耕层土壤培养过程中,各处理除 CK 外整体处于下降的趋势, T_2, T_3, T_4, T_5 培养至 28 d 其下降幅度分别为 21.5%, 13.8%, 6.91%, 33.55%, 其中 T_2, T_3 与 T_5 达到显著性差异 ($p < 0.05$)。在培养的第 5 天,各处理 DON 平均含量呈现 $T_5 (25.81 \pm 0.82 \text{ mg/kg}) > T_2 (23.88 \pm 2.48 \text{ mg/kg}) > T_3 (23.4 \pm 3.24 \text{ mg/kg}) > T_4 (18.1 \pm 0.76 \text{ mg/kg})$; 在培养的第 14 天,各处理 DON 平均含量呈现 $T_5 (22.51 \pm 1.34 \text{ mg/kg}) > T_3 (20.62 \pm 2.89 \text{ mg/kg}) > T_2 (19.6 \pm 0.93 \text{ mg/kg}) > T_4 (16.26 \pm 2.53 \text{ mg/kg})$ 。在培养的第 28 天,各处理 DON 平均含量呈现 $T_3 (20.17 \pm 1.35 \text{ mg/kg}) > T_2 (18.74 \pm 1.81 \text{ mg/kg}) > T_5 (17.15 \pm 1.52 \text{ mg/kg}) > T_4 (16.85 \pm 0.77 \text{ mg/kg})$ (图 5A)。

在酸性耕层土壤培养过程中,各处理 DON 含量除 CK 以及 T_3 外与碱性土壤培养过程呈现相同规律,整体处于下降的趋势。 T_2, T_4, T_5 培养至 28 d 其下降幅度分别为 48.92%, 53.84%, 9.48%, 在培养的第 5 天,各处理 DON 平均含量呈现 $T_2 (83.1 \pm 3.74 \text{ mg/kg}) > T_3 (79.8 \pm 1.48 \text{ mg/kg}) > T_4 (78.77 \pm 4.77 \text{ mg/kg}) > T_5 (72.1 \pm 0.21 \text{ mg/kg})$ 在培养的第 14 天,各处理 DON 平均含量呈现 $T_3 (82.32 \pm 3.35 \text{ mg/kg}) > T_4 (75.67 \pm 4.13 \text{ mg/kg}) > T_5 (73.47 \pm 3.07 \text{ mg/kg}) > T_2 (68.62 \pm 1.09 \text{ mg/kg})$; 在培养的第 28 天,各处理 DON 平均含量呈现 $T_3 (81.94 \pm 2.31 \text{ mg/kg}) > T_5 (65.25 \pm 5.51 \text{ mg/kg}) > T_2 (42.45 \pm 4.67 \text{ mg/kg}) > T_4 (36.56 \pm 2.37 \text{ mg/kg})$ (图 5B)。

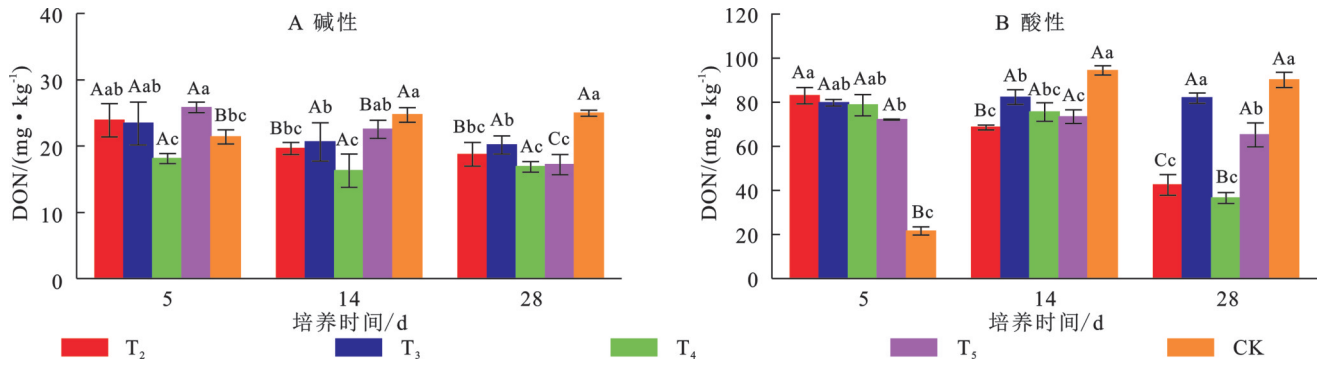


图 5 岩溶土壤可溶性有机氮特征

Fig. 5 Characteristics of dissolved organic nitrogen (DON) in karst soil

2.4 不同酸度条件下岩溶土壤各阶段理化性质与外源钙、碳的响应特征

本研究通过室内培养试验揭示了不同酸化程度下岩溶土壤各阶段理化性质与外源钙、碳的响应特征(图 6)。碱性土壤中, T₂处理在培养第 5 天与土壤有机碳(SOC)呈显著正相关($p < 0.05$), T₅处理则与钙碳比(Ca/C)存在显著正相关关系($p < 0.05$);培养至第 14 天, T₄处理与可溶性有机碳(DOC)呈显著正相关($p < 0.05$),而与可溶性有机氮(DON)呈显著负相关,同时 T₅处理与土壤全钙含量及 pH 值呈现显著负相关($p < 0.05$);培养

至 28 d 时, T₄处理与 DOC 转为显著负相关($p < 0.05$),但与土壤 pH 值建立显著正相关关系($p < 0.05$)。

酸性土壤体系呈现差异化响应规律:培养初期(第 5 天), T₃处理与 DOC 显著正相关($p < 0.05$), T₅处理则与钙离子含量及 pH 值同步呈现显著正相关($p < 0.05$);培养至第 14 天, T₂处理与钙含量显著正相关($p < 0.05$),而 T₄处理在促进 SOC 积累($p < 0.05$)的同时显著降低 Ca/C;培养末期(第 28 天), T₄处理与 DOC, DON 及 pH 值均呈显著负相关($p < 0.05$),而 T₅处理则与 DON 形成显著正相关关系($p < 0.05$)。

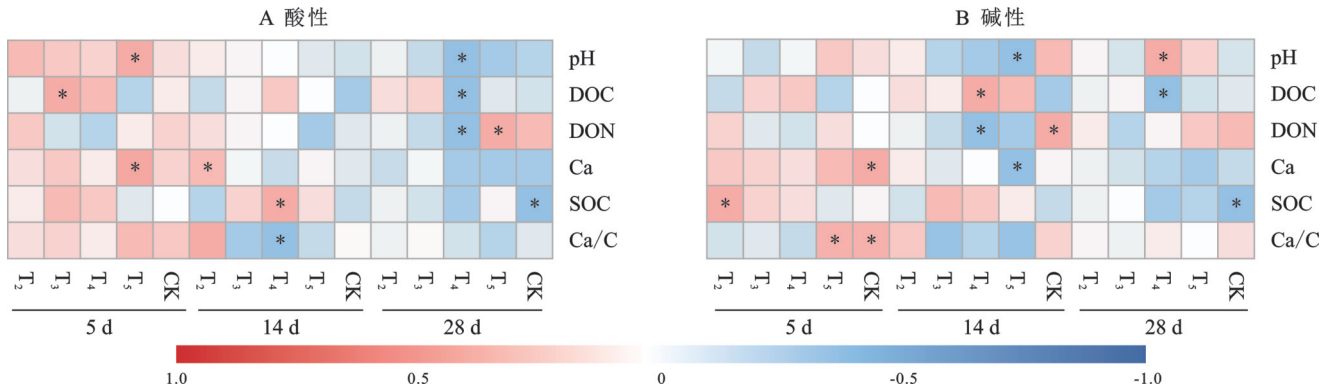


图 6 室内培养过程中耕层土壤影响因子分析

Fig. 6 Analysis of influencing factors in cultivated-layer soil during laboratory incubation

3 讨论

3.1 添加外源钙和有机物料对岩溶酸化土壤有机碳的影响

钙离子(Ca²⁺)通过增强土壤团聚体稳定性及促进有机-无机复合体形成,调控有机碳的物理保护与化学稳定性^[15]。钙与带负电荷的有机酸结合形成钙桥(Ca-bridging),减少有机碳的氧化分解。也可以通过多种机制促进土壤团聚体的形成,例如通过桥联土壤颗粒,增加土壤的结构稳定性,从而提高对颗粒有机碳的物理保护^[16]。同时,钙通过调节活性有机碳组分、碳库管理指数和微生物群落来影响土壤有机碳^[17]。有机物料的添加通过激发效应与稳定化路

径的平衡影响有机碳动态。高木质素含量的有机物料(如秸秆)可促进顽固性有机碳的形成,其分解产生的多酚类物质与钙结合后形成稳定的有机-矿物复合体^[18]。新鲜有机物料输入可能通过正激发效应(Positive Priming Effect)促进土壤原有有机质的分解。在高碳环境中,外源碳的输入会刺激微生物活性,导致微生物通过“共代谢”机制加速分解难降解的腐殖质^[13]。尽管微生物生物量短期内增加,但其对腐殖质的分解量显著超过生物量碳的累积量,导致土壤有机碳净减少^[19]。

本研究中,在外源有机物料添加一致条件下岩溶碱性土壤有机碳 T₂ > T₄, T₃ > T₅,说明高钙的环境更容易使植物凋零并腐殖化后的胡敏酸与 Ca²⁺形成

不易分解的胡敏酸钙,降低有机质的分解程度,对土壤有机质起稳定作用,从而利于土壤有机质的累积。这与前人的研究一致,富钙偏碱的岩溶环境中钙是土壤固碳的能量补给站或催化剂,高钙环境可以大大增加岩溶土壤的固碳能力,提高岩溶区土壤的碳储量以及维持生态平衡。酸性岩溶土壤随着培养时间的增长, T_3 、 T_5 有机碳含量变化幅度小于 T_2 、 T_4 ,说明低碳环境中有机碳稳定性比较强,尽管 T_2 、 T_4 添加了等量的有机质,但随着培育时间的增长, T_2 、 T_4 中有机碳含量下降趋势更为明显,其原因可能是由于新鲜有机物质对土壤有机质分解的激发作用在高碳环境中表现更强,微生物生物量的增加少于分解的腐殖质量,净效应为土壤有机质的减少^[13]。

3.2 添加外源钙和有机物料对岩溶酸化土壤全钙的影响

外源钙的施用可显著提升土壤全钙含量。碳酸钙(CaCO_3)在土壤中水解生成 Ca^{2+} 与 HCO_3^- ,直接补充钙库^[20]。其作用机制包括两方面:一是钙离子通过阳离子交换作用被土壤胶体吸附;二是碳酸钙的溶解受土壤pH调控,酸性土壤中溶解度更高,钙释放量增加^[21]。本研究中,外源钙和有机物料的输入都明显增加了岩溶土壤中全钙的含量,其中酸性岩

溶土壤各个处理在培养的各个阶段较CK,增长量均达到了显著程度($p < 0.05$),且 T_3 处理中钙含量始终高于 T_2 ,并随着培养时间的变化 T_3 中钙变化的稳定性也始终强于 T_2 ,这说明土壤中钙在“高钙低碳”的环境中有效性更强,这与前人研究结论一致,其原因可能是高钙环境(如外源碳酸钙添加)大幅增加土壤中可交换性钙(Exchangeable Ca^{2+})的比例^[22]。低碳环境则减少了有机质对钙的络合固定作用,使更多钙以自由离子态存在^[23]。

3.3 添加外源钙和有机物料对改善岩溶土壤酸化及活性养分的影响

碳酸钙(CaCO_3)作为碱性改良剂,通过水解反应生成 Ca^{2+} 和 H^+ ,可使酸性土壤pH值提升,维持在6.0甚至7.0^[24]。本研究中,酸性岩溶土壤在培养过程中各个处理较CK来说,其pH值提升量都达到显著性差异($p < 0.05$),这与前人研究结果一致;碱性岩溶土壤在培养过程中各处理土壤pH值较CK没有明显差异,甚至在培养至14 d前,pH值略低于CK,其原因可能是外源有机物料的添加在培养过程中分解产生有机酸的含量高于其离子交换能力^[25],从而使各处理在培养前期略低于CK,培养至28 d时, T_2 、 T_3 、 T_5 略高于CK是因为 Ca^{2+} 对有机酸的缓冲(图7)。

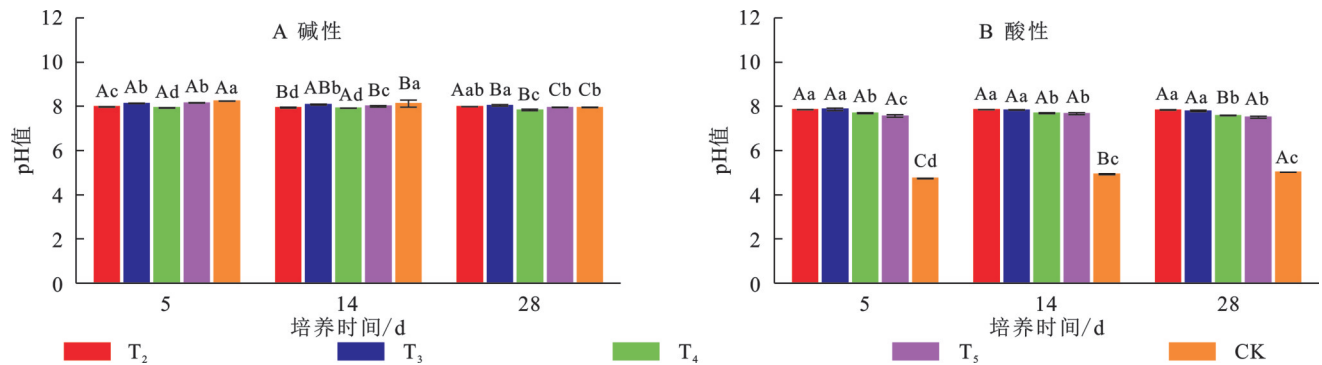


图7 岩溶土壤pH特征

Fig. 7 Characteristics of pH in karst soil

土壤可溶性有机碳的主要来源是植物残体和土壤腐殖质,土壤可溶性有机碳性质较为活跃,在土壤中的转化速率较高,是土壤中易氧化、易分解、易矿化部分的有机碳,可以直接作为有机碳源被微生物所利用^[26]。本研究中 T_2 处理对酸性岩溶土壤中可溶性有机碳的激发效应更强, T_4 处理对碱性岩溶土壤中可溶性有机碳的激发效应最强,因为碱性土中的 T_4 处理营造出“低钙高碳”的环境,有较低的pH值化学环境和高的外源有机物料的添加;酸性土中的 T_2 处理营造出“高钙高碳”的环境,通过高外源钙的添加改善酸性的化学环境并拥有较高的外源有机物料添加量,这与前人的研究一致。黄瑞农等^[27]提出pH值可以通过

影响微生物的活动,影响土壤有机质含量及其空间分布,微生物最适宜在中性环境下活动,在强酸或者强碱条件下其活动受到抑制,在高pH条件下,可溶性有机碳中的酸性部分很容易与其他物质如钙镁化合物发生中和反应,进而土壤中可溶性有机碳含量受到影响。张玉等^[28]发现无论是在碱性还是酸性土壤中,在培养前期各处理土壤可溶性有机碳含量都呈现“激增”的原因是因为土壤可溶性有机碳在较短时间内对凋落物输入非常敏感,凋落物输入对活性碳有效性、土壤微生物活性有强烈的积极影响,新鲜凋落物输入通过改变土壤微生物底物可利用性来改变土壤微生物生物量和群落结构,从而对凋落物分解和

土壤碳周转过程产生深远影响。凋落物输入前期,凋落物中可溶性糖等易分解的土壤可溶性有机碳快速淋溶释放并被土壤微生物同化利用,而在分解后期,大部分可溶性有机碳均已释放,此时剩余的凋落物对土壤可溶性有机碳含量的影响减小。

土壤可溶性有机氮是反映土壤生境和养分状况的重要表征,其含量变化可以反映土壤中氮的供应、转化和损失情况,以及土壤微生物活性和生态系统的稳定性。本研究中,除CK外各处理可溶性有机氮含量整体处于下降的趋势,碱性土壤 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 培养至24 d其下降幅度分别为21.5%、13.8%、6.91%、33.55%;酸性土壤 T_2 、 T_4 、 T_5 培养至24 d其下降幅度分别为48.92%、53.84%、9.48%,其原因可能是钙介导的DON吸附与聚合以及有机质腐殖化进程。 Ca^{2+} 与DON中的羧基、酚羟基结合,形成大分子络合物,在长期培养中,络合物进一步聚合为腐殖酸类大分子,溶解度显著降低^[29]。与此同时,随培养时间延长,可溶性有机物通过微生物作用转化为腐殖质(胡敏酸、富里酸),导致DON净减少,且碱性条件会加速该过程^[30],因而碱性岩溶土壤各处理不同培养阶段可溶性有机氮含量都远低于酸性岩溶土壤。

4 结论

通过28 d室内培养对比试验,本研究系统揭示了不同酸度条件下湖南岩溶耕地土壤对外源钙碳添加的响应机制。外源钙碳协同添加整体提升了土壤有机碳和全钙含量,碱性土壤 T_2 处理SOC最高,达47.79 g/kg,全钙含量较CK提升1.3~2.22倍;酸性土壤 T_4 处理SOC最高,达43.83 g/kg,全钙含量较CK提升39~49倍。酸性岩溶土壤中,“高钙低碳”组合有助于显著提升pH与SOC的稳定性,促进有机碳固持;碱性岩溶土壤高碳输入虽短期提高SOC,但后期分解加快,碳库稳定性下降。各处理对活性有机碳、氮等养分的调控具有明显的阶段性和酸度依赖性。酸性岩溶土壤肥力质量提升可优先“高钙低碳”管理,碱性岩溶优化钙碳配比以提升土壤质量和碳固持能力。

参考文献(References):

[1] 熊康宁,李晋,龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].地理学报,2012,67(7):878-888.
Xiong K N, Li J, Long M Z. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating karst rocky desertification[J]. Acta Geographica Sinica, 2012,67(7):878-888.

[2] 徐仁扣,李九玉,周世伟,等.我国农田土壤酸化调控的

科学问题与技术措施[J].中国科学院院刊,2018,33(2):160-167.

Xu R K, Li J Y, Zhou S W, et al. Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018,33(2):160-167.

[3] 曹建华,袁道先,章程,等.受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J].地球与环境,2004,32(1):1-8.
Cao J H, Yuan D X, Zhang C, et al. Karst ecosystem constrained by geological conditions in southwest China [J]. Geology-geochemistry, 2004,32(1):1-8.

[4] 王霖娇,汪攀,盛茂银.西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J].生态学报,2018,38(18):6580-6593.
Wang L J, Wang P, Sheng M Y. Stoichiometric characteristics of soil nutrient elements and its influencing factors in typical karst rocky desertification ecosystems, Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18):6580-6593.

[5] Tao L, Li F B, Liu C S, et al. Mitigation of soil acidification through changes in soil mineralogy due to long-term fertilization in Southern China [J]. Catena, 2019, 174:227-234.

[6] 何洁,严友进,易兴松,等.喀斯特地区土壤异质性及其与植物相互作用[J].应用生态学报,2021,32(6):2249-2258.
He J, Yan Y J, Yi X S, et al. Soil heterogeneity and its interaction with plants in karst areas [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(6):2249-2258.

[7] 曹建华,袁道先,潘根兴.岩溶生态系统中的土壤[J].地球科学进展,2003,18(1):37-44.
Cao J H, Yuan D X, Pan G X. Some soil features in karst ecosystem [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(1):37-44.

[8] Debrath N C, Mandal S K. Effect of liming acid soil on inorganic transformation of native and added phosphorus [J]. Journal of the Indian Society of Soil Science, 1983, 31(2): 197-201.

[9] Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010,42(9):1363-1371.

[10] 王媛华,苏以荣,李杨,等.水田和旱地土壤有机碳周转对水分的响应[J].中国农业科学,2012,45(2):266-274.
Wang A H, Su Y R, Li Y, et al. Response of the turnover of soil organic carbon to the soil moisture in paddy and upland soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012,45(2):266-274.

[11] 胡乐宁,苏以荣,何寻阳,等.西南喀斯特石灰土中钙的形态与含量及其对土壤有机碳的影响[J].中国农业科学,2012,45(10):1946-1953.
Hu L N, Su Y R, He X Y, et al. The speciation and

- content of calcium in karst soils, and its effects on soil organic carbon in karst region of southwest China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(10):1946-1953.
- [12] 葛云辉, 苏以荣, 邹冬生, 等. 桂西北石灰土土壤有机碳矿化对外源有机物质和碳酸钙的响应[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(11):2748-2754.
- Ge Y H, Su Y R, Zou D S, et al. Organic carbon mineralization in lime soils in Karst region of Guangxi, South China in response to exogenous organic substrate and calcium carbonate [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(11):2748-2754.
- [13] 李茜. 自然演替过程中岩溶土壤钙与团聚体有机碳特征[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
- Li H. Characteristics of soil aggregates organic carbon and soil calcium in karst areas in natural succession process [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- Lu R K. Methods of soil agrochemical analysis [M]. China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [15] Sarker J R, Singh B P, Cowie A L, et al. Carbon and nutrient mineralisation dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116:22-38.
- [16] Xiang J, Shi W Z, Jing Z J, et al. Exogenous calcium-induced carbonate formation to increase carbon sequestration in coastal saline-alkali soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 946:174338.
- [17] Xu Z B, Tsang D C W. Mineral-mediated stability of organic carbon in soil and relevant interaction mechanisms [J]. *Eco-Environment & Health*, 2024, 3(1):59-76.
- [18] Pingthaisong W, Blagodatsky S, Vityakon P, et al. Mixing plant residues of different quality reduces priming effect and contributes to soil carbon retention [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 188:109242.
- [19] Dou X L, Zhang C Z, Chen L, et al. Calcium forms influence soil organic carbon by mediating labile organic carbon fractions, carbon pool management indices and microbial communities in calcareous alkaline soils [J]. *Plant and Soil*, 2025, 512(1):801-817.
- [20] Ball K R, Malik A A, Muscarella C, et al. Irrigation alters biogeochemical processes to increase both inorganic and organic carbon in arid-calcic cropland soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 187:109189.
- [21] Calegari A, Tiecher T, Hargrove W L, et al. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol [J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 133:32-39.
- [22] Luo Y, Shi C M, Yang S T, et al. Characteristics of soil calcium content distribution in karst dry-hot valley and its influencing factors [J]. *Water*, 2023, 15(6):1119.
- [23] Dhaliwal S S, Dubey S K, Kumar D, et al. Enhanced organic carbon triggers transformations of macronutrients, micronutrients, and secondary plant nutrients and their dynamics in the soil under different cropping systems—a review [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(3):5272-5292.
- [24] Sirbu C, Mărin M, Ursan P. The effect of amendment and fertilization on some chemical characteristics of the soil [J]. *Annals of the University of Craiova-Agriculture Montanology Cadastre Series*, 2023, 53(1):412-418.
- [25] Li Z A, Zou B, Xia H P, et al. Role of low-molecular-weight organic acids and their salts in regulating soil pH¹ [J]. *Pedosphere*, 2008, 18(2):137-148.
- [26] Si G H, Yuan J F, Xu X Y, et al. Effects of an integrated rice-crayfish farming system on soil organic carbon, enzyme activity, and microbial diversity in waterlogged paddy soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1):29-35.
- [27] 黄瑞农. 环境土壤学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
- Huang R N. Environmental Pedology [M]. Beijing: Higher Education Press, 1988.
- [28] 张玉, 吴福忠, 艾灵, 等. 凋落物输入对土壤可溶性有机碳的影响 [J]. *生态学杂志*, 2023, 42(9):2107-2112.
- Zhang Y, Wu F Z, Ai L, et al. Litter input effects on soil dissolved organic carbon [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(9):2107-2112.
- [29] Pogodaeva T, Khodzher T. Organic carbon in the bottom sediments of lake baikal: geochemical processes of burial and balance values [J]. *Water*, 2023, 15(16):2941.
- [30] Xie T, Zhang Z H, Yu Y L, et al. Aeration intensity drives dissolved organic matter transformation and humification during composting by regulating the organics metabolic functions of microbiome [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 476:146645.