

施肥对喀斯特地区植草土壤活性有机碳组分 和牧草固碳的影响

林明月¹, 邓少虹¹, 苏以荣^{2,3}, 刘坤平^{2,3}, 李伏生^{1*}

(1 广西大学农学院, 广西南宁 530005; 2 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南长沙 410125; 3 中国科学院环江喀斯特农业生态试验站, 广西环江 547100)

摘要: 通过盆栽试验, 研究施肥对喀斯特地区植草土壤不同活性有机碳组分和牧草固碳的影响。试验处理包括 CK (不施肥)、N1 (N 150 mg/kg)、N2 (N 250 mg/kg)、N1P1 (P_2O_5 100 mg/kg)、N2P2 (P_2O_5 150 mg/kg)、N1P1K1 (K_2O 70 mg/kg)、N1P1K2 (K_2O 105 mg/kg) 和 N2P2K1 和 N2P2K2。结果表明, 与对照 (不施肥) 相比, 施肥处理增加植草土壤有机碳、微生物量碳和易氧化碳, 有机碳日矿化量和累积矿化量以及牧草固碳量。其中 N1P1K1 处理土壤有机碳和易氧化碳最高, N1P1 处理土壤微生物量碳最高, N2P2K1 处理土壤可溶性碳最高, N2P2K2 处理牧草地上部及根系固碳量、有机碳日矿化量和累积矿化量均最高。综上, 低量氮磷钾肥配施有利于土壤活性有机碳的积累, 高量氮磷钾平衡配施牧草固碳效果最佳。

关键词: 施肥; 喀斯特地区; 土壤活性有机碳组分; 牧草固碳

中图分类号: 153.6⁺1; S541.01

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2012)05-1119-08

Effects of fertilization on soil active organic carbon and carbon sequestration of forage in Karst region

LIN Ming-yue¹, DENG Shao-hong¹, SU Yi-rong^{2,3}, LIU Kun-ping^{2,3}, LI Fu-sheng^{1*}

(1 College of Agronomy, Guangxi University, Nanning 530005, China; 2 Key Laboratory of Processes of Agro-eco-system, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China;

3 Huanjiang Station of Karst Eco-system, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

Abstract: The objective of this experiment is to study the effects of fertilization on different fractions of soil active organic carbon and carbon sequestration of forage in Karst region. There were nine treatments, CK (no fertilization), N1 (N 150 mg/kg soil), N2 (N 250 mg/kg soil), N1P1 (P_2O_5 100 mg/kg soil), N2P2 (P_2O_5 150 mg/kg soil), N1P1K1 (K_2O 70 mg/kg soil), N1P1K2 (K_2O 105 mg/kg soil), N2P2K1 and N2P2K2 in the experiment. Compared to the control (no fertilization), the contents of organic carbon (SOC), microbial biomass carbon (MBC) and readily oxidizable carbon (ROC) in soils, daily mineralization (DMC) and accumulated mineralization (AMC) of organic carbon in soils, and carbon sequestration by forage under the fertilizer treatments are increased. The N1P1K1 has the highest contents of SOC and ROC in soils, the N1P1 has the highest content of MBC, the N2P2K1 has the highest content of the dissolved carbon, and the N2P2K2 has the highest carbon sequestration by forage and the highest contents of DMC and AMC. Generally, more soil active organic carbon is accumulated in the treatments of low NPK, while more carbon is fixed by forage plant in the treatments of high NPK.

Key words: fertilization; Karst region; soil active organic carbon; carbon sequestration by forage

收稿日期: 2012-03-01

接受日期: 2012-06-19

基金项目: 国家科技支撑计划项目课题 (2012BAD05B03); 中国科学院战略性先导科技专项子课题 (XDA05070403) 资助。

作者简介: 林明月 (1986—), 女, 福建福州人, 硕士, 主要从事水土资源利用与环境研究。E-mail: lmy8657@163.com

* 通讯作者 Tel: 0771-3235314-806, E-mail: zhenz@gxu.edu.cn; lpfu6@163.com

喀斯特地区土壤土层一般较浅,生态环境极其脆弱,对土地利用变化、耕作、施肥等人类活动敏感^[1-2]。据调查,在桂西北喀斯特地区发展牧草种植过程中,农民大多只注重施氮肥,很少施或不施磷、钾肥、有机肥和微量元素肥料,导致牧草生态系统难以维持土壤养分及有机碳平衡。有研究表明,非均衡施肥不能增加土壤有机碳,甚至会造成土壤有机碳减少^[3-4]。

占土壤有机碳比例较小而周转速率较快的部分称为活性有机碳^[5],它是有机碳的重要组成部分^[6-7]。活性有机碳组成以微生物量碳、可溶性碳、易氧化碳和可矿化碳为主,这部分有机碳对环境变化最敏感,可以指示土壤有机质的早期变化,但并不能为土壤所真正固定^[8];同时活性有机碳的降解还可以为作物的生长提供养分。近年来,土壤活性有机碳已成为国内外农业生态领域的研究热点。大量研究表明,长期施用有机肥可显著提高土壤活性有机碳含量,长期有机无机肥配施能显著提高微生物碳、易氧化碳和可矿化碳含量^[9-11]。说明施肥不仅能培肥土壤,还可以改善土壤有机碳的性质,提高土壤供给作物养分的能力并提高作物产量。有研究指出,稻田土壤微生物量碳明显高于林地,林地明显高于旱地^[12],草地开垦为农田后,土壤微生物量碳和可溶性碳含量明显降低^[13],但施肥对喀斯特地区种植牧草土壤活性有机碳影响的报道却不多见。

植物光合作用固定的碳是土壤有机碳的重要来源,所以,研究作物固碳量及其碳在地下部分分配对认识植物-土壤生态系统碳循环及土壤可持续利用有重要意义^[14]。针对广西环江喀斯特种植牧草土壤施肥情况,研究施肥对喀斯特地区植草土壤活性有机碳组分和牧草固碳的影响,以期增加植草土壤有机碳积累,提高和稳定土地生产力提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

盆栽试验在广西环江中国科学院环江喀斯特农业生态试验站进行。试验土壤采自该站峰丛洼地的棕色石灰土,土壤 pH 为 6.87,有机质含量 37.9 g/kg、全氮 1.72 g/kg、全磷 0.89 g/kg、全钾 7.89 g/kg、碱解氮 113.9 mg/kg、有效磷(Olsen 法)10.2 mg/kg、速效钾 75.6 mg/kg。供试牧草品种为桂牧一号,属多年生牧草品种,它是由杂交狼尾草和矮象草进行杂交育成的高产优质的饲草。

1.2 试验设计

试验设 9 个施肥处理,即 CK、N1、N2、N1P1、N2P2、N1P1K1、N1P1K2、N2P2K1 和 N2P2K2,每个处理重复 5 次,共 45 盆,随机区组排列。其中 CK 为对照(不施肥),N1 和 N2 分别施 N 150 和 250 mg/kg, P1 和 P2 分别施 P_2O_5 100 和 150 mg/kg, K1 和 K2 分别施 K_2O 70 和 105 mg/kg 土。氮肥用磷酸二氢铵(分析纯,含 N 12%, P_2O_5 61%)和硫酸铵(分析纯,含 N 21%)。磷肥用磷酸二氢铵,其用量以含 P_2O_5 量计算。磷酸二氢铵中氮不足时,以硫酸铵补足。钾肥用氯化钾(分析纯,含 K_2O 60%)。全部磷肥作为基肥在装盆时施用,60% 的氮和钾肥作基肥,剩余的 40% 的氮和钾肥均于第 1 次和第 2 次牧草刈割后分别追施 20%。试验用聚乙烯塑料盆(上部开口直径 35.5 cm,底部直径 25.5 cm,高 29 cm),每盆装土 20 kg。2011 年 3 月 10 日每盆均匀播种 4 株长势一致的牧草幼苗。试验过程中各处理管理措施相同,每次灌水用称质量法确定各处理灌水量,各处理土壤含水量均保持在田间持水量的 70%~75%。

1.3 样品采集与测定

分别于 6 月 17 日、8 月 15 日和 10 月 20 日进行 3 次刈割牧草地上部,第 3 次刈割时还采集牧草根。10 月 20 日采集牧草后,105℃ 杀青,75℃ 烘干,过 1 mm 筛,装入封口袋备用。并采集 0—20 cm 土层土样,每盆采集 5 个样点,混匀,将采集的新鲜土样分成两份。一份风干磨碎过筛,测定总有机碳和易氧化活性碳含量。另一份立即处理或保存于 4℃ 冰箱中,测定前除去土样中可见植物残体及土壤动物,过 2 mm 孔径筛,混匀,调节土壤湿度至饱和和持水量的 40% 左右,用于测定可溶性碳和微生物碳含量以及有机碳矿化量。

植株地上部和根系碳含量用重铬酸钾容量法—外加热法测定^[15]。地上部或根系固碳量用地上部或根系全碳含量与其干物质质量的乘积表示;根际沉析碳量以地下部总碳量的 13% 计,其中,地下部总碳量是根据根系固碳量占地下部总碳量的比例(约 50%)计算得到^[16]。

土壤有机碳(SOC)用重铬酸钾容量法—外加热法测定。

易氧化碳(ROC)用 $KMnO_4$ 氧化法测定^[17]:称取过 0.25 mm 筛的土壤样品(含碳 15 mg),装入加

盖的塑料瓶,加入 25 mL 1/3 mol/L 的 KMnO_4 溶液,将塑料瓶盖紧,振荡 1 h,过滤,取滤液加水稀释 250 倍,然后在分光光度计上 565 nm 波长处比色。ROC (mg/kg) = KMnO_4 浓度变化值 $\times 25 \times 250 \times 9 \times 1000$ / 土样重,以每消耗 1 mmol / L KMnO_4 溶液相当于氧化 9 mg 碳表示。

微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸提取,碳自动分析仪测定^[18]:称取 4 份经预培养 1 周后的土样(每份相当于烘干重 25.00 g),其中 2 份土样用氯仿熏蒸 24 h,除去氯仿后,用 0.5 mol/L K_2SO_4 溶液(土水比 1:4, W/V)振荡(25℃, 300 r/min)浸提 30 min。另 2 份土样不熏蒸,浸提方法同上。浸提液中有机碳含量采用碳-自动分析仪(Phoenix 8000)测定。

微生物量碳(MBC) = $0.45 \times (\text{熏蒸土样浸提的有机碳} - \text{不熏蒸土样浸提的有机碳})$

可溶性碳(DOC)测定方法与 MBC 中不熏蒸土样浸提有机碳的方法相同。

土壤有机碳矿化量(MC)采用室内恒温培养、碱液吸收法测定^[19]:称取 40 g 经预培养 1 周后的土样放于 50 mL 烧杯中,将烧杯放入 750 mL 培养瓶中,然后将盛有 20 mL 1 mol/L NaOH 溶液的小瓶小心地置于培养瓶内,将培养瓶加盖密封好,于(28 ± 1)℃的恒温箱中培养,每一土样均 2 次重复。在培养开始后第 1、5、10、20、30 d 取出小瓶子,取 10 mL 吸收液,加 10 mL 去 CO_2 蒸馏水(蒸馏水加热煮

沸 15 ~ 30 min),采用 Phoenix 8000 碳-自动分析仪测定稀释液中的 CO_2 -C 量。

CO_2 -C 矿化速率[$\text{C } \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$, SOC] = 培养时段内矿化量 / 培养时间 / 土样中有机碳总量。

1.4 数据分析

测定数据采用 Excel 2003 和 SPSS 进行统计分析,多重比较采用 Duncan 法,处理间差异水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 施肥对土壤有机碳的影响

表 1 表明,与对照(不施肥)相比,施肥处理提高土壤有机碳(SOC)含量 6.9% ~ 13.4%,以 N1P1K1 处理提高 SOC 含量最为明显。单施氮肥(N)显著增加土壤 SOC 含量,而 N1 和 N2 处理之间土壤 SOC 含量差异不明显。在施氮肥(N)基础上,增施磷肥(P)并没有增加土壤 SOC 含量;而在施氮磷肥(NP)的基础上,增施钾肥(K)可提高土壤 SOC 含量,且 N1P1K1 和 N1P1K2 处理之间土壤 SOC 含量差异明显。

2.2 施肥对土壤活性有机碳组分的影响

土壤微生物量碳(MBC)是土壤中活的细菌、真菌、藻类和土壤微动物体内所含的碳,对施肥等农业措施的反应非常敏感^[8]。由表 1 可以看出,与对照相比,各施肥处理均提高土壤 MBC。单施氮肥显著提高土壤 MBC,在施氮肥的基础上,增施磷肥还

表 1 施肥对土壤有机碳和活性碳组分的影响

Table 1 Effects of the fertilization on soil organic carbon and different fractions of active carbon

处理 Treatment	有机碳 SOC (g/kg)	微生物量碳 MBC (mg/kg)	可溶性碳 DOC (g/kg)	易氧化碳 ROC (g/kg)
CK	17.1 ± 0.4 d	266.7 ± 20.3 d	159.4 ± 0.2 b	4.1 ± 0.1 g
N1	18.3 ± 0.1 c	350.6 ± 18.2 a	127.6 ± 10.6 d	4.2 ± 0.04 fg
N2	18.3 ± 0.1 c	298.9 ± 15.4 c	142.1 ± 3.7 c	4.3 ± 0.2 fg
N1P1	18.3 ± 0.2 c	357.1 ± 21.1 a	135.8 ± 3.5 cd	4.7 ± 0.3 e
N2P2	18.2 ± 0.2 c	354.1 ± 9.8 a	135.8 ± 15.5 cd	4.6 ± 0.3 ef
N1P1K1	19.3 ± 0.1 a	320.1 ± 20.9 bc	161.9 ± 4.8 b	8.3 ± 0.4 a
N1P1K2	18.9 ± 0.1 b	336.0 ± 14.2 ab	161.0 ± 14.6 b	7.4 ± 0.2 b
N2P2K1	18.6 ± 0.4 bc	355.9 ± 22.2 a	179.6 ± 4.7 a	5.3 ± 0.3 d
N2P2K2	18.5 ± 0.5 bc	353.7 ± 11.4 a	179.3 ± 9.8 a	6.9 ± 0.8 c

注(Note): SOC—Soil organic carbon; MBC—Microbial biomass carbon; DOC—Dissolved organic carbon; ROC—Readily oxidizable carbon. 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

可进一步提高土壤 MBC,而在施氮磷肥的基础上,增施钾肥并不增加土壤 MBC。

土壤可溶性碳(DOC)主要来源于归还土壤的植物残体和腐殖质及根际分泌物等,它容易被土壤微生物分解,是土壤微生物的主要能源^[20]。与对照相比,单施氮肥或氮磷肥配施均显著降低土壤 DOC 含量,而在 N2P2 处理的基础上,增施钾肥则明显提高土壤 DOC 含量,但在 N1P1 基础上增施钾肥土壤 DOC 含量增加不明显(表 1)。因此 N2P2K1 和 N2P2K2 处理土壤 DOC 含量最高,与其他处理差异显著。

土壤易氧化碳(ROC)是有机质中最活跃和最易变化的部分^[21]。与对照相比,单施氮肥(N1 或 N2)并不明显增加土壤易氧化碳(ROC)含量(表 1)。在施氮肥的基础上,增施磷肥可提高土壤 ROC 含量。在施氮磷肥基础上,增施钾肥土壤 ROC 含量明显提高,由此可见,氮磷钾配施特别是 N1P1K1 处理明显提高土壤 ROC 含量。此外,不同氮或磷水平之间土壤 ROC 含量差异不明显,而 K1 和 K2 水平

之间土壤 ROC 含量差异明显。

2.3 施肥对土壤有机碳矿化的影响

土壤有机碳矿化是土壤碳动态的重要过程,其矿化速率与有机碳的稳定性及微生物的数量和活性相关^[22]。图 1 表明,各处理土壤有机碳日矿化量(DMC)均随着时间的延长呈下降趋势,在培养前期表现出急剧下降且各处理下降幅度差异较大,然后逐渐变缓趋于一致。在整个培养期内,施肥处理土壤 DMC 均显著高于不施肥处理,其中 N2P2K1 处理提高土壤 DMC 最为明显。单施氮肥显著增加土壤 DMC,但是 N1 和 N2 处理之间土壤 DMC 差异不明显。图 1A 中,N1P1 处理,在培养初期(1 d)和末期(30 d)没有明显提高土壤 DMC,而在 N1P1 基础上增施钾肥,在培养初期明显提高了土壤 DMC,在培养末期则不明显提高土壤 DMC。图 1B 中,N2P2 处理,在整个培养期内明显提高土壤 DMC,而在 N2P2 基础上增施钾肥,在培养初期明显提高土壤 DMC,培养末期土壤 DMC 提高不明显。

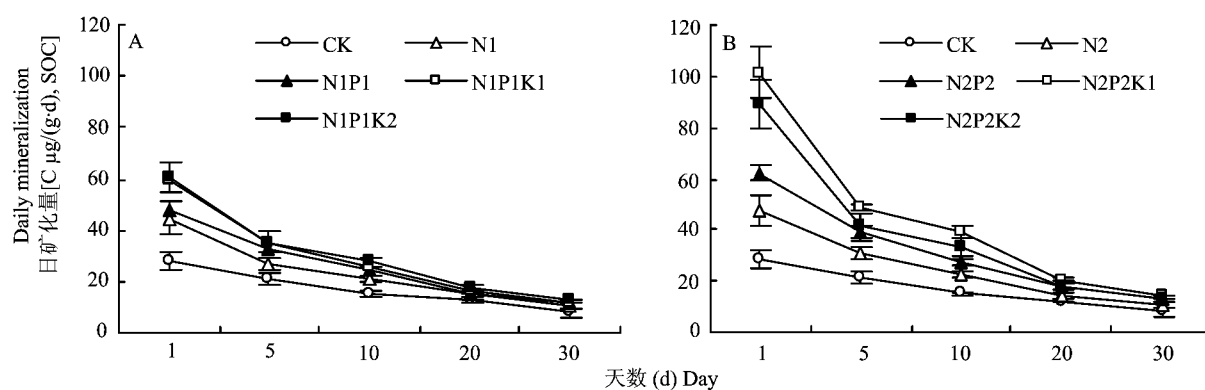


图 1 施肥对土壤有机碳日矿化量的影响

Fig. 1 Effects of the fertilization on daily mineralization of organic carbon in soils

由图 2 可以看出,各处理土壤有机碳累积矿化量(AMC)随着时间的增长趋势一致,施肥处理累积矿化量始终大于不施肥处理。在整个培养期内,N2P2K1 处理均最大,CK 处理最小。单施氮肥显著增加土壤 AMC,但是在培养初期和末期 N1 和 N2 处理之间土壤 AMC 差异不明显。图 2A 中,N1P1 处理,在培养初期土壤 AMC 没有明显提高,而在培养末期土壤 AMC 明显增加。在 N1P1 基础上增施钾肥,培养初期土壤 AMC 明显提高,但 K1 和 K2 水平之间差异不显著;培养末期 K2 明显提高土壤 AMC,且 K1 和 K2 之间差异显著。图 2B 中,N2P2、

N2P2K1 和 N2P2K2 处理,在整个培养期内土壤 AMC 均明显高于对照。

2.4 施肥对牧草固碳量的影响

表 2 显示,与对照相比,施肥处理提高牧草地上部固碳量 60.2%~144.3%。在施氮肥基础上,增施磷肥提高地上部固碳量。除 N2P2K2 处理外,在施氮磷肥基础上,增施钾肥并不增加牧草地上部的固碳量。与对照相比,施肥处理明显提高根系固碳量 12.1%~59.4%。在施氮肥基础上,增施磷肥进一步提高根系固碳量;而在施氮磷肥的基础上,增施钾肥并不明显提高牧草根系固碳量。

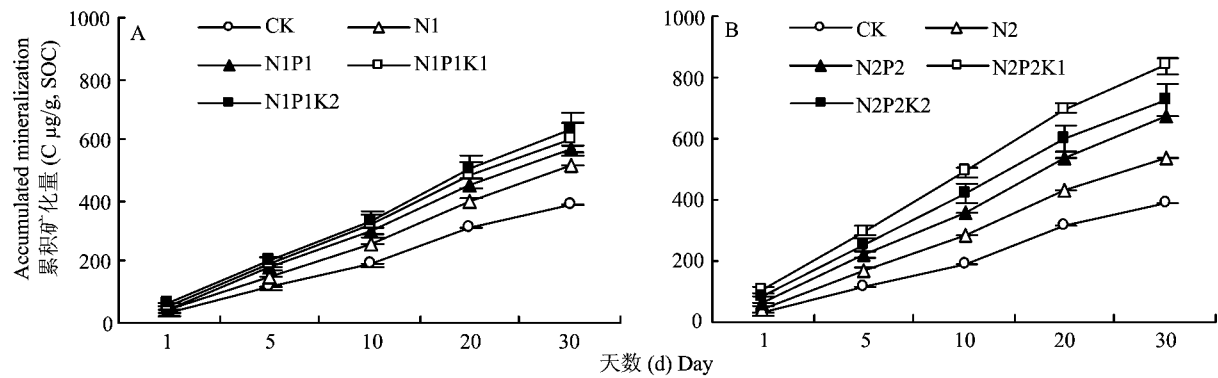


图 2 施肥对土壤有机碳累积矿化量的影响

Fig.2 Effects of the fertilization on accumulated mineralization of organic carbon in soils

表 2 施肥对牧草固碳量的影响

Table 2 Effects of the fertilization on forage carbon sequestration

处理 Treatment	地上部固碳量 (g/pot) * Shoot C fixation	根系固碳量(g/pot) Root C fixation	根际沉析碳量 (g/pot) Rhizodeposition carbon
CK	49.5 ±4.2 d	14.7 ±0.9 e	3.83
N1	79.4 ±4.9 c	16.5 ±0.5 de	4.29
N2	85.7 ±4.0 c	20.2 ±1.7 bc	5.25
N1P1	88.8 ±5.1 c	19.6 ±0.3 bc	5.09
N2P2	110.0 ±7.8 b	22.5 ±1.7 ab	5.84
N1P1K1	79.4 ±1.6 c	19.4 ±0.2 cd	5.04
N1P1K2	82.3 ±10.2 c	20.2 ±1.7 bc	5.26
N2P2K1	109.0 ±5.9 b	21.9 ±1.7 cd	5.70
N2P2K2	121.0 ±3.3 a	23.5 ±0.8 a	6.11

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level. *3 次刈割牧草地上部固碳量之和 Indicate the sum of carbon fixation by shoots for three harvesting time.

根际碳沉积是指植物根系通过不同形式将输入到根部的碳以根系脱落物和根系分泌物的形式释放到根际土壤环境中的过程^[23]。牧草根际沉析碳量变化趋势与根系固碳量一致,施肥处理均增加牧草根际沉析碳量,其变化范围为 3.83 ~ 6.11 g/盆。

3 讨论

本研究发现,所有施用化肥的处理均增加土壤有机碳含量,其中 N1P1K1 配施土壤有机碳最高。赵鑫^[4]对玉米和大豆的研究结果表明,与不施肥相比,NP 或 NPK 配施均能在一定程度上提高土壤有机碳含量。佟小刚等^[24]对小麦的研究发现,长期施氮、氮磷和氮磷钾肥土壤总有机碳分别比 CK 提高 0.9、2.0 和 1.7g/kg。李玲等^[25]研究表明,6 年单

施化肥能明显提高坡旱地土壤有机碳含量,比不施肥平均增加 14.8%。因此,施用化肥能维持或提高土壤有机碳的积累。化肥能使牧草生长繁茂,提高牧草地上部固碳能力及生物产量,增加根茬碳归还土壤,为有机碳的积累提供了基础^[26]。

本试验表明,施用化肥显著增加土壤微生物量碳(MBC),宇万太等^[27]和赵鑫^[4]研究也发现,施化肥处理土壤 MBC 显著高于 CK 处理。氮源是影响微生物活性的因素之一,因此,高氮配施磷钾肥处理的土壤 MBC 较高。施氮基础上增施磷肥会进一步增加土壤 MBC,这与磷肥刺激植物根系生长发育有关^[28],根系吸取养分能力增强,分泌物及脱落物增多,促进了土壤微生物的繁殖^[29]。

长期施用化肥降低土壤可溶性碳(DOC)含

量^[30]。Adams 等^[31]和 McDowella 等^[32]的研究表明,单施化肥不能提高土壤 DOC 含量,本研究也发现,单施氮肥或氮磷配施不能提高土壤 DOC 含量。而在施氮磷肥的基础上,增施钾肥土壤 DOC 含量明显提高,这是由于长期氮或氮磷处理下,土壤钾可能成为限制因子,所以氮磷钾平衡施肥的土壤 DOC 含量明显高于单施氮和氮磷配施的处理^[27]。

本研究发现,除单施氮肥外,施肥明显提高土壤易氧化碳(ROC)含量,这与赵鑫^[4]的施用化肥(除 N 处理外)可增加土壤 ROC 含量 11.86%~39.65%的研究结果一致。长期施用化肥能提高土壤中难氧化有机碳的含量,从而增加土壤有机碳的氧化稳定性^[33]。易氧化态碳与土壤有机碳的比值能反映土壤腐殖质的稳定性,比值越大,说明土壤碳的活性越大,稳定性越差^[34]。本试验中,施肥处理土壤 ROC 占有有机碳的比例为 21.5%~43.1%,其中 NPK 处理比值较高,说明氮磷钾平衡配施使植草土壤腐殖质稳定性降低,因此 ROC 比例较高。

大量试验表明,施肥提高土壤有机碳矿化量,增加土壤 CO₂ 的释放量^[35-37]。本试验也发现,各施肥处理明显提高土壤有机碳矿化速率和累积矿化量。在培养初期,土壤微生物活性较弱,需要消耗较多能量来进行生命活动,因此释放出较多的 CO₂;随着培养时间的延长,土壤微生物数量逐渐增加且较稳定,CO₂ 的释放速率逐渐变小并趋于稳定^[38]。土壤有机碳和氮素是土壤有机碳矿化的底物,其含量高低直接影响矿化作用^[39]。施用化肥使土壤有机碳矿化量明显增加,说明在施肥条件下,土壤微生物利用矿化底物增强,土壤有机质分解增强,从而导致矿化量提高。

本研究发现,施用氮肥牧草地上部、根系及根际沉析量碳均显著增加,其中,高量氮磷钾平衡配施增加最明显,这与以往对小麦的研究结果相似^[39-40]。孟磊等^[41]对玉米和小麦的研究表明,NPK 和 NP 处理作物固定碳总量和根际沉析碳量最高。有研究发现,玉米喇叭口期高氮处理根际沉积对土壤有机碳的贡献率大于低氮处理^[42]。施肥明显提高牧草地上部的固碳能力,其原因是施肥能提高牧草植物的光合能力,增加牧草生物量,从而增大牧草的固碳作用。

4 结论

1)施肥可增加土壤有机碳、微生物量碳和易氧化碳含量,本试验中 N1P1K1 处理(N 150 mg/kg、

P₂O₅ 100 mg/kg 和 K₂O 70 mg/kg)对提高土壤有机碳和易氧化碳的效果最明显,N1P1 处理提高土壤微生物量碳的效果最明显。

2)施肥可提高土壤有机碳日矿化量和累积矿化量,本试验中 N2P2K2 处理(N 250 mg/kg、P₂O₅ 150 mg/kg 和 K₂O 105 mg/kg)的土壤有机碳日矿化量和累积矿化量均最高。

3)施肥可提高牧草地上部碳及根茬碳积累量,本试验中 N2P2K2 处理的牧草地上部及根系固碳量均最高。

参考文献:

- [1] 兰安军,张百平,熊康宁. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析[J]. 地理研究, 2003, 22(6): 733-742.
Lan A J, Zhang B P, Xiong K N. Spatial pattern of the fragile karst environment in southwest Guizhou province [J]. Geogr. Res., 2003, 22(6): 733-742.
- [2] 王世杰,李阳兵,李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 657-666.
Wang S J, Li R B, Li R L. Karst rocky desertification: formation background, evolution and comprehensive taming [J]. Quat. Sin., 2003, 23(3): 657-666.
- [3] Insam H, Parkinson D, Domsch K H. Influence of macroclimate on soil microbial biomass[J]. Soil Biol. Biochem., 1989, 21(2): 211-221.
- [4] 赵鑫. 土地利用方式与施肥制度对土壤活性有机碳库的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2007.
Zhao X. Effect of land use types and fertilization systems on active soil organic carbon pool [D]. Shenyang: MS thesis, Shenyang Agricultural University, 2007.
- [5] McLauchlan K K, Sarah E, Hobbie. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2004, 68: 1616-1625.
- [6] Alvarez R, Alvarez C R. Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64: 184-189.
- [7] Freixo A A, Machado P L, Santos H P *et al.* Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil[J]. Soil Till. Res., 2002, 64: 221-230.
- [8] 佟小刚. 长期施肥下我国典型农田土壤有机碳库变化特征[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2008.
Tong X G. Change characteristics of soil organic carbon pools in typical cropland of China under long-term fertilization [D]. Beijing: MS thesis, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [9] 徐阳春,沈其荣,冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 89-96.
Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Effect of zero-tillage and application

- of manure on soil microbial biomass C, N and P after sixteen years of cropping[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2002, 39(1): 89-96.
- [10] 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 有机肥料施用后潮土中活性有机质组分的动态变化[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(4): 416-419.
- Ni J Z, Xu J M, Xie Z M. Dynamic of active organic matter fractions in fluvio-aquic soil after application of organic fertilizers[J]. *J. Agro-Environ. Prot.* 2003, 22(4): 416-419.
- [11] 沈宏, 曹志洪. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究[J]. *生态学报*, 2000, 20(4): 663-668.
- Shen H, Cao Z H. Study on soil C pool management index of different farmland ecosystems[J]. *Acta Ecol. Sin.* 2000, 20(4): 663-668.
- [12] 李新爱, 肖和艾, 吴金水, 等. 喀斯特地区不同土地利用方式对土壤有机碳、全氮以及微生物生物量碳和氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1827-1831.
- Li X A, Xiao H A, Wu J S *et al.* Effects of land use type on soil organic carbon, total nitrogen, and microbial biomass carbon and nitrogen contents in karst region of South China[J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2006, 17(10): 1827-1831.
- [13] 王百群, 苏以荣, 吴金水. 开垦草地对土壤有机碳库构成与来源的效应[J]. *核农学报*, 2007, 21(6): 618-622.
- Wang B Q, Su Y R, Wu J S. Impaction of grassland reclamation on the composition and derivation of soil organic carbon pool[J]. *Acta Agric. Nucl. Sin.*, 2007, 21(6): 618-622.
- [14] 金剑, 王光华, 刘晓冰, 等. 作物生育期内光合碳在地下部的分配及转化[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(8): 1393-1399.
- Jin J, Wang G H, Liu X B *et al.* Allocation and transformation of photosynthetic carbon in belowground part of during their growth period[J]. *Chin. J. Ecol.*, 2008, 27(8): 1393-1399.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000.
- [16] Yakov Kuzyakov, Grzegorz Domanski. Carbon input by plants into the soil[J]. *Plant Nutr. Soil Sci.*, 2000, 163: 421-431.
- [17] Blair G J, Lefory R D B. Soil C fractions based on their degree of oxidation and the development of a C management index for agricultural systems[J]. *Aust. J. Agric. Res.*, 1995, 46: 1459-1466.
- [18] 吕国红, 周广胜, 周莉, 贾庆宇. 土壤溶解性有机碳测定方法与应用[J]. *气象与环境学报*, 2006, 22(2): 51-55.
- Li G H, Zhou G S, Zhou L, Jia Q Y. Methods of soil dissolved organic carbon measurement and their applications[J]. *J. Meteor. Environ.*, 2006, 22(2): 51-55.
- [19] 文启孝. 土壤有机质研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1984.
- Wen Q X. Soil organic matter research[M]. Beijing: Agricultural Press, 1984.
- [20] 李玲, 肖和艾, 苏以荣, 等. 土地利用对亚热带红壤区典型景观单元土壤溶解有机碳含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 122-128.
- Li L, Xiao H A, Su Y R *et al.* Effects of land use on the content of soil dissolved organic carbon in the typical landscape units in subtropical red Earth region[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2008, 41(1): 122-128.
- [21] 王新建, 张仁陟, 毕冬梅, 汪娟. 保护性耕作对土壤组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 115-121.
- Wang X J, Zhang R Z, Bi D M, Wang J. Effects of conservation tillage on soil organic carbon fractions[J]. *J. Soil Water Conserv.*, 2009, 23(2): 115-121.
- [22] 罗友进, 赵光, 高明, 等. 不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 117-122.
- Luo Y J, Zhao G, Gao M *et al.* Organic carbon distribution in aggregates and soil organic carbon mineralization in different vegetation covering[J]. *J. Soil Water Conserv.*, 2010, 24(6): 117-122.
- [23] 王振宇, 吕金印, 李凤民, 徐炳成. 根际沉积及其在植物-土壤碳循环中的作用[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1963-1968.
- Wang Z Y, Lü J Y, Li F M, Xu B C. Rhizodeposition and its role in carbon cycling in plant-soil system[J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2006, 17(10): 1963-1968.
- [24] 佟小刚, 黄绍敏, 徐明岗, 等. 长期不同施肥模式对潮土有机碳组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 831-836.
- Tong X G, Huang S M, Xu M G *et al.* Effects of the different long-term fertilizations on fractions of organic carbon in fluvo-aquic soil[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2009, 15(4): 831-836.
- [25] 李玲, 朱捍华, 苏以荣, 等. 稻草还田和易地还土对红壤丘陵农田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(3): 926-933.
- Li L, Zhu H H, Su Y R *et al.* Effects of rice straw incorporation in situ and ex situ on soil organic C and active organic C in agricultural soils in red soil hilly region[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2009, 42(3): 926-933.
- [26] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 潘庆民. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J]. *生态学报*, 2003, 23(4): 787-796.
- Yang J C, Han X G, Huang J H, Pan Q M. The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices[J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2003, 23(4): 787-796.
- [27] 宇万太, 赵鑫, 姜子绍, 等. 不同施肥制度对潮棕壤微生物量碳的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(10): 1574-1578.
- Yu W T, Zhao X, Jiang Z S *et al.* Effects of different fertilization system on microbial biomass carbon in aquic brown soil[J]. *Chin. J. Ecol.*, 2007, 26(10): 1574-1578.
- [28] 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义[J]. *土壤*, 1997, 29(2): 61-69.
- He Z L. The effect of soil microbial biomass on its nutrient cycling and environmental quality assessment[J]. *Soils*, 1997, 29(2): 61-69.
- [29] 王忠华, 叶庆富, 舒庆尧, 等. 转基因植物根系分泌物对土壤微生物生态的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 373-375.

- Wang Z H, Ye Q F, Shu Q Y *et al.* Impact of root exudates from transgenic plants on soil micro-ecosystems[J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2002, 13(3): 373-375.
- [30] 倪进治, 徐建民, 谢正苗, 王德建. 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳含量及其组成特征的研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(5): 724-730.
- Ni J Z, Xu J M, Xie Z M, Wang D J. Contents of WSOC and characteristics of its composition under different fertilization systems[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2003, 40(5): 724-730.
- [31] Adams A B, Harrison R B, Sletten R S *et al.* Nitrogen-fertilization impacts on carbon sequestration and flux in managed coastal Douglas-fir stands of the Pacific Northwest[J]. *For. Ecol. Manag.*, 2005, 220: 313-325.
- [32] McDowella W H, Magillb A H, Aitkenhead-Petersona J A *et al.* Effects of chronic nitrogen amendment on dissolved organic matter and inorganic nitrogen in soil solution[J]. *For. Ecol. Manag.*, 2004, 196: 29-41.
- [33] 石峰. 管理措施对草地土壤有机碳含量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2009.
- Shi F. Effect of management on grassland soil organic carbon [D]. Beijing: MS thesis, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [34] 徐秋芳, 姜培坤. 不同森林植被下土壤水溶性有机碳研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 84-87.
- Xu Q F, Jiang P K. Study on active organic carbon of soils under different types of vegetation[J]. *J. Soil Water Conserv.*, 2004, 18(6): 84-87.
- [35] 李梦雅, 王伯仁, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤有机碳矿化及微生物活性的影响[J]. *核农学报*, 2009, 23(6): 1043-1049.
- Li M Y, Wang B R, Xu M G *et al.* Effect of long-term fertilization on mineralization of organic carbon and microbial activity red soil[J]. *Acta Agric. Nucl. Sin.*, 2009, 23(6): 1043-1049.
- [36] 陈吉, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 长期施肥潮土在玉米季施肥初期的有机碳矿化过程研究[J]. *土壤*, 2009, 41(5): 719-725.
- Chen J, Zhao B Z, Zhang J B, *et al.* Research on process of fluvo-aquic soil organic carbon mineralization in initial stage of maize growth under long-term different fertilization[J]. *Soils*, 2009, 41(5): 719-725.
- [37] 马力, 杨林章, 慈恩, 等. 长期不同施肥处理对水稻土有机碳分布变异及其矿化动态的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(6): 1050-1058.
- Ma L, Yang L Z, Ci E *et al.* Effects of long-term fertilization on distribution and mineralization of organic carbon in paddy soil [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2009, 46(6): 1050-1058.
- [38] 张旭博, 徐明岗, 林昌虎, 张文菊. 施肥对红壤有机碳矿化特征的影响[J]. *贵州农业科学*, 2011, 39(6): 99-102.
- Zhang X B, Xu M G, Lin C H, Zhang W J. Effect of fertilization on mineralization characteristics of organic carbon in red soil[J]. *Guizhou Agric. Sci.*, 2011, 39(6): 99-102.
- [39] 高会议. 黄土旱塬长期施肥条件下土壤有机碳平衡研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2009.
- Gao H Y. C sequestration and soil C balance under long-term fertilization on arid-highland of the Loess Plateau[D]. Yangling: MS thesis, Northwest Agriculture and Forestry University, 2009.
- [40] 李伏生, 康绍忠. CO₂ 浓度、氮素和水分对春小麦碳素固定的影响[J]. *土壤通报*, 2004, 35(5): 546-549.
- Li F S, Kang S Z. Effect of CO₂ concentration, nitrogen and water on plant carbon fixation in spring wheat[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2004, 35(5): 546-549.
- [41] 孟磊, 蔡祖聪, 丁维新. 长期施肥对土壤碳储量和作物固定碳的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(5): 769-775.
- Meng L, Cai Z C, Ding W X. Carbon contents in soils and crops as affected by long-term fertilization[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2005, 42(5): 769-775.
- [42] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长和施氮水平对土壤有机碳更新的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(2): 280-286.
- Yang L F, Cai Z C. Effects of growing maize and N application on the renewal of soil organic carbon[J]. *Acta Sci. Circumst.*, 2006, 26(2): 280-286.