

民勤绿洲区撂荒农耕地土壤有机碳变化特征及影响因素^①

王军强^{1,2}, 刘立超², 杨义荣^{1*}, 邱晓庆³

(1 甘肃省农垦农业研究院, 甘肃武威 733006; 2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000;

3 甘肃畜牧工程职业技术学院, 甘肃武威 733006)

摘要:对民勤绿洲区不同撂荒年限农耕地 0~60 cm 土层土壤总有机碳(TOC)、轻组有机碳(LFC)和重组有机碳(HFC)剖面分布以及土壤主要属性的关系进行了比较研究。结果表明:①撂荒区 0~60 cm 土层土壤 TOC、LFC 和 HFC 含量分别介于 3.21~5.23、0.34~1.51、2.55~4.30 g/kg, 相对于常规耕作土壤, 撂荒土壤 TOC、LFC 和 HFC 的下降主要发生在耕层(0~20 cm), 撂荒 40 年间, TOC、LFC 和 HFC 年均减幅分别为 1.94%、5.46% 和 2.13%; 20~60 cm 土层土壤 TOC 和 HFC 含量总体呈现缓慢增长的趋势, 撂荒 40 年 TOC 和 HFC 年增幅分别为 0.31% 和 0.88%, LFC 持续减少, 年均减幅为 1.18%。②撂荒地 HFC 对 TOC 的贡献大于 LFC, 土壤 TOC 和 HFC 含量分别与黏粒百分比和粉粒百分比呈极显著正相关, 与砂粒百分比呈极显著负相关, LFC 含量与粉粒、砂粒和黏粒百分比均未达到统计学上的显著相关, 但 LFC 含量分别与土壤 pH、EC 和 SAR(钠吸附比)呈显著或极显著相关, 说明 LFC 对土壤盐碱化较为敏感。③逐步回归分析表明, 土壤全氮、总碳氮比对土壤 TOC、LFC 和 HFC 影响较大。④随撂荒时间延长, 耕层土壤逐步趋于粗质化, 黏、粉粒含量不足, 体积质量降低, 盐碱化提高, 不利于土壤有机碳的积累, 随土层加深, 黏、粉粒含量提高, 有助于土壤有机碳的固持。

关键词:民勤绿洲; 撂荒农耕地; 有机碳; 轻组有机碳; 重组有机碳

中图分类号:T158.1

农耕地撂荒后土壤总有机碳(TOC)的动态受诸多因素的影响, 这些因素主要包括气候条件^[1]、撂荒时间^[2-3]、撂荒地植物群落结构^[4]、撂荒土壤类型^[5]、撂荒前土壤有机碳背景值、团聚体特征^[6]、土壤呼吸^[7]及土壤恢复时间^[8]等。已有研究表明, 农耕地撂荒有利于土壤中轻组有机碳(LFC)、重组有机碳(HFC)和 TOC 含量提高^[9-10], 且土壤 TOC 含量随撂荒年限呈线性增长趋势^[3], 即使是低产田在撂荒一个世纪以后也能恢复到中等碳汇的水平^[3], 各组分中, LFC 的增长率明显高于 HFC 和 TOC 的增长率^[1], 其对土地利用方式的变化最为敏感^[11], 因此, LFC 可作为反映撂荒后土壤质量变化的敏感性指标^[1,12]。也有研究得出相反结论, 认为撂荒初期土壤有机碳增长, 但不能长期发挥碳汇功能^[13]。目前, 关于中国西北干旱内陆区耕地土壤有机碳动态变化还没有一个确切的结论, 主要原因是该地区土壤碳库演替极易受风蚀和土地利用方式的影响^[14], 关于该地区农耕地撂荒后

TOC 变化的研究资料更少。

20 世纪, 世界范围内耕地撂荒面积不断递增^[15-16], 这一现象同样发生在中国的西北内陆各省^[17]。相对于其他中国西北地区的绿洲, 民勤绿洲表现的尤为明显, 民勤绿洲是整个西北地区耕地撂荒最为严重的地区之一^[18]。目前关于撂荒地的研究主要集中在耕地撂荒过程中生态和水文变化过程, 很少有研究关注土壤碳循环过程, 为此本文以民勤绿洲区不同撂荒年限农耕地为研究对象, 研究撂荒后土壤有机碳及其组分的变化, 定量揭示土壤碳库的控制性因子, 以正确评价民勤绿洲区退化耕地土壤有机碳库的大小及变化, 探讨干旱荒漠区农田生态系统的健康发展和农耕地增加土壤碳汇的相关措施。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于民勤县境内的东湖镇, 属典型的温带

①基金项目: 甘肃省科技支撑计划项目(1104FKCH162; 1204FKCH164)和国家星火计划项目(2012GA860001)资助。

* 通讯作者(teyaosuowang@163.com)

作者简介: 王军强(1979—), 男, 甘肃兰州人, 助理研究员, 博士研究生, 研究方向为干旱区土壤生态过程与健康。E-mail: wangjunq0303@163.com

大陆性季风气候,多年均温 7.8℃,年日照时间长,昼夜温差大,年均无霜期 162 天;该地平均年降水量在 113.2 mm,蒸发量高达 2 644 mm,降水主要在分布在 7、8、9 月三个月,干燥度大于 5.5,年平均风速 2.55 m/T,为全国最干旱,风蚀最为严重的地区之一。耕作土壤为本地区开垦种植早、熟化程度高的灌淤土,厚度可达 30~60 cm,耕层质地轻,土性热,保肥、保水性差。

1.2 样地选择与土壤采集

以 1995 年的 1:15 万土地利用现状图、民勤县行政区划图和土壤图为基本信息源,结合 2011 年 9 月对民勤县东湖镇典型耕地利用现状的调查结果,在民勤县东湖镇西岁四社和五社(38°56′50.3″N, 103°42′E)选取撂荒面积较大且连片、耕作痕迹明显、撂荒时间序列明晰的已撂荒 3 年(3a)、12 年(12a)、20 年(20a)、30 年(30a)和 40 年(40a)农耕地土壤为采样点,采样区撂荒后没有再进行复垦。撂荒 3 年后建群种主要为一年生草本,主要有碱蓬草和苦苣菜等,撂荒 12 年后一些盐生草和黑果枸杞成为群落优势种,撂荒 30 年以后,群落中的草本植物基本退化,白刺、泡泡刺为优势种,盐爪爪和红砂为伴生种。取样区土壤为灌淤土,以常规耕作农田为对照(0a),常规耕作农田前茬种植作物为棉花,实行地膜覆盖、棉花和茴香轮作的栽培模式和免耕冬灌、播种前旋耕、秸秆还田的耕作方式。为了保证耕作方式和种植模式基本一致,取样点选在撂荒较为集中的两个自然村。在采样区由东向西大约每隔 150 m 设置一个样方,每个采样区随机设置 3 个样方,采集样方内 4 个顶点和中心 5 个样点 0~10、10~20、20~40、40~60 cm 土层土样,

取样前将土壤表层的可见有机层除去,同一样方的土样分层混合均匀后装入布袋以备土壤理化分析。采样时间为 2012 年 4 月下旬,采集土壤样品除去可见动、植物残体和砂砾,土壤自然风干过 2 mm 筛后备用。

1.3 分析方法与数据处理

1.3.1 分析方法 土壤轻组有机碳(LFC)的分离参考 Janzen 等^[19]和尚雯等^[20]的方法。轻组有机碳(LFC)和重组有机碳(HFC)含量及其分配比例的计算参照张军科等^[21]的方法。

土壤有机碳和各组分碳采用 $K_2Cr_2O_4-H_2TO_4$ 外加加热法测定;土壤体积质量(即容重, Bd)采用环刀法测定;土壤电导率(EC)使用电导法测定;土壤 pH 用水土比 5:1 的土壤悬浊液,用电位法测定;土壤粒径分布采用筛析-吸管法测定;土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量使用原子吸收分光光度法测定, Na^+ 使用火焰光度法测定;钠吸附比(sodium adsorption ratio, SAR)计算方法为^[22]: $SAR_{1:5} = [Na^+] / ([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])^{1/2}$

1.3.2 数据处理 所有数据采用 SPSS19.0 软件进行相关性和逐步回归分析,用 Sigma Plot 10.0 软件进行土壤有机碳垂直分布做图,用 CANOCO 5 进行主成分 RDA 排序作图。

2 结果

2.1 撂荒地土壤总有机碳、轻组有机碳和重组有机碳的时间变异

撂荒地土壤总有机碳(TOC)、轻组有机碳(LFC)和重组有机碳(HFC)含量在土壤垂直剖面的分布总体概况为(图 1):撂荒区 0~60 cm 土层土壤, TOC、

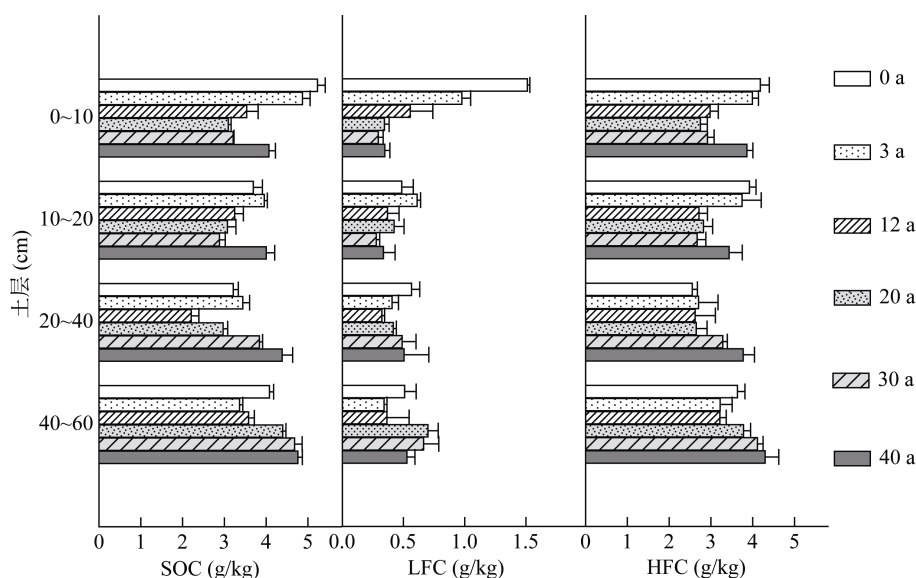


图 1 撂荒地土壤 TOC、LFC 和 HFC 的垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of TOC, LFC and HFC of abandoned cropland soils

LFC 和 HFC 含量分别介于 3.21 ~ 5.23、0.34 ~ 1.51、2.55 ~ 4.30 g/kg。随撂荒年限增加, TOC、LFC 和 HFC 含量在整个土壤剖面上的变化呈现“两头增, 中间减”的特点。同一年限撂荒区随土层深度的增加呈单峰趋势, 即先减小后增加, TOC、LFC 和 HFC 含量在整个土壤剖面的变化呈现一个共同点, 即 0 ~ 20 cm 土层以撂荒 20 年为分界点, 20 ~ 60 cm 土层以撂荒 30 年为分界点 TOC、LFC 和 HFC 先减小后增加。和试验区常规农耕地土壤相比, 撂荒过程中农耕地土壤 TOC、LFC 和 HFC 的下降主要发生在耕层(0 ~ 20 cm), 相对于常规耕作土壤, 40 年撂荒期间, 土壤年均损失 TOC、LFC 和 HFC 分别为 8.68×10^{-2} 、 5.45×10^{-2} 和 8.63×10^{-2} g/kg, 年均减幅分别为 1.94%、5.46% 和 2.13%; 撂荒过程中 20 ~ 60 cm 土层土壤 TOC 和 HFC 含量总体呈现缓慢增长的趋势, 相比常规耕作土壤, 撂荒 40 年分别增加了 0.57 g/kg 和 1.36 g/kg, 年增幅分别为 0.31% 和 0.88%, 表明耕层以下存在着 TOC 和 HFC 的固存作用, 但短时期很难恢复到一个较高的水平, LFC 持续减少, 年均减幅达到 1.18%。这与撂荒过程中植物群落结构的演替以及撂荒区缺少 LFC 的来源, 加之外来物质(降尘等)无法截存致使土壤剖面 TOC、LFC 和 HFC 含量呈现明显的差异性。

2.2 撂荒地土壤总有机碳、轻组有机碳、重组有机碳与土壤主要因子的耦合作用

土壤 pH、EC、SAR、黏粒百分比(Clay)、粉粒百分比(Silt)和砂粒百分比(Sand)等因子是影响土壤有机碳固定的微观环境。民勤绿洲区撂荒农耕地土壤的 pH、EC 和 SAR 分别在 7.8 ~ 8.4、0.91 ~ 3.84 mS/cm

和 0.55 ~ 2.36, LFC 含量分别与土壤 pH、EC 和 SAR 达到显著或极显著相关水平(表 1), 说明 LFC 对土壤盐碱化非常敏感。试验区 Sand、Silt 和 Clay 差异较大, 范围在 19% ~ 62%、18% ~ 67% 和 12% ~ 25%, TOC 含量和 Clay 呈极显著正相关, HFC 含量与 Silt 呈极显著正相关, 它们都与 Sand 呈极显著负相关, LFC 含量与 Silt、Sand 和 Clay 均未达到统计学上的显著相关水平(表 1)。对土壤 TOC、LFC 和 HFC 进行相关性分析, 结果表明: TOC、LFC、HFC 之间存在极显著正相关($P < 0.01$), TOC 与 HFC 含量相关系数高达 0.896(表 1), 说明在整个土壤取样层, TOC 的固持受各组分有机碳的影响, 其中 HFC 增加对 TOC 积累的贡献尤为突出, LFC 次之, 且 HFC 和 LFC 相互联系, 彼此促进, 而且它们分别与全氮呈极显著正相关。

进一步对 TOC、LFC 和 HFC 与土壤主要因子进行拟合回归分析。为了避免在进行回归分析时可能出现共线性现象, 利用逐步回归分析方法, 对该研究区域 6 个撂荒时间序列和 4 个土层的信息进行分析, 探讨影响 TOC、LFC 和 HFC 变化的主要因子。

采用逐步回归分析, 利用决定系数比较 4 个土壤结构因子、2 个土壤养分因子和 3 个土壤障碍因子对 TOC、LFC 和 HFC 的影响, 结果见表 2。 t 表示对回归系数的检验; P 表示显著性水平; β 用于同一模型不同系数的检验, 其值越大表示对因变量的影响越大; R^2 是决定系数, 指回归方程中的自变量对因变量变异性的解释能力, 满足允许水平 $P < 0.05$ 的变量进入模型。在 9 个因子中, TOC(y_1)和土壤全氮(x_4)、总碳氮比(x_5)以及土壤体积质量(x_6)有显著的线性关

表 1 全样本土壤 TOC、LFC 和 HFC 和土壤主要因子的相关性分析
Table 1 Correlation analysis of soil organic carbon and main physical-chemical properties of all samples

	TOC(y_1)	LFC(y_2)	HFC(y_3)	pH(x_1)	EC(x_2)	SAR(x_3)	TN(x_4)	TOC/TN(x_5)	B _d (x_6)	Sand(x_7)	Silt(x_8)	Clay(x_9)
TOC(y_1)	1	0.686**	0.896**	0.029	-0.218	-0.118	0.702**	0.199	0.196	-0.613**	0.323	0.623**
LFC(y_2)		1	0.406**	-0.233*	-0.479**	-0.302*	0.658**	-0.086	0.157	-0.159	0.071	0.207
HFC(y_3)			1	0.083	-0.077	-0.012	0.530**	0.289*	0.232*	-0.734**	0.757**	0.125
pH(x_1)				1	0.444**	0.562**	-0.117	0.256*	-0.319**	-0.132	0.246*	-0.19
EC(x_2)					1	0.502**	-0.263*	0.173	-0.653**	0.097	0.108	-0.422**
SAR(x_3)						1	-0.238*	0.217	-0.254*	-0.084	0.246*	-0.297*
TN(x_4)							1	-0.539**	-0.002	-0.264*	0.346**	-0.098
TOC:TN(x_5)								1	0.132	-0.318**	0.231	0.243*
B _d (x_6)									1	-0.495**	0.240*	0.611**
Sand(x_7)										1	-0.888**	-0.449**
Silt(x_8)											1	-0.012
Clay(x_9)												1

注: n (样本数)=72; * 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关, ** 表示表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关。

表 2 撂荒地土壤有机碳拟合回归方程
Table 2 Regression equations of soil organic carbon in abandoned cropland

逐步回归方程	R^{2*}	P^*
$\hat{y}_1 = -3.78(t = -16.124, P = 0.000) + 7.556x_4(\beta = 1.133, t = 47.06, P = 0.000) + 0.37x_5(\beta = 0.797, t = 32.86, P = 0.000) + 0.637x_6(\beta = 0.094, t = 4.505, P = 0.000)$	0.97	0.000
$\hat{y}_2 = -1.04(t = -5.79, P = 0.000) + 2.63x_4(\beta = 1.085, t = 11.65, P = 0.000) - 0.01x_8(\beta = -0.261, t = 7.46, P = 0.000) + 0.11x_5(\beta = 0.642, t = -5.37, P = 0.000) - 0.09x_2(\beta = -0.428, t = -3.97, P = 0.000)$	0.74	0.000
$\hat{y}_3 = -0.73(t = -2.78, P = 0.007) + 0.02x_8(\beta = 0.368, t = 5.97, P = 0.000) + 3.40x_4(\beta = 0.722, t = 10.03, P = 0.000) + 0.20x_5(\beta = 0.592, t = 8.54, P = 0.000)$	0.83	0.000

注：回归方程括号中的数值指回归系数中常量和变量的 P 和 t 值；* 代表模型调整后的 R^2 和 P 值。

系,说明这 3 个因子对土壤有机碳的影响较大,对土壤 TOC 含量变异性的解释能力为 97%。LFC($\hat{y}_2$)与土壤电导率(x_2)、全氮(x_4)、总碳氮比(x_5)、粉粒百分比(x_8)有显著的线性关系,对土壤 LFC 含量变异性的解释能力为 74%。HFC($\hat{y}_3$)与全氮(x_4)、总碳氮比(x_5)、粉粒百分比(x_8)有显著的线性关系,对土壤 LFC 含量变异性的解释能力为 83%。

9 个因子对土壤 TOC、LFC 和 HFC 含量的影响程度不同,总体而言,土壤中全氮含量对 TOC、LFC 和 HFC 的影响最大,土壤中黏粒比例高,不利于土壤中 LFC 含量的增加,但有利于 HFC 的固持,土壤电导率高,同样不利于撂荒地 LFC 的固持。

2.3 撂荒地土壤有机碳与土壤主要属性的 RDA 排序

撂荒地土壤有机碳和土壤主要理化指标的 RDA 排序结果见图 2。图 2a 中 RDA 第一排序轴的特征值为 0.286、第二排序轴的特征值为 0.231,前两轴的特征值占总特征值 84.59%;图 2b 中 RDA 第一排序轴的特征值为 0.264、第二排序轴的特征值为 0.194,前两轴的特征值占总特征值 79.6%,说明排序效果很好。

土壤 TOC、LFC 和 HFC 分别用带箭头的线段(矢量)表示,箭头连线与排序轴的夹角表示该组分有机碳与排序轴相关性的大小,箭头所指方向表示该有机碳的变化趋势。箭头连线的长度代表着有机碳与土壤理化指标相关程度的大小,连线越长,说明相关性越大,反之越小。正方形代表取样区,土壤理化指标用倒三角表示。由图 2a 可知,综合 RDA 第一、二排序轴的生态意义,在 RDA 二维排序空间中,沿着 RDA 第一排序轴从左至右,随着土壤碱化程度的不断降低,土壤体积质量和黏粒百分比逐渐增加,TOC、LFC、HFC 含量不断提高;沿着 RDA 第二排序轴从下至上;土壤中砂粒含量逐渐降低;粉粒、黏粒百分比和全氮含量则呈上升趋势,TOC、HFC 含量逐渐增加,排序结果表明,沿着撂荒 0a-3a-20a-40a 时间序列,0~20 cm 土层土壤质地逐步粗化,土壤黏粉

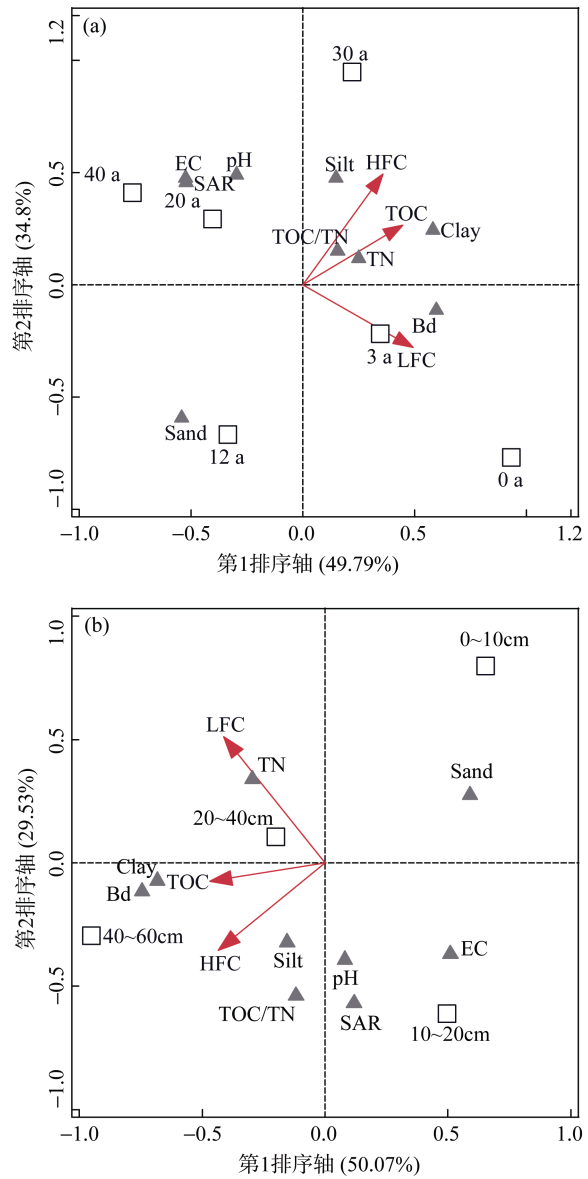


图 2 土壤 TOC、LFC 和 HFC 与土壤主要属性的 RDA 排序

Fig. 2 The graph of RDA ordination for TOC, LFC, HFC and soil main properties

粒比例增加减少,与 TOC、HFC 和全氮的结合也就越少。沿着撂荒 0a-3a-20a-40a 时间序列,土壤紧实度降低,土壤碱化程度提高,不利于 LFC 的固持。由图 2b 可以看出,样地的砂粒百分比与 RDA 第一

排序轴呈极显著正相关；体积质量、黏粒百分比与 RDA 第一排序轴呈显著正相关，而土壤中 pH、EC、SAR 与第二排序轴呈显著正相关，总氮和粉粒百分比与第二排序轴呈显著负相关。综合 RDA 排序的生态学意义，随土层加深，土壤粒度越细，土壤有机碳含量越高，土壤盐碱化主要发生在 10~20 cm 土层，因此这一土层 LFC 含量相对较低。

3 讨论

作为巨大的碳库，土壤积累和稳定有机碳的能力受到极大关注，一般认为，农耕地撂荒有利于土壤有机碳的积累和稳定^[9-10]。本研究结果表明，民勤绿洲区农耕地撂荒后并不能比常规耕地吸存更多的有机碳，相反，持续撂荒会导致耕层(0~20 cm)土壤有机碳含量呈现不同程度的下降(图 1)，虽然耕层以下存在着 TOC 和 HFC 的固存现象，但 LFC 含量随土壤深度的增加而持续减少，因此很难在短时期恢复到一个较高的水平。姜勇等^[23]对暖温带耕型壤质黄土状潮棕壤撂荒地土壤有机碳变化特征的研究也得出类似的结论。可能的原因是当农耕地撂荒后处于自然生态系统时，撂荒后土壤有机碳的截获主要取决于植物的地表枯枝落叶和细微根系的周转^[1, 24]，而研究区处于干旱荒漠区，受水资源及气候等条件的限制，植物群落稀疏，建群种单一，植被覆盖度低，不能有效地积累凋落物和立枯，增加植物残体的输入，因此难以在自然条件下达到对土壤碳库的补偿作用，而且地表大面积裸露相反还会加速有机碳的降解，从而严重制约了撂荒地耕层(0~20 cm)有机碳的固持，随撂荒年限延长，植物残体和根系在土壤剖面上分布的差异性增强，导致不同深度土层的土壤有机碳含量的变化趋势不一致。

轻组有机碳(LFC)主要来源于植物早期分解阶段中部分未分解的植物残体，因此其变化可以表征植物残体的腐殖化过程^[25]。撂荒初期为一年生草本和宿根植物迅速恢复时期^[26]，耕层源自凋落物和死根的有机物输入量大，但研究区干旱少雨的特性限制了撂荒地植被的长期定居和生长，也不能为土壤动物和微生物提供固定的食物来源和栖息，导致长期撂荒后植物凋落物对 LFC 的影响减弱，根系对 LFC 的影响增强^[27]，撂荒后期为多年生灌木稳定阶段^[26]，植物的更新大多都通过根萌^[28]，根系代谢相对活跃，根系残体在土壤中呈聚集分布，这一过程大多发生在耕层以下，加上深层土壤的干化又不利于土壤有机碳的分解^[19]，因此，长期撂荒后一些结构复杂且不易被微

生物分解利用的植物残体成为土壤深层 LFC 的主要来源^[29]，Marin-Spiotta 等^[30]对波多黎各东南部热带草地有机碳演变趋势研究得出，植被盖度的改变主要影响活性较强的有机碳持续损失，结果导致剩余有机碳库的平均固持时间延长。

在本研究区，随耕地的撂荒，一些二氧化碳固定效率高，适宜在干旱环境下生存的 C4 植物逐渐替代 C3 植物成为群落的优势种，Epstein 等^[31]研究提出当土壤氮含量偏低时，C4 植物可以为土壤提供较高的 C:N。当土壤有机碳含量增加，在无外源氮添加的前提下，氮限制增强，土壤微生物活性和呼吸速率显著性降低，导致在此过程中产生的立枯和凋落物很难分解，因此有助于土壤有机碳的累积^[4]。标准化逐步回归分析也显示，土壤全氮的变化对 TOC、LFC 和 HFC 值变化贡献最大(表 2)，进一步佐证了土壤中氮的累积速率决定着土壤有机碳的累积速率^[4]，也间接地表明植物碳同化途径不同有可能是民勤绿洲区撂荒农耕地有机碳分布规律形成的一个内在原因。

由于土壤异质性存在的绝对性，决定了田间尺度上土壤有机碳也存在一定的差异性。本研究区土壤类型、成土过程以及利用方式基本一致，但在 20 世纪 60 年代和 90 年代为了短期内达到缓解土壤板结，加速土壤熟化等目的，进行大面积“搬沙压土、搬沙压淤”，人为的改变土壤各径级颗粒之间的比例，土壤粒径分布在某种程度上决定了土壤的结构和性质，土壤结构体的改变必然对土壤有机碳及其稳定性产生影响^[32]，因此很有必要探讨撂荒地粒径分布与土壤有机碳的关系。研究表明，撂荒地 HFC 含量较高的样地其粉粒含量也较高(图 2a)，土壤中粉粒是土壤中主要的无机胶体，而土壤有机质是主要的有机胶体，无机胶体和有机胶体很容易形成有机-无机复合胶体，进而保护土壤形成较为顽固的 HFC，且试验也证实 HFC 含量与粉粒百分比呈显著正相关，与粒径较大的砂粒呈显著的负相关(表 1)，这一规律在土层深层表现的较为明显(图 2b)。LFC 含量和土壤各径级颗粒百分比之间均未构成统计学上的显著性相关，随撂荒年限的延长，LFC 含量不断下降，而且土壤的盐碱化严重制约植物残体的腐殖化过程。与黏粒结合的非保护性的 LFC 和与粉粒结合的保护性的 HFC 含量的增加，是撂荒过程中 TOC 固存效应的主要来源(图 2)。试验区耕层裸露土壤易受风蚀危害，风蚀导致输入土壤的碳数量减少，富含有机碳的黏粉粒组分随风移除系统^[33]。虽然耕作在促进新有机碳加入的同时也促进了土壤微生物活性酶活性的增加，产生明显的激发效应促进了原有机碳的矿化分解^[34]，

但耕作很容易导致土壤颗粒细化,增加土壤中的黏粉粒含量^[35],从研究结果看,无论是不同年限的撂荒耕地还是撂荒地不同土层,土壤黏粒百分比和 TOC 含量的变化趋势高度一致(图 2),因此,适宜的耕作也是补偿土壤有机碳的一项重要措施,已有的结果也证实,民勤绿洲区农耕地耕作 25 年后土壤有机质增加了 12%^[36]。

4 结论

1) 研究区撂荒地土壤 TOC、LFC 和 HFC 含量在整个土壤剖面上的变化呈现“两头增,中间减”的特点。撂荒过程中农耕地土壤 TOC、LFC 和 HFC 的损失主要发生在耕层(0 ~ 20 cm),相对于常规耕作土壤,40 年撂荒期间,撂荒土壤 TOC、LFC 和 HFC 年均减幅分别为 1.94%、5.46% 和 2.13%;20 ~ 60 cm 土层,撂荒土壤 TOC 和 HFC 含量总体呈现缓慢增长的趋势,撂荒 40 年 TOC 和 HFC 年增幅分别为 0.31% 和 0.88%,LFC 持续减少,年均减幅为 1.18%。因此,短时期内深层土壤(20 ~ 60 cm)有机碳也很难恢复到较高的水平,LFC 含量的持续下降也限制了 HFC 和 TOC 的蓄存。

2) 相关分析和逐步回归分析表明,撂荒土壤 TOC 和 HFC 含量与粉粒百分比呈极显著正相关、与砂粒百分比呈极显著负相关;土壤 LFC 对盐碱化较为敏感;土壤全氮的变化对 TOC、LFC 和 HFC 值变化贡献最大。

3) 随撂荒时间的延长,耕层土壤趋于粗粒化特征,土壤缺乏无机胶体保护有机物质,使有机物质的氧化和矿化作用大大加剧,不利于有机碳的长期固持。

致谢:特别感谢民勤县农业技术推广中心的侯忠全和王夫祥在野外工作中的悉心指导和帮助;样品分析和数据统计过程中得到了刘强、周彦芳和施志国的许多指导,王笑和陈调军参与了实验室分析,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] Zhang J, Song C, Wang S. Dynamics of soil organic carbon and its fractions after abandonment of cultivated wetlands in northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96 (1/2): 350–360
- [2] Foote RL, Grogan P. Soil carbon accumulation during temperate forest succession on abandoned low productivity agricultural lands[J]. *Ecosystems*, 2010, 13(6): 795–812
- [3] Novara A, Gristina L, La Mantia T, Ruehl J. Carbon dynamics of soil organic matter in bulk soil and aggregate

- fraction during secondary succession in a Mediterranean environment[J]. *Geoderma*, 2013, 193: 213–221
- [4] Knops JMH, Tilman D. Dynamics of soil nitrogen and carbon accumulation for 61 years after agricultural abandonment[J]. *Ecology*, 2000, 81(1): 88–98
- [5] De Baets S, Meersmans J, Vanacker V, Quine TA, Van Oost K. Spatial variability and change in soil organic carbon stocks in response to recovery following land abandonment and erosion in mountainous drylands[J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29(1): 65–76
- [6] Emran M, Gispert M, Pardini G. Patterns of soil organic carbon, glomalin and structural stability in abandoned Mediterranean terraced lands[J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(5): 637–649
- [7] Vuichard N, Ciais P, Beletti L, Smith P, Valentini R. Carbon sequestration due to the abandonment of agriculture in the former USSR since 1990[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(4): 1–8
- [8] Kurganova IN, De Gerenyu VOL, Shvidenko AZ, Sapozhnikov PM. Changes in the organic carbon pool of abandoned soils in Russia (1990–2004) [J]. *Eurasian Soil Science*, 2010, 43(3): 333–340
- [9] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明. 黄土丘陵区退耕撂荒对土壤有机碳的积累及其活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 78–80, 84
- [10] Jin X, Wang S, Zhou Y. Dynamic of organic matter in the heavy fraction after abandonment of cultivated wetlands[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44(7): 997–1001
- [11] Das M, Maiti SK. Comparison between availability of heavy metals in dry and wetland tailing of an abandoned copper tailing pond[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 137 (1–3): 343–350
- [12] 杨长明, 欧阳竹, 杨林章, 董玉红. 农业土地利用方式对华北平原土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 4148–4155
- [13] Meyer S, Leifeld J, Bahn M, Fuhrer J. Free and protected soil organic carbon dynamics respond differently to abandonment of mountain grassland[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(2): 853–865
- [14] Li D, Shao MA. Soil organic carbon and influencing factors in different landscapes in an arid region of northwestern China[J]. *Catena*, 2014, 116: 95–104
- [15] Cramer VA, Hobbs RJ, Standish RJ. What's new about old fields? Land abandonment and ecosystem assembly. *Trends in Ecology and Evolution*, 2008, 23(2): 104–112
- [16] Prishchepov AV, Radeloff VC, Baumann M, Kuemmerle T, Mueller D. Effects of institutional changes on land use: Agricultural land abandonment during the transition from state-command to market-driven economies in post-Soviet Eastern Europe[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(2): 1–13
- [17] Yang H, Li XB. Cultivated land and food supply in China[J]. *Land Use Policy*, 2000, 17(2): 73–88
- [18] Huo Z, Feng S, Kang S, Dai X, Li W, Chen S. The response of water-land environment to human activities in arid

- Minqin oasis, northwest China[J]. *Arid Land Research and Management*, 2007, 21(1): 21–36
- [19] Janzen HH, Campbell CA, Brandt SA, Lafond GP, Townley-Smith L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1 799–1 806
- [20] 尚雯, 李玉强, 王少昆, 冯静, 苏娜. 科尔沁沙地流动沙丘造林后表层土壤有机碳和轻组有机碳的变化[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2 069–2 074
- [21] 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 吴艳, 谢德体. 耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2012, 14: 4 379–4 387
- [22] 张芳, 熊黑钢, 安放舟, 夏倩柔. 基于盐(碱)生植被盖度的土壤碱化分级[J]. *土壤学报*, 2012, 49(4): 665–672
- [23] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 闻大中, 王莹, 阮宏华. 潮棕壤不同利用方式有机碳剖面分布及碳储量[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(3): 544–550
- [24] Campbell CA, Zentner RP, Liang BC, Roloff G, Gregorich EC, Blomert B. 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 (1): 179–192
- [25] Leifeld J, Kögel-Knabner I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? [J]. *Geoderma*, 2005, 124 (1/2): 143–155
- [26] 蒋礼学, 李彦. 三种荒漠灌木根系的构形特征与叶性因子对干旱生境的适应性比较[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(6): 1 118–1 124
- [27] 谢锦升, 杨玉盛, 杨智杰, 黄石德, 陈光水. 退化红壤植被恢复后土壤轻组有机质的季节动态[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 557–563
- [28] 郭树江, 杨自辉, 王多泽, 李得禄, 李爱德, 詹科杰, 王强强. 民勤绿洲-荒漠过渡带植物物种多样性及其优势种群空间分布格局研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(3): 92–96
- [29] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 李海波. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(17): 3 565–3 574
- [30] Marin-Spiotta E, Swanston CW, Torn MS, Silver WL, Burton SD. Chemical and mineral control of soil carbon turnover in abandoned tropical pastures[J]. *Geoderma*, 2008, 143 (1/2): 49–62
- [31] Epstein HE, Lauenroth WK, Burke IC, Coffin DP. Productivity patterns of C3 and C4 functional types in the U.S. Great Plains[J]. *Ecology*, 1997, 78: 722–731
- [32] Golchin A, Oades JM, Skjemstad JO, Clarke P. Soil structure and carbon cycling[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32(5): 1 043–1 068
- [33] 苏永中, 赵文智. 土壤有机碳动态: 风蚀效应[J]. *生态学报*, 2005, 25(8): 2 049–2 054
- [34] Guenet B, Juarez S, Bardoux G, Abbadie L, Chenu C. Evidence that stable C is as vulnerable to priming effect as is more labile C in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 52: 43–48
- [35] 张俊华, 李国栋, 南忠仁, 肖洪浪. 黑河绿洲区耕作影响下的土壤粒径分布及其与有机碳的关系[J]. *地理研究*, 2012, 31(4): 608–618
- [36] 吕晓东, 马忠明, 杨虎德. 民勤绿洲耕作土壤养分时空变异特征及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2010, 27(4): 487–494

Changes and Influencing Factors of Soil Organic Carbon in Abandoned Cropland of Minqin Oasis Region

WANG Jun-qiang^{1,2}, LIU Li-chao², YANG Yi-rong^{1*}, QIU Xiao-qing³

(1 *Gansu State Farms Academy of Agricultural Researches, Wuwei, Gansu 733006, China*; 2 *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 3 *Gansu Polytechnic College of Animal Husbandry & Engineering, Wuwei, Gansu 733006, China*)

Abstract: This study is aimed to investigate the dynamics of total soil organic carbon (TOC), light fraction organic carbon (LFC) and heavy fraction organic carbon (HFC) concentrations, their profile distributions and influencing factors in an anthropogenic-alluvial soil in the Minqin Oasis Area under six abandonment time series. In each sampling area soil samples were collected from 4 layers within 0–60 cm depth. The results showed that 1) TOC, LFC and HFC contents were between 3.21–5.23 g/kg, 0.34–1.51 g/kg and 2.55–4.30 g/kg in this soil profile, respectively. TOC, LFC and HFC decline mainly occurred in the tillage layer (0–20 cm) after 40 years abandonment, compared to conventional tillage, the annual decline rates of TOC, LFC and HFC were 1.94%, 5.46% and 2.13%, respectively. In general, TOC and HFC contents in 20–60 cm soil depth showed a slow increasing trend, compared with cropland under conventional tillage, the annual increase rate of TOC and HFC were 0.31% and 0.88%, but LFC continued to decline, with an annual decrease of 1.18%. 2) The HFC contribution to TOC was greater than LFC on abandoned land, soil TOC and HFC contents were significantly positively correlated with clay and silt percentages respectively, and significantly negatively correlated with the sand percentage, LFC content didn't reach significant levels in statistics with silt, sand and clay percentages, but LFC content had significant or extremely significant relationship with pH, EC and SAR, indicating LFC was more sensitive to soil salinization. 3) Stepwise regression analysis showed that soil total nitrogen (TN) and TOC/TN ratio had greater impact on soil TOC, LFC and HFC. 4) With the long time abandonment, tillage layer became rough and salinity increased, which is not suitable for soil organic carbon accumulation; but with the soil horizon deepen, clay and silt percentages increased, which can increase soil organic carbon accumulation.

Key words: Minqin oasis; Abandoned agricultural land; Organic carbon; Light fraction organic carbon; Heavy fraction organic carbon