



# 长期耕作对新疆绿洲农田土壤颗粒中有机碳和全氮含量的影响

唐光木<sup>1,2</sup>, 张云舒<sup>2</sup>, 徐万里<sup>2</sup>, 马海刚<sup>2</sup>, 胡克林<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; <sup>2</sup>新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 乌鲁木齐 830091)

**摘要:**【目的】土壤颗粒中有机碳和全氮是土壤有机碳和全氮的重要组成部分, 研究长期耕作对农田土壤颗粒组分中有机碳和全氮组分含量和比例变化的影响, 有助于揭示不同耕作年限下土壤有机碳和全氮的固存与周转规律, 可为区域农田土壤培肥和固碳减排提供科学依据。【方法】以天山南北3个典型绿洲(兰州湾镇、31团、普惠农场)长期耕作农田土壤为研究对象, 采用土壤颗粒分级法, 研究不同耕作年限(0、5、10、15、20年)下3个典型绿洲农田土壤有机碳和全氮的变化规律, 分析长期耕作对不同颗粒组分中有机碳和全氮含量的影响。【结果】(1)长期耕作增加了土壤有机碳和全氮的积累, 并随耕作时间的延长而趋于平稳。与未耕作土壤相比, 耕作0—5 a间, 土壤有机碳、全氮含量增加迅速, 兰州湾镇、普惠农场和31团土壤有机碳含量分别提高了76.4%、286.2%和145.6%, 土壤全氮含量提高了14.7%、58.9%和75.0%, 耕作5 a后, 增速趋于平缓。(2)耕作提高了不同颗粒组分中有机碳和全氮含量, 砂粒中有机碳含量表现为先增加后下降的趋势, 与未耕作土壤相比, 兰州湾、31团和普惠农场在耕作10—15 a间达到峰值, 随后下降; 耕作20 a后土壤砂粒中有机碳含量分别增加了0.63、0.89和1.56 g·kg<sup>-1</sup>。而粉粒和黏粒中有机碳含量随耕作时间延长表现为持续增加, 耕作20 a后, 兰州湾、31团和普惠农场粉粒和黏粒中有机碳含量分别增加了0.42—2.39、2.64—3.39、1.36—2.72 g·kg<sup>-1</sup>。耕作年限对不同颗粒组分中全氮含量的影响比较复杂, 砂粒中全氮含量表现为随耕作时间呈现逐渐增加的趋势, 耕作20 a后, 兰州湾、31团和普惠农场砂粒中全氮含量分别增加了0.24、0.40和0.29 g·kg<sup>-1</sup>; 粉粒中全氮含量随耕作时间呈现先下降(0—10 a), 而后(10—20 a)上升的趋势, 而黏粒中全氮含量则表现为相反的趋势, 耕作0—10 a间快速增加, 耕作10 a后开始下降。(3)不同颗粒组分中, 粉粒中有机碳和全氮含量占比最大, 分别在43.3%—56.1%和30.2%—72.2%之间。耕作改变了不同颗粒组分中有机碳和全氮含量在土壤有机碳和全氮中的分配比例, 耕作0—10 a间, 砂粒中有机碳分配比例逐渐增加, 10—20 a间呈降低趋势, 砂粒中全氮比例分配则随耕作时间表现出递增趋势, 耕作20 a间, 兰州湾、31团和普惠农场, 砂粒中全氮分配比例分别增加了14.8%、19.8%和29.0%。(4)耕作提高了土壤碳氮比, 耕作0—5 a间, 土壤中碳氮比迅速提高40.3%—142.9%, 5 a后, 碳氮比变化不明显, 同时, 改变了不同颗粒组分中碳氮比, 耕作0—10 a, 砂粒中的碳氮比最高, 10 a后, 粉粒中碳氮比最高。【结论】耕作增加了新疆绿洲农田土壤有机碳和全氮含量, 改变了不同颗粒组分中土壤有机碳和全氮含量和占比, 有助于土壤有机碳和全氮的累积, 其中粉粒中的有机碳和全氮是该地区土壤固持有机碳和全氮的主体。

**关键词:** 耕作; 颗粒组分; 碳氮比; 有机碳; 全氮; 绿洲农田; 新疆

收稿日期: 2020-04-02; 接受日期: 2020-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(31660073)、天山雪松计划(2017XS08)、国家重点研发计划(2017YFD0200803-04)

联系方式: 唐光木, E-mail: tangjunhui5120@126.com. 通信作者胡克林, Tel: 010-2732412; E-mail: hukel@cau.edu.cn

# Effects of Long-Term Cultivation on Contents of Organic Carbon and Total Nitrogen in Soil Particulate Fraction in Oasis Farmland of Xinjiang

TANG GuangMu<sup>1,2</sup>, ZHANG YunShu<sup>2</sup>, XU WanLi<sup>2</sup>, MA HaiGang<sup>2</sup>, HU KeLin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193; <sup>2</sup>Soil Fertilizer and Agricultural Water Saving Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 890091)

**Abstract:** 【Objective】 Particulate organic carbon and total nitrogen are the important components of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN), which has an effect on SOC and TN turnover and sequestration. Therefore, studies exploring the changes in soil particulate organic carbon and total nitrogen under different tillage years could aid the understanding of the mechanism of regional soil carbon and nitrogen fixation, so as to provide a scientific basis for improving land productivity. 【Method】 In this study, soil samples from the farmlands with different tillage years (0, 5, 10, 15, and 20 years) in the three typical oases (Lanzhouwan, 31 corps, and Puhui farms) of Tianshan were collected, and the SOC and TN contents of different particle components were determined. And then, the effects of long-term tillage on SOC and TN contents of different particle components were analyzed. 【Result】 Results indicated that long-term tillage practices increased SOC and TN accumulation. SOC and TN contents increased rapidly during the first five years of tillage and then tended to be stable after five years of tillage. SOC contents increased to 76.4% (Lanzhouwan), 286.2% (31 corps), and 145.6% (Puhui farms) of the SOC contents in uncultivated land. Similarly, TN contents increased to 14.7%, 58.9%, and 75.0%, respectively. The effects of long-term tillage practices on OC contents in different particles components were different. The organic carbon (OC) contents in sand showed a downward trend after reaching a maximum value (10-15 years tillage), and then showed a increasing trend, but it remained higher than that of an uncultivated land. After 20 years of tillage, OC contents in sand were increased by 0.63 g·kg<sup>-1</sup> (Lanzhouwan), 0.89 g·kg<sup>-1</sup> (31 corps), and 1.56 g·kg<sup>-1</sup> (Puhui farms). While, the contents of OC in silt and clay showed a continuous increasing trend with tillage time, After 20 years of tillage, OC contents in silt and clay were increased by 0.42-2.39 g·kg<sup>-1</sup> (Lanzhouwan), 2.64-3.39 g·kg<sup>-1</sup> (31 corps), and 1.36-2.72 g·kg<sup>-1</sup> (Puhui farms). However, the effect of long-term tillage practices on TN in different particles components was complex. The OC contents in sand showed a continuous increasing trend, After 20 years of tillage, TN contents in sand were increased by 0.24 g·kg<sup>-1</sup> (Lanzhouwan), 0.40 g·kg<sup>-1</sup> (31 corps), 0.29 g·kg<sup>-1</sup> (Puhui farms).. The content of TN in silt decreased (0-10 years of tillage) initially and then increased (10-20 years). TN in clay increased by 67.6% in Lanzhouwan, 306.3% in 31 corps, and 91.3% in Puhui farms during 0-10 years of tillage and decreased after 10 years of tillage. With regard to particle components, OC and TN in silt had the largest proportions, accounted for 43.3%-56.1% and 30.2%-72.2% of SOC and TN, respectively. Tillage affected the distribution proportions of OC and TN in different components. The distribution proportion of OC in sand increased during the first 10 years and decreased in the subsequent 10 years. The distribution proportion of TN in sand was increased by 14.8% in Lanzhouwan, 19.8% in 31 corps, and 29.0% in Puhui farms after 20 years of tillage. Soil C/N was increased by 40.3%-142.9% during 0-5 years of tillage, and no significant change was observed after 5 years of tillage. Tillage changed C/N ratio in different particles components, and the largest C/N ratio was obtained in sand during 0-10 years of tillage. During the subsequent 10 years, the largest C/N ratio was obtained in silt. 【Conclusion】 The SOC and TN contents and their stocks increased over tillage years in the oasis farmland of Xinjiang. The contents and its distribution proportions of OC and TN in different particles components were also changed. We found that the contents of OC and TN in silt fraction were the largest components of the fixed SOC and TN in the study area.

**Key words:** tillage; particulate component; carbon-nitrogen ratio; Oasis farmland

## 0 引言

【研究意义】土壤碳、氮是陆地生态系统最重要的组成部分,在全球碳氮循环中起主导作用<sup>[1]</sup>。同时土壤碳、氮还是反映土壤质量和健康的重要指标,直接影响土壤肥力和作物产量的高低,增加土壤碳、氮

对减缓温室效应、增加作物产量及促进农业可持续发展具有重要的意义<sup>[2]</sup>。土壤有机碳、全氮是由活性、功能、周转速率不同的组分构成的复合体,其总量变化难以准确反映土壤碳、氮对环境变化的响应<sup>[3]</sup>,而土壤有机碳、全氮组分及碳氮比值对农业措施改变的敏感性更高,有利于揭示农田管理措施对土壤碳、氮

的影响机制<sup>[4]</sup>，已成为当前认知土壤碳、氮累积变化过程与循环的研究热点。【前人研究进展】根据土壤颗粒大小将土壤颗粒分为砂粒（> 50 μm）、粉粒（2—50 μm）和黏粒（<2 μm）<sup>[5]</sup>，砂粒中有机碳、全氮一般被认为是主要活性有机碳氮组分，黏粒和粉粒中有机碳、全氮为非活性碳氮组分<sup>[6]</sup>。砂粒中有机碳、全氮组分对耕作、施肥措施的响应往往比总有机碳、氮更敏感，更能预警或者较早反映土壤碳、氮指标的变化<sup>[7]</sup>，土壤粉粒和黏粒组分中有机碳和全氮决定着土壤碳、氮的固存<sup>[8]</sup>。土壤碳氮比值是评价土壤有机物分解程度的一个重要指标，是土壤有机碳、全氮矿化能力的重要标志<sup>[9]</sup>，该比值越高，有机物的分解程度越低，有机碳趋于积累<sup>[10]</sup>，反之土壤有机碳的增加速度低于土壤全氮，会加快微生物对于土壤有机碳的分解和氮的矿化速率，不利于土壤有机碳、全氮的固存<sup>[11]</sup>。在农田生态系统中，土壤耕作、施肥等农田管理措施被认为是加速土壤有机碳矿化分解、氮素周转、影响土壤化学和生物学性质的重要因素，其强度与频率是影响土壤有机碳、全氮周转的关键<sup>[12]</sup>。BURNS 等<sup>[13]</sup>认为耕作、田间管理措施和土壤外源碳氮添加可引发酶类产生不同的响应，通过改变底物有效性及微环境条件影响微生物活性<sup>[14]</sup>，进而影响土壤碳、氮循环生态过程<sup>[15]</sup>。徐梦等<sup>[16]</sup>认为自然森林和草地土壤转变为农田，长期耕作导致粗颗粒有机碳数量和土壤不稳定颗粒组分碳氮比值低于自然森林和草地土壤，农业耕作显著加速了不稳定颗粒有机碳的周转，减少了稳定性有机碳组分的形成。佟小刚等<sup>[17]</sup>和 WU 等<sup>[18]</sup>研究发现长期施用有机肥显著增加土壤颗粒中有机碳、全氮组分的含量和黏粒中有机碳、全氮含量；陈洁等<sup>[19]</sup>等在湖北稻麦轮作地区研究指出，长期有机无机肥配施处理显著促进了土壤碳、氮的积累，尤其是颗粒中有机碳、全氮。但也有研究指出施肥对不同组分中有机碳、全氮的影响作用并不一致。SCHULTEN

等<sup>[20]</sup>认为，长期施化肥，特别是单施氮肥，对各颗粒中有机碳含量影响较小。【本研究切入点】新疆位于中国西部内陆干旱荒漠区，屯垦戍边以来，耕作方式与时间、施肥方式与水平、土壤性质以及气候条件等因素均影响土壤有机碳、全氮数量和质量变化，以及土壤有机碳、全氮的周转和储量。然而，对于耕作导致的土壤有机碳、全氮的差异性，特别是长期耕作对不同粒径颗粒中有机碳、全氮组分的影响作用，亟需进行深入分析。【拟解决的关键问题】本研究选择新疆干旱荒漠区南北疆不同耕作年限的棉田土壤为研究对象，利用基于土壤颗粒粒径物理分组法将土壤分为不同颗粒组分，研究耕作对不同颗粒组分中有机碳、全氮的变化规律，揭示长期耕作对土壤碳氮循环的影响机制，为我国区域农田土壤碳氮变化规律研究和农业土壤固碳潜力与生产力长期稳定机制提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

选择冲积平原区成土条件一致、灌溉、耕作方式和栽培模式相近的 3 个典型绿洲区：昌吉回族自治州兰州湾镇（86°05′—86°06′ E，44°29′—44°30′ N）、巴音郭楞蒙古自治州普惠农场（85°50′—85°52′ E，41°24′—41°26′ N）以及新疆生产建设兵团第二师 31 团（86°54′—86°59′ E，40°50′—40°54′ N），研究区自然植被以荒漠和荒漠草原植被为主，兰州湾镇主要有芨芨草、骆驼刺、红柳等，普惠农场和 31 团主要是红柳、芦苇等植物。3 个绿洲区种植作物均为棉花，采用膜下滴灌栽培模式和秋深翻、秸秆还田的耕作方式，土壤类型分别为灰漠土、潮土和灌淤土，土壤基本理化性质见表 1。以不同耕作年限（5、10、15 和 20 a）的农田作为采样点，以相邻未耕作土壤作为对照，每个采样点选择 3—5 块样地进行采样，每块样地采集耕层（0—30 cm）土壤样品 5—7 个，采用多点混合四分

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical-chemical properties of surface soil

采样点 Sampling site	pH	容重 Bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	碱解氮 Available 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> )	电导率 EC (mS·cm <sup>-1</sup> )	阳离子交换量 CEC (cmol·kg <sup>-1</sup> )
兰州湾 Lanzhouwan	8.18±0.19	1.41±0.18	53.33±45.97	14.07±21.43	380.00±144.00	1.66±0.69	11.31±9.11
31 团 31 corps	8.03±0.09	1.41±0.19	50.25±6.32	28.72±8.21	135.00±9.40	0.58±0.09	10.56±1.26
普惠农场 Puhui farm	7.92±0.13	1.47±0.13	47.35±10.32	60.09±28.17	128.40±23.84	1.21±0.51	9.37±1.86

土壤基本理化性质是不同耕作年限土壤理化性质的平均值

The basic physical and chemical properties of soil were the average values of soil physical and chemical properties in different tillage years

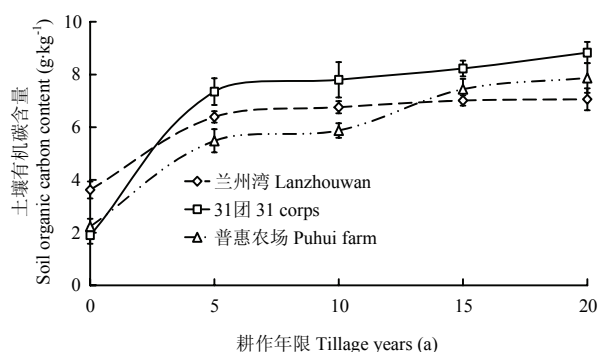
法留取土壤样品 1.00 kg 左右,带回实验室,去除肉眼能看到的有机残体,自然风干后,研磨过 2 mm 和 0.25 mm 筛,用于土壤颗粒组分离和土壤理化性质测定。

## 1.2 分析方法

上述过 2 mm 筛的土壤样品,采用武天云等<sup>[5]</sup>的 Ander-son 和 Tiessen 改进法进行不同颗粒组分的分离,将土壤样品分离出不同粒径(>50 μm, 2—50 μm, <2 μm)土壤颗粒组分,分离得到的不同粒径的土壤颗粒组分先在 60℃ 的水浴锅上蒸干,再在 60℃ 的烘箱中烘干 12 h,冷却,称重。将烘干的不同粒径土壤颗粒研磨过 0.25 mm 筛,用于测定不同颗粒组分中有机碳和全氮含量。

土壤有机碳、全氮以及不同颗粒组分中有机碳、全氮含量均按照《土壤农业化学常规分析方法》中方法测定<sup>[21]</sup>。

土壤颗粒组分中有机碳或全氮占比(%)=土壤颗粒组分中有机碳或全氮含量(g·kg<sup>-1</sup>)/土壤有机碳或全氮含量(g·kg<sup>-1</sup>)×100。(1)



## 1.3 数据处理

采用 WPS 2016 和 SAS8.0 统计分析软件进行试验数据分析和绘图,多重比较用 LSD 法。

## 2 结果

### 2.1 不同耕作年限土壤有机碳和全氮含量变化

与未耕作土壤相比,耕作 5 a 土壤有机碳含量增加迅速,兰州湾镇、普惠农场和 31 团分别提高了 76.4%、286.2%和 145.6% (图 1),耕作 5 a 后,土壤有机碳含量增加趋势变缓。与耕作 5—15 a 相比,耕作 20 a 后兰州湾镇、普惠农场和 31 团的土壤有机碳含量分别增加了 10.5%、20.1%和 43.5%,年均增速为 0.04、0.10 和 0.16 g·kg<sup>-1</sup>。耕作 0—20 a 对兰州湾土壤全氮含量的影响相对较小,年均增加 0.02 g·kg<sup>-1</sup>。耕作初期(0—5 a) 31 团和普惠农场对其全氮含量的影响较大,年均分别增加了 0.086 和 0.090 g·kg<sup>-1</sup>,耕作 5 a 后增速逐渐趋于平缓。

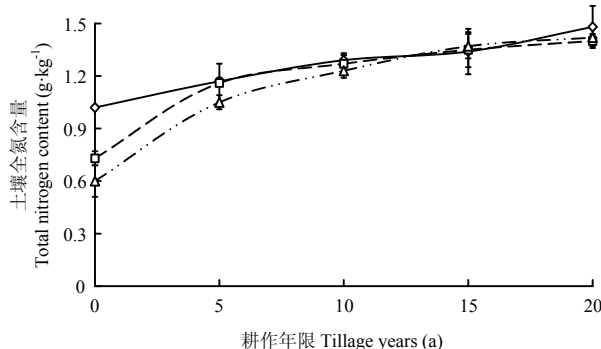


图 1 不同耕作年限土壤有机碳和全氮含量的变化

Fig. 1 Change of the content of SOC and TN in different tillage years

### 2.2 不同耕作年限土壤颗粒组分中有机碳和全氮含量及其占比

不同颗粒中有机碳、全氮是土壤有机碳、全氮的重要组成部分,直接反映了土壤有机碳、全氮的有效性,对环境或管理措施的响应极其敏感。从表 2 中可知,各组分中砂粒中有机碳、全氮含量最小,在 0.32—2.05 g·kg<sup>-1</sup> 和 0.02—0.51 g·kg<sup>-1</sup> 之间,但随着耕作时间的延长,砂粒中有机碳、全氮含量呈现不同的变化趋势。耕作 0—5 a 间,砂粒中有机碳含量快速增加,兰州湾、31 团和普惠农场分别年均增加 0.14、0.20 和 0.22 g·kg<sup>-1</sup>,耕作 10—15 a 间砂粒中有机碳含量达到峰值,随后出现下降的趋势。砂粒中全氮含量则呈现逐步增加趋势,与未

耕作土壤相比,耕作 20 a 后兰州湾、普惠农场和 31 团砂粒中全氮含量分别增加了 0.24、0.4 和 0.29 g·kg<sup>-1</sup>。

粉粒有机碳是土壤颗粒组分中固持有机碳最主要碳库,其含量在 1.02—4.41 g·kg<sup>-1</sup> 之间,是砂粒中有机碳含量的 2—3 倍,相比未耕作土壤,兰州湾、31 团和普惠农场土壤粉粒中有机碳含量随耕作时间的延长而增加,耕作 20 a 分别显著增加 152.2%、332.4%和 261.5%。相比未耕作土壤,耕作 0—10 a 间兰州湾和 31 团土壤粉粒中全氮含量呈现下降趋势,10 a 后开始增加;普惠农场粉粒中全氮含量则随耕作时间呈持续增加趋势,耕作 20 a 显著增加一倍,耕作 15—20 a 后,粉粒中全氮含量成为土壤全氮含量最大的组分。

黏粒中有机碳含量介于砂粒和粉粒中有机碳含量之间，与耕作年限关系不显著，但随耕作年限延长而增加，相比未耕作土壤，耕作 20 a 后，兰州湾、31 团和普惠农场黏粒中有机碳分别显著增加 25.5%、463.2%和 176.6%；黏粒中全氮含量呈倒“V”字形变化，相比未耕作土壤，耕作 0—10 a 间，黏粒中全氮含量快速增加，兰州湾、31 团和普惠农场分别提高了 67.6%、306.3%和 91.3%，耕作 10 a 后开始下降，耕作 20 a 相比耕作 10 a 分别降低了 35.5%、24.6%和 34.1%，除 31 团外，基本接近于未耕作土壤黏粒中全氮含量。

表 2 不同耕作年限土壤颗粒组分中有机碳和全氮含量  
Table 2 Organic carbon and total nitrogen content of soil particles components in different tillage years

采样区 Sampling site	耕作年限 Tillage year (a)	砂粒 Sand (>50 μm)		粉粒 Silt (2-50 μm)		黏粒 Clay (<2 μm)	
		有机碳 Organic carbon (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )	有机碳 Organic carbon (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )	有机碳 Organic carbon (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )
兰州湾 Lanzhouwan	0	0.40±0.12c	0.07±0.00d	1.57±0.50c	0.56±0.05ab	1.65±0.20d	0.37±0.01d
	5	1.10±0.57b	0.09±0.00d	2.95±0.59b	0.52±0.03b	2.34±0.13bc	0.56±0.07ab
	10	1.25±0.74a	0.16±0.02c	3.03±0.35b	0.49±0.04b	2.48±0.47ab	0.62±0.05bc
	15	1.02±0.38b	0.24±0.01b	3.11±0.86b	0.61±0.07ab	2.88±0.22a	0.48±0.05a
	20	1.03±0.58b	0.31±0.07a	3.96±0.49a	0.69±0.10a	2.07±0.21c	0.40±0.04cd
31 团 31 corps	0	0.32±0.18d	0.02±0.00d	1.02±0.70d	0.53±0.02a	0.57±0.20c	0.16±0.01c
	5	1.34±0.34b	0.14±0.01c	3.39±0.49c	0.42±0.07a	2.61±0.69b	0.59±0.11ab
	10	1.52±0.78a	0.21±0.03b	3.72±0.91b	0.38±0.01a	2.54±0.37b	0.65±0.09a
	15	1.31±0.50bc	0.25±0.01ab	4.15±0.58a	0.47±0.06a	2.77±0.18b	0.54±0.03b
	20	1.21±0.96c	0.31±0.05a	4.41±0.47a	0.54±0.03a	3.21±0.32a	0.49±0.07b
普惠农场 Puhui farm	0	0.42±0.44c	0.04±0.00d	1.04±0.17d	0.32±0.00b	0.77±0.29c	0.23±0.01d
	5	1.51±0.96b	0.19±0.01c	2.39±0.51c	0.41±0.05b	1.59±0.29b	0.39±0.04b
	10	1.72±0.11ab	0.36±0.03b	2.41±0.50c	0.43±0.03b	1.75±0.24ab	0.44±0.03a
	15	2.05±0.79a	0.42±0.02ab	3.41±0.70b	0.58±0.09a	2.00±0.23ab	0.36±0.01c
	20	1.98±0.17a	0.51±0.06a	3.76±0.76a	0.64±0.11a	2.13±0.47a	0.25±0.00d

不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。下同 Different lowercase letters in indicate significant difference ( $P<0.05$ ). The same as below

耕作改变了不同颗粒中有机碳、全氮含量在土壤有机碳和全氮含量中的分配比例(图 2)，粉粒中有机碳含量占比最大，在 43.3%—56.1%之间，砂粒中有机碳含量占比最小，在 11.0%—29.3%之间，黏粒中有机碳含量占比为 26.9%—41.1%，粉粒和黏粒中有机碳含量成为土壤有机碳分配主体，增强了对土壤有机碳的固持和保护。不同颗粒组分中全氮分配比例中，粉粒中全氮含量占比最大，为 30.2%—72.2%，砂粒中全氮含量占比最小，为 2.4%—35.9%。砂粒中有机碳含量占比总体表现为耕作 0—10 a 间逐渐增加，在 10—20 a 间呈降低趋势，砂粒中全氮含量占比则随耕作时间表现出递增趋势。耕作 20 a 间，兰州湾、31 团和普惠农场，砂粒中全氮占比分别从 6.4%、2.4%和 6.9%增加到 21.2%、22.2%和 35.9%，分别增加了 14.8%、19.8%和 29.0%。由此可见，耕作改变了砂粒中有机碳、全氮含量在土壤有机碳和全氮含量中的分配比例，增加了对土壤有机碳、全氮的贡献程度，同

时砂粒中全氮含量占比随耕作时间的延长呈增加趋势。土壤有机碳、全氮始终处于动态变化之中，土壤有机碳、全氮与不同颗粒组分中有机碳、全氮之间的耦合关系更能全面反映土壤有机碳、全氮的转化变异特征<sup>[22]</sup>。从图 3 可以看出，土壤有机碳、全氮含量与不同颗粒组分中有机碳、全氮含量呈显著正相关关系，但兰州湾和 31 团全氮含量与黏粒中全氮含量以及普惠农场全氮含量与粉粒中全氮含量之间差异不显著，说明不同颗粒组分中有机碳和砂粒中全氮含量随土壤有机碳、全氮含量的增加而增加。

2.3 不同耕作年限土壤不同颗粒组分碳氮比变化

土壤有机碳和全氮比值(C/N)是土壤质量的敏感指标，该比值的改变可引起微生物活性的变化进而影响土壤质量和土壤碳氮循环<sup>[23]</sup>。土壤中有有机碳的分解受土壤和微生物碳氮平衡的影响，碳氮比值在很大程度上影响其分解速率。耕作提高了土壤碳氮比，耕作 0—5 a 间，土壤中碳氮比迅速提高 40.3%—142.9% (表 3)，

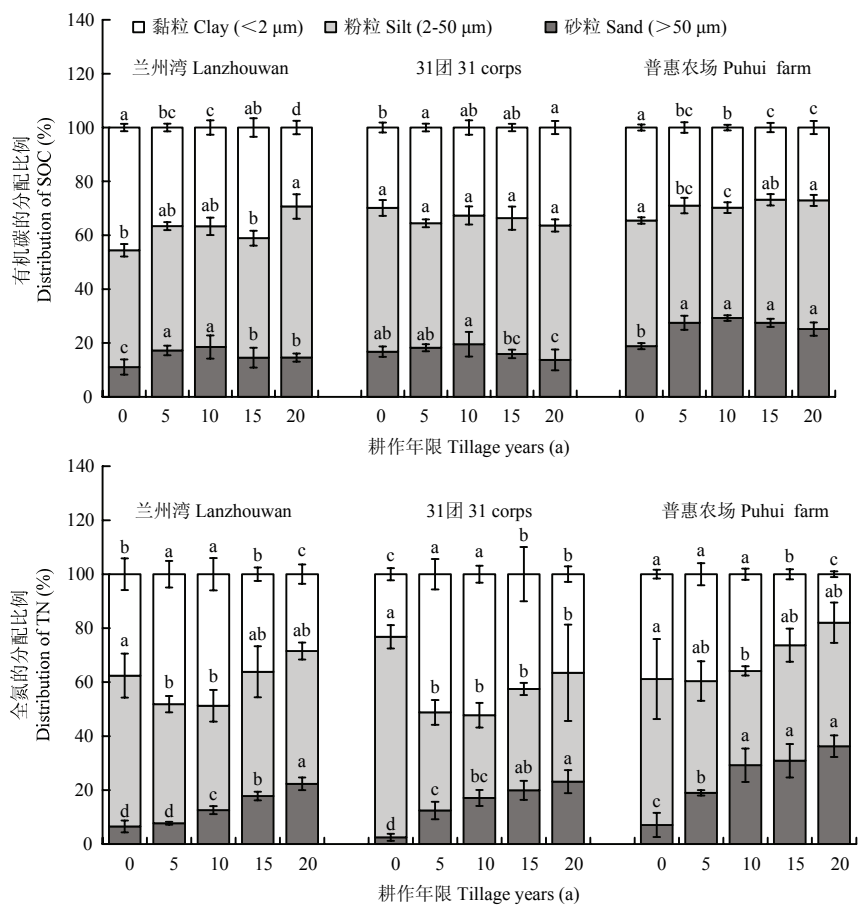


图2 不同耕作年限土壤有机碳和全氮在不同颗粒组分中的分配

Fig. 2 Distribution of SOC and TN in different particle fractions in different tillage years

表3 不同耕作年限土壤及其颗粒组分碳氮比

Table 3 C : N ratio of soil its fractions in different tillage years

采样区 Sampling site	耕作年限 Tillage year (a)	土壤碳氮比 C/N	颗粒组分碳氮比 C/N in particle fractions		
			砂粒 Sand (>50 μm)	粉粒 Silt (2-50 μm)	黏粒 Clay (<2 μm)
兰州湾 Lanzhouwan	0	3.55±0.97b	6.14±0.12bc	2.82±0.55b	4.41±0.21bc
	5	5.46±0.70a	12.22±0.57a	5.72±0.62a	4.16±0.20c
	10	5.24±0.78a	7.81±0.76b	6.16±0.39a	4.00±0.52c
	15	5.23±0.86a	4.32±0.39cd	5.08±0.93a	6.00±0.27a
	20	4.77±0.95ab	3.28±0.65d	5.71±0.59a	5.16±0.25ab
31 团 31 corps	0	2.61±0.36b	18.16±0.18a	1.94±0.72c	3.46±0.21d
	5	6.34±0.62a	9.43±0.35b	8.16±0.56b	4.46±0.80c
	10	6.14±0.73a	7.12±0.81c	9.71±0.92ab	3.88±0.46cd
	15	6.10±0.40a	5.23±0.51cd	8.77±0.64ab	5.17±0.21b
	20	6.31±0.38a	3.89±1.01d	8.12±0.50b	6.53±0.35a
普惠农场 Puhui farm	0	3.72±0.48c	10.14±0.44a	3.28±0.17b	3.38±0.30d
	5	5.22±0.32ab	8.07±0.97b	5.85±0.56a	4.07±0.33c
	10	4.78±0.46b	4.78±0.14c	5.60±0.53a	3.96±0.27c
	15	5.43±0.58ab	4.88±0.81c	5.86±0.79a	5.59±0.24b
	20	5.54±0.73a	3.88±0.23b	5.84±0.87a	8.41±0.47a

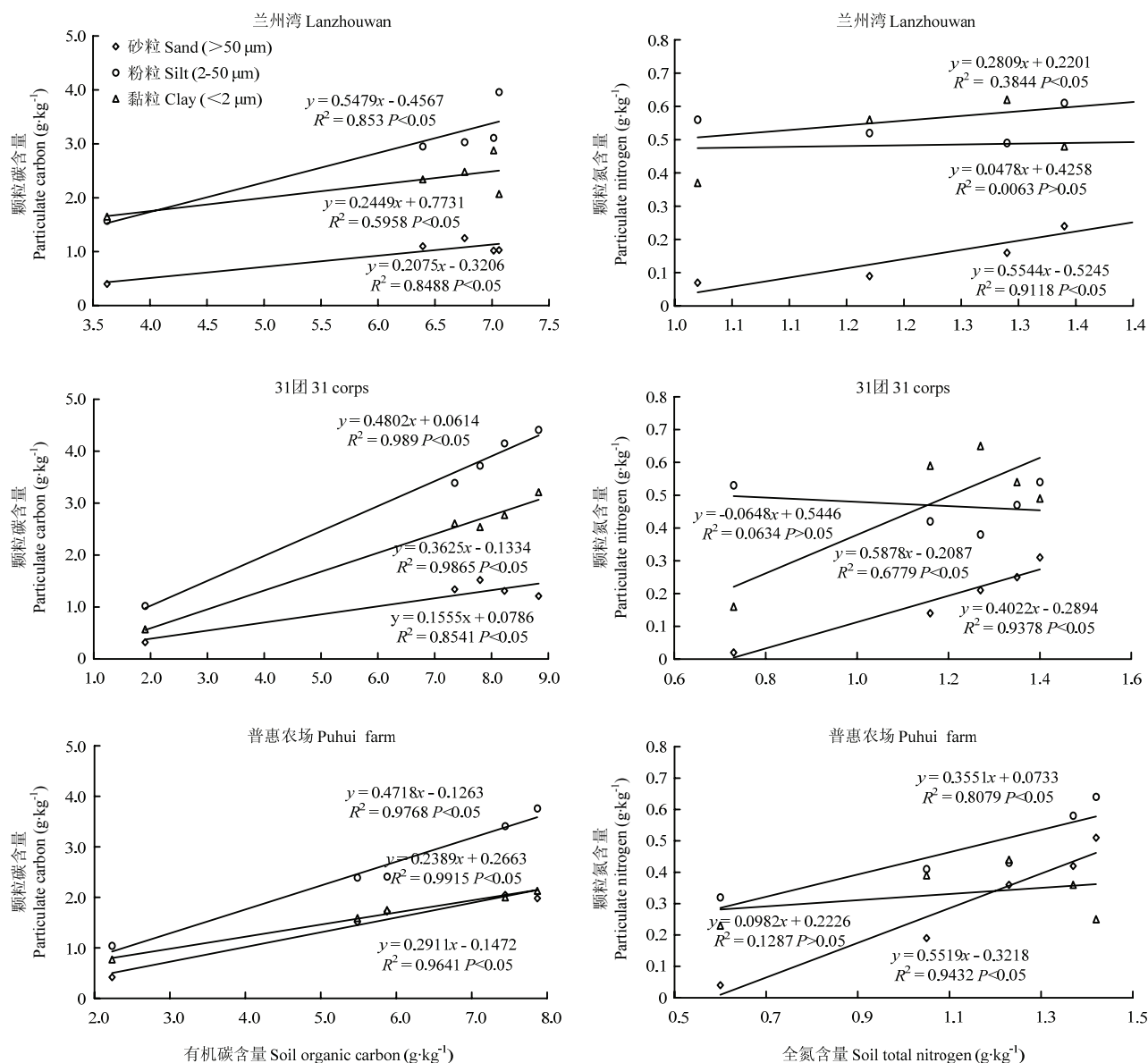


图3 土壤有机碳或全氮与不同颗粒组分中碳或氮的关系

Fig. 3 Relationship between SOC or TN and carbon or nitrogen in different particle fractions

5 a 后, 碳氮比值变化不明显, 但碳氮比仍高于未耕作土壤, 说明微生物活性降低, 减缓有机碳和有机氮分解矿化, 土壤固碳能力提高。除兰州湾外, 耕作 5 a 后, 砂粒中有机碳氮比迅速降低, 31 团和普惠农场显著降低了 48.1% 和 20.4%; 粉粒中碳氮比快速增加, 兰州湾、31 团和普惠农场分别显著提高了 102.8%、320.6% 和 78.4%。同时, 耕作也改变了土壤各颗粒组分中碳氮比的分配比例, 表现为耕作 0—5a 间, 砂粒中的碳氮比高于粉粒和黏粒中的碳氮比, 5 a 后粉粒中碳氮比最高。

### 3 讨论

#### 3.1 长期耕作对土壤有机碳和全氮含量的影响

在新疆干旱荒漠条件下, 土壤有机碳初始值很低的土壤耕作后, 土壤有机碳呈现增加趋势, 增加了绿洲生态系统土壤有机碳的固定, 从而在我国陆地碳循环过程中增加了有机碳的储量。本文的研究结果与草地<sup>[24]</sup>、林地开垦耕作<sup>[25]</sup>以及东北黑土地区耕作<sup>[26]</sup>后有机碳下降有明显的区别, 这可能由地理位置、气候条件及作物种类的差异, 以及未耕作土壤有机碳初始值

不同引起的。全氮表现出与总有机碳相似的规律,随耕作年限的延长呈递增趋势,说明土壤有机碳和全氮的变化趋势具有一致性<sup>[27]</sup>。

土壤有机碳、全氮是评价农田土壤质量和肥力以及农业生产可持续性的重要因子,但其库容大、变异小,不能快速反映土壤有机碳水平和供氮能力变化<sup>[20]</sup>。基于土壤物理分组的有机碳、全氮组分,可反映土壤有机碳、全氮的抗氧化程度,利用的难易程度以及非均匀分布的性质或功能,对耕作和农田管理反映较为敏感<sup>[28]</sup>,其中颗粒有机碳、全氮组分容易被微生物利用分解<sup>[29]</sup>和作物吸收利用,一定程度上能够提高土壤养分的有效性。研究区域不同,农田管理措施的差异,对不同有机碳、全氮组分的影响作用并不一致<sup>[16-19,30]</sup>。本研究表明,在干旱荒漠区,长期耕作提高了砂粒和粉粒中有机碳、全氮含量,并随耕作时间的延长而增加,这与于维水等<sup>[31]</sup>的研究结果一致,究其原因一方面可能是由于干旱荒漠区未耕作土壤有机碳、全氮含量相对较低,长期耕作增加了土壤有机物的输入,特别是耕作初期增加了土壤微生物和动物的活性<sup>[32]</sup>,耕作 20 a,兰州湾、31 团和普惠农场土壤脲酶活性、蔗糖酶活性显著增强(附表 1),相比未耕作土壤分别显著提高了 85.4%、60.4%、131.7%和 101.5%、79.3%和 116.8%,同时植物残体和根系分泌物增加,从而增加了土壤砂粒中有机碳、全氮组分含量。另一方面,长期耕作促进土壤团聚体的形成<sup>[33]</sup>和土壤砂粒含量的增加<sup>[34]</sup>,使更多的有机碳、全氮被土壤团聚体固持,耕作 20 a,兰州湾、31 团和普惠农场 >53  $\mu\text{m}$  的团聚体含量显著增加(附表 1),相比未耕作土壤分别显著增加了 46.5%、81.2%和 87.3%,从而增加砂粒中有机碳、全氮的含量<sup>[35]</sup>。长期耕作也改变了不同颗粒中有机碳、全氮组分的分配比例,这可能是有机碳、全氮累积速率及其被矿化的难易程度共同作用的结果。于维水等<sup>[31]</sup>指出,长期耕作施肥影响土壤有机碳、全氮组分分配,黑土和潮土粉粒和黏粒中全氮占比较大,且长期耕作秸秆还田提高了砂粒中全氮在土壤全氮的比例分配,本研究发现类似现象,在不同颗粒全氮组分中,粉粒中全氮占比最大,在 30.2%—72.2%,砂粒中全氮占比最小,在 2.4%—35.9%,但砂粒中全氮所占比例随耕作时间延长而增加,其对全氮的贡献度增加<sup>[18]</sup>,从而促进了氮的活化和转化利用,有利于土壤微生物分解利用和提高氮的利用率。

### 3.2 长期耕作对土壤碳氮比变化的影响

土壤碳氮比通常被认为是土壤碳矿化能力的标

志,低的碳氮比可以加快微生物的分解和氮的矿化速率<sup>[8-10]</sup>,不利于碳的固存。陈洁等<sup>[18]</sup>指出长期施肥条件下,土壤碳氮比低于 10,李彤等<sup>[15]</sup>研究认为长期耕作条件下难降解组分颗粒组分碳氮比比值为 8.4—9.4,低于森林土壤和草地。本研究结果表明,长期耕作条件下土壤总的碳氮比比值为 4.7—6.4,耕作提高了土壤总的碳氮比,与雷军等<sup>[36]</sup>、黄彩变等<sup>[37]</sup>研究结果类似。这是因为相比未耕作土壤,总体上长期耕作增加了凋落物和根系残留有机物的输入,表层土壤有机碳增加速度大于全氮的增加速度,提高了土壤总的碳氮比。砂粒中碳氮比的降低,可能是由于随着耕作时间延长,土壤氮投入量持续增加,加快了砂粒中微生物分解和氮的矿化速率<sup>[10]</sup>,加快了有机物的分解矿化速度,不利于砂粒有机碳的累积。耕作 0—5 a,砂粒中的碳氮比高于粉粒和黏粒中的碳氮比,但是 5 a 后粉粒中碳氮比最高,主要是耕作初期砂粒中微生物活性较低,减弱了原有有机碳和新鲜有机碳的分解矿化<sup>[24]</sup>,增加了砂粒中有机碳的积累,而随着耕作时间的延长,土壤机械破碎水平和频度的提高,加速了大团聚体向小团聚体和微团聚体的转化,耕作 20 a,兰州湾、31 团和普惠农场 53—250  $\mu\text{m}$  的小微团聚体(附表 1),相比未耕作土壤显著增加 37.4%、111.6%和 121.7%,造成土壤各组分中碳氮比分配比例的变化。

## 4 结论

新疆干旱荒漠区长期耕作增加了土壤有机碳、全氮和不同颗粒中有机碳、全氮含量。不同颗粒组分中,以粉粒中的有机碳和全氮含量最高,砂粒中的有机碳和全氮含量最低。耕作改变了各颗粒组分中有机碳或全氮含量在土壤有机碳或全氮中的占比,其中粉粒中有机碳、全氮含量成为土壤有机碳、全氮分配的主体,分别占土壤有机碳的 43.3%—56.1%和全氮的 30.2%—72.2%;同时,耕作提高了土壤中和粉粒中碳氮比,降低了砂粒中碳氮比。长期耕作增加了新疆干旱荒漠区农田生态系统土壤有机碳和全氮的累积,该措施有助于干旱荒漠区农业土壤固碳减排与生产力的长期稳定。

## References

- [1] 戴尔阜,黄宇,赵东升. 草地土壤固碳潜力研究进展. 生态学报, 2015, 35(12): 3908-3918.
- DAI E F, HUANG Y, ZHAO D S. Review on soil carbon

- sequestration potential in grassland ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 3908-3918. (in Chinese)
- [2] 龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 王景燕, 胡庭兴, 宫渊波, 冉华. 长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤颗粒有机碳和氮的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2375-2381.
- GONG W, YAN X Y, CAI Z C, WANG J Y, HU T X, GONG Y B, RAN H. Effect of long-term fertilization on soil particulate organic and nitrogen in a wheat-maize cropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11): 2375-2381. (in Chinese)
- [3] 王娜, 朱小叶, 方晰, 辜翔, 陈金磊. 中亚热带退化林地土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳的变化. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 218-225.
- WANG N, ZHU X Y, FANG X, GU X, CHEN J L. The variation of soil organic carbon and soil particle-sizes in different degraded forests in the subtropical region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 218-225. (in Chinese)
- [4] 黄雅楠, 黄丽, 薛斌, 成莉娟, 李小坤, 鲁剑巍. 保护性耕作对水-旱轮作土壤有机碳组分的影响—基于密度分组法. *土壤通报*, 2019, 50(1): 109-114.
- HUANG Y N, HUANG L, XUE B, CHENG L J, LI X K, LU J W. Effect of conservation tillage on soil carbon fractions in paddy-upland rotation: Based on density grouping method. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(1): 109-114. (in Chinese)
- [5] 武天云, SCHOENAU J J, 李凤民, 钱佩源, 王方, MALHI S S. 利用离心法进行土壤颗粒分级. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 477-481.
- WU T Y, SCHOENAU J J, LI F M, QIAN P Y, WANG F, MALHI S S. Soil particle size fractionation with centrifugation method. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 477-481. (in Chinese)
- [6] CHRISTENSEN B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances in Soil Science New York*, 1992, 20.
- [7] MANDAL N, DWIVEDI B S, MEENA M C, SINGH D, DATTA S P, TOMAR P K, SHARMA B M. Effect of induced defoliation in pigeonpea, farmyard manure and sulphitation pressmud on soil organic carbon fractions, mineral nitrogen and crop yields in a pigeonpea-wheat cropping system. *Field Crops Research*, 2013, 154(6): 178-187.
- [8] FALLOON P D, SMITH P. Modelling refractory soil organic matter. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30: 388-398.
- [9] 王建林, 钟志明, 王忠红, 陈宝雄, 余成群, 胡兴祥, 沈振西, 大次卓嘎, 张宪洲. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳氮比的分布特征. *生态学报*, 2014, 34(22): 6678-6691.
- WANG J L, ZHONG Z M, WANG Z H, CHEN B X, YU C Q, HU X X, SHEN Z X, DACIZHUOGA, ZHANG X Z. Soil C/N distribution characteristics of alpine steppe ecosystem in Qinhai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6678-6691. (in Chinese)
- [10] 谢钧宇, 孟会生, 焦欢, 洪坚平, 张杰, 李丽娜, 黄晓磊, 栗丽, 赵林婷, 李廷亮. 施肥对复垦土壤中活性和难降解碳氮组分的影响. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(5): 1113-1121.
- XIE J Y, MENG H S, JIAO H, HONG J P, ZHANG J, LI L N, HUANG X L, LI L, ZHAO L T, LI T L. Effects of fertilization regimes on organic carbon and total nitrogen in labile and recalcitrant fractions in reclaimed soils. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(5): 1113-1121. (in Chinese)
- [11] 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 张政文, 卞新民, 朱利群. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 371-377.
- HU N J, HAN X Z, YANG M F, ZHANG Z W, BIAN X M, ZHU L Q. Short-term influence of straw return on the contents of soil organic carbon fractions, enzyme activities and crop yields in rice-wheat rotation farmland. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 371-377. (in Chinese)
- [12] LENKA N K, LAL R. Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till system. *Soil & Tillage Research*, 2013, 126: 78-89.
- [13] BURNS R G, DEFOREST J L, MARXSEN J, SINSABAUGH R L, STROMBERGER M E, WALLENSEIN M D, WEINRAUB M N, ZOPPINI A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 58: 216-234.
- [14] ZUBER S M, VILLAMIL M B. Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 97: 176-187.
- [15] 李彤, 王梓廷, 刘露, 廖允成, 刘杨, 韩娟. 保护性耕作对西北旱区土壤微生物空间分布及土壤理化性质的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(5): 859-870.
- LI T, WANG Z T, LIU L, LIAO Y C, LIU Y, HAN J. Effect of conservation tillage practices on soil microbial spatial distribution and soil physico-chemical properties of the Northwest Dryland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(5): 859-870. (in Chinese)
- [16] 徐梦, 李晓亮, 蔡晓布, 李晓林, 张旭博, 张俊伶. 藏东南地区不同土地利用方式下土壤有机碳组分及周转变化特征. *中国农业科学*, 2018, 51(19): 3714-3725.
- XU M, LI X L, CAI X B, LI X L, ZHANG X B, ZHANG J L. Impact of land use type on soil organic carbon fractionation and turnover in

- southeastern Tibet. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(19): 3714-3725. (in Chinese)
- [17] 佟小刚, 徐明岗, 张文菊, 卢昌艾. 长期施肥对红壤和潮土颗粒有机碳含量与分布的影响. *中国农业科学*, 2008, 41(11): 3664-3671.
- TONG X G, XU M G, ZHANG W J, LU C A. Influence of long-term fertilization on content and distribution of organic carbon in particle-size fractions of red soil and fluvo-aquic soil in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(11): 3664-3671. (in Chinese)
- [18] WU T Y, SCHOENAU J J, LI F M, QIAN P Y, MALHI S S, SHI Y C. Influence of fertilization and organic amendments on organic-carbon fractions in Heilu soil on the loess plateau of China. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168: 100-107.
- [19] 陈洁, 梁国庆, 周卫, 王秀斌, 孙静文, 刘东海, 胡诚. 长期施用有机肥对稻麦轮作体系土壤有机碳氮组分的影响. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(1): 36-44.
- CHEN J, LIANG G Q, ZHOU W, WANG X B, SUN J W, LIU D H, HU C. Responses of soil organic carbon and nitrogen fraction to long-term organic fertilization under rice-wheat rotation. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2019, 25(1): 36-44. (in Chinese)
- [20] SCHULTEN H R, LEINWEBER P. Influence of long-term fertilization with farmyard manure on soil organic matter: characteristics of particle-size fractions. *Biology and Fertility of Soils*. 1991, 12: 81-88.
- [21] 中国土壤学会农业化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983: 105-107.
- Professional Committee of Chinese Soil Science Society of Agricultural Chemistry. *Conventional Methods for Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: Science Press, 1983: 105-107. (in Chinese)
- [22] 张电学, 韩志卿, 吴素霞, 范海荣, 谢新宇, 常连生, 王秋兵. 不同施肥制度对褐土有机氮及其组分的影响. *华北农学报*, 2017, 32(3): 201-206.
- ZHANG D X, HAN Z Q, WU S X, FAN H R, XIE X Y, CHANG L S, WANG Q B. Effect of different fertilization regimes on organic nitrogen and its fractions in Cinnamon soil. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(3): 201-206. (in Chinese)
- [23] 任书杰, 曹明奎, 陶波, 李克让. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展. *地理科学进展*, 2006, 25(4): 58-67.
- REN S J, CAO M K, TAO B, LI K R. The effects of nitrogen limitation on terrestrial ecosystem carbon cycle: a review. *Progress in Geography*, 2006, 25(4): 58-67. (in Chinese)
- [24] 刘洪来, 张卫华, 王塍. 开垦对农牧交错地带性和非地带性草地土壤性质的影响. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 272-277.
- LIU H L, ZHANG W H, WANG K. Effect of reclamation on soil properties of zonal and intrazonal grasslands in agro-pastoral, ecotone. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(10): 272-277. (in Chinese)
- [25] HOUGHTON R A, HACKLER L J L. Continental scale estimates of the biotic carbon flux from land cover change: 1850-1980. *Oak Ridge National Laboratory*, USA, 1995, 144.
- [26] 吴乐知, 蔡祖聪. 农业开垦对中国土壤有机碳的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 118-134.
- WU L Z, CAI Z C. Effect of agricultural cultivation on soil organic carbon in china. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6): 118-134. (in Chinese)
- [27] WRIGHT A L, HONS F M. Soil aggregation and carbon and nitrogen storage under soybean cropping sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 507-513.
- [28] MARTÍNEZ J M, GALANTINI J A, DUVAL M E, LÓPEZ F M. Tillage effects on labile pools of soil organic nitrogen in a semi-humid climate of Argentina: A long-term field study. *Soil and Tillage Research*, 2017, 169: 71-80.
- [29] FRANZLUEBBERS A J, HONS F M, ZUBERER D A. Seasonal changes in soil microbial biomass and mineralizable C and N in wheat management systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(11): 1469-1475.
- [30] 贺美, 王迎春, 王立刚, 李成全, 王利民, 李玉红, 刘平奇. 深松施肥对黑土活性有机碳氮组分及酶活性的影响. *土壤学报*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20190218.1008.006.html>.
- HE M, WANG Y C, WANG L G, LI C Q, WANG L M, LI Y H, LIU P Q. Effects of subsoiling combined with fertilization on the fractions of soil active organic carbon and soil active nitrogen, and enzyme activities in black soil in Northeast china. *Acta Pedologica Sinica*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20190218.1008.006.html>. (in Chinese)
- [31] 于维水, 卢昌艾, 李桂花, 武红亮, 赵雅雯, 王碧胜, 孟繁华. 不同施肥制度下中国东部典型土壤易分解与耐分解氮的组分特征. *中国农业科学*, 2015, 48(15): 3005-3014.
- YU W S, LU C A, LI G H, WU H L, ZHAO Y W, WANG B S, MENG F H. Compinent characteristics of soil labile and recalcitrant nitrogen under different long-term fertilization Systems in East China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(15): 3005-3014. (in Chinese)
- [32] 刘军, 唐志敏, 刘建国, 张东升, 刘萍, 蒋桂英. 长期连作及秸秆还田对棉田土壤微生物量及种群结构的影响. *生态环境学报*, 2012, 21(8): 1418-1422.
- LIU J, TANG Z M, LIU J G, ZHANG D S, LIU P, JIANG G Y. Effect of cotton continuous cropping and returning stalks to soil on the

- quantities and community structure of soil microbes. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(8): 1418-1422. (in Chinese)
- [33] 徐万里, 唐光木, 盛建东, 梁智, 周勃, 朱敏. 垦殖对新疆绿洲农田土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2010, 30(7): 1773-1779.
- XU W L, TANG G M, SHENG J D, LIANG Z, ZHOU B, ZHU M. Effects of cultivation on organic carbon fractionation and aggregate stability in Xinjiang oasis soils. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1773- 1779. (in Chinese)
- [34] 唐光木, 徐万里, 周勃, 梁智, 葛春辉. 耕作年限对棉田土壤颗粒及矿物结合态有机碳的影响. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 237-241.
- TANG G M, XU W L, ZHOU B, LIANG Z, GE C H. Effects of cultivation Years on particulate organic carbon and mineral-associated organic carbon in cotton soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3): 237-241. (in Chinese)
- [35] GOLCHIN A, OADES J M, SKJEMSTD J O. Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32: 1043-1068
- [36] 雷军, 张凤华, 林海荣, 韩春丽, 赵瑞海. 干旱区盐渍化荒地不同开垦年限土壤碳氮储量研究. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(3): 266-271.
- LEI J, ZHANG F H, LIN H R, HAN C L, ZHAO R H. Soil carbon and nitrogen storage of different reclamation years in salinized wasteland in arid region. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(3): 266-271. (in Chinese)
- [37] 黄彩变, 曾凡江, 雷加强, 刘镇, 安桂香. 开垦对绿洲农田碳氮累积及其与作物产量关系的影响. *生态学报*, 2011, 31(18): 5113-5120.
- HUANG C B, ZENG F J, LEI J Q, LIU Z, AN G X. Effect of cultivation on soil organic carbon and total nitrogen accumulation in Cele oasis croplands and their relation to crop yield. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5113-5120. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)