

长期不同施肥对新疆荒漠农田土壤碳含量及其剖面分布的影响

向 姣^{1,2,3}, 王著峰⁴, 王玉刚^{1,2,3}, 冯文婷^{1,4}

(1.中国科学院新疆生态与地理研究所,荒漠与绿洲生态国家重点实验室,
乌鲁木齐 830011;2.中国科学院阜康荒漠生态系统国家野外科学观测站,新疆 阜康 831505;
3.中国科学院大学,北京 100049;4 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081)

摘要: 以建于 1990 年的新疆阜康荒漠生态系统观测研究站的长期施肥定位试验为平台,分析了不施肥(CK)、单施化肥(化肥常规 NPK 和化肥高量 N2P2K)、化肥配施秸秆(化肥配施秸秆常规 NPKS 和化肥配施秸秆高量 NPKS2)和化肥配施猪粪(NPKM)对农田土壤有机碳和无机碳含量与剖面分布及有机碳热稳定性的影响。结果表明:(1)长期施肥处理提高了土壤有机碳含量,其中耕层(0—20 cm)土壤有机碳响应最敏感,化肥配施秸秆还田处理下有机碳积累高于其他处理。(2)长期施肥处理均降低土壤有机碳稳定性,表明增加的土壤有机碳并不利于碳稳定。(3)长期施肥处理降低土壤无机碳含量,其降低程度随剖面呈下降趋势,可能由于灌溉淋洗导致深层土壤无机碳的净增加。(4)尽管长期施肥促进土壤有机碳累积,但由于降低无机碳含量及其储量,最终导致土壤全碳降低,表明土壤无机碳变化对干旱区土壤碳库变化具有决定性作用。结果表明,深入理解施肥措施对干旱区盐碱土的碳影响,需要同时考虑不同深度土壤有机碳和无机碳含量的变化。

关键词: 长期试验; 秸秆还田; 土壤剖面; 盐碱土; 无机碳; 有机碳稳定性; 热学分析

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)04-0333-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.041

Effects of Long-term Different Fertilizations on Soil Carbon Content and Profile Distribution in Desert Cropland in Xinjiang

XIANG Jiao^{1,2,3}, WANG Zhufeng⁴, WANG Yugang^{1,2,3}, FENG Wenting^{1,4}

(1.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011; 2.National Fukang Desert Ecosystem Field Science Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Fukang, Xinjiang 831505; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 4.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The croplands in arid regions are characterized by saline-sodic soils, low content of soil organic carbon (SOC), and large proportions of soil inorganic carbon (SIC). Both SOC and SIC are influenced by agricultural management. However, it remains unclear that how the stock and stability of SOC and SIC at different soil depths vary after long-term fertilizations. We investigated the vertical patterns of soil carbon (C) change and SOC stability in six fertilization treatments (e.g., CK, NPK, N2P2K, NPKS, NPKS2, and NPKM) in the Fukang Station for Desert Ecological Research, Chinese Academy Sciences. The results showed that: (1) The contents and stocks of SOC in the tilled layer (0—20 cm) increased after 31-year fertilizations, especially in the treatment of chemical fertilizer combined with straw returning, which could be due to high plant C inputs. (2) In addition, the thermal stability of SOC decreased in all the fertilization treatments, suggesting that increased SOC after long-term fertilizations might be vulnerable to environmental changes and would promote the transformation of soil nutrients. (3) The contents and stocks of SIC decreased in different fertilization treatments, and the decreases in SIC reduced along soil profiles, resulting in the increment of SIC to the depth of 60 cm, which might be caused by irrigation. (4) Despite the increases in SOC after the long-term fertilizations, the decreases in SIC led to the loss of soil total C, demonstrating that the changes in SIC determine the net changes in soil C in the arid regions. Overall, the results of this

study suggest to estimate accurately the changes in soil C in the arid regions, we need to understand changes in both SOC and SIC and their stabilities at different soil depths.

Keywords: long-term experiment; straw returning; soil depth; saline-sodic soil; inorganic carbon; soil organic carbon stability; thermal analysis

土壤碳库是陆地生态系统最大的碳库,土壤碳库的微小变化直接影响陆地碳循环以及二氧化碳与气候变化的反馈效应^[1]。在陆地生态系统碳库中,农业土壤碳库是受人为活动强烈干扰,又能在较短时间尺度发生变化的碳库^[1]。土壤碳库包括有机碳(SOC)库和无机碳(SIC)库,其中土壤有机碳与土壤多种功能相关,如土壤肥力和保水蓄水等。农田生态系统的土壤有机碳提升不仅促进土壤的固碳减排和养分转化,也调控土壤的其他功能^[1-2]。由于土壤有机碳组分多样,周转速率相差很大,从数天到数百年甚至上千年,且对土地利用方式变化的响应较为敏感,受到广泛关注^[2-3]。土壤无机碳由于周转时间较长(约 1 000~10 000 年),短时期内变化小,对土壤无机碳变化的关注较少。然而,干旱区盐碱土的无机碳储量占土壤碳库比例大,约为 30%~70%,且随着土层深度增加而增加^[4]。由于干旱区面积较大,约占陆地面积的 30%^[5],干旱区土壤无机碳的变化可能引起土壤碳库的较大波动,且不同剖面土壤有机碳和无机碳对农田管理措施的响应也具有较大差异^[3-4]。因此,同时研究土壤有机碳和无机碳的剖面分布及其消长特征对理解干旱区农业生态系统土壤碳循环具有重要意义。

施肥是提升土壤有机碳常见的农田管理措施,但是不同施肥措施及其与秸秆还田的配合施用对不同剖面土壤有机碳的影响并不一致。李晨华等^[6]研究发现,长期施肥模式下阜康绿洲农田土壤耕层(0—20 cm)土壤有机碳含量增加 14%~56%,深层(20—60 cm)土壤有机碳含量减少 15%~33%,而单施化肥与化肥配施秸秆处理对深层(60—300 cm)土壤有机碳含量的影响也存在显著差异。但是,徐虎等^[7]研究发现,长期秸秆还田显著提高山西褐土 0—20 cm 土层有机碳含量,而剖面 40—60 cm 土壤有机碳含量显著降低。施肥不仅改变土壤有机碳含量,还能影响土壤有机碳稳定性。土壤有机碳稳定性是评价土壤质量的重要指标,与土壤有机碳的周转变化的紧密相关^[8]。土壤有机碳热稳定性是评价土壤有机碳稳定性的指标之一,与土壤有机碳分解和矿化速率高度相关,直接影响有机碳的动态变化^[8]。土壤有机碳的热稳定性,即有机碳在受热条件下抵抗外界分解的能力,受土壤有机碳化学组成、成土母质、矿物组成、土壤结构以及管理措施等影响^[9]。关于不同施肥管理措施下土壤有机质热稳定性如何变化,目前尚不清楚。

通过全球整合分析,Zamanian 等^[10]研究发现,长期施用氮肥导致农田土壤 CO₂ 排放量增加 7.48×10^{12} g/a,主要因为土壤酸化可能导致无机碳的溶解。但是,也有研究^[3]认为,土壤无机碳含量可能并没有减少,而是被灌溉水等淋洗到耕层以下。目前并不清楚不同施肥处理后农田土壤无机碳的剖面分布特征,也不清楚土壤无机碳库的变化如何影响土壤全碳。因此,需要比较不同施肥措施下干旱区土壤剖面无机碳的变化。

本研究选取新疆阜康地区长期施肥(31 年)农田盐碱土剖面,分析不同施肥处理下土壤有机碳及无机碳含量及储量的剖面分布特征,并且以农田开垦前的原生荒漠作为参考,估算长期施肥后不同处理下盐碱土有机碳和无机碳的变化,评估不同处理下土壤有机碳稳定性的差异。研究结果对明确施肥和秸秆还田管理措施对干旱区农田盐碱土碳库的影响具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院新疆阜康荒漠生态系统观测研究站内(44°17'N,87°56'E),该站坐落于新疆天山山脉东部博格达峰北麓,准噶尔盆地东南缘的荒漠—绿洲交错带。气候区域属于典型的温带荒漠大陆性气候,夏季高温少雨,冬季严寒干燥。年均气温 6.6~7.0 °C,年均降水量 88~246 mm,年均蒸发量高达 1 780~2 460 mm,无霜期约 170 天。研究站内的农田土壤类型为灰漠土。耕层(0—20 cm)土壤的砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 22.7%,69.7%和 7.6%;pH 为 8.8~9.1,全盐含量为 21.0~90.0 g/kg,土壤有机质含量为 0.6%~1.7%^[11]。由于邻近古尔班通古特沙漠南缘,耕地土壤相对贫瘠,土壤肥力低下,作物生长发育受到极大限制。

1.2 试验设计

以绿洲农田广泛采用的施肥处理措施为依据,于 1990 年开始土壤长期定位试验。试验包括 6 个施肥处理,分别为不施肥(CK)、单施化肥(化肥常规 NPK 和化肥高量 N2P2K)、化肥配施秸秆(化肥配施秸秆常规 NPKS 和化肥配施秸秆高量 NPKS2)和化肥配施猪粪(NPKM)。氮、磷、钾肥分别选用尿素(CO(NH₂)₂)、过磷酸钙(Ca(H₂PO₄)₂)和硫酸钾(K₂SO₄)。氮肥每年分基肥和追肥 2 次施入,各占 50%,而磷肥和钾肥均作为基肥一次性施加。化肥配施秸秆处理是在施加

无机肥的基础上,将收获的冬小麦秸秆于播种前定量还田。试验采用裂区设计,每个处理重复 3 次,共 18 个小区,每个小区 33 m²。种植作物为冬小麦,每年 9 月种植,翌年 7 月收获。除施肥外,其他的农田管理措施与当地管理措施保持一致。每个施肥处理下的具体施用量见表 1。

表 1 长期不同施肥处理的施肥量
单位:kg/(hm²·a)

类型	处理	无机肥			有机肥
		氮肥	磷肥	钾肥	
单施化肥	CK	0	0	0	0
	NPK	150	75	60	0
	N2P2K	300	150	60	0
化肥配施秸秆	NPKS	150	75	60	300(秸秆,S)
	NPKS2	150	75	60	600(秸秆,S)
化肥配施猪粪	NPKM	150	75	60	150(猪粪,M)

1.3 土壤样品采集

2021 年 7 月(冬小麦收割后)利用土钻采集 0—20,20—60 cm 土壤样品,带回实验室,去除植物根系、石子等杂物,置于阴凉处自然风干,研磨并过 2 mm 土壤筛,装袋备用。

1.4 土壤样品分析

1.4.1 土壤基本性质分析 土壤 pH 和电导率通过电位法测定,土壤全氮通过元素分析仪(Vario MACRO CNS,德国 Elementar 公司)测定,土壤铵态氮和硝态氮含量通过流动分析仪(Smart chen/SealAA3)测定。鉴于小区面积小,土样采集破坏性较大,通过环刀法仅测定 0—20 cm 剖面的土壤容重。

1.4.2 土壤有机碳和无机碳分析 土壤全碳含量通过元素分析仪测定,土样研磨过 0.15 mm 土壤筛后上机测定。土壤有机碳含量采用“酸洗法”测定,将土样与 1 mol/L 的 HCl 溶液混合(土液比为 1:10),摇匀后在振荡器上振荡 30 min,然后静置 12 h 以去除 CaCO₃;以 4 000 r/min 离心机中离心 4 min,去除上清液,继续加入等体积的去离子水,并离心,重复 3~4 次,直到上清液 pH 在 6~7 为止,表明盐酸已清洗干净;酸洗后的土样在 60 ℃ 下烘干至恒重,研磨过 0.15 mm 土壤筛后,上机测定得到土壤有机碳含量;土壤无机碳含量通过“差减法”计算得到,即全碳与有机碳的含量差值。

1.4.3 土壤有机碳热稳定性测定 同步热分析(thermal analysis)是一项可将热重分析与差热分析结合为一体,并可同时得到热重信号和热量信号的技术方法。相较于其他测定土壤碳稳定性的方法(如重铬酸钾氧化法、培养试验等),同步热分析方法测定时间短,而且由于同步热分析测定不受测试条件、样品制备和材料不均一性的影响,测试结果间的可比性

强,常运用于定量评估土壤有机质稳定性^[12]。

使用热学分析仪(STA 449 F3 Jupiter NETZSCH)在合成气氛(80% N₂+20% O₂)下,以 40 mL/min 流量进行同步热分析。将样品装入带盖的铂铑坩埚中,并使用相同材料的空坩埚作为参考。将样品从 40 ℃ 以 10 ℃/min 加热至 105 ℃,在此温度下保持 15 min 以去除土壤水分,然后以 10 ℃/min 的升温速率加热至 900 ℃。加热过程中释放的气体被传输至 LI-850 CO₂/H₂O 分析仪(LI-COR Biosciences, Lincoln NE)进行气体分析。使用 105~550 ℃ 作为土壤有机质燃烧释放 CO₂ 的温度范围,因为当温度高于 550 ℃ 以上,土壤无机碳燃烧产生 CO₂。选择 550 ℃ 作为有机碳和无机碳热稳定性之间的分界温度是基于使用烧失量(loss on ignition, LOI)法测定有机碳的常规温度^[12]。

1.5 数据处理

1.5.1 土壤碳储量计算 基于“固定深度”计算土壤碳储量的传统方法,忽视了不同时间和空间尺度上土壤容重差异所引起的土壤重量变化,会导致在估算土壤碳储量时产生偏差^[5]。由于研究样点不同施肥处理下土壤容重不同(表 1),为了校正这一偏差,采用“等效重量”法(equivalent soil mass, ESM)将不同土层中单位面积的土壤重量标准化,减小估算土壤碳储量的误差,提高精确度^[3,13-14]。

本研究中,采用 2 种方法计算不同土层中土壤碳(有机碳和无机碳)储量。计算步骤为:

(1)基于“固定深度”法计算土壤碳储量:

$$SC_{FD} = C_{con} \times BD \times D_i \times 10 \tag{1}$$

式中:SC_{FD} 分别为 SOC 和 SIC 的固定深度碳储量(g/m²);C_{con}分别为 SOC 和 SIC 含量(g/kg);BD 为土壤容重(g/cm³);D_i为土层厚度(cm)。

(2)选取原生荒漠土壤(desert)作为参考土壤,计算多余土壤重量:

$$M_{add} = M_{soil} - M_{ref} \tag{2}$$

式中:M_{add}为多余土壤重量(g/m²);M_{soil}为单位面积土壤重量(g/m²);M_{ref}为原生荒漠土壤重量(g/m²)。

(3)基于“等效重量”法计算土壤碳储量:

$$SC_{ESM} = SC_{FD} - M_{add} \times C_{sn} \times 10^3 \tag{3}$$

式中:SC_{ESM}分别为 SOC 和 SIC 的等效重量碳储量(g/m²);C_{sn}分别为实测最深土层(20—60 cm)的 SOC 和 SIC 含量(g/kg)。

1.5.2 土壤碳储量变化计算 土壤碳绝对变化速率和相对变化速率通过公式(4)和公式(5)计算获得。

$$C_{abs} = \frac{C_{t+\Delta t} - C_t}{\Delta t} \tag{4}$$

$$C_{\text{rel}}=\frac{C_{t+\Delta t}-C_t}{C_t\times\Delta t}\times100\%$$

(5)

式中: C_{abs} 为土壤碳储量的绝对变化速率($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$); C_{rel} 为土壤碳储量的相对变化速率($\%/a$); $C_{t+\Delta t}$ 为第 $t+\Delta t$ 年的土壤碳储量(g/m^2); C_t 为第 t 年的碳储量(g/m^2)。

通过公式(4)也计算了土壤碳储量在剖面 0—20,0—60 cm 的累积变化速率。

1.6 统计分析

本研究的数据处理和统计分析均通过软件 R 4.1.1 实现(R Core Team 2016)。通过“agricolae”包中的最小显著差异法(LSD.test),比较不同处理和剖面间

表 2 施肥 31 年后不同处理对阜康农田土壤基础理化性质的影响

处理	土层深度/cm	pH	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	铵态氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	硝态氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碳氮比
CK	0—20	8.99±0.04Aa	321.28±29.61Aa	67.09±5.10Aa	43.33±11.99ABa	0.51±0.05Ca	5.69±0.43Ba
	20—60	8.92±0.04ABa	303.75±8.19ABb	53.57±0.76Aa	11.85±3.37Ca	0.41±0.04Aa	4.54±0.401Aa
NPK	0—20	8.85±0.05Ba	271.90±11.18Ba	61.61±5.63Aa	13.88±2.96Ca	0.41±0.05Da	13.00±1.20Aa
	20—60	8.92±0.01ABa	291.43±13.54ABa	61.34±11.79Aa	23.72±4.08BCa	0.35±0.04Aa	7.67±1.11Ab
N2P2K	0—20	9.01±0.06Aa	252.97±7.73Ba	65.98±12.43Aa	42.05±12.23ABa	0.63±0.04Ba	5.61±0.26Ba
	20—60	9.03±0.06Aa	252.57±12.56Bb	66.46±3.09Aa	57.73±15.10Aa	0.43±0.05Ab	5.82±0.58Aa
NPKS	0—20	8.82±0.13ABa	772.04±340.94Aa	70.68±5.02ABa	39.00±9.61ABa	0.60±0.06BCa	12.66±0.32Aa
	20—60	8.94±0.11Aa	394.51±15.33Aa	68.73±6.82Ba	12.61±2.48Ba	0.77±0.49Aa	6.59±2.77Aa
NPKS2	0—20	8.58±0.17Ba	698.88±298.69Aa	61.99±2.61Ba	14.99±4.32Ba	0.72±0.01ABa	11.16±1.34Aa
	20—60	8.90±0.08ABa	316.38±4.59Aa	70.19±4.49ABa	26.85±10.13ABa	0.62±0.15Aa	4.09±0.61Ab
NPKM	0—20	8.98±0.04Aa	325.57±41.20Aa	85.21±4.61Aa	39.90±8.12ABa	0.77±0.03Aa	5.63±0.29Ba
	20—60	9.08±0.12Aa	352.70±4.70Aa	68.05±4.51Ba	45.67±17.37Aa	0.47±0.01Ab	5.20±0.20Aa

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一处理在不同土层深度间差异显著($p<0.05$);同行不同大写字母表示不同处理在相同土层间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 土壤碳含量及储量变化

与 CK 相比,长期不同施肥处理显著提高耕层土壤有机碳(SOC)含量(表 3),其中化肥配施秸秆(NPKS 和 NPKS2)处理 SOC 含量的增幅最大,而其他处理间无显著差异($p>0.05$),表明在施用等量化肥条件下,化肥配施秸秆更有利于提高 SOC 含量。不同施肥处理下 SOC 含量沿着剖面均下降,耕层(0—20 cm)SOC 含量(3.50~8.05 g/kg)显著大于深层(20—60 cm,2.36~2.56 g/kg),且耕层 SOC 含量占全碳的比例显著高于 CK 处理,表明长期施肥处理更有利于耕层 SOC 含量提升(图 1a)。

长期施肥后,不同处理 SIC 含量均呈下降趋势(表 3)。与 CK 相比,化肥配施秸秆处理耕层 SIC 含量显著降低,而其他施肥处理对 SIC 含量的影响不显著($p>0.05$),SIC 含量整体沿着剖面呈增加趋势($p<0.05$)。

长期施肥处理显著增加耕层(0—20 cm)SOC 储量(图 2a),其中化肥配施秸秆处理 SOC 储量的提升幅度最大($p<0.05$)。不同施肥处理 SOC 储量沿着剖面均

的土壤碳含量及储量差异。通过单一样本 t 检验比较土壤碳储量变化速率与零的显著性差异。采用 Origin 2017 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤基础理化性质

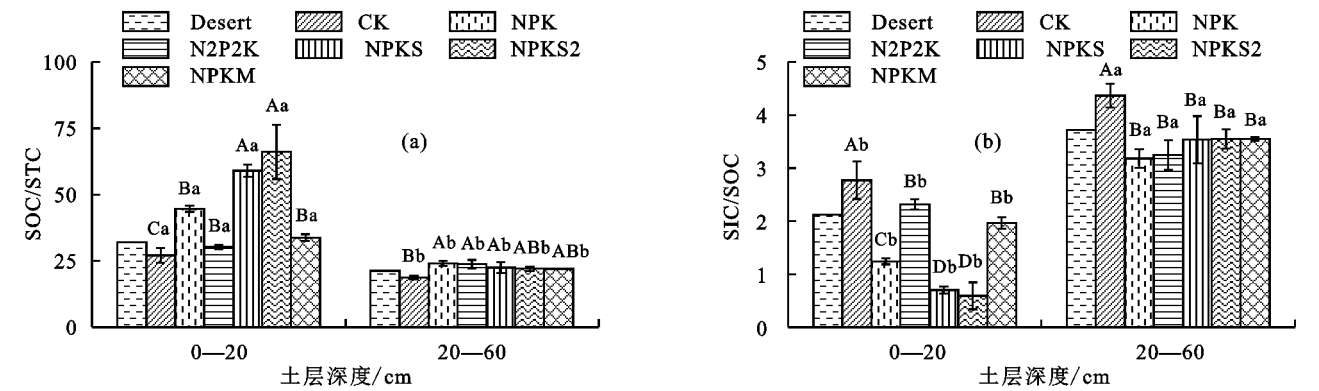
从表 2 可以看出,原生荒漠土壤容重为 1.30 g/cm^3 ,化肥配施秸秆还田处理下的土壤容重为(1.29±0.08) g/cm^3 ,其他处理下的土壤容重为(1.49±0.03) g/cm^3 。长期不同施肥处理下耕层土壤电导率降低 17.00~75.13 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。长期不同施肥处理对耕层土壤 pH 影响不显著($p>0.05$)。除 NPK 处理外,长期不同施肥处理下耕层土壤全氮含量增加 0.09~0.25 g/kg ($p<0.05$)。

呈递减趋势,耕层 SOC 储量为 958~2 079 g/m^2 ,深层(20—60 cm)SOC 储量仅为 611~683 g/m^2 。

表 3 施肥 31 年后不同处理对阜康农田土壤碳含量的影响
单位: g/kg

处理	SOC		SIC	
	0—20 cm	20—60 cm	0—20 cm	20—60 cm
Desert	4.17±0	2.46±0	8.86±0	8.93±0
CK	2.78±0.17Ca	1.82±0.03Bb	7.95±0.39ABa	7.87±0.21Aa
NPK	5.08±0.21Ba	2.43±0.17Ab	6.60±0.24Bb	8.15±0.25Aa
N2P2K	3.75±0.26BCa	2.49±0.16Ab	7.87±0.21ABa	7.76±0.26Aa
NPKS	7.63±0.74Aa	2.37±0.08Ab	3.42±1.82Db	8.31±0.83Aa
NPKS2	8.05±1.01Aa	2.36±0.18Ab	4.24±1.35Cb	8.31±0.28Aa
NPKM	4.33±0.32Ba	2.42±0.08Ab	8.44±0.23ABb	8.58±0.19Aa

与开垦前荒漠土壤相比,耕层 SIC 储量显著降低,而心土层 SIC 储量无显著变化(图 2b)。不同施肥处理中,耕作层 SIC 储量整体表现为 NPKM>N2P2K>NPK>NPKS>NPKS2。化肥配施秸秆处理 SIC 储量沿着剖面呈增加趋势(1 111~2 161 g/m^2),而其他处理的 SIC 储量在剖面间分布无显著变化($p>0.05$)。



注:图中不同小写字母表示在不同土壤剖面间差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$).下同。

图 1 施肥 31 年后不同处理对阜康农田土壤有机碳比例的影响

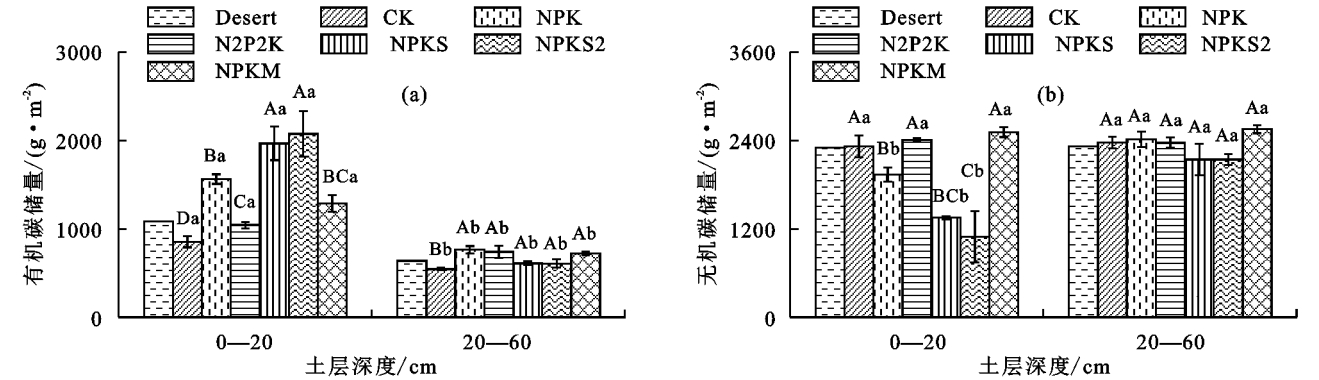


图 2 施肥 31 年后不同处理下阜康农田土壤碳储量的剖面分布

基于“固定深度”法和“等效重量”法计算的土壤不同剖面碳储量见表 4。在 0—60 cm 剖面,2 种方法计算的碳储量差异较大,为-20~430 g/m²。“固定深度”法估算的单施化肥和化肥配施猪粪处理土壤碳

储量均高于“等效重量”法,而“固定深度”法计算的化肥配施秸秆处理土壤碳储量低于“等效重量”法的结果。表明常用的“固定深度”法低估化肥配施秸秆处理的土壤碳储量,而高估其他处理的土壤碳储量。

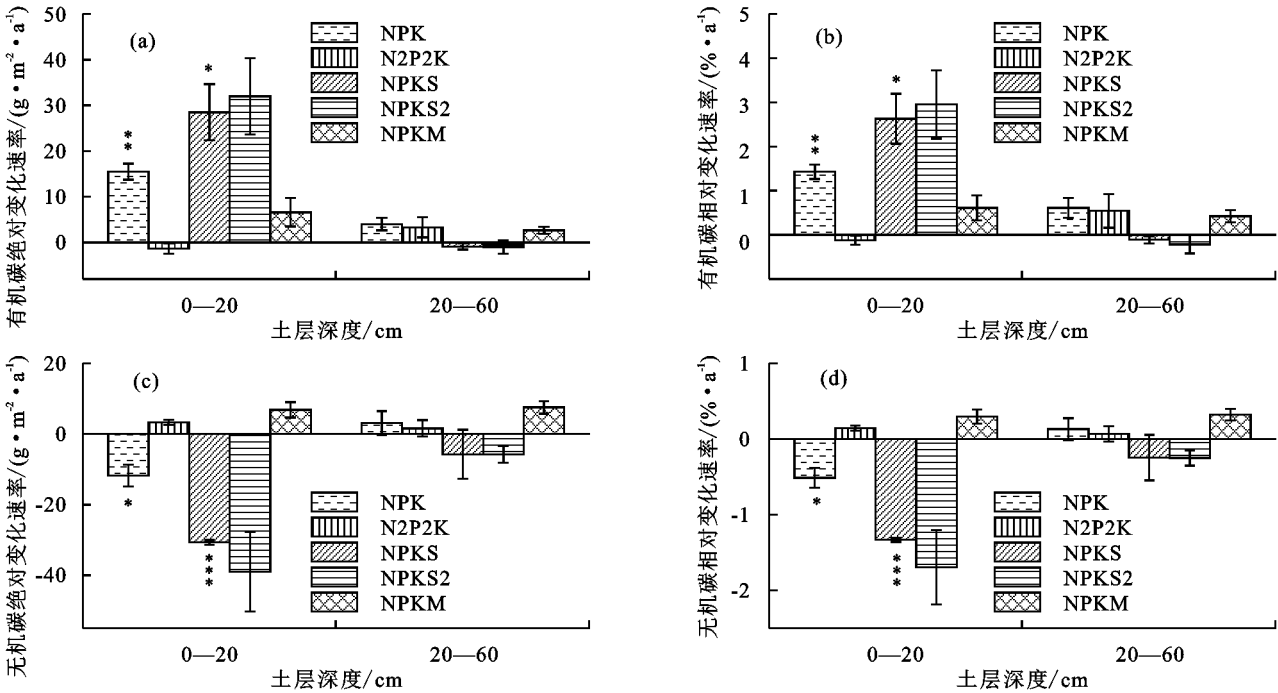
表 4 基于不同计算方法对阜康农田土壤碳储量结果的差异

处理	土层深度/cm	固定深度法/(g·m ⁻²)		等效重量法/(g·m ⁻²)	
		SOC	SIC	SOC	SIC
CK	0—20	853.27±63.43Da	2320.53±147.98Aa	792.17±66.12Da	2013.98±145.21Aa
	20—60	544.84±13.42Cb	2373.97±79.60ABa	483.74±16.08Bb	2067.42±68.40Aa
NPK	0—20	1564.50±55.02Ba	1938.19±94.63Bb	1484.61±59.75Ba	1600.93±92.62Bb
	20—60	762.98±42.72ABb	2417.87±105.04ABa	683.09±36.98Ab	2080.61±95.70Aa
N2P2K	0—20	1043.60±36.21Ca	2406.55±22.87ABa	958.51±27.50Ca	2097.20±21.25Aa
	20—60	741.37±68.77Ab	2370.89±71.71ABa	656.29±55.05Ab	2061.54±59.80Aa
NPKS	0—20	1967.68±190.01Aa	1352.05±20.18Cb	1972.07±189.90Aa	1367.69±18.80BCb
	20—60	610.34±20.44Bb	2143.68±214.67Ba	614.73±20.34Ab	2159.32±215.39Aa
NPKS2	0—20	2076.38±259.34Aa	1094.04±349.10Cb	2079.76±259.36Aa	1111.59±348.05Cb
	20—60	607.98±46.41BCb	2143.64±73.51Ba	611.36±46.39Ab	2161.18±74.56Aa
NPKM	0—20	1288.85±96.13BCa	2515.32±67.60Aa	1208.89±90.62BCa	2163.79±58.43Aa
	20—60	720.71±23.14ABb	2555.80±55.18Aa	640.75±17.88Ab	2204.27±42.92Aa

2.3 长期施肥处理后土壤碳储量的变化特征

连续施肥 31 年后,不同处理 SOC 储量的土壤剖面分布存在显著差异(图 3a、图 3b)。NPK 和 NPKS 处理耕层 SOC 储量较原生荒漠分别增加 15.49,28.50 g/(m²·a),年增幅分别为 1.43%,2.63%,而其他处理对耕层 SOC 储量的影响不显著($p>0.05$)。长期施肥

处理对深层 SOC 储量影响不显著($p>0.05$)。长期施肥处理降低 SIC 储量,且影响程度沿着剖面逐渐降低(图 3c、图 3d)。NPK 和 NPKS 处理,耕层 SIC 储量较原生荒漠分别降低 11.79,30.70 g/(m²·a),年降幅分别为 0.51%,1.33%。各施肥处理对深层 SIC 储量无显著影响($p>0.05$)。



注：* 表示 $p<0.05$ ；** 表示 $p<0.01$ ；*** 表示 $p<0.001$ 。下同。

图 3 施肥 31 年后不同处理下阜康农田土壤碳储量的绝对和相对变化速率

2.4 长期施肥处理后土壤碳储量的累积变化

经 31 年施肥处理, SOC 储量累积变化速率沿着剖面均逐渐增加(图 4a)。其中, NPK 和 NPKS 处理 0—20 cm 剖面 SOC 储量累积变化速率分别为 15.49, 28.50 g/(m²·a), 0—60 cm 分别为 11.98, 27.12 g/(m²·a); 其他处理 SOC 储量累积变化速率无显著差异($p>0.05$)。

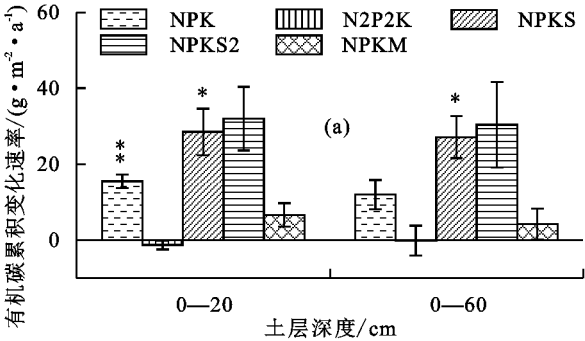
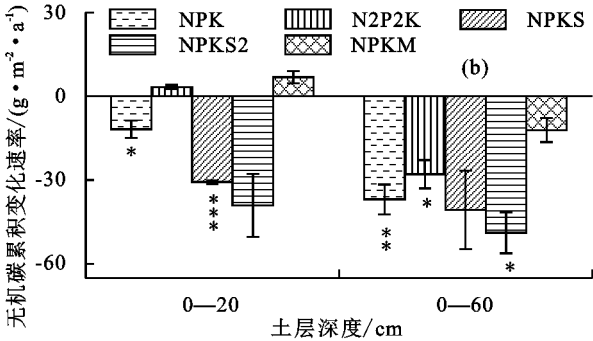


图 4 施肥 31 年后不同处理下阜康农田土壤碳储量的累积变化速率

2.5 长期施肥处理对土壤有机碳热稳定性的影响

从图 5 可以看出, TG—T50(热燃烧过程中样品累积质量损失率达 50% 时所对应的温度)常被用来表征有机碳热稳定性, 该数值越大, 表明土壤有机碳热稳定性越高^[9,15-16]。对比 CK 和 NPKM 处理, 土壤有机碳的 TG—T50 分别为 427.61, 399.34 ℃, 表明 NPKM 处理后有机碳热稳定性降低(图 5a)。与 CK 相比, 长期不同施肥处理均显著降低有机碳热稳定性, 表现为不施肥(CK) > 单施化肥(NPK, N2P2K) > 化肥配施猪粪(NPKM) > 化肥配施秸秆(NPKS, NPKS2)(图 5b, $p<0.05$), 其中 CK、NPK、N2P2K、NPKS、NPKS2 和 NPKM 处理的 TG—T₅₀ 分别为

不同施肥处理下 SIC 累积变化速率沿着剖面均呈递增趋势(图 4b)。单施化肥处理下, 0—20, 0—60 cm 土层 SIC 储量累积变化速率平均为 -15.04, -32.41 g/(m²·a)。化肥配施秸秆处理 SIC 储量累积变化速率最大, 且随着秸秆还田量的增加, SIC 储量累积变化速率增加。



427.61, 410.22, 405.60, 398.96, 394.35, 399.34 ℃。

3 讨论

3.1 土壤剖面有机碳分布变化及其原因

施肥和秸秆还田作为主要的农业管理措施, 在不同程度上影响土壤有机碳的剖面分布特征。本研究结果发现, 长期施肥处理提高土壤有机碳含量, 且主要集中在耕层(0—20 cm)土壤(表 3)。与单施化肥相比, 化肥配施秸秆处理更有利于提高耕层有机碳含量(表 3)。李晨华等^[6]研究发现, 施肥能显著提高绿洲农田土壤耕层有机碳含量, 而对耕层以下有机碳含量的影响较小。在长期施肥对稻田土壤有机碳的研究中, 陈春兰等^[17]也发现, 秸秆还田对耕层土壤有机碳的累积作用优于单施化

肥处理。这可能是由于长期施肥提高了土地生产力和作物产量,促使大量的作物残体和生物量向地下部输入,从而导致比无施肥处理具有更高的有机碳含量,尤其对耕层土壤有机碳的提升作用。植物生物量对剖面

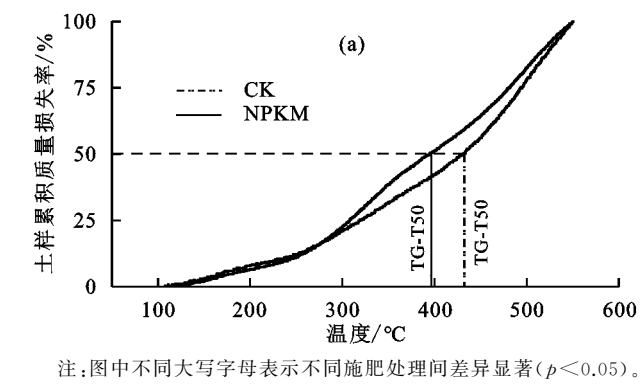
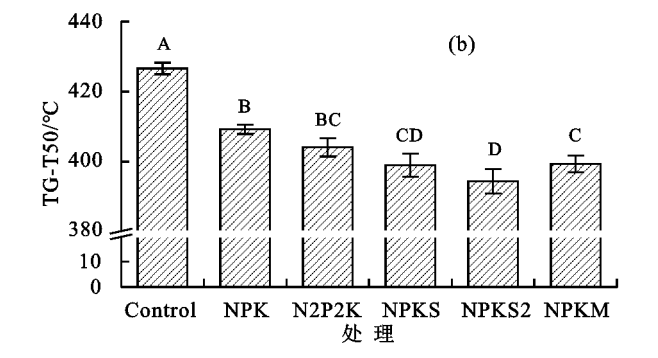


图 5 长期不同施肥处理对阜康农田土壤有机碳热稳定性的影响

荒漠盐碱土的开垦改变土壤容重,长期施肥处理也提升土壤有机碳储量,尤其是耕层土壤。不同施肥处理后,0—20 cm 土层有机碳储量是 20—60 cm 土层有机碳储量的 2.40 倍。这可能是因为施肥处理促进作物生长,导致更多的植物源有机碳输入。大量研究^[2-3]表明,植物源有机碳输入量与土壤有机碳储量呈显著正相关。Li 等^[11]在该研究地点的长期研究结果显示,农田土壤生态系统中的植物源有机碳输入量($558\sim668\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$)远高于开垦前荒漠草地;Chapin 等^[18]研究发现,荒漠生态系统净初级生产力仅为 $100\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。本研究结果也显示,在等量施加化肥后,增加秸秆还田量更有利于耕层有机碳储量的提升(图 2 和图 3)。长期施肥对红壤稻田耕层土壤碳累积影响的研究^[19]显示,相较于单施化肥,化肥配施秸秆处理对土壤有机碳储量的增幅更大。此外,本研究的结论与荣井荣等^[20]研究结果均表明,相较于有机无机肥配施处理,化肥配施秸秆处理对有机碳的提升效果更好。可能因为相较于还田的秸秆及作物残茬(表 1),有机粪肥的含氮量高,C/N 更低,施入土壤的粪肥更快地被微生物分解转化,产生能被作物吸收利用、供其生长所需无机态氮,导致其残存在土壤中的碳氮比例较低。因此,增加进入土壤的秸秆输入量是提高新疆干旱区农田盐碱土有机碳储量的有效途径。

此外,在估算不同农田管理措施下土壤碳储量的剖面分布特征和变化速率时,应该采用合适的方法计算土壤碳储量^[3,13-14]。过去常采用“固定深度”法计算土壤碳储量,而 Ellert 等^[13]提出当土壤容重发生明显变化时,应该采用“等效重量”法。本研究采用“固定深度”和“等效重量”2 种方法估算土壤碳储量,并对比不同处理下 2 种计算方法的差异,结果显示,“固定深度”法低估化肥配施秸秆处理土壤碳储量,而

有机碳具有极强的调控作用,但随着土层深度的增加而减少^[17]。同时,在化肥配施秸秆处理中,与 NPKS 相比,NPKS2 处理由于增施的秸秆还田量也导致更多的作物残茬,其耕层有机碳含量也更高(表 3)。



高估其他处理的土壤碳储量(表 4),表明基于传统的“固定深度”计算方法可能无法准确评估土壤的固碳速率,甚至得到相反的结论。高齐齐等^[14]研究发现,“固定深度”法高估保护性耕作处理后土壤有机碳储量。此外,Du 等^[21]通过数据整合分析发现,基于“固定深度”计算的免耕土壤固碳速率($300\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$)也显著高于“等效重量”计算的结果($141\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$)。因此,当依据土壤碳含量精准估算土壤碳储量时,应该首先关注不同处理下土壤容重的变化,基于土壤容重变化程度来选择合适的计算方法。

3.2 土壤剖面无机碳分布变化及其原因

本研究选取的长期施肥试验小区位于我国西北干旱区,土壤是典型的灰漠盐碱土,无机碳是土壤碳库的主要组成部分。本研究发现,长期施肥处理降低土壤无机碳含量,尤其是耕层无机碳含量的降幅最大(表 2)。一方面,可能是因为农田灌溉具有一定的淋溶作用,使得耕层溶解的碳酸盐被淋洗到深层土壤^[3];另一方面,长期施肥后土壤无机碳含量的降低可能与长期施肥引起的土壤酸化有关^[19]。土壤 pH 下降促使土壤碳酸盐溶解,进而导致无机碳含量降低。但是,不同施肥处理措施对土壤无机碳含量的降低程度存在较大差异。与单施化肥相比,化肥配施秸秆还田处理对无机碳含量的降幅更大(表 2、图 2)。这可能是由于化肥配施秸秆还田处理对土壤物理结构的影响作用远高于其他施肥处理^[22]。化肥配施秸秆还田处理降低更多的土壤容重,增加更大的土壤孔隙度,使得农业灌溉时对无机碳的淋洗作用更强,进而导致耕层土壤无机碳含量下降幅度更大^[22-23]。

土壤无机碳的微小变化可能对干旱区土壤碳库变化方向产生决定性影响。本研究结果显示,长期不同施肥处理增加土壤有机碳储量,降低无机碳储量,

最终导致全碳储量降低。此外,阜康长期农田定位试验小区中,0—60 cm 剖面土壤无机碳储量是有机碳储量的 2.58 倍(图 1b),低于干旱区土壤无机碳储量与有机碳储量的平均比值(5.85)^[3]。已有研究^[24]表明,干旱区无机碳(以碳酸盐形式)累计速率高于有机碳。本研究结果也证实此结论(图 4)。因此,准确评估干旱区不同管理措施下的土壤碳储量变化特征时,需统筹考虑土壤无机碳库和有机碳库。

3.3 土壤有机碳热稳定性变化

长期施肥处理降低土壤有机碳热稳定性,其中化肥配施秸秆还田处理的土壤有机碳稳定性降低程度最大(图 5)。赵龙华等^[9]也观测到,连续 24 年无施肥和单施化肥处理下土壤有机碳热稳定性最大,而化肥配施秸秆处理的碳稳定性最小。可能由于秸秆和有机肥中含有丰富的、热稳定性较低的新鲜有机质,这些有机质化学结构简单,腐殖化程度也较低;而无施肥和单施化肥的处理由于缺乏新鲜有机质输入,土壤中“老”有机质腐殖化程度较高,导致对应的有机碳热稳定性也较高^[25]。此外,秸秆还田处理的有机碳热稳定性较低,可能是因为外源有机碳属于不稳定组分,尚未与土壤矿物结合或未与土壤颗粒形成团聚体稳定结构,而矿物结合态或团聚体保护态有机碳热稳定性比游离态有机碳的热稳定性更高^[26]。土壤有机碳热稳定性的降低,可能有利于土壤微生物分解有机质,从而促进养分转化,提高作物产量。但是较低的土壤有机碳热稳定性可能不利于土壤发挥固碳减排功能,在短时间内会增加土壤 CO₂ 释放量。

土壤有机碳热稳定性与其生物化学稳定性具有一致性。有研究^[8]证实,从最北的阿拉斯加到南方波多黎各的北美 28 个地点土壤有机碳 TG—T₅₀ 与土壤呼吸速率呈显著正相关;陈涛等^[27]分析了不同施肥处理对耕层土壤基础呼吸速率的影响发现,有机肥和秸秆还田处理的土壤呼吸速率显著高于无施肥处理,表明有机肥和秸秆还田使土壤有机质的稳定性降低。上述研究整体上与本研究不同施肥处理间有机碳热稳定性的变化趋势具有一致性,说明施肥处理会降低土壤有机碳的生物化学和热学稳定性,而且二者变化可能存在正相关性^[8]。此外,土壤有机碳的生物化学稳定性指标(土壤呼吸速率等)测定费时费力,与之相比同步热分析方法测定过程简单、省时省力且提供的信息量大,后者在一定程度上可以代替评估土壤有机碳稳定性的化学和生物方法。

4 结论

(1)31 年长期试验后,干旱区农田盐碱土有机碳含

量及储量均随土壤剖面呈下降趋势,耕层(0—20 cm)土壤有机碳对施肥处理的响应最大。化肥配施秸秆还田处理对土壤有机碳的提升作用优于其他施肥处理。

(2)土壤无机碳含量及储量沿着土壤剖面呈增加趋势。耕层土壤无机碳储量对长期施肥处理的响应最敏感,其中化肥配施秸秆处理对土壤无机碳的影响高于其他处理。

(3)长期施肥促进土壤有机碳累积,但由于降低土壤无机碳储量,导致土壤全碳储量下降。鉴于土壤有机碳和无机碳的剖面变化趋势不同,因此在定量评估干旱区土壤碳储量及其变化时,应该同时考虑土壤无机碳库和有机碳库的剖面分布及变化。

(4)长期施肥处理降低土壤有机碳热稳定性,可能会有利于土壤微生物分解有机质。

参考文献:

[1] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis[J]. *Global Change Biology*, 2002,8(4):345-360.

[2] Luo Z K, Feng W T, Luo Y Q, et al. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions[J].*Global Change Biology*,2017,23(10):4430-4439.

[3] Wang Y G, Jiang J, Niu Z R, et al. Responses of soil organic and inorganic carbon vary at different soil depths after long-term agricultural cultivation in Northwest China[J].*Land Degradation and Development*,2019,30(10):1229-1242.

[4] Wang Y G, Li Y, Ye X H, et al. Profile storage of organic/inorganic carbon in soil:From forest to desert[J].*Science of the Total Environment*,2010,408(8):1925-1931.

[5] Wu H B, Guo Z T, Gao Q, et al. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*,2009,129(4):413-421.

[6] 李晨华,唐立松.长期施肥对绿洲农田土壤剖面有机碳及其组分的影响[J].*干旱区地理*,2013,36(4):637-644.

[7] 徐虎,蔡岸冬,周怀平,等.长期秸秆还田显著降低褐土底层有机碳储量[J].*植物营养与肥料学报*,2021,27(5):768-776.

[8] Peltre C, José M F, Joseph M C, et al. Relationships between biological and thermal indices of soil organic matter stability differ with soil organic carbon level[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013,77(6):2020-2028.

[9] 赵龙华,刘小粉,王雅婧,等.基于热分析技术的土壤有机质含量和稳定性分析[J].*农业工程学报*,2016,32(10):105-114.

[10] Zamanian K, Zarebanadkouki M, Kuzyakov Y. Nitrogen fertilization raises CO₂ efflux from inorganic carbon: A global assessment[J]. Global Change Biology, 2018, 24(7): 2810-2817.

[11] Li C H, Li Y, Tang L S, et al. The effects of long-term fertilization on the accumulation of organic carbon in the deep soil profile of an oasis farmland[J]. Plant and Soil, 2013, 369(1/2): 645-656.

[12] Apesteguia M, Plante A F, Virto I. Methods assessment for organic and inorganic carbon quantification in calcareous soils of the Mediterranean region[J]. Geoderma Regional, 2018, 12(1): 39-48.

[13] Ellert B H, Bettany J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1995, 75(4): 529-538.

[14] 高奇奇, 张玮, 马立晓, 等. 采样深度和计算方法影响保护性耕作土壤碳氮储量的评估结果[J]. 中国农业气象, 2021, 42(1): 1-12.

[15] Monger H C, Gallegos R A. Biotic and abiotic processes and rates of pedogenic carbonate accumulation in the southwestern United States-relationship to atmospheric CO₂ sequestration[C]. Paper Presented at the Workshop on Global Climate Change and Pedogenic Carbonates. Tunis, Tunisia, 1997.

[16] Barreto M S C, Ramlogan M, Oliveira D M S, et al. Thermal stability of soil organic carbon after long-term manure application across land uses and tillage systems in an oxisol[J/OL]. Catena, 2021, 200. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105164.

[17] 陈春兰, 陈安磊, 魏文学, 等. 长期施肥对红壤稻田剖面土壤碳氮累积的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 14-20.

[18] Chapin FSIII, Mastson P A, Mooney H A. Terrestrial production process, in principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. New York: Springer-Verlag New York, 2002.

[19] 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, 等. 长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1615-1621.

[20] 荣井荣, 李晨华, 王玉刚, 等. 长期施肥对绿洲农田土壤有机碳和无机碳的影响[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 592-597.

[21] Du Z L, Angers D A, Ren T S, et al. The effect of no-till on organic C storage in Chinese soils should not be overemphasized: A meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 236(1): 1-11.

[22] 邱琛, 韩晓增, 陈旭, 等. CT 扫描技术研究有机物料还田深度对黑土孔隙结构影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 98-107.

[23] 孟祥宇, 冉成, 刘宝龙, 等. 秸秆还田配施氮肥对东北黑土稻区土壤养分及水稻产量的影响[J]. 作物杂志, 2021(3): 167-172.

[24] Landi A, Mermut A R, Anderson D W. Origin and rate of pedogenic carbonate accumulation in Saskatchewan soils, Canada[J]. Geoderma, 2003, 117(1/2): 143-156.

[25] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 施入不同土层的秸秆腐殖化特征及对玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 563-570.

[26] Leifeld J, Franko U, Schulz E. Thermal stability of soil organic matter responds to long-term fertilization practices[J]. Biogeosciences Discussions, 2006, 3(2): 309-320.

[27] 陈涛, 郝晓晖, 杜丽君, 等. 长期施肥对水稻土土壤有机碳矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 1(7): 1494-1500.

(上接第 332 页)

[18] 张娜, 徐文修, 李兰海, 等. 施氮量对滴灌冬小麦冠层垂直结构特征、粒叶比及经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2491-2498.

[19] 陈梦妮, 李永山, 王慧, 等. 不同施氮量对棉花花铃期的生长特性与产量及经济效益的影响[J]. 山西农业科学, 2021, 49(4): 449-454.

[20] 王志超, 李仙岳, 史海滨, 等. 覆膜年限及灌水方法对河套灌区农膜残留的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 159-165.

[21] Gu X B, Li Y N, Du Y D. Biodegradable film mulching improves soil temperature, moisture and seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 171: 42-50.

[22] Wang Z H, Wu Q, Fan B H, et al. Effects of mulching biodegradable films under drip irrigation on soil hydrothermal conditions and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield [J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 477-485.

[23] 刘小娥. 地膜覆盖对半干旱区玉米地土壤氮素循环和肥料氮去向的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.

[24] Zhang Y T, Wang H Y, Liu S, et al. Identifying critical nitrogen application rate for maize yield and nitrate leaching in a Haplic Luvisol soil using the DNDC model [J]. Science of the Total Environment, 2015, 514: 388-398.