

基于MDC方法评价林下劣地碳氮提升对短期恢复措施响应

陈晓光^{1,2}, 于寒青², 刘文祥², 李勇¹

(1.广西大学农学院, 南宁 530004; 2.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 为了评价林下侵蚀劣地碳氮提升对短期恢复管理措施响应, 选择基于最小可检测变化(minimum detectable change, MDC)设计的土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和碱解氮(AN)随时间变化的随机分层采样方法, 用以消除林下土壤碳氮的空间变异性。以南方红壤低山丘陵区马尾松林下侵蚀劣地为对象, 共设置7个处理: 无恢复措施(CT)、乔木+鱼鳞坑(FG)、乔木+鱼鳞坑(FS)、乔木+鱼鳞坑(FGS)、乔木+小水平沟(FGP)、乔木+小水平沟(FSP)、乔木+小水平沟(FGSP)。结果表明: 试验进行1.5年后, 各处理的总植被盖度较试验前显著增加, 增加幅度为7%~50%, 其中草灌植被盖度增加尤为明显。基于MDC结果, 除FG、FS处理外, 其余处理均可以检测到SOC的变化; 除FG外, 其余处理均可以检测到TN的变化, 而所有处理均可以检测到AN的变化。与试验前相比, 各恢复措施下SOC、TN和AN含量的增量分别为0.10~2.08 g/kg、0.02~0.13 g/kg和8.54~25.06 mg/kg。SOC、TN和AN的净增量百分数分别为34%~101%、35%~83%和14%~82%; SOC的净增量大小排序为FGSP>FG>FGP>FGS>FSP>FS; 而TN的净增量表现为FS>FGS>FGSP>FGP>FSP>FG。小水平沟区组对SOC、TN和AN的增加明显高于鱼鳞坑区组。近地表草灌植被盖度是SOC、TN和AN提升的关键因素。本土先锋草灌植被与小水平沟复合配置措施是林下侵蚀劣地快速增碳固氮的有效措施, 研究结果可为红壤林下侵蚀劣地恢复治理提供技术支撑。

关键词: 红壤侵蚀劣地; 恢复措施; 土壤有机碳; 氮素; 最小可检测变化

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0280-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.04.041

Assessment of the Response of Soil Organic Carbon and Nitrogen Enhancement in Erosion-Degraded Land to Short-Term Restoration Measures Based On Minimum Detectable Change Method

CHEN Xiaoguang^{1,2}, YU Hanqing², LIU Wenxiang², LI Yong¹

(1. College of Agronomy, Guangxi University, Nanning 530004; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: In order to evaluate the enhanced effect of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and available nitrogen (AN) concentration under short-term restoration measures in erosion-degraded lands, we adopted the random stratified sampling strategy based on the theory of minimum detectable change (MDC), to eliminate spatial variability of SOC and nitrogen overtime. A typical erosion degraded forestland was selected, which located in the hilly red soil region of south China. 7 treatments were set up in this trial: No restoration measures (CT), tree and grass + fish scale pit (FG), tree and shrub + fish scale pit (FS), tree, shrub and grass + fish scale pit (FGS), tree and grass + small horizontal ditch (FGP), tree and shrub + small horizontal ditch (FSP), tree, shrub and grass + small horizontal ditch (FGSP). The results suggested that the vegetation coverage of each treatment increased significantly compared with those before the experiment, and the increase range was 7% to 50% after 18 months. Especially, the grass and shrub coverage significantly increased under each restoration measures. Except for FG and FS treatments, changes in SOC can be detected in all other treatments; except for FG treatment, changes in TN can be detected in all other treatments, while changes in AN can be detected in all treatments. The increase ranges of SOC, TN and AN content under each restoration measure were 0.10 to 2.08 g/kg, 0.02 to 0.13 g/kg and 8.54 to 25.06 mg/kg, when compared with those before the experiment. The ranges of net increment of SOC, TN and AN

收稿日期: 2020-01-08

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505402)

第一作者: 陈晓光(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: gxuchenxiaoguang@163.com

通信作者: 李勇(1958—), 男, 博士, 研究员, 主要从事水土保持研究。E-mail: liyong@caas.cn

于寒青(1983—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与碳循环研究。E-mail: yuhanqing@caas.cn

were 34% to 101%, 35% to 83% and 14% to 82%. The net increment of SOC in different treatments were in decreasing order of FGSP>FG>FGP>FGS>FSP>FS, while the net increment of TN showed as FS>FGS>FGSP>FGP>FSP>FG. The increment of SOC, TN and AN content in small horizontal ditch groups were significantly higher than those in fish scale pit groups. Near-surface grass and shrub vegetation coverage, is a key factor affecting changes in contents of SOC, TN and AN under erosion degraded forestland of red soil region. Local pioneer shrub plus grass with soil conservation engineering practices were the effective restoration measures for red soil erosion-degraded forest hillslope land and the improvement of SOC and nitrogen in the short term.

Keywords: erosion-degraded lands of red soil; restoration measures; soil organic carbon; nitrogen; minimum detectable change

我国南方红壤区总面积约 218 万 km²[1],但由于长期对红壤资源的不合理利用,红壤区降雨在时空尺度上的不均匀性,以及红壤本身“酸、黏、瘦”的土壤特性,整个红壤地区往往遭致严重的生态环境破坏,尤其是林下灌木或草本稀疏的马尾松林地,极易发生水土流失,“远看青山在,近看水土流”的问题十分突出,严重制约着该区域的社会经济发展和生态环境质量。

多年来,许多学者[2-4]对南方红壤丘陵区水土流失防治、低效林改造、生态环境改善等方面开展了一系列研究,通过采取工程措施、生物措施或多种方式相结合的综合防治措施,在减少水土流失、恢复林下植被、提高土壤质量方面取得了一定成果。有研究[5]发现,鱼鳞坑具有良好的保肥作用,而水平沟、水平阶措施对速效养分的提升幅度高达 30%。与木本植物相比,以草本植物建立的植物篱可以在短期时间发挥水土保持作用[6]。在侵蚀退化严重的林地恢复重建时应考虑选择与当地生物气候条件相适应的耐瘠耐旱抗逆性强的植物品种,以提高水土流失区的生物多样性[7];同时,补植乔、灌、草植物,需要施入一定量的基肥,为前期植被生长提供必要的养分,从而提高植株成活率和促进植被快速恢复[8]。植被恢复过程中土壤有机碳和氮素的积累与损失,是评价退化林地恢复效果的重要参考,直接影响土壤碳库和氮库的变动。Xie 等[9]研究发现,植被恢复 24 年后,马尾松人工林生态系统碳库储量与裸地相比提高 10 倍。在长汀红壤水土流失区,马尾松林植被恢复初期(10 年)显著增加了土壤表层(0—10 cm)有机碳和颗粒态碳含量,但矿质结合态有机碳并未显著提高[10]。刘俊第等[11]研究发现,随着植被恢复年限(0~30 a)的增加,土壤有机氮、矿质氮组分基本呈现上升趋势,土壤肥力逐渐改善。

目前关于侵蚀红壤劣地的研究主要集中在水沙过程和长期恢复措施生态效益评价上,而短期的生态效益评价研究较少。由于林地土壤碳氮的空间差异性很大,如何科学地采样以代表研究点的差异性以及评价短期内土壤有机碳及氮素对植被、工程复合措施的

响应,是一个值得探讨的问题。本研究以江西宁都典型红砂岩侵蚀退化马尾松林地对象,通过开展野外定位监测与实验室分析,基于最小可检测变化方法,探究不同恢复措施下马尾松侵蚀退化林地土壤碳氮的短期变化特征及其影响因素,以期对马尾松侵蚀退化林地的恢复治理与短期内土壤碳氮的提升提供一定依据。

1 材料与与方法

1.1 试验区概况

试验区设在江西省赣州市宁都县石上镇(116°02'31"E,26°41'46"N),地处中亚热带季风气候区,年平均气温 14~19℃,多年平均降水量 1 706 mm,其中 40%~70%的年降水量集中在 4—6 月,7—9 月降雨明显减少,这一时期易形成伏、秋旱,多年平均日照时间 1 938.8 h,多年无霜期平均为 279 d。地貌为低山丘陵,境内高程 300~500 m,土壤类型以花岗岩红壤、红砂岩红壤为主,肥力较低,土壤可蚀性较强,植被主要以马尾松、铁芒萁为主,植被覆盖度低,基岩裸露,林下水土流失严重。

试验区土壤基本理化性质:pH 4.72,有机碳含量 2.96 g/kg,速效磷含量 1.91 mg/kg,碱解氮含量 24.07 mg/kg,全氮含量 0.22 g/kg,土壤砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)含量分别为 83.77%,10.63%和 5.60%。

1.2 试验设计

试验选取 2012 年飞播马尾松治理的红砂岩红壤侵蚀劣地作为样地,2018 年 4 月布设随机区组试验,试验共设置 7 个处理小区,每个处理小区为 15 m×15 m,分别为:乔草+鱼鳞坑(FG)、乔灌+鱼鳞坑(FS)、乔灌草+鱼鳞坑(FGS)、乔草+小水平沟(FGP)、乔灌+小水平沟(FSP)、乔灌草+小水平沟(FGSP),以及未采取任何措施的马尾松侵蚀退化林地作为对试样地(CT)。

沿等高线挖掘小水平沟,沟长为 4~5 m,宽为 40 cm,深为 40 cm,用挖穴土在下方拍实作埂,埂顶宽为

30 cm,埂高 40 cm,每个坡位设置 1 个小水平沟;鱼鳞坑设置呈“品”字形分布,开挖面呈半圆形,直径约 80 cm,深 50 cm,土埂高 15 cm,埂顶宽 10 cm。在鱼鳞坑内引种乔木杜英 (*Elaeocarpus decipiens* Hemsl.)、木荷 (*Schima superba*)、枫香 (*Liquidambar formosana*)。在全坡面地表裸露处挖小穴种植灌木胡枝子 (*Lespedeza bicolor* Turcz.)、紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* L.)和草种宽叶雀稗 (*Paspalum wettsteinii* Hackel)、百喜草 (*Paspalum natatu*)、香根草 (*Vetiveria zizanioides*)。

引种乔木前在鱼鳞坑种植穴内施入有机肥 0.5 kg,复合肥 0.2 kg;引种灌木前在穴内施入有机肥 0.2 kg,复合肥 0.1 kg;引种草种前按 1:2.5:5 的比例需将草种、钙镁磷肥和表土等物料混匀,然后撒入种植穴,覆土填平。

1.3 土壤样品采集与处理

利用分层随机采样法进行 2 轮土壤样品采集。布设试验小区前(2018 年 4 月)进行第 1 轮采样,将每个小区按 5 m×5 m 的标准分成 9 层(格子),每层(格子)采集 3 个重复土壤样品(A、B 和 C),每个试验小区共采集 27 个样品,采用随机方程赋予每层(格子)采样点坐标,并命名为 A1、B1、C1、…、A9、B9、C9。用直径为 50 mm 的土钻采集 0—10 cm 土壤样品,按相同字母编号混合成 1 个混合样,共 21 个混合样。装入自封袋并做好标记,带回实验室自然风干,去除样品中肉眼可见根系、石粒及动植物残体后,将风干土过 2 mm 筛,取一部分用于土壤碱解氮的测定,其余样品过 0.15 mm 筛子用于土壤有机碳和全氮的测定。

2019 年 9 月进行第 2 轮采样,采样方法与第 1 轮采样一致,土样采集完毕后迅速带回实验室,去除根系、石粒及动植物残体后,将一部分原状土过 2 mm 筛,测定土壤微生物量碳氮;一部分原状土自然风干后,沿土体结构轻轻掰成直径约 1 cm 的小土块,按比例配成 100 g 用于水稳性团聚体的测定;余下土样用四分法分为 2 部分:一部分过 2 mm 筛,用于土壤碱解氮、易提取球囊霉素相关土壤蛋白、总球囊霉素相关土壤蛋白的测定;另一部分过 0.15 mm 筛子,用于土壤有机碳及全氮的测定。

1.4 土样分析及植被盖度测定

土壤理化性质均采用常规方法测定^[12]。土壤 pH 采用 pH 计测定,水土比为 2.5:1,土壤有机碳含量(soil organic carbon, SOC)采用重铬酸钾氧化—外加热法测定;土壤全氮含量(total nitrogen, TN)采用凯氏定氮法测定;土壤碱解氮含量(available nitrogen, AN)采用碱解扩散法测定。

土壤微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)和土壤微生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)采用氯仿熏蒸—K₂SO₄浸提法^[12],提取液使用 multi C/N 2100/2100S TOC 分析仪(Jena, 德国)测定。计算结果为每单位干土所含微生物量碳(微生物量氮)的量(mg/kg)。

MBC 计算公式:

$$MBC = E_c / K_{EC} \quad (1)$$

式中: E_c 为熏蒸土样有机碳量与未熏蒸土样有机碳量之差; K_{EC} 为转换系数,取值 0.45。

MBN 计算公式:

$$MBN = E_N / K_{EN} \quad (2)$$

式中: E_N 为熏蒸土样所浸提的全氮与未熏蒸土样之差, K_{EN} 为转换系数,取值 0.45。

土壤水稳性团聚体组成的测定采用湿筛法^[13],分离出 >2, 2~0.5, 0.5~0.25, 0.25~0.053, <0.053 mm 粒级,计算 <0.25 mm 水稳性团聚体($R_{<0.25}$)质量百分比和平均重量直径(MWD)。

$R_{<0.25}$ 计算公式:

$$R_{<0.25} = M_{T<0.25} / M_T \times 100\% \quad (3)$$

式中: M_T 为团聚体总重量(g)。

MWD 计算公式:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (4)$$

式中: X_i 为每一粒径团聚体的平均直径(mm); W_i 为每一粒级团聚体的重量百分含量(%)。

球囊霉素相关土壤蛋白(glomalin-related soil protein, GRSP)的提取测定采用 Wright 等^[14]的方法并加以改进。易提取球囊霉素(easy extractive glomalin-related soil protein, EEG)提取方法:称取 1.00 g 土样于 10 mL 离心管中,加入 8 mL 柠檬酸钠浸提剂(pH=7.0、浓度 20 mmol/L),充分混匀后于高压蒸汽灭菌锅 121 °C、103 kPa 下灭菌 30 min,冷却后放入离心机,在 10 000 g 下离心 5 min,收集上清液。总球囊霉素(total glomalin-related soil protein, TG)提取方法:称取 1.00 g 土样于 10 ml 离心管中,加入 8 mL 柠檬酸钠浸提剂(pH=8.0、浓度 50 mmol/L),充分混匀后于高压蒸汽灭菌锅 121 °C、103 kPa 下灭菌 60 min,之后 10 000 g 下离心 5 min,收集上清液,再加入 8 mL 柠檬酸钠浸提剂反复操作,提取 5 次至上清液棕红色消失,收集上清液,4 °C 保存待测。测定方法:吸取 0.5 mL 提取液,加入 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 染色剂(使用前需过滤),加盖,颠倒使之充分反应,显色 10 min,于 595 nm 波长下比色。用牛血清白蛋白(BSA)作标准液,考马斯亮蓝法显色,绘制标准曲线。根据绘制的标准曲线以及上清液测得的吸光度值,计

算球囊霉素相关土壤蛋白的含量。

植被覆盖度的测定采用样带法^[15]。将试验小区划分为9个5 m×5 m的样地,沿样地对角线拉1根实际的样带线,测量植物个体接触样带线的长度,等距(10 cm)连续采样,按植物类型分成乔木(F)、灌木(S)、草类(G),其中出现植被的样数占总样数的比值即为总植被盖度(vegetation coverage, VC)。

1.5 数据分析

最小可检测变化(minimum detectable change, MDC)是样品可以被检测到的最小变化量,当指标试验前后所测的均值差大于MDC时,才能检测到该指标给定接受误差的变化^[16]。MDC的计算公式^[16]为:

$$MDC = (X_{1-\alpha} + X_{1-\beta}) \left(\frac{(1-\rho_k)V_1}{N_1} + \frac{(1-\rho_k)V_2}{N_2} \right)^{0.5} \quad (5)$$

式中: $X_{1-\alpha}$ 和 $X_{1-\beta}$ 为某一精度下,由Z值表(标准正态分布表)查得的相应临界值(计算中, α 、 β 取0.05); ρ_k 为2轮采样数据的自相关性系数; V 为试验处理的该指标方差; N 为混合样数量。

2轮采样数据均差值(Δd)的计算公式为:

$$\Delta d = |d_2 - d_1| \quad (6)$$

式中: d 为该轮采样样品指标的平均值,2轮样品均差值取绝对值。

SOC、TN和AN净增量百分比的计算:

$$\text{净增量百分比} = \frac{\Delta T - \Delta C}{C_{\text{背景值}}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: ΔT 为某一处理试验前后该指标的均差值; ΔC 为对照处理试验前后该指标的均差值; C 为对照处理该指标的背景值。

使用Excel 2007和SPSS 17.0软件对数据进行处理和分析,利用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同处理间SOC、TN和AN变化的差异显著性(LSD, $\alpha = 0.05$),采用Pearson法对SOC、TN、AN和环境因子进行相关性分析,利用CANOCO 5.0软件进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),使用Origin 2018软件进行作图。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同处理植被盖度的变化特征

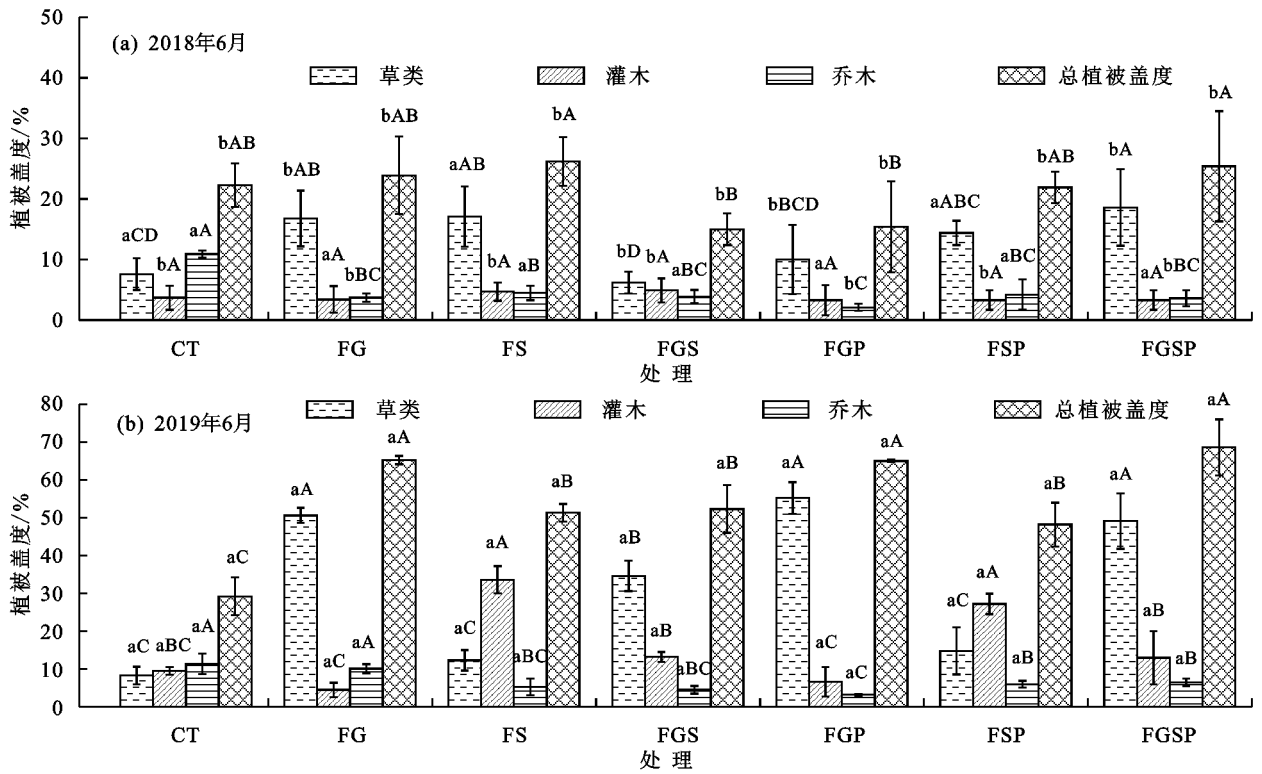
试验前,各处理小区草、灌木、乔木和总植被盖度范围分别在6%~19%,3%~5%,2%~11%和15%~26%;除CT外,其余处理植被盖度以草为主,灌木、乔木所占比重较低(图1)。采取植被恢复措施1年后(2019年6月),各处理总植被盖度提高至29%~69%,盖度由高到低依次为FGSP>FG>FGP>FGS>FS>FSP>CT;与2018年相比显著提升($P < 0.05$),分别提高7%~50%,增幅由高到低依次为FGP>FGSP>

FG>FGS>FSP>FS>CT;与CT相比,总植被盖度在FG、FS、FGS、FGP、FSP和FGSP处理上分别提高154%,82%,136%,191%,87%和163%。其中,草类盖度在FG、FGS、FGP和FGSP处理上与2018年相比显著提升($P < 0.05$),分别提高34%,28%,45%和31%;灌木在CT、FS、FGS、FSP处理上显著提升($P < 0.05$),分别提高6%,29%,8%和24%;乔木在FG、FGP、FGSP处理上显著提升($P < 0.05$),分别提高6%,1%和3%。上述结果表明,不同处理草类盖度提升最大,灌木次之,乔木最小。因此,近地表草灌木在短期内对植被盖度的快速提高作用较大。

2.2 不同处理SOC、TN和AN含量的变化特征及其净增量变化

从图2可以看出,试验前SOC含量为2.67~6.70 g/kg,平均值为4.23 g/kg,采取恢复措施1.5年后,各处理SOC含量为2.05~7.77 g/kg,平均值为5.00 g/kg,大小顺序依次为FGP>FGSP>FG>FS>FSP>FGS>CT;与试验前比较,CT显著低于试验前SOC含量($P < 0.05$),FG、FGS、FGP、FSP和FGSP处理SOC含量显著高于试验前($P < 0.05$),但FS处理变化不显著。TN变化趋势与SOC一致,试验前,TN含量为0.22~0.47 g/kg,平均值为0.37 g/kg,试验进行1.5年后,除CT外,各处理TN含量提高到0.40~0.60 g/kg,平均值为0.45 g/kg,由高到低依次为FS>FGSP>FGP>FSP>FGS>FG>CT;其中,FS、FGS、FGP、FGSP处理的TN含量显著高于其试验前TN含量($P < 0.05$)。而所有处理AN含量较试验前均呈现显著增加趋势($P < 0.05$),大小表现为FGP>FSP>FS>FGSP>FG>FGS>CT。各恢复措施均能增加SOC、TN的含量,但SOC、TN含量在CT处理下均减少,这可能是因为林下未采取恢复措施导致植被盖度低,而AN含量在所有处理中均增加可能是施肥或养分归还所致。

由图3可以看出,采取恢复措施1.5年后,SOC在不同处理的净增量大小表现为FGSP>FG>FGP>FGS>FSP>FS,FGSP的净增量百分数最高,达101%,FS的净增量百分数最低,为34%;TN净增量由高到低依次为FS>FGS>FGSP>FGP>FSP>FG,除FG外,其余处理TN净增量百分数均大于60%;AN净增量大小顺序为FSP>FGP>FS>FGS>FGSP>FG,土壤AN在FSP和FGP处理的净增量均超过80%,其余处理净增量范围在14%~37%(图3)。总之,乔灌草混交和种植草类措施均能快速增加SOC含量,而种植灌木和前期施肥措施能明显提高TN和AN的含量。



注:不同大写字母表示同一时期不同处理的差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示同一处理不同时期的差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同处理植被盖度变化特征

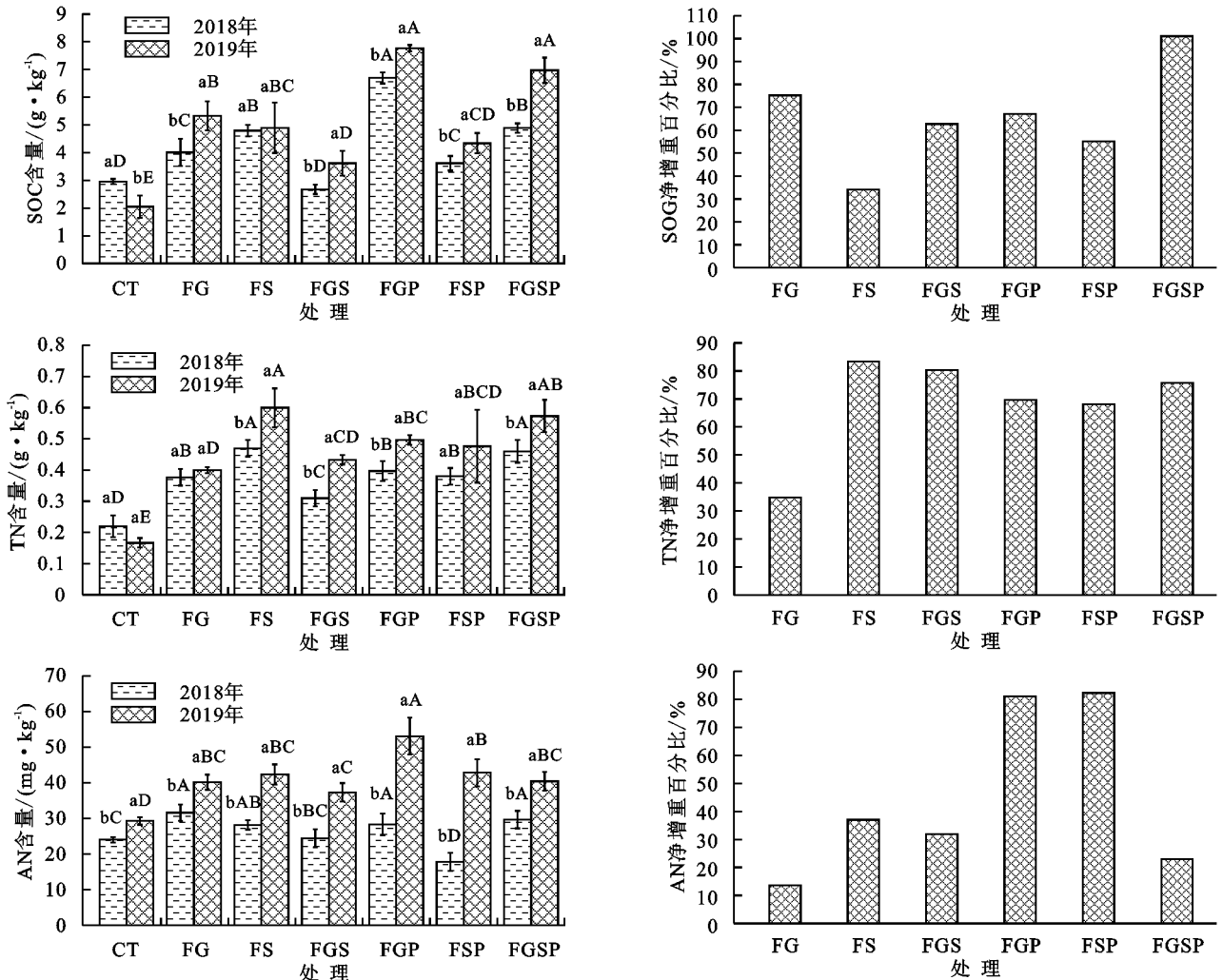


图 2 不同处理土壤有机碳和氮素变化特征

图 3 不同处理土壤有机碳和氮素净增量变化特征

2.3 不同处理 SOC、TN 和 AN 的 MDC

对2次采样的SOC、TN、AN结果进行最小可检测变化分析(表1)。除FG、FS外,其余处理的SOC的MDC结果均小于其实际采样的均值差,其中,FGSP处理SOC的均值差与其MDC相差最大,说明能检测到SOC更多的变化,能检测SOC变化的大小依次为FGSP>FGP>FSP>FGS>CT;除FG外,

其他处理TN的MDC的结果均小于其实际采样的均值差,各处理可以检测到TN变化量的由高到低为FSP>FGS>FGSP>FS>FGP>CT,而AN在所有处理上,其MDC均小于其实际采样的均值差,说明所有措施短期内均可以检测到AN的变化,各处理可以检测到AN变化量的大小分别为FSP>FGP>FS>FGSP>FGS>CT>FG。

表1 不同处理 SOC、TN 和 AN 的 MDC 变化

检测指标	MDC 变化	CT	FG	FS	FGS	FGP	FSP	FGSP
SOC	MDC	0.83	1.68	1.95	0.66	0.58	0.23	0.76
	Δd	0.91	1.32	0.10	0.95	1.08	0.72	2.08
TN	MDC	0.05	0.04	0.11	0.04	0.08	0.02	0.08
	Δd	0.05	0.02	0.13	0.12	0.10	0.10	0.11
AN	MDC	3.29	7.06	6.12	8.85	14.86	8.49	4.30
	Δd	5.25	8.54	14.16	12.94	24.77	25.06	10.77

2.4 SOC、TN、AN 与环境因子的相关性及冗余分析

由表2可以看出,SOC与 $R_{<0.25}$ 呈显著正相关($P<0.05$),与MBC、MBN、EEG、TG、G和VC呈极显著正相关($P<0.01$),但与F呈显著负相关($P<0.05$);TN与MBN、S呈显著正相关($P<0.05$),与EEG、TG和VC呈极显著正相关($P<0.01$),而与F呈极显著负相关($P<0.01$);AN与MBC、MBN、TG和G呈显著正相关($P<0.05$),与EEG、VC呈极显著正相关($P<0.01$),但与F呈极显著负相关($P<0.01$)。

以SOC、TN和AN作为响应变量,MBC、MBN和EEG等10个环境因子作为解释变量进行RDA分析,结果表明:10个环境因子可解释SOC、TN和

AN信息的97.21%(表3)。RDA前2个排序轴分别解释SOC、TN和AN总变异的81.49%和2.61%,占总可解释变异的86.51%。因此,RDA分析得到的前2个排序轴的三标图可显示SOC、TN和AN与环境因子之间的关系(图4),其中VC作用最明显,解释SOC、TN和AN变化的73.0%($P=0.002$),其他环境因子可解释变异大小依次为EEG>G>TG>MBN>MBC>F> $R_{<0.25}$ >S>MWD,分别解释SOC、TN和AN变化的60.8%($P=0.002$),45.7%($P=0.002$),45.6%($P=0.002$),35.0%($P=0.01$),34.7%($P=0.004$),25.4%($P=0.008$),13.0%($P=0.116$),1.9%($P=0.6$)和1.7%($P=0.616$)。

表2 SOC、TN、AN 与环境因子的简单相关分析

因子	SOC	TN	AN	MBC	MBN	MWD	$R_{<0.25}$	EEG	TG	G	S	F	VC
SOC	1.000												
TN	0.689**	1.000											
AN	0.807**	0.669**	1.000										
MBC	0.637**	0.408	0.483*	1.000									
MBN	0.579**	0.444*	0.541*	0.796**	1.000								
MWD	-0.111	0.122	0.085	-0.362	-0.182	1.000							
$R_{<0.25}$	0.443*	-0.106	0.307	0.492*	0.382	-0.576**	1.000						
EEG	0.797**	0.732**	0.636**	0.720**	0.596**	0.010	0.183	1.000					
TG	0.716**	0.648**	0.461*	0.711**	0.577**	-0.086	0.093	0.825**	1.000				
G	0.751**	0.325	0.513*	0.717**	0.559**	-0.368	0.714**	0.622**	0.546*	1.000			
S	-0.137	0.470*	0.086	-0.355	-0.145	0.425	-0.697**	0.019	-0.025	-0.650**	1.000		
F	-0.445*	-0.624**	-0.587**	-0.207	-0.293	-0.508*	0.017	-0.574**	-0.247	-0.228	-0.301	1.000	
VC	0.866**	0.697**	0.669**	0.699**	0.619**	-0.306	0.473*	0.776**	0.707**	0.865**	-0.205	-0.338	1.000

注:*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$; $N=21$; SOC为有机碳; TN为总氮; AN为碱解氮; MBC为土壤微生物量碳; MBN为土壤微生物量氮; MWD为平均重量直径; $R_{<0.25}$ 为 <0.25 mm土壤水稳性团聚体; EEG为易提取球囊霉素; TG为总球囊霉素; G为草类盖度; S为灌木盖度; F为乔木盖度; VC为总植被盖度。

3 讨论

本研究结果表明,马尾松侵蚀退化林地采取生态

恢复措施后,植被覆盖度尤其是近地表草灌植被覆盖度显著增加,快速提高了林下SOC含量,所有恢复措

施的 SOC 增加 0.10~2.08 g/kg(图 2)。这是因为马尾松侵蚀退化林地植被盖度增加,一方面提高了土壤有机物质的输入量,尤其是植被恢复初期林下土壤活性碳的输入;另一方面减少了水土流失进而减少 SOC 损失。在植被恢复初期,SOC 含量的增加主要表现在活性碳变化上,这些活性碳主要来源于施入有机肥、新鲜动植物残体、植物死亡的根系和地表凋落物^[17]。同时,植被的冠层对降水的截留和分配^[18]以及根系对土壤的固持与缠绕作用^[19],可提高土壤入渗能力^[20],促进水稳性团聚体的形成^[21],减少地表径流及土壤养分流失。本研究 FG、FGS、FGP 和 FGSP 处理对 SOC 含量的增加高于 FS 和 FSP 处理(图 2),这是因为草类生长周期长、生物量大,对土壤养分归还和有机物质输入高于灌木。同时,乔灌草混交形成了复杂的冠层立体结构,可以有效减轻雨滴溅蚀,从而减少了 SOC 流失。除此之外,小水平沟和鱼鳞坑等工程措施可以拦蓄坡面径流和侵蚀泥沙^[22],本研究中小水平沟区组总植被盖度增长量和 SOC 净增量均大于鱼鳞坑区组(图 1、图 3),这可能是小水平沟措施的蓄水保土效果优于鱼鳞坑,良好的水分和养分条件有助于植被的生长。

表 3 RDA 分析的 4 个排序轴的特征值及累计解释率

排序轴	特征值	累计可解释变异/%
1	0.8149	81.49
2	0.0261	84.11
3	0.0109	85.20
4	0.1201	97.21

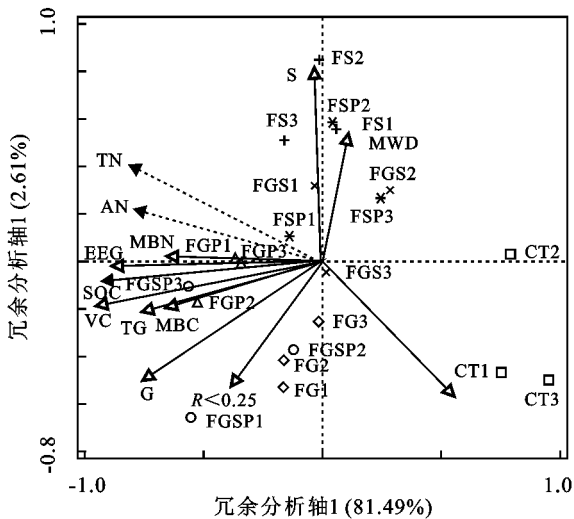


图 4 不同环境因子对有机碳、全氮、碱解氮含量影响的冗余分析

在采取生态恢复措施后,除对照处理外,土壤 TN 在其余处理下均有所上升。在植被恢复过程中,土壤氮素增加的可能原因主要有:(1)植物根系分泌有机酸,促进了土壤养分的周转^[23];(2)植被覆盖度增加,植物残体和凋落物的投入增加,导致有机物质和氮素

的输入增加^[24],同时减少了土壤侵蚀和土壤氮素流失^[11];(3)前期种植乔灌草植物的时候施用了有机肥、化肥,有机肥中有机氮的矿化和肥效发挥速率比化肥慢,肥效持续性更长,有利于土壤氮素的积累^[25]。与其他处理相比,土壤 TN 和 AN 在 FS、FGS、FSP、FGSP 处理下净增量较大,这是由于乔灌和乔灌草混交配置水土保持工程措施处理中引种了豆科固氮灌木紫穗槐、胡枝子。与 TN 不同,AN 含量在所有处理上均有所增加,这可能是大气氮沉降增加了土壤有效态氮含量。跟 SOC 相同,工程措施对土壤氮素的提升有同样作用,小水平沟区组土壤氮素净增量大于鱼鳞坑区组,说明小水平沟较鱼鳞坑提高了降水入渗能力,减少了坡面径流量和土壤侵蚀,从而减少了氮素的径流损失。

本研究发现,SOC、TN、AN 与土壤微生物量碳氮、球囊霉素相关土壤蛋白和植被盖度呈显著正相关,与乔木盖度呈显著负相关,其中总植被盖度尤其是近地表草灌植被盖度是影响 SOC 和氮素变化的关键因素(表 2 和图 4),这与许多研究^[26-29]结论一致。这是因为土壤微生物直接参与碳、氮等养分循环,在植被恢复过程中,植被盖度显著增加,地表凋落物和根系增加,为土壤微生物提供了丰富的碳源、氮源等养分,林下生境逐渐改善,有利于微生物生长发育及新陈代谢等活动,促进 SOC 和土壤氮素的积累^[26]。球囊霉素相关土壤蛋白是 AMF 真菌侵染宿主植物根系分泌产生的一类糖蛋白,是 SOC 和氮素的重要来源^[27],植被恢复显著增加植被地下生物量,增加土壤中 AMF 数量和侵染能力^[28],促进了球囊霉素相关土壤蛋白的产生。而 SOC、TN、AN 与乔木盖度呈显著负相关,可能是马尾松纯林林下无任何恢复措施,缺乏近地表草灌植被^[29],没有形成乔灌草立体冠层结构,水土流失依然强烈。

4 结论

采取植被恢复和坡面水土保持工程配置措施 1.5 年后,基于 MDC 方法评价 SOC 和土壤氮素(TN 和 AN)的变化。本研究结果表明:(1)乔草和乔灌草混交配置工程措施的处理(FGS、FGP、FG 和 FGSP)对 SOC 含量的增加贡献最大(63%~101%);而乔灌和乔灌草混交配置工程措施的处理(FSP、FGSP、FGS 和 FS)对 TN 含量的增加有明显作用(68%~83%);(2)采用小水平沟措施(FGP、FSP 和 FGSP)对 SOC、TN 和 AN 的提升高于采用鱼鳞坑措施(FG、FS 和 FGS);(3)SOC、TN 和 AN 提升与植被盖度尤其是近地表草灌植被盖度密切相关。近地表草灌植被与小水平沟措施复合配置是林下侵蚀劣地快速增碳固氮的有效措施。基于 MDC 的采样设计评价生态恢

复措施对侵蚀劣地碳氮提升的有效性是值得推荐的科学有效的方法,本研究为红壤林下侵蚀劣地短期内土壤碳氮的快速提升提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [2] 史志华,王玲,刘前进,等.土壤侵蚀:从综合治理到生态调控[J].中国科学院院刊,2018,33(2):198-205.
- [3] 张海涛,宫渊波,付万权,等.次降雨对马尾松低效林改造初期坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):51-55.
- [4] 何圣嘉,谢锦升,周艳翔,等.南方红壤侵蚀区马尾松林下植被恢复限制因子与改造技术[J].水土保持通报,2013,33(3):118-124.
- [5] 任文海.花岗岩红壤坡面工程措施的水土保持效应研究[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [6] Fan J, Yan L J, Zhang P, et al. Effects of grass contour hedgerow systems on controlling soil erosion in red soil hilly areas, Southeast China[J].International Journal of Sediment Research,2015,30(2):107-116.
- [7] 谢建华,岳辉,彭绍云,等.福建省省长汀县侵蚀地治理草灌乔综合配置技术[J].亚热带水土保持,2014,26(3):46-48.
- [8] 朱洪如.南方红壤侵蚀区退化马尾松林改造治理模式及实施技术[J].林业勘察设计,2017,37(1):58-60.
- [9] Xie J S, Guo J F, Yang Z J, et al. Rapid accumulation of carbon on severely eroded red soils through afforestation in subtropical China[J].Forest Ecology and Management,2013,300:53-59.
- [10] 江森华,吕茂奎,林伟盛,等.生态恢复对红壤侵蚀地土壤有机碳组成及稳定性的影响[J].生态学报,2018,38(13):4861-4868.
- [11] 刘俊第,刘骏,胡亚林,等.植被恢复对红壤侵蚀区土壤氮组分的影响[J].土壤通报,2019,50(1):115-123.
- [12] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2010.
- [13] 刘秀,司鹏飞,张哲,等.地膜覆盖对北方旱地土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J].生态学报,2018,38(21):7870-7877.
- [14] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J].Plant and Soil,1998,198:97-107.
- [15] Li Y, Yu H Q, Zhou N, et al. Linking fine root and understory vegetation to channel erosion in forested hillslopes of southwestern China[J].Plant and Soil, 2015,389(1/2):323-334.
- [16] Webb N P, Chappell A, Edwards B L, et al. Reducing sampling uncertainty in aeolian research to improve change detection[J].Journal of Geophysical Research: Earth Surface,2019,124:1366-1377.
- [17] 邓翠,吕茂奎,曾敏,等.红壤侵蚀区植被恢复过程中土壤有机碳组分变化[J].水土保持学报,2017,31(4):178-183.
- [18] 王晶,赵文武,刘月,等.植物功能性状对土壤保持的影响研究述评[J].生态学报,2019,39(9):3355-3364.
- [19] Sigunga D O, Kimura M, Hoshino M, et al. Root-fusion characteristic of eucalyptus trees block gully development[J].Journal of Environmental Protection, 2013,4(4):877-880.
- [20] 陈文媛,张少妮,华瑞,等.黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究[J].北京林业大学学报,2017,39(1):62-69.
- [21] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.花岗岩红壤区不同治理模式土壤抗冲性因素试验[J].水土保持学报,2019,33(5):34-40,49.
- [22] 陶禹,向风雅,任文海,等.花岗岩红壤坡面工程措施初期的水土保持效果[J].水土保持学报,2015,29(5):34-39.
- [23] 易艳灵,吴丽英,杨倩,等.柏木根系分泌物对盆栽香椿土壤养分和酶活性的影响[J].生态学杂志,2019,38(7):2080-2086.
- [24] 潘洋,赵芳,欧阳勋志,等.马尾松林两种林下植被土壤碳氮特征及其与凋落物质量的关系[J].生态学报,2018,38(11):3988-3997.
- [25] 赵伟,梁斌,周建斌.长期不同施肥处理对土壤氮素矿化特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(2):177-181.
- [26] 孙梦媛,刘景辉,米俊珍,等.植被复垦对露天煤矿排土场土壤化学及生物学特性的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):206-212.
- [27] Kumar S, Singh A K, Ghosh P. Distribution of soil organic carbon and glomalin related soil protein in reclaimed coal mine-land chronosequence under tropical condition[J].Science of the Total Environment, 2018, 625:1341-1350.
- [28] 钟思远,张静,褚国伟,等.沿海侵蚀台地不同恢复阶段土壤团聚体组成及其与丛枝菌根真菌的关系[J].生态环境学报,2017,26(2):219-226.
- [29] 梁音,张斌,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):22-27.