|  |
| --- |
| 分类号： 单位代码：10389  密 级： 学 号：1102510 |
| **福建农林大学硕士学位论文** |
| **水稻化感潜力抑草圈评价方法的建立** |
| 学 科 门 类：理学 一级学科名称：生态学  二级学科名称：化学生态学研 究 方 向：植物化感作用 研 究 生：郭徐魁  指 导 教 师：何海斌教授  完 成 时 间：二 O 一三年五月 |

|  |
| --- |
| Establishment of a weed inhibit ring for evaluation of rice allelopathic potential |
| A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of  Master of Ecology  By Xu-kui Guo  Supervisor: Prof. Ph.D Hai-Bin He  Forestry College  Fujian Agriculture and Forestry University Fuzhou 350002 P.R.China  May, 2013 |

**独创性声明**

本人声明，所呈交的学位（毕业）论文，是本人在指导教师的指导下独立完成的研究成果，并且是自己撰写的。尽我所知，除了文中作了标注和致谢中已作了答谢的地方外，论文中不包含其他人发表或撰写过的研究成果。与我一同对本研究做出贡献的同志，都在论文中作了明确的说明并表示了谢意，如被查有侵犯他人知识产权的行为，由本人承担应有的责任。

学位（毕业）论文作者亲笔签名： 日期：2013 年 6 月

**论文使用授权的说明**

本人完全了解福建农林大学有关保留、使用学位（毕业）论文的规定，即学校有权送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅; 学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

保密，在 年后解密可适用本授权书。 □

不保密，本论文属于不保密。 √

学位（毕业）论文作者亲笔签名： 日期：2013 年 6 月

指导教师亲笔签名： 日期：2013 年 6 月

**目** 录

目 录

[摘要](#_Toc686322762) 3

**[Abstract](#_Toc686322763)** 4

**[1.](#_Toc686322764)** [前言](#_Toc686322764) 4

**[1.1](#_Toc686322765)** [生物测试筛选设计的关键性问题](#_Toc686322765) 4

**[1.2](#_Toc686322766)** [常用生物测试方法的优缺点](#_Toc686322766) 4

**[2](#_Toc686322767)** [材料与方法](#_Toc686322767) 6

**[2.1](#_Toc686322768)** [实验材料](#_Toc686322768) 6

**[2.2](#_Toc686322769)** [实验设计](#_Toc686322769) 6

**[2.3](#_Toc686322770)** [田间抑草圈方法验证](#_Toc686322770) 7

**[2.4](#_Toc686322771)** [琼脂三明治土壤化感潜力评价](#_Toc686322771) 7

**[2.5](#_Toc686322772)** [土壤直接生物测试法](#_Toc686322772) 7

**[2.6](#_Toc686322773)** [土壤营养生理指标测定](#_Toc686322773) 7

**[2.7](#_Toc686322774)** [生理生化指标测定](#_Toc686322774) 7

**[2.8](#_Toc686322775)** [光合生理指标测定](#_Toc686322775) 7

**[2.9](#_Toc686322776)** [组织营养生理指标测定](#_Toc686322776) 8

**[2.10](#_Toc686322777)** [抑草圈评价方法确立](#_Toc686322777) 8

**[2.11](#_Toc686322778)** [数据处理](#_Toc686322778) 8

**[3.](#_Toc686322779)** [结果与分析](#_Toc686322779) 8

**[3.1](#_Toc686322780)** [不同叶期化感水稻](#_Toc686322780)**[PI312777](#_Toc686322780)**[对稗草的影响分析](#_Toc686322780) 8

**[3.2](#_Toc686322781)** [化感水稻](#_Toc686322781)**[PI312777](#_Toc686322781)**[对不同距离稗草的影响分析](#_Toc686322781) 9

**[3.3](#_Toc686322782)** [抑草圈土壤琼脂三明治生物测试法分析](#_Toc686322782) 23

**[3.4](#_Toc686322783)** [抑草圈土壤直接生物测试法分析](#_Toc686322783) 24

**[3.5](#_Toc686322784)** [抑草圈根部土壤速效氮、磷和钾含量的差异分析](#_Toc686322784) 24

**[3.6](#_Toc686322785)** [稗草共培条件下对水稻生长指标的影响分析](#_Toc686322785) 25

**[3.7](#_Toc686322786)** [稗草共培条件下对水稻光合指标的影响分析](#_Toc686322786) 26

**[3.8](#_Toc686322787)** [稗草共培条件下对水稻和稗草生理生化指标的影响分析](#_Toc686322787) 27

**[3.9](#_Toc686322788)** [稗草共培条件下对水稻和稗草组织全](#_Toc686322788)**[NPK](#_Toc686322788)**[含量的影响分析](#_Toc686322788) 28

**[3.10](#_Toc686322789)** [化感水稻抑草圈评价方法的应用](#_Toc686322789) 29

**[3.11](#_Toc686322790)** [不同生物测试方法间的比较分析](#_Toc686322790) 45

**[4](#_Toc686322791)** [讨论](#_Toc686322791) 46

[参考文献](#_Toc686322792) 47

摘要

本研究以国际上公认的强化感水稻品种PI312777为供体，以稗草为受体，以室外盆栽方式，建立以水稻和稗草土壤共培模式为基础的水稻化感潜力抑草圈评价方法，并对40种水稻品种进行化感潜力评价。主要结果如下：

（1）以稗草与水稻径向距离为6cm的抑制圈，随着化感水稻PI312777叶期数的增加，受体稗草的根长、株高和生物量的受抑制程度呈递增趋势。3叶期、4叶期、5叶期化感水稻对共培稗草的抑制率之间均存在显著差异，5叶期和6叶期之间不存在显著差异。因此，选择5叶期为化感水稻抑草圈评价方法的叶期数。

（2）以5叶期化感水稻PI312777进行不同距离抑制圈进行试验，连续三年的结果之间不存在显著差异。化感水稻对稗草的抑制作用随抑制圈距离的增加呈下降趋势。抑制圈为12 cm时抑制率均达到50%以上。因此，以12 cm抑制圈作为化感水稻抑草圈评价方法的种植距离。

（3）化感水稻抑草圈评价方法确定为：取30 kg混匀风干稻田土于圆盆中（直径51 cm, 高16 cm），加10L水并搅匀并静置1天，6颗预萌发水稻种子以间距2cm播于盆中央，手工去除试验中生长的杂草。待水稻至5叶期时，将6颗预萌发稗草以半径12cm等间距环绕水稻种植，以单种稗草做为对照。7d 后测定稗草根长、株高和生物量。以抑制率（inhibition

rate，IR）为评价指标。

（4）以化感水稻抑草圈评价方法对40个水稻品种进行实验，结果表明，PI312777 和

Taichung Native1为化感水稻品种，其余38个水稻品种均为弱化感水稻品种。**关键词：**水稻；稗草；抑草圈；化感作用；抑制率

**Abstract**

In order to establish a weed inhibit ring method for evaluating allelopathic rice accessions, an allelopathic rice PI312777 was employed as donor plants and barnyard grass (*Echinochloa crus galli*) was used as receiver plant. The rice and barnyardgrass were pot-cultured together in paddy soil under natural conditions. The main results are summarized as follows:

(1) At the space of 6 cm from rice to barnyard grass, the inhititory effect of rice on barnyard grass growth was increased as the increase of rice leaf stage. There were significant differents among 3-, 4-, and 5-leaf stages of allelopathic rice. However, there was no significant differents between 5- and 6-leaf stages. Therefore, 5-leaf stage of allelopathic rice PI312777 was chosen in the weed inhibit ring method to screen the allelopathic rice.

(2) At 5-leaf stage of allelopathic rice PI312777, there were no significant different among 3 years results when at the different spaces from rice to barnyardgrass. The inhibitory effects of rice on barnyard grass growth were descreased as the increase of spaces from rice to barnyardgrass. At the space 12 cm from rice to barnyard grass, the inhititory rates of rice on barnyard grass growth was as high as 50%. Therefore, the space 12 cm from rice to barnyard grass was chosen in the weed inhibit ring method to screen the allelopathic rice.

(3) The weed inhibit ring method was 30 kg paddy soil in a pot (51 cm diameter, 16 cm height) mixed with 10L water and standing for 1 day. Six uniform pre-germination rice seeds planted in the central of pot. Weeds were hand-remove. At the 5-leaf stage of rice, 6 uniform pre-germination seeds of barnyard grass planted at equal distance in the ring of 12 cm from the rice seedlings. No rice seedling was as control. After 7 days, the inhibitory rates of rice on root length, plant height and plant dry weight of barnyard grass were calculated for evaluation of rice allelopathic potential.

(6) The allelopathic potential of 40 rice accessions were evaluated by the weed inhibit ring method. The results showed that PI312777 and Taichung Native1 were allelopathic rice accessions. And 38 out of 40 rice accessions were no alleloapthic rice accessions.

**Key word:** Rice (*Oryza sativa* L.); Barnyard grass (*Echinochloa crus galli*); Weed inhibit ring; Allelopathy; Inhibitory rate

# **1.** 前言

利用水稻化感作用进行农田杂草的控制和管理是21世纪发展可持续农业的生物工程技术之一，已受到世界各国科学家的重视。植物化感作用，主要是指一活体植物（供体植物）自然生长过程中产生并通过地上部分茎叶挥发和淋溶、根系分泌，残体降解等方式（如图1）向环境释放有生物活性的次生代谢产物而影响邻近植物（受体植物）的生长和发育的一种化学生态学现象。这种作用包括两方面促进和抑制两方面的作用。农田作物化感抑草就是利用了化感作物在生态系统中的自身防御或抗逆能力，由于没有向环境系统中引入难降解的化学物质，所以不会引起农药残留、杂草抗药性增强、环境污染等一系列生态环境问题。因此，利用作物化感作用进行农田杂草的控制和管理，不仅降低了人们对化学合成除草剂的依赖和生产成本，而且保护了生态环境和生物多样性，使作物栽培朝“高产、优质、高效、生态和安全”方向发展[1-4]。

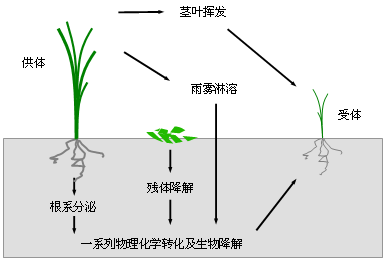


图1 植物化感物质释放途径

Fig. 1 The pathway of plant allelochemicals release

水稻是世界上最为重要的粮食作物之一。它构成了世界亿万人口的基本营养来源。随着世界人口的不断增长、可耕地面积不断减少、水资源约束及气候异常等因素的影响，水稻增产措施的研究也成为当今世界农业的重要课题。长期农业生产实践表明，提高水稻产量的两个关键因子是水稻育种和水稻种植管理，通过生态安全性手段提高水稻产量是当前农业生产和环境保护的大趋势，更值得一提的是杂草的发生主要是发生在水稻幼苗期，随着水稻直播方式在水稻生产中比重的不断提高，杂草的控制就更加重要[5]。据Chandler[6]报道，美国常年因杂草危害带来的水稻生产的损失大约为潜在产量的17%，约合2亿美元。在泰国的水稻生产中，杂草每年会带来大约25% -75%的产量损失[7]。杂草控制有多种手段，例如：人工除草，化学除草（除草剂）、耕作管理以及生物控制，其中化学除草剂为主要的杂草控制手段。据美国农业部(USDA)估计化感作用新技术的应用将对美国农业带来相当于总产量2%，也就是约为20亿美元的效益[8]。因此，如何在水稻生产过程中开发并利用水稻的化感作用

已然成为科学家所重视的一个重要的研究课题[9-15]。

我国水稻种质资源包括地方品种46885份、国内选育2396份、野生稻4655份[16]，虽然国外已对本国的一些资源进行了研究分析，毕竟为数不多，而且我国地域辽阔、生态环境多样，使得水稻种质具有更多特性。因此，在我国开展水稻化感资源研究是很有前景的。

在化感作用研究中，生物检测手段是一个亟待规范化、标准化的重要方面，它评价某植物的化感作用，为化感作用的进一步深入提供证据的作用。

筛选化感潜力作物的第一步为室内生物测试[17]。在供体与受体相互作用中，许多生物测试已证实化感的重要作用[18-22]。同时，在鉴定化感潜力作物品种的生物筛选方法上仍有待进一步改善。生物测试方法大体上可分为水提液筛选，幼苗筛选，田间筛选和化学筛选。

## **1.1** 生物测试筛选设计的关键性问题

### **1.1.1** 基本要求

生物测试筛选方法的简便和可靠性是研究化感作物品种的最关键因素。生物测试方法必须便宜，快速并且容易操作，对大多数靶标物种均广泛适用，可重复且数据可靠，并且不占用太多时间和空间，且生物测试也能分离出不同作物品种间的化感活性的差异。单一的生物测试是不能完全达到以上条件的，所以需要不同生物测试的结合，毫无疑问地说，只有结合多种生物测试方法才能客观评价作物化感特性。然而，在经费制约下通常只能选择一种或少数几种方法。

### **1.1.2** 化感作用与资源竞争的分离

田间自然条件下，植物的生长受诸多生态因子的影响，然而无论是什么引起了作物抑草作用，将化感作用与资源竞争分离开来进而评价作物的化感潜力是相当重要的。田间自然生长条件下，作物与杂草的相互影响受化感作用和资源竞争两因子同时作用进行的，将两者区分开相当困难，如果有可能的话，应在田间水平上区分两者[23]。化感作用的复杂性以致于难以选择适当的生物测试方法[24]，结果导致难以将化感作用从植物间相互作用中区分出来

[25]. 生物测试法必须能够从其它干扰因素中将化感作用区分出来[24,26-27]。在可调控的条件下

能够解释一些化感的特殊性[17]，并且一些改进的生物测试法已能够从竞争中分离出化感作用。

### **1.1.3** 受体物种的选择

目前已有很多物种被用来作为评价化感潜力的受体[19]。一些标准受体物种，如莴苣*(Lactuca sativa)*，萝卜*(Raphanus sativa)*和浮萍*(Lemna minor)*，由于它们对化感作用生物测试方法中的可操作性和高度敏感性，常常被用来进行化感活性评价[28-30]。然而，Romeo和

Weidenhamer[24]提出以上这些受体物种与供体在自然中实际发生的化感作用并无关联，因此这些受体所表现出的结果不能代表田间实验杂草。供测试的受体物种和实际田间杂草在对化感的敏感性方面均存在一定的差异[31]。生物测试的目的是为了鉴定在生态学意义上植物相互作用关系，应该避免人工敏感型物种的使用[17, 32]。生物测试所选用的受体植物应该是田间

存在的并且与化感植物伴生的，才可将该植物当作受体物种[33]。

### **1.1.4** 受体物种的预萌发

使用预萌发种子可以减少因为未萌发种子使用而产生错误的实验结果[24,33-35]。一般采用测量胚根长度来确定化感活性，然而，这个方法所获得的数据在解释现象的时候要小心，因为也可能是由于种子萌发延迟而产生的现象。此外，很多野外物种的种子休眠导致了不同发芽速度[24]。Olofsdotter等[36]提出种子发芽不一致，会导致胚根测量值存在巨大的差异。Wardle等[34]发现预萌发种子可以挑选到一致的发芽种子来进行可靠的生物测试。为了保证了供体与受体之间的密度，实验设计与数据分析需要发芽的种子。即使作物的种子发芽比杂草种子一致，但作物种子同样也需要预先萌发[33]。

### **1.1.5** 供体与受休物种的密度

改变幼苗密度会导致浓度效应的改变。Weidenhamer等[20, 37]和Thijs等[38]发现在室内生物测试和温室生长研究中，植物毒素效应取决于受体密度和毒素浓度。他们研究发现已知浓度的植物毒素，其活性随受体密度的增加而降低，这是由于受体密度的增加引起了单个受体植物分配到毒素量降低。另一方面，供体植物作为另一方面也值得考虑。Wu等[33]发现小麦幼苗化感抑制燕麦根的生长取决于供体小麦幼苗的密度。抑制率随着小麦幼苗密度的增加而加强。随着小麦密度地增加，小麦幼苗分泌的化感物质浓度增加，从而引起了对燕麦根长抑制率的增强。因此，在设计生物测试实验时要考虑供体与受体植物之间的密度。生物测试的植物密度应与田间情况相似。

### **1.1.6** 模拟化感物质的自然释放

生物测试应该模拟来自活体供体植物向生长介质中自然释放化感物质[33]，同时尽可能模拟田间条件[17, 39]。不同于除草剂，除草剂是一个给定的浓度，其次随着时间不断地降解，而活体植物会持续不断地释放化感物质，并会随土壤溶液转移，导致邻近植物吸收，微生物降解和土壤吸附[27]。化感物质的毒性是其浓度（某一时间点有效值）和不断变动的速率（动态有效值基于一段时间内物质进出系统的总量）的函数[40]。长期低化感浓度下仍对植物生长有抑制作用[41]。实验过程中生物测试的物种一定要确保实际生长情况。即使移除供体能将化感与资源竞争能分离开，但还是应该避免移除供体植物后进行生物测试。移除供体植物后化感物质的释放将停止，因此会导致实际供体的化感效应下降。

## **1.2** 常用生物测试方法的优缺点

### **1.2.1** 室内条件下水提生物测试筛选法

水提生物测试已被广泛运用到评价供体植物残留物的化感作用。总体来说，浸提生物测试是在培养皿中进行，受体植物放在滤纸上，然后添加供体植物的浸提液[18, 35, 42]。培养皿中添加等量的蒸馏水作为对照。培养皿置于生物培养箱中一段时间后（通常是2到7天）测定其受体的发芽率和根长。

浸提生物测试法简单、快速且直接地来评价作物的残留物化感作用。同时，需要多个重

复有助于实验数据分析。残留物的化感作用的变化差异就很容易区分开来[42]。然而，浸提生物测试也存在诸多问题[32,43-44]。化感物质进行浸提时，会导致酶、盐、氨基酸和含氮化合物的释放，这是不符合自然环境实际情况[43]。由于浸提液可能引发从植物化学角度上化学物质的定性和定量改变[32]，因而采用植物地上部材料的浸提液进行生物测试，其结果与实际情况没有任何生态上的相关性。另外，由于不同湿度和滤纸膨胀[18]，植物浸提液滤纸生物测试法往往得到不一致的结果。后来的浸提液琼脂生物测试法克服了这些问题[18, 35]。在进行温室和田间条件下的作物残留物的生物测试时，必须认真设计后再考虑进行浸提生物法。对此后人提出了作物残留物土壤修复生物测试法[17,45-46]。

### **1.2.2** 可控条件下幼苗生物测试法

由于浸提生物测试法的缺陷[43-44]，所以进行了改进，利用植物幼苗进行生物测试。研究化感作用通常在幼苗期[33]，因为幼苗期是作物和杂草相互影响的关键时期。如果在幼苗阶段，杂草能够被化感作物抑制的话，那么作物的长势将超过杂草。大量的这种类型的生物测试被设计并且用于评价作物幼苗的化感作用。

#### **1.2.2.1** 盆栽筛选法（**Pot Screening**）

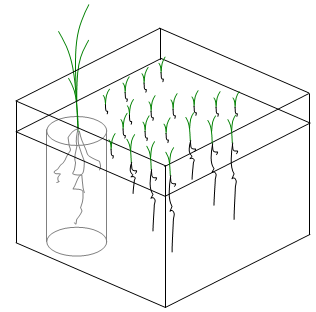
盆栽筛选法已被用于评价526种黄瓜*(Cucumber sativus)*由于其化感潜力抑制宽叶杂草，白芥末*(Brassica hirta)*和狭叶杂草，proso millet*(Panicum miliaceum)*[47]。盆栽实验分为三个阶段。第一阶段是无重复筛选法，在可调控环境下，4颗黄瓜供体和10颗杂草受体播于直径

7.6cm装有270g石英砂的盆中。以单种杂草作为对照。每盆浇80mL的半完全营养液，如果有需要再添加营养液。10天后记录杂草的生长指标。第二阶段是从第一阶段中筛选出的强化感黄瓜进行下一步的重复实验。第三阶段，选择强化感和非化感品种进行化感验证。具体步骤：在灭菌条件下，盆里起初添加的80mL营养液，待生物测试第4、6、8天时，分别加120mL营养液进行土壤物质浸提。10mL的浸提液用于化感作用评价，8个重复，每盆10颗种子，在装有30cm3石英砂的塑料托盘中。用营养液作为对照。10天后测量杂草的生长指标。

这种筛选方法，依次有三个阶段，具有一些优点。大量的作物品种在第一阶段进行无重复筛选，节省大量的时间和空间。第二阶段针对第一阶段的部分结果进行重复实验。第三阶段进行根系分泌液的收集是关键步骤，是为了证实在没有资源竞争和微生物干扰下的供体幼苗的化感作用。然而，该方法中生物测试的种子均是未萌芽的，这可能导致盆栽中供体和受体密度的不同。化感活性受供体与受体之间的密度影响[20,33,37-38]。在化感研究中种子萌芽应有所考虑[33]。

#### **1.2.2.2** 植物箱法（**Plant Box Method**）

Fujii[28]提出了植物箱法（**Plant Box Method,** PBM）（图2），以苣莴为受体来评价189种水稻幼苗化感潜力。PMB需要在含有营养液的砂子中将水稻幼苗种植一到两个月时间。水稻幼苗转移到事先装有0.5%的琼脂的纤维素透析袋管（CDT）中，将CDT置于事先装有



供体

受体

CDT

1L 0.5%的琼脂的塑料箱中一侧的中央位置。CDT由特殊固定架支撑。表面灭菌的受体种子与CDT的同心轴一排一排的移植于琼脂表面。植物箱表面覆盖一层透明薄膜以减少水分蒸发和污染。一段时间后测量受体幼苗的根长。该生物测试法同样也应用于高地和野生水稻抑制稗草（*Echinochloa crus-galli*），硬毛木蓝（*Indigofera hirsuta*）和苣莴（*Lactuca sativa*）[7]，小麦抑制野燕麦（*Avena fatua*）和印度对冲芥末（*Sisymbrium orientate*）[48]。

图2 植物箱法（PMB）

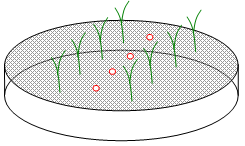
Fig. 2 Plant Box Method

PMB生物测试法可以明确得到供体物种对受体的抑制效应。供体幼苗释放的化感物质通过CDT扩散到琼脂介质中并影响受体的生长[48]。随着与供体植物的距离加大，受体植物受抑制程度不断降低。然而，该生物测试需要一个大箱，这给大量筛选品种造成巨大的问题。且该生物测试法需要时间，供体植物需要事先生长到两个月。总之，该生物测试法不适于大规模的化感生物筛选[49]。

#### **1.2.2.3** 迟播共培法（**Relay Seeding Technique**）

为了克服植物根箱法所带来的问题，Navarez and Olofsdotter [49]提出了迟播共培法（Relay Seeding Technique**,** RST）（图3）作为评价水稻幼苗的化感作用。RST方法为在透明的含有蒸馏水的培养箱内放置充满水的培养皿，培养皿上有7天的供体幼苗，然后移入受体，共培10天后测定受体生长指标。培养皿垫了一层环形滤纸，这样就可以通过滤桥为植物提供水分。供体植物成排种植，覆盖珍珠岩以防止供体植物根拱起来。生长箱被透明的塑料盖子覆盖，有必要时添加蒸馏水。10天后记录受体植物的根长和株高。

迟播共培法也有缺点，如受体根依附在滤纸上导致取样时根容易断掉，进而引起根长和干物质的测定不准确[22, 33]。微生物污染也同样是一个问题。虽然RST能成功的消除水和营养的竞争，但光竞争仍然存在[49]。进一步表现，过高的供体植物弯曲下可能引发出化感物质的重新分配和释放[33]，当植物受胁迫时这是一个特征响应[1]。



供体

受体

图3 迟播共培法（RST）Fig. 3 Relay Seeding Technique

#### **1.2.2.4** 等隔离体积共培法（**Equal Compartment Agar Method**）

近来，室内生物测试法等隔离体积共培法（**Equal Compartment Agar Method,** ECAM）

（图4），用于评价小麦幼苗化感抑制燕麦*(Lolium rigidum)* [33,50]。简言之，在装有琼脂（无营养）的玻璃容器内，挑选均匀一致的预萌发供体于一侧琼脂表面，共三排。容器表面覆盖一层封口膜，置于可控培养箱。小麦幼苗生长7天后，将预萌发的受体呈三排播于另一侧。在容器的中间插入一张事先灭菌的白色纸板，边缘高于琼脂表面1cm。整个容器由供体和受体幼苗分成了两等隔离部分。容器表面再次覆盖一层封口膜，置于可控培养箱。10天测定作物和杂草的生长指标，例如根长和株高。

ECAM是由PBM和RST的延伸，结合了两者的技术和优点。ECAM能在室内条件下快速，简单且便宜完成作物化感品种的筛选[33]。在生物测试中纸板的使用避免了供体和受体的资源竞争。供体植物根遍布整个容器，进而可完全与受体相互作用。来自活体供体根系分泌的化感物质通过琼脂扩散到开来，从而影响受体植物的生长。不断生长的供体，化感物质不断地释放和积累，这种方式与田间自然情况相似。生物测试法的是无菌环境，所以避免了微生物干扰。所获得的结果有助于供体幼苗的化感效应评价[33]。受体可轻易从琼脂中取得并用于测量和进一步的化学分析。该实验，可将琼脂收集进一步用于化学成分分析。存在于琼脂中的化感物质很容易由有机溶剂提取和回收。ECAM的另一个特点是可清晰的看到化感影响根系生长。

受体



供体

图4 等隔离体积共培法（ECAM）

Fig. 4 Equal Compartment Agar Method

### **1.2.3** 田间筛选法（**Field Screening**）

田间筛选法（图5）可广泛运用于评价水稻化感作用对水生杂草的影响[14,48,51-54]。在美国，近12000品种对*Hetheranthera Limosa* (Sw.) Willd.和5000品种对*Ammannia coccinea* Rottb进行田间化感评价[53-54]。通常，5到7颗供体品种播于0.75\*0.75m格子区域中，两个重复。受体杂草来自自然一致产生的。供体的化感活性在初穗期时测定：水稻径向距离内无杂草为最大边缘活性区域，定义为该区域无杂草生长；且以无化感活性作为对照，换算径向区域杂草抑制率。筛选出的强化感品种进一步验证。

在进行田间化感水稻品种的筛选时，很难避免消除资源竞争的影响[33]。Olofsdotter和

Navarez[55]水稻田中杂草减少量由于水稻和杂草的资源竞争和水稻的化感作用共同起作用的。因此，田间化感抑制杂草的抑制率很难换算。室内生物测试可消除所有可能干拢，以致于在同一时间研究水稻与杂草相互作用时，复杂田间条件下将得出不同结果[32]。Olofsdotter和Navarez[55]提出获得可靠的田间实验结果，必须结合室内生物测试。另外，田间筛选化感特性法耗时，需要较大的空间，而且价格昂贵。



受体

供体

图5 田间筛选法Fig. 5 Field Screening

### **1.2.4** 化学筛选法**(Chemical Screening)**

作物品种含有高水平的化感物质使其具有强化感活性[50,56-57]。直接地化学筛选法可区分化感与非化感品种。通过化学筛选法得到的化感潜力水稻在室内或者田间进一步进行筛选

[58]，因此可相对减少其它筛选生物测试所需的时间和空间。化学筛选法的结果同样有助于

其它生物测试的实验数据，并揭示不同化感潜力作物品种间的遗传性状[56]。化学筛选法也存在一个缺点，即需预先知道供体植物的化感物质，这样化学筛选法才能进行[33,50, 56,59]。所以以上同样需要可靠的数据分析和昂贵设施。因此，收集来的大量的作物品种进行直接地化学筛选将耗资巨大。值得一提的是室内试验和田间试验可能需要数月甚至更久才能消除它们之间的种种疑虑[24]。总之，在可控环境下或田间条件下有必要将化学筛选法结合其它生物测试法进行作物品种筛选。

总之，大量的生长测试运用于评价作物化感潜力，选用何种生物测试法取决于研究对象、受体、分析设备和资金。在化感研究的生物测试讨论中，Leather和Einhellig[60]认为没有哪种

生物测试能满足所有对检测具有生物活性的化感物质的需求，且应谨慎使用生物测试来评价化感作物。为了建立可靠的作物化感抑草，必须结合多种生物测试法进行评价。

评价成千上万的作物的化感抑草活性是相当的昂贵的。特定的实验方法应该是从室内条件下，到温室条件下，再进一步到田间试验，这样即可达到减少时间，空间和劳力的作用[50]。通过室内生物测试我们可得到一小部分的强化感活性的作物品种，然后进行温室室条件下再进一步进行田间试验去验证室内结果。因此，实质上可减少这个大筛选工程的时间，空间和劳力。

生物测试法很容易就得到化感物质的提取液和特征，需要利用化感物质去理解作物间不同化感活性的物质和后期遗传基础。相当多的化学研究表明，化学物质可解释品种间的不同化感潜力。使用琼脂作为生长媒介非常有助于化感物质的收集和检测[18, 33]。到目前为止，所有的化感作物所涉及到化学物质之间的协同作用[61-63]。所以我们必须优先考虑到多种化感物质试剂的筛选法[50, 57]。

基于化感抑草能力的作物品种筛选的关键是充分利用化感作物[56]。化感品种通过自然分泌生物活性的化感物质到邻近受体从而抑制杂草，因此可减少对合成除草剂的依赖。现代

DNA技术可容易定位化感活性的基因位点。然而，在进行育种计划改良作物的化感潜力前，仍需要更多的化感品种的筛选工作。

本研究结合前人生物测试法的种种优点及改善其各自的不足，得到一个更客观，更直接的化感水稻生物测试方法，所以本研究选用国际上公认的化感水稻品种PI312777为供体，以田间收集的无芒稗（*Echinochloa crusgalli* L.）为受体，通过稻稗的不同种植模式进行分析，最终获取化感水稻抑草圈筛选化感水稻的最优方法。主要考察以下几个方面，1、盆栽稻稗共培情况下，不同叶期化感水稻对稗草生长影响的差异；2、盆栽稻稗共培情况下，化感水稻对不同距离种植稗草生长的影响及不同距离点间土壤营养水平的差异；3、化感水稻抑草圈筛选方法田间实验验证及确定，以期确定化感水稻抑草圈评价方法能够适用田间强化感水稻品种的筛选提供客观科学的佐证。

# **2** 材料与方法

本试验于福建农林大学农业生态研究所田间实验区夏季进行。试验期间环境情况：温度波动范围25-38℃，空气相对湿度波动范围在44-81%。连续四年的土壤理化指标情况：第一年（2009年）土壤基本理化指标：pH=6.4，有机质30.9g·kg -1，全氮2.09g·kg -1，全磷1.17g·kg -1，全钾1.23g·kg -1；速效氮30.2mg·kg -1，速效磷118.3mg·kg -1，速效钾387.5mg·kg -1。第二年(2010年)土壤基本理化指标：pH=6.2，有机质29.5g·kg -1，全氮2.15g·kg -1，全磷1.08g·kg -1，全钾1.34g·kg -1；速效氮33.2mg·kg -1，速效磷120.6mg·kg -1，速效钾409.8mg·kg -1。第三年（2011年）土壤基本理化指标：pH=6.1，有机质31.6g·kg -1，全氮3.65g·kg -1，全磷2.75g·kg -1，全钾7.49g·kg -1；速效氮69.5 mg·kg -1，速效磷250.9mg·kg -1，速效钾237.6mg·kg -1。第四年（2012年）土壤基本理化指标：pH 6.0，有机质36.2 g·kg -1，全氮2.90 g·kg -1，全磷1.71 g·kg -1 全

钾1.33 g·kg -1；速效氮41.2 mg kg-1，速效磷132.3 mg kg-1，速效钾326.5 mg kg-1。以土培盆栽及田间种植的方式进行化感水稻抑草圈评价方法的建立及应用。

## **2.1** 实验材料

以国际上公认的强化感潜力水稻品种PI312777（简称PI）为供体，以无芒稗（Barnyard grass, *Echinochloa crus-galli L*.）为受体进行化感水稻抑草圈评价方法的建立。其余待化感潜力验证水稻品种：Lemont（来自美国，简称LE），Taichung Native1（来自中国台湾），

Azucena（来自菲律宾），IAC47（来自巴西），Iguape cateto（来自巴西）；以下水稻品种均选购于中种集团农嘉种业股份有限公司：谷优929，II优1259，II优1273，金优2155，广优明118，II优明118，T78优2155，金优07，特优73，金优明100，特优884，II优航2号，Y两优599，昌优964，川香优6号，川优673，福优158，冈优139，谷优964，金优1398，京福1优943，乐优94，汕优82，两优航2号，全优77，深优957，双两优1号，特优009，天优673，威优89，宜香2292，宜优673，岳优9113，中种优948。

## **2.2** 实验设计

**试验I**取30 kg事先挑除残根残枝的混匀风干稻田土于圆盆中（圆盆规格为直径51 cm，高16 cm），加10L水并搅匀并静置1天，挑选预萌发的PI312777种子6颗，以间距2 cm围绕盆心种植，每天定时添加蒸馏水保持土壤湿润（至土壤表层有水层出现），手工除去试验过程中生长的杂草。待水稻长至3叶（14天），4叶（21天），5叶（28天）和6叶期（35天）时，挑选预萌发稗草6颗两两等间距以半径6cm，12cm环绕水稻种植，以单种稗草做为对照（图6，

A）. 一周后沿稗草周围土壤连带稗草一并挖出，小心地将稗草根系上的土壤去除，测定稗草根长、株高和植株生物量，试验3个重复。稗草的受抑制程度即受体的相对抑制率（inhibition

rate，IR）计算公式为，IR =(TR-CK) /CK×100%，其中TR为处理值，CK为对照值。

|  |  |
| --- | --- |
| Barnyardgrass Rice |  |
| A 试验 I | B 试验 II |



图6 稻稗共培模式

Fig. 6 The mode of rice mixed cultured with barnyardgrass

**试验II**前期准备同试验方法I。待化感水稻长至化感作用最强的叶期（5叶期）时，挑选预萌发稗草以每圈间距2cm环绕水稻种植，共10圈，以单种稗草做为对照(图6，B)。1周后沿稗草周围土壤连带稗草一并挖出，小心地将稗草根系上的土壤去除，测定稗草根长、株高和植株生物量，试验3个重复。本试验连续重复3年（2009年、2010年和2011年）。按试验I之方法测定受体稗草的根长、株高和生物量，计算相对抑制率。以稗草抑制率达到50%，确定为化感水稻抑草圈评价方法的稗草种植距离，用字母X表示。

## **2.3** 田间抑草圈方法验证

将稻田分隔成长宽为1m\*1m的格子区域，挑选预萌发的水稻种子6颗，小区中心以半径2 cm等间距种植，每天定时添加自来水保持土壤湿润（至土壤表层有水层出现），手工除去试验过程中生长的杂草。待水稻长至化感作用最强的叶期（5叶期）时，挑选预萌发稗草6颗两两等间距以半径Xcm环绕水稻种植，以单种稗草做为对照(图7)。1周后测定稗草和水稻的根长、株高和生物量，试验3个重复。按2.2试验I之方法测定受体稗草的根长、株高和生物量，计算相对抑制率。



PI312777 Lemont Barnyardgrass







图7 田间稻稗共培模式

Fig. 7 The mode of rice mixed cultured with barnyardgrass in the field

## **2.4** 琼脂三明治土壤化感潜力评价

参照孙红艳等[64]采用土壤琼脂三明治生物测试法。称取2.3实验中田间抑草圈水稻径向距离Xcm处的稗草根部土壤10g于1.3cm（高）×6.2cm（直径）培养皿中，倒入30mL冷却至约45℃的浓度为0.8%的琼脂溶液，充分混匀，待凝固后再加入2ml浓度为0.5%的琼脂溶液覆盖表面，冷却后琼脂表面中播入10粒预萌发的稗草，以无稗草种植土壤为对照，试验重复5次，置于人工气候箱中。培养条件控制：昼夜温度分别为30℃/25℃，昼夜时间分别为每天光照

12h/12h，相对湿度为75%，光照强度为10000lux，3天后测定稗草根长、株高和生物量。不同土壤的化感作用潜力，即受体稗草的相对抑制率（inhibition rate, *IR*）按2.2试验I计算。

## **2.5** 土壤直接生物测试法

取2.3实验中田间抑草圈水稻径向距离X±1 cm处的稗草根部土壤500g两份，其中一份土壤经过7天的室外晾晒放置（试验环境条件同试验2），另一份4oC冰箱保存， 于

10.0cm（高）×20.0cm（直径）塑料碗中，加500mL蒸馏水至表层有水层出现，表面两两等间距（间距4cm）中播入7颗预萌发的稗草，试验重复5次，置于人工气候箱中。培养条件控制：昼夜温度分别为30℃/25℃，昼夜时间分别为每天光照12h/12h，相对湿度为75%，光照强度为

10000lux，7天后测定稗草根长、株高及生物量。以空白种植土作为对照。不同土壤的化感作用潜力的计算同试验2.4。

## **2.6** 土壤营养生理指标测定

取2.3实验中田间抑草圈水稻径向距离12cm处稗草根际土壤经风干、研磨、过2mm筛用

于土壤速效氮、磷和钾含量测定。

### **2.6.1** 速效铵态氮含量测定

称取5.00g土壤样品于250mL三角瓶中，加入20% NaCl溶液50mL，于摇床中180 r·min-1, 30min后，悬液静置5min后用定性滤纸过滤。吸取5mL滤液于25mL比色管中，加水稀释至20mL左右后，加入1mL 50%酒石酸钾钠(KNaC4H6O6·4H 2O)溶液，1.5mL 20%

NaOH溶液，充分摇动，静置15min后加入0.5mL纳氏试剂，边加边摇动，然后定容至刻度。30min后于390nm处测定吸光度，平行测定3次取均值。按标线获得铵态氮浓度[65]。

### **2.6.2** 速效硝态氮含量测定

称取5.00g土壤样品于250mL三角瓶中，加入50mL 2mol·L-1 KCl溶液，于摇床中180 r·min-1，1h后，悬液静置5min后用定性滤纸过滤。测定浸提液于220nm和275nm处的吸光度A220和A275，按A=A220-2A275进行计算校正吸光度，平行测定3次。按标线获得硝态氮浓度[65]。

### **2.6.3** 速效磷含量测定

称取5.00g土壤样品于100mL三角瓶中，加入25mL提取剂，于摇床中180 r·min-1, 5min

后，悬液静置5min后用定性滤纸过滤。吸取1mL滤液于试管中，加入24mL工作液，于

700nm处测定吸光度，平行测定3次。按标线获得速效磷浓度。

### **2.6.4** 速效钾含量测定

称取5.00g田间抑草圈经风干、研磨、过2mm筛的土壤样品于250mL三角瓶中，加入50mL 1mol·L-1醋酸铵，于摇床中180 r·min-1, 30min后，悬液静置5min后用定性滤纸过滤，滤液直接用火焰光度计测定吸光值，按标线获得速效钾浓度。

以上实验均重复三次。土壤速效氮、磷和钾的含量（mg·kg -1）=C×V/m(C：速效氮、磷和钾的浓度/mg·L -1；V：浸提液体积/mL；m：土壤质量/g)[65]。

## **2.7** 生理生化指标测定

称取2.3实验中0.5g水稻或稗草倒二叶叶片剪碎后于研钵中，加入5mL预冷的50mmol·L-1 pH 7.0磷酸缓冲液(phosphate buffer solution, PBS)含有1%聚乙烯聚吡咯烷酮(polyvinyl polypyrrolidone, PVP)的提取液，冰浴中研磨至匀浆，匀浆经4000 r·min-1离心10

min，取上清液用于超氧化歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)等生理生化指标的测定，以上试验均平行测定3次。

### **2.7.1** **SOD**活性测定

采用[氮蓝四唑](http://www.aladdin-reagent.com/thir.asp?Rea_SubID=13471)法(NBT)测定。移取100μL酶液于试管当中，加入3.9mL反应混合液和0.1mL80.2μmol·L-1 核黄素，以不加酶液作为参照，于光强度为3000lux下10min后，于

560nm处测定OD值。以每分钟抑制NBT光氧化还原50%的酶用量为一个酶活单位。酶活性以unit·mg -1(pro)表示[66]。

### **2.7.2** **POD**活性的测定

采用愈疮木酚法测定。移取20μL酶液于试管当中，加入1mL 0.2mol·L-1 pH 6.0的磷酸缓冲液和3mLPOD反应液后，立即于470nm下比色，酶活性以△D470nm·min -1·mg -1(pro)表示[66]。

### **2.7.3** **CAT**活性的测定

2.9mL反应液含有0.5mL 0.2mol·L-1 H2O2, 0.1mL酶液，2.3ml 0.1mol·L-1 Tris-HCl，立即于240nm处测定OD值，每分钟测定一次，连续测定四次。酶活性以mg(H2O2)·min -1·mg -1(pro)表示[66]。

### **2.7.4** **MDA**含量的测定

称取2.3实验中0.5g水稻或稗草倒二叶叶片剪碎后于研钵中，于研钵中，加10%TCA(三氯乙酸) 2 mL和少量石英砂，研磨；进一步加入8 mL TCA充分研磨，匀浆液以4000 r·min-1下离心10 min，上清液即为提取液。移取2 ml提取液（对照为2 ml蒸馏水）于试管中，加2 mL0.6% TBA（硫代巴比妥酸，采用10% TCA配制），混匀，置于沸水浴15 min，迅速冷却后，在4000 r·min-1下离心5 min。取上清液于450 nm, 532 nm和600 nm下测定OD值，实验重复3次。计算公式为MDA含量为[6.45(D352-D600) -0.56D45]×V/W（注：单位umol·g -1；V：提取液体积/L；W：质量/g）[66]。

## **2.8** 光合生理指标测定

在晴天上午9时进行光合生理指标的测定。采用美国Gene公司LI-6400型自动便携式光合测定系统测定净光合速率（Pn）、大气温度（Ta）、大气CO2浓度（Ca）、细胞间隙CO2浓度

（Ci）、蒸腾速率（Tr）等气体交换参数，气孔限制值（Li）为1-Ci/Ca计算所得。测定过程采用生物效应灯为光源，光强（PFD）为1200umol·m -2·s -1，大气温度为28-30℃，△Ca为

±1ul·L -1。叶绿素含量的测定采用便携式叶绿素测定仪（日本, SPAD-502）测定叶绿素相对含量（SPAD值）。重复测定5次[66]。

## **2.9** 组织营养生理指标测定

参照鲍士旦所编《土壤农化分析》中植物组织氮、磷、钾的测定方法[65]。植株干粉用H2SO4-H2O2消煮，消煮液用于氮、磷、钾含量测定。氮的测定采用凯氏定氮法，钒钼黄比色法，钾的测定采用火焰分光光度法。所用试剂均为国产分析纯。

## **2.10** 抑草圈评价方法确立

取30 kg事先挑除残根残枝的混匀风干稻田土于圆盆中（圆盆规格为直径51 cm，高16

cm），加10L水并搅匀并静置1天，挑选预萌发水稻种子6颗以间距2cm播于水盆中央，每天定时添加蒸馏水保持土壤湿润（至土壤表层有水层出现），手工除去试验过程中生长的杂草。待水稻长至5叶期时，挑选预萌发稗草6颗两两等间距以半径12cm环绕水稻种植，以单种稗草做为对照。一周后按2.2实验I之方法测定稗草根长、株高和生物量，计算相对抑制率，试验3个重复（图8）。

Rice

Barnyardgrass



图8 稻稗共培模式

Fig. 8 The mode of rice mixed cultured with barnyardgrass

## **2.11** 数据处理

所获数据采用DPS 软件进行统计并进行方差分析。数据间比较采用最小显著差数法

（LSD 法），以小写字母表示差异达到*p*<0.05 显著水平，以大写字母表示差异达到*p*<0.01

显著水平。

# **3.** 结果与分析

## **3.1** 不同叶期化感水稻**PI312777**对稗草的影响分析

不同叶期化感水稻PI312777对稗草的影响（表1）结果表明，随着化感水稻叶期数的增加，化感水稻PI312777对稗草的根长、株高和生物量的抑制作用呈递增趋势。

在稗草与水稻径向距离为6cm时，3叶期、4叶期、5叶期两两之间比较，化感水稻PI312777对稗草的根长、株高及生物量均存在显著差异，而5叶期与6叶期之间，化感水稻PI312777对稗草的根长、株高及生物量的抑制作用不存在显著差异。在稗草与水稻径向距离为12cm时，其结果与径向距离为6cm时的结果相似。可见，3叶期之后化感水稻的抑草能力随叶期增大而增强，且不同叶期之间存在显著差异，在5-6叶期对稗草的抑制能力达

到最大。因此，在以最强的化感抑草能力为前提下减少筛选时间，选择水稻5叶期为化感水稻抑草圈评价方法的叶期数。

表1 不同叶期化感水稻对稗草的影响

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 根长(cm) Root length | 根长抑制率  Root IR | 株高(cm) Plant height | 株高抑制率  Plant IR | 生物量(g) Biomass | 生物量抑制率  Biomass IR |
| 径向距离 6cm Radial distance 6cm | | | | | | |
| CK | 8.6±0.6Aa | / | 13.1±0.7Aa | / | 0.0069±0.0003Aa | / |
| 3 叶期  3 leaf stage | 7.5±1.3ABab\* | 12.8±15.2CDde | 9.3±0.4Cc | 29.5±3.1 Cc | 0.0037±0.0002Cc | 46.6±3.6Cd |
| 4 叶期  4 leaf stage | 6.2±0.7Bb | 27.5±8.2Cd | 7.8±0.4Dd | 41.0±2.9 Bb | 0.0028±0.0002Dd | 59.8±3.3Bc |
| 5 叶期  5 leaf stage | 2.7±0.5CDde | 69.0±5.2ABab | 6.3±0.2Ee | 52.4±1.2Aa | 0.0019±0.0001Eef | 72.9±1.4Aab |
| 6 叶期  6leaf stage | 2.2±0.3De | 74.4±3.5Aa | 6.2±0.5Ee | 52.7±3.8Aa | 0.0015±0.0003Ef | 78.3±4.3Aa |
| 径向距离 12cm Radial distance 12cm | | | | | | |
| CK | 8.6±0.6Aa | / | 13.1±0.7Aa | / | 0.0069±0.0003Aa | / |
| 3 叶期  3 leaf stage | 8.5±1.0Aa | 1.6±11.7De | 11.4±0.4Bb | 12.6±3.0 Dd | 0.0050±0.0002Bb | 28.0±3.4De |
| 4 叶期  4 leaf stage | 7.5±0.7ABab | 12.4±8.2CDde | 9.0±0.8Cc | 31.4±6.3 Cc | 0.0035±0.0005Cc | 49.4±7.2Cd |
| 5 叶期  5 leaf stage | 4.1±0.8Cc | 52.3±8.8Bc | 6.5±0.4Ee | 50.1±2.7Aa | 0.0020±0.0002Ee | 70.7±3.1Ab |
| 6 叶期  6leaf stage | 4.0±0.5Ccd | 53.5±5.8ABbc | 6.3±0.4Ee | 51.9±3.1Aa | 0.0016±0.0003Ef | 76.8±4.3Aab |

Table 1 Effect of allelopathic rice PI312777 at different leave stages on the barnyardgrass

注：同行不同小写字母表示*P*<0.05水平上差异显著和不同大写字母表示*P*<0.01水平上差异极显著率，下同Different lowercase and uppercase letters in the same column represent significant difference at *p*<0.05 and *p*<0.01, respectively. The same below.

## **3.2** 化感水稻**PI312777**对不同距离稗草的影响分析

以5叶期化感水稻PI312777对不同距离稗草的影响结果表明，三年之间的结果（根长、株高及生物量均不存在显著差异。随着与化感水稻距离地不断增大，稗草的根长、株高及生物量的受抑制作用呈下降趋势。

化感水稻PI312777对不同距离稗草根长的影响（表2A、表2B、表2C），抑制率高于

50%的最远圈层为第5圈，即水稻径向距离为12cm，水稻根长为4.1cm。

化感水稻PI312777对不同距离稗草株高的影响（表3A、表3B、表3C），其中抑制率高于50%的最远圈层为第5圈，即水稻径向距离为12cm，水稻株高为7.0cm。

化感水稻PI312777对不同距离稗草生物量的影响（表4A、表4B、表4C），其中抑制率高于50%的最远圈层为第7圈，即水稻径向距离为16cm，且径向距离为12cm的稗草生物量抑制率为64.2%。

可见，化感水稻PI312777对径向距离12cm的稗草根长、株高及生物量的抑制率均高达50%以上，且以生物量的抑制率最大。因此，在缩减时间的前提下，移入稗草7天后以抑制率为50%的水稻径向距离12cm定义为化感水稻抑草圈评价方法的抑草距离。

表2 A 化感水稻PI312777对不同稗草圈下稗草根长的影响

Table 2 A Effect of allelopathic rice PI312777 on the root of different barnyardgrass circles

| 不同圈层  Different circle |  | 第一年  First year |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 根长  Root length | 对照  CK | 抑制率/% |
| 第 1 圈/cm  The first circle | 2.5±0.3Aa\* | 8.6 | 70.9±3.5Aa  \* |
| 第 2 圈/cm  The second circle | 2.7±0.4Aa | 8.5 | 68.6±4.7Aa |
| 第 3 圈/cm  The third circle | 2.9±0.3Aa | 8.3 | 66.3±3.5Aa |
| 第 4 圈/cm  The fourth circle | 3.5±0.6Aa | 8.7 | 59.3±7.0Aa |
| 第 5 圈/cm  The fifth circle | 4.1±0.5Aa | 8.6 | 52.3±5.8Aa |
| 第 6 圈/cm  The sixth circle | 4.6±0.3Aa | 8.6 | 46.5±3.5Aa |
| 第 7 圈/cm  The seventh circle | 5.5±0.3Aa | 8.5 | 36.0±3.5Aa |
| 第 8 圈/cm  The eighth circle | 6.4±0.4Aa | 8.5 | 25.6±4.7Aa |
| 第 9 圈/cm  The ninth circle | 6.9±0.6Aa | 8.4 | 19.8±7.0Aa |
| 第 10 圈/cm  The tenth circle | 7.4±0.5Aa | 8.6 | 14.0±5.8Aa |

表2 B 化感水稻PI312777对不同稗草圈下稗草根长的影响

Table 2B Effect of allelopathic rice PI312777 on the root of different barnyardgrass circles

| 不同圈层  Different circle | 第二年  Second year | |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 根长  Root length | 对照  CK | 抑制率/% |
| 第 1 圈/cm  The first circle | 2.6±0.5Aa | 8.6 | 70.1±5.7Aa |
| 第 2 圈/cm  The second circle | 2.8±0.4Aa | 8.5 | 67.8±4.6Aa |
| 第 3 圈/cm  The third circle | 3.1±0.4Aa | 8.8 | 64.4±4.6Aa |
| 第 4 圈/cm  The fourth circle | 3.7±0.4Aa | 8.2 | 57.5±4.6Aa |
| 第 5 圈/cm  The fifth circle | 4.0±0.3Aa | 8.7 | 54.0±3.4Aa |
| 第 6 圈/cm  The sixth circle | 4.7±0.6Aa | 8.5 | 46.0±6.9Aa |
| 第 7 圈/cm  The seventh circle | 5.4±0.3Aa | 8.6 | 37.9±3.4Aa |
| 第 8 圈/cm  The eighth circle | 6.3±0.3Aa | 8.7 | 27.6±3.4Aa |
| 第 9 圈/cm  The ninth circle | 7.0±0.5Aa | 8.4 | 19.5±5.7Aa |
| 第 10 圈/cm  The tenth circle | 7.3±0.4Aa | 8.6 | 16.1±4.6Aa |

表2 C 化感水稻PI312777对不同稗草圈下稗草根长的影响

Table 2C Effect of allelopathic rice PI312777 on the root of different barnyardgrass circles

| 不同圈层  Different circle |  | 第三年  Third year |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 根长  Root length | 对照  CK | 抑制率/% |
| 第 1 圈/cm  The first circle | 2.5±0.5Aa | 8.6 | 70.9±5.8Aa |
| 第 2 圈/cm  The second circle | 2.6±0.3Aa | 8.6 | 69.8±3.5Aa |
| 第 3 圈/cm  The third circle | 3.2±0.5Aa | 8.4 | 62.8±5.8Aa |
| 第 4 圈/cm  The fourth circle | 3.7±0.5Aa | 8.6 | 57.0±5.8Aa |
| 第 5 圈/cm  The fifth circle | 4.3±0.6Aa | 8.6 | 50.0±7.0Aa |
| 第 6 圈/cm  The sixth circle | 4.5±0.4Aa | 8.3 | 47.7±4.7Aa |
| 第 7 圈/cm  The seventh circle | 5.6±0.4Aa | 8.9 | 34.9±4.7Aa |
| 第 8 圈/cm  The eighth circle | 6.5±0.4Aa | 8.8 | 24.4±4.7Aa |
| 第 9 圈/cm  The ninth circle | 6.8±0.3Aa | 8.7 | 20.9±3.5Aa |
| 第 10 圈/cm  The tenth circle | 7.0±0.5Aa | 8.7 | 18.6±5.8Aa |

表3 A 化感水稻PI312777对不同稗草圈下稗草株高的影响

Table 3A Effect of allelopathic rice PI312777 on on the height of different barnyardgrass circles

| 不同圈层  Different circle |  | 第一年  First year |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 根 长 Root length | 对照 CK | 抑制率/% |
| 第 1 圈(4cm)  The first circle | 3.2±0.9Aa\* | 14.3 | 78.3±6.5Aa\* |
| 第 2 圈(6cm)  The second circle | 4.4±0.3Aa | 14.3 | 70.0±2.3Aa |
| 第 3 圈(8cm)  The third circle | 5.3±0.7Aa | 14.6 | 63.7±5.1Aa |
| 第 4 圈(10cm)  The fourth circle | 6.6±0.3Aa | 14.5 | 54.2±5.4Aa |
| 第 5 圈(12cm)  The fifth circle | 7.3±0.3Aa | 14.5 | 49.6±2.2Aa |
| 第 6 圈(14cm)  The sixth circle | 7.5±0.3Aa | 14.6 | 48.6±1.8Aa |
| 第 7 圈(16cm)  The seventh circle | 8.9±0.5Aa | 14.6 | 38.8±3.7Aa |
| 第 8 圈(18cm)  The eighth circle | 9.6±0.8Aa | 14.5 | 33.7±5.3Aa |
| 第 9 圈(20cm)  The ninth circle | 10.6±0.6Aa | 14.6 | 27.0±4.2Aa |
| 第 10 圈(22cm)  The tenth circle | 10.6±0.7Aa | 14.3 | 26.9±4.7Aa |

表3 B 化感水稻PI312777对不同稗草圈下稗草株高的影响

Table 3B Effect of allelopathic rice PI312777 on on the height of different barnyardgrass circles

| 不同圈层  Different circle |  | 第二年  Second year |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 根长 Root  length | 对照 CK | 抑制率/% |
| 第 1 圈(4cm) The first circle | 3.6±0.9Aa | 13.9 | 74.2±6.7Aa |
| 第 2 圈(6cm)  The second circle | 5.3±0.7Aa | 13.9 | 62.2±5.2Aa |
| 第 3 圈(8cm)  The third circle | 5.4±0.6Aa | 13.9 | 61.5±4.2Aa |
| 第 4 圈(10cm)  The fourth circle | 6.3±0.9Aa | 14.2 | 55.0±6.6Aa |
| 第 5 圈(12cm)  The fifth circle | 6.8±0.1Aa | 14.0 | 51.7±0.5Aa |
| 第 6 圈(14cm)  The sixth circle | 7.3±0.4Aa | 14.0 | 48.1±2.5Aa |
| 第 7 圈(16cm)  The seventh circle | 8.8±0.3Aa | 14.3 | 36.9±1.8Aa |
| 第 8 圈(18cm)  The eighth circle | 9.7±1.0Aa | 14.1 | 30.9±7.0Aa |
| 第 9 圈(20cm)  The ninth circle | 10.0±0.9Aa | 14.2 | 28.3±6.3Aa |
| 第 10 圈(22cm)  The tenth circle | 10.5±1.0Aa | 14.2 | 24.8±7.0Aa |

表3 C 化感水稻PI312777对不同稗草圈下稗草株高的影响

Table 3C Effect of allelopathic rice PI312777 on on the height of different barnyardgrass circles

| 不同圈层  Different circle |  | 第三年  Third year |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 根长 Root length | 对照 CK | 抑制率/% |
| 第 1 圈(4cm)  The first circle | 3.3±0.8Aa | 14.3 | 76.8±5.2Aa |
| 第 2 圈(6cm)  The second circle | 5.0±0.1Aa | 14.1 | 65.0±0.8Aa |
| 第 3 圈(8cm)  The third circle | 5.4±0.7Aa | 14.5 | 62.3±4.8Aa |
| 第 4 圈(10cm)  The fourth circle | 6.5±0.6Aa | 14.2 | 55.0±4.0Aa |
| 第 5 圈(12cm)  The fifth circle | 6.9±0.1Aa | 14.3 | 51.9±0.8Aa |
| 第 6 圈(14cm)  The sixth circle | 7.6±1.0Aa | 14.6 | 47.2±6.9Aa |
| 第 7 圈(16cm)  The seventh circle | 8.9±0.3Aa | 14.7 | 37.8±1.8Aa |
| 第 8 圈(18cm)  The eighth circle | 9.1±0.4Aa | 14.8 | 36.3±3.0Aa |
| 第 9 圈(20cm)  The ninth circle | 10.2±0.4Aa | 14.6 | 28.6±2.7Aa |
| 第 10 圈(22cm)  The tenth circle | 10.7±0.6Aa | 14.3 | 25.5±4.1Aa |

表4 A化感水稻PI312777对不同稗草圈下稗草生物量的影响

Table 4A Effect on the biomass of different barnyardgrass circles from allelopathic rice PI312777

| 不同圈层  Different circle | 第一年  First year |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 根长 Root length | 对 照  CK | 抑制率/% |
| 第 1 圈(4cm)  The first circle | 0.0009±0.0003Aa\* | 0.0065 | 86.1±4.1Aa\* |
| 第 2 圈(6cm)  The second circle | 0.0013±0.0001Aa | 0.0062 | 80.8±1.4Aa |
| 第 3 圈(8cm)  The third circle | 0.0016±0.0002Aa | 0.0063 | 76.8±3.3Aa |
| 第 4 圈(10cm)  The fourth circle | 0.0022±0.0004Aa | 0.0069 | 67.4±5.8Aa |
| 第 5 圈(12cm)  The fifth circle | 0.0026±0.0002Aa | 0.0068 | 62.5±2.4Aa |
| 第 6 圈(14cm)  The sixth circle | 0.0026±0.0001Aa | 0.0067 | 61.3±1.9Aa |
| 第 7 圈(16cm)  The seventh circle | 0.0033±0.0003Aa | 0.0070 | 50.9±4.0Aa |
| 第 8 圈(18cm)  The eighth circle | 0.0037±0.0004Aa | 0.0070 | 45.5±5.7Aa |
| 第 9 圈(20cm)  The ninth circle | 0.0045±0.0004Aa | 0.0069 | 34.5±5.7Aa |
| 第 10 圈(22cm)  The tenth circle | 0.0045±0.0004Aa | 0.0069 | 34.5±6.0Aa |

表4 B化感水稻PI312777对不同稗草圈下稗草生物量的影响

Table 4B Effect on the biomass of different barnyardgrass circles from allelopathic rice PI312777

| 不同圈层  Different circle | 第二年  Second year |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 根长 Root length | 对照 CK | 抑制率/% |
| 第 1 圈(4cm)  The first circle | 0.0011±0.0003Aa | 0.0065 | 83.4±4.3Aa |
| 第 2 圈(6cm)  The second circle | 0.0016±0.0002Aa | 0.0066 | 75.6±3.4Aa |
| 第 3 圈(8cm)  The third circle | 0.0016±0.0002Aa | 0.0064 | 75.2±2.7Aa |
| 第 4 圈(10cm)  The fourth circle | 0.0020±0.0005Aa | 0.0067 | 68.5±7.1Aa |
| 第 5 圈(12cm)  The fifth circle | 0.0023±0.0000Aa | 0.0065 | 65.0±0.5Aa |
| 第 6 圈(14cm)  The sixth circle | 0.0025±0.0002Aa | 0.0062 | 61.2±2.7Aa |
| 第 7 圈(16cm)  The seventh circle | 0.0033±0.0001Aa | 0.0068 | 49.0±1.9Aa |
| 第 8 圈(18cm)  The eighth circle | 0.0037±0.0005Aa | 0.0069 | 42.6±7.6Aa |
| 第 9 圈(20cm)  The ninth circle | 0.0041±0.0005Aa | 0.0068 | 36.7±8.2Aa |
| 第 10 圈(22cm)  The tenth circle | 0.0044±0.0006Aa | 0.0068 | 32.2±9.0Aa |

表4 C化感水稻PI312777对不同稗草圈下稗草生物量的影响

Table 4C Effect on the biomass of different barnyardgrass circles from allelopathic rice PI312777

| 不同圈层  Different circle | 第三年  Third year |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 根长 Root length | 对照 CK | 抑制率/% |
| 第 1 圈(4cm)  The first circle | 0.0010±0.0002Aa | 0.0068 | 85.1±3.4Aa |
| 第 2 圈(6cm)  The second circle | 0.0015±0.000Aa | 0.0069 | 77.5±0.5Aa |
| 第 3 圈(8cm)  The third circle | 0.0016±0.0002Aa | 0.0070 | 75.8±3.1Aa |
| 第 4 圈(10cm)  The fourth circle | 0.0021±0.0003Aa | 0.0068 | 68.3±4.3Aa |
| 第 5 圈(12cm)  The fifth circle | 0.0023±0.0001Aa | 0.0067 | 65.0±0.8Aa |
| 第 6 圈(14cm)  The sixth circle | 0.0027±0.0005Aa | 0.0069 | 60.0±7.4Aa |
| 第 7 圈(16cm)  The seventh circle | 0.0034±0.0001Aa | 0.0070 | 49.9±1.9Aa |
| 第 8 圈(18cm)  The eighth circle | 0.0035±0.0002Aa | 0.0069 | 48.3±3.2Aa |
| 第 9 圈(20cm)  The ninth circle | 0.0042±0.0002Aa | 0.0064 | 36.7±3.4Aa |
| 第 10 圈(22cm)  The tenth circle | 0.0045±0.0004Aa | 0.0064 | 32.8±5.3Aa |

## **3.3** 抑草圈土壤琼脂三明治生物测试法分析

不同化感潜力水稻根部化感潜力（图9）结果表明，化感水稻PI的根部土壤化感潜力均显著高于非化感水稻Lemont，主要表现为稗草共培下，化感水稻PI的根部土壤对稗草的根长、株高及生物量的抑制率比非化感水稻LE分别高出27.7%、17.0%、34.0%；而无稗草共培下，化感水稻PI312777的根部土壤对稗草的根长、株高及生物量的抑制率比非化感水稻LE高出17.8%、14.8%、21.8%。进一步分析表明，稗草共培下，化感水稻PI对根部土壤对稗草的根长、株高及生物量的抑制率分别提高了10.4%、2.7%、12.7%，而非化感水稻

LE则分别提高了0.5%、0.5%、0.5%。

可见，化感水稻PI312777根际土壤对稗草具有显著的抑制作用，且稗草共培下可提高化感水稻PI312777根际土壤的抑草能力。



PI/BYG PI LE/BYG LE

Aa

Aa

Bb

Bb

Aa

Bb

Cc Cc

Cc

Cc

Cc

Cc

60

40

抑制率 inhibitory rate %

20

0

根长株高生物量

图9 不同化感潜力水稻根际土壤化感潜力

Fig9 Rhizosphere soil allelopathic potential from different allelopathic potential rice

## **3.4** 抑草圈土壤直接生物测试法分析

不同化感潜力水稻根部土壤直接生物测试（如图10）结果表明，土壤未晾晒情况下，化感水稻PI对稗草的根长、株高和生物量的抑制作用（抑制率分别为26.3%、23.2%、30.2%）均显著高于非化感水稻LE，且抑制率分别高出24.0%、20.7%、27.1%；土壤处理条件下，化感水稻PI和非化感水稻LE分别对稗草根长、株高和生物量的抑制作用均不存在显著差异。进一步研究表明，土壤处理后，化感水稻PI对稗草的根长、株高和生物量的抑制率分别为2.0%、2.1%、2.5%，而非化感水稻LE对稗草的根长、株高和生物量的抑制率在土壤处理前后并未产生显著差异。

可见，土壤处理后，化感水稻PI根部土壤的化感抑草能力大大减弱甚至消失且土壤养分并未对稗草的生长产生明显影响。



PI未处理 PI处理 LE未处理 LE处理

Aa

Aa

Aa

Bb

Bb

Bb

Bb Bb

Bb

Bb

Bb

Bb

40

20

抑制率 inhibitory rate %

0

根长株高生物量

图10 不同化感潜力水稻根际土壤直接生测法

Fig10 Rhizosphere soil direct testing from different allelopathic potential rice

## **3.5** 抑草圈根部土壤速效氮、磷和钾含量的差异分析

不同化感潜力水稻根部土壤速效氮、磷、钾含量（如图11）结果表明，在稗草共培下，化感水稻PI根部的速效氮、磷、钾含量分别为36.5 mg·kg -1、16.9 mg·kg -1、127.0 mg·kg -1，且非化感水稻LE的速效氮、磷、钾含量高出化感水稻PI，分别为21.9 mg·kg -1、4.4 mg·kg -1、

29.6 mg·kg -1；在无稗草共培下，化感水稻PI的速效氮、磷、钾含量分别为37.5 mg·kg -1、17.0 mg·kg -1、129.0 mg·kg -1，且非化感水稻LE的速效氮、磷、钾含量高出化感水稻PI，分别为

22.1 mg·kg -1、5.1 mg·kg -1、29.6 mg·kg -1。进一步分析表明，两种不同化感潜力水稻在稗草共培下和无稗草共培下的土壤速效氮、磷、钾含量均不存在显著差异。

可见，稗草共培下并未对水稻的根部土壤速效氮、磷、钾的含量造成显著影响，且化感水稻PI对根部土壤速效氮、磷、钾的吸收量显著高于非化感水稻LE。



PI/BYG PI Le/BYG Le

Aa Aa

Bb Bb

Aa Aa

Bb Bb

Bb Bb Aa Aa

200

100

含量 content /mg·kg-1

0

速效N速效P速效K

图11 不同化感潜力水稻根际土壤速效氮、磷和钾含量

Fig11 Rhizosphere soil available nitrogen, phosphorus and potassium content from different allelopathic potential rice

## **3.6** 稗草共培条件下对水稻生长指标的影响分析

稗草共培条件下对不同化感潜力水稻的影响（如表5）结果表明，在稗草共培下，化感水稻PI312777的地上部生物量为12.7g、地下部生物量为4.4g、根长为35.4cm、株高为48.1cm和总分蘖数61个，比非化感水稻Lemont高出5.7g、2.6g、10.3cm、2.4cm和40个；在无稗草共培下，化感水稻PI312777的地上部生物量为12.2g、地下部生物量为4.0g、根长为34.2cm、株高为48.0cm和总分蘖数60个，比非化感水稻Lemont高出4.9g、2.2g、7.6m、1.3cm 和

37个。进一步分析表明，两种不同化感潜力水稻在稗草共培下和无稗草共培下的地上部生物量、地下部生物量、根长、株高和总分蘖数均不存在显著性差异。

可见，稗草共培条件下并未对水稻的生长指标产生显著影响。

表5 抑草圈评价法对不同化感潜力水稻的影响

Table 5 Effect on different allelopathic potential rice from inhibit ring assessment

| 不同生长指标  Different Growth index | PI/BYG | PI | Le/BYG | Le |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 地上部生物量 g/盆  Aboveground biomass | 12.7±0.7Aa | 12.2±0.5Aa | 7.0±0.4Bb | 7.3±0.4Bb |
| 地下部生物量 g/盆  Underground biomass | 4.4±0.5Aa | 4.0±0.6Aa | 1.8±0.4Bb | 1.8±0.3Bb |
| 根长/cm  Root length | 35.4±2.9Aa | 34.2±3.1Aa | 25.1±2.6Bb | 26.3±2.1Bb |
| 株高 /cm  Plant height | 48.1±2.3Aa | 48.0±2.6Aa | 45.7±3.1Aa | 46.7±4.1Aa |
| 分蘖数 /个  Tiller number | 61±5Aa | 60±2Aa | 21±2Bb | 23±3Bb |

## **3.7** 稗草共培条件下对水稻光合指标的影响分析

稗草共培条件下对不同化感潜力水稻的光合指标的影响（如表6）结果表明，在稗草共培下，化感水稻PI312777的净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、蒸腾速率、气孔限制值和叶绿素相对含量分别为19.2、0.86、343、13.4、0.16、41.9，比非化感水稻Lemont高出-1.5、0.16、11、3.3、-0.04、-0.5；在无稗草共培下，化感水稻PI312777的净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、蒸腾速率、气孔限制值和叶绿素相对含量分别为19.0、0.85、

342、13.4、0.17、41.8，比非化感水稻Lemont高出-1.9、0.12、14、2.3、-0.03、-0.7。稗草共培下化感水稻PI312777的净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、蒸腾速率、气孔限制值和叶绿素相对含量比无稗草共培下高出0.2、0.01、1、0、-0.01、0.1；稗草共培下非化感水稻Lemont的净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、蒸腾速率、气孔限制值和叶绿素相对含量比无稗草共培下低出0.2、0.03、5、1、0、0.1。进一步分析表明，两种不同化感潜力水稻在稗草共培下的净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、蒸腾速率、气孔限制值和叶绿素相对含量与无稗草共培下均不存在显著性差异。

可见，化感水稻抑草圈评价方法并未对两种不同化感潜力水稻的净光合速率、气孔导度、

胞间二氧化碳浓度、蒸腾速率、气孔限制值和叶绿素相对含量产生显著影响。

表6 不同化感潜力水稻的光合指标

Table 6 Effect on photosynthetic indexes of different allelopathic potential rice

| 光合指标  Photosynthetic characteristic | PI/BYG | PI | Le/BYG | Le |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 净光合速率  Net photosynthesis rate | 19.2±0.2Cc | 19.0±0.3Bb | 20.7±0.5Cc | 20.9±0.3Aa |
| 气孔导度  Stomatal conductance | 0.86±0.18 Aa | 0.85±0.10 Aa | 0.70±0.12 Aa | 0.73±0.10 Aa |
| 胞间二氧化碳浓度  Intercellular CO2 concentration | 343±19Aa | 342±5Aa | 323±7Aa | 328±5Aa |
| 蒸腾速率  Transpiration rate | 13.4±1.5Bc | 13.4±0.5Aa | 10.1±0.6Bbc | 11.1±0.7ABb |
| 气孔限制值  The stomatal limitation value | 0.16±0.05Aa | 0.17±0.01Aa | 0.20±0.01Aa | 0.20±0.01Aa |
| 叶绿素相对含量  Chlorophyll relative content | 41.9±0.5Bb | 41.8±0.7ABab | 42.4±0.4ABb | 42.5±0.4Aa |

## **3.8** 稗草共培条件下对水稻和稗草生理生化指标的影响分析

稗草共培条件下对不同化感潜力水稻的SOD活性、POD活性、CAT活性和MDA丙二醛含量的影响（图12A）结果表明，稗草共培条件下化感水稻PI的SOD活性、POD活性和CAT活性明显高于非化感水稻LE，在MDA含量方面则相反，且稗草共培条件下与未共培条件下的两种不同化感潜力水稻的SOD活性、POD活性、CAT活性和MDA丙二醛含量并未产生显著差异。

不同水稻共培条件下对稗草的SOD活性、POD活性、CAT活性和MDA丙二醛含量的影响（图12B）结果表明，SOD活性、POD活性和CAT活性大小关系表现为BYG> BYG

/LE> BYG/PI，而MDA丙二醛含量的的大小关系则相反。

可见，不同稗草条件下对两种不同化感潜力的SOD、POD、CAT和MDA丙二醛含量并未产生明显的影响，而对稗草则产生极显著的影响。

0.9 20

Aa

Bb

Aa

Bb

Aa

Aa

Bb

Bb

△ D ·min -1·mg -1(pro)

0.6

unit·mg -1(pro)

10

0.3

470nm

0

0.8

mg(H2O2)·min -1·mg-1(pro)

PI/BYG LE/BYG PI LE

超氧化物岐化酶/SOD

0

PI/BYG LE/BYG PI LE

过氧化物酶/POD

Aa

Aa

Bb Bb

5

0.4 2.5

Aa

Aa

Bb

Bb

umol·g -1

0

PI/BYG LE/BYG PI LE

过氧化氢酶/CAT

0

PI/BYG LE/BYG PI LE

丙二醛/MDA

图12 A、稗草共培条件下对水稻生理生化指标的影响

Fig. 12 A Effect on Physiological and biochemical indexes of rice cocultured with barnyardgrass

8

SOD

/unit·mg -1(pro)

POD

/△D470nm·min -1·mg -1(pro)

4

CAT

/mg(H2O2)·min -1·mg-1(pro)

MDA

/umol·g -1

0

BYG BYG/LE BYG/PI

图12 B、不同化感潜力水稻对稗草生理生化指标的影响

Fig. 12B Effect on Physiological and biochemical indexes of barnyardgrass from different allelopathic rice

## **3.9** 稗草共培条件下对水稻和稗草组织全**NPK**含量的影响分析

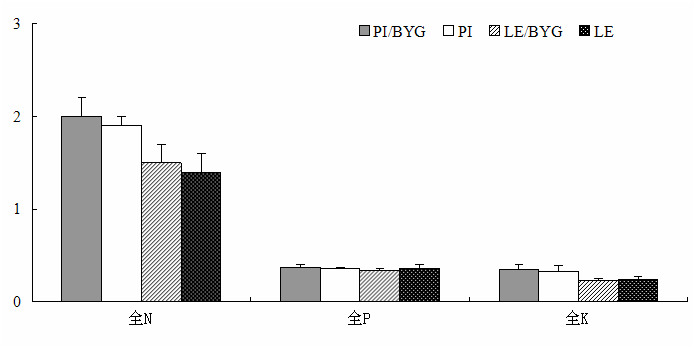
稗草共培条件下对不同化感潜力水稻的组织全NPK含量的影响（图13A）结果表明，稗草共培条件下化感水稻PI的组织全NK明显高于非化感水稻LE，而组织全P两者没有差异，且稗草共培条件下与未共培条件下的两种不同化感潜力水稻的组织全NPK含量并未产生显著差异。

不同水稻共培条件下对稗草组织全NPK含量的影响（图13B）结果表明，组织全NPK

含量的大小关系表现为BYG> BYG /LE> BYG/PI。

可见，不同稗草条件下对两种不同化感潜力的组织N、P、K含量并未产生明显的影响，而对稗草则产生极显著的抑制作用。

Fig. 13A Effect on tissue total nitrogen, phosphorus and potassium of rice cocultured with barnyardgrass



Aa

Aa

Bb Bb

Aa Aa Aa Aa

Aa Aa Bb

Bb

图 13A、稗草共培条件下对水稻组织全 NPK 含量的影响

含量 content /%

图13B、不同化感潜力水稻对稗草生理生化指标的影响 Fig.13B Effect on tissue total nitrogen, phosphorus and potassium of barnyardgrass from different allelopathic rice

含量 content /%

## **3.10** 化感水稻抑草圈评价方法的应用

利用优化后的化感水稻抑草圈评价方法对来自国内外的40个不同地区不同品种的水稻的株高、根长及生物量的结果如下：

化感水稻抑草圈评价法对根长的抑制率（如表8）结果表明，PI312777和Taichung Native1的抑制率均达到50%，且分别为52.3%和56.8%; T78优2155的抑制率达到30.7%；抑制率在20~30%的水稻品种有5种分别为金优2155、金优07、Y两优599、汕优82和全优77；抑制率在10~20%的水稻品种有21种分别为Azucena、Iguape cateto、谷优929、II优1259、

II优1273、广优明118、II优明118、特优73、金优明100、特优884、II优航2号、昌优

964、谷优964、金优1398、京福1优943、乐优94、两优航2号、特优009、天优673、威优89和宜优673；抑制率在0~10%的水稻品种有11种分别为Lemont、IAC47、川香优6号、川优673、福优158、冈优139、深优957、双两优1号、宜香2292、岳优9113和中种优948。

化感水稻抑草圈评价法对根长的抑制率（如表9）结果表明，PI312777和Taichung Native1的抑制率均达到50%，且分别为50.1%和58.5%; T78优2155的抑制率达到30.8%；抑制率在20~30%的水稻品种有4种分别为金优2155、金优07、汕优82和全优77；抑制率在10~20%的水稻品种有20种分别为Azucena、Iguape cateto、谷优929、II优1259、II优1273、广优明118、II优明118、特优73、金优明100、特优884、II优航2号、Y两优599、谷优964、金优1398、京福1优943、两优航2号、特优009、天优673、威优89和宜优673；抑制率在0~10%的水稻品种有13种分别为Lemont、IAC47、昌优964、川香优6号、川优673、福优158、冈优139、乐优94、深优957、双两优1号、宜香2292、岳优9113和中种优948。

化感水稻抑草圈评价法对根长的抑制率（如表10）结果表明，PI312777 和Taichung

Native1的抑制率均达到50%，且分别为76.2%和88.9%；抑制率在40~50%的水稻品种有2种分别为T78优2155和金优07；抑制率在30~40%的水稻品种有3种分别为金优2155、汕优82和全优77；抑制率在20~30%的水稻品种有16种分别为Azucena、谷优929、II优1259、

II优1273、广优明118、特优73、金优明100、特优884、Y两优599、谷优964、金优1398、京福1优943、两优航2号、天优673、威优89和宜优673；抑制率在10~20%的水稻品种有10种分别为Lemont、IAC47、Iguape cateto、II优明118、II优航2号、昌优964、冈优

139、乐优94、双两优1号和特优009；抑制率在0~10%的水稻品种有7种分别为川香优 6

号、川优673、福优158、深优957、宜香2292、岳优9113和中种优948。

可见，在优化后的化感水稻抑草圈评价方法结果中，同品种水稻下的根长和株高的抑制率相似，且以生物量的受抑制程度最高。其中仅有PI312777和Taichung Native1表现为强抑草能力，其余38个品种水稻均为弱抑草能力。

表7 40个水稻品种对稗草根长的影响

Table 7 Effect of 40 rice accessions on the root length of barnyardgrass

| 序 号  No | 品种  Rice accession | 来源  Origin | 稗草根长(cm) Root length | 抑制率(%) Inhibition rate |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | PI312777 | 美国 America | 4.2±0.3\*\* | 52.3±3.4 |
| 2 | Lemont | 美国 America | 8.5±0.6 | 3.4±6.8 |
| 3 | Taichung Native1 | 中国台湾 Taiwan | 3.8±0.2\*\* | 56.8±2.3 |
| 4 | Azucena | 菲律宾 The Philippines | 7.8±0.9\* | 11.4±5.2 |
| 5 | IAC47 | 巴西 Brazil | 8.0±0.8 | 9.1±9.1 |
| 6 | Iguape cateto | 巴西 Brazil | 7.5±0.6\*\* | 14.8±6.8 |
| 7 | 谷优 929 | 中国 福建 China | 7.5±0.4\*\* | 14.8±4.5 |
| 8 | II 优 1259 | 中国 福建 China | 7.2±0.3\*\* | 18.2±3.4 |
| 9 | II 优 1273 | 中国 福建 China | 7.3±0.6\*\* | 17.0±6.8 |
| 10 | 金优 2155 | 中国 福建 China | 6.7±0.5\*\* | 23.9±5.7 |
| 11 | 广优明 118 | 中国 福建 China | 7.8±0.7\* | 11.4±8.0 |
| 12 | II 优明 118 | 中国 福建 China | 7.9±0.8\* | 10.2±9.1 |
| 13 | T78 优 2155 | 中国 广东 China | 6.1±0.5\*\* | 30.7±5.7 |
| 14 | 金优 07 | 中国 福建 China | 6.2±0.5\*\* | 29.5±5.7 |
| 15 | 特优 73 | 中国 福建 China | 7.4±0.5\*\* | 15.9±5.7 |
| 16 | 金优明 100 | 中国 福建 China | 7.2±0.6\*\* | 18.2±6.8 |
| 17 | 特优 884 | 中国 福建 China | 7.5±0.4\*\* | 14.8±4.5 |
| 18 | II 优航 2 号 | 中国 福建 China | 7.9±0.4\* | 10.2±4.5 |
| 19 | Y 两优 599 | 中国 湖南 China | 7.0±0.4\*\* | 20.5±4.5 |
| 20 | 昌优 964 | 中国 福建 China | 7.5±0.5\*\* | 14.8±5.7 |
| 21 | 川香优 6 号 | 中国 四川 China | 8.5±0.4 | 3.4±4.5 |
| 22 | 川优 673 | 中国 四川 China | 8.7±0.5 | 0.4±5.7 |
| 23 | 福优 158 | 中国 福建 China | 8.3±0.8 | 5.7±9.1 |
| 24 | 冈优 139 | 中国 福建 China | 8.0±0.4 | 9.1±4.5 |
| 25 | 谷优 964 | 中国 福建 China | 7.4±0.6\*\* | 15.9±6.8 |
| 26 | 金优 1398 | 中国 福建 China | 7.2±0.4\*\* | 18.2±4.5 |
| 27 | 京福 1 优 943 | 中国 福建 China | 7.2±0.3\*\* | 18.2±3.4 |
| 28 | 乐优 94 | 中国 福建 China | 7.5±0.4\*\* | 14.8±5.7 |
| 29 | 汕优 82 | 中国 广西 China | 6.9±0.4\*\* | 21.6±5.7 |
| 30 | 两优航 2 号 | 中国 福建 China | 7.5±0.5\*\* | 14.8±5.7 |
| 31 | 全优 77 | 中国 江西 China | 6.7±0.5\*\* | 23.9±5.7 |
| 32 | 深优 957 | 中国 北京 China | 8.4±0.6 | 4.5±6.8 |
| 33 | 双两优 1 号 | 中国 湖南 China | 8.2±0.6 | 6.8±6.8 |
| 34 | 特优 009 | 中国 福建 China | 7.7±0.7\* | 12.5±8.0 |
| 35 | 天优 673 | 中国 福建 China | 7.5±0.4\*\* | 14.8±4.5 |
| 36 | 威优 89 | 中国 广西 China | 7.1±0.5\*\* | 19.3±5.7 |
| 37 | 宜香 2292 | 中国 四川 China | 8.3±0.2 | 5.7±2.3 |
| 38 | 宜优 673 | 中国 广东 China | 7.3±0.5\*\* | 17.0±5.7 |
| 39 | 岳优 9113 | 中国 湖南 China | 8.3±0.4 | 5.7±4.5 |
| 40 | 中种优 948 | 中国 云南 China | 8.2±0.6 | 6.8±6.8 |
| 41 | 对照 CK | / | 8.8±0.5 | / |

表8 40个水稻品种对稗草株高的影响

Table 8 Effect of 40 rice accessions on the plant height of barnyardgrass

| 序 号  No | 品种  Rice accession | 来源  Origin | 稗草株高(cm) Plant height | 抑制率(%) Inhibition rate |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | PI312777 | 美国 America | 6.5±0.4\*\* | 50.1±2.7 |
| 2 | Lemont | 美国 America | 12.1±0.5\* | 7.9±3.9 |
| 3 | Taichung Native1 | 中国台湾 Taiwan | 5.4±0.6\*\* | 58.5±4.6 |
| 4 | Azucena | 菲律宾 The Philippines | 11.2±1.0\*\* | 14.5±7.6 |
| 5 | IAC47 | 巴西 Brazil | 12.1±0.7\* | 7.4±5.4 |
| 6 | Iguape cateto | 巴西 Brazil | 11.6±1.0\*\* | 11.2±7.7 |
| 7 | 谷优 929 | 中国 福建 China | 11.2±0.3\*\* | 14.8±2.5 |
| 8 | II 优 1259 | 中国 福建 China | 10.6±0.3\*\* | 19.3±1.9 |
| 9 | II 优 1273 | 中国 福建 China | 10.8±0.8\*\* | 17.9±6.1 |
| 10 | 金优 2155 | 中国 福建 China | 9.7±0.4\*\* | 26.0±2.8 |
| 11 | 广优明 118 | 中国 福建 China | 11.2±1.0\*\* | 14.5±7.9 |
| 12 | II 优明 118 | 中国 福建 China | 11.7±0.7\*\* | 10.4±5.2 |
| 13 | T78 优 2155 | 中国 广东 China | 9.1±0.5\*\* | 30.8±3.9 |
| 14 | 金优 07 | 中国 福建 China | 9.5±0.6\*\* | 27.2±4.9 |
| 15 | 特优 73 | 中国 福建 China | 10.9±1.0\*\* | 17.0±7.7 |
| 16 | 金优明 100 | 中国 福建 China | 10.6±0.5\*\* | 19.1±4.0 |
| 17 | 特优 884 | 中国 福建 China | 11.1±0.6\*\* | 15.0±4.2 |
| 18 | II 优航 2 号 | 中国 福建 China | 11.7±0.6\*\* | 10.9±4.7 |
| 19 | Y 两优 599 | 中国 湖南 China | 11.0±0.4\*\* | 16.3±2.9 |
| 20 | 昌优 964 | 中国 福建 China | 11.9±0.7\* | 9.5±5.6 |
| 21 | 川香优 6 号 | 中国 四川 China | 12.7±0.5 | 3.1±3.5 |
| 22 | 川优 673 | 中国 四川 China | 12.9±0.5 | 1.9±3.9 |
| 23 | 福优 158 | 中国 福建 China | 12.5±0.7 | 4.3±5.2 |
| 24 | 冈优 139 | 中国 福建 China | 11.8±0.4\* | 9.8±3.4 |
| 25 | 谷优 964 | 中国 福建 China | 11.1±0.7\*\* | 15.4±5.3 |
| 26 | 金优 1398 | 中国 福建 China | 10.8±0.4\*\* | 17.3±3.2 |
| 27 | 京福 1 优 943 | 中国 福建 China | 11.3±0.4\*\* | 13.9±3.1 |
| 28 | 乐优 94 | 中国 福建 China | 11.9±0.4\* | 9.4±2.7 |
| 29 | 汕优 82 | 中国 广西 China | 10.3±0.6\*\* | 21.8±4.4 |
| 30 | 两优航 2 号 | 中国 福建 China | 11.1±0.5\*\* | 15.1±4.1 |
| 31 | 全优 77 | 中国 江西 China | 10.2±0.4\*\* | 21.9±3.0 |
| 32 | 深优 957 | 中国 北京 China | 12.5±0.6 | 4.5±4.9 |
| 33 | 双两优 1 号 | 中国 湖南 China | 12.2±0.7 | 7.3±5.5 |
| 34 | 特优 009 | 中国 福建 China | 11.4±0.6\*\* | 12.8±4.6 |
| 35 | 天优 673 | 中国 福建 China | 11.2±0.4\*\* | 14.6±3.0 |
| 36 | 威优 89 | 中国 广西 China | 10.8±0.3\*\* | 17.4±2.0 |
| 37 | 宜香 2292 | 中国 四川 China | 12.5±0.9 | 4.8±6.6 |
| 38 | 宜优 673 | 中国 广东 China | 10.8±0.5\*\* | 17.6±3.7 |
| 39 | 岳优 9113 | 中国 湖南 China | 12.5±0.5 | 4.5±3.8 |
| 40 | 中种优 948 | 中国 云南 China | 12.7±0.7 | 3.1±5.1 |
| 41 | 对照 CK | / | 13.1±0.3 | / |

表9 40个水稻品种对稗草生物量的影响

Table 9 Effect of 40 rice accessions on the biomass of barnyardgrass

| 序 号  No | 品种  Rice accession | 来源  Origin | 稗草干物质重(g) Biomass | 抑制率(%) Inhibition rate |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | PI312777 | 美国 America | 0.0015±0.0003\*\* | 76.2±4.6 |
| 2 | Lemont | 美国 America | 0.0054±0.0004 | 12.0±5.7 |
| 3 | Taichung Native1 | 中国台湾 Taiwan | 0.0007±0.0004\*\* | 88.9±6.9 |
| 4 | Azucena | 菲律宾 The Philippines | 0.0047±0.0007\*\* | 22.3±1.5 |
| 5 | IAC47 | 巴西 Brazil | 0.0054±0.0005 | 12.0±8.0 |
| 6 | Iguape cateto | 巴西 Brazil | 0.0050±0.0007\*\* | 17.7±1.5 |
| 7 | 谷优 929 | 中国 福建 China | 0.0047±0.0002\*\* | 22.3±3.4 |
| 8 | II 优 1259 | 中国 福建 China | 0.0043±0.0002\*\* | 29.2±3.4 |
| 9 | II 优 1273 | 中国 福建 China | 0.0045±0.0006\*\* | 26.9±9.2 |
| 10 | 金优 2155 | 中国 福建 China | 0.0037±0.0003\*\* | 39.5±4.6 |
| 11 | 广优明 118 | 中国 福建 China | 0.0047±0.0007\*\* | 22.3±3.5 |
| 12 | II 优明 118 | 中国 福建 China | 0.0051±0.0005\*\* | 16.6±8.0 |
| 13 | T78 优 2155 | 中国 广东 China | 0.0033±0.0004\*\* | 46.4±5.7 |
| 14 | 金优 07 | 中国 福建 China | 0.0036±0.0004\*\* | 41.8±6.9 |
| 15 | 特优 73 | 中国 福建 China | 0.0045±0.0007\*\* | 25.7±3.5 |
| 16 | 金优明 100 | 中国 福建 China | 0.0043±0.0004\*\* | 29.2±5.7 |
| 17 | 特优 884 | 中国 福建 China | 0.0047±0.0004\*\* | 23.4±6.9 |
| 18 | II 优航 2 号 | 中国 福建 China | 0.0051±0.0004\*\* | 16.6±6.9 |
| 19 | Y 两优 599 | 中国 湖南 China | 0.0046±0.0003\*\* | 25.0±4.3 |
| 20 | 昌优 964 | 中国 福建 China | 0.0052±0.0005\* | 14.8±8.4 |
| 21 | 川香优 6 号 | 中国 四川 China | 0.0058±0.0003 | 5.1±5.3 |
| 22 | 川优 673 | 中国 四川 China | 0.0059±0.0004 | 3.4±5.9 |
| 23 | 福优 158 | 中国 福建 China | 0.0057±0.0005 | 7.0±7.8 |
| 24 | 冈优 139 | 中国 福建 China | 0.0052±0.0003\* | 15.2±5.1 |
| 25 | 谷优 964 | 中国 福建 China | 0.0047±0.0005\*\* | 23.6±8.0 |
| 26 | 金优 1398 | 中国 福建 China | 0.0045±0.0003\*\* | 26.5±4.8 |
| 27 | 京福 1 优 943 | 中国 福建 China | 0.0048±0.0003\*\* | 21.3±4.7 |
| 28 | 乐优 94 | 中国 福建 China | 0.0052±0.0002\* | 14.6±4.1 |
| 29 | 汕优 82 | 中国 广西 China | 0.0041±0.0004\*\* | 33.2±6.6 |
| 30 | 两优航 2 号 | 中国 福建 China | 0.0047±0.0004\*\* | 23.3±6.1 |
| 31 | 全优 77 | 中国 江西 China | 0.0041±0.0003\*\* | 33.4±4.6 |
| 32 | 深优 957 | 中国 北京 China | 0.0057±0.0005 | 7.2±7.4 |
| 33 | 双两优 1 号 | 中国 湖南 China | 0.0054±0.0005 | 11.4±8.3 |
| 34 | 特优 009 | 中国 福建 China | 0.0049±0.0004\*\* | 19.8±6.9 |
| 35 | 天优 673 | 中国 福建 China | 0.0047±0.0003\*\* | 22.5±4.6 |
| 36 | 威优 89 | 中国 广西 China | 0.0045±0.0002\*\* | 26.7±2.9 |
| 37 | 宜香 2292 | 中国 四川 China | 0.0056±0.0006 | 7.8±9.9 |
| 38 | 宜优 673 | 中国 广东 China | 0.0045±0.0003\*\* | 26.9±5.5 |
| 39 | 岳优 9113 | 中国 湖南 China | 0.0057±0.0004 | 7.2±5.8 |
| 40 | 中种优 948 | 中国 云南 China | 0.0058±0.0005 | 5.1±7.6 |
| 41 | 对照 CK | / | 0.0061±0.0006 | / |

\*-与对照呈显著水平；\*\*与对照呈极显著水平。

## **3.11** 不同生物测试方法间的比较分析

化感水稻水稻抑草圈评价方法与浸提液法、迟播共培法及田间筛选法的比较分析（表11）结果表明，从试验周期，所需空间及操作角度上看，选择窒内生物测试法作为化感生物测试法为佳，且具有不受季节影响，经费消耗少，化感物质收集容易等特点。但室内生物测试的试验结果可信度却很低，因此从试验结果可信度角度上来说，则选择室外生物测试作为化感生物测试法为佳。总之，在试验结果可信度基本前提要求下，且试验周期，所需空间小及操作容易则选择抑草圈评价法为宜。

表10 化感水稻抑草圈评价方法与几种生物测试方法的比较

Table 10 Comparison of allelopathic rice inhibit ring assessment and other methods

| 室内 | | |  | 室外 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 浸提液法 | 迟播共培法 | 田间筛选法 | 抑草圈评价法 |
| 试验周期 | 7-10 天 | 20 天 | 100-120 天 | 30-40 天 |
| 试验操作难易程度 | 简单 | 简单 | 较难 | 中等 |
| 所需空间环境 | 生物培养箱 | 生物培养箱 | 大田 | 网室 |
| 是否受季节影响 | 无 | 无 | 有 | 有 |
| 是否存在营养竞争 | 无 | 有 | 有 | 无 |
| 经费消耗量 | 少 | 较少 | 多 | 较多 |
| 化感物质收集难易程度 | 容易 | 容易 | 难 | 难 |
| 受种选择 | 非伴生杂草 | 非伴生杂草 | 伴生杂草 | 伴生杂草 |
| 试验结果可信度 | 低 | 中等 | 高 | 较高 |

# **4** 讨论

建立一套合理的水稻化感作用生物测试方法，是水稻化感作用研究的基础。Wu等[33]提出了理想的生物测试方法必须具备耗费低、快速、操作简易、对大多数靶标植物均广泛适用，可重复性强且客观、并且不占用太多时间和空间等优点。此外，王大力[5]提出有效的生物测试方法应包括田间和室内两种测试方法，室内的生物测试方法应是一种快速、灵敏以及适用于大批量检测的手段，而田间测试应是对室内检测结果的一种野外条件下的进一步印证。为了建立一套适合水稻的强化感生物筛选方法，所以本研究以国际公认的化感水稻PI312777及收集自田间的无芒稗草为试验材料，结合室内生物测试和田间生物测试的各自的优点，进行化感水稻抑草圈评价方法的建立，以及选自国内外不同地区的40个水稻品种进行抑草圈的应用。

本研究结果表明，盆栽下选用稻稗比例为1: 1情况下，不同叶期化感水稻PI均对稗草的存在一定的抑制作用，且5叶期化感水稻PI的抑草率达到最大。何海斌等[67]研究化感水稻苗期不同器官水浸液及根系分泌物对稗草的化感作用中发现，5叶期的化感水稻PI水浸提液的抑制率最大，表明该叶期化感水稻PI组织内部具有更多的活性化感物质，因此在当水稻响应稗草胁迫时，化感水稻PI可以更及时地分泌更多的活性化感物质到环境当中，从而提高化感水稻PI对稗草的抑制率。所以5叶期化感水稻根系能分泌更多化感物质到环境中，从而提高化感抑草能力。可见，化感水稻抑草圈评价法中5叶期化感水稻PI具有最强的化感作用进而使其抑草率达到最大。Fujii[28]利用植物根箱法进行植物化感筛选测试方法，发现随着与供体距离加大，受体植物的受抑制程度不断降低，其主要是随着与供体距离地增加，地下部的活性化感物质浓度不断下降引起的。所以本研究中在探讨化感水稻PI对径向不同距离的稗草的影响中，同样发现对稗草均存在抑制作用，且随着径向距离地增加稗草的抑制率不断降低。此外，在化感水稻PI径向距离为12cm时，化感水稻PI对稗草的根长、株高及生物量的抑制率均高达50%. Dilday等[11]田间抑草圈的强化感水稻筛选中，以杂草生长圈离供体水稻径向距离小于10cm则定义该水稻为不具有化感作用之品种，反之亦然。同时杂草生长圈离供体水稻径向距离愈远，则该水稻的化感作用愈强。现今的水田种植中水稻种植间距通常在20-28cm之间，意味着水稻间的分界线为径向距离10-14cm。因此，以本研究中化感水稻PI径向距离12cm为化感水稻抑草圈评价方法的选定评价距离较为合理。同时在该距离上稗草抑制率越大，则表明该水稻品种的化感潜力越强，反之亦然。

因此，化感水稻抑草圈评价法中水稻品种的选定叶期数为5 叶期，且径向抑草距离为

12cm。田间化感水稻抑草圈评价方法的验证结果表明，化感水稻PI对稗草的根长、株高及生物量的抑制率均达到50%，与上述盆栽结果一致。因此，在同样的田间气候条件下，化感水稻抑草圈评价方法可客观评价化感水稻的化感潜力。综上所述，化感水稻抑草圈评价方法确定为：取30 kg事先挑除残根残枝的混匀风干稻田土于圆盆中（圆盆规格为直径51 cm，

高16 cm），加10L水并搅匀并静置1天，挑选长势均匀一致的预萌发水稻种子6颗以间距

2cm播于水盆中央，每天定时添加蒸馏水保持土壤湿润（至土壤表层有水层出现），手工除去试验过程中生长的杂草。待水稻品种长至5叶期时，挑选长势均匀一致的预萌发稗草6颗两两等间距以半径12cm环绕水稻种植，以单种稗草做为对照。一周后测定稗草根长、株高和生物量，试验3个重复。稗草的受抑制程度即受体的相对抑制率(inhibition rate, IR)计算公式为，IR =(TR-CK) /CK×100%，其中TR为处理值，CK为对照值。稗草抑制率达到50%以上则该水稻品种为强化感水稻，抑制率越大其化感潜力越强，反之亦然。

孙红艳等[64]利用土壤-琼脂三明治法对不同小麦种质资源进行化感潜力评价，并筛选出具有较强化感潜力的小麦品种。本研究取自抑草圈距离12cm处土壤并利用土壤-琼脂三明治法对不同化感潜力水稻的土壤化感潜力进行研究，结果表明，化感水稻PI的土壤抑草率明显高于非化感水稻，且稗草共培下，可提高化感水稻PI的土壤化感潜力，而非化感水稻LE则无明显变化，但其稗草抑制率结果均低于化感水稻抑草圈方法，主要是由于活体植物的化感作用是一个不间断持续地过程，一旦破坏了这种关系将对稗草抑制率产生一定的影响。

Narwal[9]在研究稻麦轮作时发现水稻残株和秸秆还田对杂草有一定程度的抑制作用，且后期

（播种45d）由于秸秆产生的化感物质，可能源于分解使得其抑制率低于前期（15d）。因此在对不同化感潜力水稻根际土壤处理后结果发现，7 天生长后的稗草与对照之间无显著差异，表明化感水稻PI的根际由于化感物质分解造成化感作用消失且土壤现有的营养条件对稗草生长并无影响。进一步研究表明，化感水稻抑草圈评价方法均未对两种不同化感潜力水稻土壤速效NPK含量产生明显的影响。王大力认为[5]受体种子本身内部仍具有一定的养分，前期可减少对环境的营养需要，从而可避免由于养分引起的资源竞争。因此，化感水稻抑草圈评价方法中化感水稻抑制稗草的生长，可排除资源竞争因素，其抑草作用以化感作用为主。

化感水稻抑草圈评价方法中对不同化感潜力水稻的影响结果表明，两种不同化感潜力水稻地上部和地下部的根长、株高、生物量、总分蘖数和光合作用指标均未造成明显影响。此外，生理生化指标和营养指标结果，化感水稻抑草圈评价方法均未对两种不同化感潜力水稻造成明显影响，而化感水稻PI对稗草的抑制作用明显高于LE。可见，化感水稻抑草圈评价方法仅对受体稗草有影响，而对水稻并未产生明显的影响。

化感水稻抑草圈评价方法运用结果表明，化感水稻抑草圈评价方法中的40个供试水稻品种中，仅有PI和Taichung Native1为化感水稻，且Taichung Native1的化感作用强于PI，而其余

38个品种水稻均为弱化感水稻。沈荔花等[68]在室内化感水稻生物测试方法中利用琼脂迟播共培法（RSA）生物测试法发现PI312777、Taichung Native1、Iguape Cateto、Azucena、IAC47均为强化感水稻。而化感水稻抑草圈评价方法中Iguape Cateto、Azucena、IAC47结果中则为弱化感水稻。由于在自然界中，植物之间的相互作用通常是一个多因素相互作用的结果，主要是根系分泌在土壤环境的滞留、转化、迁移等过程中，可能发生氧化还原、水合、质子化以及微生物分解，以致于到达受体植物的具有化感作用的物质与未经土壤环境的根系分泌物发生了质与量的变化[69]。可见，室内的生物测试结果与化感水稻抑草圈评价方法存在差异。

因此，室内生物测试结果并不能客观实际的评价水稻品种间的化感潜力。

不同生物测试法间的比较分析表明，抑草圈评价法可客观地评价水稻品种的化感潜力，但在试验周期、操作难易和经费消耗等方面存在一定的限制。总之，今后的强化感水稻品种的筛选方法应包括两个步骤：第一阶段为室内琼脂迟播共培法（RSA）生物测试法，第二阶段为对第一阶段的部分结果进行室外化感水稻抑草圈评价法。化感水稻抑草圈评价法又可分两个步骤：I、无重复筛选；II、针对I的部分结果进行重复实验。

参考文献

[1] Rice E L. Allelopathy [M]. 2nd eds. 1984. Academic Press: Orlando, FL, USA

[2] 林文雄著. 水稻化感作用[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2005

[3] Ni H W, Zhang C X. Use of allelopathy for weed management in China-A review[J]. Allelopathy Journal, 2005, 15(1): 3-12

[4] Mallik A. Allelopathy: Advances, Challenges and Opportunities. Proceedings of 4th World Congress on Allelopath*y*[C], International Allelopathy Society. 2005. p. 3-11

[5] 王大力. 水稻化感作用研究综述[J]. 生态学报, 1998, 18(3): 326-334.

[6] Chandler J M. Estamated losses of crops to weeds In: D. Pimentel(ed. )[M]. Handbook of Pest Management in Agriculture Vo.1. CRC Press. Inc. Boca Raton. FL. 1981: 95-109.

[7] Maneechote C and Krasaesinhu P. Allelopathic effects of some upland and wild rice genotypes in Thailand Paper in the First World Congress on Allelopathy: A Science for the Future[C]. Cadiz, Spain, 1996

[8] U. S. Department of Agriculture. Report of the Research Planning Conference on the Role of Secondary. Compounds in Plant Interactions of Allelopathy[C]. A Conf. sponesd by ARS-USDA. Mississippi State Univ. March 15-16, 1977, 124.

[9] Narwal S S. Allelopathic strategies for weed management in rice-wheat rotation for sustainable agriculture[C]. Paper in the" Workshop on Allelopathy in Rice", IRRI, Los Banos, Philippines, 1996.

[10] Chou C H. Adaptive automtoxication mechanisms of Oryza sative[C]. Paper in the" Workshop on Allelopathy in Rice", IRRI, Los Banos, Philippines, 1996.

[11] Dilday R H. Yan W G and Moldenhauer K A K. Allelopathic activity in Rice (Oryza sative L.) to major aquatic weed species[C]. Paper in the" Workshop on Allelopathy in Rice", IRRI, Los Banos, Philippines, 1996.

[12] Marambe B. Rice allelopathy: current scenario and its future potential in weed management in rice fields of Sri Lanka[C]. Paper in the" Workshop on Allelopathy in Rice", IRRI, Los Banos, Philippines, 1996.

[13] Prasad M N V. Allelopathy in rice paddies of Andhra Pradesb, Indian[C]. Paper in the" Workshop on Allelopathy in Rice", IRRI, Los Banos, Philippines, 1996.

[14] Olofsdotter M, Wang D and Navarz D. Allelopathy of rice[C]. Paper in the first world congress on allelopathy: A Science for the Future, Cadiz, Spain, 1996.

[15] Olofsdotter M and Navarez D. Approaches in rice allelopathy research[C]. In: Proceedings of 15th Asian-Pacific Weed sciences Society Conference, July, 24-28, Tsukubs Japan, 1995, 315-320.

[16] 应存ft. 中国稻种资源[M]. 应存ft主编. 北京: 中国农业科技出版社, 1991.

[17] Foy C L. How to make bioassays for allelopathy more relevant to field conditions with particular reference to cropland weeds[C]. Pp. 25-33 in Inderjit, K. M. M. Dakshini & C. L. Foy(eds.), Principles and practices in plant ecology: Allelopathic interactions. CRC Press,

Washington, DC., 1999.

[18] Pederson G. A. White clover seed germination in agar containing tall fescue leaf extracts[J]. Crop Sci. 1986, 26: 1248-1249.

[19] Shilling D G and Yoshikawa F. A rapid seedling bioassay for the study of allelopathy[C]. Pp. 334-342 in G. Waller(ed.), Allelochemicals: Role in agriculture and forestry. American Chemical Society Symposium Series, 330. American Chemical Society, Washington, DC., 1987.

[20] Weidenhamer J D, Hartnett D C and Romeo J T. Density-dependent phytotoxicity: Distinguishing resource competition and allelopathic interference in plants[J]. J. Appl. Ecol. 1989, 26: 613-624.

[21] Liu D L and Lovett J V. Biologically active secondary metabolites of barley: I. Developing techniques and assessing allelopathy in barley[J]. J. Chem. Ecol. 1993, 19: 2217-2230.

[22] Haugland, E and Brandsaeter L O. Experiments on bioassay sensitivity in the study of allelopathy[J]. J. Chem. Ecol. 1996, 22: 1845-1859.

[23] lnderjit and Del Moral D. Is separating resource competition from allelopathy realistic[J]. Bot. Rev. (Lancaster) 1997, 63: 221-230.

[24] Romeo J T and Weidenhamer J D. Bioassays for allelopathy in terrestrial plants[C]. Pp. 179-211 in K. F. Haynes and J. G. Millar (eds.), Methods in chemical ecology. Kluwer Academic Publishing, Boston, 1999.

[25] Elakovich S D. Bioassays applied to allelopathic herbaceous vascular hydrophytes[C]. Pp. 45-56 in Inderjit, K. M. M. Dakshini & C. L. Foy (eds.), Principles and practices in plant ecology: Allelopathic interactions. CRC Press, Washington, DC., 1999.

[26] Fuerst E P and Putnam A R. Separating the competitive and allelopathic component of interference: Theoretical principles[J]. J. Chem. Ecol. 1983, 9: 937-944.

[27] Weidenhamer J D. Distinguishing resource competition and chemical interference: Overcoming the methodological impasse[J]. Agron. J. 1996, 88: 866-875.

[28] Fujii Y. The potential biological control of paddy weeds with allelopathy: Allelopathic effect of some rice varieties[C]. Pp. 305-320 in Proceedings of International Symposium on Biological Control and Integrated Management of Paddy and Aquatic Weeds in Asia. National Agricultural Research Centre of Japan, Tsukuba, Japan, 1992.

[29] Putnam A R, Defrank J and Barnes J P. Exploitation of allelopathy for weed control in annual and perennial cropping systems[J]. J. Chem. Ecol. 1983, 9: 1001-1011.

[30] Leather G R and. Einhellig F A. Bioassays in the study of allelopathy[C]. Pp. 133-145 in A. R. Putnam & C. S. Tang (eds.), The science of allelopathy. John Wiley & Sons, New York, 1986. [31] An M, Pratley J E, Haig T and Jellett P. Genotypic variation of plant species to the allelopathiceffects of vulpia residues[J]. Austral. J. Exp. Agric. 1997, 37: 647-660.

[32] Inderjit and Dakshini K M M. On laboratory bioassays in allelopathy[J]. Bot. Rev. (Lancaster) 1995, 61: 29-34.

[33] Wu H, Pratley J, Lemerle D, Haig T and Verbeek B. Laboratory screening for allelopathic potential of wheat (*Triticum aestivum*) accessions against annual ryegrass (*Lolium rigidum*)[J]. Austral. J. Agric. Res. 2000, 51: 259-266.

[34] Wardle D A, Nicholson K A and Rahman A. Influence of plant age on allelopathic potential of nodding thistle (*Carduus nutans* L.) against pasture grasses and legumes[J]. Weed Res. 1993, 33: 69-78.

[35] Ben-Hammouda M, Kremer R J, Minor H C and Sarwar M. A chemical basis for the differential allelopathic potential of sorghum hybrids on wheat[J]. J. Chem. Ecol. 1995, 21: 775-786.

[36] Olofsdotter, Navarez M D C and Moody K. Allelopathic potential in rice (*Oryza sativa* L.) germplasm[J]. Ann. Appl. Biol. 1995, 127: 543-560.

[37] Weidenhamer J D, Morton T C and Romeo J T. Solution volume and seed number: Overlooked factors in allelopathic bioassays[J]. J. Chem. Ecol. 1987, 13: 1481-1491.

[38] Thijs H, Shann J R and Weidenhamer J D. The effects ofphytotoxins on competitive outcome in a model system[J]. Ecology 1994, 75: 1959-1964.

[39] Williamson G B. Allelopathy, Koch's postulates and the neck riddle[C]. Pp. 143-162 in J. B. Grace & D. Tilman (eds.), Perspectives on plant competition. Academic Press, New York.

[40] Williamson G B and Weidenhamer J D. Bacterial degradation of juglone: evidence against allelopathy[J]. J. Chem. Ecol. 1990, 16: 1739-1742.

[41] Blum U and Rebbeck J. Inhibition and recovery of cucumber roots given multiple treatments of ferulic acid in nutrient culture[J]. J. Chem. Ecol. 1989, 15: 917-928.

[42] Wu H, Pratley J, Lemerle D, Haig T and Verbeek B. Differential allelopathic potential among wheat accessions to annual ryegrass[C]. Pp. 567-571 in Proc. 9th Austral. Agron. Conf., Wagga Wagga, NSW, Australia, 1998.

[43] Chou C H and Muller C H. Allelopathic mechanisms ofArctostaphylos glandulosa vat. zacaensis[J]. Amer. Midl. Naturalist 1972, 88: 324-347.

[44] Stowe L G. Allelopathy and its influence on the distribution of plants in an lllinois old-field[J]. J. Ecol. 1979, 67: 1065-1085.

[45] Blum U. Designing laboratory plant debris-soil bioassays: Some reflections[C]. Pp. 17-23 in Inderjit, K. M. M. Dakshini & C. L. Foy (eds.), Principles and practices in plant ecology: Allelopathic interactions. CRC Press, Washington, DC., 1999.

[46] lnderjit and Dakshini K M M. Bioassays for allelopathy: Interactions of soil organic and inorganic constituents[C]. Pp. 35-44 in Inderjit, K. M. M. Dakshini & C. L. Foy (eds.), Principles and practices in plant ecology: Allelopathic interactions. CRC Press, Washington, DC., 1999.

[47] Putnam A R and Duke W B. Biological suppression of weeds: Evidence for allelopathy in accessions of cucumber[J]. Science 1974, 185: 370-372.

[48] Hashem A and Adkins S W. Allelopathic effects of Triticum speltoides on two important

Weeds of wheat[J]. P1. Protection Quart. 1998, 13: 33-35.

[49] Navarez D C and Olofsdotter M. Relay seeding technique for screening allelopathic rice (Oryza sativa L. )[C]. Pp. 1285-1290 in Proc. 2nd International Weed Control Congress, Copenhagen, Denmark. 1996.

[50] Wu H, Pratley J, Lemerle D, Haig T and Verbeek B. Evaluation of seedling allelopathy in 453 wheat (Triticum aestivum) accessions by Equal-Compartment-Agar-Method[J]. Austral. J. Agric. Res. 2000, 51: 937-944.

[51] Kim K U and Shin D H. Rice allelopathy research in Korea[C]. Pp. 39-44 in M. Olofsdotter (ed.), Allelopathy in Rice. IRRI, Los Bar3os, Philippines, 1998.

[52] Kim K U, Shin D H and Lee I J. Allelopathic potential of rice against barnyardgrass[C]. P. 110 in Book of Abstracts, Second World Congress on Allelopathy: Critical Analysis and Future Prospects, August 8-13, 1999, Thunder Bay, Ontario, Canada, 1999.

[53] Dilday R H, Lin J and Yan W. Identification ofallelopathy in the USDA-ARS rice germplasm collection. Austral[J]. J. Exp. Agric. 1994, 34: 907-910.

[54] Dilday R H, Yah W G, Moldenhauer K A K and Gravols K A. Allelopathic activity in rice for controlling major aquatic weeds[C]. Pp. 7-26 in M. Olofsdotter (ed.), Allelopathy in Rice. IRRI, Los Bafios, Philippines, 1998.

[55] Olofsdotter M and Navarez D C. Allelopathic rice for Echinochloa crus-galli control[C]. Pp. 1175-1181 in Proc. 2nd International Weed Control Congress, Copenhagen, Denmark, 1996.

[56] Wu H. Allelopathic potential of wheat (Triticum aestivum L.) against annual ryegrass (*Lolium rigidum Gaud*. )[C]. Ph. D. diss., Charles Sturt University, Australia, 1999.

[57] Wu H, Pratley J, Lemerle D, Haig T, Verbeek B and An M. Allelochemicals in wheat (*Triticum aestivum* L.): Variation of phenolic acids in shoot tissues[C]. J. Chem. Ecol. 2001, 27: 125-135.

[58] Mattice J D, Dilday R H and Skulman B W. Using HPLC to predict which accessions of rice will inhibit growth ofbarnyardgrass (Echinochloa crus-galli). P. 133 in Book of Abstracts, Second World Congress on Allelopathy: Critical Analysis and Future Prospects, August 8-13, 1999, Thunder Bay, Ontario, Canada, 1999.

[59] Fay P K. and Duke W B. An assessment ofallelopathic potential in Avena germplasm[J]. Weed Sci. 1977, 25: 224-228.

[60] Leather G R and Einhellig F A.. Mechanisms of allelopathic action in bioassay. Pp. 197-205 in A. C. Thompson (ed.), The chemistry of allelopathy: Biological interaction among plants[C]. American Chemical Society Symposium Series, 268. American Chemical Society, Washington, DC., 1985.

[61] Rasmussen J A, Einhellig F A and Sehon M K. Synergistic inhibitory effects ofp-coumaric and ferulic acids on germination and growth of grain sorghum[J]. J. Chem. Ecol. 1977, 3: 197-205. [62] Einhellig F A. Mechanisms and modes of action of allelochemicals[C]. Pp. 171-188 in A. R. Putnam & C. S. Tang (eds.), The science of allelopathy, John Wiley & Sons, New York, 1986.

[63] Blum U. Allelopathic interactions involving phenolic acids[J]. J. Nematol. 1996, 28: 259-267.

[64] 孙红艳, 林瑞余, 叶陈英等. 化感小麦种质资源的筛选与评价[J]. 中国农业生态学报, 2008, 16(4): 894-899.

[65] 鲍士旦. 土壤农化分析（第三版）[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39~114

[66] 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999

[67] 何海斌, 王海斌, 陈祥旭, 林文雄, 贾小丽, 方长旬, 甘邱锋, 倪尼娜, 吴文祥. 化感水稻苗期不同器官水浸提液及根系分泌物对稗草的化感作用[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 14-17.

[68] 沈荔花, 梁义元, 何华勤, 何俊, 梁康迳, 林文雄. 水稻化感生物测试方法的比较及应用[J]. 应用生态学报, 15(9): 1575-1579.

[69] 林文雄, 熊君, 周军健等. 化感植物根际生物学特性研究现状与展望[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 1-8.

致谢

本论文是在导师何海斌教授的悉心指导下完成的。从课题选定、试验设计、试验实施、数据整理到论文撰写，无不倾注了导师大量的心血。自本科大一起在何海斌教授的引导下，我开始学习科研技能、7年的时间导师对我的关心与帮助使我从一个懵懂的农村小孩走到了今天，导师对我知遇之恩学生时刻铭记在心。多年来导师渊博的学识、开阔的思维、严谨的态度和孜孜不倦的求知精神将使我终身受益。从导师身上我不仅学会如何做研究，更懂得如何去发现问题、提出问题并解决问题；更重要的是导师教会了我很多为人处事的道理，导师博大的胸襟，乐观的精神和平易近人的品质都将对我以后的人生道路产生深刻的影响。在此对恩师7年来的教育和关心致以最衷心的感谢！

衷心地感谢10级博士生王海斌师兄多年在实验上、在文章写作上、在生活上、在人生

目标的制定上给了无限的帮助。感谢已经毕业的05级本科生曾聪明、郭万财、蔡志祥、林银英、吴良展等学长学姐们，一进实验你们就给予莫大的鼓舞与帮助，我们一起在实验室奋斗了3年多，虽然你们已毕业了4年，我心里还是很感激你们。衷心感谢10级研究生刘长辉、王家琪，11级研究生林志华、俞振明、黄怡，09级本科生张奇，沈惠福等这3年在实验室对我的帮助，谢谢你们！

感谢我的家人对我学业的支持，小学、初中、高中、本科、研究生，这一条求学的路上是你们艰辛的付出，才有我顺利的升学。你们的支持是默默的，你们的理解是发自内心的，你们的贡献是无可估量的！

本研究得到国家自然科学基金项目（31070447）、福建省高校服务海西建设重点项目子项目（0b08b005）和福建省自然科学基金（2012J01077）等项目共同资助。