

小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响

南雄雄¹, 田霄鸿^{1*}, 张琳², 游东海¹, 吴玉红¹, 曹玉贤¹

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 农业部黄土高原农业资源与环境修复重点开放实验室, 陕西杨凌 712100;

2 华南农业大学资源环境学院, 广东广州 510642)

摘要: 通过室内模拟培养试验, 揭示了不同水分条件下小麦和玉米秸秆在土壤中的腐解特点及对土壤碳、氮含量的影响。结果表明, 1) 水分条件对有机物质腐解的影响较大, 在 32 d 的培养期间, 相对含水量为 60% (M_{60}) 时, 土壤 CO_2 释放速率始终低于含水量 80% (M_{80}) 的处理。 M_{60} 条件下释放的 CO_2 -C 量占秸秆腐解过程中释放碳总量的 40.1%, 而 M_{80} 条件下达到 51.5%; M_{60} 条件下, 添加秸秆土壤有机碳含量平均提高 2.24 g/kg, 显著高于 M_{80} 条件下的 1.43 g/kg。2) 添加玉米秸秆的土壤, 在培养期内 CO_2 释放速率始终高于小麦秸秆处理, CO_2 -C 累积释放量和有机碳净增量分别为 408.35 mg/pot 和 2.12 g/kg; 而小麦秸秆处理分别仅为 378.94 mg/pot 和 1.56 g/kg, 两种秸秆混合的处理介于二者之间。3) 与未添加秸秆相比, 土壤中添加小麦或玉米秸秆后, 土壤有机碳、微生物量碳、全氮和微生物量氮含量均显著提高, 且数量上总体趋势表现为: 玉米秸秆 > 两种秸秆混合 > 小麦秸秆。可见, 适宜水分条件有利于秸秆腐解过程中秸秆中碳向无机碳方向转化, 而不利于向土壤有机碳方向转化; 且玉米秸秆比小麦秸秆更易腐解。秸秆在土壤中腐解对补充土壤碳、氮作用很大, 可改善土壤微生物生存条件, 提高土壤质量。

关键词: 秸秆腐解; CO_2 释放; 土壤有机碳; 微生物量碳; 微生物量氮

中图分类号: 153.6⁺ 1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)03-0626-08

Decomposition characteristics of maize and wheat straw and their effects on soil carbon and nitrogen contents

NAN Xiong-xiong¹, TIAN Xiao-hong^{1*}, ZHANG Lin², YOU Dong-hai¹, WU Yu-hong¹, CAO Yu-xian¹

(1 College of Resource and Environment Northwestern A & F University/Key Lab for Agricultural Resources and Environmental Remediation in Loess Plateau of Agriculture Ministry of China, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract: An incubation experiment was carried out to reveal decomposition characteristics of straw of maize and wheat and their effects on soil carbon and nitrogen contents. The experiment was lasted in dynamic microcosms for 32 days at 30°C with 8 treatments combined with 2 moisture levels, namely, relative water content of 60% (M_{60}) and 80% (M_{80}), and 4 straw levels, namely, maize straw addition, wheat straw addition, mixed addition and no addition. The results show that, 1) there is a strong influence of soil water content on the decomposition of the both crop straw in soils, and the rate of CO_2 evolution at RCW 60% is lower than that at RCW 80% throughout the incubation period. Moreover, the ratios of CO_2 -C derived from straw to the total released C from straw are 40.1% and 51.5% under the M_{60} and M_{80} treatments, respectively, and the increases of SOC content are 2.24 and 1.43 g/kg for the two treatments. 2) The rate of CO_2 -C evolution from maize straw decomposition is consistently higher than that from wheat straw. In the treatments where maize straw are added, the cumulative amount of CO_2 -C evolution and net SOC increase are 408.35 mg/pot and

收稿日期: 2009-09-21 接受日期: 2009-12-29

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2007BAD89B16, 2006BAD05B07); 国家自然科学基金面上项目(40971179)资助。

作者简介: 南雄雄(1984—), 男, 陕西子长人, 硕士研究生, 主要从事养分资源管理方面的研究。E-mail: nanxiong0820@163.com

* 通讯作者 Tel: 029-87082069, E-mail: txhong@hotmail.com

2.12 g/kg, and those for wheat straw additions are 378.94 mg/pot and 1.56 g/kg. When the two types of straw are mixed with soil, the two values range between those of solely additions. 3) Compared to no straw addition at the end of 32 d incubation, the contents of SOC, microbial biomass C, total N and microbial biomass N in the straw addition treatments are significantly increased, and they are almost ranked in maize straw > maize and wheat straw > wheat straw. Therefore, it is more easily to transform the straw carbon into inorganic C (CO_2) than into SOC under high water condition, and maize straw decomposition is easier than that of wheat straw. In conclusion, the high contribution of straw returning to soil can be regarded as a supplement to soil carbon pool and nutritious elements including N, and microbe, and thus soil quality is improved.

Key words: straw decomposition; CO_2 -C evolution; soil organic carbon; microbial biomass C; microbial biomass N

据预测,到 2030 年中国粮食需求量将达到 6.4 亿吨,维持现有粮食种植面积尤其是进一步提高单位面积产量将是保障我国粮食安全的关键所在^[1]。然而,近 20 年来随着经济社会的快速发展,我国一些粮食主产区种植业结构发生了显著变化。以关中平原为例,粮田面积呈不断萎缩趋势,而蔬菜和果树种植面积不断扩大;同时有限的有机肥源几乎全部进入经济效益较高的果园和菜地,粮食生产则越来越依赖于化肥的投入。长期如此,势必导致粮田土壤养分严重失衡,土壤质量下降,成为粮食生产可持续发展的限制性因素。因此,如何维持和提高粮田耕地土壤质量已成为保障粮食生产可持续发展的重要理论和实践问题。

研究表明,土壤有机碳是影响土壤肥力和作物产量高低的决定性因子,被认为是土壤质量和功能的核心^[2-4]。研究土壤碳的投入、存储、转化和循环,在维持和提高土壤肥力、环境保护、农业可持续发展等方面均起着极其重要的作用,对于揭示耕地土壤质量的演变,维持耕地土壤可持续利用和保障国家粮食安全也至关重要。

作物秸秆含有大量有机质,同时含有植物生长所必需的氮、磷、钾及其它中微量元素。近年来全国每年生产秸秆近 6.5 亿吨,机械化还田面积逐年扩大。对粮食生产来说,作物秸秆正逐渐取代传统有机肥成为重要的有机肥源,秸秆还田成为增加土壤有机质,提高土壤肥力的重要途径之一^[5-7]。在集约化生产条件下,单位面积上会有较大数量的作物秸秆产生,秸秆还田后的腐解速度和特点是秸秆还田能否发挥重要作用的关键,因此,作物秸秆本身的组成和特点及农田水分条件对其腐解的影响,亟待进一步深入研究。

冬小麦/夏玉米一年二熟制是关中平原最主要的粮食作物种植制度,小麦和玉米秸秆也成为该区迅猛发展的田间机械化秸秆还田的主要对象。本试

验以小麦和玉米秸秆为研究对象,通过室内培养试验研究秸秆进入土壤后影响其腐解的因素、秸秆腐解过程及特点,以及秸秆腐解对土壤中碳、氮含量的影响,旨在为以秸秆还田为纽带的农田物质循环研究提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自陕西省三原县西北农林科技大学研究所试验地(秸秆还田定位试验田间试验示范区),连续两季未进行秸秆还田处理区的耕层土壤(0—20 cm),土壤类型属于红油土。土壤有机碳含量 16.89 g/kg,全氮 0.68 g/kg, NO_3^- -N 13.87 mg/kg, NH_4^+ -N 12.92 mg/kg。土壤风干后,除去杂物,研磨过 2 mm 筛供培养用;供试秸秆为玉米和小麦秸秆,分别为作物成熟收获后采集的地上部分,70℃烘干后粉碎(粉状),待用。试验所用培养容器为高 15 cm,直径 9 cm 的带密封盖塑料圆盆。

1.2 试验设计

采取室内模拟恒温培养方法,每个培养盆装入供试风干土样 204 g(风干土水分含量为 2%)。培养过程中土壤水分保持相对含水量 60% (M_{60})或 80% (M_{80});将小麦秸秆(Ws)和玉米秸秆(Ms)分别单独施加,秸秆用量为 1.8 g/pot,且设置二者混合施加(WM)及无秸秆对照(NS),混合施用处理中小麦和玉米秸秆各加 0.9 g/pot。采用完全组合设计,8 个处理,重复 9 次,共培养 72 盆。

另外,每个培养盆中添加 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 0.08 g/kg,以调整秸秆腐解过程中土壤 C/N 比。培养时,氮肥按 2 个不同的水分水平配制成 2 份相应溶液,再按试验方案依次加入培养盆。

按照试验方案将 204 g 风干土壤与 1.8 g 秸秆装入培养盆中均匀混合,根据不同水分水平均匀加入所需氮肥溶液,再放入一装有 10 mL 1 mol/L

NaOH 的小烧杯(容积 50 mL)用于收集 CO_2 , 培养盆边缘处涂抹凡士林以保证其密封性, 放于 30°C 恒温培养箱中培养。 CO_2 收集瓶于第 2、3、5、8、11、15、19、23、28、32 d 分别进行测定, 并重新放入装有 10 mL 1 mol/L NaOH 的小烧杯。培养过程中水分控制采用重量控制法—加蒸馏水至初始重量。

1.3 测定项目与方法

土壤微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸, 0.5 mol/L K_2SO_4 浸提(水土比为 4:1), 微生物量碳用 TOC 总有机碳分析仪测定; 微生物量氮用消煮氧化法测定^[8-9]; 土壤有机碳采用重铬酸钾—浓硫酸外加加热法测定; 土壤全氮采用半微量开氏法测定; CO_2 采用碱液吸收滴定法测定。

试验数据采用 Excel、DPS 统计软件进行方差分析和多重比较(SSR 法)。

2 结果与分析

2.1 秸秆腐解过程中 CO_2 的释放

小麦和玉米秸秆在土壤中的腐解过程差别较

大, 且水分状况对秸秆腐解影响较大。在不同秸秆种类和水分条件下, 秸秆腐解释放 CO_2 -C 均呈现由快逐渐变慢的趋势。图 1 表明, 添加玉米秸秆, 培养期内土壤中 CO_2 释放速率始终高于小麦玉米秸秆混合和小麦秸秆的处理, 且 3 个秸秆处理均显著高于无秸秆处理; 相对含水量为 80% (M_{80}) 的条件下, 土壤 CO_2 释放速率始终高于其在 60% (M_{60}) 含水量条件下。经过 32 d 的培养, 不同秸秆种类和水分条件下, CO_2 -C 累积释放量有显著差异(表 1)。在 M_{80} 的条件下, 添加各种秸秆的土壤 CO_2 -C 平均累积释放量达到 346.37 mg/pot, 显著高于其 M_{60} 条件下的释放量 319.96 mg/pot; 而且, 加秸秆处理, 显著高于未添加秸秆处理。其中单施玉米秸秆使 CO_2 -C 累积释放量增加最明显, 约为无秸秆条件下的 3 倍。另外, 在 M_{80} 的水分条件下, CO_2 -C 累积释放量高于 M_{60} , 其中在小麦秸秆和未添加秸秆处理下差异极显著; 而在两种水分条件下, 添加秸秆处理显著高于未添加秸秆处理。

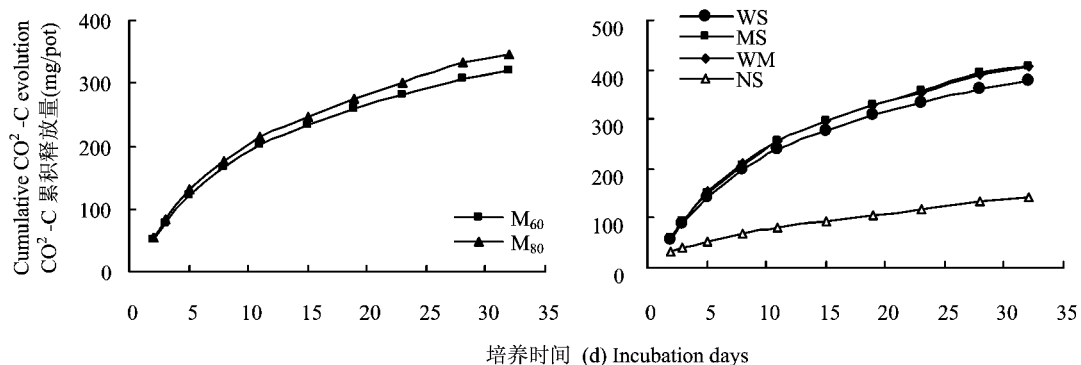


图 1 不同条件下秸秆腐解过程中 CO_2 -C 释放规律

Fig.1 CO_2 -C emission from straw decomposition under different conditions

[注(Note): WS—小麦秸秆 Wheat straw; MS—玉米秸秆 Maize straw; WM—小麦秸秆与玉米秸秆混合 Wheat straw + Maize straw; NS—无秸秆加入 No straw.]

表 1 不同条件下秸秆腐解过程中 CO_2 -C 释放累积释放量 (mg/pot)

Table 1 Cumulative CO_2 -C evolution amounts from straw decomposition under different conditions

湿度 Moisture	秸秆种类 Straw type				均值 Average
	WS	MS	WM	NS	
M_{60}	357.07 ± 14.06 b	397.96 ± 12.23 a	400.11 ± 3.78 a	124.68 ± 0.78 d	319.96 B
M_{80}	400.81 ± 6.13 a	418.75 ± 10.78 a	409.63 ± 7.20 a	156.27 ± 5.56 c	346.37 A
均值 Average	378.94 B	408.35 A	404.87 A	140.48 C	

注(Note): WS—小麦秸秆 Wheat straw; MS—玉米秸秆 Maize straw; WM—小麦秸秆与玉米秸秆混合 Wheat straw + Maize straw; NS—无秸秆加入 No straw. 不同处理间多重比较在 5% 水平下进行, 不同湿度、秸秆种类(均值)间多重比较在 1% 水平下进行 The multiple comparisons of different treatments are conducted under the levels of 5%, and the multiple comparisons among various levels (average) of moisture and straw supply are conducted under the levels of 1%.

2.2 不同条件下秸秆腐解对土壤碳的影响

不同水分条件下经过 32 d 的培养,土壤有机碳变化并不明显;但就添加作物秸秆和未添加秸秆相比,无论添加小麦、玉米秸秆或者二者混合施加,均能显著提高土壤有机碳,其中添加玉米秸秆效果最

明显(表 2)。另外,在 2 个不同的水分条件下,除了未添加秸秆处理外, M_{60} 条件下土壤中有机碳含量均高于 M_{80} ;添加秸秆处理的土壤,显著高于未添加秸秆处理。由此看出,秸秆还田对土壤中碳的储存和转化有明显的影

表 2 不同条件下土壤中有有机碳含量(g/kg)

Table 2 Soil organic carbon content under different conditions

湿度 Moisture	秸秆种类 Straw type				均值 Average
	WS	MS	WM	NS	
M_{60}	15.17 ± 0.50 abc	15.99 ± 0.62 a	15.62 ± 0.52 ab	13.41 ± 0.40 d	15.05 A
M_{80}	14.14 ± 0.20 bcd	14.81 ± 0.51 abcd	14.96 ± 0.35 abc	13.79 ± 0.37 cd	14.43 A
均值 Average	14.65 AB	15.40 A	15.29 A	13.60 B	

注(Note): WS—小麦秸秆 Wheat straw; MS—玉米秸秆 Maize straw; WM—小麦秸秆与玉米秸秆混合 Wheat straw + Maize straw; NS—无秸秆加入 No straw. 不同处理间多重比较在 5% 水平下进行,不同湿度、秸秆种类(均值)间多重比较在 1% 水平下进行 The multiple comparisons of different treatments are conducted under the levels of 5%, and the multiple comparisons among various levels (average) of moisture and straw supply are conducted under the levels of 1%.

用添加秸秆和未添加秸秆的土壤有机碳含量之差来表示秸秆还田对土壤中有机碳含量的影响。表 3 表明,培养 32 d 后,在 M_{60} 条件下,土壤中有机碳含量平均提高了 2.18 g/kg,显著高于 M_{80} 条件下的 0.85 g/kg;小麦秸秆、玉米秸秆及二者混合处理土壤有机碳含量依次较未施用秸秆平均提高 1.05、1.80 和 1.69 g/kg。 M_{60} 条件下土壤中有机碳增量均高于 M_{80} ;添加玉米秸秆,在 2 种水分条件下土壤中有机碳含量增加幅度最大。说明秸秆种类和水分条件对土壤中有机碳的累积有明显影响。

表 4 看出,不同的水分和秸秆处理对土壤碳库中最活跃和最易变化的土壤微生物量碳影响均较明显。经 32 d 培养后, M_{80} 处理土壤微生物量碳平均含量较 M_{60} 提高 19.1%;添加小麦秸秆、玉米秸秆及二者混合较未添加秸秆处理,分别提高 159%、115% 和 118%。在两种水分条件下,添加秸秆均能使土壤微生物量碳有所增加; M_{80} 条件下,小麦和玉米秸秆混合

添加,土壤微生物量碳达最高。可见,秸秆还田至少在短期内可以使土壤中微生物量碳显著增加。

表 3 不同条件下秸秆腐解对土壤中有有机碳量的影响(g/kg)

Table 3 Effects of straw decomposition on soil organic matter content under different conditions

湿度 Moisture	秸秆种类 Straw type			均值 Avg.
	WS	MS	WM	
M_{60}	1.76 abc	2.58 a	2.20 ab	2.18 A
M_{80}	0.35 c	1.02 bc	1.17 abc	0.85 B
均值 Avg.	1.05 A	1.80 A	1.69 A	

注(Note): WS—小麦秸秆 Wheat straw; MS—玉米秸秆 Maize straw; WM—小麦秸秆与玉米秸秆混合 Wheat straw + Maize straw. 不同处理间多重比较在 5% 水平下进行,不同湿度、秸秆种类(均值)间多重比较在 1% 水平下进行 The multiple comparisons of different treatments are conducted under the levels of 5%, and the multiple comparisons among various levels (average) of moisture and straw supply are conducted under the levels of 1%.

表 4 不同条件下秸秆腐解对土壤中微生物量碳的影响(mg/kg)

Table 4 Effects of straw decomposition on soil microbial biomass C under different conditions

湿度 Moisture	秸秆种类 Straw type				均值 Average
	WS	MS	WM	NS	
M_{60}	309.60 ± 5.66 b	315.90 ± 1.61 b	181.25 ± 12.74 d	130.45 ± 11.91 d	234.30 B
M_{80}	361.26 ± 40.84 ab	241.76 ± 24.11 c	384.29 ± 31.27 a	128.93 ± 10.86 d	279.06 A
均值 Average	335.43 A	278.83 B	282.77 AB	129.69 C	

注(Note): WS—小麦秸秆 Wheat straw; MS—玉米秸秆 Maize straw; WM—小麦秸秆与玉米秸秆混合 Wheat straw + Maize straw; NS—无秸秆加入 No straw. 不同处理间多重比较在 5% 水平下进行,不同湿度、秸秆种类(均值)间多重比较在 1% 水平下进行 The multiple comparisons of different treatments are conducted under the levels of 5%, and the multiple comparisons among various levels (average) of moisture and straw supply are conducted under the levels of 1%.

2.3 不同条件下土壤截留碳和 CO₂-C

在秸秆腐解条件下,土壤截留碳(土壤有机碳增量)和 CO₂-C 量基本相等,但碳分配略有不同。其中,水分条件对其影响最为明显。M₆₀条件下,CO₂-C 占到秸秆腐解释放碳量的 40.84%,而 M₈₀达到了 51.51%(图 2)。可见,作物秸秆腐解释放的碳至少近一半在短期内可被土壤截留,并且相对充足的水分条件并不利于土壤碳的累积。

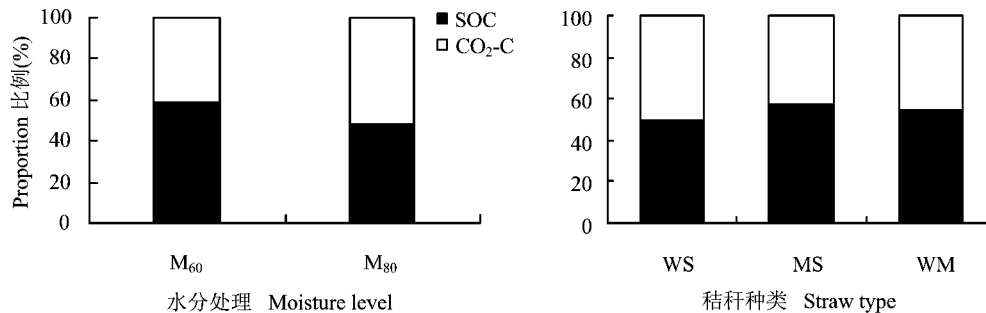


图 2 不同条件下 CO₂-C 和有机碳所占秸秆腐解释放碳量的比例

Fig. 2 Proportion of CO₂-C and organic C in straw derived C under different conditions

[注(Note): WS—小麦秸秆 Wheat straw; MS—玉米秸秆 Maize straw; WM—小麦秸秆与玉米秸秆混合 Wheat straw + Maize straw.]

表 5 不同条件下土壤中全氮含量(g/kg)

Table 5 Soil total nitrogen content under different conditions

湿度 Moisture	秸秆种类 Straw type				均值 Average
	WS	MS	WM	NS	
M ₆₀	0.70 ± 0.01 ab	0.71 ± 0.01 ab	0.71 ± 0.01 ab	0.67 ± 0.01 c	0.70 A
M ₈₀	0.71 ± 0.01 a	0.72 ± 0.00 a	0.72 ± 0.00 a	0.69 ± 0.00 bc	0.71 A
均值 Average	0.71 A	0.72 A	0.71 A	0.68 B	

注(Note): WS—小麦秸秆 Wheat straw; MS—玉米秸秆 Maize straw; WM—小麦秸秆与玉米秸秆混合 Wheat straw + Maize straw; NS—无秸秆加入 No straw. 不同处理间多重比较在 5% 水平下进行,不同湿度、秸秆种类(均值)间多重比较在 1% 水平下进行 The multiple comparisons of different treatments are conducted under the levels of 5%, and the multiple comparisons among various levels (average) of moisture and straw supply are conducted under the levels of 1%.

秸秆腐解的模拟培养后土壤全氮和有机碳的变化规律相似。表 6 看出,在 M₆₀和 M₈₀的水分条件下,添加作物秸秆能使土壤中全氮平均分别提高 0.035 和 0.029 g/kg; 而小麦、玉米秸秆及二者混合施用较未施用秸秆依次提高 0.029, 0.034 和 0.032 g/kg。

与土壤微生物量碳类似,不同的水分条件和秸秆添加物对其影响均比较明显(表 7)。在 M₈₀的水分条件下,各种秸秆处理的土壤微生物量氮均略高于 M₆₀水分条件下含量,且添加作物秸秆能显著提高其含量,添加小麦、玉米及二者混合秸秆较未施加秸秆土壤微生物量氮平均分别提高 62.5%、65.6% 和 72.7%。

2.4 不同条件下秸秆腐解对土壤氮的影响

经过不同条件下秸秆腐解的模拟培养后,土壤中全氮与有机碳的含量变化趋势相似。不同的水分条件下,土壤全氮变化不明显,而添加作物秸秆的处理均使土壤全氮显著提高,单独施加玉米秸秆条件下全氮含量最高,较未添加秸秆高 0.04 g/kg; 而不同秸秆处理之间差异不显著(表 5)。

表 6 不同条件下秸秆腐解对土壤中全氮含量的影响(g/kg)

Table 6 Effects of straw decomposition on soil total nitrogen under different conditions

湿度 Moisture	秸秆种类 Straw type			均值 Avg.
	WS	MS	WM	
M ₆₀	0.031 a	0.036 a	76.13 ± 4.96 a	0.035 A
M ₈₀	0.026 a	0.032 a	80.11 ± 9.06 a	0.029 A
均值 Avg.	0.029 A	0.034 A	78.12 A	

注(Note): WS—小麦秸秆 Wheat straw; MS—玉米秸秆 Maize straw; WM—小麦秸秆与玉米秸秆混合 Wheat straw + Maize straw; NS—无秸秆加入 No straw. 不同处理间多重比较在 5% 水平下进行,不同湿度、秸秆种类(均值)间多重比较在 1% 水平下进行 The multiple comparisons of different treatments are conducted under the levels of 5%, and the multiple comparisons among various levels (average) of moisture and straw supply are conducted under the levels of 1%.

表 7 不同条件下秸秆腐解对土壤中微生物量氮含量的影响 (mg/kg)

Table 7 Effect of straw decomposition on soil microbial biomass N under different conditions

湿度 Moisture	秸秆种类 Straw types				均值 Avg.
	WS	MS	WM	NS	
M ₆₀	68.91 ± 4.25 a	74.21 ± 7.87 a	76.13 ± 4.96 a	40.71 ± 6.36 b	64.99 A
M ₈₀	78.10 ± 8.98 a	75.67 ± 4.52 a	80.11 ± 9.06 a	49.78 ± 4.71 b	70.91 A
均值 Average	73.51 A	74.94 A	78.12 A	45.25 B	

注(Note): WS—小麦秸秆 Wheat straw; MS—玉米秸秆 Maize straw; WM—小麦秸秆与玉米秸秆混合 Wheat straw + Maize straw; NS—无秸秆加入 No straw. 不同处理间多重比较在 5% 水平下进行,不同湿度、秸秆种类(均值)间多重比较在 1% 水平下进行 The multiple comparisons of different treatments are conducted under the levels of 5%, and the multiple comparisons among various levels (average) of moisture and straw supply are conducted under the levels of 1%.

3 讨论

3.1 水分条件和秸秆种类与秸秆腐解的关系

研究表明,作物秸秆进入土壤发生复杂的物质和能量转化,而外界环境条件对其转化过程有着重要的影响^[10,11]。与前人研究结果一致^[12],水分条件是秸秆在土壤中腐解转化的决定性因子之一。本试验在其他条件相同的情况下,较充分的水分(M₈₀),土壤释放 CO₂ 速度较快,经过 32 d 的腐解,土壤 CO₂-C 累积释放量显著高于其 M₆₀条件下的释放量;但从水分条件对腐解引起的土壤有机碳净增量来看,M₆₀显著高于 M₈₀条件下有机碳净增量。同时,在 M₈₀的水分条件下,以 CO₂ 形式排放的碳量在秸秆腐解释放碳量中所占的比例高于 M₆₀水分条件下所占比例。类似研究也表明,土壤水分含量的高低和土壤有机质的分解及土壤呼吸有重要关系。最佳的土壤水分状况通常是接近最大田间持水量^[12],即在此时土壤中有有机质的分解也最快。因此土壤水分对秸秆还田条件下物质的转化和累积有着重要的影响。

不同的作物秸秆由于其本身的成分和性质有很大的差别,其进入土壤后的腐解过程和特点也有所不同。本研究针对研究区域小麦/玉米轮作体系下秸秆还田的实际状况,分别模拟了小麦秸秆和玉米秸秆,以及二者混合存在的条件下其腐解特点和对土壤性质的影响。结果发现,腐解过程中 CO₂ 释放以及秸秆腐解对土壤中碳、氮的影响来看,短时间内(32 d)玉米秸秆的腐解相对比较容易,因而 CO₂ 的累积释放,土壤碳、氮的增加效果相对较明显。所以秸秆还田时,应该依据物料的物质组成和特点实时调整化肥配比以及田间管理等相关措施,以使秸秆还田发挥较好的效果。

3.2 秸秆腐解对土壤有机碳的影响

土壤有机质(SOM)是由一大类组成和结构不均

一的碳、氮有机化合物组成,既包括了正在腐解的植物残体,也包括与土壤矿质颗粒和团聚体结合的植物残体降解产物、根系分泌物和菌丝体^[13-14]。在土壤-植物体系物质循环和利用方面有着无可替代的作用,成为人们评价土壤质量和生产力高低的关键因子。土壤有机质中所含的碳称为土壤有机碳(SOC),是有机质的主要组成部分,土壤有机碳的水平也直接反应土壤有机质的状况。土壤有机质主要来源就是生长在土壤中的植物,作物残体就成了补充土壤碳库最主要途径之一。当前,养分投入主要依赖于化肥,大量作物秸秆被丢弃或焚烧,造成农田生态系统中土壤有机碳含量在长时间尺度上的持续下降^[15]。李长生^[3]和潘根兴等^[16]的研究也表明,中国北方大部分农田土壤有机碳含量呈现负平衡,恢复农田系统土壤有机碳的平衡对于中国农业的可持续发展至关重要。本研究发现,添加作物秸秆,无论是小麦、玉米秸秆,还是二者混合,均能使土壤有机碳含量显著提高。添加秸秆腐解后,土壤截留碳和以 CO₂ 形式排放到大气中碳量基本相等。可见秸秆还田能使一大部分秸秆碳进入农田,对土壤有机碳有着重要的补充作用。邱建军等^[17]的研究表明,在其它投入既定的条件下,全国各地均存在通过提高耕地有机碳含量增加产量的潜力。当土壤有机碳含量增加 1 g/kg,东北地区玉米产量可增加 176 kg/hm²;华北地区夏玉米/冬小麦轮作产量可增加约 454 kg/hm²;西北地区春玉米产量约可增加 328 kg/hm²;中南地区单季水稻产量可增加约 185 kg/hm²;华东地区双季稻产量可增加约 266 kg/hm²;西南地区水稻/冬小麦种植产量可增加约 229 kg/hm²。从各个地区的增产率分析,土地有机质含量较低时,它的微小变动,会引起耕地生产力的较大变化,如西北地区。因此,通过秸秆还田,有望成为实现作物产量进一步提高的最佳途径之一。

如上所述,秸秆还田能够增加土壤中有机碳含量,而增加的碳主要来自于植物有机体通过光合作用而固定的 CO_2 ,所以土壤中有机碳的增加即意味着大气 CO_2 的减少。这与张凡等^[18]提出的提高作物秸秆还田率是提高陕西农田碳库储量的有效可行措施;将作物秸秆还田率从当前的 15% 提高到 50% 或 90%,使陕西农田土壤从大气 CO_2 源转变为汇的观点相吻合。 CO_2 作为温室气体最主要的成分,近年来成为国际地学界、生态学界和环境学界共同关注的全球变化研究的科学热点,一直是全球碳计划(Global Carbon Project)、PAGES 等全球变化研究核心计划的焦点内容^[19]。国际社会已经提出排放总量控制和人均排放控制的对策来限制国家和区域的温室气体(GHG)排放量^[20],而增加陆地生态系统中的碳库储量被认为是一种非常有效的 CO_2 减排措施。可见,增加土壤碳库具有重要的生态效应,土壤碳的增加可能通过缓解温室效应等方面对人类生存和生活产生重大影响。

3.3 秸秆腐解对土壤质量的影响

秸秆还田除了对土壤有机碳有重要的补充作用,改善土壤质量外,土壤中全氮也有增加的趋势。增加的氮素主要来源于植物秸秆的腐解,而秸秆中除了含有氮素以外,还含有大量的钾和其他一些作物生长必需的中微量元素,其中玉米秸秆和小麦秸秆 N、 P_2O_5 、 K_2O 养分含量分别为 0.61%, 0.21%, 2.28% 和 0.64%, 0.29%, 1.07%^[21-23]。因此,秸秆的腐解同样会释放出这些元素,作为土壤中植物营养元素补充的有效途径之一,说明作物秸秆还田是土壤养分平衡和耕地土壤持续利用的可行措施。

土壤微生物是土壤中有机质和土壤养分循环和转化的主要动力,对土壤养分供应起着重要作用^[24]。土壤微生物量对轮作、施肥等农业管理措施极为敏感,是反映土壤管理变化的活指标^[25],可以综合反映土壤的肥力和环境质量状况^[26]。土壤微生物在土壤中的作用一方面作为有机残体降解和腐殖化过程的直接参与者,从而对土壤有机碳等元素在各库之间的转移起直接作用;另一方面微生物体及其分泌物中的 N、P、S 及其它营养元素是植物可直接利用的速效养分^[27-28]。本研究显示,在秸秆还田的条件下土壤微生物量碳和氮均表现出明显的增加趋势,表明土壤中的微生物条件发生了很大改善。另外,土壤微生物量碳、氮比值(BC/BN)在 0.34~9.25 范围内,明显低于土壤 C/N 值(18.97~23.11),土壤 C/N 越大,说明有机物质越不易被矿

化,矿化速率越低,供氮能力越弱;而土壤中 BC/BN 较低,表明 BN 是植物有效氮的重要储备库和源^[29]。可见,对土壤微生物条件的改善是提高土壤肥力的又一个重要的方面。因此,秸秆还田对提高土壤生产力,实现农田土壤可持续利用有重要作用。

参考文献:

- [1] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N *et al.* Ecological linkages between aboveground and belowground biota [J]. *Science*, 2004, 304: 1629-1633.
- [2] 王立刚,邱建军,马永良,王迎春. 应用 DNDC 模型分析施肥与翻耕方式对土壤有机碳含量的长期影响[J]. *中国农业大学学报*, 2004, 9(6): 15-19.
Wang L G, Qiu J J, Ma Y L, Wang Y C. Apply DNDC model to analysis long-term effect of soil organic carbon content under different fertilization and plough mode [J]. *J. China Agric. Univ.*, 2004, 9(6): 15-19.
- [3] 李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患 - 中美农业生态系统碳循环对比研究[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(4): 345-350.
Li C S. Loss of soil carbon threatens Chinese agriculture: A comparison on agroecosystem carbon pool in China and the U.S. [J]. *Quarter. Sci.*, 2000, 20(4): 345-350.
- [4] 苏永中,赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 220-228.
Su Y Z, Zhao H L. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects [J]. *J. Desert Res.*, 2002, 22(3): 220-228.
- [5] 吴婕,朱钟麟,郑家国,姜心禄. 秸秆覆盖还田对土壤理化性质及作物产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2006, 19(2): 291-291.
Wu J, Zhu Z L, Zheng J G, Jiang X L. Influences of straw mulching treatment on soil physical and chemical properties and crop yields [J]. *Southwest China J. Agric. Sci.*, 2006, 19(2): 291-291.
- [6] 王小彬,蔡典雄,张镜清,高绪科. 旱地玉米秸秆还田对土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(4): 54-61.
Wang X B, Cai D X, Zhang J Q, Gao X K. Effects of corn stover incorporated in dry farmland on soil fertility [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2000, 33(4): 54-61.
- [7] Zhang H J, Gan Y T, Huang G B *et al.* Postharvest residual soil nutrients and yield of spring wheat under water deficit in arid northwest China [J]. *Agric. Water Manag.*, 2009, 96(6): 1045-1051.
- [8] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial C [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1987, 19: 703-707.
- [9] Jenkinson D S, Brookes P C, Powlson D S. Measuring soil microbial biomass [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2004, 36: 5-7.
- [10] Bastian F, Bouziri L, Nicolardot B, Ranjard L. Impact of wheat straw decomposition on successional patterns of soil microbial community structure [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2009, 41: 262-275.
- [11] Baumann K, Marschner P, Smernik R J, Baldock J A. Residue chemistry and microbial community structure during decomposition of eucalypt, wheat and vetch residues [J]. *Soil Biol. Biochem.*,

- 2009, 41: 1966–1975.
- [12] Davidson E A, Verchot L V, Cattanio J H *et al.* Effect of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 53–69.
- [13] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates [J]. *Adv. Soil Sci.*, 1992, 20: 2–90.
- [14] 武天云, Schoenau J J, 李凤民, 等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 717–722.
- Wu T Y, Schoenau J J, Li F M *et al.* Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter [J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2004, 15(4): 717–722.
- [15] Matson P A, Parton W J, Power A G, Swift M J. Agricultural intensification and ecosystem properties [J]. *Science*, 1997, 277: 504–509.
- [16] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家安全粮食安全[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 384–393.
- Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security [J]. *Adv. Earth Sci.*, 2005, 20(4): 384–393.
- [17] 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(1): 154–161.
- Qiu J J, Wang L G, Li H *et al.* Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2009, 42(1): 154–161.
- [18] 张凡, 李长生, 王政. 耕作措施对陕西耕作土壤碳储量的影响模拟[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 1021–1028.
- Zhang F, Li C S, Wang Z. Modeling the impacts of management alternatives on soil carbon storage of farmland in Shaanxi province [J]. *Quarter. Sci.*, 2006, 26(6): 1021–1028.
- [19] 孙成权, 曲建升. 国际地球科学发展态势[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(3): 344–347.
- Sun C Q, Qu J S. Status and trends of the international earth science studies [J]. *Adv. Earth Sci.*, 2002, 17(3): 344–347.
- [20] Morgan M G. Managing carbon from the bottom up [J]. *Science*, 2000, 289: 2285.
- [21] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 374–380.
- Li F Y, Sun X F, Feng W Q *et al.* Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2009, 15(2): 374–380.
- [22] 杨文钰, 王兰英. 作物秸秆还田的现状与展望[J]. *四川农业大学学报*, 1999, 17(2): 211–216.
- Yang W Y, Wang L Y. Present situation and prospects of returning application of crop straw [J]. *J. Sichuan Agric. Univ.*, 1999, 17(2): 211–216.
- [23] 沈裕斌, 黄相国, 王海庆. 秸秆覆盖的农田效应[J]. *干旱地区农业研究*, 1998, 16(1): 45–50.
- Shen Y H, Huang X G, Wang H Q. Field effects of straw mulching [J]. *Agric. Res. Arid Areas*, 1998, 16(1): 45–50.
- [24] Kandeler E, Tschirko D, Spiegel H. Long-term monitoring of a microbial biomass, N mineralization and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management [J]. *Biol. Fert. Soils*, 1999, 28: 343–351.
- [25] Nsabimana D, Haynes R J, Wallis F M. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use [J]. *Appl. Soil Ecol.*, 2004, 26(2): 81–92.
- [26] Spedding T A, Hamel C, Mehuis G, Madramootoo C A. Soil microbial dynamics in maize growing soil under different tillage and residue management systems [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2004, 36(3): 499–512.
- [27] Gregorich E G, Carter M R, Angers D A *et al.* Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils [J]. *Can. J. Soil Sci.*, 1994, 74: 367–385.
- [28] Gregorich E G, Carter M R, Doran J W *et al.* Biological attributes of soil quality[A]. Gregorich E G, Carter M R (eds.). *Soil quality for crop production and ecosystem health* [M]. The Netherlands: Elsevier, Amsterdam. 1997. 81–113
- [29] 李东坡, 陈利军, 武志杰, 等. 不同施肥黑土微生物量氮变化特征及相关因素[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1891–1896.
- Li D P, Chen L J, Wu Z J *et al.* Dynamics of microbial biomass N in different fertilized black soil and its related factors [J]. *Chin. Appl. Ecol.*, 2004, 15(10): 1891–1896.