

文章编号: 1002-8551(2007)06-618-05

开垦草地对土壤有机碳库构成与来源的效应

王百群^{1,2} 苏以荣^{1,3} 吴金水^{1,3}

(11 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;

21 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 31 中国科学院亚热带区域农业生态研究所, 湖南 长沙 410125)

摘要:以广西西北部喀斯特地区的开垦草地生态系为对象, 研究了草地开垦变为不同农田后对土壤有机碳库的效应。结果表明, 草地开垦为农田后, 土壤可溶性有机碳、微生物生物量碳及总有机碳的含量显著下降。自然草地开垦后, 柑桔地土壤有机碳含量高于农作用地土壤。玉米与甘蔗轮作土壤有机碳含量高于甘蔗连作。¹³C 示踪结果表明, 柑桔地土壤有机碳中来源于草地的含量高于农田土壤; 农田土壤有机碳中来源于草地的随种植年限的增加而降低。在玉米与甘蔗轮作的农田中, 土壤有机碳中来源于玉米的高于甘蔗连作土壤有机碳中来源于甘蔗的。

关键词:开垦草地; 农田; 土壤有机碳; ¹³C 同位素; 喀斯特地区

IMPACT OF GRASSLAND RECLAMATION ON THE COMPOSITION AND DERIVATION OF SOIL ORGANIC CARBON POOL

WANG Baizun^{1,2} SHU Yirong^{1,3} WU Jinshui^{1,3}

(11 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 21 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 31 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125)

Abstract: The study on the impact of conversion of permanent grassland to farmland on the soil organic carbon pool was conducted in the reclaimed grassland in Karst area of northwest Guangxi. The result showed that soil dissolved organic carbon, microbial biomass carbon and total organic carbon declined significantly after the conversion of permanent grassland to farmland. The level of soil organic carbon in the soil growing citrus trees was higher than that in the cropland, and the concentration of soil organic carbon in the cropland with the rotation of corn and sugar cane was higher than that in the cropland with successional sugar cane. The result of ¹³C isotope tracing indicated that soil organic carbon derived from original organic carbon of previous grassland in the land growing citrus tree was higher than that in the farmland, soil carbon derived from the original organic carbon of previous grassland declined in cropland with the increase of years of planting crops, and the soil organic carbon derived from corn was higher than that derived from sugar cane in the cropland with the ration of corn and sugar cane.

Key words: grassland reclamation; cropland; soil organic carbon; ¹³C isotope; Karst area

在草地生态系统中, 植物地上部凋落物及地下根系分泌物和死亡根系不断输入到土壤中, 对于土壤中有机碳的积累具有重要的作用。但是, 当自然草地开

垦后, 原有的植被不再存在, 向土壤中加入有机物料的数量和质发生变化, 土壤受到严重扰动, 土壤的结构及水热条件发生明显改变, 导致土壤有机碳含量变化, 因

收稿日期: 20070320

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(90502007); 国家自然科学基金项目(40301024); 西北农林科技大学/创新团队建设计划; 西北农林科技大学科研启动项目

作者简介: 王百群(1962), 男, 陕西渭南人, 博士, 副研究员, 从事土壤有机碳氮循环研究, E-mail: bqwang@ms.isac.ac.cn

此,开垦对土壤有机碳库具有明显的影响^[1,2]。在开垦草地上种植农作物后,草地生态统转变为新的农田生态系统,土壤有机碳的含量及其来源也将发生变化。为了阐明生态系统转变后土地利用方式对土壤有机碳变化的效应,一些研究者根据植物体及土壤有机碳的稳定同位素 $D^{13}C$ 信号,来甄别土壤有机碳的来源及其动态变化^[3-6]。 ^{13}C 示踪技术不仅可用来揭示不同管理方式下农田土壤有机碳构成和周转特征^[7-9],还可以用来表征植被演替过程中土壤剖面有机碳的 $D^{13}C$ 值分布与植被类型的关系^[10,11],因此, ^{13}C 示踪法已成为研究生态系中土壤有机碳循环过程的重要方法,得到了广泛应用。本文以广西西北喀斯特地区为对象,研究了自然草地开垦后种植作物对土壤有机碳库变化的影响,并应用 ^{13}C 示踪法揭示作物种植制度对土壤有机碳构成的相对贡献,这对于合理开发利用该区有限的土地资源、保持和提高农田有机碳的贮量、稳定土壤肥力、促进农业与生态环境的协调发展具有重要的意义。

1 材料与方方法

111 研究区概况

研究区位于广西河池地区环江县肯福区,平均气温 $19.9^{\circ}C$, 年均降雨 $1389.1mm$, 属亚热带湿润地区。植被类型多为灌木群落和草丛群落。这一区域原为自然生态系统,无人居住,总面积为 $2461.7km^2$, 其中零星开发的土地面积不足 $31.3km^2$, 现为移民安置的试验示范区。示范区内地貌以中低丘陵为主,海拔 $202.12\sim 396.10m$, 相对高差 $193.8m$, 土地类型多为坡地,土壤类型主要为红壤,土壤剖面发育良好。

112 样品采集

在肯福示范区内选择自然草地,以及自然草地开垦后种植甘蔗 4 年和 6 年,栽植柑桔 5 年、种植甘蔗(2 年)- 玉米(2 年)- 甘蔗(1 年)等 4 块不同利用方式和年限的农地采集土壤样品;另外,还采集了该区相邻地区一个长期种植春玉米- 秋大豆间红薯的典型农田土壤样品。总共有 6 个采集土壤样品的田块。在每一个采样田块中随机多点采集土样,采样深度为 $0\sim 20cm$, 将从各点采集的土样放在一起,充分混匀,放入 $4^{\circ}C$ 的冷藏箱中保存。另外,在相应的地块中分别采集草的地上部样品、玉米样品和甘蔗样品,用于测定其中的 $D^{13}C$ 值。

113 测定项目及方法

从冷藏箱中取出样品,经前处理后,用氯仿熏蒸-提取仪器法测定土壤微生物生物量碳^[12]。土壤可溶

性有机碳的测定方法如下:用 $0.15moPL$ 的 K_2SO_4 溶液振荡浸提样品,用总有机碳分析仪(Phoenix 8000, 美国 Tekmar2Dohrmann 公司生产)测定浸提液中的有机碳。采用重铬酸钾-硫酸氧化外加加热法测定土壤有机碳含量^[13]。取经研磨和 $0.1moPL$ 盐酸处理过的风干土样进行真空高温燃烧,用 MAT2251 型稳定同位素质谱仪测定碳同位素比值,植物样品中 ^{13}C 比值的测定与土样测定类似。采用国际通用的 PDB 作为标准,根据下式求出样品中碳的 $D^{13}C$ 值。

$$D^{13}C = \left[\left[\frac{R_{sam}}{R_{std}} \right] - 1 \right] @1000j \quad (1)$$

式中, R_{sam} 为样品中 ^{13}C 与 ^{12}C 的比值, R_{std} 为标准样品中的 ^{13}C 与 ^{12}C 的比值。

114 计算土壤有机碳中碳来源的原理与方法

根据质量守恒原理,应用下式计算土壤有机碳中分别来源于草地固有的有机碳和作物残体的有机碳的比例。

$$D_s = f D_c + (1 - f) D_n \quad (2)$$

式中, D_s 为自然草地开垦种植作物后土壤有机碳的 $D^{13}C$ 值, D_c 为 C_4 作物的 $D^{13}C$ 值, D_n 为未开垦草地的 $D^{13}C$ 值, f 为来源于 C_4 作物残体的有机碳占土壤总有机碳的比例, $(1 - f)$ 为来源于草地固有的有机碳的比例。

2 结果与分析

211 草地开垦对土壤总有机碳的影响

从表 1 可以看出自然草地开垦变为农田之后,不同利用方式下土壤有机碳的含量显著下降。农田土壤有机碳的含量为柑桔地 > 玉米与甘蔗轮作地 > 种植 4 年甘蔗地 > 种植 6 年甘蔗地,分别为未开垦草地土壤有机碳含量的 521.9% 、 481.5% 、 401.3% 和 361.2% 。由此表明,自然草地转变为农田之后,土壤有机碳的含量水平取决于土壤有机碳分解量与输入到土壤中的作物残体分解后残留的有机碳量的平衡结果,由于土壤有机碳的分解量远大于作物残体中残留于土壤中的有机碳量,从而导致土壤有机碳含量下降。土壤有机碳下降的程度与土地利用方式有密切关系。

212 草地开垦对土壤微生物生物量碳的影响

土壤微生物生物量碳是土壤有机碳的重要组成部分。自然草地开垦为农田后,土壤的微生物生态环境条件发生变化,引起了土壤微生物生物量碳含量显著下降(表 1)。农田土壤微生物生物量碳含量的水平为:玉米与甘蔗轮作地 > 柑桔地 > 种植 4 年甘蔗地 > 种植 6 年甘蔗地,分别为未开垦草地土壤微生物生物量碳含

表 1 不同土地利用方式下的土壤有机碳、可溶性碳和微生物生物量碳

Table 1 Soil organic carbon, dissolved carbon and microbial biomass carbon in different land methods

土地类型 Land type	土地利用方式 land use	土壤有机碳 soil organic carbon (SOC) (g/kg)	土壤微生物量碳 soil microbial biomass carbon(MBC) (mg/kg)	土壤可溶性碳 soil dissolved carbon (mg/kg)	微生物量碳占 有机碳的比例 ratio of SOC to MBC (%)
长期农地 long-term crop land	春玉米-大豆轮作 corn-soybean rotation	131.63	511.4	231.1	01.38
草地开垦后的农地 crop land following grassland reclamation	连续种植甘蔗 4 年 4-year successional sugar cane	121.94	97.6	1141.9	01.75
同上 same as above	连续种植甘蔗 6 年 6-year successional sugar cane	111.60	701.8	561.4	01.61
同上 same as above	种植甘蔗 2 年 玉米 2 年 甘蔗 1 年 rotation of 2-year sugar cane, 2-year corn and 1-year sugar cane	151.55	186.3	791.2	11.20
同上 same as above	连续栽植柑桔 5 年 5-year successional citrus	171.00	177.9	1321.0	11.05
自然草地 permanent grassland	自然草 natural grass	321.08	576.1	1941.8	11.80

量的 321.3%、301.9%、161.9% 和 121.3%。表明草地开垦为农田后,土壤微生物生物量碳下降的幅度大于土壤总有机碳下降的幅度,且其下降的程度与土地利用方式、利用作物年限的种植制度有关。

2.1.3 草地开垦对土壤可溶性有机碳的影响

土壤可溶性有机碳来源于植物根系的分泌物、植物残体中的可溶性物质及微生物的代谢产物^[14],其含量与植物根系生理特性及输入到土壤中的作物残体的性质具有密切的关系。草地开垦为农田后,也引起了土壤可溶性有机碳含量的显著下降(表 1)。柑桔地土壤可溶性有机碳含量为草地的 67.1%,高于农田土壤 28.17%~59.10% 的含量。由此说明,开垦草地及草地开垦后的土地利用方式是影响土壤可溶性有机碳的重要因素。

2.1.4 土壤微生物生物量碳与有机碳的关系

草地及其开垦后的不同土地利用方式的农田中,土壤微生物生物量碳占有机碳的比例有一定差别(表 1),草地土壤中微生物生物量碳占有机碳的比例最高,甘蔗与玉米轮作地及柑桔地土壤中比例次之,甘蔗连作地土壤中的比例较低,长期农田土壤中的比例最低。土壤微生物生物量碳与有机碳之间呈显著的线性关系(图 1),表明草地开垦为农田后,土壤微生物生物量碳的含量随着有机碳含量的下降而下降,土壤有机碳的含量变化与微生物生物量碳的含量具有明显的相关关系。

2.1.5 草地开垦为农田后土壤有机碳的来源构成

如前所述,自然草地转变为农田后,土壤有机碳的含量发生显著变化,这是草地开垦后有机碳分解与作

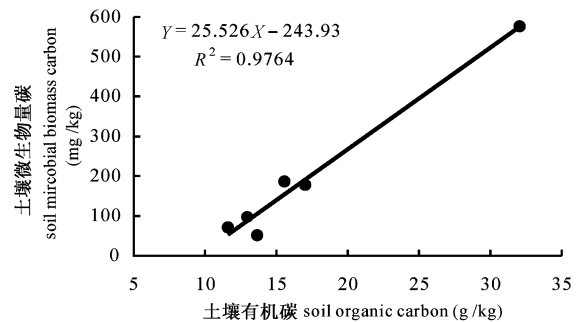


图 1 土壤微生物量碳与总有机碳的关系

Fig. 1 The relationship between soil microbial biomass carbon and soil organic carbon

物残体向土壤中输入有机碳共同作用的结果。开垦后的农田土壤有机碳中既有来源于草地原有的有机碳,也有向土壤中加入的作物残体残留的有机碳,定量地分辨出土壤有机碳的来源,有助于明确认识开垦草地和种植作物对土壤有机碳的效应。

草地及开垦后的土壤有机碳的 $D^{13}C$ 值如表 2 所示。根据 $D^{13}C$ 值可以判别土壤有机碳的来源与构成。未开垦草地上植物样品的 $D^{13}C$ 值为 -211.18‰,草地土壤有机碳的 $D^{13}C$ 值为 -201.32‰,表明草地土壤的有机碳来源于草地植物残体输入的有机碳。草地开垦栽植柑桔后,土壤有机碳的 $D^{13}C$ 值为 -201.17‰,与自然草地土壤有机碳的 $D^{13}C$ 值接近,证明栽植柑桔的枯枝落叶输入到土壤表面后,虽然经过分解,但残留在土壤中的碳甚微,对土壤有机碳库的贡献很小,土壤有机碳仍来源于原来草地固有的有机碳。

草地开垦后种植的玉米和甘蔗属于 C4 植物, 未开垦草地土壤的 $D^{13}C$ 值与种植这两种作物的土壤 $D^{13}C$ 值有一定的差异性, 因此, 根据土壤有机碳和作物残体的 $D^{13}C$ 值, 就可计算种植玉米或甘蔗的土壤有机碳的来源构成。在应用公式(2)时, 确定 D_0 值是关键, 可用两种方法选择 D_0 值, 一种是采用与农地相邻的林地或草地土壤有机碳的 $D^{13}C$ 值, 另一种是根据相邻的林草地和农地土壤剖面中 $D^{13}C$ 值的分布特征, 推算出 D_0 值^[3,6], 根据研究区的实际情况可以采用其中的一种方

法确定相应的 D_0 值。在本试验中, 农地是由开垦草地形成的, 将草地土壤的 $D^{13}C$ 值作为 D_0 值(- 20132j), 玉米和甘蔗样品的 $D^{13}C$ 值分别为 - 12146j 和 - 13127j, 开垦后的土壤有机碳的 $D^{13}C$ 值如表 2 所示。根据 $D^{13}C$ 值, 由公式(2)就可以估算出自然草地开垦种植玉米或甘蔗后, 土壤有机碳库中来源于草地土壤中固有的有机碳和通过玉米或甘蔗残体而输入的有机碳量(表 2)。

表 2 不同土地利用方式下土壤有机碳的 $D^{13}C$ 值和有机碳构成来源

Table 2 $D^{13}C$ values of soil organic carbon and the composition and derivation of soil organic carbon pool

土地类型 Land type	土地利用方式 land use	$D^{13}C$ (j)	土壤有机碳 soil organic carbon (g/kg)	来自草地的有机碳 organic carbon derived from grassland (g/kg)	来自玉米的有机碳 organic carbon derived from com (g/kg)	来自甘蔗的有机碳 organic carbon derived from sugar cane (g/kg)
草地开垦后的农地 crop land following grassland reclamation	种植甘蔗 4 年 4year successional sugar cane	- 191.96	121.94	121.28	-	01.66
草地开垦后的农地 crop land following r grassland reclamation	种植甘蔗 6 年 6year successional sugar cane	- 181.74	111.60	91.00	-	21.60
草地开垦后的农地 crop land following r grassland reclamation	种植甘蔗 2 年 2 玉米 2 年 2 甘蔗 1 年 rotation of 2year sugar cane, 2year com and 2year sugar cane	- 171.59	151.55	101.06	41.70	01.79
草地开垦后的农地 crop land following grassland reclamation	栽植柑桔 5 年 5year citrus	- 201.17	171.00	171.00	-	-
自然草地 permanent grassland	草 natural grass	- 201.32	321.08	321.08	-	-

由表 2 可以看出, 草地开垦后, 栽植柑桔树的园地土壤中来源于草地土壤的有机碳高于种植玉米或甘蔗的农田土壤; 种植玉米或甘蔗的土壤其有机碳量的来源随作物种植年限的增加而下降, 说明草地开垦后, 土壤耕作是引起来源于草地土壤有机碳逐渐分解的主要因素。

由表 2 还可看出, 在甘蔗连作土壤中, 来源于甘蔗残体输入的有机碳量随种植年限的增加而增加。在玉米与甘蔗轮作的农田中, 将玉米秸秆归还于土壤中, 土壤中来自玉米残体的有机碳占总有机碳的 30.12%, 来源于玉米残体的碳量显著高于来源于甘蔗残体的碳量, 反映了在种植作物条件下, 向土壤中加入一定量的作物残体后, 其中的部分碳残留于土壤中, 对于稳定土壤有机碳库起着重要的作用。

3 讨论与结论

在草地生态系统中, 土壤有机碳含量状况与植被构成了一种相对稳定的平衡体系, 林草地开垦转变为农田生态系统后, 原有的平衡关系就会改变, 引起土壤有机碳含量发生显著变化。草地开垦为不同利用方式的农田后, 土壤有机碳含量明显降低(表 1), 这主要是由于草地开垦后, 土壤受到扰动, 植被类型、土壤水热状况及通气条件改变, 雨滴的击溅作用及耕作使土壤结构遭到破坏, 土壤团聚体破裂, 存在于团聚体之间及包闭在团聚体内部的有机碳暴露出来, 这些条件使得草地土壤原有的易分解的有机碳组分发生分解, 而分解缓慢的有机碳保留在土壤中。 ^{13}C 示踪结果表明, 柑桔园地土壤中保留的原有土壤的有机碳高于农田土壤, 农田土壤中保留的原有有机碳量随耕种年限而变化(表 2), 柑桔园地土壤的扰动程度低于农田土壤,

所以,这种差异主要与开垦后土壤扰动的程度有关。农田土壤中来源于作物残体的有机碳量与作物种植制度、作物残体的利用状况等因素有密切的关系(表2),玉米与甘蔗连作的土壤中,玉米收获后,将秸秆还田,而在甘蔗连作的土壤中,甘蔗的茎秆被收获,只有枯落的叶片和部分根系归还到土壤中,所以,采用秸秆还田有利于增加农田土壤有机碳的积累,对丰富和稳定土壤有机碳具有重要的贡献。

草地开垦后,经原有的有机碳分解及新的有机碳输入两个过程的综合平衡,除柑桔园地土壤外,种植农作物的土壤有机碳水平接近于长期耕种的农田(表1),表明在当地的生态环境条件下,采用耕作施肥及作物残茬管理等措施,在5年左右的时间内,新开垦的农田土壤有机碳的含量趋于新的稳定状态,通过秸秆还田还可以有效地保持和提高土壤有机碳的含量。

虽然土壤微生物生物量碳及可溶性有机碳占土壤有机碳的比例较小,但二者对土壤耕作、施肥及土壤条件的变化具有敏感响应,可以反映土壤有机质的生物化学性质^[14,15]。在生态条件一致的环境中,根据土壤微生物的生物量碳占总有机碳的比例可以灵敏反映土壤有机碳的变化趋势^[16,17]。土壤开垦为农田后,土壤微生物生物量碳的含量降低,微生物生物量碳占有有机碳的比例下降(表1),表明了土壤有机碳下降的趋势。当开垦草地成为稳定的农田后,土壤微生物的生物量碳及其占有有机碳的比例明显地反映出了土壤管理措施对土壤有机碳影响的差异性。土壤微生物生物量碳是表征土壤有机碳变化的灵敏指标。

本研究表明,在广西西北的喀斯特地区,甘蔗与玉米轮作的农田中,采用玉米秸秆还田可以有效维持土壤有机碳的水平,保持土壤肥力。在甘蔗连作的农田中,应该加强有机肥及有机物料的投入,增加土壤有机碳,保持土壤肥力,以促进甘蔗生产的稳定发展。合理的种植制度与相应的土壤管理措施相结合,对于该区农业可持续发展及生态环境质量的提高具有重要的作用。

参考文献:

[1] Mikhailova E A, Bryant R B, et al. Cultivation effects on soil carbon and nitrogen contents at depth in the Russian Chernomem. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64: 738~ 745

- [2] Mann L K. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Sci*, 1986, 142: 279~ 288
- [3] 朴河春,刘启明,余登利,等.用天然¹³C丰度评估贵州茂兰喀斯特森林区玉米地土壤中有有机碳的来源. *生态学报*, 2001, 21(3): 434~ 439
- [4] 刘启明,王世杰,朴河春,等.稳定碳同位素示踪农林生态转换系统中土壤有机质含量的变化. *环境科学*, 2002, 23(3): 75~ 7, 8
- [5] 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
- [6] Balesdent, J, Mariotti A, Boissongier D. Effect of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from ¹³C abundance in maize fields. *Journal of Soil Science*, 1990, 41: 587~ 596
- [7] Follett R F, Paul E A, Leavitt S W, Halvorson A D, Lyon D, Peterson G A. Carbon isotope ratios of Great Plains soils and in wheat-fallow systems. *Soil Sci Soc Am J*, 1997, 61: 1068~ 1077
- [8] Gregorich E G, Ellert B H, Monreal C M. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural ¹³C abundance. *Can J Soil Sci*, 1995, 75: 161~ 167
- [9] Collins H P, Elliot E T, Paustian K, Bundy L G, Dick W A, Hunggins D R, Smucker A J M, Paul E A. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems. *Soil Biology & biochemistry*, 2000, 32: 157~ 168
- [10] 沈承德,孙彦敏,易惟熙,等.退化森林生态系统恢复过程的碳同位素示踪. *第四纪研究*, 2001, 21(5): 452~ 460
- [11] 沈承德,孙彦敏,易惟熙,等.鼎湖山森林土壤¹⁴C表观年龄及¹³C分布特征. *第四纪研究*, 2000, 20(4): 335~ 344
- [12] Wu J, Joergensen R G, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: An automated procedure. *Soil Biol Biochem*, 1990, 22: 1167~ 1169
- [13] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: *Methods of Soil Analysis, Part 2*, (Page A L, Miller R H, Keeney D R Eds), 2nd Edn, Agronomy 9, American Society of Agronomy, Madison, 1982, 539~ 579
- [14] McGill W B, Cannon K R, Robertson J R, Cook F D. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L 50 years of cropping to two rotations. *Can J Soil Sci*, 1986, 66: 1~ 19
- [15] Lupwayi N Z, Rice W A, Clayton G W. Soil microbial biomass and carbon dioxide flux under wheat as influenced by tillage and crop rotation. *Can J Soil Sci*, 1999, 79: 273~ 280
- [16] Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *J Agric Sci*, 1987, 97: 713~ 721
- [17] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Aust J Soil Res*, 1992, 30: 195~ 207