

DOI: 10.5846/stxb202006231627

贺同鑫, 胡宝清, 张建兵, 张诗萌, 庞榆, 裴广廷, 胡刚, 张伟, 孙建飞. 植被恢复十年喀斯特坡地细根对土壤碳氮存留与可利用性的影响. 生态学报, 2020, 40(23): 8638-8648.

He T X, Hu B Q, Zhang J B, Zhang S M, Pang Y, Pei G T, Hu G, Zhang W, Sun J F. Fine root effects on the retention and availability of soil carbon and nitrogen after ten years of vegetation restoration in a karst slope ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8638-8648.

植被恢复十年喀斯特坡地细根对土壤碳氮存留与可利用性的影响

贺同鑫¹, 胡宝清¹, 张建兵¹, 张诗萌³, 庞榆¹, 裴广廷¹, 胡刚¹, 张伟², 孙建飞^{1,*}

1 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530001

2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100

3 沈阳工学院生命工程学院, 沈阳 113122

摘要: 土壤碳氮存留与可利用性对恢复生态系统的稳定性和可持续性产生重要影响, 研究其细根控制过程对深入理解植被恢复的作用及其针对性应用具有重要意义。依托中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站 10 年植被恢复平台, 通过分析 8 种植物恢复模式植物(细根生物量、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)、土壤(有机碳、总氮、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、团聚体、砂粒、交换性钙、可溶性有机碳和氮、铵态氮、无机氮、微生物生物量碳和氮)理化性质的变化和关系, 阐明细根对土壤碳氮存留与可利用性的影响。研究表明: 细根对土壤碳氮存留的影响可能主要基于对土壤团聚体结构的改善, 加强了对土壤原有机碳、氮的保护和存留, 而细根有机质输入的影响是较弱的; 细根可能通过影响微生物调控土壤可利用性碳和氮; 因高的细根生物量和固氮植物, 封育林和刈割草地模式具有较高的土壤碳氮存留效应。综上所述, 喀斯特植被恢复过程中细根对土壤碳氮存留与可利用性产生积极的影响。因此, 石漠化生态工程治理可以考虑根系发达与固氮植物共同引种。

关键词: 土壤碳氮存留; 植被恢复; 细根; 同位素; 喀斯特

Fine root effects on the retention and availability of soil carbon and nitrogen after ten years of vegetation restoration in a karst slope ecosystem

HE Tongxin¹, HU Baoqing¹, ZHANG Jianbing¹, ZHANG Shimeng³, PANG Yu¹, PEI Guangting¹, HU Gang¹, ZHANG Wei², SUN Jianfei^{1,*}

1 Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, and Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation of Nanning Normal University, Nanning 530001, China

2 Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China

3 College of Life Engineering, Shenyang Institute of Technology, Shenyang 113122, China

Abstract: The retention and availability of soil carbon (C) and nitrogen (N) significantly affect the stability and sustainability of the restored ecosystem. Research about how fine root regulates soil C and N processes is significant importance for thoroughly understanding the role of vegetation restoration and its specific application. An experiment was carried out at the vegetation restoration plot which has lasted for ten years in Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences. We analyzed the changes and relationships in plant (fine root biomass,

基金项目: 国家自然科学基金(41701605, 41807523); 广西壮族自治区自然科学基金(2017GXNSFBA198034, 2017GXNSFBA198169)

收稿日期: 2020-06-23; 网络出版日期: 2020-10-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sjf@nnnu.edu.cn

$\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) and soil (soil organic C, total N, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, soil aggregates, sand content, exchangeable Ca^{2+} , dissolved organic C and N, NH_4^+ , inorganic N, microbial C and N) physiochemical properties among eight vegetation restoration models, in order to clarify the effects of fine root on soil C and N retention and availability. The results showed a significant relationship between fine root and soil organic C and total N, indicating that fine root played an important role in regulating soil C and N retention. The significant relationships between fine root and soil aggregates, sand content, exchangeable Ca^{2+} and soil water content, combined with the proportion of C input derived from new vegetation, the changes and relationships of plant and soil $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ further indicated that the effects of fine root on soil C and N retention may mainly depend on improving soil aggregate structure, which enhanced the conservation and retention of the original soil C and N; while the effect of fine root organic matter inputs was weak. The results showed a significant relationship between fine root and dissolved organic C and N, NH_4^+ and inorganic N, indicating that fine root affected soil C and N availability. The significant relationships between fine root and soil microbial C and N further indicated that fine root may regulate soil C and N availability by affecting microbes. Our results showed that the higher soil C and N concentrations in spontaneous regeneration and aboveground vegetation removal models compared with other six models. The better sequestered soil C and N in spontaneous regeneration and aboveground vegetation removal models may be due to higher fine root biomass and nitrogen fixing plants. Together, fine root played the positive effect on the retention and availability of soil C and N during vegetation restoration in a karst slope ecosystem. Thus, well-developed roots and nitrogen fixing plants can be jointly planted during rocky desertification ecological restoration.

Key Words: soil C and N retention; vegetation restoration; fine root; isotope; karst

石漠化恢复是我国西南喀斯特地区亟需解决的重要生态问题,近 30 年来“退耕还林还草”、“坡耕地整治”、“异地扶贫搬迁”等生态工程相继实施,石漠化恢复已初见成效^[1-6]。但如何对恢复生态系统进行提质改造,提升区域生态恢复的可持续性成为当前首要解决的重要问题^[6]。石漠化宏观上表现为植被退化,但本质上是由土壤养分流失和营养元素生物地球化学过程的改变或中断造成的^[7]。因此,土壤生态功能的提升可能有助于这种积极效应的持续^[6,8]。

土壤有机碳能够稳定土壤结构,提高土壤缓冲性能和抗干扰能力,调控土壤生物多样性和养分有效性,对土壤生态功能的恢复和提升发挥着重要作用^[9-11]。氮素作为陆地生态系统主要限制营养元素,其可利用性对提高植物生产力,推进群落演替,强化生态系统稳定性等产生重要影响^[12-14]。然而,石漠化过程中 40%—73% 和 30%—69% 的土壤有机碳和氮发生流失^[15-18]。因此,石漠化植被恢复过程中如何有效的提高土壤碳氮存留与可利用性将影响土壤生态功能的恢复和区域生态恢复的可持续性^[8,19-21]。

植物细根以其高周转、根际微生物富集、胶结土壤团聚体等特性对土壤碳氮存留与可利用性产生重要影响^[22-24]。一方面重植植物细根可作为胶结剂改善土壤结构,对土壤碳氮形成有效的保护;此外,细根作为重要的植物源有机质,可增加土壤碳氮输入^[22-23]。另一方面,细根及其分泌物的输入也会促进微生物生物量及其活性的提高,增加碳氮有效性,但同时也增加损失风险^[25]。因此,明晰喀斯特植被恢复过程中细根影响土壤碳氮存留与可利用性的主要控制过程,将有助于通过物种选育有针对性对恢复生态系统进行提质改造,增强生态恢复的可持续性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

植被恢复长期定位控制试验布设在广西壮族自治区环江毛南族自治县中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站木连综合试验示范区(108°18'E, 24°43'N)。研究区属于典型的中亚热带季风气候,年均降雨量约 1389 mm,干湿季节明显(雨季:4—9 月;旱季:10 月—次年 3 月),70%以上集中在雨季;年均气温 19.9℃,极

端低温-5.2℃,极端高温 38.7℃。1985 年之前研究区生态系统经历着频繁的火烧和放牧,1985 年研究区所有居民外迁,退化系统得以逐渐恢复,恢复群落以荒草地和稀疏灌丛为主^[26]。2004 年 12 月选择坡面土壤和植被较为均一的东南向山坡,按照表 1 的处理方式建立火烧草丛、刈割草丛、刈割除根草丛、封育林、枇杷、光皮树、任豆、青冈栎 8 种植被恢复模式。该样地基岩裸露率<10%,碎石覆盖率为 30%—60%,表土碎石体积含量为 10%—30%。土壤是白云岩发育而成的碱性石灰土,沿坡向下,土层平均厚度由 10—30 cm 增加到 50—80 cm^[26]。植被恢复十年土壤和植物基本理化性质详见表 2。

表 1 植被恢复区概况
Table 1 Basic condition of vegetation restoration plot

植被恢复 Vegetation restoration	处理方法 Treatment	土壤扰动情况 Soil disturbance	植被现状 Vegetation condition
火烧草丛 Prescribed burning	每年 12 月,火烧 1 次	低土壤扰动	下坡以草灌为主,中上坡以草本为主,主要植被为白茅(<i>Imperata cylindrical</i>)、蔓生莠竹(<i>Microstegium vagans</i>)、毛桐苗(<i>Mallotus barbatus</i>)、紫穗槐苗(<i>Amorpha fruticosa</i>)等
刈割草丛 Aboveground vegetation removal	每年 12 月,地上植被刈割,植物根系无扰动	土壤扰动轻微	下坡以草灌为主,中上坡以草本为主,主要植被为白茅(<i>Imperata cylindrical</i>)、蔓生莠竹(<i>Microstegium vagans</i>)、紫穗槐苗(<i>Amorpha fruticosa</i>)等
刈割除根 Complete vegetation removal	每年 12 月,地上植被刈割,除根	中土壤扰动	以白茅(<i>Imperata cylindrical</i>)、蔓生莠竹(<i>Microstegium vagans</i>)草本为主
封育林 Spontaneous regeneration	维持原始状态,自然演替	土壤无扰动	植被覆盖率高于 90%,多灌木,地表有较为丰富的藤本和杂草分布,主要植被为黄荆(<i>Vitex negundo</i>)、榉木(<i>Aralia chinensis</i>)、毛桐(<i>Mallotus barbatus</i>)、火棘(<i>Pyracantha fortuneana</i>)、紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>)、小花楸木(<i>Swida parviflora</i>)、竹叶花椒(<i>Zanthoxylum armatum</i>)等,凋落物层较厚
枇杷 <i>Eriobotrya japonica</i>	挖坑栽种枇杷,连续 3 年去除原始植被,除根	建立初期连续 3 年高土壤扰动	植被以枇杷(<i>Eriobotrya japonica</i>)为主,几乎没有地下植被,地表多枇杷叶凋落物
光皮树 <i>Cornus wilsoniana wanger</i>	挖坑栽种光皮树,连续 3 年去除原始植被,除根	建立初期连续 3 年高土壤扰动	植被以光皮树(<i>Cornus wilsoniana wanger</i>)为主,地下草本斑状分布,凋落物层较薄
任豆 <i>Zenia insignis</i>	挖坑种植任豆,连续 3 年去除原始植被,除根	建立初期连续 3 年高土壤扰动	植被以任豆(<i>Zenia insignis</i>)为主,地下草本片状分布,并有灌木零星分布,凋落物层较薄
青冈栎 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	挖坑种植青冈栎,连续 3 年去除原始植被,除根	建立初期连续 3 年高土壤扰动	植被以青冈栎(<i>Cyclobalanopsis glauca</i>)为主,地下草本星状分布,凋落物层很薄

表 2 植被恢复十年土壤和植物基本理化性质
Table 2 The basic physicochemical properties of soil and plant after ten years vegetation restoration

理化性质 Physicochemical properties	SR	CWW	CG	EJ	ZS	PB	VR	CVR	P
有机碳 SOC/(g/kg)	59.6±3.6a	43.9±4.3bc	40.9±4.5c	49.3±5.3abc	45.1±5.8bc	54.7±4.5ab	62.2±4.4a	51.7±2.7ab	0.01
总氮 TN/(g/kg)	4.8±0.5ab	4.1±0.3ab	4.0±0.4b	4.4±0.4ab	4.9±0.3ab	4.9±0.2ab	5.1±0.3a	4.5±0.3ab	0.32
土壤 δ ¹³ C/‰	-20.6±0.3b	-20.1±0.5ab	-20.0±0.4ab	-20.4±0.5ab	-20.4±0.3ab	-20.3±0.3ab	-20.2±0.3ab	-19.1±0.4a	0.18
土壤 δ ¹⁵ N/‰	5.4±0.2cd	6.7±0.3ab	5.6±0.3cd	6.2±0.3abc	5.2±0.3d	6.9±0.3ab	6.1±0.3bc	6.9±0.2a	< 0.01
交换性钙 Ca ²⁺ /(g/kg)	5.2±0.1a	4.5±0.3ab	3.3±0.5b	4.8±0.3a	4.5±0.3ab	5.0±0.2a	4.9±0.2a	5.0±0.1a	0.02
pH (H ₂ O)	7.8±0.1ab	7.5±0.2b	6.4±0.3c	7.8±0.0a	7.6±0.2ab	7.8±0.1ab	7.9±0.0a	7.9±0.0a	< 0.01
粘粒含量 Clay content/%	33.4±1.6abc	37.8±1.0a	36.1±5.2abc	36.8±3.1ab	38.9±3.8a	33.3±5.1abc	27.1±3.2c	30.7±1.9bc	0.19
粉粒含量 Silt content /%	19.4±0.7a	17.7±0.4ab	15.6±1.1b	19.6±1.3a	17.5±0.4ab	18.2±1.2ab	16.7±1.3b	17.6±0.8ab	0.12
砂粒含量 Sand content/%	47.2±2.2ab	44.5±1.0b	48.2±6.2ab	43.6±4.3ab	43.6±4.2ab	48.6±6.4ab	56.2±4.5a	51.8±2.7ab	0.39

续表

理化性质 Physicochemical properties	SR	CWW	CG	EJ	ZS	PB	VR	CVR	P
容重 BD/(g/cm ³)	0.6±0.1abc	0.7±0.0a	0.7±0.0a	0.7±0.0a	0.7±0.0ab	0.6±0.0bc	0.6±0.0c	0.6±0.0bc	< 0.01
叶片碳浓度 Leaf C/(g/kg)	453.4±5.7ab	428.8±3.8b	465.7±1.2a	468.1±3.8a	458.0±2.7a	456.3±9.8ab	453.1±7.7ab	429.3±6.2b	< 0.01
叶片氮浓度 Leaf N/(g/kg)	21.2±1.6b	19.2±0.7b	18.0±0.8b	13.4±0.7c	38.3±1.1a	23.7±5.1abc	21.9±4.3abc	12.8±1.0c	< 0.01
植物 δ ¹³ C/‰	-31.6±0.4d	-30.6±0.1c	-32.7±0.2e	-32.2±0.3de	-29.9±0.3bc	-22.2±3.7b	-21.7±3.7b	-12.9±0.2a	< 0.01
植物 δ ¹⁵ N/‰	-3.2±0.7c	-1.5±0.3ab	-2.8±0.6bc	-0.8±0.1a	-1.2±0.2a	-0.9±0.4a	-0.6±0.5a	-2.3±0.4bc	< 0.01
细根生物量 FRB/(g/m ²)	130.3±18.9a	42.4±10.7d	53.6±12.8cd	57.9±19.4cd	53.9±7.4cd	76.0±13.3bc	105.9±14.5ab	72.8±11.6bc	0.01

SOC:有机碳 soil organic carbon; TN:总氮 total nitrogen; BD:容重 soil bulk density; FRB:细根生物量 fine root biomass; SR:封育林 Spontaneous regeneration; CWW:光皮树 *Cornus wilsoniana wanger*; CG:青冈栎 *Cyclobalanopsis glauca*; EJ:枇杷 *Eriobotrya japonica*; ZS:任豆 *Zenia insignis*; PB:火烧草 Prescribed burning; VR:刈割草 Aboveground vegetation removal; CVR:刈割除根草 Complete vegetation removal

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

2017年6月每个植被恢复模式分别建立6个5 m × 10 m的样方。每个样方内“S”型5点取样,采集0—10 cm表层土壤,混合作为一个土壤样本;根钻(直径7 cm)随机采集3个植物根系样品,混合作为一个根系样本;环刀(100 cm³)随机采集3个土壤容重样品。同时,每个样方内随机选取3—4棵树,在每棵树4个方向上随机采集植物叶片,混合作为一个植物样本;草地样方内随机选择3个点,取地上植物混合作为一个植物样本。

1.2.2 样品分析

土钻所取土壤样品过2 mm筛,挑出植物根系和石砾,土壤分成两部分,一部分测定土壤含水量、铵态氮、硝态氮、可溶性有机碳(DOC)和氮(DON)、微生物碳、氮等;另一部分风干,测定土壤有机碳、氮含量及其同位素丰度、pH、土壤质地和交换性钙离子含量等。

称取20 g新鲜土样,加入100 mL 2 mol/L的KCl,25℃、250 rpm振荡1 h,过滤,取上清液10 mL,流动分析仪测定铵态氮和硝态氮(Bran-Luebbe Inc., Germany)。分别称取20 g新鲜土样进行氯仿熏蒸和未熏蒸处理后,加入100 mL 0.5 mol/L的K₂SO₄溶液,25℃、250 rpm振荡1 h,过滤,取上清液用TOC分析仪(multi N/C 2100, Germany)测定微生物碳、氮。

土壤有机碳含量和¹³C同位素丰度的测定需要对土壤预先进行酸洗处理,除掉土壤中的无机碳,具体操作过程为:称取风干磨碎土壤15 g于50 mL烧杯,加入30 mL 0.5 mol/L盐酸,白天每隔2 h搅拌2 min,静止过夜;第二天测定土壤pH的变化,然后加入15 mL 0.5 mol/L盐酸,搅拌观察是否有气泡,若无气泡,去离子水清洗2—3遍,直至溶液呈中性,土壤样品60℃烘干,磨碎,备用;如有气泡重复以上步骤直至无气泡出现。至酸洗实验结束,依据土壤无机碳含量的不同,酸洗用量为65—195 mL。分别称取20 mg的未酸洗和酸洗土壤采用元素分析仪(Isoprime vario ISOTOPE cube, Elementar, Germany)—同位素质谱仪联用(Isoprime 100, UK)测定土壤有机碳和总氮含量及其同位素丰度。

称取5 g风干土放入慢速滤纸中,用200 mL 1 mol/L的乙酸铵溶液冲洗,最后定容至250 mL,原子吸收分光光度计测定交换性钙离子。

环刀所取土壤将大的根系、石砾等去除,60℃烘干,称重,测定土壤容重;根系样品用清水清洗干净,将活的≤2 mm细根挑出,60℃烘干,称量,计算植物细根生物量;烘干法测定土壤含水量;沉降法测定土壤颗粒组成。

植物叶片用去离子水清洗,105℃杀青20分钟,65℃烘干,粉碎,称取4 mg,元素分析仪(Isoprime vario

ISOTOPE cube, Elementar, Germany) — 同位素质谱仪联用 (Isoprime 100, UK) 测定植物碳氮浓度及其同位素丰度。

1.2.3 数据处理与分析

微生物量碳、氮计算参照公式(1):

$$M_{C/N} = (C_f - C_e) / B \quad (1)$$

式中, $M_{C/N}$ 表示微生物生物量碳或氮含量 (mg/kg); C_f 表示熏蒸后 DOC 或 DON 含量 (mg/kg); C_e 表示未熏蒸 DOC 或 DON 含量 (mg/kg); B 为浸提系数, 微生物碳为 0.45^[27], 微生物氮为 0.54^[28]。

重植植物碳输入比例根据 Bernoux 等^[29] 公式(2)估算:

$$P_r = (\delta_t - \delta_{ref}) / (\delta_{vegB} - \delta_{vegA}) \quad (2)$$

式中, P_r 表示重植植被碳输入比例 (%); δ_t 表示恢复 t 时间后土壤有机碳 $\delta^{13}C$; δ_{ref} 表示植被恢复前土壤有机碳 $\delta^{13}C$, 本研究以封育林土壤平均 $\delta^{13}C$ 作为 δ_{ref} ; δ_{vegB} 表示重植植物 $\delta^{13}C$; δ_{vegA} 表示封育林植物平均 $\delta^{13}C$ 。

单因素方差分析 (LSD 多重比较) 检验不同植被恢复模式土壤和植物基本理化性质差异。回归分析细根生物量与土壤理化性质之间的相关性。利用 SPSS 17.0 进行数据统计分析, 鉴于喀斯特生境异质性高, 设定 $P \leq 0.05$ 存在显著性差异, $P \leq 0.1$ 存在差异趋势。Origin 8.5 绘制相关数据图。

2 结果与分析

2.1 细根生物量与土壤理化性质的关系

细根生物量与土壤有机碳、总氮存在显著的正相关关系 (图 1)。细根生物量与微生物碳和氮存在显著正相关的趋势, 与可溶性有机碳和氮、铵态氮和无机氮存在显著正相关关系 (图 2)。细根生物量与砂粒含量、> 2—8 mm 大团聚体含量、土壤含水量和交换性钙离子含量呈显著正相关关系 (图 3)。

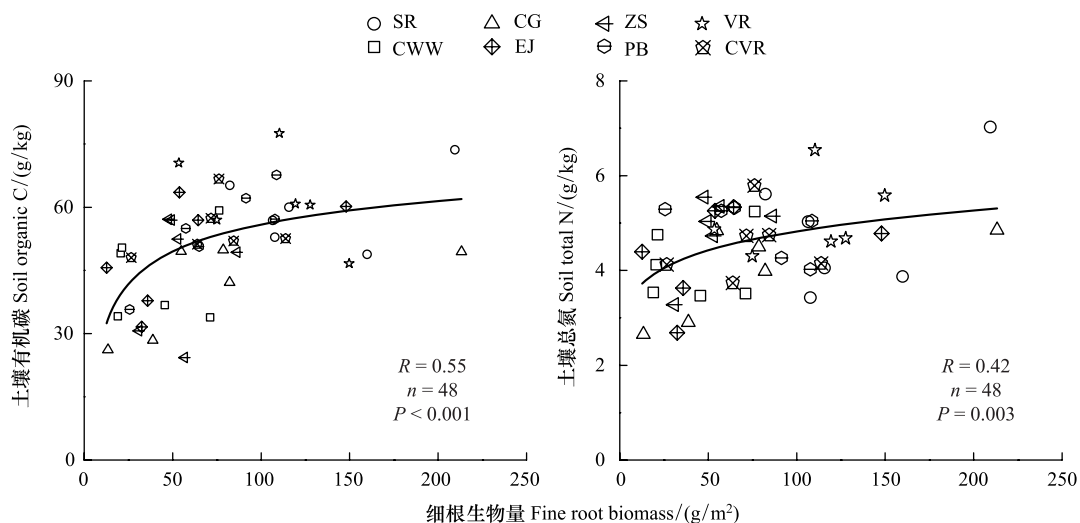


图 1 不同植被恢复模式细根生物量与土壤有机碳和总氮相关性

Fig.1 Correlations between fine root biomass and soil organic carbon and total nitrogen content under different vegetation restoration strategies

SR: 封育林 Spontaneous regeneration; CWW: 光皮树 *Cornus wilsoniana wanger*; CG: 青冈栎 *Cyclobalanopsis glauca*; EJ: 枇杷 *Eriobotrya japonica*; ZS: 任豆 *Zenia insignis*; PB: 火烧草 Prescribed burning; VR: 刈割草 Aboveground vegetation removal; CVR: 刈割除根草 Complete vegetation removal

2.2 土壤和植物碳、氮同位素丰度

不同植被恢复模式土壤有机碳 $\delta^{13}C$ 无显著差异, 多重比较结果表明刈割除根处理土壤有机碳 $\delta^{13}C$ 显著

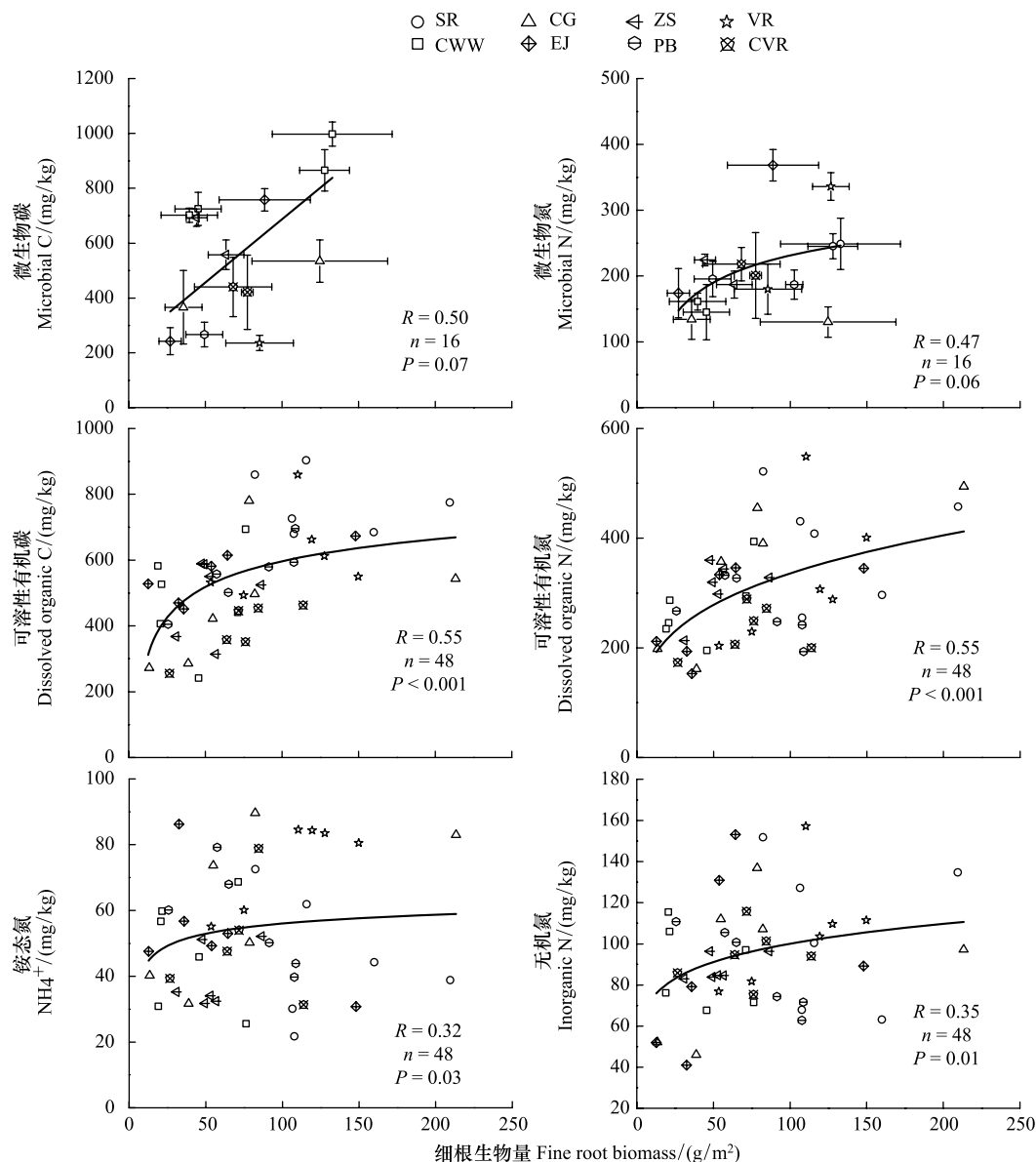


图2 不同植被恢复模式细根生物量与土壤微生物量碳、氮和可溶性有机碳、可溶性有机氮、铵态氮和无机氮相关性

Fig.2 Correlations between fine root biomass and soil microbial carbon and nitrogen, dissolved organic C and N, NH_4^+ and soil inorganic nitrogen under different vegetation restoration strategies

微生物碳和氮是各植被恢复处理中坡、下坡均值所做相关性

高于封育林,其他处理之间均无显著差异(表2)。不同植被恢复模式植物 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著差异,多重比较结果表明刈割除根处理 $\delta^{13}\text{C}$ >刈割草丛和火烧草丛>任豆和光皮树>封育林>枇杷和青冈栎(表2)。

植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$,植物 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 之间无显著相关关系,而土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 之间存在显著正相关关系(图4)。

根据 Bernoux 等^[29]估算的封育林、光皮树、青冈栎、枇杷、任豆、火烧草地、刈割草地和刈割除根草地重植植被碳输比例分别为 3.34%、0.30%、0.30%、0.31%、0.16%、-0.02%、0.13%、0.08%,8 种恢复模式间无显著差异(图5)。

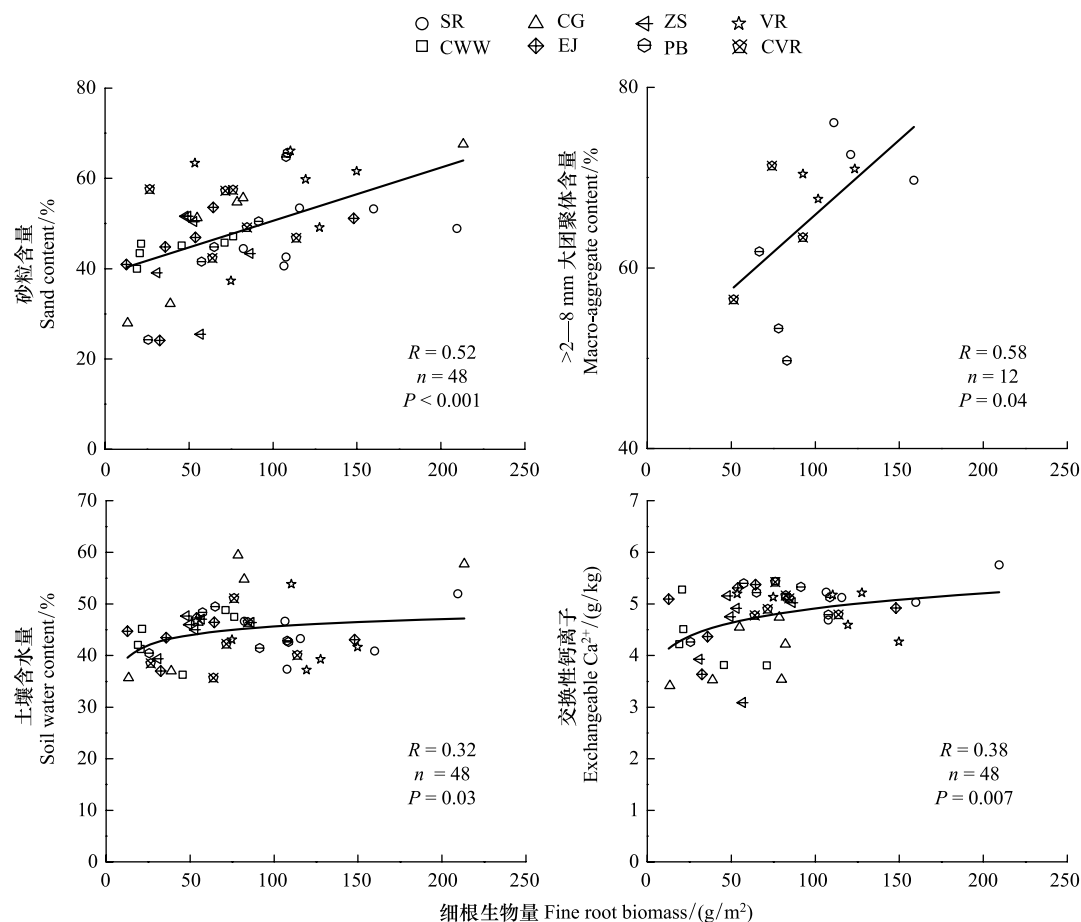


图3 不同植被恢复模式细根生物量与土壤砂粒含量、>2—8 mm 大团聚体含量、土壤含水量和交换性钙离子相关性

Fig.3 Correlations between fine root biomass and sand content, >2—8 mm macro-aggregate content, soil water content and exchangeable Ca^{2+} under different vegetation restoration strategies

团聚体数据来自肖霜霜等^[30], Xiao 等^[31]

3 讨论

3.1 细根在土壤碳氮存留过程中可能的作用

植被恢复模式对土壤有机碳产生显著的差异性影响(表2),这种差异与细根生物量变化有密切的关系(表2,图1)。细根主要通过调控两个过程影响土壤有机碳存留:其一,细根及其共生真菌和分泌物作为重要的植物源有机质,可增加土壤碳输入^[23,32-33];其二,细根及其共生真菌能够胶结土壤有机质形成稳定的团聚体结构,对已存留的有机碳形成有效的保护^[22,34-36]。

^{13}C 同位素特征值能够有效的表征土壤有机碳的来源^[29,37-38]。鉴于同种植物叶片与根系的 $\delta^{13}\text{C}$ 之间差异很小($0.77\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$)^[38-41],本研究基于叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 分析重植植物细根碳输入对土壤有机碳的影响。土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 主要继承于植物的 ^{13}C 同位素特征^[38-39],因而在地表植物物种组成稳定的情况下土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 与植物 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著的线性关系^[40,42]。然而,本研究区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 并无显著的相关关系(图4),而且尽管不同恢复模式植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著差异,但土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 基本维持在 -20‰ (表2),表明本研究中土壤有机碳同位素特征更多的继承于植被重植前的土壤原有机碳,而非现有植物的同位素特征。我们根据 Bernoux 等^[29] 估算植被恢复十年过程中重植植物碳输入比例均值约为 0.57%,而且恢复模式间无显著差异(图5);鉴于细根仅为植物源有机质输入的一部分,其比例还要低,因此细根通过碳输入过程对土壤有

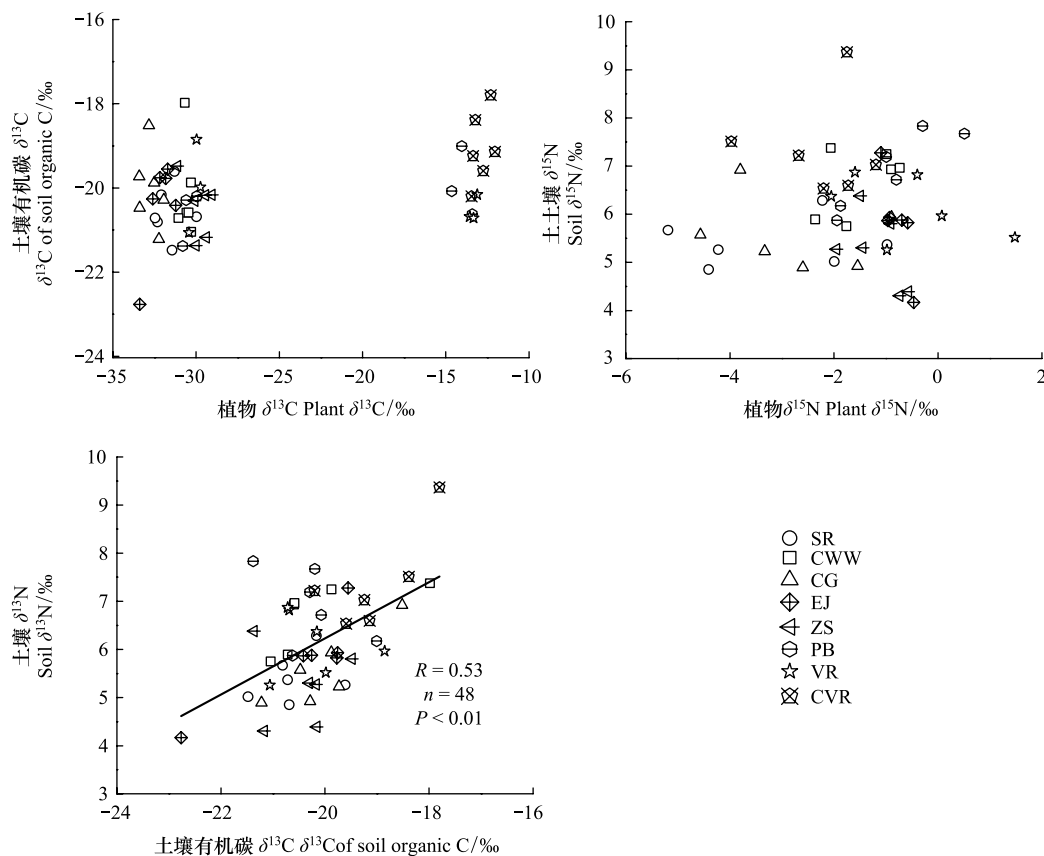


图4 不同植被恢复模式植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 、植物 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 、土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 相关性

Fig.4 Correlations between plant $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{13}\text{C}$ of SOC, plant $\delta^{15}\text{N}$ and soil $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ of SOC and soil $\delta^{15}\text{N}$ under different vegetation restoration strategies

机碳存留的影响可能是较弱的。

退化生态系统恢复前期,重植植物碳输入对土壤有机碳存留的影响是滞后的^[43];而停止干扰之后土壤结构较快恢复,对土壤原有机碳形成有效的保护^[35]。喀斯特坡地恢复生态系统土壤砂粒是有机碳的主要赋存形式^[31,44],细根可能通过胶结作用将与砂粒结合的易分解的颗粒有机碳稳定于大团聚体中(图3),增加对土壤原有机碳的保护和存留。张伟等^[16]在同一研究地点分析了喀斯特坡地玉米和牧草垦殖对土壤有机质的影响,其结果表明开垦两年玉米地有机质丢失率达42%,而牧草地仅为19%,这在一定程度上得益于牧草地较大的根系生物量对与砂粒结合的颗粒有机质的保护。喀斯特生态系统交换性钙是稳定土壤有机碳的主要控制因素^[15,45]。细根生物量与土壤交换性钙存在显著正相关关系(图3),表明细根可以通过影响土壤交换性钙对土壤有机碳存留产生影响。其潜在机理可能是细根分泌有机酸活化养分的过程中促进交换性钙的释放^[24,46-48];释放的交换性钙与有机质形成胶结物质和土壤颗粒复合形成较稳定的团聚体^[10,49],促进土壤有机

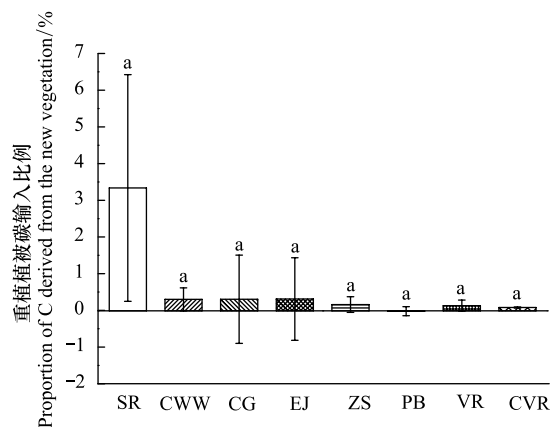


图5 重植植被碳输入比例估算

Fig.5 Estimate the proportion of C input derived from new vegetation

碳存留。此外,细根对土壤结构的改善有助于提高土壤含水量(图3),在一定程度上可减少地表或地下水循环导致的碳流失^[26]。

稳定生态系统中因继承同一植物的¹⁵N和¹³C同位素特征,土壤与植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 、土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 之间存在显著正相关线性关系^[42]。本研究土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著的正相关关系,而植物与土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 之间无相关性(图4),表明在植被恢复过程中重植植物氮输入对土壤总氮 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响较少,更多的是继承于植被重植前土壤总氮的¹⁵N同位素特征。一般而言,植被恢复过程中土壤有机碳、氮的变化是耦合一致的^[50],其存留机制是相似的^[35]。因此,本研究中细根对土壤总氮存留的影响可能更多的也是基于对土壤原总氮的保护,而非细根氮输入。

3.2 细根对土壤可利用性碳、氮的影响

细根生物量与土壤可溶性有机碳和氮、铵态氮和无机氮存在显著的正相关关系(图2),表明喀斯特坡地植被恢复过程中细根对土壤可利用性碳、氮产生重要影响,而且这种影响可能与细根对微生物的影响是相关的(图2)。细根通过影响其微域范围内微生物群落结构和生物量调控根际动态过程,在根本上决定着根际养分的有效性^[25,46]。如Phillips等^[25]在杜克森林的研究表明增加的细根生物量,促进根系分泌物的增多,激发根际微生物生物量的增加和酶活性的提高,促进土壤可利用性有机碳和无机氮的释放。Phillips等^[25]的研究进一步表明尽管细根生物量的增加,提高土壤可利用性碳、氮含量,但土壤有机碳、氮的存留并没有发生显著变化。这与本研究结果相吻合,因喀斯特恢复生态系统不同演替阶段均受到氮磷等营养元素限制^[8],重植植物细根有机质输入可能被微生物很快分解,供植物吸收利用,其存留的有机碳、氮含量相对于原土壤来说是很少的,因而不足以改变土壤原有有机碳¹³C和¹⁵N同位素特征值。

3.3 不同植被恢复模式土壤碳氮存留效应评估

八种植被恢复模式间土壤有机碳存在显著差异($P = 0.01$),封育林和刘割草地>火烧和刘割除根草地>枇杷>任豆和光皮树>青冈栎,这与细根生物量的变化基本吻合(表2)。封育林和刘割草地较高的细根生物量可能通过改善土壤团聚体结构,增加对土壤原有有机碳的保护,减少植被重植干扰导致的有机碳流失。八种植被恢复模式间土壤总氮无显著差异($P = 0.32$),但与封育林相比,任豆、火烧草地和刘割草地总氮轻微增加,这可能与三种恢复模式样地存在固氮植物有关(表1,2);其他4种模式总氮浓度下降,这与其细根生物量变化相吻合(表2)。综上,喀斯特植被恢复前期封育林和刘割草地模式对土壤碳氮具有较好的存留效应。

4 结论

本研究结果表明:喀斯特坡地植被恢复前期(1)细根通过稳定土壤团聚体结构对土壤原有有机碳、氮形成有效保护和存留,而细根有机质输入的影响是较弱的;(2)细根可能通过影响微生物调控土壤碳氮可利用性;(3)封育林和刘割草地模式因高细根生物量和固氮植物对土壤碳氮具有较好的存留效应。

致谢:感谢中国科学院亚热带农业生态研究所杜虎和刘坤平老师在样地选择和数据分析方面给予的帮助。

参考文献(References):

- [1] 喻理飞,朱守谦,叶镜中,魏鲁明,陈正仁.退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究.林业科学,2002,38(1):1-7.
- [2] 王世杰,李阳兵.喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势.地球科学进展,2007,22(6):573-582.
- [3] Zhang M Y, Zhang C H, Wang K L, Yue Y M, Qi X K, Fan F D. Spatiotemporal variation of karst ecosystem service values and its correlation with environmental factors in northwest Guangxi, China. Environmental Management, 2011, 48(5): 933-944.
- [4] Qi X K, Wang K L, Zhang C H. Effectiveness of ecological restoration projects in a karst region of southwest China assessed using vegetation succession mapping. Ecological Engineering, 2013, 54: 245-253.
- [5] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, De Keersmaecker W, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. Nature Sustainability, 2018, 1(1): 44-50.

- [6] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Ciais P, Jepsen M R, Penuelas J, Wigner J P, Xiao X M, Song X P, Horion S, Rasmussen K, Saatchi S, Fan L, Wang K L, Zhang B, Chen Z C, Wang Y H, Li X J, Fensholt R. Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 129.
- [7] 刘丛强, 郎赞超, 李思亮, 朴何春, 涂成龙, 刘涛泽, 张伟, 朱书法. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势. *地学前缘*, 2009, 16(6): 1-12.
- [8] Zhang W, Zhao J, Pan F J, Li D J, Chen H S, Wang K L. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China. *Plant and Soil*, 2015, 391(1/2): 77-91.
- [9] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展. *土壤学报*, 2004, 41(4): 618-623.
- [10] Kononova M M. *Soil Organic Matter: Its Nature, Its Role in Soil Formation and in Soil Fertility*. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [11] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 220-228.
- [12] Tilman D. Nitrogen-limited growth in plants from different successional stages. *Ecology*, 1986, 67(2): 555-563.
- [13] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? *Biogeochemistry*, 1991, 13(2): 87-115.
- [14] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer, 2002.
- [15] 张伟, 王克林, 刘淑娟, 叶莹莹, 潘复静, 何寻阳. 喀斯特峰丛洼地植被演替过程中土壤养分的积累及影响因素. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 1801-1808.
- [16] 张伟, 陈洪松, 苏以荣, 王克林, 林海飞, 刘坤平. 不同作物和施肥方式对新垦石灰土土壤肥力的影响. *土壤通报*, 2013, 44(4): 925-930.
- [17] Chen H S, Zhang W, Wang K L, Hou Y. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by land use types in karst and non-karst areas of northwest Guangxi, China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(5): 1086-1093.
- [18] Hu Y C, Du Z L, Wang Q B, Li G C. Combined deep sampling and mass-based approaches to assess soil carbon and nitrogen losses due to land-use changes in karst area of southwestern China. *Solid Earth*, 2016, 7(4): 1075-1084.
- [19] 陈祖拥, 刘方, 蒲通达, 李准, 宁婧. 贵州中部喀斯特森林退化过程中土壤酶活性的变化. *贵州农业科学*, 2009, 37(2): 47-51.
- [20] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 舒世燕, 何寻阳, 杨珊, 潘复静. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被演替阶段的土壤脲酶活性. *生态学报*, 2011, 31(19): 5789-5796.
- [21] Zhao J, Li S P, He X Y, Liu L, Wang K L. The soil biota composition along a progressive succession of secondary vegetation in a karst area. *PLoS One*, 2014, 9(11): e112436.
- [22] Rasse D P, Rumpel C, Dignac M F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 2005, 269(1/2): 341-356.
- [23] Clemmensen K E, Bahr A, Ovaskainen O, Dahlberg A, Ekblad A, Wallander H, Stenlid J, Finlay R D, Wardle D A, Lindahl B D. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. *Science*, 2013, 339(6127): 1615-1618.
- [24] 朱永官, 段桂兰, 陈保冬, 彭新华, 陈正, 孙国新. 土壤-微生物-植物系统中矿物风化与元素循环. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(6): 1107-1116.
- [25] Phillips R P, Finzi A C, Bernhardt E S. Enhanced root exudation induces microbial feedbacks to N cycling in a pine forest under long-term CO₂ fumigation. *Ecology Letters*, 2011, 14(2): 187-194.
- [26] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 何菲, 王克林. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 121-126.
- [27] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. Microbial biomass measurements in forest soils: determination of k_C values and tests of hypotheses to explain the failure of the chloroform fumigation-incubation method in acid soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 689-696.
- [28] Brookes P C, Kragt J F, Powlson D S, Jenkinson D S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: the effects of fumigation time and temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 831-835.
- [29] Bernoux M, Cerri C C, Neill C, de Moraes J F L. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma*, 1998, 82(1/3): 43-58.
- [30] 肖霜霜, 叶莹莹, 张伟, 吴敏, 王克林. 干扰/利用方式对喀斯特石灰土团聚体分布及其碳氮含量的影响. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1140-1146.
- [31] Xiao S S, Zhang W, Ye Y Y, Zhao J, Wang K L. Soil aggregate mediates the impacts of land uses on organic carbon, total nitrogen, and microbial activity in a karst ecosystem. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41402.
- [32] Tefs C, Gleixner G. Importance of root derived carbon for soil organic matter storage in a temperate old-growth beech forest-evidence from C, N and ¹⁴C content. *Forest Ecology and Management*, 2012, 263: 131-137.
- [33] Xiong Y M, Liu X, Guan W, Liao B W, Chen Y J, Li M, Zhong C R. Fine root functional group based estimates of fine root production and turnover rate in natural mangrove forests. *Plant and Soil*, 2017, 413(1/2): 83-95.

- [34] Jastrow J D, Miller R M, Lussenhop J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(7): 905-916.
- [35] O'Brien S L, Jastrow J D. Physical and chemical protection in hierarchical soil aggregates regulates soil carbon and nitrogen recovery in restored perennial grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 61: 1-13.
- [36] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 高晓丹, 李双异, 孙良杰, 安婷婷, 裴久渤, 李明, 王阳, 张维俊, 葛壮. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展. *土壤学报*, 2019, 56(3): 528-540.
- [37] 孙建飞, 戴巍巍, 贺同鑫, 彭勃, 姜萍, 韩士杰, 白娥. 蒙古栎叶片及其土壤碳、氮同位素自然丰度对大气 CO₂ 浓度升高的响应. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2179-2185.
- [38] Balesdent J, Mariotti A, Guillet B. Natural ¹³C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(1): 25-30.
- [39] Natelhoffer K J, Fry B. Controls on natural nitrogen-15 and carbon-13 abundances in forest soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(6): 1633-1640.
- [40] Balesdent J, Girardin C, Mariotti A. Site-related $\delta^{13}\text{C}$ of tree leaves and soil organic matter in a temperate forest. *Ecology*, 1993, 74(6): 1713-1721.
- [41] Hobbie A E, Werner R A. Intramolecular, compound-specific, and bulk carbon isotope patterns in C₃ and C₄ plants; a review and synthesis. *New Phytologist*, 2004, 161(2): 371-385.
- [42] Peri P L, Ladd B, Pepper D A, Bonser S P, Laffan S W, Amelung W. Carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) stable isotope composition in plant and soil in Southern Patagonia's native forests. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 311-321.
- [43] Deng L, Liu G B, Shanguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3544-3556.
- [44] 刘涛泽, 刘丛强, 张伟. 植被恢复中坡地土壤颗粒有机碳分布特征和 $\delta^{13}\text{C}$ 值组成. *生态环境*, 2008, 17(5): 2031-2036.
- [45] Li D J, Wen L, Yang L Q, Luo P, Xiao K C, Chen H, Zhang W, He X Y, Chen H S, Wang K L. Dynamics of soil organic carbon and nitrogen following agricultural abandonment in a karst region. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(1): 230-242.
- [46] 张福锁, 曹一平. 根际动态过程与植物营养. *土壤学报*, 1992, 29(3): 239-250.
- [47] Fahey T J, Heinz A K, Battles J J, Fisk M C, Driscoll C T, Blum J D, Johnson C E. Fine root biomass declined in response to restoration of soil calcium in a northern hardwood forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2016, 46(5): 738-744.
- [48] 龚芳芳, 樊卫国. 外源柠檬酸对石灰性黄壤养分活化及刺梨实生苗养分吸收与生长的影响. *中国农业科学*, 2018, 51(11): 2164-2177.
- [49] 任娇娇, 周运超, 刘兵, 张春来. 石灰岩发育土壤团聚体形成机制研究. *中国岩溶*, 2019, 38(5): 722-728.
- [50] Li D J, Niu S L, Luo Y Q. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis. *New Phytologist*, 2012, 195(1): 172-181.