

不同土地利用方式及栽培措施对土壤有机碳及 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

孟凡乔, 匡星, 杜章留, 吴文良, 郭岩彬

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:以河北曲周县原状草地土壤和农田土壤为研究对象, 结合稳定性碳同位素方法, 分析不同秸秆还田方式、耕作方式和施肥水平对土壤有机碳特性的影响。研究表明, 华北原状草地改变为农田后 (34 a), 土壤有机碳显著降低, 且因农田栽培方式不同而异, 1 m 土层降低幅度在 13.3% ~ 35% 之间, 但降低显著发生在 0 ~ 40 cm。经过 8 a 施加底肥, 可以提高土壤有机碳 0.83 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。免耕方式可以显著提高土壤有机碳, 且主要发生在 0 ~ 10 cm 土层。翻耕操作会引起 10 ~ 15 cm 和 15 ~ 20 cm 土层的土壤有机碳高于免耕处理的现象。土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的比变化主要发生在 0 ~ 20 cm 土层, 玉米种植输入的有机碳主要集中在土壤 0 ~ 20 cm 层次。在土壤 0 ~ 5 cm 表层, 源于农作物的土壤有机碳所占的最高比例为 18%, 到 15 ~ 20 cm 已经降到了 5% 左右。

关键词:原状草地; 免耕; 秸秆还田; ^{13}C ; 层化; 土壤有机碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)08-1733-07

Impact of Land Use Change and Cultivation Measures on Soil Organic Carbon (SOC) and Its ^{13}C Values

MENG Fan-qiao, KUANG Xing, DU Zhang-liu, WU Wen-liang, GUO Yan-bin

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: In Quzhou County, Hebei Province where now intensive farming system is operated, original grassland and farming land under different tillage, crop straw return and fertilization measures were studied using isotope carbon for the analysis of the impact on soil organic carbon (SOC) properties. The research indicated that after change into farmland (34 years), SOC is significantly reduced and for 1m of soil layer, the scope of reduction is from 13.3% -35% and this decrease happens in 0-40 cm of soil layer. After 8 years of fertilization, SOC can be increased at 0.83 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. No-tillage can significantly increase the SOC especially in 0-10 cm but plough will increase the SOC at 10-15 cm and 15-20 cm. Change of $\delta^{13}\text{C}$ of SOC due to land use change mainly happens in 0-20 cm, where input of organic materials from maize stored. In soil layer of 0-5 cm, only maximum 18% of SOC is from crop residues and in 15-20 cm, this percentage is about 5%.

Key words: original grassland; no-tillage; crop straw return; ^{13}C ; stratification; soil organic carbon (SOC)

占全国近 20% 耕地面积的华北高产平原是我国重要的粮食产区。自 20 世纪 80 年代以来, 随着农业生产条件的改善和技术水平的提高, 河北、山东、河南等省土地粮食产量基本都实现了吨粮田 (15 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。华北平原土壤有机碳库只占全国的 11%, 与美国等相似类型地区相比土壤有机碳水平是较低的^[1-4]。诸多研究表明, 在中国特别是华北农业区实行土壤碳优化管理具有可行性和实践价值^[2,5]。李长生等^[2]研究发现, 由于对农作物残留物管理措施不同, 美国每年土壤以 CO_2 形式释放入大气中的碳为 812 Tg, 但从农作物残留物 (根和秸秆) 获得 884 Tg 的碳; 中国土壤释放 366 Tg 的碳于大气中, 仅从农作物残留物收回 293 Tg 的碳。Lal^[4]认为中国农田土壤每年截存碳的潜力大约为 25 ~ 37 Tg, 约占农田、林地和草地土壤截存总量的 30% ~ 46%。因此,

有充分理由认为农业优化措施对于长期的碳汇是有非常重要的贡献; 然而, 也有研究认为这种通过农业措施来增加碳汇的代价和有效性提出质疑: 一是这种措施本身需要化石燃料 (用于肥料、灌溉等), 相当于把增加的碳汇又“重新”释放; 另一方面, 由于新输入有机碳的不稳定性, 增加的土壤有机碳很可能在短时间之内重新被释放, 因此研究农业措施与土壤有机碳之间的关系显得尤为重要。

自然植被覆盖下或草原土壤的开垦会导致土壤有机质含量的降低。人们已经在土地利用、耕作措施, 包括施肥、免耕、秸秆还田等对土壤有机碳的

收稿日期: 2009-10-28; 修订日期: 2009-12-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (30300056); 国家自然科学基金面上项目 (30870414)

作者简介: 孟凡乔 (1969 ~), 男, 副教授, 主要研究方向为土壤有机碳和有机农业, E-mail: mengfq@cau.edu.cn

影响方面做了大量研究^[6],但对于长时间跨度的研究尚不多见.此外,稳定碳同位素是示踪有机碳变化过程的有效手段之一,文献[7~9]表明,在法国西南部 Auzeville 和 Doazit 两地在长期观测积累的数据基础上开展工作后,开始大量应用 $\delta^{13}\text{C}$ 值来研究土壤有机质的特性.近 10 年来,这方面的研究快速发展,大大加深了对生态转换系统中特别不同土地利用方式转换过程中土壤有机质变化过程的认识^[10~13].本试验通过对不同土地利用方式变化及不同栽培措施对土壤有机碳测定,并应用稳定性碳同位素方法,研究华北高产平原地区的土地利用方式,特别是投入类型、投入水平和改变植被类型等因素在长时间跨度条件下对土壤有机碳的影响.

1 材料与方 法

1.1 试验地点概况

试验地点位于河北省曲周县,东经 $114^{\circ}50'30''$ ~ $115^{\circ}13'30''$,北纬 $36^{\circ}34'45''$ ~ $36^{\circ}57'57''$ 之间.海拔 40 m,属华北地区暖温带半湿润大陆性季风气候区,年均气温 13.1°C ,无霜期年平均 201 d.年平均降雨量为 556.2 mm,年蒸发量 1 841 mm.1973 年以前盐碱土壤养分含量一般都偏低,有机质含量较低,为 $2\sim 8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.24\sim 0.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,极度缺磷,有效磷含量多在 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,钾素较为丰富,土壤物理性状很差,不适宜作物生长.自 1973 年开始,先后在这里建立了一代、二代和三代综合治理试验区.经过治理后,农业生产基本条件大大改善,抗旱防涝能力、土壤肥力均有提高,盐渍化程度明显减轻,高产农田面积大幅度增加,作物产量迅速提高.土壤有机质含量提高到 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,全氮 $0.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷达到 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.本试验用地 1985 年时的土壤养分状况为:pH 7.8,有机质 $7.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.37\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $50.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷含量 $1.37\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $9.94\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $92.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1.2 试验处理

研究试验地处理主要包括原状草地和原状草地改变为农田后不同栽培措施的农田处理.原状草地位于中国农业大学曲周实验站内,并于 1973 年建站以来一直保留,不经任何农业生产和土地耕作,植被自然生长,其上生长的植被是主要以 C3 植物为主的草原化草甸植物,以杂草群落为主.常以狗尾草 (*Setaria viridis*)、白茅 (*Imperata cylindrica*)、榛子 (*Corylus heterophylla*)、大针茅 (*Stipa grandis*) 等群

落为主.原状草地和农田处理之间有 5 m 距离.农田处理:种植方式为冬小麦夏玉米轮作,按不同的栽培措施分为整翻、粉碎、清茬、整翻无肥、直立免耕、粉碎免耕 6 个处理,其中各个处理从 1999 年 10 月开始(只针对玉米),小麦为统一农事操作,成熟后用联合收割机直接收走,秸秆不还田,只有根茬还田.不同栽培措施的农田处理见表 1.

表 1 农田的试验处理
Table 1 Farming treatments

处理	农事操作
整翻	玉米秸秆整株还田,还田数量为 $7\ 290\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,翻耕土壤深度为 20 cm
粉碎	玉米秸秆粉碎还田,还田数量为 $7\ 290\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,采用普通机械将秸秆粉碎,长度为 5 cm 左右,翻耕土壤深度为 20 cm
直立免耕	玉米秸秆整株还田,还田数量为 $7\ 290\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,免耕
粉碎免耕	玉米秸秆粉碎还田,还田数量为 $7\ 290\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,采用普通机械将秸秆粉碎,长度为 5 cm 左右,免耕
整翻无肥	玉米秸秆整株还田,还田数量为 $7\ 290\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,翻耕土壤深度为 20 cm,不施底肥
清茬	玉米秸秆不还田,翻耕土壤深度为 20 cm

1.3 样品采集与分析

2007 年玉米收获后,对原状草地及 6 个农田处理(整翻、粉碎、清茬、整翻无肥、直立免耕、粉碎免耕)按“S”型进行土壤样品的采集,每个处理按 0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 共 8 个层次取 6 个点,并按不同层次混合.将采集的土壤样品剔除掉其中的岩屑及 $>2\text{ mm}$ 的植物碎片和根系,风干后过 2 mm 筛,再用 1:3 盐酸去除土壤无机碳.

土壤有机碳总量:采用 Elementar vario MACRO CNS 元素分析仪测定.土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值在中国农业大学资源与环境学院实验室,采用 DELTA-Plus- xp 型质谱仪测定,测定误差 $\leq 0.1\%$.碳同位素组成的表达式为:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB}) = \left(\frac{R_{\text{sa}}}{R_{\text{st}}} - 1 \right) \times 1\ 000\text{‰} \quad (1)$$

式中 $R = (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})$, R_{sa} 为样品的碳同位素丰度, R_{st} 为标准样品的碳同位素丰度.

试验数据的处理采用 SAS V6.12 软件.

2 结果与分析

2.1 土地利用方式改变和不同栽培和秸秆还田措施对土壤有机碳数量的影响

从图 1 中可以看出,原状草地的土壤比转变为农田种植模式后的土壤有机碳水平都要高.在整个

0~100 cm 土层中,分别比直立免耕、清茬、整翻、无肥、粉碎、粉碎免耕 6 个处理高 24.8%、17.3%、17.3%、35.0%、25.7%、13.3%。其中 0~5 cm 最为明显,有机碳绝对量差异可达 2.93~4.88 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。方差分析表明,1m 土层原状草地的土壤与 6 类处理农田土壤的有机碳都存在显著性差异 ($\alpha = 0.05$),说明草地转变为农田以后,土壤中有机碳含量显著降低,通过秸秆还田等栽培措施可以使其得到一定程度的恢复,但也很难达到未开垦时草地的水平。1973 年开始实验前的土壤(盐碱土,0~20 cm)有机碳水平在 1.12~4.64 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,1985 年盐碱土经过改良后土壤(0~20 cm)有机碳水平为 5.8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,而本实验 2007 年采集的保留原植被生长状态的土壤(0~20 cm)有机碳水平为 12.40 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机碳水平的差异一方面是由于土样不是同一地点,另一方面也说明改良后盐碱土经过 22 a 的自然演变后,土壤有机碳水平显著增长。由于未完整保留 0~100 cm 的原盐碱土剖面,没有能够对不同层次的有机碳变化趋势进行分析。

从施肥对土壤有机碳的影响分析,整翻处理和整翻无肥处理的差异只是是否施加底肥,对这 2 个处理相比较就可以看出施加底肥对土壤有机碳含量的影响。从图 1 可以看出在整个 1 m 土层,整翻处理和整翻无肥处理之间土壤有机碳总量有显著差异 ($\alpha = 0.05$),前者比后者高 0.83 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明长期施加底肥(8 a)可以显著提高土壤有机碳。

从翻耕和免耕的影响来看,整翻处理和直立免耕处理都将秸秆整株还田,前者将秸秆整株翻入土壤(大约 20 cm),而后的秸秆整株立于农田。粉碎处理和粉碎免耕处理的差异是前者将秸秆粉碎翻入土壤,后者将秸秆粉碎但不进行农田耕作。这两对处理进行比较可以看出翻耕和免耕对于土壤有机碳数量的影响。图 1 的数据表明在 1 m 土层,无论是整翻处理和直立免耕处理还是粉碎处理和粉碎免耕处理,两对处理之间土壤有机碳的含量差异都达到显著水平 ($\alpha = 0.05$),说明免耕同样可以显著提高土壤有机碳水平。

秸秆还田方式也会影响土壤有机碳的含量。整翻处理和粉碎处理都进行翻耕操作,其差异在于前者为整株还田,后者将秸秆粉碎还田。直立免耕处理和粉碎免耕处理的差异仅在于秸秆直立或粉碎还田。图 1 表明,在 1 m 土层,整翻处理的土壤有机碳显著高于粉碎处理,且两者之间有显著性差异 ($\alpha = 0.05$),而直立免耕处理的土壤有机碳却低于粉碎

免耕处理,两者之间也存在显著性差异 ($\alpha = 0.05$)。说明在对土壤扰动程度大的情况下,整株还田比粉碎还田有利于土壤有机碳增加,而在对土壤扰动程度小的情况下,秸秆粉碎比整株秸秆有利于土壤有机碳增加。但值得关注的是,在整个 1 m 土层,整翻处理的土壤有机碳和玉米秸秆不还田的清茬处理处于同一水平,没有显著性差异,且清茬处理比直立免耕、整翻无肥和粉碎等 3 个秸秆还田的处理都要高,这个现象需要进一步研究和分析。

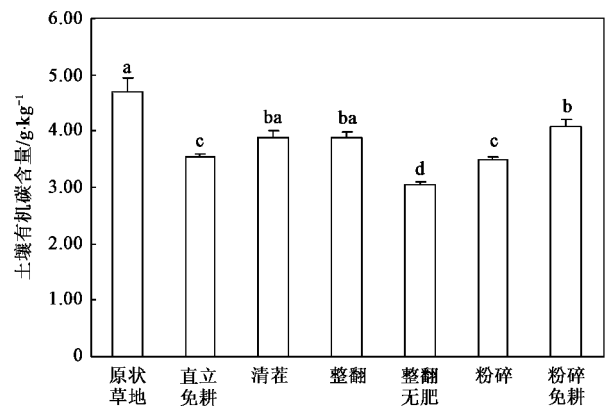


图 1 1 m 土层原状草地和不同栽培和秸秆还田模式农田土壤有机碳对比

Fig. 1 Comparison of soil organic carbon in original grassland and different plough and crop straw return systems in 1 m of soil layer

2.2 土地利用方式改变和不同栽培和秸秆还田措施对土壤有机碳层化特性的影响

从表 2 可以看出原状土及各个处理土壤有机碳含量随土层深度增加而降低,但原状草地土壤有机碳随土层加深而递减的幅度较大,而农田土壤有机碳含量随土层加深而变化幅度较小。

土壤有机碳含量在土壤剖面表现明显层次性。从表 2 可以看出虽然不同土地利用方式及栽培措施下不同深度的土壤有机碳变化是不同的,但在 20 cm 和 40 cm 处其有机碳变化是一致的,20 cm 和 40 cm 把土壤剖面分成 3 个部分。在所有的土壤剖面中这 3 部分之间土壤有机碳的差异都是显著的。由于草本植物及小麦、玉米根系分布浅,因此可以把 0~20 cm 看作一个土层为表土层,20~40 cm 看作一个土层为主根层,40 cm 以下为次根层,正是因为小麦和玉米的根系分布造成了这种土壤有机碳的层化现象。

从表 2 还可以看出,在 0~60 cm 土层,除了 10~20 cm 的整翻处理及 20~40 cm 粉碎免耕处理以

外,原状草地的土壤有机碳都高于其它处理的土壤,且差异性都达到显著性水平($\alpha = 0.05$),而在60~100 cm土层,原状草地及其他处理的土壤有机碳没有显著性差异。

在0~10 cm土层,施加底肥对土壤有机碳的影响是不显著的,而在10~80 cm的5个土层,施加底肥对土壤有机碳有显著性影响。虽然免耕有助于提高土壤有机碳含量,但并不是每个土层免耕操作的土壤有机碳含量都高于翻耕操作,从表2可以看出,10~15 cm和15~20 cm的2个土层,无论哪种秸秆还田方式,翻耕操作的土壤有机碳含量都要高于免耕操作,并且这种差异是显著的。

表2 原状土及不同处理不同层次有机碳含量差异比较¹⁾ /g·kg⁻¹

Table 2 Comparison of soil organic carbon in different soil layers in original grassland and different plough and crop straw return systems/g·kg⁻¹

类型	0~5 cm	5~10 cm	10~15 cm	15~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
原土	12.41 a	9.05a	8.94a	8.93a	5.73b	3.95a	2.50a	1.53b
直立免耕	9.46 b	8.49b	7.26c	6.11c	4.57c	2.57b	1.48bc	1.25b
粉碎免耕	8.82 c	8.39bc	7.18c	6.78bc	6.99a	2.44b	1.97ab	1.21b
整翻	8.15 d	8.25bc	8.57ab	8.74a	5.28b	2.23b	2.10a	1.42b
整翻无肥	7.77 de	7.95cd	7.42c	6.89bc	4.20c	1.55c	0.92c	1.13b
清茬	7.55e	7.69d	7.62c	7.50b	5.42b	2.13bc	2.29a	2.03a
粉碎	7.52e	7.47d	8.42b	7.27b	4.68c	2.13bc	1.50b	1.49b

1) 采用 Duncan's 多重比较法对同一列数据进行比较,不同小写字母表示在 $p < 0.05$ 水平差异显著;表中数值为均值

2.3 原状草地及不同栽培和秸秆还田措施下土壤有机碳的 $\delta^{13}C$ 值

表3的数据表明,原状草地土壤表层有机碳的 $\delta^{13}C$ 值为 -23% 左右,说明其原始植被主要以 C3 植物为主,从原状土整个剖面土壤有机碳 $\delta^{13}C$ 值的变化来看,从上往下是先增大后减小,在20~40 cm 达到最大的 -19.82% 。

在0~20 cm的表土,从原状草地改变为小麦、玉米种植模式后,土壤有机碳的 $\delta^{13}C$ 值都较原状草地增加,并且随着土壤深度的增加而减小或者与0

从秸秆还田的影响分析,在1m土层,秸秆是否还田对土壤有机碳含量的影响不显著,但从不同土壤层次上来看,在0~20 cm的4个土层,秸秆还田都使得土壤有机碳含量有了显著的增加。翻耕处理中秸秆整株还田土壤有机碳的含量在土壤各个层次中基本都要高于秸秆粉碎还田,并且在0~5 cm、5~10 cm、15~20 cm、20~40 cm和60~80 cm这5个层次达到显著性差异;免耕处理中土壤有机碳含量的差异主要存在于0~40 cm土层,在0~15 cm土层秸秆整株还田土壤有机碳的含量高于秸秆粉碎还田,而在15~40 cm土层则秸秆粉碎还田的土壤有机碳含量较高。

~5 cm层次相同水平,但在20~40 cm却都突变到最大值,之后基本与原状草地上的土壤变化相同,到达底层后,土壤有机碳的 $\delta^{13}C$ 值基本一致。可以认为从草地转变为农田后,小麦、玉米的种植,使得土壤有机碳的构成发生了改变,本研究玉米秸秆的 $\delta^{13}C$ 值为 -12.60% ,小麦秸秆的 $\delta^{13}C$ 值为 -26.38% ,可以得出玉米秸秆对土壤有机碳的贡献大于小麦秸秆,这也与处理中主要为玉米秸秆还田,小麦只是根茬还田一致。而且,新有机质的输入主要影响0~20 cm表层土,对底层土壤基本没有影响。

表3 原状土及不同处理不同层次土壤有机碳的 $\delta^{13}C$ 值/ $\%$

Table 3 $\delta^{13}C$ value of soil organic carbon in different soil layers in original grassland and different plough and crop straw return systems/ $\%$

深度/cm	原土	直立免耕	粉碎免耕	整翻	粉碎	整翻无肥
0~5	-23.41	-21.65	-21.37	-21.62	-21.46	-21.46
5~10	-22.24	-21.86	-21.69	-21.78	-21.60	-21.38
10~15	-22.48	-21.66	-21.56	-21.79	-21.42	-21.25
15~20	-21.92	-21.33	-21.51	-21.47	-20.74	-21.21
20~40	-19.82	-19.95	-20.36	-20.17	-20.86	-20.24
40~60	-20.25	-19.48	-22.28	-21.23	-20.53	-21.53
60~80	-20.46	-21.82	-21.52	-22.33	-21.52	-20.78
80~100	-20.88	-21.18	-21.71	-21.64	-21.91	-21.19

2.4 农田土壤中、旧有机碳含量的估算

在小麦、玉米种植模式下,玉米秸秆全部还田

而小麦只是其根茬还田,种植玉米对土壤有机碳 $\delta^{13}C$ 值的影响远大于小麦。本研究假设土壤有机碳

的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化只是由于耕作玉米造成的,那么可根据公式: $\delta = \delta_1 \times f + (1 - f) \times \delta_0$ 就可以得出土壤原有有机碳和新输入有机碳各自的比例. 式中, δ 为土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, δ_1 为玉米秸秆的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, δ_0 为原状草地土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, f 为玉米对土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值的贡献. 如果已知土壤有机碳总量 C , 那么 $C \times f$ 就为土壤中新输入有机碳含量, $C \times (1 - f)$ 为土壤原有有机碳含量.

从表 4 可以看出,由玉米种植所带来的新投入有机碳所占比例很小,在 3.98% ~ 18.92% 之间,说明土壤有机碳仍然以源于原来植物的有机碳为主,而且

以 0 ~ 5 cm 土层中新输入的有机碳比例最高. 从秸秆还田方式的影响来看,无论是免耕还是翻耕,秸秆粉碎还田处理带来的新有机碳所占比例均大于秸秆整株还田. 对于整株还田方式,在 0 ~ 10 cm 层,免耕还田方式新输入土壤有机碳的比例要比翻耕还田低,而到了 10 ~ 20 cm 层免耕还田方式新输入土壤有机碳的比例比翻耕还田高,说明在整株还田条件下,免耕对土壤有机碳的积累主要在 10 ~ 20 cm 层发生. 而对于粉碎还田方式,免耕方式对于有机碳的积累主要表现在 0 ~ 5 cm 层. 表 5 是对新输入有机碳的绝对数量进行分析,可以发现同样的结论.

表 4 农田土壤中原有和新投入有机碳的比例 / %

Table 4 Old and newly input organic carbon in different plough and crop straw return farming systems / %

深度 / cm	直立免耕		粉碎免耕		整翻		粉碎	
	原有	新投入	原有	新投入	原有	新投入	原有	新投入
0 ~ 5	83.72	16.28	81.08	18.92	83.40	16.60	81.96	18.04
5 ~ 10	96.02	3.98	94.28	5.72	95.19	4.81	93.39	6.61
10 ~ 15	91.66	8.34	90.67	9.33	93.04	6.96	89.27	10.73
15 ~ 20	93.52	6.38	95.65	4.35	95.19	4.81	87.35	12.65

表 5 不同耕作和秸秆还田方式中土壤中新输入有机碳的数量 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 5 Newly input organic carbon quantity in different plough and crop straw return farming systems / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

深度 / cm	直立免耕	粉碎免耕	整翻	粉碎
0 ~ 5	1.540	1.668	1.354	1.357
5 ~ 10	0.338	0.480	0.397	0.494
10 ~ 15	0.605	0.670	0.597	0.903
15 ~ 20	0.390	0.295	0.420	0.919

作层土壤有机碳含量和空间分布格局变化的研究表明,草地与耕地表层 0 ~ 10 cm 土壤有机碳含量差异不显著,草地亚表层 10 ~ 20 cm 土壤有机碳含量低于耕地. 在本实验中 0 ~ 20 cm 土壤中原状草地的有机碳含量显著高于不同栽培方式的农田土壤,其中 0 ~ 5 cm 土层中有机碳损失最大,可到 23.7% ~ 39.3%,而在 60 ~ 100 cm 土层原状草原土壤及不同栽培方式的农田土壤有机碳差异不显著,说明土壤剖面下部土壤有机碳含量随土地利用变化而改变的幅度不大.

有机碳损失的原因,主要包括:①有机碳的输入减少,草地变成农田后减少了土壤有机质的输入量,并且草地群落被作物取代后使初级生产固定的碳素向土壤中的分配比例降低(生物量的地下与地上比例降低);②耕作方式影响,人工耕种使土壤的干湿交替频繁,增大土壤的通气性,对土壤的团粒结构破坏很大,而土壤团粒结构对土壤有机质起物理保护作用^[13];耕作能改变土壤温度、湿度、孔隙状况和土壤微生物的活性环境,使土壤变得疏松,更适合微生物活动,从而加速土壤有机质的分解、消耗过程^[19];此外耕作还能造成可溶性有机碳或颗粒有机碳的淋溶和迁移,加速的土壤侵蚀过程.

3.2 不同栽培措施对土壤有机碳含量的影响

长期施肥条件下,土壤及各粒径级中有机碳含量增多. Campbell 等^[6]研究得到的结论是,在常规

3 讨论

3.1 土地利用方式改变对土壤有机碳含量的影响

土地利用方式的变化,尤其是近半个世纪以来农田开垦面积的增加和放牧方式、放牧强度的变化对土壤有机碳的影响十分强烈. 许多研究表明,草地开垦为农田后会损失掉原来土壤中碳素总量的 30% ~ 50%^[14]; Postw 等^[15]指出,几乎所有的开垦都会造成自然生态系统土壤有机碳含量的降低,温带地区草地改为农田后土壤有机碳损失 20% ~ 40%; 刘全友等^[16]在内蒙古多伦县的研究发现农田比草地土壤有机质低约 50%. 本实验中原状草地开垦为农田,1m 深度土层内的土壤碳损失从 13.3% ~ 35.0% 不等.

王艳芬等^[17]研究发现我国内蒙古草甸草原植被下的黑钙土不同层次有机碳因农垦损失 34% ~ 38%; 陈伏生等^[18]通过对草地开垦 8 a 后的耕地耕

耕作条件下,长期施用氮肥使土壤 30 a 后土壤有机质增长 4%~6%,在本实验中可以发现无机肥的使用能够显著的增加土壤有机碳含量,施加底肥的处理土壤有机碳含量比未施加底肥的高 $0.83 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 这主要是由于无机肥能增加作物生物学产量,从而增加了对土壤有机物(通过根系、残茬、落叶、根系分泌物等)的投入.

一般认为,免耕可以增加土壤碳贮量. 秦嘉海^[20]的研究表明,免耕由于留茬的根系和秸秆覆盖的残落物进入土壤,增加了土壤有机物的来源,其 0~20 cm 耕层土壤有机质增加 $2.01 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 本实验也得到相同的结论,无论是秸秆整株还田还是秸秆粉碎还田,免耕操作的土壤有机碳含量都要显著地高于翻耕操作. 但在 10~15 cm、15~20 cm 这 2 个土层却出现了翻耕操作土壤有机碳含量反而显著地高于免耕操作的现象,这主要是因为一方面免耕操作,土壤有机碳的增加主要发生在 0~10 cm 的土壤表层;另一方面由于秸秆还田和耕地的影响,使得秸秆在耕地时主要被翻到了土壤的表层以下约 20 cm 的土层,使得 10~20 cm 土层有机碳含量反而增加. 康红等^[21]在陕西的研究也发现在 15~30 cm 土层,免耕和翻耕 2 种耕作方式的土壤有机质含量相差不大的现象.

秸秆是土壤有机质的一项重要来源,一般能提高土壤有机质含量. 张电学等^[22]的研究表明,经过 2 a 实验,施用玉米秸秆配施化肥使土壤有机质含量增加了 $0.9 \sim 1.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,年均提高 $0.45 \sim 0.60 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;于和平等^[23]研究得出麦秸覆盖还田连续 3 a 的 0~20 cm 土壤有机质较对照田增加 $0.03 \sim 0.25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,年均递增 $0.16 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 本实验中,虽然在 0~100 cm 土层秸秆还田对土壤有机碳的影响不显著,但是在 0~20 cm 土层,秸秆还田使土壤有机碳含量有了显著的增加. 很多研究也表明,由于秸秆还田的翻耕深度在 15~20 cm 之间,所以有机质的增加也主要发生于 0~20 cm,所以用 0~20 cm 土壤有机碳含量的变化来说明秸秆还田的影响显然更有说服力.

粉碎处理的秸秆组织被机械破坏,当翻压入土时,与土壤接触面积大于整株处理的,当温、湿度条件适宜时,在微生物作用下,分解速度显然大于整株处理,但本实验中秸秆整株还田处理土壤有机碳含量却大于秸秆粉碎处理,这可能因为秸秆粉碎或是不粉碎其最终分解率都是没有显著差异. 马永良等^[24]研究表明到第 2 年 9 月还田近 1 年时,秸秆整

株还田和秸秆粉碎还田差别已不明显,分解率都超过 80%,分别为 82.73% 和 85.26%.

3.3 原状草地及不同栽培措施下土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值

土壤有机质代表着一个从新鲜植物残体到彻底腐殖质化物质的连续体. 一般来说,土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与来源植物物料的 $\delta^{13}\text{C}$ 值十分接近,因此可以根据植物的特征 $\delta^{13}\text{C}$ 值,判断土壤有机质来源^[25],土壤深度与土壤的年龄是相关的,越深土壤的年代越老,所以结合本实验原状草地上土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化,可以推断出原状草地上植被的更替是从主要以 C3 植被为主,逐渐过渡到 C4 植被大量繁殖,再到 C3 植被重新建立优势的过程.

很多研究表明新源有机质的加入很难影响到土壤较深的层次,主要对土壤表层土产生影响, Balesdent 等^[26]利用 ^{13}C 标记作物,区分土壤原有有机质和新输入的有机质,经过连续 17 茬作物的生长,在免耕条件下,50% 以上新输入的碳集中在 4 cm 表层土壤,25 cm 以下土层为 20%. 本实验中,草地转变为农田后,虽然栽培措施不一样,但土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的比变化主要发生在 0~20 cm 土层,到底层土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值基本达到一致,也说明小麦、玉米的种植引入的新源的有机质主要集中在土壤 0~20 cm 土层.

土壤中原有有机碳很难被新输入的有机质取代,在土壤表层新输入的有机质所占比例依然很小. Collins 等^[27]的研究表明,在毁林造田后耕作时间分别为 8 a 和 35 a 的地点,源于农作物 C4 植物的土壤有机碳所占的比例分别为 22% 和 40%; Balesdent 等^[28]研究了在草原(C3 植物)上种植玉米(C4 植物)后土壤有机质的周转情况. 结果表明,在耕种大约 100 年后,草原来源的碳的比例仍不少于 50%. Kramer 等^[29]的研究发现土地利用改变 40 a 后,由 C4 植物引入的有机质在 0~20 cm 层占总有机质的 12%,而在 40~60 cm 层只占 3%. Guggenberger 和 Dijkstra 等^[30,31]研究表明,微生物引起的有机无机复合比单纯的植物秸秆更容易防止分解. 本实验中草地转变为农田后,虽然栽培措施不一样,即使在土壤 0~5 cm 表层,源于农作物的土壤有机碳所占的比例最高不超过 18%,到 15~20 cm 已经降到了 5% 左右. 此外在 20 cm 以下的土层这个比例出现了负值,这可能由 2 个因素导致,一方面本来新源有机质的加入很难影响到土壤较深的层次,再加上原状草地上土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 20~40 cm 达到最大,

相对来说不容易受新源有机质加入的影响,另一方面,本研究假定土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化只是由于耕作玉米造成的,对耕层土壤可能适用,但对于 20 cm 一下土层,小麦根系的贡献可能较大但在本研究中被忽略,也可能是出现负值的原因,需要进一步研究和明确。

4 结论

(1) 华北原状草地改变为农田后(34 a),土壤有机碳显著降低,且因农田栽培方式不同而异,1m 土层降低幅度在 13.3%~35% 之间,但降低显著发生在 0~40 cm。经过 8 a 施加底肥,可以提高土壤有机碳 $0.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(2) 免耕方式可以显著提高土壤有机碳,且主要发生在 0~10 cm 土层。翻耕操作会引起 10~15 cm 和 15~20 cm 土层的土壤有机碳高于免耕处理的现象。

(3) 华北原状草地改变为农田后(34 a),土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的比变化主要发生在 0~20 cm 土层,玉米种植输入的有机碳主要集中在土壤 0~20 cm 层次。在土壤 0~5 cm 表层,源于农作物的土壤有机碳所占的最高比例为 18%,到 15~20 cm 已经降到了 5% 左右。

参考文献:

- [1] 王绍强,周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. 地理研究,1999,18(4): 349-357.
- [2] 李长生,肖向明,Frøking S,等. 中国农田的温室气体排放[J]. 第四纪研究,2003,23(5):493-503.
- [3] 杨学明. 利用农业土壤固定有机碳缓解全球变暖与提高土壤生产力[J]. 土壤与环境,2000,9(4): 311-315.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration in China through agricultural intensification, and restoration of degraded and desertified ecosystems[J]. Land Degradation and Development,2002,13: 469-478.
- [5] 潘根兴,李恋卿,张旭辉,等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题[J]. 地球科学进展,2003,18(4): 609-618.
- [6] Campbell C A, Zentner R P, Liang B C, et al. Organic C accumulation in soil over 30 years in semiarid southwestern Saskatchewan—Effect of crop rotations and fertilizers [J]. Canadian Journal of Soil Science,2000,80: 179-192.
- [7] Balesdent J, Mariotti A, Guille B. Nature ^{13}C abundance as a tracer for soil organic matter dynamics studies [J]. Soil Biology & Biochemistry,1987,19: 25-30.
- [8] 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]. Canadian Journal of Soil Science,1995,75: 161-167.
- [9] Schwartz D, Mariotti A, Lanfranchi R. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ Ratios of soil organic matter as indicators of vegetation changes in the congo [J]. Geoderma,1986,39: 97-103.
- [10] 刘涛泽,刘丛强,张伟. 植被恢复中坡地土壤颗粒有机碳分布特征和 ^{13}C 值组成 [J]. 生态环境,2008,17(5):2031-2036.
- [11] 刘涛泽,刘丛强,张伟,等. 喀斯特地区坡地土壤可溶性有机碳的分布特征 [J]. 中国环境科学,2009,28(3):248-253.
- [12] 涂成龙,刘丛强,武永锋. 马尾松林地与玉米地土壤有机碳的分异研究 [J]. 生态环境,2008,17(1):261-267.
- [13] 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的迁移和赋存规律 [J]. 环境科学,2002,23(4): 89-92.
- [14] Davidson E A, Ackerman I K. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils [J]. Biogeochemistry,1993,20: 161-193.
- [15] Postw M, Mann L K. Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation [A]. In: Bouwman A F. Soils and the greenhouse effect [M]. New York: John Wiley and Sons,1990. 401-406.
- [16] 刘全友,董依平. 北方农牧交错带土地利用现状对生态环境变化的影响 [J]. 生态学报,2003,23(5):1025-2030.
- [17] 王艳芬,陈佐忠,Larry T T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响 [J]. 植物生态学报,1998,22(6): 545-551.
- [18] 陈伏生,曾德慧,陈广生,等. 开垦对草甸土有机碳的影响 [J]. 土壤通报,2004,35(4):413-419.
- [19] 王清奎,汪思龙,高洪. 土地利用方式对土壤有机质的影响 [J]. 生态学杂志,2005,24(4): 360-363.
- [20] 秦嘉海. 免耕留茬秸秆覆盖对河西走廊荒漠化土壤改土培肥效应的研究 [J]. 土壤,2005,37(4): 447-450.
- [21] 康红,朱保安,洪利辉,等. 免耕覆盖对旱地土壤肥力和小麦产量的影响 [J]. 陕西农业科学,2001,9: 1-3.
- [22] 张电学,韩志卿,刘微,等. 玉米秸秆直接还田配施促腐剂效应研究 [J]. 河北科技师范学院学报,2004,18(3): 1-3.
- [23] 于和平,秦志前. 麦秸覆盖还田效应研究初报 [J]. 甘肃农业科技,2005,9: 38-39.
- [24] 马永良,宇振荣,江永红,等. 两种还田模式下玉米秸秆分解速率的比较 [J]. 生态学杂志,2002,21(6): 68-70.
- [25] 朴河春,刘启明,余登利,等. 用天然 ^{13}C 丰度法评估贵州茂兰喀斯特森林区玉米地土壤有机碳的来源 [J]. 生态学报,2001,21(3): 434-439.
- [26] Balesdent J, Chenu C, Balabane M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage [J]. Soil Resource,2000,53: 215-230.
- [27] Collins H P. Soil carbon dynamics in corn based agro-ecosystems: results from carbon-13 natural abundance [J]. Soil Science Society of America Journal,1999,63: 584-591.
- [28] Balesdent J, Wagner G H, Mariotti A. Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance [J]. Soil Science Society of American Journal,1988,52: 118-124.
- [29] Kramer C, Gleixner G. Soil organic matter in soil depth profiles: Distinct carbon preferences of microbial groups during carbon transformation [J]. Soil Biology & Biochemistry,2008,40: 425-433.
- [30] Guggenberger G, Zech W, Haumaier L, et al. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soils: II. CPMAS and solution ^{13}C NMR analysis [J]. European Journal of Soil Sciences,1995,46: 147-158.
- [31] Dijkstra P, Ishizu A, Doucet R, et al. ^{13}C and ^{15}N natural abundance of the soil microbial biomass [J]. Soil Biology & Biochemistry,2006,23: 3257-3266.