

基于 CENTURY 模型研究干旱区人工绿洲开发与 管理模式变化对土壤碳动态的影响

许文强^{1,*}, 陈曦¹, 罗格平¹, 张清¹, 张豫芳², 唐飞²

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所与中国科学院绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 新疆发展和改革委员会经济研究院, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 近半个世纪前, 中国西北干旱区人类大规模的水土开发活动使得流域下部的荒漠覆被土地转变成了人工绿洲, 强烈的人类耕作活动使得人工绿洲土壤有机碳库发生了显著变化。以干旱区典型的三工河流域下部的人工绿洲为例, 基于 CENTURY 模型, 研究人工绿洲开发前后及农业管理模式变化对表层土壤有机碳库(0–20 cm)的影响。CENTURY 模型模拟结果表明: (1) 研究区荒漠灌木林地开垦为人工绿洲后, 在最初的 2a 土壤总有机碳(TOC)快速增加, 随后呈逐渐下降的趋势; (2) 研究区人工绿洲在被开发后 50a 的连续耕作下, 平均土壤 TOC 呈先增后减再增的“N”型变化趋势, 但最终土壤 TOC 超过了原始自然状态下的 TOC, 而且 2008 年土壤 TOC 比原始荒漠状态增加 7.74%, 说明研究区表层土壤有机碳总体呈“碳汇”趋势。尤其在研究区实施了免耕、秸秆粉碎还田、科学测土配方施肥等保护性耕作措施后, 土壤固碳效应明显, 这完全不同于热带森林、中国北部温带半干旱草原及非洲 Savanna 半干旱稀树草原开垦为耕地后土壤有机碳大量损失的结论。

关键词: 土壤有机碳; 管理模式; 人工绿洲; 作物轮作; CENTURY 模型

The impact of land reclamation and management practices on the dynamics of soil organic carbon in the arid region of North-western China as simulated by CENTURY model

XU Wenqiang^{1,*}, CHEN Xi¹, LUO Geping¹, ZHANG Qing¹, ZHANG Yufang², TANG Fei²

1 Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 Academy of Economy, Xinjiang Development and Reform Commission, Urumqi 830002

Abstract: Large-scale reclamation in arid land over North-western China during the past 50 years has converted the natural desert landscape into anthropogenic oasis, particularly in the lower part of watersheds. Drastic human activities may have caused the change in soil organic carbon (SOC) in anthropogenic oasis. Fubei farm, a typical anthropogenic oasis at the lower part of Sangong river watershed reclaimed 50 years ago, is selected as the representative area to assess the dynamics of SOC before and after the land reclamation and to analyse the effect of different management practices on soil carbon pools. Based on field investigation, history of crop rotations, and past farm practices in Fubei farm, land management practices were divided into five categories, corresponding five periods, 0–1958, 1959–1984, 1985–1992, 1993–1998 and 1999–2008. This study employs the CENTURY model to investigate the effects of land reclamation and management practices in oasis agriculture on the dynamic of SOC at different periods. CENTURY model (Version 4.0) was run based on a monthly time step, and simulated three conceptual SOC pools, namely active, slow, and passive pools, represented fast, medium, and slow rates of turnover of carbon in the soil profile, respectively. The model successfully simulated the soil total organic carbon (TOC) dynamics of the top layer soil (0–20 cm) in the different periods in the study area. The

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40801113, 40871028); 中国科学院西部之光人才培养计划(XBBS200903)

收稿日期: 2010-01-21; **修订日期:** 2010-04-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuwxq@ms.xjb.ac.cn

model was run for 1950a to reach steady state which assumes the land was a natural desert shrub with low-intensity grazing. In the equilibrium state, the proportions of active, slow, and passive organic carbon pools in soil TOC were 3.78%, 61.41%, and 34.81%, respectively, indicating that soil TOC in the study area was dominated by the slow and passive carbon pools. Model simulation showed that soil TOC increased rapidly in the first 2 years of oasis agriculture when the natural desert shrubland with its weak nutrient recycling was replaced by annual crops with better nutrient recycling. Over the 50 years' cultivation (1959–2008), the mean change in soil TOC exhibited complex ways. TOC increased rapidly in the first 2 years (1959–1960) after shrubland reclamation, and declined slowly during the period 1961–1984 and then decreased rapidly from 1985 to 1992. Between 1993 and 1998, it remained relatively stable, and climbed rapidly again during 1999–2008. The trend in soil TOC showed “N” shape, i. e., increase, decrease, then increase. Soil TOC is greater (7.74%) in 2008 than in 1958 under the natural desert shrub. The improvements of land management practices such as ploughing being replaced with no tillage, straw being crushed before returning it to soil, and reasonable application of fertilizers, played a key role in the change in soil TOC. Especially, soil carbon sequestration was obviously increased since protective management practices were implemented in 1993. The results were different from the conclusions that loss of soil organic carbon would happen due to reclamation and continuous farming in tropical forests, semi-arid grasslands of northern China and Nigerian semiarid Savannah.

Key Words: soil organic carbon; land management; anthropogenic oasis; crop rotation; CENTURY model

土壤有机碳(SOC)库是陆地生物圈中最大的碳库,约占陆地生态系统总碳储量的三分之二^[1-2],其中农田土壤有机碳库占全球陆地碳库的8%—10%^[3]。然而,由人类活动引起的土地利用/覆盖变化已成为影响土壤碳库动态的最直接原因,其中最严重的干扰就是将自然植被转变为耕地。研究表明,毁林或改变林地利用现状会造成20%—50%的SOC损失^[4-6],如 Silveria 等^[7]用 CENTURY 模型模拟的巴西亚热带森林变为甘蔗地,在最初的12a中,20cm深度的SOC储量下降了28%,耕作50a后下降了42%;草地开垦同样也会导致SOC的大量释放^[8],西非 savannah 半干旱草地被开垦为耕地后,40a的连续耕作使得1m深度的SOC下降了24%^[9],我国内蒙古草甸草原植被下的黑钙土被开垦后1m深度SOC损失超过30%^[10]。然而,并非所有的自然植被类型转化为耕地后都导致SOC下降,在合理的耕作方式下,土壤有机碳可能呈增加趋势,干旱区荒漠植被转化为耕地有可能属于这种转化类型,但相关的研究还需要进一步深入开展。

中国西北干旱区具有独特的山盆相间的地貌格局,形成了典型的以“山地-绿洲-荒漠”为主体的流域生态系统,其结构完全不同于世界其它干旱区,如非洲 Savanna 稀树草原地区、中东干旱沙漠区域、澳洲中西部干旱区及北美干旱区等。中国西北干旱区流域生态系统一直受到人类活动的强烈影响,半个世纪前人类大规模的水土开发使得流域下部的荒漠覆被土地转变为人工绿洲,以天山北坡为例,近50a耕地面积增幅约150%,其后在不同农业管理模式的影响下,土壤碳库发生了显著变化^[11-12]。然而,目前对近50a来干旱区绿洲开发及农业管理模式变化对SOC动态的影响研究还不够深入,需要深入探讨。

CENTURY 模型是评价农田生态系统土壤有机碳演变最有效的工具之一,该模型已被广泛应用于草地生态系统、农田生态系统、森林生态系统等,都取得了较好的应用结果^[13-15]。我国在 CENTURY 模型的研究方面也取得了很大的进展,分别在内蒙古锡林河流域典型草原区^[16]、鼎湖山森林区^[17]以及东北黑土区域^[18-19]等都进行了成功的应用。本文在干旱区绿洲应用 CENTURY 模型,研究三工河流域绿洲开发前后土壤有机碳库动态,分析绿洲农业管理模式变化对土壤有机碳库的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

位于天山北坡的三工河流域,北与古尔班通古特沙漠毗邻,南与天山山脉相邻,为干旱区典型的流域生态系统,其中流域下部为典型的人工绿洲,完全由原始荒漠植被土地开垦而来。本文选择三工河流域下部的人

工绿洲作为研究区(图 1),其隶属新疆生产建设兵团阜北农场,面积约 187km²,区内地形平坦,地势东南略高,西北低,海拔 450—480m。气候属典型温带大陆性气候,昼夜温差大,多年平均气温 6.6℃,多年平均降水 164 mm,年蒸发量为 1780—2453mm。地带性土壤为灰漠土,其土壤有机质含量为 0.6%—1.0%,属较低水平。中国科学院阜康荒漠生态系统观测试验站(阜康站)位于研究区内,该试验站积累的阜北农场及其周边大气、植被和土壤的观测数据可为 CENTURY 模型的参数化提供支持。

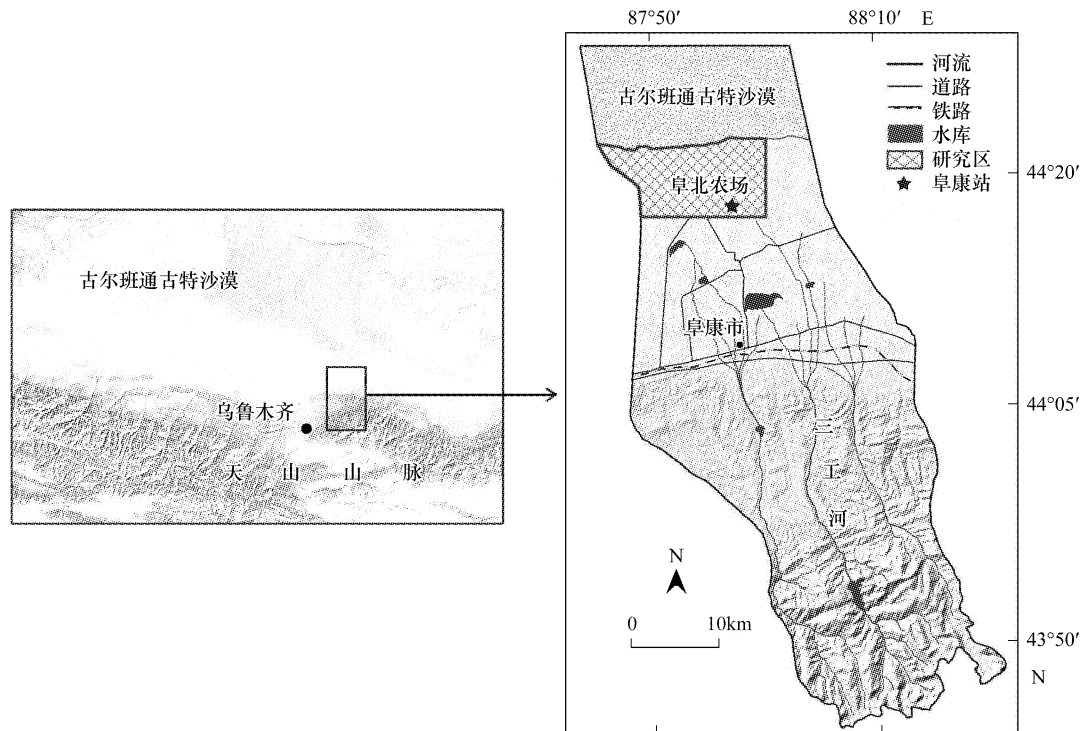


图 1 三工河流域绿洲和研究区地理位置示意图

Fig.1 The sketch map of the Sangong river watershed and the study area

阜北农场建于 1959 年,建场前是以荒漠灌木林地(怪柳、梭梭和琵琶柴为主要建群种)为主要土地覆被类型的自然荒漠景观(图 2),经过 50a 的高强度人类耕作活动影响,地表荒漠景观已转变为以人工植被为主体的绿洲景观,绿洲农业管理模式发生了很大的变化,如人工绿洲作物类型也从开发初期的 1 年生作物(小麦、玉米等)转变为目前的多年生作物(葡萄);同时,耕作模式也发生了显著变化,开发初期化肥使用量较少,作物秸秆均被移除并作为燃料使用,而 20 世纪 90 年代初开始逐步推行作物秸秆粉碎还田技术,并扩大了多年生作物的种植面积,实现了免耕种植^[12, 20]。

1.2 数据采集与实验室分析

本文所需的土壤数据为阜北农场 1982、1999、2003 和 2004 年土壤有机质数据,采样时间均为 5 月上旬,采样深度为 20cm,其中 1982 年土壤有机质数据是阜北农场全国第二次土壤普查数据,来自于 472 个土壤采样点,包括位于阜北农场外围荒漠灌木林地的 10 个采样点,且部分土壤样品进行了粒度分析,1999、2003 和 2004 年土壤有机质数据分别来自于 421、332 和 35 个土壤采样点分析数据。土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化外加热法测定,土壤有机碳含量由土壤有机质含量乘以 Bemmelen 换算系数 0.58 得到^[21]。

1.3 CENTURY 模型的参数化设置

CENTURY 模型是一个基于过程的陆地生态系统生物地球化学循环模型,主要用于模拟不同土壤-植被系统间 C、N、P 和 S 的长期动态。根据土壤有机质的分解速率,CENTURY 模型将土壤总有机碳(TOC)分成了 3 个碳库,即活性、慢性和惰性有机碳库^[22-25]。本文利用 CENTURY 模型的 4.0 版本,其主要输入数据包括:(1)月平均最高和最低气温,(2)月降水量,(3)植物体木质素含量,(4)植物中 C、N、P 和 S 含量,(5)土壤质地,

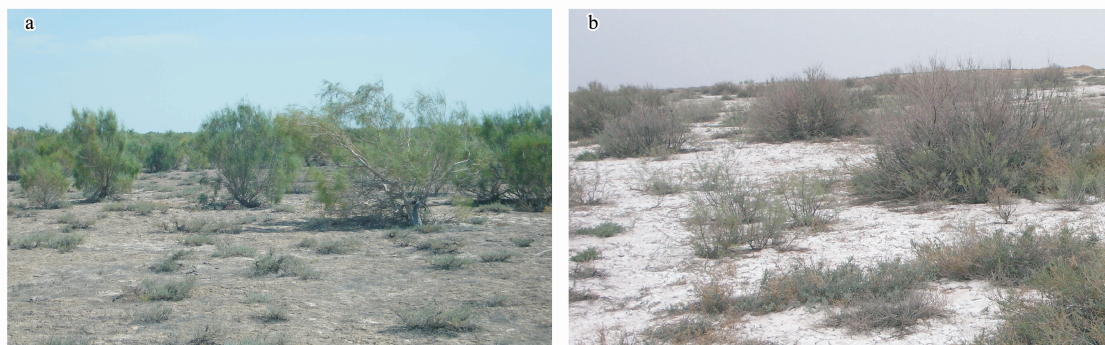


图2 研究区土地开发前以荒漠灌木林为土地覆被类型的原始荒漠景观

Fig.2 The original landscape (a natural desert shrub) before land reclamation

图片 a 和 b 显示了与研究区绿洲开发前相似的自然荒漠景观,分别为研究区绿洲外围以梭梭为主要建群种和以怪柳为主要建群种的自然景观,拍摄时间为 2008 年 5 月和 10 月

(6) 大气和土壤 N 素输入, (7) 初始土壤 C、N、P 和 S 水平。

模型所需的气象数据为阜康站提供的 1990—2007 年研究区气象数据,其它模拟时段的气象数据由模型根据 1990—2007 年气象数据的偏态分布 (Skewed Distribution) 特征随机产生。土壤物理控制变量包括初始土壤质地 (砂粒、粉粒和粘粒的百分比)、土层厚度、土壤容重、pH 值等,其数据均来自 1982 年全国第二次土壤普查数据 (表 1)。模型所需的管理模式数据包括作物轮作、施肥、灌溉、收获等数据,均来自阜北农场生产科。植物体木质素含量、C/N 比值和 C 含量等植被生产力参数参考阜康站的相关观测数据获得,其中部分参数应用模型提供的缺省值。

表 1 CENTURY 模型初始化所需的土壤和气象数据

Table 1 Soil characteristics and climatic parameters used as inputs for the CENTURY model

参数 Parameter	值 Value
土壤特征 Soil characteristics (0—20cm)	
质地 Texture (sand, silt, clay)/%	44.1, 43.2, 12.7
容重 Bulk Density /(g/cm ³)	1.2
pH 值 Value	8.7
初始土壤总有机碳 Initial Soil TOC/(g/m ²)	2173.7
气象参数 Climate data	
月均最低气温 Minimum mean monthly temperature/℃	-0.23
月均最高气温 Maximum mean monthly temperature/℃	11.20
月均降水量 Mean monthly precipitation /mm	13.88

根据研究区土地开发历史及人工植被种类和管理方式的变化,模型将研究区分为 5 个模拟时段 (Block), 时段 1 为 0—1958 年,植被类型为原始灌木林地,此时段也是模型建立平衡状态的过程,之后研究区原始荒漠植被转变为绿洲人工植被,时段 2—5 为人工植被种植期,每个时段对应有不同的作物类型、管理方式和重复时间 (表 2)。

2 结果与分析

2.1 模型建立平衡状态过程中土壤有机碳变化分析

CENTURY 模型模拟了研究区土壤 TOC 及活性、慢性和惰性有机碳库从无积累到稳定平衡状态的动态变化,模型建立平衡过程所需的时间为 1950a (图 3)。比较土壤有机碳变化曲线的速率可知,土壤 TOC 和慢性有机碳库在最初的 100a 累积速率非常快,之后累积速率较为缓慢;活性有机碳库约在最初的 30a 就基本达到了平衡状态 (图 3);而惰性有机碳库累积速率一直比较平缓,到 1500a 时累积速率基本趋于稳定。在模型达

到平衡状态时,活性、慢性和惰性有机碳库分别占总有机碳的 3.78%、61.41% 和 34.81%,研究区土壤 TOC 以慢性和惰性有机碳库为主。从图 3 中土壤有机碳的散点分布也可看出,土壤 TOC 和慢性有机碳库的年际变化相对较大,活性有机碳库也具有一定的年际变化,而惰性有机碳库年际变化非常小(图 3),这主要是受气温、降水等自然环境条件年际差异的影响。

表 2 模型模拟时段设置
Table 2 Blocks set up in the model: years, crops, and management practices

模拟时段 Block	开始和结束的时间 Starting and ending year	植被类型及管理方式 Vegetation and management	重复时间/a Repeating sequence
B1	0—1958	荒漠灌木林地,低强度放牧干扰	1
B2	1959—1984	小麦和玉米轮作,犁耕,作物秸秆被移除,施有机肥	2
B3	1985—1992	棉花,犁耕,作物秸秆被移除,施少量化肥	1
B4	1993—1998	棉花,犁耕,作物秸秆粉碎还田,施大量化肥	1
B5	1999—2008	葡萄,免耕种植,施化肥(测土配方施肥)	10

由于阜北农场开垦前的土地覆被类型为荒漠灌木林地,而 1982 年土壤采样点中包含位于阜北农场外围荒漠灌木林地的 10 个采样点,因此可将该 10 个采样点土壤有机碳含量的均值 2173.7 g/m^2 作为阜北农场开垦前荒漠灌木林地土壤 TOC 的实测值。CENTURY 模型运行达到平衡状态时 TOC 含量为 2169.7 g/m^2 (用 1950—1958 年均值替代模拟平衡状态下的土壤 TOC 值),与实测值 2173.7 g/m^2 间的误差非常小,即模型到达平衡状态时累积的土壤有机碳与研究区实测土壤有机碳含量基本一致,说明 CENTURY 模型正确模拟了研究区自然植被状态下的土壤有机碳动态过程。

2.2 模型模拟值与实测值的比较

阜北农场土壤 TOC 实测数据共有 5 期,分别为阜北农场开发前(即原始灌木林地土壤有机碳数据,用 1982 年阜北农场外围荒漠灌木林地采样点土壤有机碳均值代替)、1982 年、1999 年、2003 年和 2004 年,将其 5 期实测数据分别与 CENTURY 模型模拟得到的数据进行比较,结果显示土壤 TOC 模拟值与实测值具有较好的拟合关系, R^2 值达到了 0.87(图 4)。通过配对样品 t 检验(Paired-Sample T Test)得出, t 值等于 0.63,双尾检验概率 P 值等于 0.57(>0.001),即模型模拟值与实测值间的差异不显著,说明 CENTURY 模型适合于进行研究区土壤有机碳动态模拟,模拟精度满足要求。

2.3 作物轮作和耕作模式变化对土壤有机碳动态的影响分析

半个世纪前的土地开发使得三工河流域下部自然植被转变为人工植被,导致土壤有机碳发生了显著的变化。在 1959 年前,CENTURY 模型模拟时段为 B1,植被类型为原始灌木林地;自 1959 年开始,研究区人工绿洲农业管理模式经历了 4 个时段(B2,B3,B4 和 B5)的

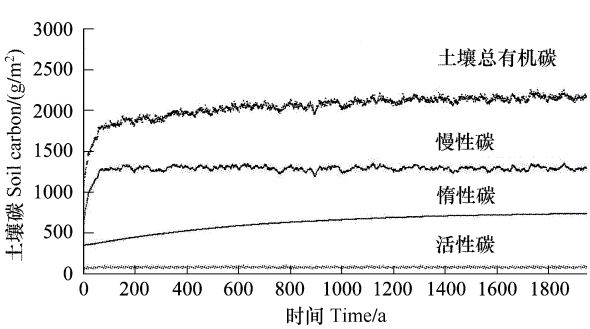


图 3 CENTURY 模型建立土壤有机碳平衡状态的过程
Fig. 3 The process of establishing equilibrium conditions using the CENTURY model

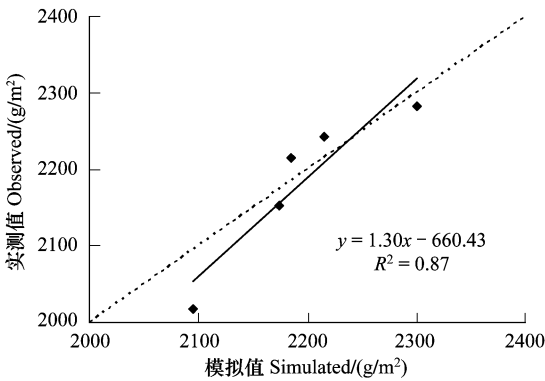


图 4 土壤 TOC 模拟值与实测值间的关系
Fig. 4 Relationship between observed and simulated values of soil TOC

变化(表 2,表 3),在每个时段的作物轮作和耕作模式影响下,土壤活性、慢性、惰性有机碳库和 TOC 都发生了显著变化(图 5)。

B1 时段 在 1959 年前,研究区土壤 TOC 及 3 个碳库处于原始平衡状态,土壤碳动态主要受气温、降水等自然因素的影响和低强度放牧的干扰,土壤总有机碳变异性较小(表 3)。1959 年研究区自然状态被打破,原始灌木林地被开垦为耕地,土壤有机碳也发生了变化(图 6)。

B2 时段 阜北农场 B2 时段土地耕作时间为 1959—1984 年,作物种植制度为小麦和玉米轮作,耕作方式为作物秸秆被移除作为燃料使用,但每年施有机粪肥。B2 时段土壤活性、慢性有机碳库和 TOC 在土地被开垦初的 2a 增加幅度较大,随后又开始迅速下降,5a 后下降趋势开始逐渐趋缓;土壤惰性有机碳库变化幅度较小,但其变化趋势也是先增加后逐渐减小(图 6)。B1 时段土壤碳的变化主要受施肥和作物耕作方式的影响。由于 1 年生作物(小麦和玉米)地上生物量和地表凋落物量要大于荒漠灌木林地,而且在种植 1 年生作物的最初 2a 作物产量较低,被收获的生物量较小,同时还施用了有机粪肥,因此在研究区土地被开垦初的 2a 土壤碳含量要明显高于开垦前的原始灌木林地,但随着小麦和玉米产量的不断增加和作物秸秆被移除,土壤碳的累积效率不断降低。

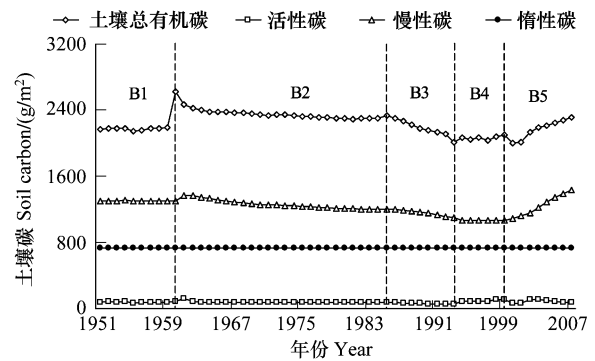


图 5 研究区人工绿洲开发及农业管理模式影响下土壤 TOC 和 3 个碳库随时间的变化

Fig. 5 Variation over the years in soil TOC and in three organic carbon pools under the influence of land reclamation and management patterns

表 3 研究区人工绿洲不同时段土壤 TOC 变化的描述性统计

Table 3 Descriptive statistical of soil TOC change under the different blocks in study area

项目 Item	时段 Blocks				
	B1	B2	B3	B4	B5
均值 Mean /(g/m ²)	2169.7	2355.9	2212.8	2050.7	2181.3
标准差 Standard Deviation	10.83	76.71	82.27	26.40	120.52
最大值 Max /(g/m ²)	2180.7	2625.6	2333.0	2081.6	2348.4
最小值 Min /(g/m ²)	2147.1	2188.1	2107.8	2010.7	1999.3
变异系数 Coefficient of Variation %	0.50	3.26	3.72	1.29	5.53

注: B1 时段为平衡状态,时间段为 1950—1958 年

B3 时段 B3 时段为 1985—1992 年,经济收益较高的棉花取代了小麦和玉米成为研究区主要的作物类型。该时段作物的秸秆仍被移除,但肥料种类发生了变化,以施用少量无机化肥为主。B3 时段土壤活性、慢性有机碳库和 TOC 都出现了快速的下降,但惰性有机碳库下降的幅度较小,这主要是因为 B3 时段棉花的秸秆被移除,化肥使用量也较小,致使土地出现了掠夺式的经营,导致土壤碳储量出现了大幅度的下降(图 6)。

B4 时段 B4 时段为 1993—1998 年,作物类型仍为棉花,但施肥管理和耕作方式发生了变化,棉花秸秆不再被移除,而是实施了粉碎还田的利用方式,同时无机化肥使用量逐步增加。B4 时段土壤活性有机碳库和 TOC 有所增加,尤其活性有机碳库增加幅度较大,这主要是由于棉花秸秆粉碎还田技术实施后增加了地表凋落物的生物量,而由地表凋落物产生的土壤腐殖质又是活性有机碳库的主要来源,所以其增加幅度较大;土壤慢性和惰性有机碳库在 B4 时段内变化不明显(图 6)。

B5 时段 B5 时段为 1999—2008 年,经济效益更好的葡萄取代了棉花成为阜北农场的主要作物类型。由于葡萄属多年生作物,实行免耕种植,其耕作方式完全不同于 1 年生作物;同时,阜北农场从 20 世纪 90 年代末开始实施了更科学的施肥方式,即根据作物不同生长阶段的养分需求进行施肥的“科学测土配方施肥技术”,这使得研究区施肥方式更加合理。B5 时段土壤活性有机碳库变化幅度较大,在葡萄种植的前 2a 土壤活

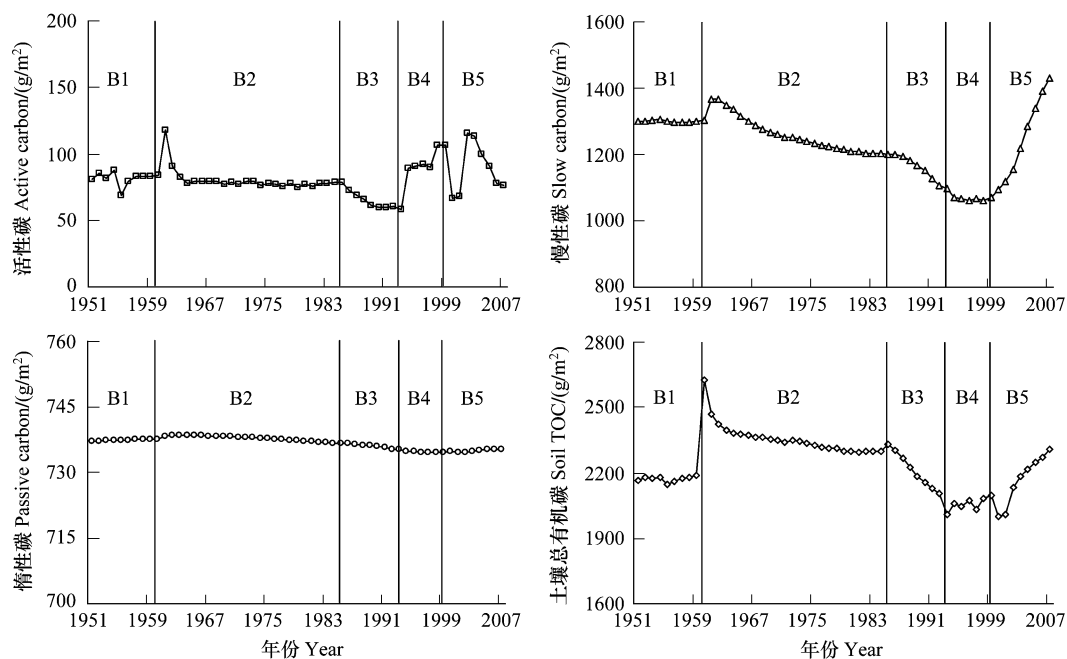


图6 不同模拟时段土壤活性、慢性和惰性有机碳库及 TOC 随时间的变化

Fig. 6 Variation in active, slow, and passive carbon pools and soil TOC under different simulation periods

性碳库较小,随后快速增加,5a 后开始逐步减小,这主要是因为葡萄前 2a 属于苗期,其地表和地下生物量都很小,所以活性碳库较低;葡萄在生长期的第 3 年开始结果实,此时无机化肥的用量开始增加,这导致土壤活性碳库又出现了快速的上升;其后随着葡萄果实产量的逐年增加,使得返回土壤的生物量减少,故而活性有机碳出现了逐年下降的趋势。土壤慢性和惰性有机碳库呈逐年增加的趋势,其中慢性碳库增加幅度较大,这主要是因为多年生作物的免耕种植方式及科学的施肥技术有利于慢性有机碳的累积。由于慢性有机碳库占 TOC 的比重最大,所以土壤 TOC 变化趋势与慢性有机碳库相似,呈持续增加的趋势。总之,B5 时段土壤有机碳变化受多种因素的影响,包括作物生长特点、耕作和管理方式、土壤微生物活动、气温和降水等,但其中最重要的影响因素为作物生长特点和人类耕作与管理方式。

研究区荒漠灌木林地被开垦为人工绿洲后,经过了 50a 的人类耕作活动影响,CENTURY 模型模拟结果显示,土壤 TOC 经历了 B2 时段的缓慢下降、B3 时段的急剧下降、B4 时段企稳到最后 B5 时段回升的变化过程,最终绿洲土壤 TOC 库超过了开垦前原始自然状态下的 TOC 库,土壤碳总体呈“碳汇”趋势。

3 讨论

3.1 近 50a 人工绿洲土壤 TOC 变化分析

研究区人工绿洲开垦前的土地覆被类型为荒漠灌木林地,土壤类型为盐分含量高而养分含量低的灰漠土。经过人类大规模的水土开发,包括灌溉、排盐、防护林种植等,在原始荒漠景观中建立了以 1 年生作物为主要植被类型的人工绿洲。随着土地政策和市场价格的变化,1 年生作物又逐渐转变为多年生作物。在 50a 的人类耕作活动影响下,土壤 TOC 发生了显著的变化,图 7 为研究区不同模拟时段土壤总有机碳的均值变化。从 B2 到 B4 时段平均土壤 TOC 呈下降趋势,但 B2、B3 和 B5 时段平均土壤 TOC 均高于 B1 时段,尤其在 B5 时段平均土壤 TOC 具有明显的增加趋势,这主要是因为 B5 时段研究区开始大面积种植多年生作物葡萄,由于多年生植被生长季要长于 1 年生植被,其生物量总体也较高,其回归土壤的落叶和其它有机残留物要多于 1 年生植被,同时多年生作物的免耕种植方式降低了土壤耕作强度,有效的保护了土壤团聚体的结构,增强了团聚体的稳定性,有利于土壤有机碳的积累^[26-27]。因此,CENTURY 模型模拟结果表明:研究区荒漠灌木林地被开垦为人工绿洲后的 50a,平均土壤 TOC 呈先增后减再增的“N”型变化趋势,但最终土壤 TOC 超过了原

始自然状态下的 TOC,且 2008 年土壤 TOC 比原始荒漠状态增加 7.74%,说明研究区土壤碳总体呈“碳汇”趋势,这与在热带地区将森林开垦为耕地后土壤有机碳随土地耕作时间增长而逐步降低^[4, 7, 28]的结论不同;也与在尼日利亚半干旱稀树草原地区和中国北部半干旱草原地区持续耕作条件下土壤逐步退化^[10, 29-30]的结论相反。

3.2 人工绿洲开垦初期土壤 TOC 变化分析

研究区荒漠灌木林地开垦为人工绿洲后,在最初的 2a 中,土壤 TOC 快速增加,随后呈逐渐下降的趋势,这与热带森林开垦为耕地、中国北部温带半干旱草原开垦为耕地及非洲 Savanna 半干旱稀树草原开垦为耕地后土壤有机碳在最初的几年内出现大幅下降^[4, 7, 10, 28-30]的结果完全不同。这主要是由于研究区开垦前为荒漠灌木林地,其植被覆盖度仅为 8%—25%^[31],大部分地表为盐碱含量很高的裸地(图 2),因此其平均土壤有机碳含量较低,开垦后种植的 1 年生作物土壤有机质和养分元素形成、分解和积累明显不同于原始灌木林地土壤,因为

人类耕作活动参与了养分的循环,生物量较高的人工植被的落叶和残体是土壤有机质的主要来源,这完全不同于生物量极低的荒漠灌木林植被作为自然土壤有机质的来源^[20];同时,研究区土地还施入了有机粪肥,这有利于提高土壤碳含量,尤其能显著提高土壤活性有机碳的含量。总之,研究区人工绿洲是建立在养分循环系统功能较弱的荒漠灌木林地上之的,所以在养分循环系统功能相对较强的一年生作物种植的前两年土壤有机碳含量出现了快速的增加,而之后的下降主要是由于人类不合理的耕作活动所致。

由于研究区土地开垦初期没有土壤有机碳实测数据,仅有零星的关于有机碳变化趋势的描述,在土地被开垦后最初的几年土壤有机碳迅速增加的结论主要依赖于模型模拟得出,虽然该结论与相关描述的变化趋势一致,但缺乏实测数据的验证。因此,今后应加强相关试验,以验证研究区土地开垦初期模型模拟结果的精度。

3.3 绿洲农业管理模式变化对土壤碳动态的影响

研究区人工绿洲开发后的 50a,土壤有机碳经历了缓慢下降、急剧下降、企稳到最后回升的变化(图 5),这主要是受研究区作物轮作制度、耕作方式等农业管理模式变化的影响。研究区人工绿洲农业管理模式主要可以归纳为三个方面:一是作物轮作制度的变化,即由 B2 到 B4 时段的 1 年生作物转变为 B5 时段的多年生作物;二是作物秸秆利用方式的改变,研究区作物秸秆的利用方式从早期移除作为燃料使用转变为后期粉碎还田,其利用方式越来越合理,这有效提高了有机残体的分解速度和土壤有机质的合成速度;三是施肥方式的变化,研究区施肥方式也由开垦初期施用有机粪肥转变为施用无机化肥,20 世纪 90 年代末开始推行科学测土配方施肥技术,科学施肥逐步得到普及。因此,不同时段作物轮作制度、秸秆利用和施肥方式决定了土壤有机碳的动态变化,尤其在种植了多年生作物葡萄后,实施了免耕种植方式,土壤 TOC 开始迅速增加,说明干旱区人工绿洲在实行保护性耕作措施(如秸秆粉碎还田、免耕、测土配方施肥等)后,其固碳效应非常明显,如果这些保护性耕作措施能够在干旱区绿洲得到全面普及,其土壤碳汇潜力巨大,这对保护干旱区土壤资源、提高土壤质量、增加土壤碳截存和减缓温室效应具有重要意义。

4 结论

中国西北干旱区流域生态系统一直受到人类活动的强烈影响,人工绿洲开发及绿洲农业管理模式变化使得土壤碳库发生了显著变化。CENTURY 模型结果显示:(1)CENTURY 模型适合于进行干旱区绿洲土壤有机碳动态模拟,模拟精度满足要求;(2)当模型模拟的土壤碳积累达到平衡状态时,其活性、慢性和惰性有机碳库分别占总有机碳的 3.78%、61.41% 和 34.81%,说明研究区土壤碳库主要以慢性和惰性有机碳库为主;(3)

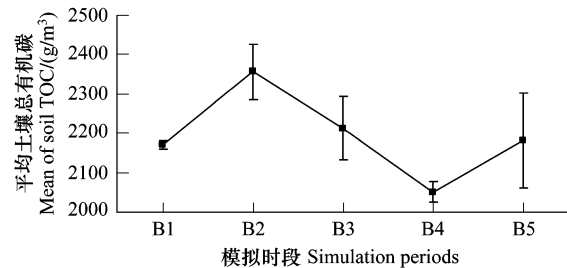


图 7 不同模拟时段土壤总有机碳的均值变化

Fig. 7 Change in mean values of soil TOC under different simulation periods

注:误差线表示标准偏差

不同时段作物轮作制度、秸秆利用和施肥方式决定了研究区土壤有机碳的动态变化,研究区人工绿洲被开发后的 50a,土壤有机碳经历了缓慢下降、急剧下降、企稳到最后回升的变化,平均土壤 TOC 呈先增后减再增的“N”型变化趋势,但最终土壤 TOC 超过了原始自然状态下的 TOC,而且 2008 年 TOC 比原始自然状态增加 7.74%,说明研究区土壤有机碳总体呈“碳汇”趋势,尤其在研究区实施了免耕、秸秆粉碎还田、科学测土配方施肥等保护性耕作措施后,土壤固碳效应非常明显,这完全不同于热带森林、中国北部温带半干旱草原及非洲 Savanna 半干旱稀树草原开垦为耕地后土壤有机碳为“碳源”的趋势。

致谢: 感谢美国马里兰大学的王秀君老师和法国气候与环境国家实验室的李龙辉博士对本文写作的帮助。

References:

- [1] Schlesinger W H. Global change science. *Trends in Ecology and Evolution*, 2006, 21: 348-351.
- [2] IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Cambridge University Press; New York, 2007; 6-19.
- [3] Marland G, Garten C T, Post W M, West T O. Studies on enhancing carbon sequestration in soils. *Energy*, 2004, 29: 1643-1650.
- [4] Eswaran H, Van B E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 192-194.
- [5] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: process and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6: 317-327.
- [6] Follett R F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil & Tillage Research*, 2001, 61(1/2): 77-92.
- [7] Silveria A M, Victoria R L, Baliester M V, Camargo P B, Martinelli L, Piccolo M C. Simulation of the effects of land use changes in soil carbon dynamics in the Piracicaba river basin, Sao Paulo State, Brazil. *Brasilerira*, 2000, 35(2): 389-399.
- [8] Bouwman A F. *Soils and Greenhouse Effect*. Chichester: John Wiley Sons, 1990: 61-127.
- [9] Elberling B, Touré A, Rasmussen K. Changes in soil organic matter following groundnut-millet cropping at three locations in semi-arid Senegal, West Africa. *Agriculture. Ecosystems and Environment*, 2003, 96: 37-47.
- [10] Wang Y F, Chen Z Z, Tieszen L T. Distribution of soil organic carbon in the major grasslands of Xilinguole, Inner Mongolia, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(6): 545-551.
- [11] Fan Z L, Mu G J, Ma Y. Formation and development of the artificially irrigated oases in the northern piedmont of the Tianshan Mountains. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(2): 184-189.
- [12] Xu W Q, Luo G P, Chen X. Response of soil nutrients to the change of crop systems in the Oasis of Arid land. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(1): 167-172.
- [13] Parton W J, Stewart J W B, Cole C V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry*, 1988, 5: 109-131.
- [14] Song C H, Woodcock C E. A regional forest ecosystem carbon budget model: impacts of forest age structure and landuse history. *Ecological Modelling*, 2003, 164: 33-47.
- [15] Foereid B, Hogh J H. Carbon sequestration potential of organic agriculture in northern Europe: a modeling approach. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 68: 13-24.
- [16] Xiao X M, Wang Y F, Chen Z Z. Dynamics of primary productivity and soil organic matter of typical steppe in the Xilin river basin of Inner Mongolia and their response to climate change. *Acta Botanica Sinica*, 1996, 38(1): 45-52.
- [17] Huang Z L. Application of a CENTURY model to management effects in the productivity of forests in Dinghushan. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2): 175-179.
- [18] Gao L P, Liang W J, Jiang Y, Wen D Z. Dynamics of organic C in black soil of Northeast China, simulated by CENTURY model I. Accumulation of soil organic carbon under natural conditions. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, (5): 36-40.
- [19] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, Liang A Z, Shen Y. Simulation on dynamics of soil organic carbon under the effect of tillage and water erosion. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 730-735.
- [20] Luo G P, Chen X, Xu W Q. Soil properties related to land-use systems in oases of Sangong river watershed, Xinjiang. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18: 483-498.
- [21] Mann L K. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Science*, 1986, 142: 279-288.
- [22] Parton W J, Rasmussen P E. Long-term effects of crop management in wheat-fallow II. Century model simulations. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 530-536.
- [23] Leite L F C, Mendonça E S, Machado P L O A, Filho E I F, Neves J C L. Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-tillage and disc-plow systems using the Century model. *Geoderma*, 2004, 120: 283-295.
- [24] Tornquist C G, Mielniczuk J, Cerri C E P. Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibirubá (Brazil) with the Century Model. *Soil &*

- Tillage Research, 2009, 105(1): 33-43.
- [25] Parton W J, Stewart J W B, Cole C V. Dynamics of C, N, P e S in grassland soils: a model. Biogeochemistry, 1988, 5: 109-131.
- [26] Birda S B, Herricka J E, Wanderb M M, Wright S F. Spatial heterogeneity of aggregate stability and soil carbon in semi-arid rangeland. Environmental Pollution, 2002, 116: 445-455.
- [27] Johna B, Yamashitac T, Ludwigb B, Flessa F. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. Geoderma, 2005, 128: 63-79.
- [28] Martinez L J, Zinck J A. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. Soil & Tillage Research, 2004, 75: 3-17.
- [29] Jaiyeoba I A. Changes in soil properties due to continuous cultivation in Nigerian semiarid Savannah. Soil & Tillage Research, 2003, 70: 91-98.
- [30] Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H, Zhao X Y. Soil properties following cultivation and non-grazing of a semi-arid sandy grassland northern China. Soil & Tillage Research, 2004, 75: 27-36.
- [31] Zhao C Y, Song Y D, Wang Y C, Jiang P A. Analysis on the dynamics of desert-oasis vegetation in the Sangong river basin. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(2): 249-254.

参考文献:

- [10] 王艳芬, 陈佐忠, Tieszen L 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. 植物生态学报, 1998, 22(6): 545-551.
- [11] 樊自立, 穆桂金, 马英杰, 马映军. 天山北麓灌溉绿洲的形成和发展. 地理科学, 2002, 22(2): 184-189.
- [16] 肖向明, 王义风, 陈佐忠. 内蒙古锡林河流域草原初级生产力和土壤有机质的动态及其对气候变化的反映. 植物学报, 1996, 38(1): 45-52.
- [17] 黄忠良. 运用 Century 模型模拟管理对鼎湖山森林生产力的影响. 植物生态学报, 2000, 24(2): 175-179.
- [18] 高鲁鹏, 梁文举, 姜勇, 闻大中. 利用 CENTURY 模型研究东北黑土有机碳的动态变化 I. 自然状态下土壤有机碳的积累. 应用生态学报, 2004, (5): 36-40.
- [19] 方华军, 杨学明, 张晓平, 梁爱珍, 申艳. 耕作及水蚀影响下坡耕地土壤有机碳动态模拟. 土壤学报. 2006, 43(5): 730-735.
- [31] 赵成义, 宋郁东, 王玉潮, 蒋平安. 三工河流域荒漠绿洲植被动态及其成因分析. 应用生态学报, 2004, 15(2): 249-254.