

林地变为玉米地后土壤轻质部分有机碳的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值的变化朴河春¹, 余登利², 刘启明¹, 郭景恒¹, 冉景丞²

(1: 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2: 贵州茂兰国家级喀斯特森林保护区管理处, 贵州 荔波 558400)

摘要: 为了观察森林生态系统转变为农业生态系统后土壤有机碳的变化, 选择贵州喀斯特森林区为研究对象, 采集了林地和邻近的玉米地土壤剖面样品, 并按土壤密度把土壤样品分级成轻质部分和重质部分。林地和玉米地土壤均为石灰土。玉米地土壤风化相对较强, 淋溶严重而贫瘠, 并且所返还的植物残留物数量很少。实验结果表明, 林地土壤轻质部分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显低于重质部分, 而玉米地土壤轻质部分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显高于重质部分, 说明植物残留物首先进入到轻质部分。然而, 由于当地的耕作习惯, 输入到玉米地土壤轻质部分的玉米残留物的数量很少, 只有48%, 这是初级生产力低下的主要原因。

关键词: 密度分级; 土壤有机质; 天然 ^{13}C 丰度; 植物残留物; 喀斯特森林; 贵州

中图分类号: S153.6⁺21 文献标识码: A

Changes of Natural ^{13}C Abundance in Light Fraction in Cleared Maolan Karst Forest Soils Converted to Maize CroppingPIAO He-chun¹, YU Deng-li², LIU Qi-ming¹, GUO Jing-heng¹, RAN Jing-cheng²

(1: The State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2: The Management of Maolan National Nature Reserve in Guizhou, Libo, Guizhou 558400, China)

Abstract: Soil samples from forest and corn fields in the Maolan karst region of southwest China were collected and separated into light and heavy fractions to investigate the changes of soil organic carbon in forest soils now used for the continuous cropping of corn. The forest and the cultivated soils are limesoils (Alfisols). These agricultural soils are relatively weathered, leached and impoverished, and have a low input of plant residues. In cultivated soils, some residues of the main C_4 crop, namely maize, have been incorporated into the soils, along with some residues of C_3 plants, namely soybean and sweet potato, which were occasionally planted, and weeds. The $\delta^{13}\text{C}$ value of organic C in light fraction of forest soils were significantly lower than that of heavy fraction. In contrast, The $\delta^{13}\text{C}$ value of organic C in light fraction of corn fields were higher than that of heavy fraction, indicating that corn residues were firstly incorporated into light fraction. However, the ratio of organic C originated from corn residues was small, only was 48%, reflecting the small plant residues incorporating these agricultural systems.

Key words: density fractionation; carbon isotope; plant residue; soil organic carbon; karst; Guizhou

贵州地处中亚热带南部, 属中亚热带季风性气候带, 其土壤风化程度强于温带土壤, 并且植物残留物的分解速度快于温带土壤, 其土壤有机质浓度相对较低。因此, 该区典型的低输入的农业生产严重地依赖于外界营养物和能量物质的供给。然而, 营养物和能量物质的迁移依赖于土壤有机质的转换和矿化作用、阳离子交换能力和土壤物理条件的维持, 以及土壤有机质的持久性^[1]。

过去, 贵州喀斯特森林区的农民为了获取更多的粮食, 毁林开荒, 并在庄稼收割后, 运走或焚烧庄稼的茎秆, 导致该区初级生产力较低^[2]。因此, 土壤有机质的量和质问题关系着低输入的贵州农业生产的可持续发展。土壤有机质的数量与

返回到土壤的植物残留物的数量和这些残留物分解速度是一种函数关系。植物残留物的输入量是影响土壤有机质数量的最重要因素。

利用土壤密度分级所获得的轻质部分 (light fraction) 是新鲜的植物残留物和腐殖化的土壤有机质之间有机质的不稳定过渡库, 库内的有机质大部分是未完全分解的植物残留物。这些有机质在土壤中的浓度是高度变化的, 依赖于所输入的植物残留物的数量和特性, 以及影响分解速度的土壤环境因素^[3]。在轻质部分土壤中有有机质浓度的变化可作为土壤总有机质变化的一个早期指示剂, 并能够确定土壤肥力的早期变化^[4]。由此可见, 当森林生态系统转变成农业生态系统时, 土壤肥

基金项目: 国家自然科学基金项目 (49772175)

作者简介: 朴河春 (1941-), 男, 研究员。

收稿日期: 2000-05-12

力变化的控制，即土壤中所输入的植物残留物数量和质量对农业可持续发展是非常重要的。

大多数土壤有机质来自植物残留物，而植物残留物的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值对土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值有直接的影响。土壤有机质的天然 ^{13}C 丰度与覆盖土壤的植物的 ^{13}C 丰度密切相关^[5]。因此，利用土壤有机质的稳定碳同位素比值可以重建生态时间尺度和地质时间尺度上的植被动态过程^[6, 7]。当森林生态系统或草地生态系统转变成农业生态系统时，会把 C_4 植物（一般其 $\delta^{13}\text{C} = -12\text{‰} \sim -14\text{‰}$ ）残留物导入到曾在 C_3 植被（一般其 $\delta^{13}\text{C} = -26\text{‰} \sim -28\text{‰}$ ）下发育的土壤中去，因而使土壤中含有来源不同的有机质，从而使土壤有机质的碳同位素组成有所不同。这就为我们利用碳同位素来辨别土壤有机质来源提供了依据。

本研究利用天然 ^{13}C 丰度技术来评估生态系统转换后土壤轻质部分中的有机质的变化，并估算耕作数十年后来源于 C_4 植物残留物的有机质在土壤轻质部分有机质中所占的比例，以揭示植物残留物的输入对保持土壤有机质浓度的重要性。

1 材料与与方法

实验所用的样品是贵州茂兰喀斯特林地土壤和玉米地土壤，均是石灰土（样品森 1 和玉 2 采于 $\text{N } 25^{\circ} 15'$ ， $\text{E } 108^{\circ} 02'$ ；样品森 3 和玉 4 采于 $\text{N } 25^{\circ} 14'$ ， $\text{E } 108^{\circ} 03'$ ；样品森 5 和玉 6 采于 $\text{N } 25^{\circ} 16'$ ， $\text{E } 108^{\circ} 03'$ ）。海拔高度为 515 m。该区基岩为碳酸盐岩，因而形成了具喀斯特特征的裸岩山区，遍生连片乔木林和常绿落叶阔叶混交林，植被覆盖率达 90%以上^[8]。它是在地带性生物气候条件的背景下，在喀斯特地貌、石灰土等特殊生态环境的影响下形成的非地带性原始植被，区系丰富。该区地处中亚热带南部，其气候属中亚热带季风性湿润气候，年平均气温为 15.3°C ，年平均降水量为 1752 mm。该区土壤分布不连续，且土层薄。该区林地土壤的 pH 值随深度的增加而增高，其变化范围在样品森 1 为 $6.7 \sim 7.5$ 之间，样品森 3 为 $7.8 \sim 8.2$ 之间；玉米地土壤的 pH 值也有同样的变化规律，其变化范围在样品玉 2 为 $6.6 \sim 7.3$ ，样品玉 4 为 $6.8 \sim 7.7$ 。

野外采集土壤剖面样品（林地土壤采样深度为 50 cm，而玉米地为 70 cm）后，每层样品混匀，仔细剔除植物根系和岩屑后风干，过筛至 20 目。我们在森 1 和森 3 以及玉 2 和玉 4 采样点，选取表层深度分别为 $0 \sim 5$ cm， $5 \sim 10$ cm， $10 \sim 15$ cm， $15 \sim 20$ cm 层位采集土壤样品，每一层土壤称取约 40 g 土壤样品悬浮在 40 ml NaI 溶液中（sp.

gr.=1.7），并充分分散土壤 30 min，静止 48 h 后，把悬浮物质（轻质部分）直接转移到过滤装置过滤，再利用 0.1 mol/L HCl 去除土壤碳酸盐，并用蒸馏水洗掉残留在土壤中的 HCl，在 60°C 下烘干并研磨。称取一定数量的土壤样品（能够获取 3 mg C）与 CuO （1:50）置于石英管中。在真空和 750°C 温度下燃烧，然后用低温蒸馏把石英燃烧管中所产生的 CO_2 气体分开，并收集在可破碎的熔封管中。在 MAT252 型质谱仪上测定稳定碳同位素比值。重同位素的天然丰度是用千分之单位（‰），以 δ 符号来表示，并与国际 PDB 标准相对应。土壤有机碳的浓度用 PE2400 型元素分析仪测定。对样品进行重复分析，如果重复结果之差超过 0.4‰，则再进行分析，然后取平均值。当林地变为玉米地时，土壤中就会存在两种分别来自 C_4 植物和 C_3 植物的不同的 ^{13}C 丰度的有机质，从而使玉米地土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大，因为原来的林地有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较小，而玉米地土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较大。

根据所测得的这些 $\delta^{13}\text{C}$ 值就可以计算出玉米残留物碳的比例：设 X 为 C_4 玉米残留物碳的比例， $X = (\delta - \delta_3) / (\delta_4 - \delta_3)$ (1)

式中， δ = 玉米地土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值， δ_3 = 来源于 C_3 植物的土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值， δ_4 = 玉米 C_4 植物残留物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

2 结果与讨论

2.1 林地和玉米地土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值随剖面深度的变化

在林地土壤剖面中，土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随深度的增加而增高，表层土壤与 50 cm 深处底层土壤之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在的差异，样品森 1 为 3.2‰，另两个样品为 2.0‰，其波动范围可从表层土壤的 $27.0 \pm 0.1\%$ 至 50 cm 深处的 $24.6 \pm 0.5\%$ ，平均相差 2.4‰。林地土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随深度的变化曲线呈对数关系（图 1）。用来对照的玉米地已确定无疑原来是森林地，已有几十年的开垦史，其表层土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-20.2 \pm 0.4\%$ ，70 cm 深处土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-23.2 \pm 1\%$ 。是由于 C_4 植物残留物的输入而导致玉米地表层土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增高的。玉米地土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随深度的变化曲线呈直线关系（图 2），其直线相关系数大于对数关系的相关系数。土壤的耕作之所以导致表层土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值从 -27.0% 增加至 -20.2% ，除了上述原因之外，还与土壤的耕作导致输入到土壤里的植物残留物的分解速度加快有关。植物残留物的分解作用是微生物媒介的过程，因此，在植物残留物分解作用期间，对 ^{13}C 的特别优待将引起土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增高。此外，植物残留物某些生物化学组分的 ^{13}C 同位素浓度的不同

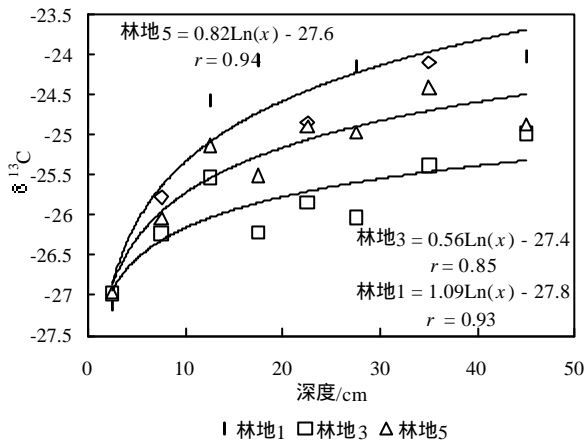


图1 林地土壤的δ¹³C 值随剖面深度的变化

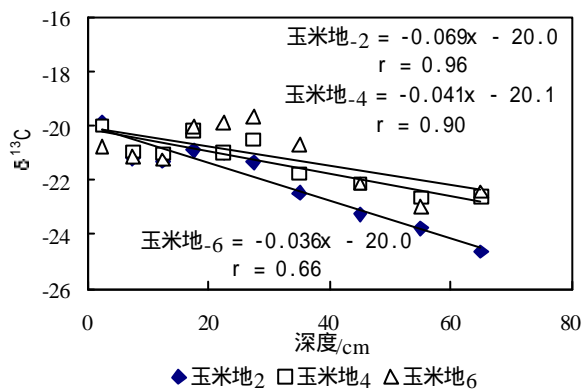


图2 玉米地土壤的δ¹³C 值随剖面深度的变化

以及它们的分解速度的不同也会造成土壤的δ¹³C 值的不同，例如，纤维素和半纤维素比其它植物组织富含 1‰~2‰ 的 ¹³C，而木质素少含 2‰~6‰ 的 ¹³C^[9]。由于植物残留物在分解作用期间各组分间分解速度的差异，导致了植物残留物的同位素组成的改变。其结果是植物残留物的腐殖化作用伴随着 ¹³C 的轻微富集^[10]。

对林地土壤来说，其δ¹³C 值随深度的增加而增加是普遍的现象，除了上述原因之外，还与大气 CO₂ 有关，这是由于化石燃料的燃烧和土壤有机质矿化作用的加强，使大气 CO₂ 的δ¹³C 值降低，因此年龄在百年以上有机质与现代植被的δ¹³C 值之间至少有 1.3% 的差异^[9]。

2.2 土壤轻质部分和重质部分有机碳的δ¹³C 值随深度的变化

土壤轻质部分和重质部分有机碳的δ¹³C 值的测定是在耕作层的 0~20 cm 层位的样品中进行的，其随深度的变化规律与土壤总有机碳的δ¹³C 值随深度的变化规律相一致；在林地土壤中轻质部分和重质部分有机碳的δ¹³C 值随深度的增加而增加（图

3）；而在玉米地中轻质部分和重质部分有机碳的δ¹³C 值随深度的增加而降低（图 4）。在林地土壤中轻质部分有机碳的δ¹³C 值明显低于重质部分，接近森林植物样品中的有机碳的δ¹³C 值，总土壤的δ¹³C 值介于轻质部分和重质部分之间（图 3）。土壤轻质部分主要包含了处于各种分解阶段的植物、动物以及微生物的残留物，它是新鲜植物残留物和腐殖化的有机质之间的一个过渡性有机质库。因此，在土壤轻质部分中含有大量的碳和营养物，它的δ¹³C 值接近森林植物样品中的有机碳的δ¹³C 值，林地土壤轻质部分有机碳的δ¹³C 值（-27.6‰）与树木的平均δ¹³C 值（-29.1‰）之差仅为 1.5‰，这是由于不断地往林地里输入单一的 C₃ 植物残留物的结果。与林地相反，玉米地土壤中轻质部分有机碳的δ¹³C 值明显高于重质部分，说明玉米等 C₄ 植物的残留物首先输入到土壤轻质部分。但是，玉米地土壤轻质部分有机碳的δ¹³C 值（-20.3‰）与玉米的δ¹³C 值（-11.4‰）之差为 8.9‰，这说明除了玉米等 C₄ 植物的残留物输入到土壤以外，还有 C₃ 植物残留物，如杂草（其平均δ¹³C 值为 -

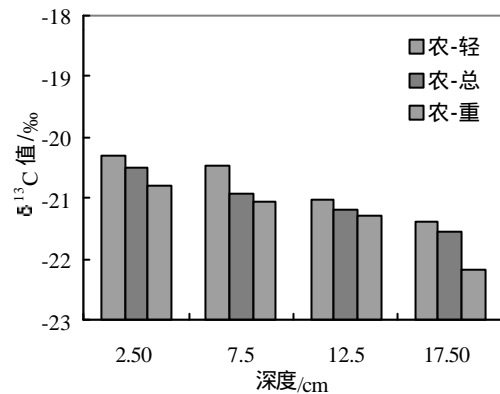


图3 森林土壤的轻质部分，重质部分以及总土壤有机碳的δ¹³C 值随剖面深度的变化

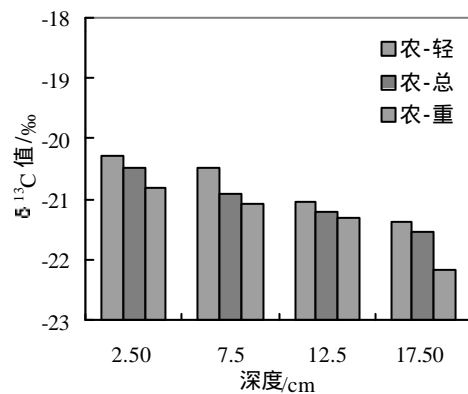


图4 玉米地土壤的轻质部分，重质部分以及总土壤有机碳的δ¹³C 值随剖面深度的变化

28.9‰、偶尔轮作的黄豆（其平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-28.2‰）和红薯（其平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-27.5‰），也输入到玉米地土壤中。把输入到玉米地土壤中的 C_3 植物残留物的平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值-28.4‰ 和 C_4 植物残留物的平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值-11.4‰ 代入公式（1）中，就可以得出玉米地轻质部分有机碳中有 48%来自玉米残留物。该采样地主要作物为玉米，由此可推测输入到玉米地的 C_3 作物残留物的数量应少于 C_4 作物残留物的数量，因此在玉米地土壤轻质部分有机碳中仍含有原林地土壤的有机质。Gregorich 等（1994）^[11]的实验结果表明，林地土壤经过连续 25 a 耕种玉米之后，土壤轻质部分有机碳中有 73%来自玉米残留物。然而，我们所研究的玉米地中，耕种玉米几十年后，在轻质部分有机碳中来源于玉米残留物的有机质的比例之所以如此之少，是由于当地的耕作方式所引起的：在庄稼收割后，庄稼的茎秆茬连同谷物均被运走或前者被焚烧。

一般来说，玉米等作物残留物分解缓慢，是由于有机质 N 和 S 的浓度低所致。比起具有较高浓度的 N，具有低浓度的 N 的材料所显示的耐分解作用意味着它们能够作为土壤碳的库留下相对较长的周期^[12, 13]。在土壤轻质部分中的 C 和 N 的比值随着海拔高度的增加而倾向于增加，这反映了植被和气候的差异^[14]。土壤轻质部分的有机质的不均匀的大量损失发生在未开垦的土壤变成耕地土壤的初期，并在细密结构的土壤中损失速度最快^[15]。土壤轻质部分也受种植实践的影响，如种植草类或豆类作物会特别加强土壤轻质部分有机质浓度^[16]。短时豆科草和一年生作物（如小麦）的轮作将加强土壤轻质部分的有机质浓度^[17]，但是小麦和兵豆轮作时土壤轻质部分的有机质浓度反而低于连续种植小麦的土壤轻质部分的有机质浓度^[18]。肥料的加入会通过提高植物生物量产量而增加土壤轻质部分的有机质浓度，并且这种增加归结于新的残留物的加入^[19]。

土壤轻质部分具有一个相对快速的转换速度，并且是一个易变的碳的重要的来源，因此它可作为土壤质量的灵敏的指示剂，特别是有机质质量的指示剂^[19]。主要是因为比起总的有机质来它对经营实践的变化更为敏感。比如，对小麦系统的长期研究表明，在各种经营实践的变化中土壤轻质部分碳的变化比总的有机碳大 15 倍^[18]。虽然人们已经知道土壤轻质部分对经营影响的敏感性，但是还不清楚土壤轻质部分对有机质变化预测的有用性。土壤轻质部分的增加一般标志着易变的有机质浓度的增加，但是还没有充分研究过

渡性碳至稳定的有机质的最终转换^[20]。稳定的有机碳库与易变的有机碳库的区分是相当重要的，因为它们土壤中营养物和能量碳的流动的控制中起着不同的作用。

参考文献：

- [1] SHANG C, TIESEN H. Organic matter stabilization in two semiarid tropical soils: size, density, and magnetic separation [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1998, 62:1 247-1 257.
- [2] PIAO H C, HONG Y T, YUAN Z Y. Seasonal changes of microbial biomass carbon related to climatic factors in soils from karst areas of southwest China [J]. *Biol Fertil Soils*, 2000, 30:294-297.
- [3] GREGORICH E G, JANZEN H H. Storage of soil carbon in the light fraction and macroorganic matter [A]. In: CARTER M R, STEWART B A, eds. *Structure and Soil Organic Matter Storage in Agricultural Soils* [C]. Boca Raton, FL: Lewis Publ, 1995. 167-190.
- [4] CADISCH G, IMHOF H, URQUIAGA S, et al. Carbon turnover (^{13}C) and nitrogen mineralization potential of particulate light soil organic matter after rainforest clearing [J]. *Soil Biol Biochem*, 1996, 28:1 555-1 567.
- [5] NISSENBAUM A, SCHALLINGER K M. The distribution of the stable carbon isotope ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) in fractions of soil organic matter [J]. *Geoderma*, 1974, 11:137-145.
- [6] DZUREC R S, BOUTTON T W, CALDWELL M M, et al. Carbon isotope ratios of soil organic matter and their use in assessing community composition changes in Curlew Valley, Utah [J]. *Oecologia*, 1985, 66:17-24.
- [7] KINGSTON J D, MARINO B D, HILL A. Isotopic evidence for neogene hominid paleo environments in the Kenya Rift Valley [J]. *Science*, 1994, 264:955-959.
- [8] 周政贤. 茂兰喀斯特森林考察综合报告 [A]. 见：周政贤主编. 茂兰喀斯特森林科学考察集 [C]. 贵阳：贵州人民出版社，1987. 1-23.
- [9] BENNER R, FOGEL M, SPRAGNE E K, et al. Depletion of ^{13}C in lignin and its implications for stable carbon isotope studies [J]. *Nature* (London), 1987, 329:708-710.
- [10] BALESDENT J, MARIOTTI A. Measurement of soil organic matter turnover using ^{13}C natural abundances [A]. In: BOUTTON T W, YAMASAKI S I, eds. *Mass Spectrometry of Soils* [C]. New York: Marcel Dekker Inc, 1996. 83-111.
- [11] GREGORICH E G, ELLERT B H, MONREAL C M. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural ^{13}C abundance [J]. *Can J Soil Sci*, 1994, 75:161-167.
- [12] LADD J N, OADES J M, AMATO M. Decomposition of plant material in Australian soils: residual organic and microbial biomass C and N from isotope-labelled legume material and soil organic matter, decomposing under field conditions [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1985, 23:603-611.
- [13] AMATO M, LADD J N, ELLINGTON A, et al. Decomposition of plant material in Australian soils: decomposition in situ of ^{14}C - and

- ¹⁵N-labelled legume and wheat materials in a range of Southern Australian soils [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1987, 25:95-105.
- [14] CHRISTENSEN B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates [J]. *Adv Soil Sci*, 1992, 20:1-90.
- [15] DALAL R C, MAYER R J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland: distribution and kinetics of soil organic carbon in particle-size fractions [J]. *Aust J Soil Res*, 1986, 24:301-309.
- [16] ANGERS D A, MEHUYS G R. Barley and alfalfa cropping effects on carbohydrate contents of a clay soils and its size fractions [J]. *Soil Biol Biochem*, 1990, 22:285-288.
- [17] JANZEN H H, CAMPBELL C A, BRANDT S A, *et al.* Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, 56:1 799-1 806.
- [18] BIEDERBECK V O, JANZEN H H, CAMPBELL C A, *et al.* Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment [J]. *Soil Biol Biochem*, 1994, 26:1 647-1 656.
- [19] GREGORICH E G, ELLERT B H, DRURY C F, *et al.* Fertilization effects on soil organic matter turnover and corn residue C storage [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1996, 60:472-476.
- [20] GREGORICH E G, CARTER M R, DORAN J W, *et al.* Biological attributes of soil quality. In Soil quality for crop production and ecosystem health [A]. In: GREGORICH E G, CARTER M R, eds. *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science 25* [C]. New York: Elsevier, 1997. 81-113.