

添加水稻秸秆对油菜(*Brassica napus* L.)幼苗生长的影响

余常兵¹, 胡 威², 吕驰驰², 柯奇画², 李银水¹, 庞 静^{2*}

(1.中国农业科学院油料作物研究所, 农业部油料作物生物学与遗传育种重点实验室, 湖北 武汉 430062; 2.生物资源绿色转化湖北省协同创新中心, 湖北大学资源环境学院, 湖北 武汉 430062)

摘 要:近几年,水稻秸秆直接还田对油菜幼苗生长的负效应受到关注。有许多研究在水稻残体或腐解物中检测出了酚酸等被广泛证实具有化感作用的物质,因此在水稻秸秆产生的负效应中,化感抑制作用不容忽视。本研究以酚酸为目标化感物质,以湖北省油菜主栽品种“中双11号”为受体,采用4种采自典型稻油轮作系统中的土壤进行盆栽试验,研究水稻秸秆对油菜幼苗生长的影响。结果表明:(1)整体看来,添加秸秆对油菜幼苗总生物量的主效应在进贤土为正,在汉川土为负,在阳逻和麻城土为无明显影响;(2)功能叶片光合色素含量在全部土壤下的显著降低均出现在播种后33 d之内,与水稻秸秆腐解速率最大值的出现与存在时间上的重叠。秸秆处理对油菜幼苗的负效应在早期强于后期;(3)土壤水溶态酚酸含量为3.3~49.0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ soil。添加秸秆虽导致土壤中水溶态酚酸浓度增加,但其明显增加主要发生在试验后期,且增量与幼苗生物量化感效应指数呈正相关关系。因此酚酸含量的变化不能解释水稻秸秆的负效应,为揭示秸秆处理的负效应机制,需要转换目标化感物质。

关键词:水稻秸秆;腐解;油菜幼苗;化感作用;酚酸

中图分类号:X71

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2016)03-0253-09

doi: 10.13254/j.jare.2015.0208

引用格式:

余常兵, 胡 威, 吕驰驰, 等. 添加水稻秸秆对油菜(*Brassica napus* L.)幼苗生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3): 253-261.

YU Chang-bing, HU Wei, LÜ Chi-chi, et al. Allelopathic Effect of Rice Straw on Rape(*Brassica napus* L.) Seedlings[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(3): 253-261.

Allelopathic Effect of Rice Straw on Rape(*Brassica napus* L.) Seedlings

YU Chang-bing¹, HU Wei², LÜ Chi-chi², KE Qi-hua², LI Yin-shui¹, PANG Jing^{2*}

(1.Oil Crops Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Biology & Genetic Improvement of Oil Crops, Ministry of Agriculture, Wuhan 430062, China; 2.Hubei Collaborative Innovation Center for Green Transformation of Bio-Resources, Academy of Resource and Environment, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: In recent years, negative effects of rice straw on rape(*Brassica napus* L.) were verified in rice-rape(*Brassica napus* L.) rotation system in Yangtze River Basin in China. Allelopathic effect could contribute to the negative effects, as soluble phenolic compounds were frequently identified in decomposing rice straw. To gain a better understanding, seedlings of rape cultivar Zhongshuang 11 were treated with and without rice straw in 4 typical soils sampled from rice-rape rotation system. Our results were as follows: (1) Across the whole experiment period, rice straw treatment showed marked positive and negative main effect in Jinxian soil and Hanchuan soil, respectively, while showed no effect in the other two soils; (2) Significant decrease in photosynthetic pigment contents of functional leaves were observed in all the soils from 20 d to 33 d after sowing. The peak decomposition rates of rice straw were also verified during this period. (3) Total phenolic acid contents ranged 3.3~49.0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ soil in this study. Significant increases in total phenolic acid content of soil extractions were observed in later stages. The marked($P<0.01$) positive correlation between the increases and *RI*(allelopathic response index) of total biomass suggested positive effect of the phenolic acids on biomass accumulation. Thus, dynamic changes of water soluble phenolic acids were not valid to illuminate the mechanism of negative effect of rice straw on rape seedlings. Allelochemicals other than phenolic acids should be included in further studies on this issue.

Keywords: rice straw; decomposition; rape seedling; allelopathic effect; phenolic acids

收稿日期:2015-08-19

基金项目:国家自然科学基金(NSFC31200336);农业部油料作物生物学重点开放实验室开放基金(2014003);湖北省教育厅自然科学基金项目(Q20101005);湖北省大学生创新训练项目(201310512046)

作者简介:余常兵(1976—),男,湖北汉川人,博士,助理研究员,主要从事油料作物营养与农田生态研究。E-mail: cbyu123@163.com

* 通信作者:庞 静 E-mail: pangjing2286@126.com

秸秆还田是我国农业可持续发展的有效途径之一,对维持土壤养分平衡起着积极作用^[1],且随着农业机械化程度的提高,秸秆直接还田越来越普遍。以水稻-油菜轮作这种长江中下游地区最普遍的轮作模式为例,稻草还田利于保温保墒,减缓冬油菜的干旱和低温伤害;加之近年来水稻收获机械化程度不断提高,为进一步推广水稻秸秆还田技术提供了有利条件。但由于缺乏对水稻秸秆直接还田负面影响的系统研究,实际生产中下茬作物——油菜出苗不齐、幼苗生长受抑制的问题尚未得到妥善解决^[2-4]。

秸秆直接还田引起的负效应中,化感作用不容忽视^[5-6]。植物化感作用指由植物活体或腐解的植物组织/残体释出某些有机物质,从而对环境其他植物个体产生直接或间接的正、负效应^[5]。还田秸秆腐解是化感物质进入农业生态系统的重要途径。从植物材料提取液或腐解液中检测出被证实具有化感作用的物质,包括酚酸、酯、醇、萜、有机酸、挥发性化合物等^[5,7]。其中木质素降解产生的单体酚酸类化合物(以下称酚酸)的化感效应得到了广泛证实^[5,8]。根据前人的研究,酚酸在自然生态系统中广泛存在,对植物的影响有“低促高抑”的特点;高浓度的酚酸可导致植物根系细胞膜损伤^[5]、活性氧爆发^[8]等初级反应,进一步导致根系的水分、养分吸收能力下降等次级反应,并最终引发脱落酸含量上升、次级根增加、光合与呼吸作用下降等再次级反应^[5-7]。然而,即便如此,在秸秆直接还田的化感效应中酚酸是否起着实质性的关键作用尚存争议。有研究表明麦秸还田导致大田 0~20 cm 层次土壤中酚酸类物质的含量增加,夏玉米幼苗根系的生长受到明显抑制^[9]。García-Sánchez 等^[8]报道提炼橄榄油后的残渣的水提取液导致番茄幼苗体内活性氧爆发,酚酸是其重要原因。也有相反的报道,如吴萼等^[10]证明小麦植物材料还田 3~13 周内表层土壤中有效酚酸含量为每克土 0.030~0.143 μmol 之间,并未能产生实际伤害。Blum 等^[9]系统地研究了小麦、黑麦草、三叶草等覆盖作物对土壤中酚酸类物质浓度的影响及其对几种杂草的化感作用,也未发现酚酸浓度的动态变化与杂草抑制率间存在显著相关关系。

水稻残体的化感作用已有广泛报道。前人研究表明,水稻的自毒作用与稻草腐解产生的以酚酸为主的化感物质有关^[11];Jung 等^[12]包含 114 个水稻品种的研究证明水稻植物残体对稗草的化感抑制是一个普遍的现象。朱林等^[13]报道稻草酚酸总含量达 95.6 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,在好气湿润条件下稻草腐解 50 d 酚酸总释出量为

49.9 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,其中光合毒性较强的肉桂酸衍生物可达 85%~90%。Chung 等^[14]在水稻叶、稻草、腐解稻草和稻田土中均检测出了 p-羟基苯甲酸、阿魏酸、p-香豆酸、丁香酸、水杨酸等酚酸物质的存在。基于此,本研究以 4 个长江中下游典型稻-油轮作区土壤为基质,以油菜为受体材料,依据实际生产中的秸秆还田量进行盆栽试验,研究添加水稻秸秆对油菜幼苗生长的影响,目的是从秸秆腐解-土壤水溶态酚酸含量变化-油菜幼苗生长抑制间的相关关系探究其作用机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤均于水稻季结束后采于稻/油轮作种植模式的农田中,其中取自江西进贤的土壤为红壤,取自湖北麻城、汉川和阳逻的土壤均为潮土。土壤风干并过 20 目筛取待用。取样地点和理化性状见表 1。水稻秸秆由湖北省农业科学院粮食作物研究所提供,风干并剪碎成 1 cm 左右小段备用。油菜品种为“中双 11 号”,由中国农业科学院油料作物研究所提供。

表 1 供试土壤理化性状

Table 1 Physicochemical properties of four soils used in this experiment

取样地点	pH 值	有机质含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效钾含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
湖北麻城	5.51	23.10	77.1	8.2	80.1
江西进贤	5.12	31.76	118.7	23.5	131.3
湖北汉川	7.90	12.50	45.6	117.5	218.6
湖北阳逻	8.08	15.86	52.6	10.3	210.1

1.2 试验处理

对 4 个供试土壤,设对照 CK(不加秸秆)和添加秸秆处理 T(根据大田生产中实际还田量添加秸秆 0.65 $\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 风干土,约相当于 9.75 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)两个秸秆水平,共 40 组,每组 3 次重复。于 2013 年 3 月 10 日,称取 1 g 秸秆与 150 g 风干土混匀,装入盆钵(直径 7.5 cm,高 9 cm),加水 50 mL,每盆均匀播入已经室温催芽 48 h 发芽一致的油菜种子 6 粒。所有盆钵均置于室外正常光照条件下培养,盆钵每 2 d 用称重法加水到播种时的初始重量,每次加水后调换盆钵位置以减小环境因子的影响。每 6 d 灌施 50 mL Hogland 全营养液。播种后 11 d,子叶全展;播种后 18 d,第一片真叶初现,此时间苗,每盆留长势中等均匀一致的 3 株幼苗。

1.3 分析方法

自真叶初现至现蕾期,每隔约 13 d,对全部供试土壤随机取对照和添加秸秆处理各一组进行植物和土壤样品破坏性取样。首先,每个盆中所有叶片沿着主脉在叶尖一侧剪取 2 mm×3 mm 的叶片,称重后投入加有 5 mL 95%乙醇的比色管内,盖紧管塞,用黑色塑料袋包裹,放入冰箱中静置至叶片变为白色,用分光光度法测定叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量。然后,收获植物地上部,称取鲜重。最后,将盆钵中的土转入装有 100 mL 去离子水的三角瓶中,上下抖动洗出根系,再用 25 mL 去离子水冲洗根系 2 次并将水混入三角瓶,洗净根系、擦干、称取鲜重。T 处理组盆钵用镊子仔细挑出秸秆处理组秸秆,水洗净以后置于烘箱内 80 ℃烘干至恒重,称量并记录。

土壤水提取液的获取及其中酚酸含量的测定参照 Blum 等^[5]的方法。将上文中洗出根系后的三角瓶加棉花塞,放入高压灭菌锅,1.2 kg·cm⁻²,121 ℃灭菌 45 min,拿出冷却至室温,8 000 r·min⁻¹ 离心 15 min,取上清液,用 pH 计测定上清液 pH 值,然后用 1 mol·L⁻¹ 的盐酸将离心上清液调至 pH 2.2,8 000 r·min⁻¹ 离心 15 min,1 mol·L⁻¹ 氢氧化钠溶液调离心上清液至 pH 7.0。用福林酚试剂-分光光度法测定土壤水提取液中酚酸含量。土壤水提取液中氮含量用碱解扩散法测定,玻璃扩散皿内室加 2 mL 硼酸指示剂混合液,吸取水提取液 10 mL 于扩散皿外室,加 2 g 硫酸亚铁粉,盖上毛玻璃盖并留出一条狭缝,用移液管加 2 mL 40% 氢氧化钠于外室中,迅速将毛玻璃盖严使其不漏气,平放扩散皿轻轻转动以使外室均匀混合。在室温下放置 24 h 后用 0.006 29 mol·L⁻¹ 硫酸标准溶液滴定内室液体由蓝色转变为紫红色。同时做空白对照试验。

1.4 数据处理

参照 Williamson 等^[15]的方法,以化感效应指数(RI)作为化感作用的研究指标, $RI=(T_1-T_0)/T_0$ (T_1 为测试项目的处理值, T_0 为对照值)。当 $RI>0$ 时表示存在促进效应;当 $RI<0$ 时,表示存在抑制效应。 RI 的绝对值越大,其化感作用潜力(促进或抑制作用)越大。对叶片、茎、地上部生物量计算抑制率。

采用 SPSS10.0 软件中通用线性模型多因素变量程序(General Linear Model-Multivariate-full Factorial)进行方差分析,包括秸秆还田处理、时间的主效应以及秸秆还田×时间的交互作用。同一时期不同秸秆水平处理间的多重比较采用 LSD 法。因素间相关性及其显著性分析采用 Sigmaplot 9.0 软件回归分析程序

(regression wizard)进行。

2 结果与分析

2.1 水稻秸秆处理对油菜幼苗生长状况的影响

2.1.1 生物量

秸秆处理对油菜幼苗生物量的影响随土壤不同而不同(图 1)。整个试验期间,秸秆处理仅对汉川土和进贤土条件下的油菜幼苗总生物量表现出显著主效应:前者为负效应,后者为正效应。在汉川土,秸秆处理的负效应在播种后 20、33 d 和 46 d 达统计显著水平,总生物量的化感效应指数分别为-58.2%、-37.3%和-34.9%。在进贤土,正效应在播种后 71 d 达统计显著水平,总生物量的化感效应指数为 21.0%。除进贤土外,秸秆处理与时间均未对总生物量表现出显著交互作用,表明不同时间秸秆处理在这些土壤下的影响趋势一致。

水稻秸秆处理对生物量的影响主要缘于地上部生物量的变化。在整个试验期间,秸秆处理对汉川土和进贤土的地上部生物量表现出显著主效应(表 2)。对汉川土,在播种后 20、33、46 d 和 56 d 添加秸秆的负效应达统计显著水平,化感效应指数分别为-48.9%、-55.9%、-31.4%和-10.9%;对进贤土,在播种后 56 d 和 71 d 添加秸秆处理的正效应达统计显著水平,化感效应指数分别为 15.6% 和 22.7%。添加秸秆处理对所有供试土壤油菜幼苗的根系生物量均未表现出显著主效应(表 2)。

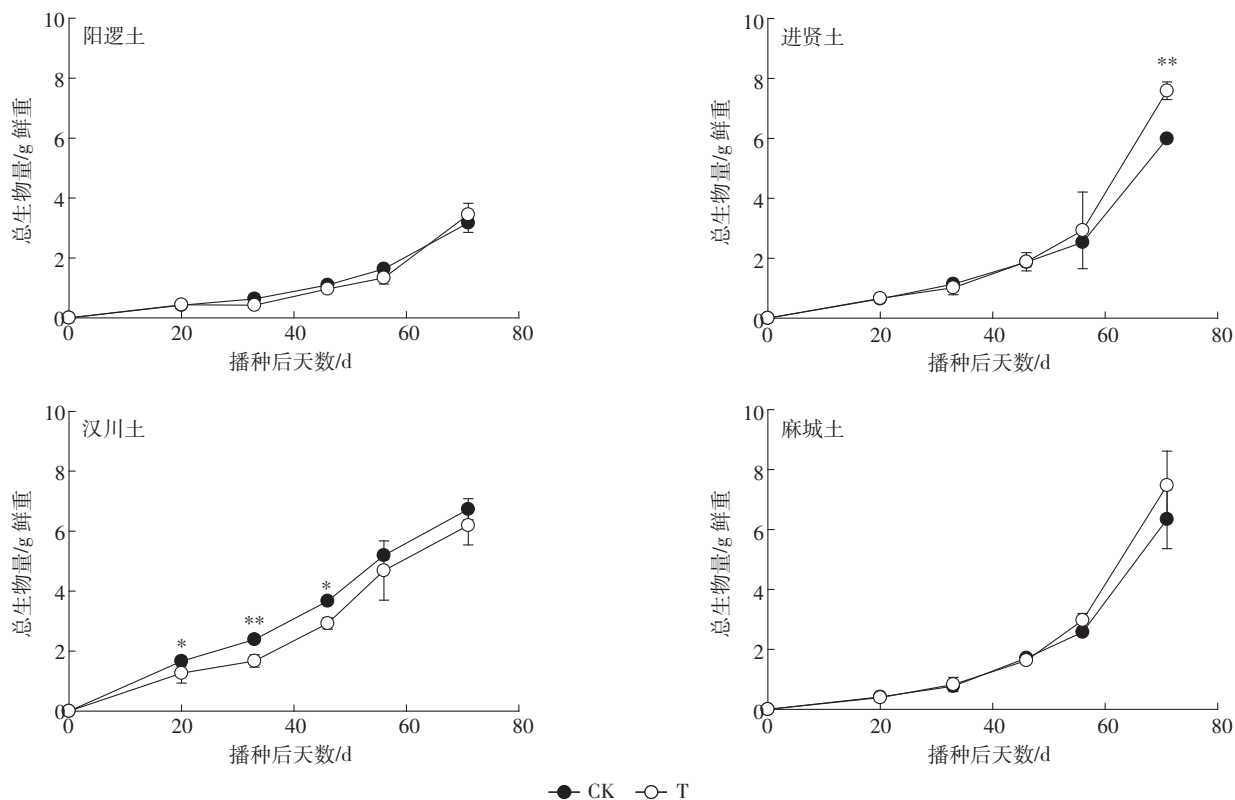
2.1.2 功能叶光合色素含量

秸秆处理对不同土壤下油菜幼苗功能叶片光合色素含量的影响趋势相似(图 2):仅在试验初期,添加秸秆处理使油菜幼苗功能叶片光合色素含量显著降低。在播种后 20 d,添加秸秆使阳逻土、汉川土、进贤土和麻城土的油菜幼苗功能叶光合色素含量分别极显著降低 38.8%、31.7%、40.3% 和 57.0%;在播种后 33 d,使进贤土和麻城土降幅分别为 34.9% 和 41.1%;其后,处理间差异减小至无。从整个试验期来看,4 种土壤条件下秸秆处理的主效应均不显著;时间和秸秆处理也未表现出显著的交互作用。

2.2 水稻秸秆腐解对土壤环境的影响

2.2.1 水稻秸秆腐解动态

4 种供试土壤在试验结束时水稻秸秆腐解率均达到了 80%左右;但腐解动态存在差异,差异主要出现在播种后 46 d 之前(图 3)。在阳逻土下,播种后 20 d 和 33 d 仅约 20% 水稻秸秆腐解,播种后 46 d 起迅速上升



图中数据点为平均值($n=3$), Error bar: $\pm$ SD; “*”表示 $P \leq 0.05$, “**”表示 $P \leq 0.01$ 。下同

图 1 水稻秸秆处理对油菜幼苗总生物量的影响

Figure 1 Effect of rice straw treatment on total biomass of rape seedlings

表 2 水稻秸秆处理对不同土壤油菜幼苗生物量影响的方差分析

Table 2 Analysis of variance of the effects of rice straw treatment and time on biomass accumulation of rape seedlings

项目	总生物量				地上部生物量				根生物量			
	阳逻	汉川	进贤	麻城	阳逻	汉川	进贤	麻城	阳逻	汉川	进贤	麻城
$P_{\text{时间}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$P_{\text{处理}}$	0.30	0.00	0.03	0.12	0.30	0.00	0.03	0.07	0.93	0.57	0.67	0.68
$P_{\text{时间} \cdot \text{处理}}$	0.10	0.94	0.02	0.22	0.10	0.86	0.02	0.17	0.13	0.01	0.82	0.54

至约 60%, 到 71 d 达到近 80%。在进贤土下, 水稻秸秆腐解率初期即达约 40%, 但播种后 33 d 到 56 d 一直维持在这个水平, 到 71 d 才又迅速升至约 80%。在汉川土和麻城土, 水稻秸秆腐解率在播种后 20 d 和 33 d 即达约 40%, 46 d 到 55 d 升至约 60%, 71 d 达到近 80%。

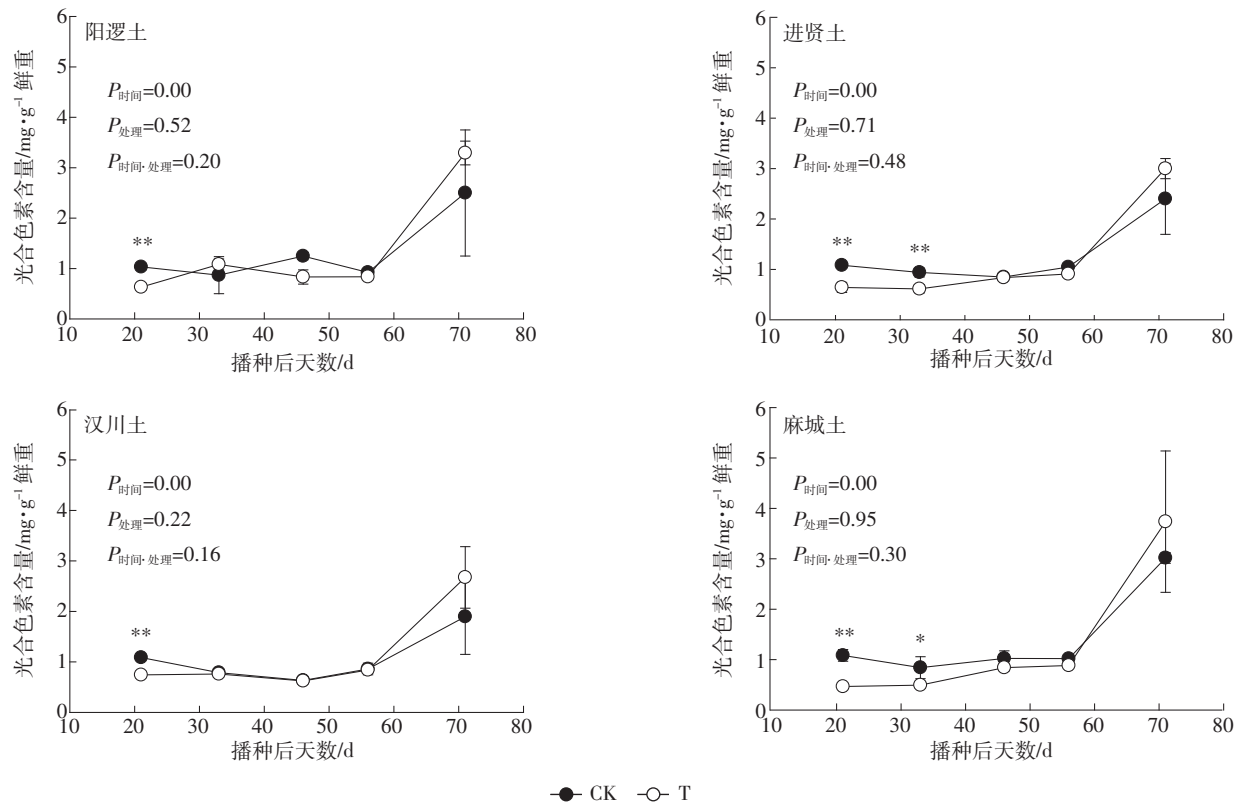
2.2.2 土壤水提取液 pH 值

水稻秸秆处理对阳逻和汉川土的水提取液 pH 值表现出显著主效应(图 4): 在阳逻土为正效应, 在汉川土为负效应。时间和秸秆处理在这两种土壤上也表现出了显著的交互作用。对阳逻土, 播种后 20 d 秸秆处理有高于对照的趋势; 而后到播种后 33 d 这种趋势消失至无; 此后到播种后 55 d 秸秆处理高于对照的幅度越来越大, 分别在播种后 46 d 和 55 d 达统

计显著和极显著水平; 到播种后 71 d, 两者间的差别再次消失。对汉川土, 添加秸秆处理导致土壤水提取液 pH 值降低, 在播种后 20 d 和 46 d 达显著水平; 播种后 56 d 之后, 这种降低消失。

2.2.3 土壤水提取液的氮含量

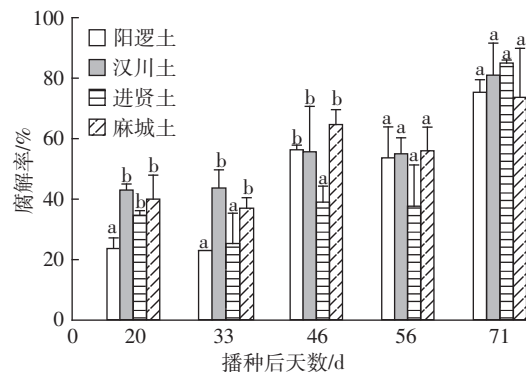
从图 5 结果可见, 添加秸秆处理对土壤水提取液中氮含量的影响主要出现在试验前期。在播种后 33 d, 添加秸秆处理使进贤土、汉川土和麻城土的土壤水提取液氮含量分别显著增加 50.0%、236.6% 和 305.9%; 在播种后 46 d, 使麻城土土壤水提取液 N 含量显著增加 91.9%。但就整个试验期间看, 4 种土壤下水稻秸秆处理的主效应均不明显; 除进贤土外, 时间和秸秆处理的交互作用均不显著。



图中 P 值为时间、秸秆处理的主效应及其交互作用的显著性检验的结果,下同

图 2 水稻秸秆处理对油菜幼苗功能叶光合色素含量的影响

Figure 2 Effect of rice straw on content of photosynthetic pigments in leaves of rape seedlings



图中不同字母表示数据差异达 5% 的显著水平

图 3 不同土壤条件下水稻秸秆的腐解动态

Figure 3 Decomposition dynamics of rice straw in different soils

2.2.4 土壤水提取液的酚酸含量

在整个试验期间,对照处理下阳逻土、汉川土、进贤土和麻城土的土壤水提取液酚酸含量范围分别为 3.77~8.70、8.17~23.17、10.97~35.53 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 9.77~40.50 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (图 6)。添加秸秆处理对阳逻土、汉川土和麻城土表现为显著主效应,且均为正效应。对阳逻土和麻城土,在整个试验期间秸秆处理下土壤水提取

液酚酸含量呈增加趋势,增幅分别为 16.8%~29.1%和 10.9%~44.5%。对汉川土,试验初期秸秆处理使土壤水提取液中的酚酸含量降低,在播种后 46 d 之后才呈现增加趋势,增幅 7.0%~18.6%。对进贤土,秸秆处理的影响在播种后 33 d 前不明显,播种后 46 d 呈显著负效应,之后也呈正效应趋势。秸秆处理与时间的交互作用对所有土壤均不显著。

2.3 水稻秸秆腐解率-土壤水提取液中酚酸增量-化感效应指数间的相关关系

对水稻秸秆腐解率和土壤水提取液中酚酸增量进行回归分析,发现其二者之间存在极显著的线性正相关(图 7)。

对土壤水提取液中酚酸增量与生物量的化感效应指数进行回归分析,发现存在显著正相关关系(图 8)。

3 讨论

添加秸秆处理对油菜幼苗总生物量的影响随土壤不同而不同:在进贤土表现为显著正效应,增加趋势自播种后 56 d 出现至播种后 71 d 达到显著;在汉川土为显著负效应,降低趋势自播种后 20 d 出现至

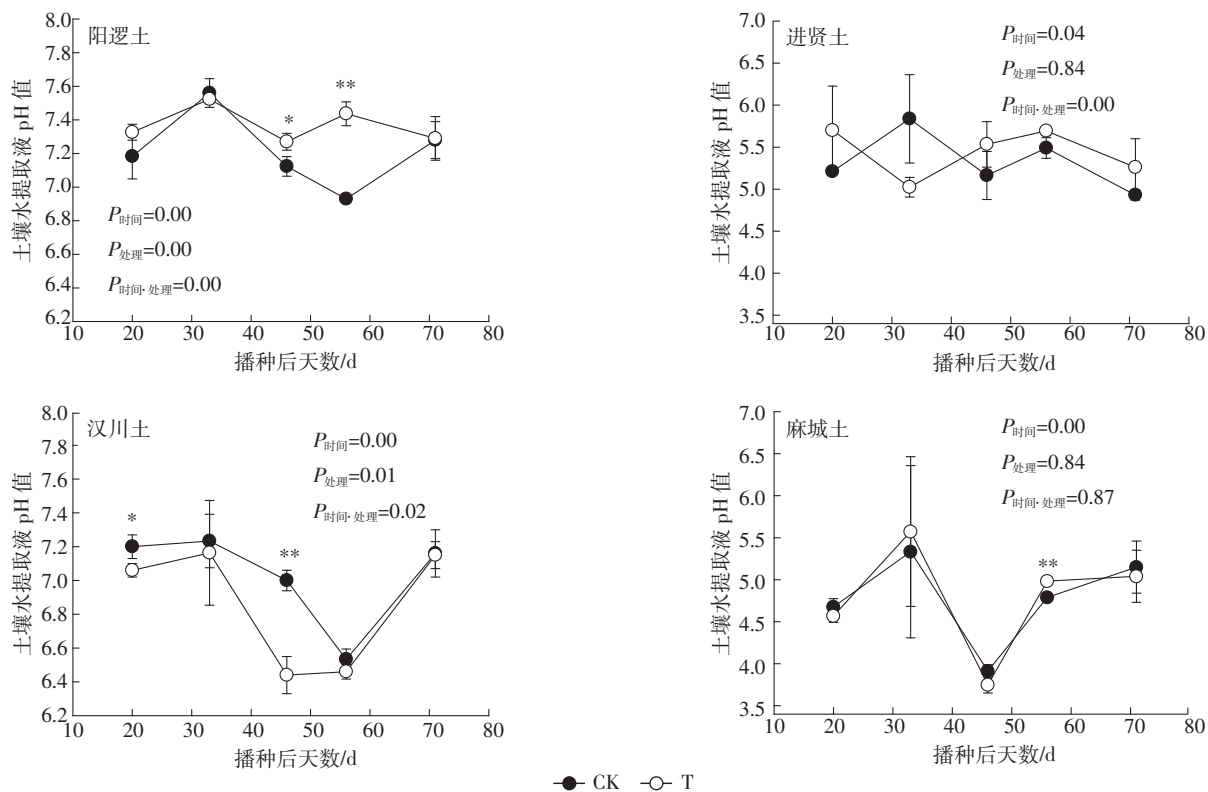


图 4 水稻秸秆处理对土壤水提取液 pH 值的影响

Figure 4 Effect of rice straw treatment on pH value of water autoclave extracts under different soils

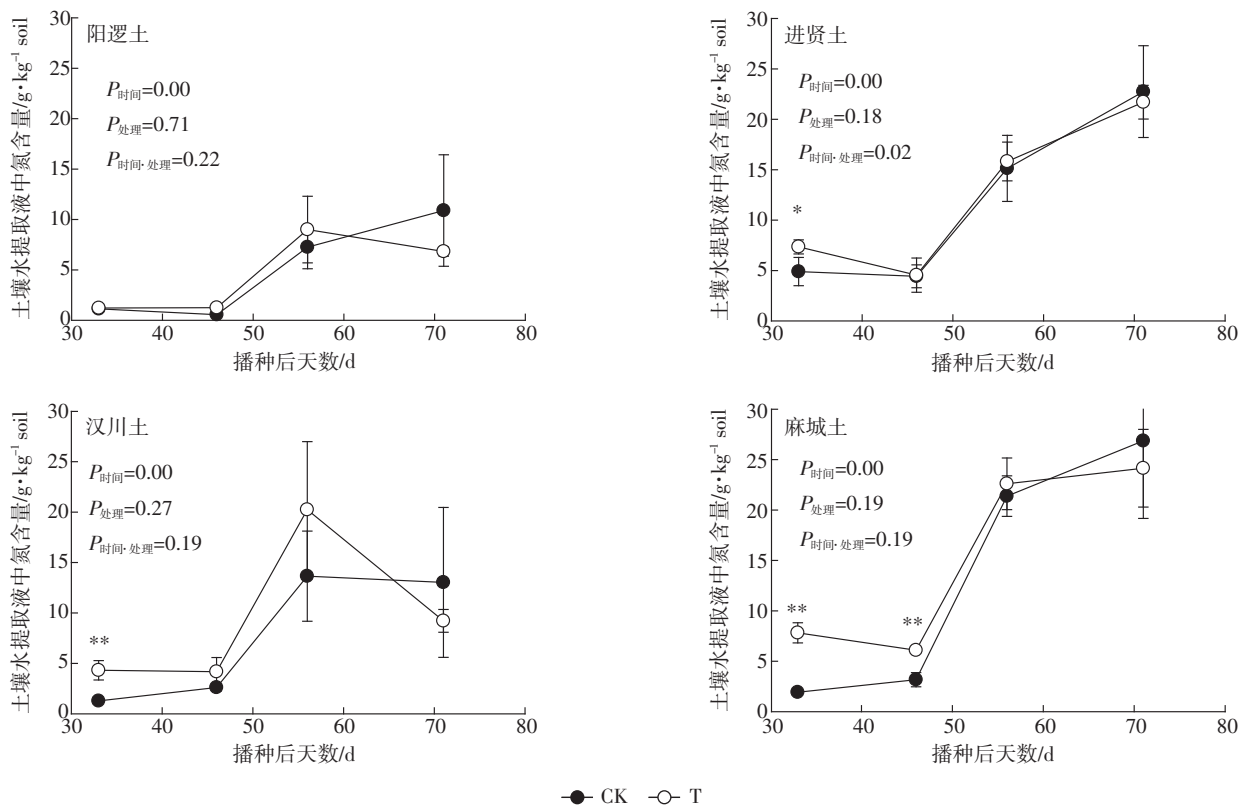


图 5 水稻秸秆还田对不同土壤提取液中氮含量的影响

Figure 5 Effects of rice straw treatment on N content of water autoclave extracts under different soils

试验结束,在播种后 20 d 至 46 d 达到显著;在阳逻土和麻城土则均无明显影响。而从油菜幼苗功能叶片的光合色素含量看,秸秆处理的显著影响出现在幼苗生长早期——在播种后 20 d 到 33 d, 秸秆处理油菜幼苗的功能叶片光合色素含量在 4 种供试土壤下普遍明显降低;而且与秸秆腐解速率最大值的出现存在时间上的重叠。在试验期间,水稻秸秆的腐解速率在阳

逻土为 $0.0\sim 25.6\text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$, 最大值出现在播种后 33~46 d;进贤土为 $0.2\sim 31.7\text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$, 最大值在播种后 20 d 之内和 56~71 d;汉川土和麻城土分别为 $1.9\sim 21.4\text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.2\sim 21.0\text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$, 最大值均出现在播种后 20 d 之内。这种时间重叠性表明两者间存在因果关系的可能性很大,同时也暗示化感物质的释放以及化感抑制作用的产生在早期比后期更强。同样的,Hassan 等^[16]对

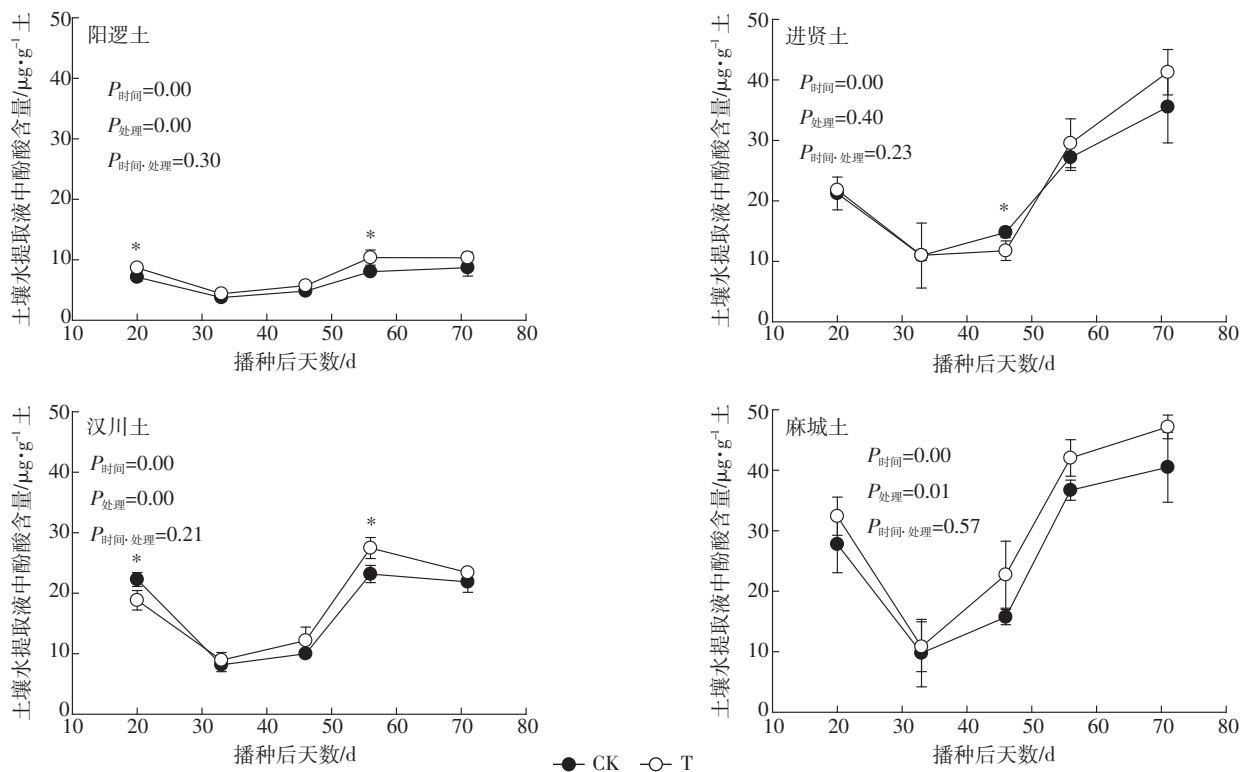


图 6 水稻秸秆还田对不同土壤提取液中酚酸含量的影响

Figure 6 Effect of rice straw treatment on phenolic acid contents of water autoclave extracts under different soils

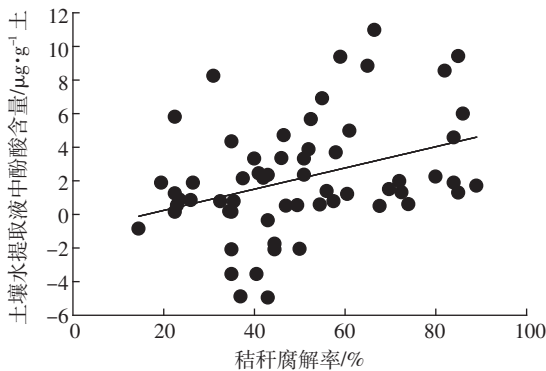


图 7 水稻秸秆腐解率与土壤水提取液中酚酸增量的相关关系
($y=-1.03+0.063x, r=0.362\ 0, P<0.01$)

Figure 7 Correlation between decomposition rate and increase in phenolic acid contents of soil water autoclave extracts($y=-1.03+0.063x, r=0.362\ 0, P<0.01$)

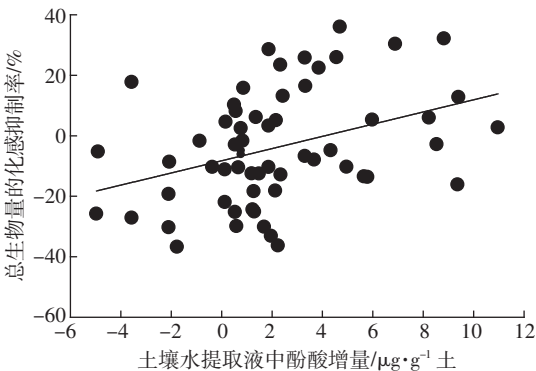


图 8 土壤水提取液中酚酸增量与生物量的化感效应指数间的相关关系($y=-8.25+2.02x, r=0.372\ 5, P<0.01$)

Figure 8 Correlation between increase in phenolic acid contents of soil water autoclave extracts and RI of total biomass($y=-8.25+2.02x, r=0.372\ 5, P<0.01$)

水稻-稗草的化感关系进行了研究,发现水稻对稗草和异型莎草的抑制作用主要体现在抑制杂草的发芽以及二叶期的生长。Narwal^[17]在研究稻麦轮作时也发现水稻残株还田对杂草的抑制作用在早期(播种 15 d)比后期(播种 45 d)更明显。基于此,在今后的研究中,关注油菜幼苗早期的反应对于揭示水稻秸秆的化感抑制作用意义更大。

为探讨水稻秸秆对油菜幼苗生长的影响机制,本研究对比分析了自播种日到播种后 71 d 之间添加秸秆与对照处理土壤水提取液中氮含量和酚酸总量的变化。除阳逻土之外的 3 个供试土壤中,添加秸秆导致播种后 33 d 土壤水提取液中氮含量显著高于对照,这种增加趋势持续至播种后 46 d(进贤土)和 56 d(汉川土和麻城土)。究其原因,一方面与秸秆腐解向土壤归还氮素有关,秸秆腐解率显著低于其他 3 种土壤的阳逻土中氮含量增加不明显;另一方面,也可能与上文所述的这段时间内植物生长状况差有关——这种情况常对应着氮吸收量的降低。

Narwal^[17]将水稻残株对杂草的抑制主要出现在早期、后期归因于水稻秸秆产生的化感物质由于分解等原因而降低的结果,但本研究的结果并未能验证此推测。在供试的 4 种土壤中,目标化感物质——水溶态酚酸的含量为 $3.3\sim 49.0\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 土,与前人的结果处于同一数量级^[5,10-11]。除进贤土外,添加秸秆使土壤中水溶态酚酸含量显著增加,增加趋势在试验后期更明显。在播种后 56 d,阳逻土、汉川土和麻城土土壤水提取液中酚酸含量分别显著增加了 2.34 、 $4.30\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 土和 $5.3\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 土。本研究中,土壤水提取液中酚酸的增加量与水稻秸秆腐解率之间存在显著正相关关系,暗示水稻秸秆是土壤中水溶态酚酸增量的来源。然而,在土壤水提取液中酚酸含量和水稻秸秆处理对油菜幼苗生物量化感抑制率间未发现显著相关关系。考虑到不同土壤条件下酚酸作用浓度的阈值不同:环境 pH 值降低、不同单酚酸以及(或者)其他有机抑制因子如绿原酸等的共存会使其降低,土壤颗粒固定、微生物降解、植物吸收则使之增高^[5];本研究又分析了土壤水提取液中酚酸增量与秸秆处理对油菜幼苗生物量的化感效应指数间的相关关系,发现二者之间存在显著的正相关关系。已有研究证实酚酸等化感物质普遍存在“低浓度促进、高浓度抑制”的特点^[5,7]。因此,我们推测在本研究中土壤水溶态酚酸尚未达到致害浓度,对油菜幼苗生长表现为低浓度促进的作用,这与吴萼等^[10]对小麦秸秆还田土壤的研究结果是一致

的。另外,从时间上看,秸秆处理导致的土壤水溶态酚酸含量增加主要出现在试验后期,其促进作用与养分改善的正效应叠加,可能正是在进贤土、阳逻土和麻城土下抵消幼苗早期秸秆处理产生的负效应,最终导致植物幼苗生物量未显著降低甚至增加的原因。

综合看来,酚酸含量的增加并不能解释水稻秸秆对油菜幼苗生长的负效应,在后续研究中可能需要转换目标化感物质。近年来,随着分离和结构鉴定技术的提高,也有报道认为水稻活体组织中的化感物质是糖甙间羟基苯二酚、黄酮和羟基脂肪酸等^[18],在水稻秸秆的化感作用中,这些物质的作用也值得进一步关注。

4 结论

处理间总生物量的显著差异主要出现在中、后期,添加秸秆对油菜幼苗总生物量的影响在进贤土表现为显著正效应,在汉川土为显著负效应,在阳逻土和麻城土无明显影响。功能叶片光合色素含量的显著降低在 4 种土壤下均出现在早期。

水稻秸秆处理对土壤水溶态氮和酚酸含量均为正效应,前者主要表现在早、中期,后者主要表现在后期。酚酸增量与幼苗生物量化感抑制率之间的正相关关系表明:酚酸含量的变化不能解释秸秆处理的负效应。为揭示秸秆处理的负效应机制,在今后研究中需要转换目标化感物质。

参考文献:

- [1] 卜毓坚,屠乃美. 水稻秸秆还田的效应与技术及其展望[J]. 作物研究, 2005(5):428-431.
BU Yu-jian, TU Nai-mei. Effect and techniques of rice straw returning to the field and the prospects[J]. *Crop Research*, 2005(5):428-431. (in Chinese)
- [2] 杨思存,霍琳,王建成. 秸秆还田的生化他感效应研究初报[J]. 西北农业学报, 2005, 14(1):52-56.
YANG Si-cun, HUO Lin, WANG Jian-cheng. Allelopathic effect of straw returning[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2005, 14(1):52-56. (in Chinese)
- [3] 李逢雨. 秸秆还田养分释放规律及稻草化感作用研究[D]. 成都:四川农业大学硕士论文, 2007.
LI Feng-yu. Patterns of nutrient release from straws returned to the field and the allelopathic effect of rice straw[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [4] 苏伟,鲁剑巍,周广生,等. 稻草还田对油菜生长、土壤温度及湿度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2):366-373.
SU Wei, LU Jian-wei, ZHOU Guang-sheng, et al. Influence of straw-returning on rape seed(*Brassicanapus* L.) growth, soil temperature and moisture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(2):

- 366–373. (in Chinese)
- [5] Blum U. Plant–plant allelopathic interactions, phenolic acids, cover crops and weed emergence[M]. Dordrecht:Springer, 2011.
- [6] 李彦斌, 刘建国, 程相儒, 等. 秸秆还田对棉花生长的化感效应[J]. 生态学报, 2009, 29(9):4942–4948.
- LI Yan-bin, LIU Jian-guo, CHENG Xiang-ru, et al. The allelopathic effects of returning cotton stalk to soil on the growth of succeeding cotton[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 29(9):4942–4948. (in Chinese)
- [7] Willis R J. The history of allelopathy[M]. Dordrecht:Springer, 2007.
- [8] García-Sánchez M, Garrido I, Casimiro I d J, et al. Defence response of tomato seedlings to oxidative stress induced by phenolic compounds from dry olive mill residue[J]. *Chemosphere*, 2012, 89:708–716.
- [9] 郑皓皓, 胡晓军, 贾敬业, 等. 麦秸还田耕层酚酸变化及其对夏玉米生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(4):79–81.
- ZHENG Hao-hao, HU Xiao-jun, JIA Jing-ye, et al. Changes of the phenolic acid in plough layer and its effects on the growth and yield of summer corn with returning wheat straw[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(4):79–81. (in Chinese)
- [10] 吴 蓓, 徐 宁, 温美娟. 磷钼酸–磷钨酸盐比色法测定土壤中总酚酸含量[J]. 环境化学, 2000, 19(1):67–72.
- WU E, XU Ning, WEN Mei-juan. The measurement of total phenolic acids in soil by phosphomolybdic–phosphotungstic acid phenol reagent colorimetry[J]. *Environmental Chemistry*, 2000, 19(1):67–72. (in Chinese)
- [11] Chou C H, Lin H J. Autointoxication mechanism of *Oryza sativa* L. phytotoxic effects of decomposing rice residues in soil[J]. *Chemistry and Ecology*, 1976(2):353–367.
- [12] Jung W S, Kima K H, Ahn J K, et al. Allelopathic potential of rice (*Oryza sativa* L.) residues against *Echinochloa crus-galli*[J]. *Crop Protection*, 2004, 23:211–218.
- [13] 朱 林, 张春兰, 沈其荣, 等. 稻草等有机物料腐解过程中酚酸类化合物的动态变化[J]. 土壤学报, 2001, 38(4):471–475.
- ZHU Lin, ZHANG Chun-lan, SHEN Qi-rong, et al. Phenolic acids in decomposing organic materials[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4):471–475. (in Chinese)
- [14] Chung I M, Ahn J K, Yun S J. Assessment of allelopathic potential of barnyard grass (*Echinochloa crus-galli*) on rice (*Oryza sativa* L.) cultivars[J]. *Crop Protection*, 2001, 20:921–928.
- [15] Williamson G B, Richardson D. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1988, 14:181–187.
- [16] Hassan S M, Aidy I R, Bastawisi A O, et al. Weed management in rice using allelopathic rice varieties in Egypt[M]//Olofsdotter M, et al. Allelopathy in rice. Los Baños, Philippines:IRRI, 1996.
- [17] Narwal S S. Allelopathic strategies for weed management in rice–wheat rotation for sustainable agriculture[M]//Olofsdotter M, et al. Allelopathy in rice. Los Baños, Philippines:IRRI, 1996.
- [18] 孔垂华, 徐效华, 梁文举, 等. 水稻化感品种根分泌物中非酚酸类化感物质的鉴定与抑草活性[J]. 生态学报, 2004, 24(7):1317–1322.
- KONG Chui-hua, XU Xiao-hua, LIANG Wen-ju, et al. Non-phenolic allelochemicals in root exudates of an allelopathic rice variety and their identification and weed-suppressive activity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7):1317–1322. (in Chinese)