

宋秋来,王峭然,王 麒,等. 玉米秸秆还田对黑土碳排放的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(13):219-222.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.13.058

# 玉米秸秆还田对黑土碳排放的影响

宋秋来<sup>1,3</sup>, 王峭然<sup>2</sup>, 王 麒<sup>3</sup>, 冯延江<sup>3</sup>, 孙 羽<sup>3</sup>, 曾宪楠<sup>3</sup>, 来永才<sup>1,3</sup>

(1. 黑龙江省农业科学院博士后科研工作站,黑龙江哈尔滨 150086;2. 黑龙江农垦勘测设计研究院,黑龙江哈尔滨 150090;  
3. 黑龙江省农业科学院耕作栽培研究所,黑龙江哈尔滨 150086)

**摘要:**采用静态箱法测定不同秸秆还田方式、耕作措施下东北春玉米生长季土壤 CO<sub>2</sub> 排放。结果表明,种植玉米的黑土 CO<sub>2</sub> 排放通量日变化呈单峰曲线,最大值出现在 14:00,最低值出现 02:00—06:00;秸秆还田处理 CO<sub>2</sub> 排放通量日变化较不还田处理波动大。玉米生育期土壤 CO<sub>2</sub> 排放量呈显著的季节变化:春季玉米播种期及秋季玉米收获期土壤 CO<sub>2</sub> 通量低,排放峰值出现在温度、降水量较高的 7 月末,秸秆还田处理的 CO<sub>2</sub> 排放峰值高于相应不还田处理。土壤 CO<sub>2</sub> 排放总量受秸秆还田和耕作措施影响显著,免耕秸秆还田、翻耕秸秆还田、翻耕、免耕等 4 个处理的总排放量分别为 9.41、8.91、7.33、6.43 t/hm<sup>2</sup>,免耕排放总量最小;秸秆还田处理 CO<sub>2</sub> 排放总量较相应的不还田处理多排放 1.59~2.98 t/hm<sup>2</sup>;但若将不还田处理秸秆焚烧,其 CO<sub>2</sub> 排放总量达到 17.78~19.48 t/hm<sup>2</sup>,是秸秆还田的 2 倍左右。秸秆还田能够有效减缓因秸秆焚烧而增加的 CO<sub>2</sub> 释放量,且对玉米产量无显著影响。

**关键词:**玉米;秸秆还田;土壤;CO<sub>2</sub>;排放

**中图分类号:** S141.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)13-0219-03

农田土壤是大气 CO<sub>2</sub> 的重要排放源,农田向大气中释放的 CO<sub>2</sub> 主要来自土壤的呼吸,土壤呼吸释放出的 CO<sub>2</sub> 分子是土壤及凋落物产生的。秸秆不还田时,往往是将秸秆焚烧使秸秆中的碳全部排放到大气中,增加温室效应;而秸秆还田后,经过腐解的秸秆形成腐殖质,进入到土壤中,滞留了秸秆中碳的排放,减缓了温室效应。黑龙江省是我国重要的商品粮基地,在保障国家粮食安全上发挥着重大作用。其旱作农田以玉米种植为主,2014 年种植面积达到 664.2 万 hm<sup>2</sup>,占黑龙江省农作物播种面积的 45%,占全国玉米播种面积的 18%<sup>[1-2]</sup>。随着玉米单产大幅度提高,相应的秸秆产量也迅速增加,由于秸秆利用技术相对滞后,玉米秸秆处置不合理带来了众多的生态环境问题。因此,有效处理玉米秸秆已成为当务之急,而秸秆还田是秸秆诸多利用方式中最为直接有效的。目前,关于秸秆还田对黑土农田理化性状及作物生产力的影响虽已有不少研究,但在我国东北寒冷气候条件下,玉米秸秆还田方式对有机质含量相对较高的黑土碳排放的影响,尚缺乏系统的研究。本试验从不同秸秆还田方式对土壤碳排放的影响展开研究,以阐明玉米秸秆还田的减排机制,为

东北黑土区制订合理的秸秆还田模式提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验地概况

本研究于 2015 年在黑龙江省哈尔滨市国家现代农业示范区进行,示范区位于松嫩平原中部哈尔滨市道外区民主乡,所辖区域地理坐标为 126°50'E、45°50'N。示范区属于寒温带大陆性气候,四季变化明显,春季多风少雨,夏季温热多雨,秋季较短,冬季寒冷干燥,年均气温 3.6℃,无霜期 135 d,≥10℃ 积温 2 780℃,年均降水量 500 mm。该区域为一年一熟制,旱作农田主要种植模式为玉米连作,土壤类型为黑土,土壤基础肥力有机质含量 37.8 g/kg,有效氮含量 140 mg/kg,有效磷含量 72.6 mg/kg,速效钾含量 206 mg/kg,pH 值 7.09。

### 1.2 试验设计

在玉米连作模式下设置翻耕秸秆还田、翻耕、免耕秸秆还田、免耕 4 个处理,采用大区试验,每个处理面积 0.067 hm<sup>2</sup>,处理内重复 4 次。翻耕秸秆还田(CTS):玉米收获后,秋季翻耕,将秸秆切成 10~15 cm 段与根茬一同翻入农田 25~30 cm 处,起垄越冬,春季垄上播种;免耕秸秆还田(NTS):玉米收获后,将玉米秸秆切成 10~15 cm 段,均匀覆盖还田越冬,春季原垄播种。2 个还田处理玉米秸秆还田量均为 9 t/hm<sup>2</sup>;翻耕(CT):玉米收获后,秸秆移除农田,秋季翻耕,将根茬翻入农田 25~30 cm 处,起垄越冬,春季垄上播种;免耕(NT):玉米收获后,秸秆移除农田,春季原垄播种。试验用玉米品种均为先玉 335,5 月 4 日播种,10 月 3 日收获,4 个处理水肥等管理措施相同。

### 1.3 土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的测定

土壤 CO<sub>2</sub> 排放试验季节变化测定于 2015 年玉米生育期

收稿日期:2017-01-16

基金项目:国家自然科学基金(编号:31540039);公益性行业(农业)科研专项(编号:201303126-1);黑龙江省政府博士后经费项目(编号:LBH-Z151196);黑龙江省哈尔滨市科技创新人才(编号:2016RAQYJ048);黑龙江省农科院博士科研启动金项目(编号:201507-10)。

作者简介:宋秋来(1985—),男,黑龙江勃利人,博士,助理研究员,从事农田温室气体排放研究。Tel:(0451) 86632234;E-mail:sql142913@163.com。

通信作者:来永才,研究员,从事耕作栽培研究。Tel:(0451) 86632234;E-mail:yame451@163.com。

进行,取样间隔期为 10~15 d,选择晴天 09:00—11:00 进行样品采集。土壤 CO<sub>2</sub> 排放试验的日变化测定从 06:00 开始,每 4 h 测定 1 次,至第 2 天 06:00 结束,完成 1 次日变化测定,1 次采样完成后,从基座上取下采样箱,直到下一次采样时再将采样箱重新安置在基座上,这样可以降低密闭气室长期覆盖在采样区上而对小环境造成的影响,尤其是对箱内温度和气体背景浓度的影响。本试验进行了 2 次土壤 CO<sub>2</sub> 排放的日变化监测,分别为 2015 年 7 月 24 日和 9 月 1 日。收集的气体样品采用红外线气体分析仪测定样品中 CO<sub>2</sub> 含量。

试验的采样箱为有机玻璃箱体,箱体长 40 cm、宽 30 cm、高 50 cm,箱体一侧距顶部 25 cm 处设置三通阀采气孔,用于连通三通阀便于收集气体。采样箱内置风扇,用于采样时混匀箱内气体。底座为不锈钢材料,插入两垄中间,入土 5 cm,作物整个生长季节不再移动。底座上有盛水凹槽(水封槽),采样时将凹槽灌满水,利用水封原理隔绝室内外气体交换。每次采样时将采样箱置于底座后,开始取气并记录时间为 0 min,在 15、30 min 后再分别采集 1 次气体样品,用 100 mL 玻璃注射器将箱内气体转移到铝箔采样袋中,将采样袋带回实验室测定。

1.4 玉米生育期间土壤 CO<sub>2</sub> 排放量的估算

在知道 CO<sub>2</sub> 气体排放的时间和空间规律的前提下,由以下公式计算农田生态系统在生长季的 CO<sub>2</sub> 气体排放总量:

$$S = \int_1^0 58F(x_i)dx_i。$$

式中:S 为 CO<sub>2</sub> 气体的排放总量,i 取 1~4 时分别代表 4 个处理;F(x<sub>i</sub>)为 CO<sub>2</sub> 气体通量函数,由各处理 CO<sub>2</sub> 气体在各地点的通量与采样时间回归拟合而来,用于总量估算的方程及参数见表 1。

表 1 模拟方程及参数		
处理	回归方程	拟合度
翻耕(CT)	$y = -0.044\ 4x^2 + 6.866\ 3x + 28.219$	0.719
翻耕秸秆还田(CTS)	$y = -0.054\ 2x^2 + 8.505\ 2x + 14.214$	0.724
免耕(NT)	$y = -0.032\ 3x^2 + 4.973\ 4x + 45.247$	0.565
免耕秸秆还田(NTS)	$y = -0.059\ 3x^2 + 9.178\ 1x + 16.638$	0.792

注:y 表示土壤 CO<sub>2</sub> 排放模拟通量;x 表示玉米生长时间,d。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式对土壤 CO<sub>2</sub> 排放日变化的影响

图 1 为夏季(2015 年 7 月 24 日)土壤 CO<sub>2</sub> 日变化趋势。CO<sub>2</sub> 排放通量最大值均出现在 14:00,此时温度也最高;CO<sub>2</sub> 排放通量的最低值出现在 06:00 左右,此时间段温度较低。免耕秸秆还田(NTS)和翻耕秸秆还田(CTS)处理 CO<sub>2</sub> 排放通量的日变化波动最大,而相应的不还田免耕(NT)处理波动最小。CO<sub>2</sub> 排放的最大通量、最小通量也都表现为免耕秸秆还田(NTS)和翻耕秸秆还田(CTS)高于相应的不还田处理。

图 2 为夏末(2015 年 9 月 1 日)CO<sub>2</sub> 排放的日变化趋势,其全天所有时间段 CO<sub>2</sub> 浓度均低于 7 月 24 日。全天的变化趋势呈抛物线状,最高值出现在 14:00,与温度最高值出现时间相同,而最低值出现 02:00 左右,此时气温也最低,18:00 之后 CO<sub>2</sub> 浓度变化趋于平缓。CO<sub>2</sub> 排放的最大通量、最小通

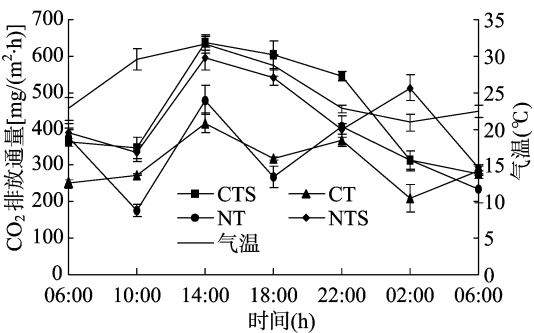


图1 土壤 CO<sub>2</sub> 排放日变化(2015年7月24日)

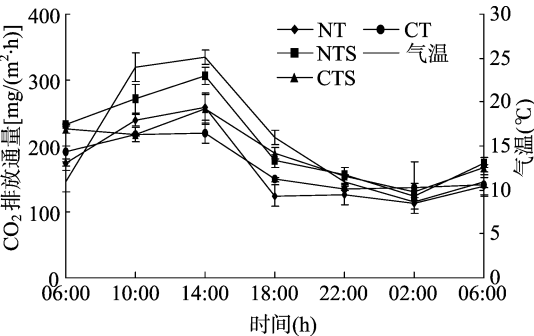


图2 CO<sub>2</sub>排放日变化(2015年9月1日)

量也表现为免耕秸秆还田(NTS)和翻耕秸秆还田(CTS)高于相应的不还田处理,在温度较高的白天,这种规律更为明显。

2.2 不同秸秆还田方式对土壤 CO<sub>2</sub> 排放季节变化动态的影响

土壤 CO<sub>2</sub> 排放季节变化如图 3 所示,春、夏、秋 3 个季节各处理 CO<sub>2</sub> 排放通量均出现先升高后降低的规律,在玉米播种期和成熟期 CO<sub>2</sub> 排放通量均较低。在苗期,随着玉米的生长,各处理的 CO<sub>2</sub> 排放通量均有较大幅度增加,在 7 月下旬玉米拔节至抽雄期,各处理均出现排放高峰,此时各处理温度也较高;秸秆还田(NTS、CTS)处理的 CO<sub>2</sub> 排放通量峰值明显高于 2 个不还田处理;之后,各处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量开始下降,但秸秆还田(NTS、CTS)较不还田处理下降缓慢。免耕、翻耕、免耕秸秆还田、翻耕秸秆还田各处理 CO<sub>2</sub> 平均排放通量分别为 164、186、239、228 mg/(m<sup>2</sup>·h),CO<sub>2</sub> 排放通量大小依次为 NTS>CTS>CT>NT,可见免耕秸秆还田(NTS)与其相应的不还田处理(NT)相差较大,2 个秸秆还田处理相差较小,免耕处理则低于翻耕处理,说明在秸秆不还田的条件下,减少对土壤的扰动能够适当减少 CO<sub>2</sub> 排放。

2.3 玉米生育期间土壤 CO<sub>2</sub> 排放量

表 2 显示,玉米生育期间,免耕(NT)处理 CO<sub>2</sub> 排放总量最小,可见免耕措施有利于土壤 CO<sub>2</sub> 的减排。而秸秆还田处理(NTS、CTS)显著大于不还田处理(NT、CT),免耕秸秆还田处理生育期 CO<sub>2</sub> 排放总量较免耕处理多 2.98 t/hm<sup>2</sup>,排放量增加了 46.35%;而翻耕还田处理仅较翻耕处理多排放 1.58 t/hm<sup>2</sup>,排放量增加了 21.56%,可见在一定条件下,秸秆还田增加了土壤碳排放。从表 2 还可见,翻耕处理产量略高于免耕,但未达到显著水平;秸秆还田处理与相应不还田处理产量相对差异也不显著。

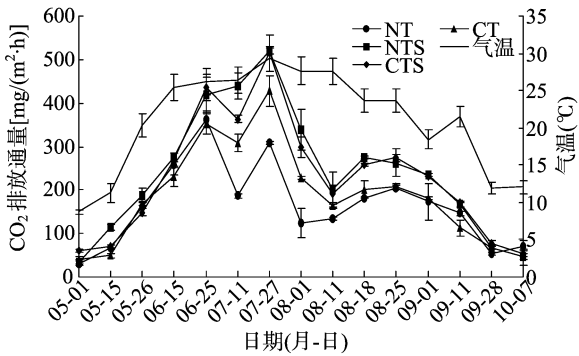


图3 土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的季节变化

表 2 各处理 CO<sub>2</sub> 排放总量与产量变化

处理	CO <sub>2</sub> 排放总量 (t/hm <sup>2</sup> )	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )
翻耕 (CT)	7.33 ± 0.24b	11 311 ± 533a
翻耕秸秆还田 (CTS)	8.91 ± 0.36a	11 215 ± 1 727a
免耕 (NT)	6.43 ± 0.41b	10 057 ± 278a
免耕秸秆还田 (NTS)	9.41 ± 0.28a	10 463 ± 757a

3 讨论

有研究指出,农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量通常是随着土壤温度的升高而增加,一天中在中午至下午时段达到高峰,之后随着温度的降低排放量也逐渐减少<sup>[3]</sup>。对于不同农田系统,土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的日变化规律也受温度、水分含量和季节等因素的影响,周志田等研究认为,白天的土壤呼吸速率均高于夜间<sup>[4]</sup>;董立国等认为,小麦田土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量日变化呈单峰曲线,于 13:00—14:00 出现日最高排放值,夜间排放值最低<sup>[5-6]</sup>;而王丙文等认为,在小麦整个生育期,土壤呼吸速率日变化于 18:00 达到最高值,04:00 达到最低值<sup>[7]</sup>。本研究在不同耕作措施及秸秆还田条件下,农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量日变化规律均表现为单峰曲线,峰值出现在温度较高的 14:00,CO<sub>2</sub> 排放通量的最低值基本都出现在 06:00 左右,此时温度也较低。通过盛夏(7 月 24 日)和夏末(9 月 1 日)2 天的日排放通量比较可知,夏季排放量高于秋季,说明较高的温度促进了 CO<sub>2</sub> 的排放。刘博等对不同耕作条件下黄土高原春小麦成熟期农田 CO<sub>2</sub> 排放通量日变化进行研究,结果显示,春小麦成熟期 CO<sub>2</sub> 排放通量表现为常规耕作 > 免耕<sup>[6]</sup>。本研究结果表明,免耕秸秆还田 (NTS) 和翻耕秸秆还田 (CTS) 处理 CO<sub>2</sub> 排放通量的日变化波动最大,而相应的不还田免耕 (NT) 处理波动最小。CO<sub>2</sub> 排放的最大通量、最小通量也都表现为免耕秸秆还田 (NTS) 和翻耕秸秆还田 (CTS) 高于相应的不还田处理,说明秸秆的还田促进了土壤 CO<sub>2</sub> 的排放。

在各项研究中都观察到土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的季节变化,李成芳等在秸秆还田对免耕稻田温室气体排放研究中发现,温室气体排放通量呈季节性变化,主要是因为土壤有机质含量高,适合土壤微生物的繁殖,使得秸秆降解和土壤碳矿化作用增强,因此土壤 CO<sub>2</sub> 排放逐渐加强<sup>[8]</sup>。秦越等在不同耕作措施下秸秆还田土壤 CO<sub>2</sub> 排放的动态变化研究中发现,小麦生育期内各处理 CO<sub>2</sub> 排放通量受温度影响明显,且季节变化趋势显著,具体表现为从出苗后到越冬前的一段时间内呈下降趋势,返青后开始增加,到开花期达到高峰,其后开始下

降<sup>[9]</sup>。在这种季节变化特征中,夏季土壤呼吸最多,春秋季节次之,冬季最少。多数研究认为,土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量呈季节变化单峰曲线,但峰值出现时间有所不同,戴万宏等认为土壤 CO<sub>2</sub> 排放的季节变化峰值多出现在温度与降水量均较高的 7 月,而也有部分研究认为夏玉米农田土壤呼吸速率在 8 月(盛夏—秋初期间)出现最大值<sup>[10-13]</sup>。本研究结果表明,农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量呈单峰曲线,有明显的季节性,各处理均表现为先升高后降低的规律,在玉米播种期和成熟期 CO<sub>2</sub> 排放通量较低,在温度较高条件下,各处理达到峰值,其中秸秆还田 (NTS、CTS) 的排放通量峰值明显高于 2 个不还田处理。

本研究以连作玉米农田为试验土壤,在相同耕作措施下,2 个秸秆不还田处理的土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量和总量均显著低于相应的还田处理。免耕秸秆还田处理生育期 CO<sub>2</sub> 排放总量较免耕处理多 2.98 t/hm<sup>2</sup>,排放量增加了 46.35%;而翻耕还田处理仅较翻耕不还田处理多排放 1.58 t/hm<sup>2</sup>,排放量增加了 21.56%。虽然秸秆还田在一定程度增加了土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量,而相对于秸秆焚烧排放释放的 CO<sub>2</sub> 通量却少了很多,根据已有研究对我国玉米秸秆焚烧后的 CO<sub>2</sub> 焚烧因子测定结果(1 261.5 ~ 1 350 g/kg)<sup>[14-16]</sup>,假设本研究中不还田处理的玉米秸秆(9 t/hm<sup>2</sup>)全部焚烧,会产生 CO<sub>2</sub> 170.25 ~ 182.25 t/hm<sup>2</sup>,加上不还田处理土壤排放的 CO<sub>2</sub>,免耕处理的 CO<sub>2</sub> 释放总量将达到 266.70 ~ 278.70 t/hm<sup>2</sup>,而翻耕更将达到 280.20 ~ 292.20 t/hm<sup>2</sup>,是相应秸秆还田处理的 2 倍左右。可见,秸秆还田能够有效减缓因秸秆焚烧而增加的 CO<sub>2</sub> 释放量。

4 结论

连作玉米的黑土 CO<sub>2</sub> 排放通量日变化呈单峰曲线,随着温度上升而增加,排放通量最大值出现在 14:00,最低值出现 02:00—06:00。秸秆还田 (NTS、CTS) 处理 CO<sub>2</sub> 排放通量日变化较不还田处理波动大;CO<sub>2</sub> 排放通量的日变化最大值、最小值也均表现为秸秆还田 (NTS、CTS) 高于不还田处理,说明秸秆还田促进了土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量。玉米生育期间土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量呈显著的季节变化,春季玉米播种期及秋季玉米收获土壤 CO<sub>2</sub> 通量低,7 月末各处理排放通量达到最大,秸秆还田处理的 CO<sub>2</sub> 排放最大值高于相应不还田处理。玉米生育期间,土壤 CO<sub>2</sub> 排放总量同时受秸秆还田和耕作措施的显著影响,免耕还田、翻耕还田、免耕、翻耕 4 个处理的总排放量分别为 9.41、8.91、6.43、7.33 t/hm<sup>2</sup>;秸秆还田处理 CO<sub>2</sub> 排放总量较相应的不还田处理多排放 1.59 ~ 2.98 t/hm<sup>2</sup>;但若将不还田处理秸秆焚烧,其 CO<sub>2</sub> 排放总量达到 266.70 ~ 278.70 t/hm<sup>2</sup>,是秸秆还田处理的 2 倍左右。可见,秸秆还田能够有效减缓因秸秆焚烧而增加的 CO<sub>2</sub> 释放量,且秸秆还田不影响玉米产量。

参考文献:

[1] 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴(2015)[M]. 北京:中国统计出版社,2015:323.  
[2] 中国农业统计年鉴(2015)[M]. 北京:中国农业出版社,2016:207.

黄曼曼, 乔 帅, 王梦姣, 等. 香菇胞外多糖高产菌株的紫外诱变选育[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(13): 222–225.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.13.059

# 香菇胞外多糖高产菌株的紫外诱变选育

黄曼曼<sup>1</sup>, 乔 帅<sup>1</sup>, 王梦姣<sup>1,2,3</sup>, 邓百万<sup>1,2</sup>, 陈文强<sup>1,2</sup>

(1. 陕西理工大学生物科学与工程学院, 陕西汉中 723000; 2. 陕西省资源生物重点实验室, 陕西汉中 723000;

3. 陕西省食药菌工程技术研究中心, 陕西汉中 723000)

**摘要:**以香菇 808# 为出发菌, 采用紫外辐射诱变处理其孢子, 通过拮抗试验, 筛选出与亲本菌株有较明显拮抗线的诱变菌株, 并测定其香菇胞外多糖含量。结果表明, 通过筛选, 获得 20 个诱变菌株产胞外多糖高于亲本菌株, 其中诱变菌株 YBS21 的胞外多糖含量相对较高, 为 1.34 g/L, 比亲本菌株高 42.6%; 经 10 代培养, 菌株 YBS21 的胞外多糖含量为 1.33 g/L, 高产胞外多糖遗传性状较为稳定。

**关键词:**香菇; 紫外诱变; 拮抗; 胞外多糖; 菌株 YBS21

**中图分类号:** S182 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)13-0222-04

香菇 (*Lentinus edodes*) 别称花菇、香菌、中国蘑菇, 真菌分类中属层菌纲担子菌亚纲伞菌目口蘑科香菇属<sup>[1]</sup>。我国是香菇的原生地及优产区, 主产于河南、山东、福建、浙江等省。香菇不仅香味独特、味道鲜美, 且具有抗菌抗病毒、防治肿瘤、增强人体免疫力、降血脂等多种药用价值<sup>[2]</sup>。香菇的主要成分为香菇多糖, 而从香菇子实体中直接提取香菇多糖的生产周期相对较长、成本较高。菌种选育常用方法有紫外诱变、化学诱变、原生质体融合、代谢工程育种等。紫外诱变是一种传统而经典的微生物菌种选育技术, 对原生质体紫外诱变有较

多研究且成果丰硕, 而直接对孢子进行紫外诱变的相关研究较少。本试验采用紫外辐射对香菇孢子进行诱变处理, 通过拮抗试验对诱变菌株进行初步鉴定, 对产生拮抗线较明显的诱变菌株测定胞外多糖, 以筛选出胞外多糖高产的诱变菌株。在此基础上, 利用香菇营养菌丝液体发酵生产香菇多糖, 不仅生产效率得到提高, 而且生产成本有明显降低。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1.1.1 供试菌株 香菇 808#, 由陕西省食药菌工程技术研究中心提供。

1.1.2 培养基的配制 综合马铃薯葡萄糖琼脂培养基 (CPDA 综合培养基): 去皮马铃薯 200.0 g, 葡萄糖 20.0 g,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  5.0 g,  $\text{MgSO}_4$  3.0 g, 蛋白胨 5.0 g, 维生素  $\text{B}_1$ 、维生素  $\text{B}_2$  各 10.0 mg, 琼脂 15.0 g, pH 值自然, 加水定容至

收稿日期: 2016-12-19

基金项目: 陕西省科技创新工程项目 (编号: 2016HBGC-07)。

作者简介: 黄曼曼 (1991—), 女, 宁夏银川人, 硕士研究生, 从事微生物资源保育研究。E-mail: 765447467@qq.com。

通信作者: 邓百万 (1963—), 男, 陕西眉县人, 教授, 主要从事微生物资源保护与开发利用研究。E-mail: 2210309868@qq.com。

[3] Yi Q L, Zhou X H. 土壤呼吸与环境 [M]. 姜丽芬, 曲来叶, 周玉梅, 等译. 北京: 高等教育出版社, 2007: 31–32.

[4] 周志田, 成升魁, 刘允芬, 等. 中国亚热带红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤  $\text{CO}_2$  排放规律初探 [J]. 资源科学, 2002, 24(2): 83–87.

[5] 董立国, 许 浩, 张源润, 等. 宁夏黄土丘陵区冬小麦农田土壤呼吸特征及影响因素分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 75–80.

[6] 刘 博, 黄高宝, 高亚琴, 等. 免耕对旱地春小麦成熟期  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放日变化的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(1): 82–87.

[7] 王丙文, 迟淑筠, 田慎重, 等. 不同玉米秸秆还田方式对冬小麦田土壤呼吸的影响 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1374–1380.

[8] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2362–2367.

[9] 秦 越, 李彬彬, 武兰芳. 不同耕作措施下秸秆还田土壤  $\text{CO}_2$  排放与溶解性有机碳的动态变化及其关系 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7): 1442–1449.

[10] 戴万宏, 刘 军, 王益权, 等. 不同培肥措施下土壤  $\text{CO}_2$  释放及其动力学研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 292–297.

[11] 高 婕, 李 倩, 刘景辉, 等. 免耕留茬对内蒙古后山地区油菜田土壤呼吸和水热变化的影响 [J]. 作物杂志, 2012(3): 81–85.

[12] 何向南, 黄高宝, 黄 鹏. 秸秆还田及施肥对小麦复种油菜农田土壤呼吸的影响 [J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 1003–1008.

[13] 严俊霞, 李洪建, 尤龙凤. 玉米农田土壤呼吸与环境因子的关系研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 183–189.

[14] Zhang H F, Ye X N, Cheng T, et al. A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: emission factor and emission inventory [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 8432–8441.

[15] Li X H, Wang S X, Duan L, et al. Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn stover in China [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(17): 6052–6058.

[16] 彭立群, 张 强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单 [J]. 环境科学研究, 2016, 29(8): 1109–1118.