

## 长期不同施氮量下黑土团聚体稳定性及有机碳含量的变化

姚俊红, 武俊男, 王呈玉, 崔炎田, 高云航, 孙嘉璐, 刘淑霞

### 引用本文:

姚俊红, 武俊男, 王呈玉, 崔炎田, 高云航, 孙嘉璐, 刘淑霞. 长期不同施氮量下黑土团聚体稳定性及有机碳含量的变化[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 102–110.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0024>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 亚热带地区不同种植年限果园土壤团聚体结构及有机碳、氮分布特征

林诚, 郑祥洲, 郭宝玲, 丁洪, 解钰, 张玉树

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1560–1566 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1193>

#### 膨润土对镉污染土壤团聚体结构特征及有机碳含量的影响

王润珑, 徐应明, 李然, 罗文文, 孙约兵

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2701–2710 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0104>

#### 施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性

陆太伟, 蔡岸冬, 徐明岗, 高强, 孙楠, 张文菊

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2183–2193 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1767>

#### 不同种植模式下坡耕地红壤团聚体有机碳矿化特征

乌达木, 范茂攀, 赵吉霞, 李孝梅, 李永梅

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1519–1528 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1446>

#### 秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响

王学霞, 张磊, 梁丽娜, 宋宁宁, 刘东生, 王甲辰

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1774–1782 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0010>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姚俊红, 武俊男, 王呈玉, 等. 长期不同施氮量下黑土团聚体稳定性及有机碳含量的变化[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 102–110.

YAO J H, WU J N, WANG C Y, et al. Changes in aggregates stability and organic carbon content of black soil following the use of different long-term nitrogen application rates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(1): 102–110.



开放科学 OSID

# 长期不同施氮量下黑土团聚体稳定性及有机碳含量的变化

姚俊红<sup>1,2</sup>, 武俊男<sup>3</sup>, 王呈玉<sup>1,2</sup>, 崔炎田<sup>1,2</sup>, 高云航<sup>4</sup>, 孙嘉璐<sup>1,2</sup>, 刘淑霞<sup>1,2\*</sup>

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2. 吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 长春 130118; 3. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033; 4. 吉林农业大学动物科技学院, 长春 130118)

**摘要:**为测定不同氮肥施用量对黑土团聚体组成及稳定性、有机碳含量及团聚体有机碳分布的影响,阐明黑土有机碳稳定性对不同施氮水平的响应机制,本研究在吉林省梨树县不同施氮水平长期定位试验田进行取样,以施氮水平不同设置5个处理,分别为T1(0)、T2(160 kg·hm<sup>-2</sup>)、T3(240 kg·hm<sup>-2</sup>)、T4(280 kg·hm<sup>-2</sup>)、T5(320 kg·hm<sup>-2</sup>),分析长期不同施氮量下水稳性团聚体组成、团聚体结构特征、土壤总有机碳含量及团聚体有机碳分布的变化,探究酸化黑土有机碳含量影响特征。结果表明:随氮肥施用水平的升高,土壤碱解氮(AN)和全氮(TN)含量先增后减,T3处理含量最高,AN和TN分别比T1处理高24.90%、10.28%;土壤速效磷(AP)的含量呈下降趋势。随氮肥用量的提高,土壤团聚体呈现大粒径团聚体向小粒径团聚体转变的趋势,>2 mm粒径团聚体下降14.55%。土壤有机碳总量随施氮水平的提高呈先增后减的趋势,施氮量为280 kg·hm<sup>-2</sup>有机碳含量最高;>2 mm和2~0.25 mm粒径团聚体有机碳含量较高;不同施氮水平下有机碳含量与团聚体稳定性特征的几何平均直径、土壤团聚体破坏率、不稳定团粒指数和土壤化学性质的相关度较高。研究表明:通过13 a连续施入不同水平氮肥,土壤有机碳含量随氮肥施用量的增加呈先增后减的趋势;氮肥施用量增加会显著降低土壤pH,土壤团聚体有机碳主要分布在2~0.25 mm粒径中。

**关键词:**氮肥施用量;黑土;土壤理化性质;团聚体有机碳;团聚体稳定性

中图分类号:S153.6;S152.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)01-0102-09 doi:10.11654/jaes.2023-0024

## Changes in aggregates stability and organic carbon content of black soil following the use of different long-term nitrogen application rates

YAO Junhong<sup>1,2</sup>, WU Junnan<sup>3</sup>, WANG Chengyu<sup>1,2</sup>, CUI Yantian<sup>1,2</sup>, GAO Yunhang<sup>4</sup>, SUN Jialu<sup>1,2</sup>, LIU Shuxia<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources in Commodity Grain Base of Jilin Province, Changchun 130118, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China; 4. School of Animal Science and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** This study aimed to determine the effects of different nitrogen fertilizer application rates on aggregate composition and stability, and organic carbon content and distribution within black soil aggregates, and to elucidate the response mechanisms of black soil organic carbon stability to these different nitrogen application levels. Samples were collected from long-term pilot plots with different nitrogen application levels in Lishu County, Jilin Province. Five treatment groups with different nitrogen application levels, T1(0), T2(160 kg·hm<sup>-2</sup>), T3(240 kg·hm<sup>-2</sup>), T4(280 kg·hm<sup>-2</sup>), and T5(320 kg·hm<sup>-2</sup>), were assessed to analyze the corresponding influence of nitrogen application levels on the organic carbon content of acidified black soil. With an increase in nitrogen fertilizer application level, the content of soil alkaline hydrolyzable nitrogen (AN) and total nitrogen (TN) first increased and then decreased, with the highest contents being

收稿日期:2023-01-12 录用日期:2023-05-23

作者简介:姚俊红(1998—),女,河北邯郸人,硕士研究生,从事施肥与环境研究。E-mail:735022119@qq.com

\*通信作者:刘淑霞 E-mail:liushuxia2005824@163.com

基金项目:吉林省自然科学基金项目(20210101100JC);国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-37)

Project supported: Natural Science Foundation of Jilin Province, China(20210101100JC); China Agriculture Research System of MOF and MARA(CARS-37)

observed in the T3 treatment group; AN and TN were 24.90% and 10.28% higher in the T3 group than those in the T1 group, respectively. Nonetheless, the content of soil available phosphorus (AP) showed a decreasing trend with increasing nitrogen application levels. With an increase in nitrogen fertilizer dosage, soil aggregates exhibited an overall transition from large to small particle size aggregates, with a corresponding 14.55% decrease in aggregates with a particle size  $> 2$  mm. The total amount of soil organic carbon exhibited an initial increasing trend followed by a decreasing trend with an increasing nitrogen application level; the highest organic carbon content was observed at a nitrogen application rate of  $280 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . The organic carbon content in aggregates with particle sizes  $> 2$  mm and those ranging from 2 mm to 0.25 mm was relatively high. Further, the correlation between organic carbon content and the aggregate stability characteristics average geometric diameter (GMD), aggregate failure rate (PAD), unstable aggregate index ( $E_{\text{LT}}$ ), and soil chemistry properties was high across the different nitrogen application levels. Throughout 13 years of continuous application of different levels of nitrogen fertilizer, with the continuous increase in nitrogen fertilizer application, the soil organic carbon content exhibited a trend of initially increasing before decreasing. Overall, an increase in nitrogen fertilizer application significantly reduces soil pH; additionally, soil aggregate organic carbon is primarily distributed within particle sizes ranging from 2–0.25 mm in size.

**Keywords:** nitrogen application rate; black soil; soil physical and chemical property; aggregate organic carbon; soil aggregate stability

农田土壤有机碳库是全球碳库最活跃的部分<sup>[1-2]</sup>,也是全球碳循环的重要组成部分<sup>[3]</sup>。我国东北平原是世界仅有的四大块连片黑土区之一,是我国最适宜耕作地区,同时也是我国的商品粮主产区,享有“谷物仓库”之称<sup>[4]</sup>。然而,由于长期高强度利用和不合理耕作,加之风蚀和水蚀影响,黑土有机质含量大幅下降。区域调查表明,与1980年第二次全国土壤普查相比,2011年东北地区耕层(0~20 cm)土壤有机碳储量下降了  $0.41 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以C计)<sup>[5]</sup>。黑土有机质含量降低是黑土退化的核心问题,如何提高黑土有机碳含量,增强黑土有机碳的稳定性是黑土保护的重中之重。

近年来为提高农作物产量,我国氮肥施用量普遍偏高,一些地区达到  $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,一些蔬菜施肥量更是高达  $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,而国际上氮肥的施用上限为  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[6]</sup>。科学证据表明,土壤酸化主要是由于过量施用氮肥造成的<sup>[7]</sup>。张福锁<sup>[8]</sup>的研究结果显示,从20世纪80年代到21世纪,全国农田土壤的pH值平均下降了0.5个单位。施氮土壤酸化对土壤植物、作物的影响是多方面的,如土壤养分有效性降低、作物根系生长和发育不良、重金属危害的风险增加<sup>[9-10]</sup>、有机碳含量发生变化<sup>[11]</sup>等。土壤团聚体是土壤结构的基本单元<sup>[12]</sup>,土壤中90%的碳保存在团聚体内,团聚体影响土壤养分的迁移转化,对土壤质量产生影响<sup>[13]</sup>。不同粒径团聚体有机碳的固碳率不同,且矿化速度不同<sup>[14]</sup>。

在东北粮食主产区,农民大量施用氮肥来提高作物产量,而土壤氮循环与碳循环有着密切的关系。目前关于氮肥施用水平的研究大多集中在对土壤氮素循环方面,而对土壤有机碳的影响,尤其是对土壤团

聚体有机碳方面的研究还较少。目前关于施氮对土壤有机碳的影响尚未得出统一结论,现有的研究表明,施氮处理后土壤有机碳矿化速率会增加或没有变化<sup>[15]</sup>,施氮对土壤有机碳的影响受多种因素制约,不同地区的影响规律不同<sup>[16]</sup>。鉴于此,本文研究了长期不同施氮水平的黑土中总有机碳及团聚体有机碳的变化特征。

本文采用长期定位试验的方法,通过对土壤pH、全氮含量、碱解氮含量、施氮量及土壤团聚体组成等指标的测定,研究不同施氮水平对黑土理化性质、团聚体稳定性和有机碳含量的影响,以及对土壤有机碳总量及土壤团聚体分布的影响,以明确不同施氮水平下土壤有机碳的演化和走向,及施氮对土壤有机碳变化的影响规律,为合理制定不同施氮水平下黑土有机碳稳定措施提供理论依据和支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区域概况

试验区位于吉林省四平市梨树县四棵树乡三棵樹村,中国农业大学吉林梨树试验站试验田( $43^{\circ}31' \text{ N}$ ,  $124^{\circ}34' \text{ E}$ ),该地区年平均降水量576.8 mm,无霜期145 d,年平均温度5.8  $^{\circ}\text{C}$ ,土壤类型为草甸黑土。试验始于2008年,长期定位试验前土壤pH为6.16,有机碳含量为  $10.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮含量为  $1.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碱解氮含量为  $128.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷含量为  $43.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾含量为  $196.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

本试验共设5个处理,每个处理3次重复。试验小区面积为  $130 \text{ m}^2$ ,所有小区均种植玉米“先玉335”,在不使用塑料覆膜的情况下进行作物栽培,每年4月

播种,10月收获,所有玉米残体均从小区中移除,无秸秆还田。各处理具体施肥方案见表1。

表1 不同处理施肥量

Table 1 Fertilizer dosage of different treatments

| 处理<br>Treatment | 氮肥 N/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 磷肥 P/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 钾肥 K/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 肥料施用方法<br>Fertilizer application<br>method         |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------|
| T1              | 0                               | 100                             | 120                             | 氮肥以基肥、追肥两种方式施入(基肥与追肥比例为1:2),追肥在拔节期施入;磷肥和钾肥一次性作基肥施入 |
| T2              | 160                             | 100                             | 120                             |                                                    |
| T3              | 240                             | 100                             | 120                             |                                                    |
| T4              | 280                             | 100                             | 120                             |                                                    |
| T5              | 320                             | 100                             | 120                             |                                                    |

供试肥料:尿素含氮46%,磷酸二铵含氮16%,磷肥含五氧化二磷48%,氯化钾含钾60%。

于2021年10月秋收后采集表层土壤样品,采用对角线法进行采样,土样放入保鲜盒内,尽量保持土壤结构的完整。土样经自然风干后用于测定。

### 1.3 测定项目及方法

土壤理化性质测定参见《土壤农化分析》<sup>[17]</sup>。

土壤容重(BD)采用环刀法;土壤含水量(SWC)采用烘干法;土壤孔隙度(SP)采用计算法;土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法;土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法;土壤速效磷(AP)采用0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub>浸提,钼锑抗比色法;土壤速效钾(AK)采用NH<sub>4</sub>OAc浸提,火焰光度法;土壤碱解氮(AN)采用扩散法;土壤pH采用pH计(水:土=2.5:1);土壤交换性酸、交换性H<sup>+</sup>和交换性Al<sup>3+</sup>采用氯化钾交换法;土壤交换性Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>采用原子吸收分光光度法;土壤交换性Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>采用火焰光度法。

土壤团聚体的分布与稳定性采用干筛法与湿筛法测定。干筛法:称取风干土壤500 g,过套筛后得到粒径为>5、5~2、<2~1、<1~0.5、<0.5~0.25、<0.25 mm的团聚体,将各粒级土粒称质量,计算各级团聚体所占百分比,按百分比配成3份50 g土样,供湿筛分析;湿筛法:将供试土壤装入套筛(孔径为2、0.25、0.053 mm)中沿沉降桶小心加水至筛边缘2/3处,浸湿5 min后开机振荡5 min,将各粒级土壤洗进称好质量的铝盒,待烘干后称质量,计算百分比。将团聚体筛分为大团聚体(>2 mm)、中间团聚体(2~0.25 mm)、微团聚体(<0.25~0.053 mm)和黏粉粒级团聚体(<0.053 mm)4个粒径。

### 1.4 数据处理

土壤孔隙度计算公式<sup>[18]</sup>:

$$T = (R_s - D_s) / R_s \times 100\%$$

式中: $T$ 为土壤总孔隙度,%; $R_s$ 为土壤比重,一般取2.65 g·cm<sup>-3</sup>; $D_s$ 为土壤容重,g·cm<sup>-3</sup>。

土壤团聚体平均质量直径(MWD, $D_{MW}$ )、几何平均直径(GMD, $D_{GM}$ )、>0.25 mm团聚体质量分数( $R_{0.25}$ )计算公式如下<sup>[19]</sup>:

$$D_{MW} = \sum_{i=1}^n x_i \times w_i$$

$$D_{GM} = \exp \left( \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right)$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T}$$

土壤团聚体破坏率(PAD, $P$ )和不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )的计算公式如下:

$$P = \frac{D_{0.25} - W_{0.25}}{D_{0.25}} \times 100$$

$$E_{LT} = \frac{M_T - M_{0.25}}{M_T} \times 100$$

式中: $w_i$ 为 $i$ 粒径团聚体的质量百分比,%; $x_i$ 为 $i$ 粒径团聚体的平均直径; $D_{0.25}$ 和 $W_{0.25}$ 分别为粒径>0.25 mm机械稳定性和水稳定性团聚体质量百分含量,%; $M_{0.25}$ 为粒径>0.25 mm团聚体的质量,g; $M_T$ 为团聚体的总质量,g。

采用Excel 2010处理数据,SPSS 21.0进行数据分析,Origin 2021软件绘图,Canoco 5软件进行冗余分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性质变化特征

#### 2.1.1 不同施氮水平下土壤物理性质变化

如表2所示,施氮量对土壤含水量、容重和孔隙度无显著影响,各处理间差异不显著( $P>0.05$ ),且上述指标的变化没有什么规律。T2处理土壤含水量和容重较其他处理略高,土壤孔隙度较其他处理略低;而T3、T4处理的土壤孔隙度稍高于其他处理,土壤含水量和容重则稍低于其他处理。

#### 2.1.2 土壤团聚体变化特征

由表3可以看出,不同施氮量处理土壤的团聚体组成均以>2 mm团聚体和2~0.25 mm团聚体为主,分别占团聚体总量的19.59%~34.14%和32.41%~39.28%。

不同粒径土壤团聚体占比从高到低的顺序依次为2~0.25、>2、<0.25~0.053 mm和<0.053 mm。因施氮水平的不同,不同粒径土壤团聚体的分布也略有不同。

与T1处理相比其他4个处理<0.053 mm粒径土



表2 不同施氮水平土壤物理性质变化  
Table 2 Changes of soil physical properties at different nitrogen application levels

| 处理<br>Treatment | 土壤含水量<br>Soil moisture content/% | 土壤容重<br>Soil bulk density/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 土壤孔隙度<br>Soil porosity/% |
|-----------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|
| T1              | 22.75±1.40a                      | 1.40±0.08a                                          | 47.33±3.13a              |
| T2              | 23.18±0.66a                      | 1.45±0.13a                                          | 45.28±4.99a              |
| T3              | 22.38±0.77a                      | 1.32±0.13a                                          | 50.30±4.93a              |
| T4              | 21.57±1.37a                      | 1.34±0.10a                                          | 49.59±3.96a              |
| T5              | 23.22±0.65a                      | 1.40±0.10a                                          | 47.07±3.91a              |

注:表中数据为平均值±标准差,不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。  
Note: The data in the table are  $\bar{x} \pm s$ . Different lowercase letters indicate the significant difference between different treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

表3 不同施氮水平土壤水稳性团聚体组成的变化(%)  
Table 3 Changes of soil water stable aggregate composition at different nitrogen application levels(%)

| 处理<br>Treatment | >2 mm        | 2~0.25 mm     | 0.25~0.053 mm | <0.053 mm     |
|-----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| T1              | 34.14±1.59Ba | 38.43±1.18Aab | 16.14±1.03Cd  | 11.28±0.67Dc  |
| T2              | 27.48±1.38Bb | 35.81±2.14Abc | 24.23±0.74Ccd | 12.49±0.24Db  |
| T3              | 29.36±2.08Bb | 32.41±0.96Ad  | 25.47±1.18Cbc | 12.77±0.07Dab |
| T4              | 27.62±2.01Bb | 33.64±1.55Acd | 26.29±0.65Bab | 12.45±0.39Cb  |
| T5              | 19.59±1.66Cc | 39.28±1.13Aa  | 27.44±1.36Ba  | 13.69±0.89Da  |

注:不同大写字母表示相同处理不同粒径间的差异显著( $P<0.05$ )。  
Note: Different capital letters represent significant differences between different particle sizes of the same treatments ( $P<0.05$ ).

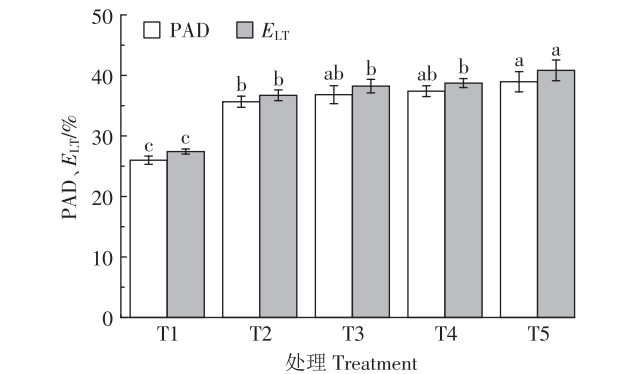
壤团聚体占比均有所增加,这说明随施氮水平的提高,土壤颗粒有细化的趋势。氮肥施用量对<0.25~0.053 mm粒径土壤团聚体的数量影响较大,其随施氮水平提高表现出比较明显的增加趋势,即T1<T2<T3<T4<T5,T5处理比T1处理增加了11.3个百分点,增幅为70%。2~0.25 mm粒径土壤团聚体占比随施氮水平的提高表现出先下降后升高的趋势,其中T3处理占比最低为32.41%,分别比T1处理和T5处理低6.02个百分点和6.87个百分点。与T1处理相比,其他处理>2 mm土壤团聚体的数量均表现出不同程度的下降,其中以T5处理下降最为显著,比T1处理下

降了14.55个百分点,下降幅度为42.6%。  
如表4所示,不同施氮量处理土壤团聚体稳定性有显著差异( $P<0.05$ )。从整体上看,随土壤施氮量的增加,土壤团聚体稳定性有所降低,T1处理的MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 显著高于其他处理,MWD分别比T2、T3、T4、T5处理高18.83%、15.82%、19.61%及44.09%;GMD分别高34.43%、34.43%、38.98%、67.35%; $R_{0.25}$ 分别高9.29、10.81、11.31个和13.42个百分点。T2、T3处理间MWD和GMD无显著差异,都显著高于T5处理;T2处理的 $R_{0.25}$ 显著高于T4、T5处理,T3处理显著高于T5处理。

PAD与 $E_{LT}$ 变化趋势基本一致,均随施氮量增加而提高(图1)。T1处理的PAD和 $E_{LT}$ 显著低于其他处理,其PAD低于T5处理12.96个百分点, $E_{LT}$ 低于T5处理13.42个百分点。

2.2 不同施氮水平下土壤化学性质变化  
2.2.1 土壤养分的变化

与物理性质不同,不同施氮水平对土壤化学性质影响较显著。如表5所示,不同处理土壤中碱解氮含量随土壤施氮量增加出现先升高后下降的趋势,其中T3处理含量最高,比T1处理提高了24.16 mg·kg<sup>-1</sup>,T3



图中数据为平均值±标准差,不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。  
The data in the figure are  $\bar{x} \pm s$ . Different lowercase letters indicate the significant difference between different treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

图1 不同施氮水平土壤团聚体PAD和 $E_{LT}$ 的变化  
Figure 1 Changes of PAD and  $E_{LT}$  of soil aggregate under different nitrogen application levels

表4 不同施氮水平土壤团聚体稳定性的变化  
Table 4 Changes of stability of soil aggregate under different nitrogen application levels

| 处理 Treatment  | T1          | T2          | T3           | T4          | T5          |
|---------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| MWD/mm        | 1.83±0.05a  | 1.54±0.04b  | 1.58±0.07b   | 1.53±0.07b  | 1.27±0.06c  |
| GMD/mm        | 0.82±0.02a  | 0.61±0.01b  | 0.61±0.03b   | 0.59±0.02b  | 0.49±0.02c  |
| $R_{0.25}/\%$ | 72.58±0.42a | 63.29±0.88b | 61.77±1.12bc | 61.27±0.74c | 59.16±1.71d |

和T4处理间差异不显著( $P>0.05$ )。不同处理土壤速效磷含量随施氮量增加基本呈现降低的趋势,其中T1和T5处理与其他3个处理间差异显著,T5处理比T1处理下降了43.36%,处理之间差异达到极显著水平( $P<0.01$ )。不同处理土壤速效钾含量随土壤施氮水平的提高出现先下降后升高的趋势,具体表现为 $T5>T1>T4>T3>T2$ ,T5处理与T2处理的速效钾含量差异达到 $114\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。不同处理的全氮含量与土壤施氮量的变化之间没有明显的规律可循,T1和T2处理与其他3个处理间存在一定差异。施氮水平的上升提高了黑土的C/N。

2.2.2 土壤酸度的变化

随施氮水平的提高,土壤pH次第降低,T1处理与其他处理之间差异显著,尤其是与T4和T5处理相比差异极显著,土壤pH分别下降1.10个和1.22个单位(表6)。

土壤总交换性酸、交换性 $\text{H}^+$ 和交换性 $\text{Al}^{3+}$ 含量均随施氮水平的上升而提高。其他处理与T1处理相比,土壤总交换性酸、交换性 $\text{H}^+$ 和交换性 $\text{Al}^{3+}$ 含量分

别增加 $0.09\sim 0.53$ 、 $0.03\sim 0.15\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.05\sim 0.39\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.2.3 相关性分析

表7的相关性分析结果表明,施氮水平与土壤pH和土壤碱解氮、速效磷、速效钾、全氮含量的变化之间存在一定的相关性,其与土壤碱解氮、土壤全氮和C/N之间存在显著的正相关关系,而与土壤速效磷、速效钾和土壤pH之间存在负相关关系。

2.3 土壤交换性盐基离子含量的变化

由表8可知,随施氮水平的提高,交换性盐基总量及各盐基离子的含量均呈逐渐下降的趋势。盐基离子总量T1与T5处理的差异最大,差值为 $6.08\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,T5处理比T1处理下降了38.21%。T3、T4和T5处理间差异没有达到显著水平,但这3个处理与T1处理间差异显著。

施氮量的变化对土壤交换性 $\text{K}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 含量的影响不大,各处理间差异不显著;不同处理 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+$ 含量的变化与盐基离子总量的变化相似,T1和T2处理与其他3个处理间的差值较大。T5、T4和T3处理交

表5 不同施氮水平土壤化学性质的变化

Table 5 Changes of soil chemical characteristics under different nitrogen application levels

| 处理<br>Treatment | 碱解氮<br>Available N/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 速效磷<br>Available P/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 速效钾<br>Available K/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 全氮<br>Total N/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | C/N         |
|-----------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------|
| T1              | 97.03±2.18d                                           | 14.83±0.1a                                            | 267.00±3.00b                                          | 0.88±0.02b                                      | 17.60±0.41b |
| T2              | 107.89±.73c                                           | 9.42±0.1b                                             | 184.33±2.52d                                          | 0.89±0.01b                                      | 20.97±0.77a |
| T3              | 121.19±.67a                                           | 10.55±0.2b                                            | 194.33±2.89c                                          | 0.97±0.01a                                      | 20.37±0.76a |
| T4              | 118.52±.84a                                           | 10.48±0.2b                                            | 202.67±3.21c                                          | 0.96±0.01a                                      | 20.56±0.09a |
| T5              | 112.90±.64b                                           | 8.40±0.4c                                             | 298.33±3.21a                                          | 0.96±0.01a                                      | 19.81±0.69a |

表6 不同施氮水平土壤酸化指标的变化

Table 6 Changes in soil acidification indicators under different nitrogen application levels

| 处理<br>Treatment | pH          | 总交换性酸<br>Total exchangeable acid/( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 交换性 $\text{H}^+$<br>Exchangeable $\text{H}^+$ /( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 交换性 $\text{Al}^{3+}$<br>Exchangeable $\text{Al}^{3+}$ /( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |
|-----------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| T1              | 6.54±0.02a  | 0.31±0.02d                                                            | 0.13±0.02d                                                                          | 0.17±0.01d                                                                                  |
| T2              | 6.03±0.17b  | 0.40±0.02d                                                            | 0.17±0.04c                                                                          | 0.23±0.04c                                                                                  |
| T3              | 5.72±0.34bc | 0.61±0.02c                                                            | 0.21±0.03b                                                                          | 0.39±0.02b                                                                                  |
| T4              | 5.44±0.24c  | 0.77±0.12b                                                            | 0.25±0.03a                                                                          | 0.51±0.09a                                                                                  |
| T5              | 5.32±0.22c  | 0.84±0.03a                                                            | 0.28±0.11a                                                                          | 0.56±0.07a                                                                                  |

表7 土壤施氮量与土壤化学性质的相关性分析

Table 7 Correlation analysis between the amount of nitrogen applied to soil and soil chemistry properties

| 项目<br>Item                    | pH       | 碱解氮<br>Available N | 速效磷<br>Available P | 速效钾<br>Available K | 全氮<br>Total N | C/N     |
|-------------------------------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|---------|
| 相关性系数 Correlation coefficient | -0.893** | 0.854**            | -0.865**           | -0.088             | 0.841**       | 0.679** |

注:\*差异显著( $P<0.05$ ),\*\*差异极显著( $P<0.01$ )。  
Note:\*significant difference ( $P<0.05$ ),\*\* extremely significant difference ( $P<0.01$ ).

表8 不同施氮水平土壤交换性盐基离子含量的变化( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )Table 8 Changes of content of soil exchangeable base cations under different treatments( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 处理<br>Treatment | 交换性 $\text{K}^+$<br>Exchangeable $\text{K}^+$ | 交换性 $\text{Na}^+$<br>Exchangeable $\text{Na}^+$ | 交换性 $\text{Ca}^{2+}$<br>Exchangeable $\text{Ca}^{2+}$ | 交换性 $\text{Mg}^{2+}$<br>Exchangeable $\text{Mg}^{2+}$ | 交换性盐基总量<br>Total exchangeable base cations |
|-----------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| T1              | $0.65\pm0.26\text{a}$                         | $1.54\pm0.13\text{a}$                           | $13.18\pm1.04\text{a}$                                | $0.78\pm0.10\text{a}$                                 | $15.91\pm1.88\text{a}$                     |
| T2              | $0.61\pm0.05\text{a}$                         | $1.32\pm0.14\text{ab}$                          | $10.79\pm2.68\text{ab}$                               | $0.78\pm0.15\text{a}$                                 | $13.34\pm2.49\text{ab}$                    |
| T3              | $0.42\pm0.04\text{a}$                         | $1.25\pm0.21\text{bc}$                          | $8.29\pm0.40\text{b}$                                 | $0.76\pm0.03\text{a}$                                 | $10.78\pm0.55\text{bc}$                    |
| T4              | $0.45\pm0.03\text{a}$                         | $1.06\pm0.16\text{c}$                           | $7.67\pm0.59\text{b}$                                 | $0.65\pm0.06\text{a}$                                 | $10.04\pm0.74\text{c}$                     |
| T5              | $0.48\pm0.01\text{a}$                         | $1.07\pm0.07\text{c}$                           | $7.52\pm2.07\text{b}$                                 | $0.65\pm0.04\text{a}$                                 | $9.83\pm0.89\text{c}$                      |

换性  $\text{Ca}^{2+}$  含量分别比 T1 处理下降 5.66、5.51  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 4.89  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 下降幅度分别为 42.94%、41.81% 和 37.10%; T5、T4、T3 和 T2 处理交换性  $\text{Na}^+$  含量分别比 T1 处理下降了 30.52%、31.17%、18.83% 和 14.29%。由此可见, 施氮水平对土壤交换性盐基总量和交换性  $\text{Na}^+$  及  $\text{Ca}^{2+}$  含量的影响较为明显。

## 2.4 不同施氮水平下土壤有机碳变化特征

### 2.4.1 土壤有机碳总量变化

从图 2 可见, 不同处理土壤有机碳含量范围为 15.52~19.79  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 随施氮水平的提高, 土壤有机碳含量呈现先升高后下降的趋势。

当施氮量达到 280  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 土壤有机碳含量出现下降, 不同处理土壤有机碳含量具体表现为 T4>T3>T5>T2>T1, 其中 T3、T4、T5 有机碳含量显著高于 T1 处理, T3、T4、T5 处理间无显著差异 ( $P>0.05$ )。

### 2.4.2 土壤团聚体有机碳的组成变化

不同施氮量处理土壤不同粒径团聚体有机碳含量有所差异, 如图 3 所示: 2~0.25 mm 和 >2 mm 粒径有机碳含量较高, 在 T1、T2 处理中 2~0.25 mm 粒径有机碳含量略高于 >2 mm 粒径, 但差异不显著, 在 T3、T4、T5 处理中 2~0.25 mm 粒径有机碳含量显著高于 >2 mm 粒径; <0.25~0.053 mm 与 <0.053 mm 粒径有机碳

含量较低, <0.053 mm 粒径有机碳含量略高于 <0.25~0.053 mm 粒径, 且在 T1、T4 处理中有显著差异 ( $P<0.05$ )。在不同处理中各粒径有机碳含量由高到低为 2~0.25、>2、<0.053 mm 和 <0.25~0.053 mm。

各处理团聚体有机碳含量变化也有差异, 在 >2 mm 粒径中, T5 处理有机碳含量较高, 显著高于 T1 与 T4 处理, T2、T3、T4 处理间无显著差异, 但均显著高于 T1 处理; 在 2~0.25 mm 粒径中 T3 处理有机碳含量最高, 分别比 T1、T2、T4、T5 处理高 8.86%、4.18%、6.26% 和 3.83%, 均存在显著差异, 整体呈现先增高后降低的趋势; 在 <0.25~0.053 mm 粒径中, 各处理的有机碳含量均无显著差异, 施氮水平对该粒径有机碳含量影响较小; 在 <0.053 mm 粒径中, T1 处理有机碳含量最高, 氮肥施用量增加会降低 <0.053 mm 粒径有机碳含量, T1 处理有机碳含量显著高于其他处理, 分别比 T2、T3、T4、T5 处理高 3.40%、2.32%、2.95% 和 4.04%, T2、T3、T4、T5 处理间 <0.053 mm 粒径有机碳含量无显著差异。

相关性分析结果表明: 施氮水平与土壤有机碳总

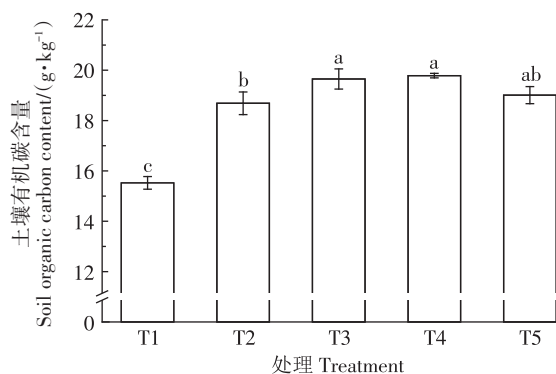


图2 不同施氮水平土壤有机碳总含量的变化

Figure 2 Changes of total organic carbon content of soil under different treatments

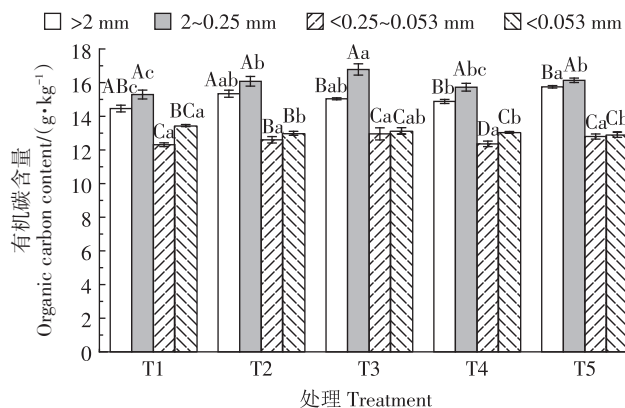


图3 不同施氮水平团聚体有机碳含量的变化

Figure 3 Change of organic carbon content in aggregates under different treatments

量之间存在显著负相关,除 $<0.053$  mm粒径有机碳含量与土壤施氮水平间呈正相关关系外,其他粒级土壤团聚体有机碳含量均与施氮水平间呈负相关关系。

## 2.5 土壤理化性质、团聚体稳定性特征与有机碳及团聚体有机碳的相关性分析

图4为土壤施氮量、理化性质、团聚体结构特征对原土及团聚体有机碳含量的冗余分析。分析结果表明:不同施氮水平原土及团聚体有机碳含量变化受影响因子影响较大,第一轴累计解释量为81.25%,第二轴解释量为7.30%,累计为88.55%。其中土壤碱解氮、C/N、全氮对有机碳及团聚体有机碳含量解释度高( $P<0.05$ ),分别为67.7%、12.6%、5.3%,且碱解氮、C/N、全氮对 $<0.053$  mm粒径团聚体有机碳含量解释呈负相关,对原土及团聚体有机碳含量解释呈正相关;土壤施氮量、速效磷对有机碳及团聚体有机碳含量的解释度分别为2.9%、2.5%( $P<0.01$ ),速效磷对 $<0.053$  mm粒径团聚体有机碳含量解释度呈正相关,对原状土及其他粒径有机碳含量解释呈负相关。

## 3 讨论

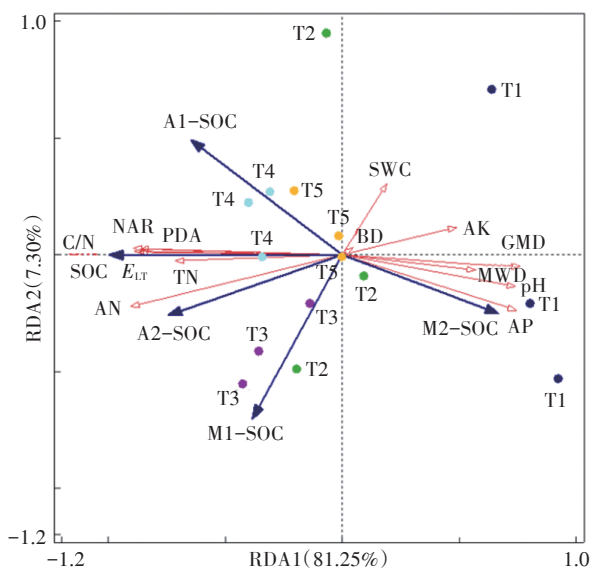
土壤理化性质是衡量土壤质量状况的重要指标之一,试验结果表明氮肥施用水平对土壤化学养分影

响较大。随施氮量的增加,碱解氮、全氮含量增加,相关性分析也表明,土壤碱解氮和全氮含量与氮肥施用水平之间存在显著的正相关关系,这与江晓东<sup>[20]</sup>的研究结果一致。土壤pH与施氮水平之间存在显著负相关关系,即随施氮水平的提高,土壤pH呈下降趋势。蔡泽江<sup>[21]</sup>的研究结果表明,长期施用化学氮肥是加速红壤酸化的主要原因,施氮量是影响红壤酸化的主要原因之一。另外,随土壤外源氮输入量和持续时间的增加和延长,土壤pH的下降幅度也增大<sup>[22]</sup>。Goulding等<sup>[22]</sup>认为农田土壤酸化的最重要原因是施用铵态氮肥和尿素。

氮肥施用量的增加会降低土壤速效磷含量,相关性分析结果表明,氮肥施用水平与土壤速效磷含量存在显著的负相关关系,这可能是由于pH下降导致部分速效磷被固定转化为缓效磷<sup>[23]</sup>。范钦桢<sup>[24]</sup>认为氮肥能够降低土壤钾素的释放、提高钾的固定,本试验结果表明随施氮量增加速效钾含量增加。随氮肥施用水平的提高,土壤盐基离子的总量及交换性 $\text{Ca}^{2+}$ 的含量呈明显的下降趋势,这可能是随氮肥施用量的增加,土壤pH下降,部分交换性 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^{+}$ 遭到淋失的结果。

土壤pH下降会促进有机碳积累<sup>[25]</sup>。杨灵芳等<sup>[26]</sup>的研究也同样发现在C/N较高( $>15$ )或酸性( $\text{pH}<6.5$ )土壤中,施氮后土壤有机碳积累明显。这是因为土壤pH降低导致的土壤交换性 $\text{Al}^{3+}$ 增加,其会形成有机无机复合体吸附在团聚体上,从而降低微生物对有机质的分解<sup>[27]</sup>;同时土壤pH降低会抑制土壤微生物活性<sup>[28]</sup>,减少有机质分解,抑制土壤碳排放,导致土壤有机碳积累<sup>[29]</sup>。本试验结果表明:随氮肥施用水平的提高,土壤有机碳总量呈先快速增加后缓慢下降的趋势。不同酸化程度对有机质稳定性的主控因素不同<sup>[14]</sup>。按照对土壤缓冲体系的分类<sup>[30]</sup>,本试验所在地的黑土属于原生硅酸盐矿物风化缓冲体系( $\text{pH}5.0\sim 6.2$ ),土壤酸化可以通过抑制微生物活性和加强矿物-有机物相互作用来增加有机质稳定及减少淋溶浸出。此外,氮肥施用会促进作物生长,加大凋落物返还量,进而促进有机碳积累,但施氮量持续增加超出植物吸收范围后会抑制有机碳积累,使有机碳分解加速,从而降低有机碳含量<sup>[31]</sup>。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其组成和分布直接影响了土壤养分的吸收、转化和利用,是土壤肥力的重要体现<sup>[32]</sup>。本研究中,不同处理土壤团聚体主要以 $>2$  mm和 $2\sim 0.25$  mm粒径为主,随氮肥施用水平的提高大团聚体含量有所下降,这可能是氮肥施



A1-SOC、A2-SOC、M1-SOC、M2-SOC 分别表示 $>2$ 、 $2\sim 0.25$ 、 $<0.25\sim 0.053$ 、 $<0.053$  mm 粒径有机碳含量。NAR 表示土壤施氮量。

A1-SOC, A2-SOC, A3-SOC, A4-SOC represent the organic carbon content of particle size  $>2$ ,  $2\sim 0.25$ ,  $<0.25\sim 0.053$  mm and  $<0.053$  mm, respectively. NAR represents the amount of nitrogen applied to the soil.

图4 土壤理化性质、团聚体稳定性特征与有机碳冗余分析  
Figure 4 RDA between physical and chemical properties of soil, aggregate stability, and soil organic carbon content



用导致的土壤酸化使  $\text{Ca}^{2+}$  等盐基离子流失,稳定性胶结剂物质减少<sup>[33]</sup>,不利于团聚体稳定。

团聚体有机碳与土壤总有机碳含量密切相关,在不同粒径团聚体内,有机碳的周转速率及矿化速率均不相同<sup>[34]</sup>,这是影响土壤有机碳稳定性的重要原因之一。大团聚体通常包含细根和菌丝等有机胶结物质和小团聚体,碳含量较高<sup>[29]</sup>,这与本试验 2~0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量较高的结果类似。随氮肥施用水水平的提高大团聚体比例降低,这可能是由于大团聚体破坏所丢失的碳量要小于氮输入促进植物根系生长增加的碳量。<0.053 mm 粒径团聚体中有机碳含量略高于<0.25~0.053 mm 团聚体,这可能是由于<0.053 mm 粒径团聚体具有较高的比表面积,可以牢固地吸附有机物<sup>[35]</sup>。

王冰等<sup>[36]</sup>的研究表明有机碳含量与 MWD、GMD 呈显著正相关性,本文冗余分析结果也表明 GMD、PDA、 $E_{\text{IT}}$  与土壤有机碳之间存在显著的相关关系。团聚体稳定指标 GMD 与总有机碳含量呈负相关,这与李可依等<sup>[37]</sup>的研究结果相同。

## 4 结论

通过 13 a 连续施入不同水平氮肥,对比不施氮肥处理,随着氮肥施入量的不断增加,土壤有机碳含量呈先增后减的趋势,在施氮量为  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $280 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时有机碳含量较高;氮肥施用量的增加会显著降低土壤 pH 和团聚体稳定性;土壤团聚体有机碳主要分布在 2~0.25 mm 粒径中;土壤全氮含量、C/N、碱解氮含量、施氮量、速效钾含量是影响有机碳及团聚体有机碳含量的主要因子。

### 参考文献:

- [1] XU R K, LI J Y, ZHOU S W, et al. Scientific problems and technical measures for regulation and control of farmland soil acidification in China[J]. *Journal of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 160–167.
- [2] 陈洁, 梁国庆, 周卫, 等. 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[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(1): 36–44. CHEN J, LIANG G Q, ZHOU W, et al. Responses of soil organic carbon and nitrogen fractions to long-term organic fertilization under rice-wheat rotation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 36–44.
- [3] 丁雪丽, 韩晓增, 乔云发, 等. 农田土壤有机碳固存的主要影响因素及其稳定机制[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 737–744. DING X L, HAN X Z, QIAO Y F, et al. Sequestration of organic carbon in cultivated soils: main factors and their stabilization mechanisms[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 737–744.

- [4] 赵月. 基于玉米大豆轮作的农田黑土酶活性对耕层厚度的响应[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019. ZHAO Y. Responses of mollisols enzyme activities to topsoil depths based on maize-soybean rotation [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
- [5] 宋显伟, 张保才, 白洋, 等. 生物技术助力黑土地保护性利用的应用与思考[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(12): 1488–1496. SONG X W, ZHANG B C, BAI Y, et al. Application and review of biotechnology in promoting protective utilization of black soil[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Science*, 2021, 36(12): 1488–1496.
- [6] 王伟妮, 鲁剑妮, 鲁明星, 等. 早、中、晚稻施氮增产效应及氮肥利用率研究[C]//中国植物营养与肥料学会. 中国植物营养与肥料学会 2010 年学术年会论文集, 2010: 238–251. WANG W N, LU J W, LU M X, et al. A study on effect of and nitrogen fertilizer and nitrogen use efficiency of early, mid and late-season rice[C]//Chinese Society of Plant Nutrition and Fertilizers. Proceedings of the 2010 Academic Annual Meeting of the Chinese Society of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010: 238–251.
- [7] 徐仁扣, COVENTRY D R. 某些农业措施对土壤酸化的影响[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(5): 385–388. XU R K, COVENTRY D R. Soil acidification as influenced by some agricultural practices[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(5): 385–388.
- [8] 张福锁. 我国农田土壤酸化现状及影响[J]. *民主与科学*, 2016(6): 2. ZHANG F S. The current situation and impact of farmland soil acidification in China[J]. *Democracy & Science*, 2016(6): 2.
- [9] 孙清凡, 钱海燕, 陈莎莎, 等. 鄱阳湖洲头湿地土壤粒度组成及其对有机碳的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(1): 197–204. SUN Q F, QIAN H Y, CHEN S S, et al. Composition of soil grain size and its effect on organic carbon in Sizhoutou wetland of Poyang Lake[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(1): 197–204.
- [10] 于海艳, 宫汝宁, 周娅, 等. 北京八达岭地区 4 种人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 162–166. YU H Y, GONG R N, ZHOU Y, et al. Characteristics of soil aggregate stability and soil organic carbon under four typical artificial plantations in Beijing Badaling Mountain area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015 29(5): 162–166.
- [11] 曹丽花, 郭祥坤, 连玉珍, 等. 信阳市不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布[J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(4): 833–838. CAO L H, GUO X K, LIAN Y Z, et al. Soil aggregates and their organic carbon distribution under different land use patterns in Xinyang City[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2022, 63(4): 833–838.
- [12] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体有机碳研究进展[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(21): 86–90. LIU Z L, YU W T. Research progress of organic carbon in soil aggregates[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(21): 86–90.
- [13] 朱锐. 酸化对黑土性质及其呼吸作用影响的模拟研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2012. ZHU R. The simulation study of the acidification of the black nature of respiration[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012.
- [14] 王继红, 王洋, 于洪波. 吉林玉米带黑土酸化与有机质稳定性关系[J]. *吉林农业大学学报*, 2022, 44(6): 657–664. WANG J H, WANG Y, YU H B. Relationship between black soil acidification and organic matter stability in Jilin corn belt[J]. *Journal of Jilin Agricultural*

- al University, 2022, 44(6):657-664.
- [15] 苗雪松, 王嗣奇, 张彦东. 施氮对落叶松人工林凋落物分解及土壤有机碳矿化的影响[J]. 森林工程, 2022, 38(6):1-8. MIAO X S, WANG S Q, ZHANG Y D. Effects of nitrogen fertilization on litter decomposition and soil carbon mineralization in *Larix olgensis* plantation[J]. *Forest Engineering*, 2022, 38(6):1-8.
- [16] 张彦军, 党水纳, 任媛媛, 等. 基于 Meta 分析的土壤呼吸对凋落物输入的响应[J]. 生态环境学报, 2020, 29(3):447-456. ZHANG Y J, DANG S N, REN Y Y, et al. Response of soil respiration to surface litter input based on a Meta-analysis[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(3):447-456.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 4版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 4th. Edition. Beijing: Edition China Agricultural Publishing House, 2000.
- [18] 王斌, 温维亮, 郭新宇, 等. 基于 SFS 的土壤三维结构恢复及孔隙度计算[J]. 中国农业科学, 2013, 46(23):4950-4956. WANG Y, WEN W L, GUO X Y, et al. 3D reconstruction and porosity computing of soil based on SFS algorithm[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(23):4950-4956.
- [19] 冯秋苹, 刘玉涛, 郭勇智, 等. 不同秸秆还田方式对土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2023, 45(5):564-571. FENG Q P, LIU Y T, GUO Y Z, et al. Effects of different straw returning to fields methods on the stability of soil aggregates and organic carbon[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2023, 45(5):564-571.
- [20] 江晓东. 耕作模式与施氮量对土壤理化性状及小麦玉米产量、品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007. JIANG X D. Effects of soil tillage systems and nitrogen applied amount on soil physical and chemical characters, yield and quality of wheat and maize[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2007.
- [21] 蔡泽江. 长期施肥下红壤酸化特征及影响因素[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010. CAI Z J. Acidification characteristics of red soil under long-term fertilization and effect factors[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [22] GOULDING K. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom[J]. *Soil Use and Management*, 2016, 32(3):390-399.
- [23] WU Z F, SUN X M, SUN Y Q, et al. Soil acidification and factors controlling topsoil pH shift of cropland in central China from 2008 to 2018[J]. *Geoderma*, 2022, 408:115586.
- [24] 范钦桢. 铵对土壤钾素释放、固定影响的研究[J]. 土壤学报, 1993, 30(3):245-252. FAN Q Z. Influence of ammonium on release and fixation of potassium in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(3):245-252.
- [25] XIE A Q, SUN L M, ZHANG D L, et al. Changes in the root system of the herbaceous peony and soil properties under different years of continuous planting and replanting[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2021, 9(4):801-810.
- [26] 杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 等. 氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析[J]. 环境科学, 2023, 44(11):6226-6234. YANG L F, KONG D Y, DIAO J W, et al. Meta analysis on the effects of nitrogen addition on soil organic carbon content in terrestrial ecosystems[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(11):6226-6234.
- [27] BOURG I C, SPOSITO G, BOURG A. Modeling the diffusion of Na<sup>+</sup> in compacted water-saturated Na-bentonite as a function of pore water ionic strength[J]. *Applied Geochemistry*, 2008, 23(12):3635-3641.
- [28] ZHOU J, GUAN D, ZHOU B, et al. Influence of 34-years of fertilization on bacterial communities in an intensively cultivated black soil in northeast China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 90:42-51.
- [29] 邓志豪, 杨静, 戴全厚, 等. 喀斯特区土地利用方式对石灰土团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5):114-121. DENG Z H, YANG J, DAI Q H, et al. Effects of land use patterns on aggregate stability and organic carbon of calcareous soil in karst area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5):114-121.
- [30] ROBERTS T M, ULRICH B, PANKRATH J. Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems[J]. *Forest Ecology and Management*, 1986, 17(1).
- [31] 徐雷. 氮沉降对杉木人工林土壤理化性质和酶活性的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2007. XU L. Impacts of nitrogen deposition on physical-chemical properties and enzyme activities of soil in Chinese-fir plantation forest[D]. Fuzhou: Fujian Agricultural and Forestry University, 2007.
- [32] 黎宏祥, 王彬, 王玉杰, 等. 不同林分类型对土壤团聚体稳定性及有机碳特征的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(5):84-91. LI H X, WANG B, WANG Y J, et al. Impact of different forest types on stability and organic carbon of soil aggregates[J]. *Beijing Forestry University Journal*, 2016, 38(5):84-91.
- [33] 尚应妮, 胡斐南, 赵世伟, 等. 不同胶结物质对黄绵土团聚体形成的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2):204-208. SHANG Y N, HU F N, ZHAO S W, et al. Effects of cementing materials on the formation of loessial soil aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2):204-208.
- [34] 祁剑英, 马守田, 刘冰洋, 等. 保护性耕作对土壤有机碳稳定化影响的研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(1):1-9. QI J Y, MA S T, LIU B Y, et al. Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon stabilization[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(1):1-9.
- [35] 郑金阳. 不同年限果园土壤团聚体有机碳分布及其微生物作用机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021. ZHENG J Y. Soil organic carbon distribution in soil aggregates and its microbial influencing mechanisms in orchards of different ages[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021.
- [36] 王冰, 张鹏杰, 张秋良. 不同林型兴安落叶松林土壤团聚体及其有机碳特征[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2021, 45(3):15-24. WANG B, ZHANG P J, ZHANG Q L. Characteristics of the soil aggregate and its organic carbon in different *Larix gmelinii* forest types[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2021, 45(3):15-24.
- [37] 李可依, 愚广灵, 陈末, 等. 不同利用方式对高寒草地土壤团聚体稳定性及其有机碳含量分布的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1):332-340. LI K Y, YU G L, CHEN M, et al. Effects of different land utilization methods on soil aggregate stability and organic carbon content in alpine grassland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(1):332-340.

(责任编辑:李丹)