



吉林农业大学学报
Journal of Jilin Agricultural University
ISSN 1000-5684, CN 22-1100/S

《吉林农业大学学报》网络首发论文

题目：东北黑土区不同秸秆还田方式下玉米田土壤呼吸特征
作者：闫旭，邵贞荣，王少杰
DOI：10.13327/j.jjlau.2024.0008
收稿日期：2024-07-09
网络首发日期：2025-06-04
引用格式：闫旭，邵贞荣，王少杰. 东北黑土区不同秸秆还田方式下玉米田土壤呼吸特征[J/OL]. 吉林农业大学学报. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.0008>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

东北黑土区不同秸秆还田方式下玉米田土壤呼吸特征

闫旭，邵贞莱，王少杰**

吉林农业大学资源与环境学院，长春 130118

摘要：土壤呼吸过程深刻影响全球碳平衡，明确不同秸秆还田方式和施氮量对东北黑土玉米农田土壤呼吸的影响，可为秸秆合理利用和土壤碳库管理提供理论依据。通过田间原位试验，设置秸秆覆盖还田（NTS）、秸秆深翻还田（DTS）和秸秆不还田（CK）3个主处理，并在每个主处理下设置不施氮（N0）、施氮量 180 kg/hm²（N1）和施氮量 270 kg/hm²（N2）3个副处理。采用 LI-870+Smart Chamber 土壤碳通量自动测定系统监测玉米全生育期土壤呼吸速率，并同步监测土壤温度、可溶性有机碳等指标。结果表明：在玉米全生育期内，土壤 CO₂ 排放速率呈现“先升高，后降低”的趋势，在 7 月中旬至 8 月初土壤 CO₂ 排放速率达到峰值，平均 7.60~14.92 μmol·m⁻²·s⁻¹。DTS 处理土壤 CO₂ 平均排放速率为 4.20~10.31 μmol·m⁻²·s⁻¹，显著高于 CK 处理和 NTS 处理，分别增加 19.37%~57.11% 和 32.87%~82.73%。不同秸秆还田方式下土壤呼吸累积量也有一定的差异，DTS 处理平均土壤呼吸累积量显著高于 CK 处理和 NTS 处理，分别增加 33.16%~129.70% 和 32.71%~109.33%。研究结果表明不同秸秆还田方式下的 Q₁₀ 值在 1.49~2.62。土壤温度和土壤可溶性有机碳是影响土壤呼吸速率的重要因子，CK、DTS 和 NTS 处理下，土壤温度分别可以解释土壤呼吸速率季节变化的 77.10%~90.70%，82.40%~97.60%，57.40%~79.90%；土壤呼吸速率和土壤可溶性有机碳之间呈显著正相关关系，且土壤呼吸速率随着土壤可溶性有机碳的增加而增加。

关键词：土壤呼吸；施氮量；秸秆还田；土壤 CO₂；Q₁₀

中图分类号：S15 文献标识码：A

DOI:10.13327/j.jjlau.2024.0008

Study on Soil Respiration Characteristics of Corn Fields under Different Straw Returning Methods in the Black Soil Region of Northeast China

YAN Xu, SHAO Zhenzhu, WANG Shaojie**

College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China.

Abstract: The soil respiration process has a profound impact on global carbon balance. Clarifying the effects of different straw return methods and nitrogen application rates on soil respiration in maize fields in Northeast black soil can provide a theoretical basis for rational utilization of straw and soil carbon pool management. This study conducted field experiments and set up three main treatments: straw covered return (NTS), straw deep tillage return (DTS), and straw no return (CK). Under each main treatment, three sub treatments were set up: no nitrogen application (N0), nitrogen application rate of 180 kg/hm² (N1), and nitrogen application rate of 270 kg/hm² (N2). The LI-870+Smart Chamber soil carbon flux automatic measurement system is used to monitor the soil respiration rate throughout the entire growth period of corn, and synchronously monitor soil temperature, soluble organic carbon and other indicators. The experimental results show that during the entire growth period of corn, the soil CO₂ emission rate shows a trend of "increasing first and then decreasing". From mid July to early August, the soil CO₂ emission rate reaches its peak, with an average of 7.60~14.92 μmol·m⁻²·s⁻¹. The average CO₂ emission rate of soil treated with DTS was 4.20~10.31

* 基金项目：国家自然科学基金项目(U19A2035, 41907081),吉林省自然科学基金项目(20200201017JC)

作者简介：闫旭，男，硕士，研究方向：土壤碳氮循环。

收稿日期：2024-07-09

** 通讯作者：王少杰 E-mail: shaojiawang72@163.com

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, significantly higher than that of CK and NTS treatments, with increases of 19.37%~57.11% and 32.87%~82.73%, respectively. There are also certain differences in soil respiration accumulation under different straw returning methods. The average soil respiration accumulation of DTS treatment is significantly higher than that of CK treatment and NTS treatment, with increases of 33.16%~129.70% and 32.71%~109.33%, respectively. The research results indicate that the Q10 values under different straw return methods range from 1.49 to 2.62. Soil temperature and soluble organic carbon are important factors affecting soil respiration rate. Under CK, DTS, and NTS treatments, soil temperature can explain 77.10% to 90.70%, 82.40% to 97.60%, and 57.40% to 79.90% of seasonal changes in soil respiration rate, respectively; There is a significant positive correlation between soil respiration rate and soil soluble organic carbon, and soil respiration rate increases with the increase of soil soluble organic carbon.

Key words: Soil respiration; Nitrogen application rate; Returning straw to the field; Soil CO₂; Q10

土壤呼吸是农田生态系统中一个重要的生态过程，它涉及到土壤中的植物根系、动物和微生物等生物消耗有机物质并产生 CO₂ 的代谢活动^[1, 2]，这一代谢活动不仅是土壤碳输出的主要途径，也影响着全球的碳平衡，是气候变化研究中的一个关键因素^[3, 4]，土壤呼吸的微小变化，都会严重影响大气中的 CO₂ 浓度，以及土壤碳库在全球变化中的源汇作用^[5]。研究估算土壤呼吸约占整个陆地生态系统呼吸中的 60%~90%，合理调控土壤呼吸对于充分了解全球碳循环过程及其在气候变化中的作用至关重要，对探究不同农田生态系统和不同影响因素下土壤呼吸的变化特征及其作用机制，具有深远的意义^[6, 7]。

黑土是重要的土壤类型之一，东北黑土区作为世界四大黑土区之一，对我国乃至全世界的粮食安全具有重要意义^[8]。长久以来，由于农民施用化肥数量不断增加，而施入有机肥料数量较少，土壤的活性变低，严重影响了作物生长及其产量^[9]。邱建军^[10]等人的研究认为东北黑土区的土壤有机碳损失约占全国 1/4。田间耕作管理措施的不同也会影响农田土壤呼吸^[11-13]，在整个玉米生育期内的土壤呼吸速率也不同。刘平齐^[14]的研究表明在玉米全生育时期的土壤呼吸速率与土壤温度之间存在显著的正相关关系，并呈现出“先升高，后降低”的趋势，原因在于，随着温度的升高，土壤中微生物的活性增加，导致呼吸速率上升。到达一定温度后，如果温度继续升高，可能会抑制微生物的活动，或者可分解的有机物质减少，导致呼吸速率下降。因此，土壤温度是影响土壤 CO₂ 排放速率最显著的影响因子之一，在一定的温度范围内，微小土壤温度的增加会显著提高土壤呼吸速率，从而导致土壤碳固持量的降低；温度降低会导致土壤 CO₂ 释放减少，降低土壤呼吸速率。不同的秸秆还田方式对土壤呼吸产生不同影响，但目前研究学者对秸秆还田与土壤 CO₂ 排放关系的认知仍存在分歧。YANG^[16]等人的试验研究结果认为，秸秆还田通过促进有机物分解和养分循环，显著提高了土壤 CO₂ 排放速率。白银萍^[17]等人的试验研究发现，与无秸秆还田相比，秸秆覆盖还田显著增加了土壤 CO₂ 排放速率，增幅为 12.70%；而秸秆深翻还田显著降低了土壤 CO₂ 的排放速率，降幅为 2.50%。土壤活性有机碳是陆地生态系统的重要组成部分，在陆地碳循环研究中具有非常重要的意义，活性有机碳作为土壤呼吸的底物，通过影响微生物的活性和代谢能力来调节土壤呼吸速率。当土壤中活性有机碳含量较高时，会促进微生物的增殖、增强活性，从而增加土壤呼吸强度^[18]。王春新^[19]等研究发现，土壤呼吸速率与表层土壤活性有机碳含量呈显著正相关关系，与 10 cm 以下土层土壤活性有机碳含量的相关性较小。崔骁勇^[20]等研究表明，土壤活性有机碳含量与土壤呼吸速率呈显著正相关关系。

近年来, 各地因地制宜推行秸秆深翻还田、覆盖还田等科学还田措施, 有效提升了还田效果, 而对于秸秆还田方式与氮肥用量对农田土壤呼吸的耦合调控作用研究相对较少, 本次试验针对以上问题, 采用大田试验原位监测的方法探究东北黑土玉米不同秸秆还田方式和不同施肥量对农田土壤呼吸的影响, 以期为东北黑土地力提升和土壤碳库调控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021-2023 年在吉林省四平市梨树县中国农业大学梨树实验站进行(43° 16' N, 124° 26' E)。研究区域地处于典型的温带季风气候带, 夏季有着高温多雨的特点, 冬季有着寒冷干燥的特点, 主要土壤类型为黑土。该试验地的耕层土壤基本理化性状如下: 土壤有机质含量为 18.90 g kg⁻¹、土壤碱解氮含量为 84.00 mg kg⁻¹、土壤 pH 为 6.10、土壤有效磷含量为 23.90 mg kg⁻¹、土壤速效钾含量为 183.00 mg kg⁻¹。2021-2023 年玉米生育期日降水量及日均温变化如图 1 所示。2021 年玉米全生育期内日平均气温为 18.30 °C, 总降雨量为 492.00 mm, 主要集中在 7~9 月份。2022 年玉米全生育期内日平均气温为 19.80 °C, 总降雨量为 918.20 mm。2023 年玉米全生育期内日平均气温为 20.46 °C, 总降雨量为 454.60 mm, 降雨量主要集中在 7~8 月份。

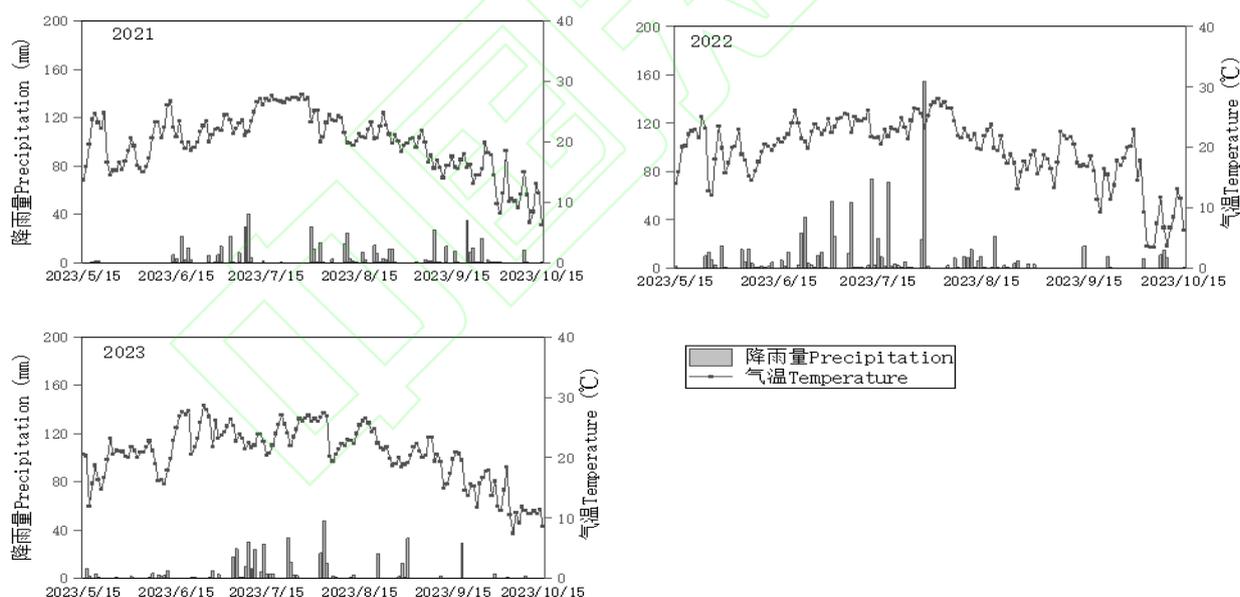


图 1 2021-2023 年玉米生育期日降水量及日均温变化

Figure 1 Daily precipitation and daily average temperature changes during maize growth period from 2021 to 2023

1.2 试验设计

试验为双因素试验, 主处理为还田方式, 即无秸秆还田(CK); 免耕秸秆覆盖还田(NTS); 秸秆深翻还田(DTS); 副处理为施氮量, 为不施氮肥(N0)、施氮肥 180 kg hm⁻²(N1), 施氮肥 270 kg hm⁻²(N2)。在本研究中, 氮肥采用的是含氮量为 46%的尿素, 施用方式采用基追比 1: 2; 磷肥和钾肥则分别是含 P₂O₅为 16%的过磷酸钙和含 K₂O为 60%的氯化钾, 施用量相同, 均为 90 kg hm⁻², 秸秆全量还田。小区长 60 m, 每个小区 12 垄, 垄距 0.6 m, 设置 3 次重复。为测定每个处理的土壤 CO₂排放速率, 在每个处理内埋下 PVC 管。玉米品种选用

当地常用良玉 99，玉米种植密度为 65000 株 公顷⁻¹，于每一年的 5 月上旬播种，收获日期为每年的 10 月上旬，在收获时测产、采集土壤样本；作物生育期间按当地栽培方式进行田间管理。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤可溶性有机碳的测定

称取过 2 mm 筛的鲜土 10 g 于 50 ml 离心管中加入 40 毫升 0.5 mol/l 的 K₂SO₄ 溶液，300 r/min 震荡 1 小时，2000 r/min 离心 5 分钟，经过震荡离心后将溶液过滤，然后将浸提液通过滴定法测的可溶性有机碳的浓度。

1.3.2 土壤呼吸的测定

土壤呼吸试验于 2021 年~2023 年定时定点进行测定不同秸秆还田方式和施氮量水平下玉米生长季农田土壤 CO₂ 排放速率和土壤 CO₂ 的排放量，土壤 CO₂ 排放速率采用土壤碳通量自动测定系统(LI-870+Smart Chamber) 进行测定。在玉米播种之后，在每个试验小区中间的无苗区放置一个规格为 8 寸的 PVC 环，把 PVC 环垂直插入土壤里约 2~3 cm，以确保其稳定并与土壤表面形成良好的接触，需将每个 PVC 环外围的土壤轻轻压实。为减少土壤扰动对试验测量结果产生的影响，我们需要在测量土壤呼吸的前一天插入 PVC 环。土壤呼吸的监测覆盖玉米的整个生育期，从春种到秋收之间，这有助于捕捉不同生长阶段下土壤 CO₂ 排放速率的变化情况。土壤 CO₂ 排放速率分别在玉米的不同生育时期（苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期）各测量一次，每一天测定的时间均为上午的 8:00~12:00 之间，这个时间段土壤温度相对稳定，且能代表这一天的土壤 CO₂ 排放速率的平均值。

1.3.3 土壤呼吸累积量和 Q10 值

根据已测定和计算的土壤呼吸速率估算土壤呼吸累积量（以 CO₂-C 值计），未测定日期用拉格朗日插值法求出其日排放通量，然后累加计算求玉米整个生育期的土壤呼吸累积量，公式^[21]：

$$X = R_s \times 3600 \times 24 \times 12$$

$$CO_2 - C (Mg \cdot ha^{-1}) = \sum_{i=first}^{n=last} X_i + X_{i+1} \times N + X_{i+2} \times N + \dots + X_{i+n} \times N$$

式中：X 为土壤每天 CO₂ 排放量，kg hm⁻²；R_s 为测定的土壤呼吸速率，μmol·m⁻² s⁻¹；12 为 CO₂-C 的摩尔质量，g mol⁻¹；3600 和 24 为换算系数。i 为第 i 次测定土壤呼吸速率，n 为最后一次监测值。N 是相邻两次监测之间相隔的天数，相邻两次土壤呼吸的线性内插作为间隔土壤呼吸速率值。土壤呼吸速率对温度的敏感性通常用 Q₁₀ 来描述。Q₁₀ 是指温度每升高 10 °C 所造成的土壤呼吸速率的变化值。在不受其他因子限制的情况下，温度和土壤呼吸速率(R_s)之间的关系通常可以用指数方程描述^[22]：

式中：a 和 b 为拟合参数，分别代表 0 °C 时某层土壤 CO₂ 排放速率(μmol·m⁻² s⁻¹)和温度响应系数；T 为土壤温度(°C)。

$$R_s = ae^{bt}$$

$$Q_{10} = e^{10b}$$

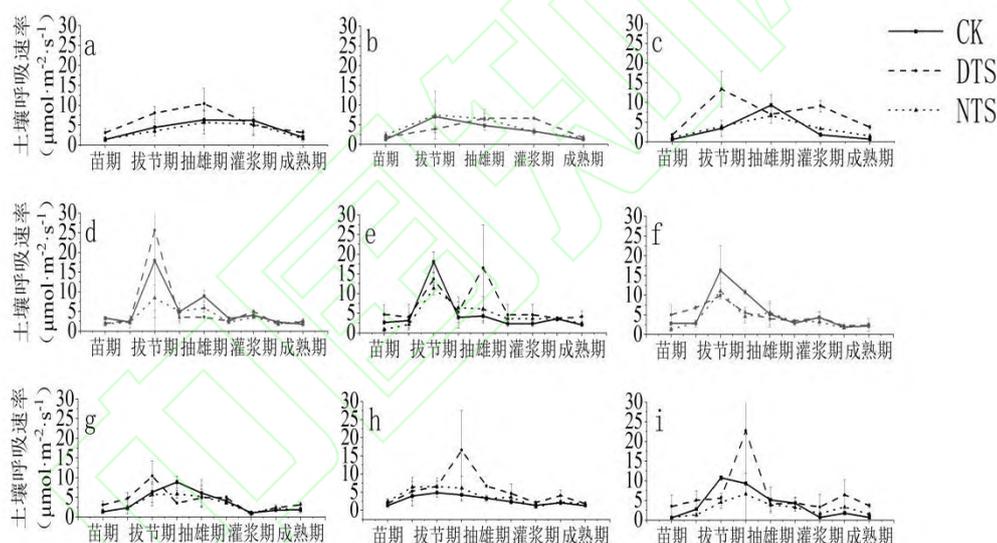
1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2019 软件进行计算处理，采用 IBM SPSS Statistics 26(SPSS Inc, Chicago, USA)软件进行统计分析，并基于最小显著差异法(Least significant difference, LSD)多重比较处理间的均值差异(P<0.05)。采用软件 Origin 2021b(Origin Lab, Massachusetts, USA)进行图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式下土壤呼吸速率的动态变化

连续 3 年试验结果如图 2 所示, 各处理的生育期土壤呼吸速率变化动态基本一致, 均呈现出先升高后降低的单峰趋势。各处理土壤 CO_2 排放速率均在拔节期-抽雄期时达到峰值。试验研究结果表明 CK 处理在不同氮肥施用量(N0、N1、N2)下的平均土壤呼吸速率分别为 $4.07\sim 5.43 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $3.26\sim 4.72 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $3.18\sim 5.49 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$; DTS 处理在不同氮肥施用量(N0、N1、N2)下的平均土壤呼吸速率分别为 $4.78\sim 5.94 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $4.20\sim 6.59 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $4.88\sim 10.31 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$; NTS 处理在不同氮肥施用量(N0、N1、N2)下的平均土壤呼吸速率分别为 $3.41\sim 3.78 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $3.79\sim 4.43 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $3.24\sim 4.07 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。在相同施氮量水平下, 不同秸秆还田方式下的土壤呼吸速率也有显著差异。DTS 处理平均土壤呼吸速率显著高于 CK 处理和 NTS 处理, 增幅分别为 $19.37\%\sim 47.46\%$ (N0)、 $32.87\%\sim 53.33\%$ (N1)、 $57.11\%\sim 82.73\%$ (N2)。试验研究结果表明 DTS 处理的土壤呼吸速率最高, 其次是 NTS 处理, 均要高于 CK 处理。



注: a、b、c 分别为 2021 年 N0、N180、N270; d、e、f 分别为 2022 年 N0、N180、N270; g、h、i 分别为 2023 年 N0、N180、N270。

a, b, and c represent N0, N180, and N270 in 2021; d, e, and f represent N0, N180, and N270 in 2022; g, h, and i represent N0, N180, and N270 in 2023, respectively.

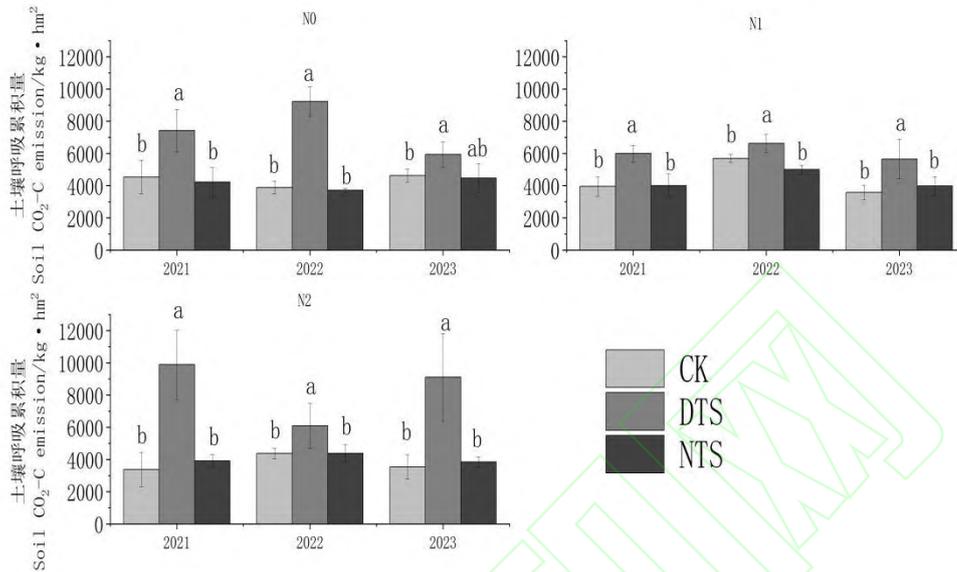
图 2 2021-2023 年不同秸秆还田方式下土壤呼吸速率的变化

Figure 2 Changes in soil respiration rate under different straw returning methods from 2021 to 2023

2.2 不同秸秆还田方式对土壤呼吸累积量的影响

根据 2021-2023 年测得的土壤呼吸, 可以明确看出来不同秸秆还田下的土壤呼吸累积量有显著性差异 (图 3)。在三个氮肥施用量下 DTS 处理的平均土壤呼吸累积量都要显著高于 CK 处理和 NTS 处理, 增幅分别为 $76.08\%\sim 85.59\%$ (N0)、 $32.71\%\sim 33.16\%$ (N1)、 $109.33\%\sim 129.70\%$ (N2)。按照不同生育期划分, 整体表现为拔节期和抽雄期的土壤呼吸的累积量占比最大。在 2021 年不同生育期的土壤呼吸累积量拔节期占总生育期的 $26.8\%\sim 51.3\%$; 抽雄期占总生育期的 $14.10\%\sim 45.10\%$ 。在 2022 年不同生育期的土壤呼吸累积量拔节期总生育期的 $53.78\%\sim 87.56\%$ 、抽雄期占总生育期的 $4.92\%\sim 23.65\%$ 。在 2023 年不同生育期的土壤呼吸累积量拔节期占总生

育期的 42.43%~69.51%、抽雄期占总生育期的和 12.69%~30.11%。苗期和成熟期的土壤呼吸的累积量占比最小，分别占总生育期的 3.70%~9.20%和 8.40%~16.80%。



注：同一年度不同小写字母表示在相同施氮量下不同秸秆还田方式之间差异显著(P<0.05)。

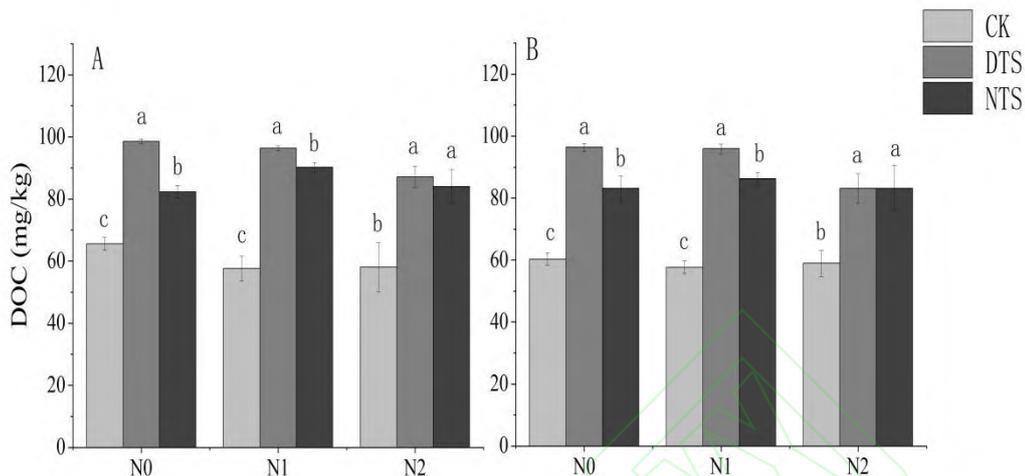
Different lowercase letters in the same year indicate significant differences between different straw return methods under the same nitrogen application rate (P<0.05).

图 3 2021-2023 年不同秸秆还田方式下土壤呼吸累积量

Figure 3 Accumulation of Soil respiration under different straw returning modes in 2021 to 2023

2.3 不同秸秆还田方式对土壤可溶性有机碳的影响

不同秸秆还田方式下土壤可溶性有机碳的变化如图 4 所示。可以看出在不同秸秆还田方式下的土壤可溶性有机碳的浓度范围在 57.64~98.56 mg/kg。在不同秸秆还田方式下土壤可溶性有机碳有显著差异，在 0-20cm 土层，不同氮肥施用量下，DTS 处理和 NTS 处理的土壤可溶性有机碳含量都要显著高于 CK 处理，增幅分别为 25.50%~50.34%(N0)、56.49%~67.18%(N1)、44.70%~50.00%(N2)；同样，在 20-40cm 土层，DTS 处理和 NTS 处理的土壤可溶性有机碳含量都要显著高于 CK 处理 37.96%~59.85%(N0)、49.62%~66.41%(N1)、41.04%~41.05%(N2)。综上所述，秸秆还田方式可以有效地提高土壤可溶性有机碳的含量，其中 DTS 处理的增幅效果更加明显。



注：图中 A：0-20 cm 土层，B：20-40 cm 土层；不同小写字母表示不同秸秆还田方式下差异显著(P<0.05)。

A: 0-20 cm soil layer, B: 20-40 cm soil layer in the figure; Different lowercase letters indicate significant differences under different straw returning methods (P<0.05).

图 4 不同秸秆还田方式下土壤可溶性有机碳浓度

Figure 4 Soil soluble organic carbon concentration under different straw returning methods

2.4 土壤呼吸速率和土壤温度之间的关系

从拟合出来的指数方程可以看出土壤呼吸速率随土壤温度升高呈现指数增加的趋势（表 1），除 N0 水平 CK 处理和 N2 水平 NTS 处理外，土壤呼吸速率与土壤温度均达到显著相关水平(P<0.05)。温度敏感系数 Q10 大小表现为 N2-NTS > N0-DTS > N1-CK > N0-CK > N1-DTS > N2-CK > N2-DTS > N0-NTS > N1-NTS。在 CK、DTS 和 NTS 处理下，土壤温度分别可以解释土壤呼吸速率季节变化的 77.1%~90.7%、82.4%~97.6%、57.4%~79.9%。在表中可以看出在不同秸秆还田方式下，CK 处理的 Q10 值为 1.93~2.23、DTS 处理的 Q10 值为 1.89~2.25、NTS 的 Q10 值为 1.49~2.62。

表 1 土壤呼吸速率与土壤温度之间的关系及 Q10 值

Table1 Relationship between soil respiration rate and soil temperature in Q10 value

施氮量 Nitrogen gradient	秸秆还田 Straw returning to the field	方程 Equation	R^2	Q10
N0	CK	$y=0.7458e^{0.0658x}$	0.298	1.93
	DTS	$y=0.6454e^{0.081x}$	0.519	2.25
	NTS	$y=0.7216e^{0.0584x}$	0.350	1.79
N1	CK	$y=0.5235e^{0.0801x}$	0.349	2.23
	DTS	$y=0.9048e^{0.0705x}$	0.400	2.02
	NTS	$y=1.2945e^{0.0401x}$	0.103	1.49
N2	CK	$y=0.6476e^{0.0684x}$	0.107	1.98
	DTS	$y=1.1217e^{0.0639x}$	0.353	1.89
	NTS	$y=0.298e^{0.0963x}$	0.575	2.62

注：N0：不施氮，N1：施氮量 180 kg hm⁻²，N2：施氮量 270 kg hm⁻²，CK：无秸秆还田，DTS：秸秆深翻还田，NTS：免耕秸秆覆盖还田。下同。

N0: no nitrogen application, N1: nitrogen application rate of 180 kg hm⁻², N2: nitrogen application rate of 270 kg hm⁻², CK: no straw returning, DTS: straw deep plowing returning, NTS: no tillage straw covering returning. Same below.

2.5 土壤呼吸速率和土壤可溶性有机碳之间的关系

土壤呼吸速率和土壤可溶性有机碳之间的关系可由线性回归方程解释（图 5）。由此可知土壤呼吸速率和土壤可溶性碳有机之间达显著相关水平（ $P<0.05$ ）。且随着土壤可溶性有机碳的增加土壤呼吸速率也增加。

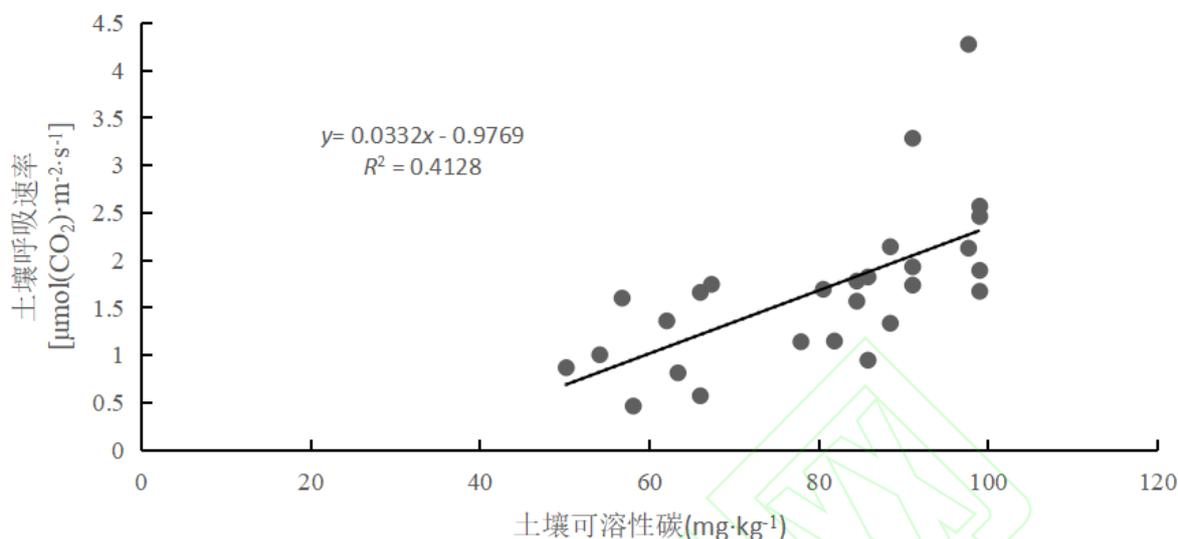


图 5 土壤呼吸速率与土壤可溶性有机碳之间的关系

Figure 5 Relationship between soil respiration rate and soil soluble carbon

3 讨论

3.1 不同秸秆还田方式对土壤呼吸的影响

本试验研究发现, 不同秸秆还田方式和不同施氮量水平下的土壤 CO₂ 排放速率均表现为“先升高, 后降低”的趋势, 在 7、8 月份随着土壤温度的升高土壤 CO₂ 排放速率也逐渐升高, 在 7 月中旬至 8 月初时由于土壤温度达到最高, 土壤 CO₂ 排放速率也达到最高点。试验研究表明不同秸秆还田方式下 DTS 处理的土壤呼吸速率要显著高于 CK 处理和 NTS 处理。从不同处理来看, DTS 处理作为一种有效打破犁底层的措施, 降低了表层土壤的容重和紧实度, 增加了土壤孔隙度和通气性^[23], 促进了土壤有机物质矿化, 有利于土壤呼吸速率的排放。本试验研究表明了不同秸秆还田方式下 DTS 处理和 NTS 处理的土壤呼吸累积量要显著高于 CK 处理的土壤呼吸累积量。这与高寒^[24]和秦子鏊^[25]等人的试验研究结果相似。秸秆还田和深翻相结合可以促进土壤呼吸作用。主要原因是秸秆还田在施入土壤中后, 提高了土壤温度和土壤相关有机质的含量, 这部分土壤有机质含量的增加也为耕层土壤提供了丰富的营养成分, 因此秸秆深翻还田能显著增加土壤呼吸总量^[26-27]。

在本试验研究中, 不同秸秆还田方式结合氮肥梯度造成了土壤肥力和作物生长的差异, 使得不同处理下土壤呼吸速率表现出明显差异, 在同一秸秆还田条件下归因于化学氮肥施用量的不同, 第一, 化学氮肥的投入可以有效提高土壤氮素有效性, 促进作物根系生长, 导致土壤呼吸加剧^[28]; 第二, 化学氮肥的施用可通过改变土壤微环境、土壤养分可用性和碳供应进而提高土壤呼吸速率, 微生物除了通过分解土壤有机质影响异养呼吸外, 还可能通过为植物生长发育提供养分进而影响自养呼吸^[29]。

3.2 土壤呼吸与土壤温度和土壤可溶性有机碳之间的关系

在已知相关环境因子中, 土壤表层温度与含水率是土壤呼吸速率变化的两个重要影响因子, 在本试验中影响土壤呼吸速率变化的环境因子主要是土壤温度(P<0.05)。土壤 CO₂ 排放速率和土壤温度升高呈现指数增加的趋势, 这是因为温度是决定陆地生态系统碳循环过程的关键因素, 温度影响着土壤呼吸过程的所有环节, 温度

升高可能会改变土壤微生物群落并有助于土壤团聚体形成的微生物次生化化合物的分解,在一定范围内增加温度可以提高土壤微生物活性,进而影响有机碳的矿化,从而使土壤温度对土壤 CO₂ 排放具有极显著正效应^[30]。在 DTS 处理下,土壤温度对土壤 CO₂ 排放速率的敏感性高于 CK 和 NTS 处理。NTS 处理的土壤 CO₂ 排放量显著低于 DTS 处理,这可能与较高的年降水量和生育期内的平均土壤温度有关。秸秆免耕还田为土壤提供了较湿润的耕层土壤,并且土壤含水量和土壤温度波动较范围变化较小^[31, 32]。本试验研究下不同秸秆还田方式下的 Q10 值在 1.49~2.62,符合 Murata^[33]等人测定的 Q10 值 1.28~4.75 之间。在本试验中土壤可溶性有机碳也是影响土壤 CO₂ 排放速率的关键影响因子。本研究发现土壤呼吸速率和土壤可溶性有机碳之间呈显著正相关的关系,这与 Yang 等^[34]研究结果一致。土壤可溶性有机碳作为土壤呼吸的主要碳源,土壤可溶性有机碳与微生物活性密切相关,增加可溶性有机碳含量能够刺激微生物活性,改变微生物群落组成以及各群落新陈代谢活动,从而导致土壤呼吸增加^[35]。

4 结论

土壤呼吸速率与土壤温度和土壤可溶性有机碳含量呈正相关,其中,土壤温度在 CK、DTS 和 NTS 处理下分别可以解释土壤呼吸速率季节变化的 77.1%~90.7%、82.4%~97.6%、57.4%~79.9%。秸秆深翻还田与覆盖还田均显著增加了土壤可溶性有机碳含量,增幅达 50.00%~67.18%和 25.50%~56.48%;秸秆深翻还田显著提高了土壤呼吸速率和累积量,特别是在高施氮量的情况下,土壤呼吸速率和累积量更大。

参考文献:

- [1] 李元鸿,赵芯,袁心洁,等.祁连山七一冰川梯度因子四季变化特征与土壤呼吸关联性分析[J].农业环境科学学报,2022,41(7):1610-1618.
- [2] 原慧芳,谢江,张勇波,等.不同林龄橡胶林土壤呼吸速率的变化及其与水热因子的关系[J].热带生物学报,2022,13(1):13-18.
- [3] 王东慧.不同降水情景及草场管理方式对内蒙古典型草原土壤呼吸的影响[D].内蒙古大学,2021.
- [4] 田艳领.秸秆还田下施磷量对土壤呼吸及其温度敏感性的影响[D].山东农业大学,2023.
- [5] 冯彦淞,杨彩红,强玉泉.耕作模式对河西绿洲灌区夏玉米农田土壤呼吸的影响[J].中国沙漠,2023,43(4):200-208.
- [6] 段少荣,于美佳,盛基峰,等.草地土壤呼吸速率影响因素研究现状[J].农业与技术,2021,41(23):57-59.
- [7] 竹万宽,许宇星,王志超,等.不同林龄尾巨桉人工林土壤呼吸特征及影响因素[J].桉树科技,2021,38(4):9-14.
- [8] 张之一.关于世界黑土分布的探讨[J].黑龙江农业科学,2010(4):59-60.
- [9] 李然嫣.我国东北黑土区耕地利用与保护对策研究[D].北京:中国农业科学院,2017.
- [10] 邱建军,唐华俊,陈庆沐,等.中国农业耕地土壤碳平衡与碳排放研究[C]//中国青年农业科学学术年报.北京:中国农业出版社,2002.
- [11] 刘爽,严昌荣,何文清,等.不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素[J].生态学报,2010,30(11):2919-2924.
- [12] 韦泽秀,徐友伟,曾兴权,等.土壤呼吸及影响因子对耕作方式的响应[J].西藏科技,2013(7):6-8.13.
- [13] 安崇霄,张永杰,杜孝敬,等.不同耕作措施对伊犁河谷夏大豆农田土壤碳排放、碳平衡及经济效益的影响[J].生态学杂志,2020,39(3):812-821.
- [14] 刘平奇,张梦璇,王立刚,等.深松秸秆还田措施对东北黑土土壤呼吸及有机碳平衡的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(5):1150-1160.
- [15] 杨学慧,于爱忠,柴健,等.绿肥还田结合减氮对麦田土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J/OL].中国生态农业学报(中英文):1-11[2024-01-10].
- [16] Yang X, Meng J, Lan Y, et al. Effects of maize stover and its biochar on soil CO₂ emissions and labile organic carbon fractions in Northeast China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 240: 24-31.
- [17] 白银萍,海江波,杨刚,等.稻田土壤呼吸及酶活性对不同秸秆还田方式的响应.应用与环境生物学报,2017,23(1):28-32.
- [18] 崔凤娟.免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤呼吸和碳平衡的影响[D].内蒙古农业大学,2011.
- [19] 王春新,于鹏,张玉玲,等.氮肥与有机肥配施对设施土壤呼吸的影响[J].土壤通报,2017,48(1):146-154.
- [20] 崔骁勇,王艳芬,杜占池.内蒙古典型草原主要植物群落土壤呼吸的初步研究[J].草地学报,1999,(3):245-250.
- [21] 高会议,郭胜利,刘文兆.黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子[J].生态学报,2011,31(18):5217-5224.

- [22] 贺美, 王迎春, 王立刚, 等. 不同耕作措施对黑土碳排放和活性碳库的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(5): 1195-1202.
- [23] 张丽, 张中东, 郭正宇, 等. 深松耕作和秸秆还田对农田土壤物理特性的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 102-106+117.
- [24] 高寒, 王宏燕, 李传宝, 等. 玉米秸秆不同腐解处理还田对黑土碳氮比的影响研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1392-1397.
- [25] 秦子罍, 刘子琪, 曾庆亚, 等. 玉米秸秆还田对东北黑土地生态效益的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(18): 9711-9714.
- [26] 张丽, 张中东, 郭正宇, 等. 深松耕作和秸秆还田对农田土壤物理特性的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 102-106,117.
- [27] 王万宁, 强小嫒, 刘浩, 等. 麦前深松对夏玉米土壤物理性状和生长特性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 229-236.
- [28] Nakane K, Kohno T, Horikoshi T. Root respiration rate before and just after clear - felling in a mature, deciduous, broad leaved forest[J]. *Ecological Research*, 1996, 11(2): 111-119.
- [29] Law R. Interpreting, Measuring, and modeling soil respiration[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 3-27.
- [30] 阎佩云. 黄土旱塬旱作玉米农田不同栽培模式温室气体排放特征及影响因素[D]. 西北农林科技大学, 2013.
- [31] Helgason B L, Walley F L, Germida J J. Fungal and bacterial abundance in long-term no-till and intensive-till soils of the Northern Great Plains. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73: 120-127.
- [32] Balota EL, Colozzi A, Andrade D, et al. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. *Soil & Tillage Research*, 2004, 77: 137-145.
- [33] Murata T, Tanaka H, Hamada S, et al. Seasonal variations in soil microbial biomass content and soil neutral sugar composition in grassland in the Japanese temperate zone. *Applied Soil Ecology*, 1999, 11: 253-259.
- [34] YANG J S, ZHAN C, LI Y Z, et al. Effect of salinity on soil respiration in relation to dissolved organic carbon and microbial characteristics of a wetland in the Liaoh River estuary, Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 946-953.
- [35] 杨学慧, 于爱忠, 柴健, 等. 绿肥还田结合减氮对麦田土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(1): 61-70.