

苗期不同化感潜力水稻根际土壤酶活性分析*

林瑞余^{1,2} 于翠平¹ 戎 红¹ 肖清铁¹ 邱兴贵¹ 叶陈英¹ 林文雄^{1,2**}

(1. 福建农林大学生命科学学院 福州 350002; 2. 福建农林大学农业生态研究所 福州 350002)

摘 要 为揭示化感水稻根际土壤酶活性与水稻化感潜力的关系,在前期研究的基础上,以化感水稻“PI312777”、“IAC47”、“Iguape”和非化感水稻“Lemont”为材料,测定了苗期旱作水稻根际土壤酶活性。结果表明,化感水稻抑制了根际土壤的脱氢酶、过氧化物酶、多酚氧化酶、脲酶活性、纤维素分解酶活性,提高了酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性。脲酶、多酚氧化酶活性与水稻化感潜力呈显著负相关,酸性磷酸酶、碱性磷酸酶与水稻化感潜力呈显著正相关,蛋白酶、脱氢酶活性与其他土壤酶、土壤微生物区系、水稻化感潜力间均无显著相关性。化感水稻降低根际土壤多酚氧化酶活性,有利于根际化感物质的积累,提高了酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性,促进土壤磷、碳循环,为实现水稻化感效应奠定基础。

关键词 水稻 化感作用 化感潜力 土壤微生物 土壤酶活性

中图分类号:Q948;S314 文献标识码:A 文章编号:1671-3990(2008)02-0302-05

Rhizospheric soil enzyme activity of allelopathic rice at seedling stage

LIN Rui-Yu^{1,2}, YU Cui-Ping¹, RONG Hong¹, XIAO Qing-Tie¹,
QIU Xing-Gui¹, YE Chen-Ying¹, LIN Wen-Xiong^{1,2}

(1. School of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Institute of Agro-Ecology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract In order to determine the relationship between allelopathic potential of rice and soil enzyme activity in rhizospheric soils, a dry cultivation experiment was conducted on enzyme activity in rhizospheric soil of allelopathic rice “PI312777”, “IAC47” and “Iguape”, and non-allelopathic rice “Lemont” at seedling stage. The results show that allelopathic rice inhibits dehydrogenase, peroxide, polyphenol oxidase, urease, and cellulose activity and enhances acid phosphatase, alkaline-phosphatase, invertase and catalase activity in rhizospheric soils. Correlation analyses show that urease and polyphenol oxidase activity is significantly negatively correlated with rice allelopathic potential, while acid phosphatase and alkaline-phosphatase activity is significantly positively correlated with rice allelopathic potential. No significant relationship exists between protease and dehydrogenase activity with other enzymes or microbial amount and rice allelopathic potential. Allelopathic rice decreases polyphenol oxidase activity, increases acid-phosphatase, alkaline-phosphatase and invertase activity, which is beneficial for allelopathic substance accumulation, soil carbon and phosphorus cycle enhancement.

Key words Rice, Allelopathy, Allelopathic potential, Soil microbe, Soil enzyme

(Received Sept. 10, 2007; accepted Nov. 8, 2007)

利用作物的化感作用控制田间杂草被认为是21世纪农业可持续发展的关键技术之一^[1],前人在化感水稻种质资源评价^[2]、化感物质的分离与鉴定^[3-6]、化感作用的遗传特性^[7,8]、分子机理研究等方面取得了重要进展^[9,10],但对水稻化感作用根际过程的研究很少^[11-15]。王大力等研究发现在实验室中大部分对稗草具有显著抑制作用的水稻品种,

在田间试验中却没有显示化感作用^[2],这是因为田间试验中大量根际微生物的拮抗作用,还是化感物质在土壤中分解或者是通过其他途径损失了,从而导致化感作用的丧失,至今无明确结论^[11-13]。土壤酶是土壤有机物代谢的催化剂,对土壤中物质转化具有重要作用。土壤酶活性的高低直接影响土壤生态系统的物质循环过程,是衡量土壤理化性

* 国家自然科学基金项目(30471028,30671220)、福建省科技厅项目(2002F012,2005K039)资助

** 通讯作者:林文雄(1957~),男,汉族,博士,教授,主要从事作物栽培与耕作学、作物生理生态的研究。E-mail: wenxiong181@163.com
林瑞余(1968~),男,汉族,博士研究生,副教授,主要从事作物生理生态、化学生态学研究。E-mail: lrylin2004@163.com

收稿日期:2007-09-10 接受日期:2007-11-08

质、肥力水平、微生物学特征和土壤环境污染状况的重要指标^[14-20]。土壤酶与土壤微生物、土壤酶与土壤生态系统的物质转化关系是当前土壤生物化学的研究热点问题^[21,22]。本课题组前期研究表明,不同化感潜力水稻根际微生物区系及对碳源代谢功能存在显著差异^[13],可以预测与物质转化密切相关的土壤酶活性间也存在差异,但有关水稻化感作用土壤酶活性的报道比较少^[15]。探讨化感水稻根际土壤酶活性与化感潜力、土壤微生物间的关系,有助于揭示水稻化感物质在土壤中的转化以及土壤微生物间的互作,为阐明化感水稻作用机制、促进水稻化感作用在农业实践中的应用提供借鉴。

1 材料与方法

试验在福建农林大学教学农场进行。试验地土壤主要理化性质为:有机碳含量 $15.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $2.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效氮 $29.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $1.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $126.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $1.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $354.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 为 5.5。供试水稻品种为化感水稻“*IAC47*”、“*Iguape*”、“*PI312777*”和非化感水稻“*Lemont*”。2006 年 8 月,统一浸种催芽后,每品种每小区($1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$)均匀播种 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,设无播种小区作对照,试验重复 3 次,采用旱作栽培管理。在苗期(3 叶期)按照 5 点取样,用抖落法获得各水稻根际土和对照土,土壤立即过 2 mm 筛,混匀,鲜土用于微生物区系和酶活性分析。供试水稻的化感潜力(稗草、莠苣根长抑制率)和土壤的微生物区系特征分析参见文献[13]。

土壤酶活性测定参照关松荫等^[16]的方法。土壤脱氢酶采用比色法测定,酶活性以 24 h 后 1 g 干土生成三苯基甲潜(TF)的量表示;过氧化氢酶采用滴定法测定,酶活性以 1 g 干土 1 h 内消耗 0.1 mol KMnO_4 毫升数表示;蔗糖酶采用硝基水杨酸法测

定,酶活性以 24 h 后 1 g 干土中葡萄糖的含量表示;纤维素酶采用蒽酮比色法测定,酶活性以 1 g 土样在 24 h 内生成的葡萄糖表示;蛋白酶采用 Folin-Ciocsleu 法测定,酶活性以 24 h 后 1 g 干土中氨基酸含量表示;脲酶采用比色法测定,酶活性以 24 h 后 1 g 干土中氨基酸的含量表示;多酚氧化酶采用邻苯三酚比色法测定,酶活性以 2 h 后 1 g 干土紫色没食子素的含量表示;过氧化物酶活性测定采用比色法,酶活性以 2 h 后 1 g 干土紫色没食子素的含量表示;磷酸单脂酶采用对硝基苯磷酸盐法测定,酶活性以单位时间里生成的对硝基苯酚的量表示。数据的统计分析采用 DPS 5.0 软件(杭州睿丰信息技术有限公司)完成。

2 结果与分析

2.1 不同化感潜力水稻根际土壤氧化还原酶活性

由表 1 可见,不同化感潜力水稻根际土壤氧化还原酶活性存在明显差异。非化感水稻“*Lemont*”根际土壤脱氢酶(DH)活性显著高于化感水稻“*PI312777*”、“*IAC47*”、“*Iguape*”和 CK;化感水稻“*PI312777*”根际土壤脱氢酶活性显著低于其他处理,“*IAC47*”、“*Iguape*”的脱氢酶活性与 CK 之间无显著差异。各水稻品种根际土壤及 CK 土壤的过氧化氢酶(CAT)活性间均存在显著差异,活性从高到低“*Iguape*”>“*Lemont*”>“*PI312777*”>“*IAC47*”>CK,非化感水稻“*Lemont*”的过氧化氢酶活性也比较高。非化感水稻“*Lemont*”的过氧化物酶(POD)活性最高,不同处理间存在显著差异,活性高低为:“*Lemont*”>“*Iguape*”>“*PI312777*”>CK>“*IAC47*”。化感水稻根际土壤的多酚氧化酶(PPO)活性显著低于“*Lemont*”和 CK,不同化感潜力水稻的多酚氧化酶活性高低为:CK>“*Lemont*”>“*Iguape*”>“*PI312777*”>“*IAC47*”。

表 1 不同水稻苗期根际土壤氧化还原酶活性

Tab. 1 Oxidoreductase activities in the rhizospheric soils with different rice cultivars at seedling stage

处理 Treatment	酶活性 Enzyme activity			
	DH($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	CAT($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	POD($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	PPO($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
<i>Iguape</i>	$29.5 \pm 0.7 \text{ b}$	$0.61 \pm 0.01 \text{ a}$	$465.7 \pm 7.5 \text{ b}$	$529.0 \pm 15.9 \text{ c}$
<i>PI312777</i>	$20.9 \pm 0.8 \text{ c}$	$0.39 \pm 0.01 \text{ c}$	$446.3 \pm 5.3 \text{ c}$	$525.7 \pm 24.1 \text{ c}$
<i>IAC47</i>	$29.7 \pm 2.7 \text{ b}$	$0.24 \pm 0.01 \text{ d}$	$154.1 \pm 1.8 \text{ e}$	$501.5 \pm 5.1 \text{ d}$
<i>Lemont</i>	$41.4 \pm 1.0 \text{ a}$	$0.42 \pm 0.01 \text{ b}$	$479.4 \pm 10.2 \text{ a}$	$558.2 \pm 12.4 \text{ b}$
CK	$30.4 \pm 2.0 \text{ b}$	$0.09 \pm 0.01 \text{ e}$	$428.6 \pm 2.9 \text{ d}$	$640.8 \pm 7.2 \text{ a}$

表中各栏数据后的字母不同表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著。The data followed by different small letters in one column are significantly different at 0.05 level. DH: 脱氢酶 Dehydrogenase; CAT: 过氧化氢酶 Catalase; POD: 过氧化物酶 Peroxidase; PPO: 多酚氧化酶 Polyphenoloxidase. 下同 The same below.

2.2 不同化感潜力水稻根际土壤水解酶活性

研究结果显示,不同化感潜力水稻根际土壤水解酶活性存在显著差异(表2)。各水稻根际土壤的脲酶(UR)活性均显著低于CK,化感水稻“Iguape”、“PI31277”的脲酶活性显著低于非化感水稻“Lemont”,但化感水稻“IAC47”和“Lemont”之间无显著差异。各水稻根际土壤的酸性磷酸酶(ACP)和碱性磷酸酶(AKP)活性均显著高于CK,且酸性磷酸酶活性远高于碱性磷酸酶活性。不同处理土壤的酸性磷酸酶活性均存在显著差异,高低顺序表现为:“PI31277”>“IAC47”>“Lemont”>“Iguape”>CK。碱性磷酸酶活性以“IAC47”最高,但化感水

稻和非化感水稻间无显著差异。不同处理土壤的蔗糖酶(Inv)活性差异显著,各水稻土的蔗糖酶活性均显著高于CK,且以“PI31277”最高,是CK的2.93倍,“Lemont”的1.22倍。

不同化感水稻根际土壤的纤维素酶活性间也存在显著差异。化感水稻“IAC47”的土壤纤维素酶(CA)活性高于CK,而化感水稻“PI31277”低于CK,“Iguape”与CK无显著差异,非化感水稻“Lemont”的纤维素酶活性则低于CK。不同处理土壤蛋白酶(Pr)活性除“IAC47”显著低于“Iguape”外,化感水稻间及其与非化感水稻间蛋白酶活性均无显著差异。

表2 不同水稻苗期根际土壤水解酶活性

Tab.2 Hydrolase activities in the rhizospheric soils with different rice cultivars at seedling stage

处理 Treatment	酶活性 Enzyme activity($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)					
	UR	ACP	AKP	Inv	CA	Pr
Iguape	643.7 \pm 9.0c	403.1 \pm 33.1d	19.1 \pm 2.25b	5 008.9 \pm 347.7c	257.2 \pm 24.0b	351.5 \pm 3.6a
PI31277	652.1 \pm 13.1c	573.6 \pm 11.9a	20.8 \pm 2.71b	7 488.3 \pm 247.2a	187.5 \pm 8.9c	317.0 \pm 11.4ab
IAC47	797.9 \pm 24.9b	492.8 \pm 19.6b	25.8 \pm 0.59a	4 345.3 \pm 67.0d	319.2 \pm 23.5a	297.0 \pm 49.7b
Lemont	783.0 \pm 72.3b	449.1 \pm 9.4c	22.5 \pm 3.26ab	6 134.2 \pm 216.1b	173.1 \pm 47.3c	324.0 \pm 12.8ab
CK	999.9 \pm 9.2a	319.9 \pm 11.6e	10.1 \pm 1.09c	2 555.1 \pm 179.1e	250.4 \pm 22.6b	319.9 \pm 5.3ab

UR:脲酶 Urease; ACP:酸性磷酸酶 Acid-phosphatase; AKP:碱性磷酸酶 Alkaline-phosphatase; Inv:蔗糖酶 Invertase; CA:纤维素酶 Cellulase; Pr:蛋白酶 Protease. 下同 The same below.

2.3 不同化感水稻根际土壤酶活性、微生物种群密度及水稻化感潜力的相关分析

2.3.1 根际土壤不同酶活性间的关系

对不同化感潜力水稻苗期土壤酶活性间相关分析表明,除脲酶活性与蔗糖酶、过氧化氢酶活性

呈显著负相关,酸性磷酸酶活性与蔗糖酶呈显著正相关,碱性磷酸酶与多酚氧化酶以及纤维素酶与多酚氧化酶呈显著负相关外,其余的酶活性间无显著水平的相关性(表3)。此外,蛋白酶、脱氢酶活性与其他酶之间均无显著相关关系。

表3 土壤不同酶活性间的相关性

Tab.3 Relationships among soil enzyme activities

项目 Item	UR	Pr	ACP	AKP	Inv	CA	DH	CAT	POD
Pr	-0.382								
ACP	-0.679	-0.377							
AKP	-0.612	-0.326	0.746						
Inv	-0.813 *	0.080	0.844 *	0.580					
CA	0.249	-0.297	-0.233	0.092	-0.644				
DH	0.296	0.106	-0.422	0.097	-0.197	-0.180			
CAT	-0.884 *	0.711	0.292	0.413	0.610	-0.297	0.041		
POD	-0.175	0.748	-0.227	-0.481	0.296	-0.807 *	0.138	0.414	
PPO	0.802	0.128	-0.773	-0.910 *	-0.602	-0.198	0.237	-0.569	0.432

* 表示相关性水平为 $P < 0.05$ Means significant correlation at 0.05 level. 下同 The same below.

2.3.2 根际土壤酶活性与微生物数量、水稻化感潜力间的关系

根据参考文献[13]对不同化感潜力水稻根际

土壤微生物种群密度及其化感潜力的研究结果,对水稻根际土壤酶活性与微生物数量、水稻化感潜力间的相关关系分析(表4)表明,土壤细菌与脲酶活

性呈显著负相关,与酸性磷酸酶、蔗糖酶活性呈显著正相关;真菌与过氧化氢酶活性呈显著负相关;放线菌与碱性磷酸酶呈显著正相关,与多酚氧化酶呈显著负相关;微生物总量与脲酶、多酚氧化酶活性

呈显著负相关,而与酸性磷酸酶呈显著正相关。化感水稻化感潜力(以稗草和茼蒿的根长抑制率表示)与土壤脲酶、多酚氧化酶活性呈显著负相关,与酸性磷酸酶、碱性磷酸酶活性间存在显著的正相关关系。

表 4 根际土壤酶活性与微生物数量、水稻化感潜力间的相关性

Tab.4 Relationships among soil enzyme activities, soil microbe community and its allelopathic potential

项目 Item	UR	Pr	ACP	AKP	Inv	CA	DH	CAT	POD	PPO
细菌 Bacteria	-0.896 *	0.102	0.835 *	0.525	0.809 *	-0.186	-0.645	0.604	0.027	-0.763
真菌 Fungi	-0.208	-0.530	0.486	0.440	-0.003	0.701	-0.649	-0.151	-0.818 *	-0.613
放线菌 Actinomycete	-0.793	0.164	0.509	0.858 *	0.504	0.145	0.102	0.759	-0.248	-0.906 *
微生物总量 Total microbe	-0.953 **	0.123	0.816 *	0.694	0.785	-0.081	-0.472	0.711	-0.076	-0.895 *
茼蒿抑制率 Inhibition rate of lettuce	-0.917 *	0.009	0.840 *	0.843 *	0.774	-0.036	-0.304	0.684	-0.200	-0.964 **
稗草抑制率 Inhibition rate of barnyard grass	-0.901 *	-0.005	0.821 *	0.881 *	0.757	-0.021	-0.226	0.686	-0.226	-0.974 *

** 表示相关性水平为 $P < 0.01$ Means significant correlation at 0.01 level.

3 讨论

土壤氧化还原酶影响土壤中酶促氧化还原反应的进行。土壤脱氢酶能酶解有机物质脱氢,是氢的中间传递体,其活性高低标志着土壤微生物分解代谢作用的强弱,反映了土壤微生物总活性^[19]。本研究表明化感水稻根际土壤的脱氢酶活性显著低于非化感水稻,化感水稻根系分泌物抑制了脱氢酶活性,降低了土壤微生物对土壤有机物的脱氢氧化能力。

土壤中的过氧化氢酶能酶促过氧化氢分解为水和氧,与土壤微生物活动密切关,有机质含量高的土壤,过氧化氢酶的活性较强,有利于解除过氧化氢的毒害作用和提高土壤肥力^[15,16,21]。本研究中各水稻根际土壤的过氧化氢酶活性显著高于对照,这与前期土壤微生物种群密度的研究结果一致^[13],说明水稻根系分泌物可以明显提高过氧化氢酶活性,改善土壤肥力状况,增强土壤的解毒能力,为水稻生长创造良好环境。土壤过氧化物酶能酶促土壤中酚、胺类有机物质氧化成醌的过程,参与土壤腐殖质的合成,对土壤肥力的形成具有重要作用。土壤中多酚氧化酶以酚类物质为底物,可将酚类物质氧化为醌,醌又能与氨基酸分子合成胡敏酸,直接影响土壤中芳香族化合物转化为腐殖质,这种转化直接影响水稻化感潜力的实现。土壤中固有的酚酸等芳香族化合物较稳定,但外源酚酸等物质进入土壤后,在土壤酶作用下,一部分很快被土壤吸附、微生物利用或分解^[11,12,19,20]。研究表明,化感水稻“*Iguape*”、“*PI312777*”、“*IAC47*”根际土壤的过氧化物酶、多酚氧化酶活性均显著低于非化感水稻“*Lemont*”,可以预测化感水稻有利于其根系分

泌的酚类、胺类物质在土壤中的滞留、积累和放大。水稻化感潜力与土壤脱氢酶、过氧化物酶、多酚氧化酶的活性呈负相关,表明根际氧化作用的加强不利于水稻化感作用的实现。

土壤水解酶对土壤中各类化合物的分解、土壤养分的供给等具有重要作用。蛋白酶能促进蛋白质水解生成肽和氨基酸,脲酶参与尿素的水解作用,脲酶和蛋白酶能促进土壤中氮素的转化,使蛋白质等含氮化合物水解为氨,供植物吸收利用。蛋白酶活性在化感水稻与非化感水稻根际土壤间无显著差异,与水稻化感潜力亦无显著相关。化感水稻根际土壤脲酶活性明显低于非化感水稻“*Lemont*”和对照,水稻化感潜力与脲酶活性呈显著负相关,这是否与其根系分泌物抑制了脲酶活性,降低了土壤氮素的转化与释放^[16,21],从而实现化感效应有关尚待进一步加以证实。此外,在氮素养分充足的条件下,土壤氮素转化与释放的降低有利于提高水稻的氮素利用效率。土壤有机磷在磷酸酶作用下转化为植物根系可用的无机磷,促进土壤磷循环。在南方酸性水稻土中,酸性磷酸酶活性远高于碱性磷酸酶。化感水稻根际土壤磷酸酶活性总体上高于非化感水稻和对照,化感水稻具有提高土壤释放有效磷的潜在能力,保障了稻株快速生长所需的磷素供应,也增强对磷素胁迫的抗性。相关分析表明水稻的化感潜力与酸、碱性磷酸酶活性间均呈显著正相关。各水稻根际土蔗糖酶活性均高于CK,化感水稻纤维素酶活性高于非化感水稻,表明种植水稻能增强蔗糖酶活性,促进土壤有机碳转化,与水稻化感潜力呈明显的正相关。可见,化感水稻能够改变根际土壤中的水解酶活性,调节碳、氮、磷等营养元素的周转与循环,为化感水稻创造

了良好的根际营养环境,为土壤微生物繁殖和化感物质的转化提供保证。但胡开辉等对水作水稻根际土壤脲酶活性研究表明,化感水稻对土壤脲酶具有促进作用^[15],这是否因水作环境下土壤氧化还原条件的明显差异导致酶活的变化有待进一步加以证实^[4]。

土壤微生物是土壤生态系统中最活跃的部分,是土壤分解系统的主要成分,在推动土壤物质转换、能量流动和生物地化循环中起着重要作用^[13]。土壤酶一部分通过土壤细菌、真菌、放线菌等微生物代谢产生^[19],酶活性与细菌和真菌类群密切相关^[4]。不同化感潜力水稻根际土壤酶活性存在明显差异,这与土壤微生物的差异显著相关^[15]。土壤酸性磷酸酶、蔗糖酶活性与细菌数量存在显著正相关关系;碱性磷酸酶与放线菌存在显著正相关。可见,化感水稻对酸性磷酸酶的显著促进作用,间接促进了土壤中细菌数量的增加,也使得化感水稻土壤微生物种群密度保持在一个较高水平^[13,22]。同时说明微生物区系的变化明显受化感水稻特有根系分泌物的影响。胡开辉等研究表明^[15],根际环境中的酚酸能促进细菌数量的增加,这进一步佐证了本研究结果。过氧化物酶、多酚氧化酶活性与真菌数量显著负相关,而这两种酶的酶促反应底物均为酚类物质,由此可以看出,化感水稻根系分泌物中含有的大量次生代谢物酚酸,影响了土壤微生物的群落组成。

参考文献

- [1] 林文雄,何海斌,熊君,等. 水稻化感作用及其分子生态学研究进展[J]. 生态学报,2006,26(8):2687-2694
- [2] 王大力,马瑞霞,刘秀芬,等. 水稻化感抗草种质资源的初步研究[J]. 中国农业科学,2000,33(3):94-96
- [3] Kato N. H. Allelopathic substance in rice root exudates: Rediscovery of momilactone B as an allelochemical[J]. J. Plant Physiol., 2004,161:271-276
- [4] Seal A. N., Pratley J. E., Haig T., *et al.* Identification and quantification of compounds in a series of allelopathic and nonallelopathic rice root exudates[J]. J. Chem. Ecol., 2004,30:1647-1662
- [5] Kong C. H., Xu X. H., Zhou B., *et al.* Two compounds from allelopathic rice accession and their inhibitory activity on weeds and fungal pathogens[J]. Phytochemistry, 2004,65:1123-1128
- [6] 张淑香,高子勤. 连作障碍与根际微生态研究. II. 根系分泌物与酚酸物质[J]. 应用生态学报,2000,11(1):152-156
- [7] 林文雄,董章杭,何华勤,等. 不同环境下水稻化感作用的动态杂种优势分析[J]. 中国农业科学,2003,36(9):5-10
- [8] 曾大力,钱前,滕胜. 水稻化感作用的遗传分析[J]. 科学通报,2003,48(3):265-268
- [9] 徐正浩,何勇,崔绍荣. 水稻化感物质的代谢途径及基因调控[J]. 植物保护,2004,30(1):5-8
- [10] 余柳青,陆永良,周勇军,等. 相同遗传背景不同植株形态水稻等基因系与杂草的竞争及化感作用[J]. 应用生态学报,2004,16(4):721-725
- [11] Marschner P., Timonen S. Interactions between plant species and mycorrhizal colonization on the bacterial community composition in the rhizosphere[J]. Applied Soil Ecology, 2005,28:23-36
- [12] Brajesh K. S., Peter M., Andrew S. W., *et al.* Unravelling rhizosphere-microbial interactions: opportunities and limitations[J]. Trends in Microbiology, 2004,12(8):386-393
- [13] 林瑞余,戎红,周军建,等. 苗期化感水稻对根际土壤微生物群落及其功能多样性的影响[J]. 生态学报,2007,27(9):3644-3654
- [14] Tiffany L. W., Sang W. P., Jorge M. V. Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2004,7:472-479
- [15] 胡开辉,罗庆国,汪世华,等. 化感水稻根际微生物类群及酶活性变化[J]. 应用生态学报,2006,17(6):1060-1064
- [16] 关松荫. 土壤酶及其方法[M]. 北京:农业出版社,1986:3-25
- [17] 张旭辉,潘根兴,李恋卿. 连续多年栽培叶用银杏下土壤养分及酶活性变化[J]. 土壤通报,2004,35(1):21-25
- [18] Badiane N. Y., Chotte J. L. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions[J]. Applied Soil Ecology, 2001,18:229-238
- [19] Andreoni V., Cavalca L., Rao M. A., *et al.* Bacterial communities and enzyme activities of PAHs polluted soils[J]. Chemosphere, 2004,57:401-412
- [20] 薛冬,姚槐应,黄昌勇,等. 植茶年龄对茶园土壤微生物特性及酶活性的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(2):84-87.
- [21] Bruce A. C. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review[J]. Pedobiologia, 2005,49:637-644
- [22] 林文雄,熊君,周军建,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