

李彬彬, 武兰芳. 土壤温室气体排放对 C/N 的响应[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 2067–2078.

LI Bin-bin, WU Lan-fang. Soil greenhouse gases emission in response to the C/N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 2067–2078.

土壤温室气体排放对 C/N 的响应

李彬彬, 武兰芳*

(中国科学院地理科学与资源研究所生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要:土壤碳氮比(C/N)是影响微生物活动导致土壤温室气体排放和养分有效性变化的关键因素, 秸秆还田配施氮肥则是调节农田土壤C/N的重要措施。为了探讨土壤C/N对温室气体排放的影响, 通过在土壤中添加等量秸秆配以不同数量N素, 在室内培养条件下测定分析了土壤不同起始C/N条件下土壤温室气体排放和活性碳氮的变化动态。研究发现: 不同C/N条件下, 土壤温室气体排放和溶解性有机碳(DOC)、溶解性有机氮(DON)的变化趋势基本一致。土壤CO₂排放速率和DOC含量均表现为随培养时间的延长逐渐降低, 培养前30 d下降幅度较大, 30~75 d降低缓慢, 75 d后基本平稳; 土壤N₂O的排放速率和DON含量则表现为先升高后降低, N₂O的排放速率在第7 d达到最大后逐渐降低直至平稳, 土壤DON含量在第14 d达到最高后逐渐降低。土壤起始C/N越低, 有机碳矿化率和净氮硝化速率越高, CO₂和N₂O排放量越多; 土壤CO₂和N₂O的排放速率及累积排放量不但与土壤DOC和DON含量显著相关, 而且与土壤DOC/DON比值显著相关。土壤硝态氮的含量变化表现为与土壤起始C/N相关, 当土壤起始C/N在20~30时, 硝态氮先升高后降低; 土壤起始C/N大于40时, 硝态氮先降低后升高。结果表明: 在实际生产中, 秸秆还田后合理配施氮肥调节土壤C/N是减少温室气体排放、提高作物氮肥利用效率的重要措施, 为了掌握适宜的配施量和施用时期, 有必要针对不同作物农田系统继续进行田间试验研究。

关键词: C/N; 温室气体排放; 可溶性有机碳; 可溶性有机氮

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)09-2067-12 doi:10.11654/jaes.2017-1607

Soil greenhouse gases emission in response to the C/N

LI Bin-bin, WU Lan-fang*

(Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The soil C/N is a key factor affecting the emission of greenhouse gases (GHGs) from soil and the nutrient availability, resulting from the microbial activity in soil. The retention of crop residues in soil, combined with the application of N fertilizer, is an important way to adjust the soil C/N. To investigate the effect of the soil C/N on GHGs emission, a batch of incubation experiments with 5 different treatments of C/N were conducted, that ground mature maize stalks and leaves along with urea N were mixed into the pre-incubated soil. The changing trends of soil GHG emissions, the dissolved organic carbon (DOC), and the dissolved organic nitrogen (DON) were observed during the 180 days of incubation. The soil CO₂ efflux and the DOC content decreased throughout the incubation period and could be differentiated into 3 phases, the fast decreasing phase before the 30th day, the slow decreasing phase from the 30th to the 75th day, and tended towards a stable phase after the 75th day. Meanwhile, both the soil N₂O efflux and DON content had a tendency to increase at first and then decline until keep stable; their peaks were observed on day 7 and day 14, respectively. The lower the soil C/N, the faster was the rate of soil organic C mineralization and N nitrification, consequently increasing CO₂ and N₂O emissions. The correlation analyses showed that the CO₂ and N₂O

收稿日期: 2017-11-23 录用日期: 2018-02-13

作者简介: 李彬彬(1985—), 女, 山东青岛人, 硕士, 从事农田温室气体排放与过程的研究。E-mail: wudibinbin223@163.com

*通信作者: 武兰芳 E-mail: wulf@igsnr.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(31271675); 国家科技支撑计划课题(2013BAD05B03)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31271675); The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2013BAD05B03)

emissions of the soil were not only significantly related with the DOC and DON content, but were also related with the DOC/DON ratio in soils. The nitrate(N) content in the soil was related to the initial soil C/N. However, the changes in the nitrate(N) content in soils with different C/N were different; the changes increased at first and then decreased at low C/N, but the changes were just the opposite when the soil C/N was greater than 40. The results indicate that by adjusting the soil C/N with the correct application of N fertilizer, after crop residue retention in the soil, is a fundamental approach to mitigate GHGs emission and improve soil N availability in farming practices. As for the rates and times of N application along with the crop residues, managements are still necessary for further research for different cropping systems under different field conditions.

Keywords: C/N; greenhouse gases emission; dissolved organic carbon; dissolved organic nitrogen

农田土壤是大气中温室气体的重要来源,对温室气体总排放的贡献率占17%~32%^[1]。农田管理措施是影响土壤碳氮排放的重要因素^[2-4],秸秆还田作为重要的农田土壤培肥措施之一,为土壤微生物提供了主要的碳源,而氮肥施用作为维持农田作物产量的主要措施之一,为土壤微生物活动提供主要的氮源。秸秆还田后不同氮肥施用量会直接影响到土壤的C/N^[5],从而影响土壤微生物活动并进一步对土壤碳氮过程产生影响^[6],导致土壤温室气体产生排放和氮素有效性发生变化^[6-7]。

研究表明,秸秆和氮肥施入量的不同配比将对农田土壤温室气体排放量产生不同影响^[8]。伍玉鹏等^[9]在研究氮肥配施不同作物残渣还田对红壤温室气体排放的影响时发现,氮肥施入量与不同种类的作物残渣配施均能增加土壤CO₂-C累积排放量,低氮量(120 kg N·hm⁻²)配施作物残渣可增加N₂O的排放,但是随着氮肥施入量的增加N₂O的排放受到抑制,可能是因为微生物的生长被抑制;李睿达等^[10]研究认为,施氮显著促进了CO₂和N₂O的排放,并且N₂O的排放通量随着施氮量的增加而增加,其原因可能与秸秆和氮肥引起土壤C/N发生变化有关^[8],土壤C/N较低时可以降低反硝化微生物对氮素的竞争力,从而减缓土壤的反硝化过程^[11];Millar等^[12]研究表明,N₂O的排放量与所添加的外源有机质的C/N有显著的负相关性;杨馨逸等^[13]在研究小麦田土壤溶解性有机物对不同施氮量的响应时发现,施用氮肥能显著提高土壤可溶性有机碳氮的含量,但是当氮肥用量超过135 kg N·hm⁻²时,土壤中可溶性有机碳氮的含量则呈现降低;云鹏等^[14]在研究冬小麦-夏玉米轮作体系中不同氮肥水平对玉米生长及其根际土壤氮的影响时发现,高氮施肥(300 kg N·hm⁻²)的非根际土壤的硝态氮含量较高,土壤微生物碳、氮含量则较低;沈玉芳等^[15]在研究有机物料输入对干润砂质新成土可溶性有机碳、氮的影响时发现,有机物料的添加能促进DOC的累积量,而高

C/N的有机物料加入后DON累积量无明显增加。总之,秸秆还田与配施氮肥在影响温室气体排放的同时,也会引起土壤碳氮组分的变化,但在不同气候地区、土壤类型及有机质含量背景条件下所获得的结果不尽相同,因而有必要进一步进行研究。

华北平原是我国重要的小麦/玉米一年两熟粮食作物主产区,秸秆资源丰富,年产秸秆总量为10 600 kg·hm⁻²,还田比例为65.5%^[16],主要方式为机械在收获作物时将秸秆粉碎直接还田;氮素作为作物生长的必需养分元素,投入量逐渐升高,现每年高达500~600 kg N·hm⁻²^[17-19]。秸秆和氮肥的投入改变了土壤的C/N,进而影响了土壤的碳氮排放过程,本文利用培养试验测定不同起始C/N处理下土壤温室气体排放及土壤可溶性有机碳/氮含量的变化,分析不同C/N对土壤碳氮排放和土壤速效态养分的影响,旨在为农田秸秆还田合理配施氮肥以减少温室气体排放和提高N素作物有效性和利用效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计与培养方法

1.1.1 材料来源

试验所用土壤采自中国科学院禹城综合试验站空闲地0~20 cm耕层土壤。试验站年平均气温为13.1℃,年平均降水量为538.0 mm,土壤类型为潮土,培养实验所用土壤于2016年4月份采集,混合过2 mm筛除去小石子等,风干备用。经测定分析,土壤有机碳含量为8.8 g·kg⁻¹,全氮含量为0.9 g·kg⁻¹,碱解氮含量为113.4 mg·kg⁻¹,全磷含量为2.5 g·kg⁻¹,全钾含量为21.2 g·kg⁻¹,pH为8.4,土壤C/N为10。

试验所用秸秆是玉米秸秆,将玉米茎叶烘干(烘箱45℃,48 h)后,剪成1~3 mm的颗粒,混合均匀后测定其C、N含量分别为418.0、9.7 g·kg⁻¹,C/N为43。试验所用的氮肥为尿素,其N含量为46%。

1.1.2 试验设计

每个处理的秸秆添加量相同,根据当地大田秸秆还田量计算得出,即每个处理的秸秆添加量为干土质量的1%;氮素添加量根据调控土壤起始C/N计算,分别设置为低氮量(N120)、中氮量(N240)和高氮量(N300)3个水平,则试验处理为:(1)土壤中只添加玉米秸秆,起始C/N为43,用(C/N)43表示;(2)土壤中加入秸秆和氮肥,氮肥添加量为120 kg N·hm⁻²,起始C/N为29,用(C/N)29表示;(3)土壤中加入秸秆和氮肥,氮肥添加量为240 kg N·hm⁻²,起始C/N为21,用(C/N)21表示;(4)土壤中加入秸秆和氮肥,氮肥添加量为300 kg N·hm⁻²,起始C/N为19,用(C/N)19表示;(5)不添加任何物质(CK)C/N=10。由此,共得到5个处理,土壤起始C/N由高到低分别为(C/N)43、(C/N)29、(C/N)21、(C/N)19、(C/N)10,每个处理设3次重复。

1.1.3 培养方法

称取相当于100 g干土的湿土样于500 mL的圆柱形玻璃瓶中,加蒸馏水使其达到田间持水量的65%,预培养一周。预培养后,按上述处理加入相应的秸秆和氮肥,将其与土壤混匀,用封口膜封口,保持透气性,在生化培养箱内25℃恒温培养。每隔3~5 d检查土壤含水量并用称重法补充缺失的水分,使培养期间土壤含水量保持在田间持水量的65%左右。

1.2 样品分析与数据处理

1.2.1 CO₂和N₂O的测定

培养期为180 d,在整个培养期共取样14次,分别在第1、3、5、7、14、21、30、45、60、75、90、120、150、180 d破坏性取样,每次取样每个处理取3个样品作为重复。在取样的前1 h将封口膜去掉,使其与周围环境空气混合均匀。取样时,用自制的取样装置塞住瓶口,用注射器抽取瓶内的气体,隔1 h后,再抽取第二针气体,两次抽取的气体体积均为5 mL,在气相色谱仪上测定温室气体的浓度。

土壤排放的CO₂和N₂O采用Agilent 6890D气相色谱仪,检测器温度为330℃,柱温55℃,转化器温度375℃,载气为高纯氮气,标准气体购买自国家标准物质研究中心。

温室气体排放速率的计算公式为:

$$F(\text{CO}_2) = M/V_0 \times V/m \times T_0/T \times \Delta c/\Delta t \times 10^3 \quad (1)$$

$$F(\text{N}_2\text{O}) = M/V_0 \times V/m \times T_0/T \times \Delta c/\Delta t \times 10^6 \quad (2)$$

式中: F 为土壤气体排放速率(CO₂排放速率单位为mg·kg⁻¹·h⁻¹;N₂O排放速率单位为μg·kg⁻¹·h⁻¹); M 为气体的摩尔质量,g·mol⁻¹;V₀为标准状态下(温度273 K,气压1013 kPa)气体摩尔体积,22.4 L·mol⁻¹;T₀和T

分别为标准状态下和采样时空气的绝对温度(单位为K); $\Delta c/\Delta t$ 为单位时间内瓶内气体浓度的变化; m 为土壤质量,kg; V 为瓶内气体所占的有效体积^[19,20-21]。

土壤CO₂和N₂O累积排放量的计算如下:

$$F_{\text{累积}} = \sum_{i=1}^n (F_i \times 24 \times D_i) \quad (3)$$

式中: $F_{\text{累积}}$ 表示气体累积排放量(CO₂累积排放量的单位为mg·kg⁻¹,N₂O为μg·kg⁻¹); F_i 表示连续两次采样时气体平均排放速率; D_i 表示采样的间隔时间,d; n 表示采样次数。

有机碳矿化率=土壤有机碳累积矿化量/(土壤原有有机碳含量+玉米秸秆有机碳含量)×100%^[22]

土壤氮的净硝化速率按照以下公式计算^[23-24]:

$$R_{\text{硝}} = (N_{\text{B硝}} - N_{\text{A硝}})/t \quad (4)$$

式中: $N_{\text{B硝}}$ 为培养后硝态氮量; $N_{\text{A硝}}$ 为培养前硝态氮量; $R_{\text{硝}}$ 为土壤氮的净硝化速率; t 为培养时间,d。

外源氮对硝态氮矿化量的贡献(G)参照氮肥利用率的概念和计算公式^[25]:

$$G(\%) = (N_{\text{硝氮添加}} - N_{\text{硝未加氮}})/N \times 100 \quad (5)$$

式中: $N_{\text{硝氮添加}}$ 为氮添加处理后培养期间硝化量; $N_{\text{硝未加氮}}$ 为无氮添加处理土壤培养期间的硝化量; N 为氮添加量。

1.2.2 硝态氮、DOC和DON的测定

每次取样时,先将气体采集完毕,然后将瓶内土壤全部取出用于测定硝态氮、DOC和DON的含量、土壤含水量。

硝态氮的测定方法:称取10 g左右的鲜土于白色塑料瓶中,加入50 mL KCl溶液(2 mol·L⁻¹),振荡30 min,过滤,浸提液硝态氮浓度用紫外分光光度计测定。

DOC和DON的测定方法:称取过2 mm筛的鲜土10 g于白色塑料瓶中,加入50 mL蒸馏水,振荡离心,过0.45 μm的滤膜,所得浸提液分为两部分,一部分在Liqui II TOC仪上测定DOC和全氮浓度,另一部分用流动分析仪测定硝态氮和铵态氮浓度。DON浓度=全氮浓度-硝态氮浓度-铵态氮浓度。

1.2.3 数据计算与处理

数据采用Excel作图,SPSS 12.0对各碳氮指标进行单因素方差分析及LSD显著性检验和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 CO₂排放量和土壤DOC含量的变化

2.1.1 不同处理下土壤CO₂排放动态

从培养起始至结束,不同处理的CO₂排放速率均

表现随着培养时间逐渐下降的趋势(图1a),大致可以分为三个阶段:在前30 d下降速度较快,到第30 d时的排放速率与起始排放速率相比下降了80%以上;30~90 d内缓慢下降,90 d后基本达到平衡,排放速率稳定在 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右。同时可以看出,各处理 CO_2 排放速率均显著高于CK;除CK外,培养前60 d内土壤起始C/N越高 CO_2 排放速率越低,即各处理 CO_2 排放速率表现为 $(\text{C}/\text{N})19 > (\text{C}/\text{N})21 > (\text{C}/\text{N})29 > (\text{C}/\text{N})43$,统计分析表明达到了显著差异水平;培养60 d后各处理 CO_2 排放速率没有显著性差异。

从累积排放量看(图1b),前30 d各处理的 CO_2 排放总量占整个培养期的51%~56%,前90 d的 CO_2 累积排放量占总排放量的85%~90%;比较不同处理的 CO_2 累积排放量,各处理 CO_2 累积排放量显著高于CK,并且表现为土壤起始C/N越低累积排放量越高,(C/N)19处理比(C/N)21处理提高了19%,(C/N)21处理比(C/N)29处理提高了11.5%,(C/N)29处理比(C/N)43处理提高了26.3%,(C/N)43处理的 CO_2 排放总量是CK处理的1.3倍。

由此说明,秸秆还田后在适宜水分和温度条件下其有机碳在土壤中分解排放,而且增施N素用量可促进有机碳分解排放。

随着培养时间的延长,土壤有机碳的矿化率逐渐升高,并在培养后期保持稳定,与土壤 CO_2 累积排放量的变化动态相一致(图2),土壤起始C/N越低,土壤有机碳矿化率越高,培养到第30 d时,起始C/N为19处理的土壤有机碳矿化率为23%,起始C/N为43处理的土壤有机碳矿化率为12%,培养到第75 d时,起始C/N为19处理的土壤有机碳矿化率为35%,起始C/N比为43处理的土壤有机碳矿化率为20%,培养结束

后,起始C/N为19处理的土壤有机碳矿化率为42%,起始C/N为43处理的土壤有机碳矿化率为24%。由此进一步说明,土壤有机碳的矿化作用主要发生在培养前期和中期,并且土壤C/N具有重要的影响作用。

2.1.2 不同处理土壤DOC含量的动态

由图3所示,各处理的土壤DOC含量呈逐渐降低的趋势,秸秆和氮肥施入引起土壤DOC含量升高,主要有两方面原因:第一,秸秆本身含有大量的溶解性碳;第二,秸秆和氮肥刺激土壤微生物的增长,通过对秸秆和氮肥及其土壤原有有机质的分解释放了大量的DOC。通过对不同处理的土壤DOC含量方差分析可知, $(\text{C}/\text{N})19 > (\text{C}/\text{N})21 > (\text{C}/\text{N})29 > (\text{C}/\text{N})43 > \text{CK}$,其中(C/N)19处理与(C/N)21处理的土壤DOC含量差异不显著,与其他处理土壤DOC含量差异显著($P < 0.05$), (C/N)19处理土壤DOC含量比(C/N)43处理高30%,比(C/N)29处理的土壤高13.5%;与CK相比,各处理土壤DOC含量的提高范围为20%~41.3%,秸

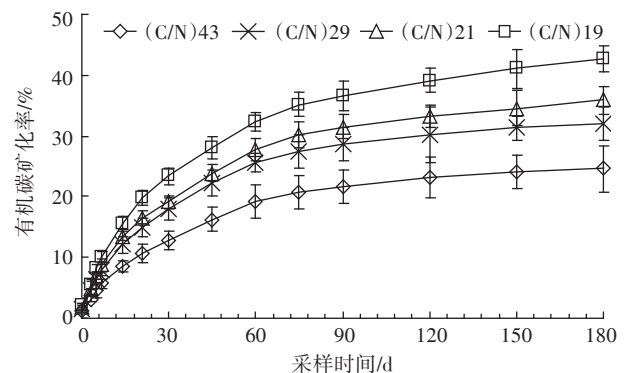


图2 不同处理土壤有机碳矿化率的动态

Figure 2 Dynamics of soil organic carbon mineralization rate under different treatments

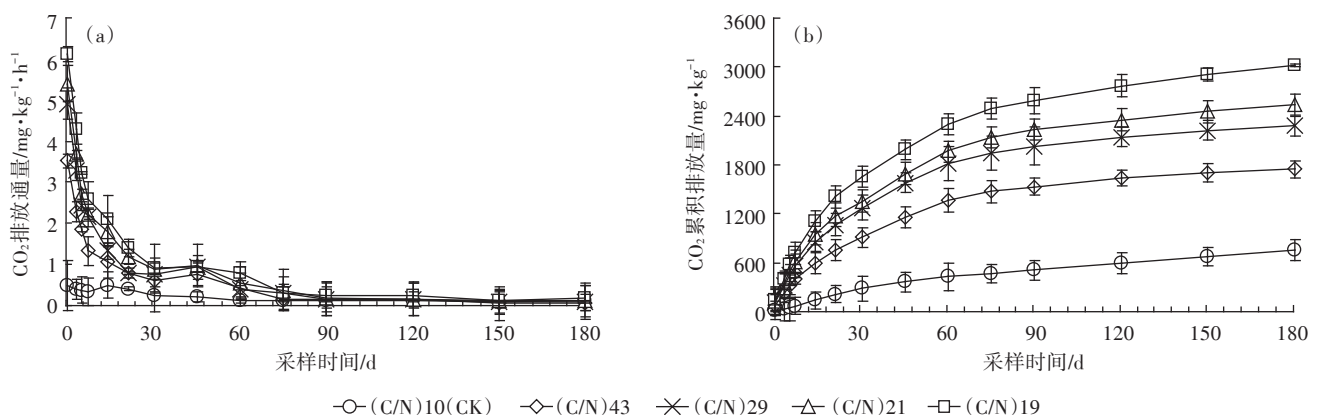


图1 不同处理 CO_2 排放速率与累积排放量的动态

Figure 1 Dynamics of CO_2 emission flux and cumulative CO_2 emission under different treatments

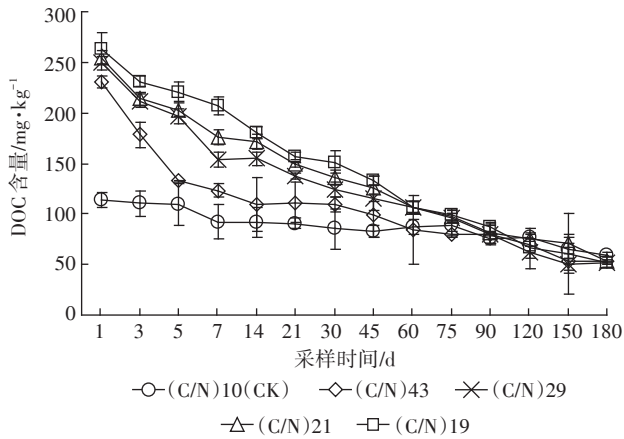


图3 不同处理土壤DOC含量的动态变化

Figure 3 Dynamics of DOC content in soil under different treatments

秆和氮肥添加均提高了土壤DOC的含量。随着氮肥添加量的增加,土壤有机物的C/N减小,当在微生物适合生长的C/N范围内,土壤有机物的分解最大,此时土壤中DOC含量差异不显著。

2.2 N₂O排放速率与土壤硝态氮、DON含量变化

2.2.1 不同处理土壤N₂O的排放动态

整个培养期间内的N₂O排放动态如图4所示。不同处理的N₂O排放速率呈现先升高后降低,在培养后期排放呈比较平稳的趋势(图4a),在0~7 d时,各处理的土壤N₂O排放速率急剧升高到最大值,分别为(C/N)19处理8.3 μg·kg⁻¹·h⁻¹, (C/N)21处理6.9 μg·kg⁻¹·h⁻¹, (C/N)29处理5.8 μg·kg⁻¹·h⁻¹, (C/N)43处理4.3 μg·kg⁻¹·h⁻¹;7~30 d内,各处理的排放量急剧降低,30 d后基本保持不变,各处理的排放速率为1.6 μg·kg⁻¹·h⁻¹左右。在图4a中还显示出各处理的N₂O排放速率均显著高于CK,除CK外,起始土壤的C/N越高土壤N₂O

的排放速率越低,即各处理的N₂O的排放速率表现为:(C/N)19>(C/N)21>(C/N)29>(C/N)43,统计分析表明各处理之间达到了显著差异水平;从60 d往后,各处理之间的N₂O排放差异不显著。这表明,秸秆和氮肥对土壤N₂O排放速率的影响随着时间的延长逐渐减弱。

从累积排放量看(图4b),前60 d各处理的土壤N₂O累积排放量占整个培养期排放总量的55%~68%,比较整个培养期内不同处理的N₂O排放总量可知,各处理均显著高于CK,并且土壤N₂O累积排放量随着土壤起始C/N的降低而增加,(C/N)19处理比(C/N)21处理提高了9%,(C/N)21处理比(C/N)29处理提高了15%,(C/N)29处理比(C/N)43处理提高了28%,(C/N)43处理比CK处理提高了50%。这表明,秸秆和氮肥的添加均能促进土壤N₂O的排放,当秸秆添加量一致时,土壤N₂O的排放与氮素添加量密切相关,氮素添加量越高,排放速率越大。

2.2.2 不同处理土壤硝态氮含量的动态

由图5可知,(C/N)43处理的土壤硝态氮含量呈先降低后升高的趋势,在第14 d时含量最低,仅为55.7 mg·kg⁻¹; (C/N)29、(C/N)21和(C/N)19处理的土壤硝态氮含量呈现先升高后降低的趋势,在第14 d时达到最高,为96.4、120.6 mg·kg⁻¹和142.0 mg·kg⁻¹,并且随着氮素添加量的增加即起始C/N的下降,这种趋势越来越明显。由图6可知,C/N>30处理的土壤出现了微生物对外源氮的固持现象,C/N<30处理的土壤促进了土壤有机氮的硝化,表现为土壤有机氮的矿化作用,随着氮肥添加量的增加,土壤氮的净硝化速率和外源氮的贡献率越来越高。通过方差分析可知,各处理的土壤硝态氮含量大小为:(C/N)19>(C/N)21>(C/N)29>(C/N)43>CK。

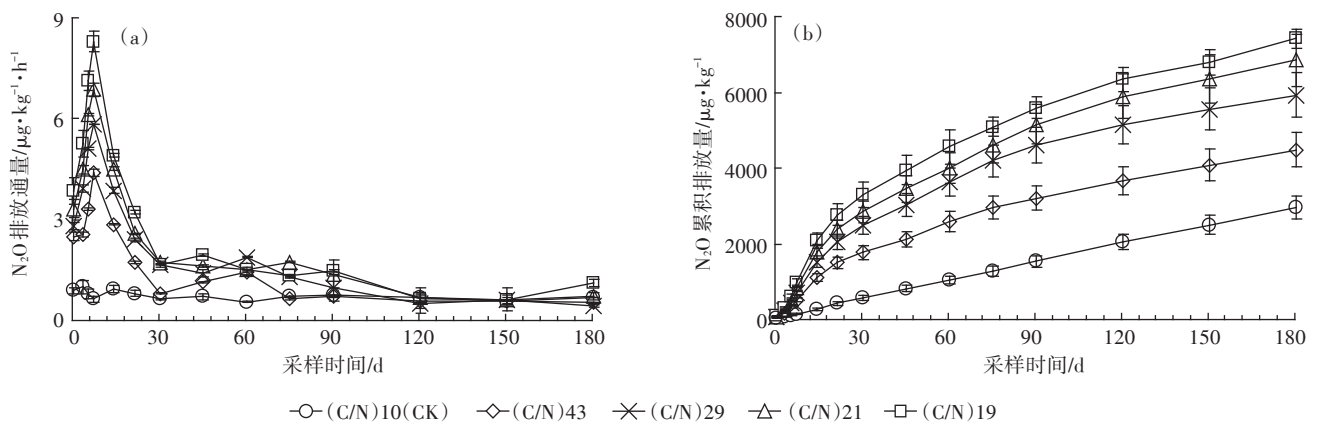
图4 不同处理N₂O排放速率与累积排放量的动态

Figure 4 Dynamics of N₂O emission flux and cumulative N₂O emission under different treatments

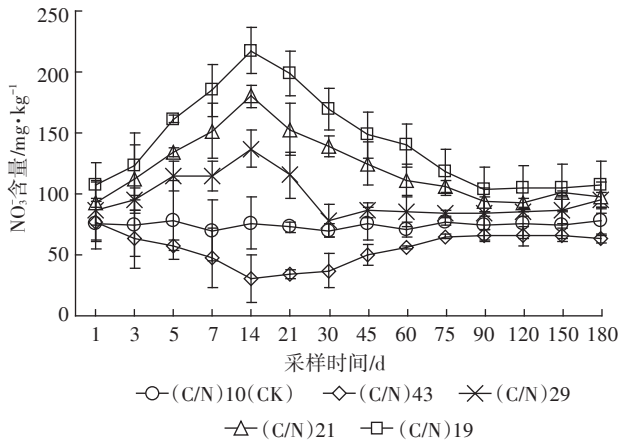


图5 不同处理土壤硝态氮含量动态

Figure 5 Dynamics of NO₃-N content in soil under different treatments

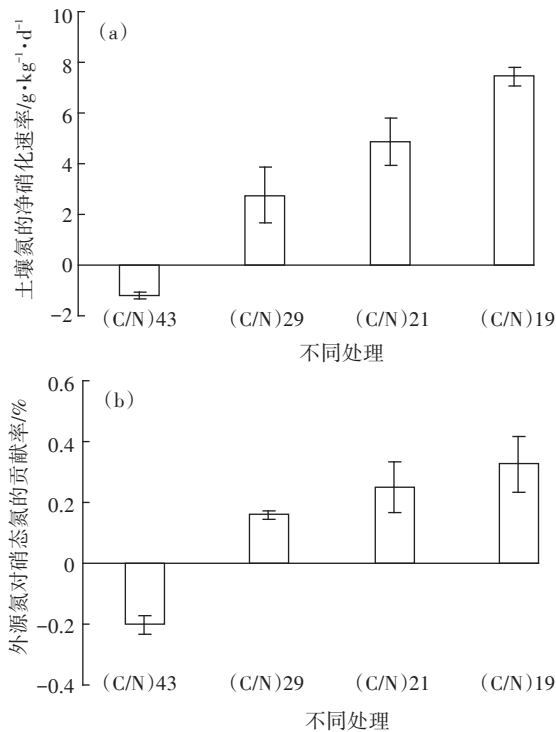


图6 秸秆和氮肥添加对土壤氮的净硝化速率及硝态氮贡献率的影响

Figure 6 Effects of maize residue and urea additions on soil nitrification rate and contribution to soil NO₃-N content

N)29>CK>(C/N)43,且处理间差异显著($P<0.05$)。由此表明,秸秆还田后与氮肥的配施量即调节土壤C/N对土壤硝态氮动态具有重要影响,当C/N低于30时,氮肥的添加促进土壤有机氮的矿化,增加硝态氮的含量。

2.2.3 不同处理土壤DON含量的动态

由图7所示,(C/N)43处理的土壤DON含量随着

培养时间的延长逐渐上升,(C/N)29、(C/N)21和(C/N)19处理的土壤DON含量呈先升高后降低,在培养末期达到平稳,但培养结束期土壤DON含量高于培养起始期的土壤DON含量,各处理DON含量较培养起始期提高了48%~70%。秸秆和氮肥的添加增加了土壤中DON含量,(C/N)19>(C/N)21>(C/N)29>(C/N)43>CK,方差分析表明,各处理之间差异达到显著水平($P<0.05$)。这充分说明,土壤DON的含量不但与氮素的添加量有关,而且与C/N有关,氮素添加量越多,C/N越低,培养期土壤DON含量越高。

2.3 土壤活性C/N(DOC/DON)的变化

由图8所示,不同处理土壤DOC/DON均随着培养时间的延长逐渐降低,前期下降较快,最后趋于稳定,不同处理之间在前75 d差异显著($P<0.05$),90~

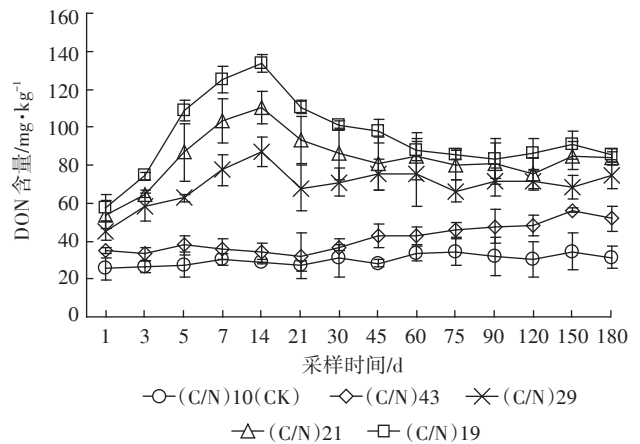


图7 不同处理土壤DON含量动态变化

Figure 7 Dynamics of DON content in soil under different treatments

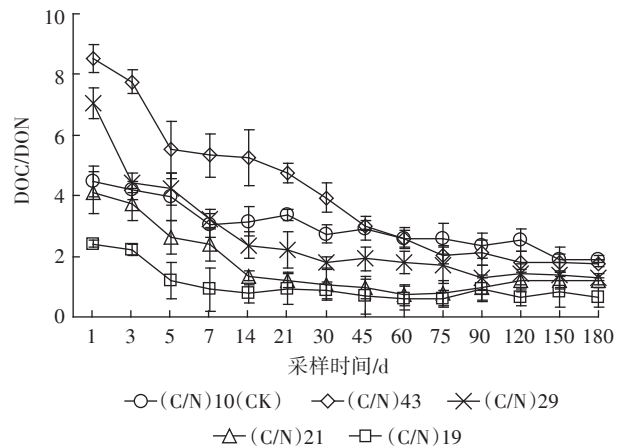


图8 不同处理土壤DOC/DON的变化

Figure 8 Dynamics of DOC/DON in soil under different treatments

180 d差异不显著($P>0.05$)。这说明秸秆和氮肥的添加短期内会显著影响土壤DOC和DON的含量比,随着培养时间的延长,这种影响效应会逐渐减弱。土壤DOC/DON与土壤起始C/N有关,土壤起始C/N越高,培养期内土壤DOC/DON越高。土壤起始C/N高的处理在培养前期(45 d)土壤DOC/DON显著高于CK,培养45 d后低于CK;土壤起始C/N低的处理在整个培养期内土壤DOC/DON始终显著低于CK,(C/N)29处理在前7 d时高于CK,自第7 d至培养结束,均低于CK。由此说明,起始C/N高的土壤活性C/N随着培养时间的延长会逐渐降低,并最终与起始C/N低的土壤无显著差异。

2.4 土壤CO₂和N₂O排放与其影响因素的相关性

由图9所示,不同处理的土壤CO₂排放速率和累积排放量与土壤DOC含量有显著相关性($P<0.05$),N₂O排放速率和累积排放量与土壤DON含量有显著的相关性($P<0.05$),不同处理的土壤CO₂和N₂O排放速率动态与土壤DOC和DON含量变化相一致。这充分说明土壤中DOC和DON含量是影响CO₂和N₂O排放的重要因素,土壤中CO₂和N₂O主要来源于土壤溶解性有机碳氮。

线性回归分析结果表明(图10),土壤CO₂和N₂O的排放速率、累积排放量随土壤活性C/N的改变而改变,并且达到了显著性水平($P<0.05$),其中CO₂和N₂O排放速率随着活性C/N的降低而降低($R^2=0.57^*$),CO₂和N₂O累积排放量随着活性C/N的降低而升高($R^2=0.67^*$),说明土壤活性C/N是显著影响土壤温室气体排放的重要因素。这可能与土壤微生物对有机质的分解有关。

3 讨论

3.1 C/N对土壤CO₂排放和DOC含量的影响

本实验中,土壤中CO₂排放速率呈现出前期释放快,后期排放慢的规律,与马力等^[26]和朱春茂等^[27]的研究结果一致,说明有机物质在土壤中的分解可分为快速阶段和慢速阶段。这可能是因为玉米秸秆含有大量的糖类、脂肪等易分解组分,进入土壤后能被微生物迅速分解利用,微生物数量急剧升高,土壤呼吸速率明显增加,CO₂释放较快,在培养试验的30 d后,易分解组分逐渐被消耗,微生物不得不转向开始利用分解木质素、多酚等难分解组分,呼吸产生排放的土壤CO₂速率降低且趋于稳定。

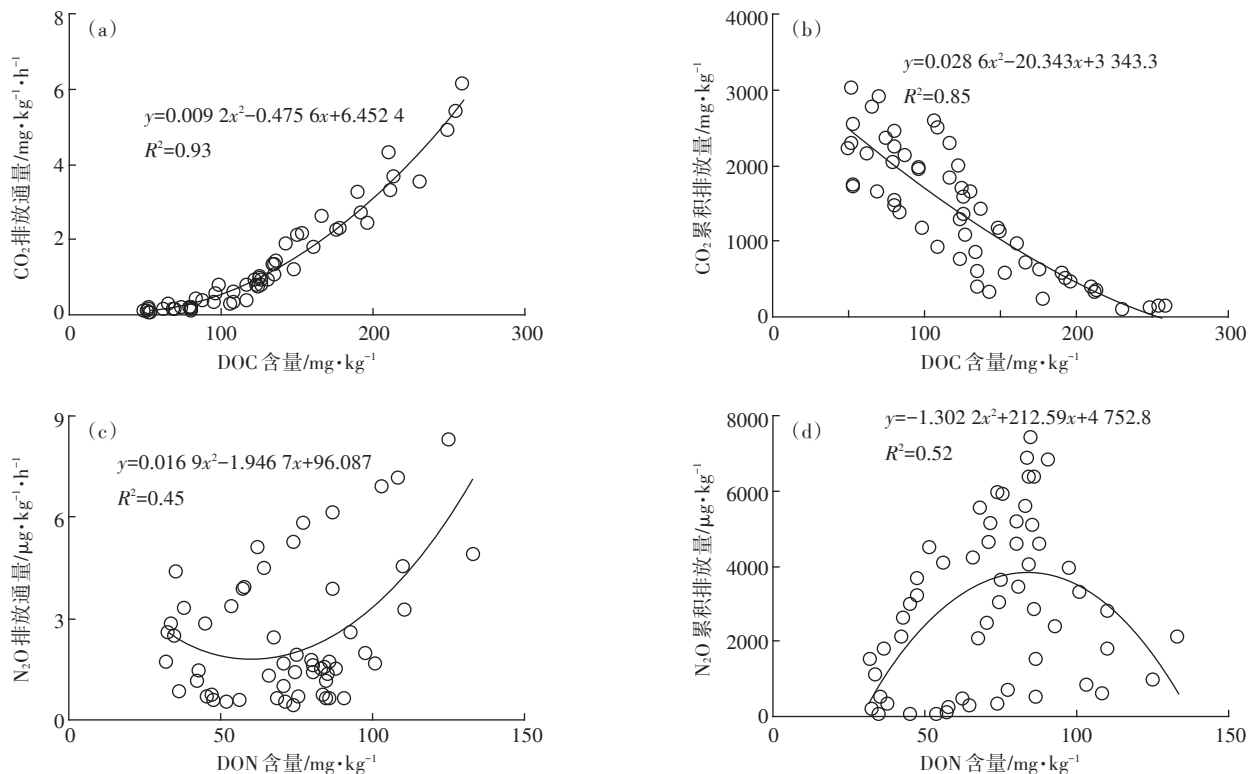


图9 土壤CO₂、N₂O排放速率和累积排放量与土壤DOC、DON含量的线性回归关系

Figure 9 Linear regressions between(a) the CO₂ emission flux and the soil DOC content;(b) the cumulative CO₂ emission and the soil DOC content;(c) the N₂O emission flux and the soil DON content;(d) the cumulative N₂O emission and the soil DON content

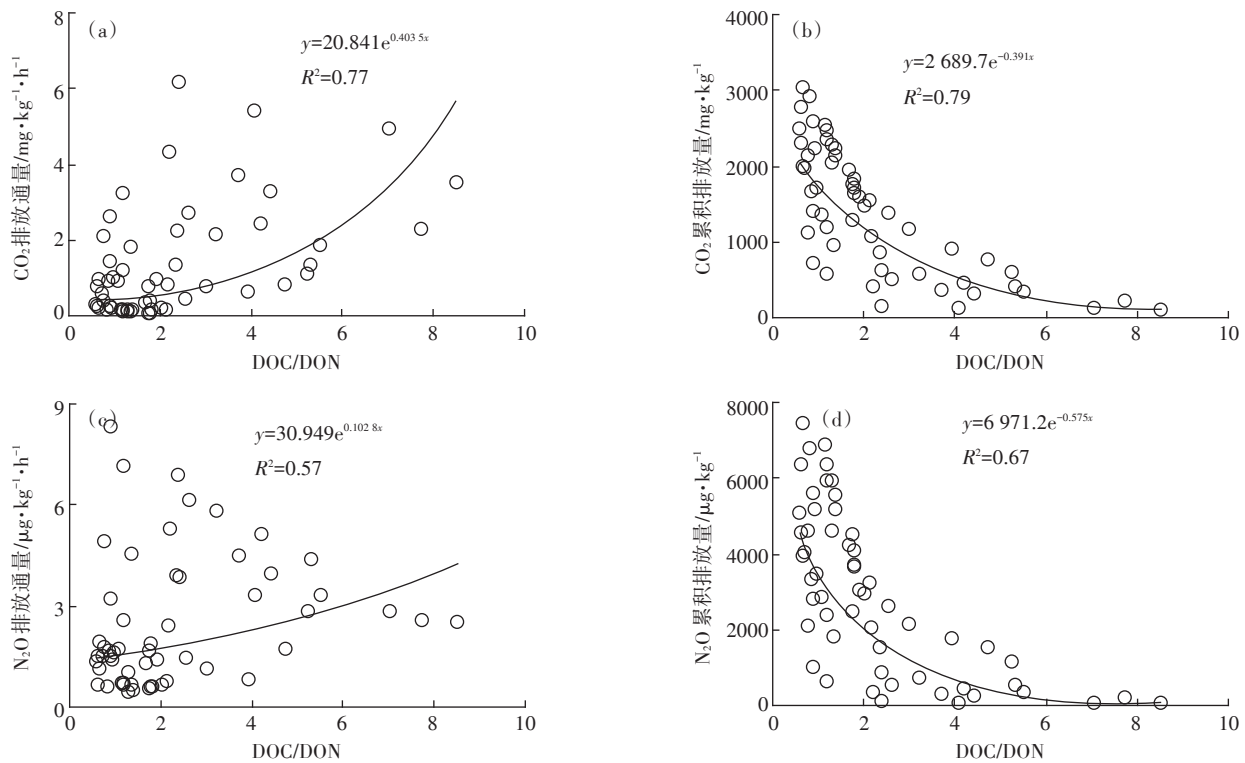


图10 土壤CO₂、N₂O排放速率和累积排放量与土壤活性C/N的线性回归关系

Figure 10 Linear regressions between(a) the CO₂ emission flux and the soil DOC/DON;(b) the cumulative CO₂ emission and the soil DOC/DON;(c) the N₂O emission flux and DOC/DON;(d) the cumulative N₂O emission and the soil DOC/DON

氮肥的添加能促进玉米秸秆的分解和土壤有机碳的矿化^[28]。秸秆施入土壤后,为微生物提供了大量的DOC,由于玉米秸秆的C/N较高,微生物活动受到限制,此时添加不同量的氮肥可降低土壤的C/N,使微生物活动增强,从而提高了对玉米秸秆的分解效率^[29]。这可能与分解过程中微生物群落朝着更高效并且对N需求更高的群落转变有关^[30]。在本实验中,土壤CO₂排放速率、累积排放量、土壤有机碳的矿化率、土壤氮的净硝化速率和DOC含量均随着土壤起始C/N的降低而增大,这与前人研究结果一致^[31-33]。刘德燕等^[31]研究外源氮对湿地土壤有机碳矿化及溶解性有机氮的影响时指出,土壤DOC含量与有机碳的累积矿化量均呈显著正相关关系,认为是外源氮输入引起土壤DOC含量的变化导致土壤有机碳矿化差异的一个主要原因,在好气条件下,外源氮的加入会引起土壤有机碳矿化速率的加快;邢晓旭等^[32]和金皖豫等^[33]在研究不同施氮水平对土壤呼吸的影响时发现,氮肥添加促进土壤呼吸速率,并且CO₂的释放量随着氮素含量的增加而升高;周国朋等^[34]研究不同施肥水平对水稻土可溶性有机质影响的结果表明,配施化肥

量的增加促使土壤中稳定性较高的有机质活化解。3.2 C/N对土壤N₂O排放速率、DON含量和硝态氮含量的影响

N₂O是由土壤微生物对含氮物质分解产生的,主要包括微生物的硝化作用和反硝化作用,影响土壤N₂O产生和排放的因素很多,秸秆和氮肥就是影响N₂O的重要因素之一^[35],研究表明,施氮能显著促进土壤N₂O的排放,并且随着施氮量的增加N₂O的排放量增加^[36-38]。本次实验结果表明,各处理的土壤N₂O排放量大小为(C/N)19>(C/N)21>(C/N)29>(C/N)43>CK,N₂O的排放速率随着土壤起始C/N的降低而增加,主要与氮素添加量有关,氮素不仅是土壤微生物分解释放N₂O的重要基质,而且降低了土壤C/N,提高了微生物活性,从而促进了N₂O的排放,(C/N)43处理的土壤虽然出现了微生物的固持现象,但有研究表明土壤硝态氮的含量在10 mg·kg⁻¹以下时排放才会受到抑制^[39-40],所以N₂O的排放速率依然高于CK土壤。Huang等^[41]研究也证实,N₂O的累积排放量C/N有显著的负相关关系;秦莉等^[42]研究不同C/N对含氮气体排放变化的影响时指出,C/N为20处理的N₂O排放含

量较高,但是与(C/N)15、(C/N)25和(C/N)30处理的 N_2O 排放量无显著差异。也有研究表明,C/N比约为19时,土壤 N_2O 的累积排放量最低^[43],可能与实验条件及秸秆种类有关。

秸秆和氮肥对土壤有机氮的矿化作用与土壤C/N有关,当有机物料的C/N大于(20~25):1时,向土壤中额外加入无机氮,微生物数量和有机残体的分解均可增加,此时外加的无机氮进入微生物体被固持;随着氮肥的添加量不断增加,C/N逐渐降低,当小于(20~25):1时,有机残体中可供微生物活动的能量物质相对不足而氮相对过剩,微生物只能根据碳的数量来形成细胞物质,此时从碳的供应看,微生物数量达不到最高值,但有机残体的分解则达到最大,同时有多余的氮释放到土壤中,称为氮的净矿化作用。在本次实验结果中,(C/N)43处理的土壤硝态氮含量呈先降低后升高的趋势,并且净矿化速率和外源氮的贡献率均为负值,出现了微生物的固持作用,主要是由土壤C/N过高导致的,而(C/N)29、(C/N)21和(C/N)19处理的土壤则均表现为土壤氮的矿化现象,与前人研究结果一致。邹亚丽等^[25]研究氮素添加对黄土高原典型草原土壤氮矿化的影响时指出,高氮输入能显著增加土壤氮的净矿化速率和净硝化速率。比较不同处理的硝态氮含量可知,(C/N)19>(C/N)21>(C/N)29>CK>(C/N)43,土壤硝态氮的含量随着氮肥施入量的增加而增加。这是因为氮肥的添加促进了土壤硝化细菌的增殖,提高了土壤尿酸酶的活性,从而将尿素充分转化成硝态氮。淮贺举等^[44]在研究不同施氮水平对春玉米硝态氮残留的影响时指出,硝态氮在土层中的累积量随氮素输入量的增加而显著增加;张经廷等^[45]在研究不同施氮水平对土壤硝态氮累积的影响时发现,施氮量与硝态氮的累积量呈极显著线性正相关;王爽等^[46]研究不同施氮水平对土壤无机氮含量影响的结果表明,土壤硝态氮积累量随氮肥输入量的增加而显著增加。以上结果均表明,土壤中硝态氮含量与施氮量密切相关。

土壤可溶性有机氮是土壤活性氮库的重要组成部分,它既是有机质转化过程的重要产物,又是微生物可利用的底物,其含量变化对土壤各种氮素形态的转化具有重要影响。目前,培养试验条件下添加有机物对土壤DON含量的影响研究结果并不一致,沈玉芳等^[15]指出,不同有机物料添加土壤后经过微生物的短暂固定,培养后期的DON含量呈现逐渐上升的趋势;但是,薛菁芳等^[47]在研究玉米秸秆加入棕壤后溶

解性有机碳氮的变化时发现,土壤中DON含量在培养前期逐渐上升后期逐渐下,这与仇少君等^[48]对淹水条件下稻草与硫酸铵配施处理的土壤DON含量动态的研究结果相近。本试验中,(C/N)19、(C/N)21和(C/N)29处理的DON含量均呈先升高后降低的趋势,与上述研究结果一致。这可能是因为,秸秆和氮肥的施入刺激了土壤微生物的繁殖,促进了对秸秆和土壤有机质的分解,此时DON作为有机物料的分解产物,含量逐渐升高,随着培养时间的延长,DON又作为微生物可利用的氮源被逐渐分解,含量逐渐降低并趋于稳定;而(C/N)43处理的土壤DON含量逐渐升高,但是变化不大,主要是因为微生物对氮的固持作用促进了DON含量的增加。本实验结果表明,(C/N)19>(C/N)21>(C/N)29>(C/N)43>CK,DON含量随着土壤起始C/N的降低而增加,与前人研究结果一致,张雅洁等^[49]的研究表明,秸秆还田配施不同化肥处理中,当C/N为18:1时,土壤中的有机氮和无机氮含量最高;梁斌等^[50]也指出,秸秆还田和高量化肥配施的土壤DON含量显著高于秸秆还田和低量化肥配施的土壤,这主要是因为化肥施入促进了对秸秆的分解,并且提高了土壤微生物活性,促进土壤中难溶态物质的分解。

4 结论

(1)在土壤中添加等量秸秆不同数量氮素可调节土壤起始C/N,土壤 CO_2 排放通量、累积排放量、土壤有机碳的矿化率和DOC的含量均随着土壤起始C/N降低而增加;土壤 N_2O 的排放通量虽然呈现先升高后降低的趋势,但是,土壤 N_2O 累积排放量却同 CO_2 一样表现为随着土壤起始C/N下降而增加,土壤中硝态氮含量则表现为调节土壤起始C/N>30时显著低于CK土壤,调节土壤起始C/N<30时则显著高于原土土壤,土壤DON含量则随着土壤起始C/N的降低而升高。

(2)土壤起始C/N的不同显著影响了土壤DOC/DON的变化,各处理的土壤均呈现逐渐降低的趋势,C/N>30的有机物料可显著提高土壤DOC/DON的值,C/N<30的有机物料则降低了土壤DOC/DON的值。

(3)不同处理土壤DOC和DON含量、DOC/DON是影响 CO_2 和 N_2O 排放通量、累积排放量的决定因素。土壤DOC含量和DOC/DON越大, CO_2 排放通量越大($R^2=0.77^*$), CO_2 累积排放量越高($R^2=0.79^*$),土壤DON含量和DOC/DON越大, N_2O 排放通量越高(R^2

=0.45*), N₂O 累积排放量也越高 ($R^2=0.52^*$)。

参考文献:

- [1] Bellarby J, Foeroid B, Hastings A F S J, et al. Cool Farming: Climate impacts of agriculture and mitigation potential[EB/OL]. <http://www.greenpeace.org>.
- [2] Trost B, Prochnow A, Meyer-Aurich A, et al. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on the greenhouse gas emissions of a cropping system on a sandy soil in northeast Germany[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 81: 117-128.
- [3] Hu N, Wang B, Gu Z, et al. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 223: 115-122.
- [4] Zhang Z S, Chen J, Liu T Q, et al. Effects of nitrogen fertilizer sources and tillage practices on greenhouse gas emissions in paddy fields of central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 144: 274-281.
- [5] Cavalli D, Marino Gallina P, Bechini L. Sensitivity analysis of six soil organic matter models applied to the decomposition of animal manures and crop residues[J]. *Italian Journal of Agronomy*, 2016, 11(4): 217-236.
- [6] Nguyen D H, Scheer C, Rowlings D W, et al. Rice husk biochar and crop residue amendment in subtropical cropping soils: Effect on biomass production, nitrogen use efficiency and greenhouse gas emissions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(2): 261-270.
- [7] Wu Y, Lin S, Liu T, et al. Effect of crop residue returns on N₂O emissions from red soil in China[J]. *Soil Use and Management*, 2016, 32(1): 80-88.
- [8] 毕智超, 张浩轩, 房歌, 等. 不同配比有机无机肥料对菜地 N₂O 排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 154-161.
BI Zhi-chao, ZHANG Hao-xuan, FANG Ge, et al. Effects of combined organic and inorganic fertilizers on N₂O emissions in intensified vegetable field[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 154-161.
- [9] 伍玉鹏, 刘田, 彭其安, 等. 氮肥配施下不同 C/N 作物残渣还田对红壤温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(10): 2053-2062.
WU Yu-peng, LIU Tian, PENG Qi-an, et al. Greenhouse gas emissions in red soil as influenced by different C/N residues under nitrogen applications[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10): 2053-2062.
- [10] 李睿达, 张凯, 苏丹, 等. 施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(10): 3903-3910.
LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, et al. Effects of nitrogen application on soil greenhouse gas fluxes in eucalyptus plantations with different soil organic carbon content[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(10): 3903-3910.
- [11] Frimpong K A, Yawson D O, Baggs E M, et al. Does incorporation of cowpea-maize residue mixes influence nitrous oxide emission and mineral nitrogen release in a tropical luvisol? [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 91(3): 281-292.
- [12] Millar N, Baggs E M. Relationships between N₂O emissions and water-soluble C and N contents of agroforestry residues after their addition to soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(3): 605-608.
- [13] 杨馨逸, 刘小虎, 韩晓日, 等. 不同品种小麦下土壤微生物量和可溶性有机物对不同施氮量的响应[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(7): 1315-1324.
YANG Xin-yi, LIU Xiao-hu, HAN Xiao-ri, et al. Responses of soil microbial biomass and soluble organic matter to different application rates of N: A comparison between liaochun 10 and liaochun 18[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(7): 1315-1324.
- [14] 云鹏, 高翔, 陈磊, 等. 冬小麦-夏玉米轮作体系中不同施氮水平对玉米生长及其根际土壤氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 567-574.
YUN Peng, GAO Xiang, CHEN Lei, et al. Plant nitrogen utilization and soil nitrogen status in rhizosphere of maize as affected by various nitrogen rates in wheat-maize rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2010, 16(3): 567-574.
- [15] 沈玉芳, 陶武辉, 李世清. 有机物料输入对干润砂质新成土可溶性有机碳、氮的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(1): 139-145.
SHEN Yu-fang, TAO Wu-hui, LI Shi-qing. Effects of exogenous organic materials on dissolved organic carbon and nitrogen in ust sandic entisols[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1): 139-145.
- [16] 杨璐. 中国大田作物茬高-茬重模型的建立东北华北和西北地区秸秆能源利用可获得性[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
YANG Lu. Dynamics model of stubble height and stubble weight and sustainable utilization for biofuel in the northeast, north, and northwest regions of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [17] 张建省, 隋鹏, 陈源泉, 等. 不同耕法和培肥措施组合对作物产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(10): 2721-2727.
ZHANG Jian-sheng, SUI Peng, CHEN Yuan-quan, et al. Crop yield response to different tillage modes combined with fertilization measures[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(10): 2721-2727.
- [18] 黄涛, 仇少君, 杜娟, 等. 碳氮管理措施对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量、秸秆腐解、土壤 CO₂ 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(4): 756-768.
HUANG Tao, QIU Shao-jun, DU Juan, et al. Effects of different carbon and nitrogen managements on yield, straw decomposition, soil CO₂ flux of the winter wheat/summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(4): 756-768.
- [19] 李涛, 何春娥, 葛晓颖, 等. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(12): 1633-1642.
LI Tao, HE Chun-e, GE Xiao-ying, et al. Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(12): 1633-1642.
- [20] 唐倩, 梁卓良, 欧阳磊, 等. 生物碳的物理结构与化学成分对土壤氧化亚氮排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(11): 2839-2845.
TANG Qian, LIANG Zhuo-liang, OUYANG Lei, et al. Effects of biochar's physical structure and chemical constituent on soil N₂O emis-

- sion[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(11):2839-2845
- [21] 孙青, 史淳星, 石坤, 等. 添加不同N源条件下典型除草剂对土壤呼吸和N₂O排放的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(6):1994-1999. SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, et al. Effects of typical herbicides on soil respiration and N₂O emissions from soil added with different nitrogen fertilizers[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6):1994-1999.
- [22] 李银坤, 陈敏鹏, 梅旭荣, 等. 土壤水分和氮添加对华北平原高产农田有机碳矿化的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(14):4037-4046. LI Yin-kun, CHEN Min-peng, MEI Xu-rong, et al. Effects of soil moisture and nitrogen addition on organic carbon mineralization in a high-yield cropland soil of the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(14):4037-4046
- [23] 肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 等. 亚热带不同林分土壤矿质氮库及氮矿化速率的季节动态[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3):730-738. XIAO Hao-yan, LIU Bao, YU Zai-peng, et al. Seasonal dynamics of soil mineral nitrogen pools and nitrogen mineralization rate in different forests in subtropical China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(3):730-738.
- [24] 陈立新, 黄兰英, 乔璐, 等. 模拟氮沉降对温带不同森林类型土壤氮矿化速率的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):139-146. CHEN Li-xin, HUANG Lan-ying, QIAO Lu, et al. Influence of simulated nitrogen deposition on soil nitrogen mineralization rate under different forest stands[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):139-146.
- [25] 邹亚丽, 牛得草, 杨益, 等. 氮素添加对黄土高原典型草原土壤氮矿化的影响[J]. 草地学报, 2014, 22(3):461-468. ZOU Ya-li, NIU De-cai, YANG Yi, et al. The effect of nitrogen addition on soil nitrogen mineralization in the semiarid typical grassland of loess plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(3):461-468.
- [26] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 长期施肥和秸秆还田对红壤水稻土氮素分布和矿化特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):898-905. MA Li, YANG Lin-zhang, XIAO He-ai, et al. Effects of long term fertilization and straw returning on distribution and mineralization of nitrogen in paddy soil subtropical China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(4):898-905.
- [27] 朱春茂, 李志芳, 吴文良, 等. 甜玉米/白三叶草秸秆还田的碳氮矿化研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(3):423-428. ZHU Chun-mao, LI Zhi-fang, WU Wen-liang, et al. Carbon and nitrogen mineralization of incubated sweet maize and white clover straw[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(3):423-428.
- [28] Cole C V, Duxbury J, Freney J, et al. Global estimates of potential mitigation of greenhouse gas emissions by agriculture[J]. 1997, 49(1):221-228.
- [29] Blagodatskaya E V, Blagodatsky S A, Anderson T H, et al. Contrasting effects of glucose, living roots and maize straw on microbial growth kinetics and substrate availability in soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60(2):186-197.
- [30] Angers D, Eriksen-Hamel N. Full-Inversion tillage and organic carbon distribution in soil profiles: A meta-analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(5):1370-1374.
- [31] 刘德燕, 宋长春, 王丽, 等. 外源氮输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(12):3525-3530. LIU De-yan, SONG Chang-chun, WANG Li, et al. Exogenous nitrogen enrichment impact on the carbon mineralization and DOC of the freshwater marsh soil[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12):3525-3530.
- [32] 邢晓旭. 施肥对春玉米农田土壤呼吸CO₂释放量的影响及其变化规律研究[D]. 保定:河北农业大学, 2006. XING Xiao-xu. The research of carbon dioxide emission and its changing rule under different fertilization in spring-corn farmland[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2006.
- [33] 金皖豫, 李铭, 何杨辉, 等. 不同施氮水平对冬小麦生长期土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2015, 39(3):249-257. JIN Wan-yu, LI Ming, HE Yang-hui, et al. Effects of different levels of nitrogen fertilization on soil respiration during growing season in winter wheat[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(3):249-257.
- [34] 周国朋, 曹卫东, 白金顺, 等. 多年紫云英-双季稻下不同施肥水平对两类水稻土有机质及可溶性有机质的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21):4096-4106. ZHOU Guo-peng, CAO Wei-dong, BAI Jin-shun, et al. Effects of different fertilization levels on soil organic matter and dissolved organic matter in two paddy soils after multi-years' rotation of Chinese milk vetch and double-cropping rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21):4096-4106.
- [35] Cardoso A D S, Quintana B G, Januszkiewicz E R, et al. N₂O emissions from urine-treated tropical soil: Effects of soil moisture and compaction, urine composition, and dung addition[J]. *CATENA*, 2017, 157:325-332.
- [36] 张凯, 郑华, 欧阳志云, 等. 施氮对桉树人工林生长季和非生长季土壤温室气体通量的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7):1779-1784. ZHANG Kai, ZHENG Hua, OUYANG Zhi-yun, et al. Effects of nitrogen fertilization on greenhouse gas fluxes of soil-atmosphere interface in growing and non-growing season in *Eucalyptus* plantations in southern China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(7):1779-1784.
- [37] 易琼, 黄旭, 张木, 等. 氮肥施用水平及种类对生菜产量及菜地N₂O排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10):2019-2025. YI Qiong, HUANG Xu, ZHANG Mu, et al. Effects of nitrogen application rate and sources on yield of lettuce and nitrous oxide emission in vegetable soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10):2019-2025.
- [38] 焦燕, 黄耀, 宗良纲. 氮肥水平对不同土壤N₂O排放的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(8):2094-2098. JIAO Yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Impact of different levels of nitrogen fertilizer on N₂O emission from different soils[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8):2094-2098.
- [39] Begum N, Guppy C, Herridge D, et al. Influence of source and quality of plant residues on emissions of N₂O and CO₂ from a fertile, acidic

- Black Vertisol[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(3): 499-506.
- [40] Muhammad W, Vaughan S M, Dalal R C, et al. Crop residues and fertilizer nitrogen influence residue decomposition and nitrous oxide emission from a Vertisol[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(1): 15-23.
- [41] Huang G F, Wong J W C, Wu Q T, et al. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust[J]. *Waste Management*, 2004, 24(8): 805-813.
- [42] 秦莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同C/N比对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2668-2673.
- QIN Li, SHEN Yu-jun, LI Guo-xue, et al. The impact of composting with different C/N on maturity variation and emission of gas concluding N[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2009, 28(12): 2668-2673.
- [43] 冯晓赞, 万鹏, 李洁, 等. 秸秆还田与氮肥配施对中南地区稻田土壤固碳和温室气体排放的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(6): 508-517.
- FENG Xiao-yun, WAN Peng, LI Jie, et al. Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on paddy soil carbons sequestration and green-house-gas emission in central south region of China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(6): 508-517.
- [44] 淮贺举, 张海林, 蔡万涛, 等. 不同施氮水平对春玉米氮素利用及土壤硝态氮残留的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2651-2656.
- HUAI He-ju, ZHANG Hai-lin, CAI Wan-tao, et al. Effect of different nitrogen rates on nitrogen utilization and residual soil nitrate of spring maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2651-2656.
- [45] 张经廷, 王志敏, 周顺利. 夏玉米不同施氮水平土壤硝态氮累积及对后茬冬小麦的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(6): 1182-1190.
- ZHANG Jing-ting, WANG Zhi-min, ZHOU Shun-li. Soil nitrate N accumulation under different N-fertilizer rates in summer maize and its residual effects on subsequent winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(6): 1182-1190.
- [46] 王爽, 孙磊, 陈雪丽, 等. 不同施氮水平对玉米产量、氮素利用效率及土壤无机氮含量的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(3): 387-391.
- WANG Shuang, SUN Lei, CHEN Xue-li, et al. Effects of different nitrogen fertilization levels on maize yield, nitrogen utilization and inorganic nitrogen content in soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(3): 387-391.
- [47] 薛菁芳, 陈书强, 汪景宽. 玉米秸秆对棕壤中可溶性无机氮和有机氮的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2011(4): 41-45.
- XUE Jing-fang, CHEN Shu-qiang, WANG Jing-kuan. Effect of maize residues on dissolved organic nitrogen and dissolved inorganic nitrogen in brown earth[J]. *Heilongjiang Agro-Sciences*, 2011(4): 41-45.
- [48] 仇少君, 彭佩钦, 荣湘民, 等. 淹水培养条件下土壤微生物生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮的动态[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2052-2058.
- QIU Shao-jun, PENG Pei-qin, RONG Xiang-min, et al. Dynamics of soil microbial biomass and dissolved organic carbon and nitrogen under flooded condition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2052-2058.
- [49] 张雅洁, 陈晨, 陈曦, 等. 小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(11): 2155-2161.
- ZHANG Ya-jie, CHEN Chen, CHEN Xi, et al. Effects of wheat and rice straw returning on soil organic matter composition and content of different nitrogen forms in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11): 2155-2161.
- [50] 梁斌, 周建斌, 杨学云, 等. 栽培和施肥模式对黄土区旱地土壤微生物量及可溶性有机碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 132-137.
- LIANG Bin, ZHOU Jian-bin, YANG Xue-yun, et al. Effects of different cultivation and fertilization models on soil microbial biomass and soluble organic carbon and nitrogen in dryland farming[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(2): 132-137.