

# 不同土地利用下黑土密度分组中碳、氮的分配变化\*

李海波<sup>1,2</sup> 韩晓增<sup>1†</sup> 王 风<sup>1,2</sup> 乔云发<sup>1</sup>

(1 海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站(中国科学院东北地理与农业生态研究所),哈尔滨 150081)

(2 中国科学院研究生院,北京 100039)

**摘 要** 陆地生态系统植被覆盖会影响有机质在土壤及其各组分中的分布,是控制土壤有机质储量的重要因子。通过对黑土有机碳、氮含量的估算,阐明土地利用变化对土壤有机碳库及轻组、重组有机碳、氮含量和结合态腐殖质有机碳含量的影响以及有机碳、氮的消长变化。结果表明:(1)不同土地利用方式下土壤 0~20 cm 土层总有机碳(TOC)、全氮(TN)含量存在显著差异( $p < 0.05$ ),自然土壤被破坏或转为农田,土壤总有机碳和全氮含量会持续下降,但农田化肥和有机肥配施后,土壤总有机碳和全氮含量显著增加;草地经过 20 年的植被恢复,土壤总有机碳含量显著高于农田化肥和无肥处理,有机碳库储量显著提高;(2)游离态轻组(Free-LF)和重组(HF)有机碳和氮含量与土壤总有机碳和全氮呈显著或极显著正相关,闭蓄态轻组(Occluded-LF)有机碳和氮在土壤中呈随机分布;(3)游离态轻组的 C/N 比高于全土和其他组分,易受微生物作用而降解,是土壤不稳定碳库的主要成分;(4)松结态胡敏酸碳含量与土壤总有机碳显著相关( $p < 0.05$ ),土壤肥力随着胡敏酸的增加而提高。农田有机培肥不但能够提高有机质含量和土壤质量,也能显著提高农田生态系统抵御大气 CO<sub>2</sub> 的能力。

**关键词** 土地利用;土壤有机碳;密度组分;结合态腐殖质;黑土

**中图分类号** S153.6 **文献标识码** A

土壤是陆地生态系统的主要碳库,而土壤碳库的变化对碳循环有重要作用。土壤有机碳库的动态平衡直接影响着土壤肥力的保持与提高,进而影响土壤质量的优劣和作物产量的高低,在培育肥力、调节土壤理化性质、提供作物营养、改善土壤结构及减少环境负面影响等方面具有重要作用。土壤有机碳的微小变化将对大气 CO<sub>2</sub> 浓度产生显著影响,最终会影响土壤乃至整个陆地生态系统的可持续性<sup>[1,2]</sup>。

陆地生态系统土地利用/覆被变化(Land use and cover change,LUCC)影响植物凋落物数量和质量、凋落物分解速率和土壤有机质稳定过程,反映碳、氮随时间变化的消长动态,是控制土壤有机质储量的重要因子<sup>[3,4]</sup>。土壤有机质因对土壤性质的深远影响而被作为土壤质量和健康的必要指示因子<sup>[5]</sup>。

土壤有机质以两种形态存在,一种是游离态,包括不分解或部分分解的动植物残体和微生物生物量,介于植物残体和腐殖化有机质之间,包括碳水化合物和氨基酸等可溶性化合物,具有较高的 C/N 比,一般称为轻组,是土壤活性碳库(Labile carbon

pools)的重要组成部分,其含量会影响土壤总有机碳和氮的周转和动态变化<sup>[6]</sup>。有人将其组分进一步分为游离态轻组(Free light fraction, Free-LF)和闭蓄态轻组(Occluded light fraction, Occluded-LF)<sup>[7]</sup>;另一种是有机-无机复合体,也称为重组,有机质主要吸附在矿物表面或隐蔽在土壤微团聚体内部<sup>[6,8]</sup>。

东北黑土因开发年限短、土壤肥沃、有机质含量高而备受关注,但是近几十年开发过快致使黑土表现出退化趋势,因此保持和恢复土壤质量、保证土地利用的可持续性至关重要。目前研究的土地利用方式时空跨度较大,涉及从农田、草地到森林等多个生态系统在人为干预下的演替过程<sup>[9~11]</sup>,本试验基于区域尺度黑土生态系统,在气候、母质、地形和开垦历史等因素各向同性的条件下,通过测定长期定位试验及农田边际自然生态系统土壤有机碳和氮含量,研究不同植物和无植被覆盖对土壤有机碳、氮的影响,揭示有机碳和氮在土壤各密度组分中的分布规律和消长动态,为阐明黑土有机质的肥力特性和环境行为提供理论依据。

\*中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-407, KZCX3-SW-NA3-27)国家科技支撑计划(2006BAD05B05)

† 通讯作者, E-mail: xzhan@mail.neigahrh.ac.cn

作者简介:李海波(1967~),男,博士研究生,主要从事土壤生态及环境化学方面的研究。E-mail: harbourlee@126.com

收稿日期:2007-02-08;收到修改稿日期:2007-06-09

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试土壤样品于 2005 年 10 月采自中国科学院东北地理与农业生态研究所海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站,地理位置 N 47°26', E 126°38', 海拔 240 m, 年均温度 1.5℃, 年均降雨量 550 mm, 无霜期 120 d, 土壤为典型黑土。从如下 5 个采样地 (Sampling plots) 采集土壤样品 (见图 1), 视为 5 个处理: 草地 (Grassland fallow, GF): 1985 年退耕休闲, 面积 1 hm<sup>2</sup>, 草原化草甸植被自然恢复, 群落优势种为狗尾草 (*Leymus chinensis*);

裸地 (Bareland fallow, BF): 1985 年退耕休闲, 面积 0.667 hm<sup>2</sup>, 植物生长季定期将植物地上部铲除, 模拟无植被覆盖下黑土退化过程; 无肥处理 (No fertilizer, NF), 不施肥料; 单施化肥处理 (NP chemical fertilizer applied, NP), 施纯 N 150 kg hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg hm<sup>-2</sup>; 化肥 + 有机肥处理 (Chemical fertilizer + organic manure, NPOM), 施纯 N 150 kg hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg hm<sup>-2</sup>, 有机肥 30 000 kg hm<sup>-2</sup>。、是 1993 年开始的长期定位试验, 为玉米-大豆-小麦轮作, 小区面积约 60 m<sup>2</sup>, 4 次重复, 2005 年种植作物玉米。土样取自 0~20 cm 层土壤, 每个处理随机取 4 个点, 样品风干后, 四分法均化, 过 2 mm 筛备用。

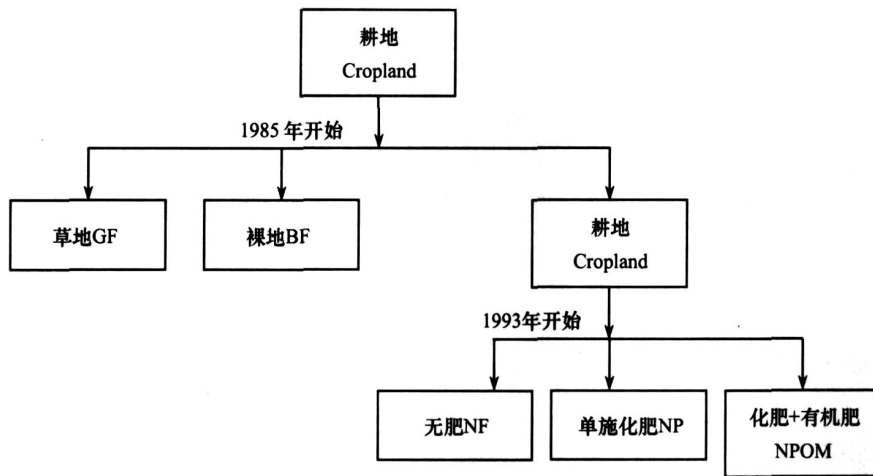


图 1 长期定位试验设置

Fig. 1 Setup of the long-term experiment

### 1.2 分析方法

土壤有机碳密度分组 (Density fractionation) 方法参照 Golchin 等<sup>[7]</sup>, 即将有机碳 (OC) 分为游离态轻组 (Free-LF)、闭蓄态轻组 (Occluded-LF) 和重组 (HF)。具体方法如下: (1) 称 10.000 g 土样装进已称重的 100 ml 离心管, 加 50 ml NaI 溶液 ( $d = 1.8 \text{ g cm}^{-3}$ ), 用手轻轻摇动, 静置室温过夜。次日 3 500 r min<sup>-1</sup> 离心 15 min, 将溶液倒出过滤, 滤液回收再用。再向离心管中加入 50 ml NaI 溶液, 摇动、离心、过滤, 重复 2 次。留在滤纸上的物质用 0.01 mol L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> 溶液 50 ml 和蒸馏水 100 ml 洗涤, 然后转移至 50 ml 烧杯中, 静置 24 h 后, 低于 60℃ 水浴蒸干、称重, 这一组分为游离态轻组 (Free-LF); (2) 离心管内沉淀继续加 50 ml NaI 溶液, 摇动后, 超声分散 15 min (KQ5200DE 数控超声清洗器, 40 Hz, 100 W)。离心、过滤同上, 并重复 2 次。滤纸上的物质经洗涤后

转移至 50 ml 烧杯中, 低于 60℃ 水浴蒸干、称重, 这一组分为闭蓄态轻组 (Occluded-LF); (3) 离心管内沉淀加 50 ml 蒸馏水, 振荡 20 min, 4 000 r min<sup>-1</sup> 离心 20 min, 管内沉淀用 95% 乙醇反复洗涤至无色, 放入鼓风干燥箱低于 40℃ 干燥至恒重, 这一组分为重组 (HF)。以上组别用玛瑙研钵研磨, 过 0.25 mm 筛, 碳、氮含量采用碳氮氢元素分析仪 (VarioEL elemental, Germany) 测定。

结合态腐殖质分组采用熊毅—傅积平改进法<sup>[12]</sup>, 即用碱溶液 (pH 12~13) 连续浸提重组, 各组分分为松结态 (0.1 mol L<sup>-1</sup> NaOH 溶液浸提)、稳结态 (0.1 mol L<sup>-1</sup> NaOH + 0.1 mol L<sup>-1</sup> Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 溶液浸提) 和紧结态腐殖质; 用 6 mol L<sup>-1</sup> HCl 溶液沉淀 (pH 1~1.5) 分离提取胡敏酸 (HA), 采用高温外热重铬酸钾氧化容量法测定胡敏酸、胡敏素 (Hu) 含量, 差减法计算富里酸 (FA) 含量。

供试土壤基本理化性质见表 1。土壤总有机碳和全氮采用碳氮氢元素分析法测定, pH 值采用

DELTA 320 pH 计法测定, 其他基本理化性质测定方法见文献[12]。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the surface soil (0~20 cm) of the tested black soil

处理代号 <sup>1)</sup> Treatment code	容重 Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	pH (H <sub>2</sub> O)	有机碳 SOC (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P (mg kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total K (g kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alk-hydro N (mg kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P (mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg kg <sup>-1</sup> )
GF	0.95	6.24	29.42	2.18	736.4	23.5	219.8	7.20	163.5
BF	1.06	6.12	23.79	1.78	745.1	24.0	222.1	17.02	183.2
NF	1.03	6.31	25.60	1.75	708.5	23.2	179.7	12.40	139.7
NP	0.97	5.87	27.79	1.95	831.7	24.4	210.0	38.72	110.0
NPOM	0.92	5.82	32.09	2.45	978.0	26.0	230.9	87.13	174.0

1) GF: 草地 Grassland fallow; BF: 裸地 Bareland fallow; NF: 无肥处理 No fertilizer; NP: 单施化肥处理 NP chemical fertilizer applied; NPOM: 化肥 + 有机肥处理 Chemical fertilizer + organic manure. 下同 The same as below

### 1.3 统计分析

文中数据用 SASV9 软件进行单因素方差分析和相关分析, 用 Duncun (SSR) 方法分析处理间平均数在  $p < 0.05$  和  $p < 0.01$  水平的差异显著性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同土地利用下土壤总有机碳、全氮含量的变化

不同土地利用下土壤总有机碳 (TOC) 含量差异显著 ( $p < 0.05$ ) (图 2), 土壤总有机碳含量大小顺序为: 化肥 + 有机肥 > 草地 > 化肥 > 无肥 > 裸地。裸地与草地同是 1985 年开始休闲, 但因为植被被人为破坏, 每年只有少量植物种子和根茬归还土壤, 输入土壤的有机碳小于草地, 20 年后, 其含量较草地低  $5.63 \text{ g kg}^{-1}$ 。化肥 + 有机肥处理土壤总有机碳含量较化肥处理增加  $4.31 \text{ g kg}^{-1}$ , 高 15.47%; 无肥和化肥处理与草地相比有机碳含量分别降低 14.91% 和 5.87%, 表明土地利用方式从草地转为耕地, 土壤有机碳 (SOC) 含量会显著下降。化肥 + 有机肥处理土壤总有机碳含量较草地增加 8.34%, 说明有机-无机肥配施对提高土壤碳库储量的效果好于植被自然恢复。

土壤全氮含量的变化与土壤总有机碳含量的变化趋势相似 (图 2), 而且与土壤总有机碳含量呈极显著正相关 ( $R^2 = 0.922^{**}$ ,  $n = 5$ ), 两者变化趋势符合线性拟合方程  $Y = 0.088 X - 0.417$ , 表明土壤全氮的消长动态受到土壤总有机碳变化的强烈影响。裸地因没有植物消耗氮素养分, 其土壤全氮含

量较无肥处理略高 ( $0.03 \text{ g kg}^{-1}$ ), 但没有显著差异, 两者分别较草地低 18.43% 和 19.88%; 同时也说明, 随着土壤有机碳的矿化损失, 土壤氮素的保持能力显著降低, 碳、氮含量变化表现出协同效应。化肥 + 有机肥和化肥处理土壤全氮含量相差  $0.50 \text{ g kg}^{-1}$ , 差异显著 ( $p < 0.05$ )。化肥 + 有机肥处理土壤全氮含量较无肥处理和化肥处理分别高出 28.71% 和 20.59%, 较草地高出 12.19%, 说明有机-无机肥配施不但可增加土壤碳库储量, 也可显著提高氮素供应能力。

土壤有机质 (SOM) 是具有农艺和环境功能的生态因子, 土壤管理措施不仅改变土壤有机质含量, 而且使土壤有机质参数发生变化, 高量无机氮肥的施用降低稳态 (Steady state) 碳值, 使土壤碳库处于动态变化过程中<sup>[13]</sup>。土壤有机碳和氮是土壤质量的重要指示因子, 农田长期施肥对土壤有效碳库有很大影响, 增加氮肥施用量可提高植物生物量, 但同时会使土壤呼吸增强<sup>[14]</sup>; 土壤有机碳储量与土壤有机碳输入量呈线性变化<sup>[15]</sup>, 有机肥或有机-无机肥配施使土壤有机碳含量明显提高<sup>[16]</sup>。

### 2.2 不同土地利用下土壤轻组有机碳、氮含量变化

土壤轻组 (Free-LF 和 Occluded-LF) 有机碳、氮含量占总量的比例多小于 10% (表 2)。裸地轻组有机碳 (LFOC) 和氮 (N) 含量最低, 其游离态轻组有机碳和氮含量较草地分别降低 60.0% 和 48.96%, 闭蓄态轻组有机碳和氮含量较草地分别降低 27.16% 和 28.43%; 无肥处理游离态轻组有机碳和氮含量较草地分别降低 21.66% 和 16.74%; 而闭蓄态轻组有机

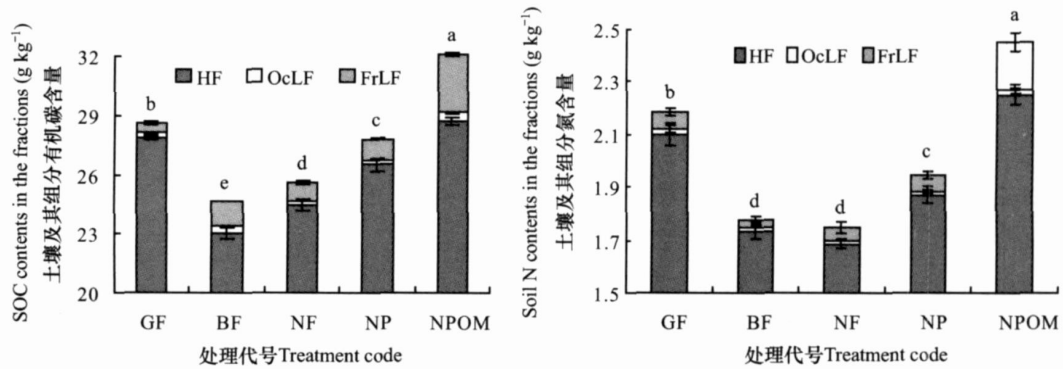


图2 土壤及其密度组分有机碳、氮含量(柱上不同字母表示碳、氮总量在  $p < 0.05$  水平差异显著, HF、OcLF和 FrLF 分别表示重组、闭蓄态和游离态轻组, 误差线为标准误)

Fig. 2 SOC and TN concentrations in the whole soil and different density fractions (Different letters on top of the bar mean significant difference at  $p < 0.05$  for TOC and TN. HF, OcLF and FrLF stand for heavy fraction, occluded and free light fraction, respectively. Error bars are standard error,  $n = 4$ )

碳和氮含量较草地分别降低 33.08 % 和 42.10 %。

农田施用有机肥后,轻组有机碳和氮含量显著增加,占土壤总有机碳和土壤全氮的比例分别为 10.48 % 和 8.43 % (表 2),其游离态轻组有机碳和氮含量分别为草地的 1.40 倍和 1.87 倍,较化肥处理分别高出 63.86 % 和 65.00 %;闭蓄态轻组有机碳和氮含量分别较草地高出 21.19 % 和 12.28 %。化肥处理游离

态轻组有机碳和氮含量较无肥处理高出 10.71 % 和 17.24 %。农田无肥处理和化肥处理因作物地上部被移走,只有部分枯枝落叶、根茬及根系分泌物等少量生物量归还土壤,轻组有机碳和氮含量相对减少,不能补偿被作物吸收和微生物分解的那部分养分,导致土壤总有机碳和土壤全氮逐年降低。因此,只有改变土地利用管理方式,才能提高土壤碳库储量。

表 2 土壤有机碳和氮在密度组分中的分布<sup>1)</sup> (以 % 表示)

Table 2 Distribution of OC and N among different density fractions (as % of the total OC or N)

处理代号 Treatment code	游离态轻组 Free-LF (%)		闭蓄态轻组 Occluded-LF (%)		重组 HF (%)	
	OC	N	OC	N	OC	N
	GF	4.18 ± 0.06	2.87 ± 0.06	1.14 ± 0.02	1.08 ± 0.02	94.68 ± 2.11
BF	2.09 ± 0.02	1.80 ± 0.03	1.03 ± 0.01	0.95 ± 0.00	96.88 ± 1.62	97.24 ± 1.39
NF	3.76 ± 0.09	2.99 ± 0.20	0.88 ± 0.01	0.78 ± 0.02	95.36 ± 0.70	96.24 ± 6.56
NP	3.84 ± 0.02	3.24 ± 0.10	0.78 ± 0.01	0.68 ± 0.00	95.38 ± 1.63	96.08 ± 3.01
NPOM	9.21 ± 0.20	7.35 ± 0.31	1.27 ± 0.01	1.08 ± 0.03	89.52 ± 1.51	91.59 ± 3.90

1) 数据为平均数 ± 标准偏差 Data are averages ± standard deviation

土壤轻组有机碳和氮含量与土壤总有机碳和土壤全氮呈正相关关系,其含量会随着总量的增加而递增(图 3)。游离态轻组有机碳和氮含量与土壤总有机碳、土壤全氮呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ) (图 3a, 图 3d)。闭蓄态轻组有机碳含量与土壤总有机碳的相关不显著,而闭蓄态轻组氮含量则与土壤全氮显著相关 ( $p < 0.05$ ) (图 3b, 图 3e)。轻组有机碳含量与氮含量相关极显著 ( $p < 0.01$ ) (图 3g, 图 3h)。有关研究结果显示,森林生态系统因有大量凋落物 (Litter fall) 进入土壤表层 (0 ~ 10 cm),游离态轻组有机碳和氮含量占全土的 20 % ~ 80 %,与碳、氮总量呈显著或极显著相关。表层土壤闭蓄态轻组有机碳

虽与土壤总有机碳的相关性达显著或极显著水平,但是沿着土壤剖面下移,相关性不显著,经分析认为,闭蓄态轻组是物理性保护组分,存在于土壤团聚体之间,分布具有随机性<sup>[17-19]</sup>。

### 2.3 不同土地利用下土壤重组有机碳、氮含量变化

土壤重组有机质 (HFOM) 腐殖化程度较高,在土壤有机质中占主导地位,5 个处理重组有机碳 (HFOC) 在土壤总有机碳中的比例为 89.52 % ~ 96.88 %,重组氮 (HFN) 所占比例为 91.59 % ~ 97.24 % (表 2)。方差分析结果表明,裸地与无肥处理之间,草地与化肥 + 有机肥处理之间有机碳含量没有显著差异。裸地与草地相比,有机碳含量降低

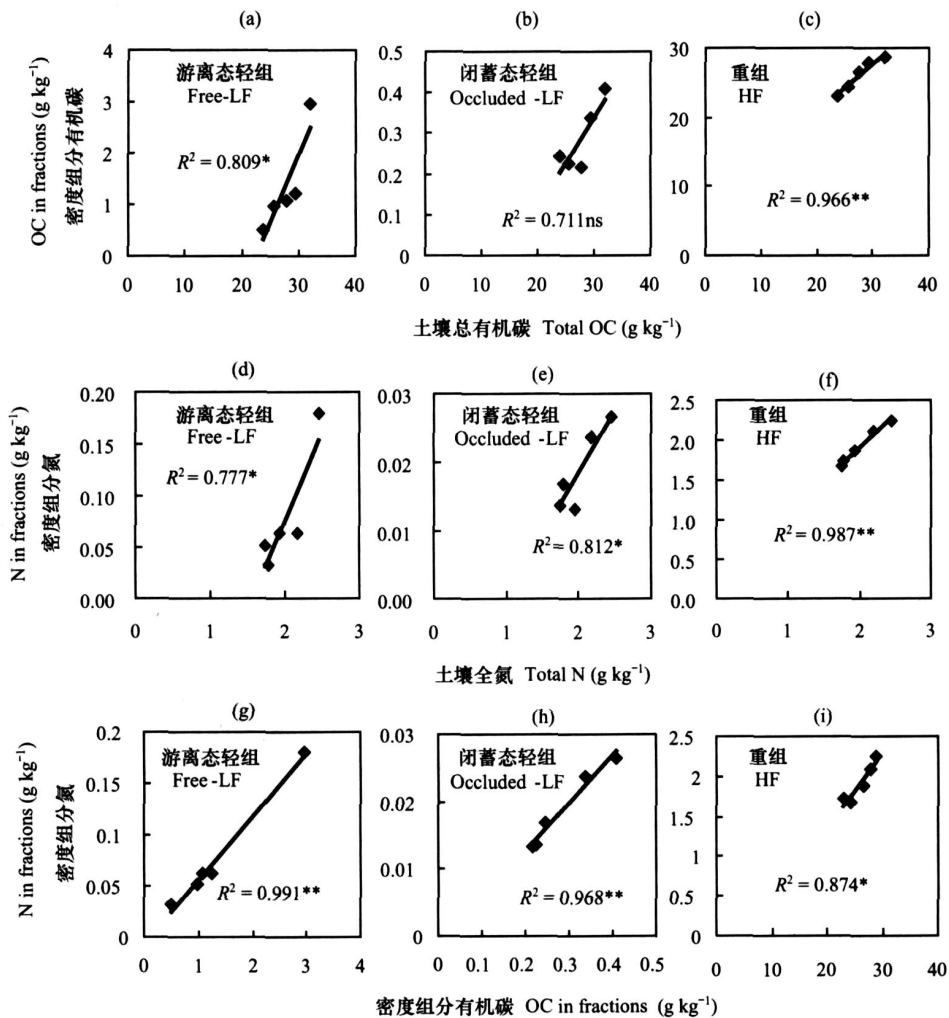


图3 土壤有机碳和氮在密度组分中的分配变化

Fig. 3 Variation of OC and N distribution in various fractions (both in  $\text{g kg}^{-1}$  of whole soil) (Linear correlation is given ns not significant; \*, significant at  $p < 0.05$ ; \*\*, significant at  $p < 0.01$ )

17.23%, 表明没有植被覆盖, 重组有机碳失去保护而分解; 相应地, 氮含量降低了 17.58%。无肥处理与草地相比, 有机碳含量降低 12.35%, 而氮含量降低了 19.88%。与化肥处理相比, 无肥处理有机碳、氮含量分别降低了 7.09% 和 10.08%; 而化肥 + 有机肥处理有机碳、氮含量则分别增加了 7.55% 和 20.06%。有研究表明, 长期单独施用常量 NPK 化肥, 只依靠根茬还田不足以补充有机碳的消耗, 使土壤有机碳 (SOC) 和重组有机碳含量均有缓慢下降的趋势<sup>[20]</sup>; 而有机-无机肥配施则显著增加土壤碳、氮库储量, 能够促使农田土壤有机质 (SOM) 水平达到平衡态 (Equilibrium state)<sup>[21]</sup>, 对土壤氮素积累更为有效。

重组有机碳、氮与土壤总有机碳、全氮呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 重组有机碳与氮含量之间相关

显著 ( $p < 0.05$ ) (图 3c, 图 3f, 图 3i), 重组有机碳含量决定土壤碳库的稳定性和土壤质量, 对不同土地利用方式下重组有机碳的变化有待于进一步研究。

#### 2.4 土壤及其各密度组分的 C/N 比值

植物残体特性和微生物活性是影响 C/N 比值的重要因素。从图 4 可以看出, 土壤 C/N 比值按照密度分组顺序而降低, 即游离态轻组 > 闭蓄态轻组 > 原土 > 重组, 表明降解和腐殖化程度逐渐升高。游离态轻组的 C/N 比高于其他密度组分及原土, 除化肥和化肥 + 有机肥处理差异不显著外, 各处理间差异达显著水平 ( $p < 0.05$ ), 相关研究结果表明, 游离态轻组易受微生物攻击而分解, 有机质逐渐腐殖化<sup>[3]</sup>。重组的 C/N 比值在 5 个试验处理中最低, 方差分析结果表明, 处理间差异显著 ( $p < 0.05$ ), 但其中裸地、草地和化肥 + 有机肥 3 个处理之间没有

显著差异,无肥处理和化肥处理没有显著差异,C/N比并不受到作物覆盖和施肥的显著影响<sup>[22]</sup>。分析认为,无肥处理和化肥处理作物同化大气CO<sub>2</sub>的同时吸收大量土壤营养元素,随着地上部生物量被移出系

统,土壤氮素也被同时带走,从而导致土壤C/N比增大。自然土壤受到人为扰动(如耕作)后,加速有机质分解和矿化,氮素遭淋洗而损失,C/N比值会增大<sup>[23]</sup>,但是有机培肥则会使C/N比值下降(图4)。

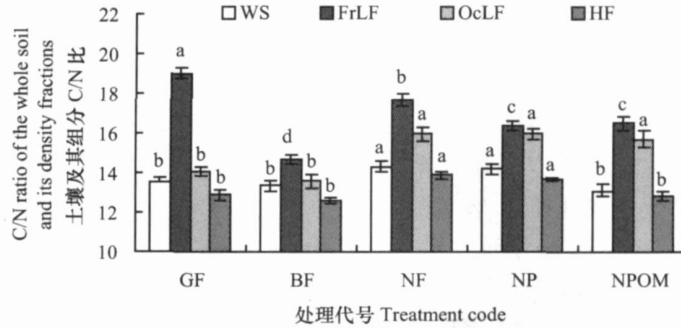


图4 土壤C/N比值(柱上不同字母表示碳、氮总量在 $p < 0.05$ 水平差异显著,WS、HF、OcLF和FrLF分别表示原土、重组、闭蓄态和游离态轻组,误差线为标准误)

Fig. 4 C/N ratio of the whole soil and its fractions (Different letters on top of the bar mean significant difference at  $p < 0.05$  for TOC and TN. WS, HF, OcLF and FrLF stand for whole soil, heavy fraction, occluded and free light fraction, respectively. Error bars are standard error,  $n = 4$ )

表3 结合态腐殖质有机碳的变化<sup>1)</sup>

Table 3 Variation of OC contents of combined humus in heavy fraction of soils different in land use ( $\text{g kg}^{-1}$  of whole soil)

处理代号 Treatment code	松结态腐殖质有机碳含量 OC content in the loosely combined humus			稳结态腐殖质有机碳含量 OC content in the stably combined humus			紧结态腐殖质有机碳含量 OC content in the tightly combined humus		
	HA + FA	HA	FA	HA/ FA	HA + FA	HA	FA	HA/ FA	Hu
	GF	8.03 (28.0)	6.24 ± 0.19 (21.8)	1.79 ± 0.14 (6.3)	3.47	3.95 (13.8)	2.10 ± 0.85 (7.3)	1.85 ± 0.77 (6.5)	0.65
BF	6.47 (26.9)	4.05 ± 0.47 (16.9)	2.42 ± 0.52 (10.1)	1.68	4.53 (18.9)	1.79 ± 0.75 (7.4)	2.74 ± 0.97 (11.4)	1.13	16.43 ± 0.03 (57.3)
NF	7.07 (29.0)	4.78 ± 0.11 (19.6)	2.29 ± 0.05 (9.4)	2.09	3.10 (12.8)	1.77 ± 0.78 (7.3)	1.33 ± 0.65 (5.5)	1.32	14.16 ± 0.15 (58.2)
NP	8.62 (32.4)	5.85 ± 0.58 (22.0)	2.76 ± 0.32 (10.4)	2.11	5.36 (20.1)	1.77 ± 0.75 (6.6)	3.59 ± 1.11 (13.5)	0.49	12.27 ± 0.09 (46.1)
NPOM	8.36 (28.9)	6.38 ± 0.26 (22.1)	1.98 ± 0.30 (6.9)	3.22	4.03 (13.9)	1.74 ± 0.81 (6.0)	2.29 ± 0.83 (7.9)	0.76	16.54 ± 0.14 (57.2)

1) 数据为平均数 ± 标准偏差。括号内数据表示结合态腐殖质有机碳在重组有机碳中的相对含量(%) Data are averages ± standard deviation. Values in the parenthesis means % of the OC in the heavy fraction. HA: 胡敏酸 Humic acid; FA: 富里酸 Fulvic acid; Hu: 胡敏素 Humic

裸地闭蓄态轻组C/N比最低,表明裸地缺乏连续供氮能力;草地经过20年的自然恢复,C/N比会逐渐达到平衡;对化肥+有机肥处理而言,虽然作物地上部被收获,但是投入大量有机肥,为微生物活动提供了能源,C/N比会先升后降。

重组有机质主要由腐殖质组成,物理性保护程度高,与黏土矿物结合紧密,不易受到微生物的分解作用,C/N比值相对稳定,而且与原土C/N比显著相关( $R^2 = 0.834^*$ ,  $n = 5$ )。

## 2.5 重组结合态腐殖质有机碳含量变化

土壤有机-无机复合体是土壤肥力的重要物质

基础。5个处理重组结合态腐殖质有机碳含量占土壤总有机碳的比例为89.52%~96.88%(表2)。松结态胡敏酸(HA)与土壤总有机碳显著相关( $R^2 = 0.897^*$ ,  $n = 5$ )。表3显示,松结态腐殖质有机碳在重组中所占比例平均为29.04%,变异程度很小;稳结态腐殖质有机碳含量所占比例变化范围为12.8%~18.9%,变异程度相对较大。紧结态腐殖质主要是胡敏素(Humin),是土壤中相对最稳定的有机质组分,变化范围为46.1%~58.2%,有机碳含量大小依次为:化肥+有机肥处理>草地>无肥处理>化肥处理>裸地,与土壤总有机碳相关不显著

(未示出)。松结态腐殖质 HA/FA 比值变化趋势大体是随着土壤总有机碳含量的增加而增加,而稳结态 HA/FA 比值变化较大,未发现规律性。

土壤腐殖质是土壤有机质在土壤中形成的一类特殊的高分子化合物,土壤腐殖质的分解和积累在很大程度上影响着土壤肥力<sup>[24]</sup>。结合态腐殖质在土壤中比较稳定,其形成过程从几十年到几百年。但是土地利用及管理方式对结合态腐殖质仍具有较大的影响,草地和化肥+有机肥处理结合态腐殖质有机碳含量和 HA/FA 比值高于其他处理,表明施用有机肥或植被自然恢复不仅改善土壤物理性质,而且使 HA 在结构上脂肪族侧链增加,芳化度减小,在起源上更“年轻”<sup>[25]</sup>,HA/FA 比值会随着土壤肥力的提高而增大<sup>[26]</sup>。

### 3 结论

土壤有机质含量的动态变化是由系统输入和输出量的相对大小决定,当系统的输入量大于输出量时,土壤有机质得到积累,土壤有机碳含量将不断提高<sup>[27]</sup>。不同土地利用方式下黑土及其轻组、重组有机碳、氮含量存在显著差异,密度组有机碳、氮含量与土壤碳、氮总量存在正相关关系。草地经过 20 年的自然恢复,土壤有机碳的损失明显低于耕地,而且缺少物理干扰(Physical disturbance)也会使土壤呼吸相对减弱,有机质持续积累;草地植被破坏后变成裸地,造成土地退化,土壤总有机碳、氮含量明显降低,输入土壤的轻组碳、氮减少,结合态腐殖质含量因氧化分解而降低,碳平衡(Carbon budget)改变。

农田生态系统通过大气-作物-土壤界面能够不同程度地抵消大气中的 CO<sub>2</sub>,采取有机培肥或秸秆还田等农艺措施,可以显著提高土壤碳库储量,提高土壤肥力,改善土壤质量,保持黑土农田的可持续利用。

### 参考文献

[1] 尹云锋,蔡祖聪,软绳武. 长期施肥条件下潮土不同组分有机质的动态研究. 应用生态学报, 2005, 16(5): 875 ~ 878. Yin Y F, Cai Z C, Qin S W. Dynamics of Fluvo-aquic soil organic matter fractions under long-term fertilization (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(5): 875 ~ 878

[2] 马红亮,朱建国,谢祖彬,等. 不同氮水平下 CO<sub>2</sub>浓度升高对小麦土壤可溶性 C、N 和 P 的影响. 土壤, 2005, 37(3): 285 ~ 289. Ma H L, Zhu J G, Xie Z B, et al. Effect of FACE (Free Air Carbon dioxide Enrichment) on available C, N and P under wheat treated with different N levels (In Chinese). Soils, 2005, 37(3):

285 ~ 289

[3] John B, Yamashita T, Ludwig B, et al. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. Geoderma, 2005, 128: 63 ~ 79

[4] 韩晓增,王守宇,宋春雨,等. 土地利用/覆盖变化对黑土生态环境的影响. 地理科学, 2005, 25(2): 203 ~ 207. Han X Z, Wang S Y, Song C Y, et al. Effects of land use and cover change on ecological environment in black soil region (In Chinese). Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(2): 203 ~ 207

[5] Xing B, Liu J D, Liu X B, et al. Extraction and characterization of humic acids and humin fractions from a black soil of China. Pedosphere, 2005, 15(1): 1 ~ 8

[6] Cookson W R, Abaye D A, Marschner P, et al. The contribution of soil organic matter fractions to carbon and nitrogen mineralization and microbial community size and structure. Soil Bio. Biochem., 2005, 37: 1 726 ~ 1 737

[7] Gölchin A, Oades J M, Skjemstad J O, et al. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state <sup>13</sup>C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. Australian Journal of Soil Research, 1994, 32: 285 ~ 309

[8] 倪进治,徐建民,谢正苗. 土壤轻组有机质. 环境污染治理技术与设备, 2000, 1(2): 58 ~ 64. Ni J Z, Xu J M, Xie Z M. Soil light fraction organic matter (In Chinese). Techniques and Equipments for Environmental Pollution Control, 2000, 1(2): 58 ~ 64

[9] Houghton R. The global effects of tropical deforestation. Environmental Science and Technology, 1990, 24: 414 ~ 422

[10] Teklay T, Nordgren A, Malmer A. Soil respiration characteristics of tropical soils from agricultural and forestry land-uses at Wondo Genet (Ethiopia) in response to C, N and P amendments. Soil Bio. Biochem., 2006, 38: 125 ~ 133

[11] Buytaert W, Deckers J, Wyseure G. Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). Geomorphology, 2006, 73: 207 ~ 221

[12] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. ed. Analytical Methods of Soil and Agrochemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000

[13] Diekow J, Mielniczuk J, Knicker H, et al. Soil organic matter properties after 40 years of different use of organic and mineral fertilizers. European Journal of Agronomy, 2004, 21: 357 ~ 367

[14] 杨兰芳,蔡祖聪. 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响. 土壤学报, 2005, 42(1): 9 ~ 15. Yang L F, Cai Z C. Soil respiration during maize growth period affected by N application rates (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(1): 9 ~ 15

[15] 孟磊,蔡祖聪,丁维新. 长期施肥对土壤碳库和作物固碳的影响. 土壤学报, 2005, 42(5): 769 ~ 776. Meng L, Cai Z C, Ding W X. Carbon contents in soils and crops as affected by long-term fertilization (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(5): 769 ~ 776

[16] Kanchikerimath M, Singh D. Soil organic matter and biological properties after 26 years of maize-wheat-cowpea cropping as affected by manure and fertilization in a Cambisol in semiarid region of India.

- Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001, 86: 155 ~ 162
- [17] Rovira P, Vallejo V R. Physical protection and biochemical quality of organic matter in mediterranean calcareous forest soils: A density fractionation approach. *Soil Bio. Biochem.*, 2003, 35:245 ~ 261
- [18] Wang G, Wang C Y, Wang W Y, *et al.* Capacity of soil to protect organic carbon and biochemical characteristics of density fractions in Ziwulin Haplic Greyxems soil. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(1): 27 ~ 32
- [19] Rosco R, Buurman P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerredo Oxisol. *Soil & Tillage Research*, 2003, 70: 107 ~ 119
- [20] 韩志卿, 张电学, 陈洪斌, 等. 长期施肥对褐土有机无机复合性态演变及其与肥力关系的影响. *土壤通报*, 2004, 35(6): 720 ~ 723. Han Z Q, Zhang D X, Chen H B, *et al.* The effect of long-term fertilization on the relationship between the development of organic-mineral in cinnamon soil and soil fertility (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(6): 720 ~ 723
- [21] Yin Y F, Cai Z C. Equilibrium of organic matter in heavy fraction for three long-term experimental field soils in China. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 177 ~ 184
- [22] Ding G W, Liu X B, Herbert S, *et al.* Effect of cover crop management on soil organic matter. *Geoderma*, 2006, 229 ~ 239
- [23] Jiang Y, Zhang Y G, Liang W J, *et al.* Profile distribution and storage of soil organic carbon in an Aquic Brown Soil as affected by land use. *Agriculture Science in China*, 2005, 4(3): 199 ~ 206
- [24] 史吉平, 张夫道, 林葆. 长期定位施肥对土壤腐殖质理化性质的影响. *中国农业科学*, 2003, 35(2): 174 ~ 180. Shi J P, Zhang F D, Lin B. Effects of long-term located fertilization on the physico-chemical property of soil humus (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 35(2): 174 ~ 180
- [25] Dou S, Chen E F, Xu X C, *et al.* Effect of organic manure application on physical properties and humus characteristics of paddy soil. *Pedosphere*, 1994, 4(2): 127 ~ 135
- [26] 刘淑霞, 刘景双, 赵兰坡, 等. 吉林省主要耕作土壤中结合态腐殖质组成特征的研究. *吉林农业大学学报*, 2002, 24(1): 72 ~ 76. Liu S X, Liu J S, Zhao L P, *et al.* A study on the composition characters of combined humus in cultivated soils of Jilin Province (In Chinese). *Journal of Jilin Agricultural University*, 2002, 24(1): 72 ~ 76
- [27] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云, 等. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析. *土壤学报*, 2003, 40(3): 344 ~ 352. Li Z P, Zhang T L, Chen B Y, *et al.* Soil organic matter dynamics in a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 344 ~ 352

## DISTRIBUTION OF SOIL ORGANIC CARBON AND NITROGEN IN DENSITY FRACTIONS ON BLACK SOIL AS AFFECTED BY LAND USE

Li Haibo<sup>1,2</sup> Han Xiaozeng<sup>1†</sup> Wang Feng<sup>1,2</sup> Qiao Yunfa<sup>1</sup>

(1 National Field Research Station of Agroecosystem in Hailun, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China)

(2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** Vegetation coverage in terrestrial ecosystem affects distribution of organic matter in soils and soil density fractions, thus is an important factor controlling storage of soil organic matter. An experiment was conducted to determine soil organic carbon and nitrogen concentration, by using density fractionation, of soil samples collected from the fields of three long-term experiments and evaluate the impact of land use on soil and density fractions. Results show that (i) soils different in land use differed significantly ( $p < 0.05$ ) in total organic carbon (TOC) or total nitrogen (TN), and TOC had a significant positive correlation with TN ( $p < 0.01$ ). Natural ecosystems, subjected to human disturbance or transferred into cropland, suffered chronic TOC and TN losses, however, application of chemical fertilizer plus organic manure increased significantly TOC and TN contents in cropland. Organic carbon storage of black soil under grassland has been increasing in the past 20 years of vegetation rehabilitation; (ii) OC or N contents in free-LF (free light fraction) and HF (heavy fraction) were significantly related to TOC or TN in the whole soil at  $p < 0.05$  or  $p < 0.01$ , respectively, indicating that accumulation of free-LF and HF is very important to net increase in TOC or TN. Occluded-LF, randomly distributed in soils, was less important to accumulation of TOC or TN; (iii) C/N ratio of free-LF was higher than that of the whole soil and other fractions, which suggested that free-LF is a major part of the labile carbon pool on account of its susceptibility to microbial decomposition; (iv) OC contents of humic acid of loosely combined humus significantly correlated with TOC, indicating that increase in humic acid leads to improvement of soil fertility. Application of organic manure to cropland not only led to accumulation of organic matter and improved soil quality, but also increased the capacity of agroecosystem to sequester atmospheric CO<sub>2</sub>.

**Key words** Land use; Soil organic carbon; Density fractions; Combined humus; Black soil