

假高粱挥发油化学成分及其化感潜力

孟庆会 黄红娟 刘艳 刘新刚 魏守辉 张朝贤*

(中国农业科学院植物保护研究所, 中国农业科学院杂草害鼠生物学与治理重点开放实验室, 北京 100193)

摘要: 以水蒸气蒸馏法提取假高粱挥发油, 应用 GC 和 GC-MS 定量分析其化学成分, 并探讨其饱和和水溶液对作物、杂草和土壤微生物的活性。结果表明, 从挥发油中鉴定出的 26 种化学成分占总挥发油的 76.51%, 主要成分为倍半萜类化合物, 如反式- α -佛手烯(21.95%)、 α -绿叶烯(10.77%)和 α -雪松烯(4.66%)等。假高粱挥发油对所有供试杂草种子萌发、作物苗高及其干重具有较强的抑制作用。在假高粱挥发油作用下, 土壤中真菌和放线菌数量显著减少, 细菌数量明显增加。研究证明, 假高粱挥发油对其它植物及土壤微生物有较强的化感效应。

关键词: 假高粱; 外来杂草; 挥发油; 化感作用

Chemical compositions and allelopathic potential of volatile oil from *Sorghum halepense* (L.) Pers.

Meng Qinghui Huang Hongjuan Liu Yan Liu Xingang Wei Shouhui Zhang Chaoxian*

(Key Laboratory of Weed and Rodent Biology and Management, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: The volatile oil was obtained with steam distillation from Johnsongrass *Sorghum halepense* (L.) Pers. leaves. The chemical components were analyzed by the means of GC and GC-MS, and its biological effects on crops, weeds and microbial populations were studied. Twenty-six chemicals, 76.51% of total content, were isolated and identified from the volatile oil. The main component was sesquiterpenes, such as trans- α -berg-amotene (21.95%), α -patchoulene (10.77%), α -himachalene (4.66%), etc. Weed germination, crop shoot height and dry weight were significantly inhibited by the volatile oil. The volatile oil also significantly reduced the population of fungi and actinomycetes in the test soils, but significantly increased the population of bacteria in the soils. The results indicated that the volatile oil from *Sorghum halepense* demonstrated significant allelopathic potential on depressing surrounding plants and affecting microbial populations.

Key words: *Sorghum halepense* (L.) Pers.; invasive weeds; volatile oil; allelopathy

假高粱 *Sorghum halepense* (L.) Pers. 为禾本科 Poaceae 蜀黍属 *Sorghum* Moench 多年生杂草, 原产于地中海地区^[1], 现分布于 50 多个国家和地区, 是世界十大恶性杂草之一^[2]。假高粱适应能力强、危害大、繁殖快、极难防除, 被中国、美国和澳大利亚等列为进境检疫杂草。20 世纪 80 年代假高粱籽实混

在进口粮食中侵入我国, 目前已扩散至广东、江苏、山东、河南和北京等 10 多个省(市), 其适宜分布区多达 20 省区以上约 400 个县市^[3]。随着国内外贸易的发展, 假高粱极易通过粮食夹带而进一步传入并扩散, 对我国农业生产具有极大的潜在威胁。

外来物种的入侵往往造成农作物产量的巨大损

基金项目: 国家“十一五”科技支撑重大项目(2006BAD08A09), 中央级公益性科研院所基本科研专项资金(2008YW05)

作者简介: 孟庆会, 男, 1982 年生, 硕士研究生, 研究方向为杂草科学和植物化感作用, email: mqhchina@gmail.com

* 通讯作者(Author for correspondence), email: cxzhang@wssc.org.cn

收稿日期: 2009-02-20

失,这种现象常常被归咎于入侵种相对于本土种具有更强的竞争力,然而,越来越多的证据证明植物化感作用在其入侵过程中发挥着重要作用^[4-6]。植物化感作用是指一种植物通过向环境释放化学物质而对另一种植物包括微生物所产生的直接或间接的伤害或促进作用。植物化感物质的释放途径主要包括:雨雾淋溶、自然挥发、根系分泌和植株分解^[7]。

自然挥发是植物释放化感物质的一种主要途径,它所释放的萜类化感物质可以影响邻近植物的正常生长和改变土壤微生物群落结构^[8]。但由于萜类的挥发性和低水溶性,制约了研究者对其饱和水溶液的相关研究。最近的研究发现,许多含氧萜类物质在水中具有足够的溶解度而显示出较强的化感作用^[8-9],许多内酯在水中的溶解度适中,既不易被雨水冲洗消失,又能缓慢溶解而表现化感效应^[10]。

已有研究结果证明假高粱具有较强的化感潜力,并认为化感作用可能是其形成强大入侵力的主要原因^[11-12]。但是大部分学者的研究主要侧重于假高粱形态解剖学^[13]、籽实和根状茎的生物学特征特性^[14-15]、假高粱的遗传学变异^[16]和假高粱的人工、化学以及生物防除^[17-18]等方面,而针对其入侵过程的研究甚少。

作者通过对假高粱挥发油化感作用潜力的评价,初步探究假高粱成功入侵的化学机制,以期揭示假高粱与其它生物之间的化学关系和探讨其在入侵过程中的作用、外来杂草入侵与本地植物及土壤微生物之间的关系。

1 材料与方法

1.1 供试材料

假高粱地上部分于2008年6月采自中国农业科学院植物保护研究所温室。

试验用土壤采自中国农业科学院植物保护研究所实验田的表层浮土(10 cm深),pH为6.50,磷含量为1.56 μg/g,钾含量为50.08 μg/g,有机质含量为1.9 mg/g,采集土壤经风干后过2 mm筛备用。

供试作物有大豆 *Glycine max*、小麦 *Triticum aestivum*、花生 *Arachis hypogaea*、莴苣 *Lactuca sativa* 和黄瓜 *Cucumis sativus*,其种子均购自中国农业大学。

供试杂草有苘麻 *Abutilon theophrasti*、反枝苋 *Amaranthus retroflexus*、黄顶菊 *Flaveria bidentis*、牛筋草 *Eleusine indica* 和稗草 *Echinochloa crusgalli*,其种

子均由本实验室提供。

1.2 挥发油的提取

用水蒸气蒸馏法提取假高粱挥发油,将采集的假高粱地上部分风干剪碎后,放入水蒸气蒸馏装置中,提取5 h,馏出液经乙醚(分析纯,北京化工厂)萃取,无水硫酸钠干燥,除去溶剂,得到具有特殊气味的淡黄色油状物。

1.3 假高粱挥发油化学成分分析

用正己烷稀释提取的假高粱挥发油,然后再分别用1 μL 稀释液在气相色谱仪(Gas Chromatography, GC)和气相色谱-质谱联用仪(Gas Chromatography-Mass Spectra, GC-MS)上进行化学成分分析。

气相色谱仪为Agilent Technologies 7890A。测定条件:色谱柱为HP-5 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm 石英毛细管,起始温度为50 °C,保持5 min,然后以4 °C/min 升温至280 °C,恒温10 min,检测器温度280 °C,载气为氦气,纯度≥99.99%,分流比20:1。色谱峰以C5~C26 烷烃为标样分别计算出各自的保留指数(retention index)。

气相色谱-质谱联用仪为Thermo Scientific-PolarisQ。色谱条件:色谱柱为HP-5 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm 石英毛细管柱,起始温度为50 °C,保持2 min,然后以4 °C/min 升温至260 °C,恒温10 min,检测器温度280 °C。载气为氦气,纯度≥99.99%;EI离子源,电子能量为70 eV;扫描范围为40~500 质谱质量单位。各色谱峰通过计算机检索NIST05 数据库和Xcalibur 工作站数据处理系统进行化学成分分析。

各化学成分依据它们在气相色谱测定的保留指数和气相色谱-质谱测定的质谱结果共同确定。

1.4 生物活性测定

1.4.1 假高粱饱和水溶液的制备

参考王朋等^[8]方法,取适量假高粱挥发油加入500 mL 分液漏斗中,充分震荡,保持液面有油滴后静置。12 h后取下层清液,即假高粱挥发油饱和水溶液(30 °C时饱和溶解度为15.2 ± 3.0 mg/L),用于生物活性测定。

1.4.2 种子萌发的测定

采用土壤基质进行试验,在直径9 cm 培养皿内加入50 g 土壤(用10 mL 假高粱挥发油饱和水溶液湿润),再分别均匀地将各成熟饱满的受试植物种子(大豆和花生各为15粒,小麦、莴苣、西红柿和苘麻各为30粒,反枝苋、黄顶菊、牛筋草和稗草各为50粒)

播入土壤中,以去离子水润湿的土壤为对照,每处理重复 8 次。将培养皿置入培养箱内,培养箱内温度设定为白天 30 ℃,晚上 20 ℃,光照时间 12 h/天,除了小麦和莠苣 36 h 外,其它均 72 h 后记录各种子的萌发数。

1.4.3 幼苗生长的测定

采用土壤盆栽方法测定假高粱挥发油饱和水溶液对作物和杂草幼苗生长的影响。在直径 8 cm、高 8 cm 的塑料杯中装入 200 g 土壤(用 60 mL 假高粱挥发油饱和水溶液浸湿),然后分别将经催芽的大豆、小麦、黄瓜和苘麻各 4 粒,反枝苋、牛筋草和稗草各 8 粒播入土壤中,以去离子水浸湿的土壤为对照,每处理重复 8 次。将塑料杯置入培养箱内,培养箱内温度设定为白天 30 ℃,晚上 20 ℃,光照时间 12 h/天。每隔 1 天向塑料杯中补充适量水分,待对照作物及杂草生长到 3 叶期时,取样记录苗高、根长及其干重。

1.4.4 土壤微生物种群数量的测定

按 1.4.3 幼苗生长测定方法,在土壤中播入大豆、小麦、反枝苋、稗草种子以及不播入种子(空白无植物),每处理重复 3 次,待幼苗生长 7 天后采用稀释平板法测定土壤微生物种群数量^[19]。称取 10 g 鲜土样置于已灭菌的装有玻璃珠的三角瓶中,加入 90 mL 无菌水,在摇床 200 r/min 震荡 30 min,制成浓度为 10^{-1} 的稀释液,然后吸取 10 mL 稀释液放入另一盛有 90 mL 无菌水的三角瓶中,制成 10^{-2} 的稀释液,以此类推对土壤悬浮液进行梯度稀释,好氧异养细菌和放线菌采用 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 的稀释液,真菌采用 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 的稀释液,最后取合适的稀释度 0.1 mL 涂平板,每个稀释度重复 4 次。好氧异养细菌用牛肉膏蛋白胨培养基于 30 ℃ 条件下培养 36 h,放线菌用高氏 1 号琼脂培养基于 28 ℃ 条件下培养 48 ~ 72 h,真菌用马丁孟加拉红琼脂培养基于 28 ℃ 条件下培养 48 ~ 72 h 后进行菌落形成单位(colony forming unit)计数。

$$\text{抑制率}(\%) = \frac{\text{对照组总数} - \text{处理组总数}}{\text{对照组总数}} \times 100$$

1.5 数据统计分析

种子萌发和幼苗生长的测定数据参照 Williamson & Richardson^[20] 的方法处理,采用化感作用效应指数(R_1)表示化感作用的强弱, $R_1 = T/C - 1$,其中 T 为测试项目的处理值, C 为对照值, R_1 为化感作用

效应指数, $R_1 > 0$ 表示存在促进作用, $R_1 < 0$ 表示存在抑制作用, R_1 绝对值大小与作用强度一致。

2 结果与分析

2.1 挥发油成分分析

经 GC 和 GC-MS 分析,共鉴定出的 26 种化学成分(表 1),占总挥发油的 76.51%。其中以反式- α -佛手烯为主要成分,占 21.95%;其次为 4-己烯-1-醇,占 12.14%; α -绿叶烯,占 10.77%;Isohexanol,占 6.00%; α -雪松烯,占 4.66%;十六烷酸,占 4.14% 等。

2.2 假高粱挥发油对作物及杂草种子萌发和幼苗生长的影响

假高粱挥发油饱和水溶液在对 5 种作物种子萌发影响试验中,对大豆种子萌发的抑制作用最强, R_1 值为 -0.19;对莠苣和黄瓜种子萌发抑制作用也较明显, R_1 值分别为 -0.13 和 -0.10;而对小麦和花生种子萌发的影响非常小, R_1 值分别仅为 -0.06 和 -0.07。但是对 5 种受试杂草种子萌发均有较强的影响,而且明显强于对作物的抑制作用,其抑制强度依次为稗草(R_1 值为 -0.55) > 黄顶菊(R_1 值为 -0.49) > 牛筋草(R_1 值为 -0.42) > 苘麻(R_1 值为 -0.43) > 反枝苋(R_1 值为 -0.39)。

在假高粱挥发油饱和水溶液对作物及杂草幼苗生长影响试验中,均表现出较强的抑制作用,其中对小麦苗高及其干重的抑制作用最强,化感作用效应指数分别约为 -0.39 和 -0.32,而对黄瓜和苘麻的根长及其干重的抑制效果最为明显(表 2)。

2.3 假高粱挥发油饱和水溶液对土壤微生物种群数量的影响

假高粱挥发油饱和水溶液能够明显改变土壤微生物数量。与对照相比,假高粱挥发油饱和水溶液对空白无植物和本地受试植物土壤微生物区系中的真菌和放线菌均有明显的抑制作用,真菌及放线菌数量均显著减少;对细菌则有促进作用,细菌数量明显增加(表 3)。

3 讨论

萜类是一大类化感物质,最常见的是倍半萜和单萜,多具有挥发性,它们不仅具有昆虫的引诱、忌避和传递信息等效应,而且还能杀菌和抑制邻近植物^[7]。假高粱挥发油化学成分以倍半萜类为主,占

表 1 假高粱挥发油的主要化学成分及其相对含量

Table 1 Composition of the essential oil from *Sorghum halepense*

峰数 Peak no.	化学成分 Chemical composition	分子式 Molecular formula	滞留指数 Kováts retention index	相对含量(%) Relative amount
1	4-己烯-1-醇 4-hexen-1-ol	C ₆ H ₁₂ O	798	12.14
2	Isohexanol	C ₆ H ₁₄ O	812	6.00
3	α-甲苯甲醛 α-tolualdehyde	C ₈ H ₈ O	950	0.23
4	苯乙醇 Phenylethyl alcohol	C ₈ H ₁₀ O	1079	0.21
5	甘菊环 Azulene	C ₁₀ H ₈	1086	1.49
6	加州月桂酮 Umbellulone	C ₁₀ H ₁₄ O	1104	0.68
7	冰片 Camphol	C ₁₀ H ₁₈ O	1122	0.26
8	香兰素 Vanillin	C ₈ H ₈ O ₃	1217	0.37
9	β-环柠檬醛 β-cyclocitral	C ₁₀ H ₁₆ O	1236	1.49
10	二氢猕猴桃内酯 Dihydro-actinidiolide	C ₁₁ H ₁₆ O ₂	1268	0.37
11	1,6-二甲基十氢化萘 1,6-dimethyldecahydronaphthalene	C ₁₂ H ₂₂	1276	1.33
12	2,3-二甲基十氢化萘 2,3-dimethyldecahydronaphthalene	C ₁₂ H ₂₂	1278	0.24
13	2,2-二甲基十氢化萘 2,2-dimethyldecahydronaphthalene	C ₁₂ H ₂₂	1282	0.34
14	1-甲基环十一烯 1-methylcycloundecene	C ₁₂ H ₂₂	1285	0.18
15	反式-α-佛手烯 Trans-α-bergamotene	C ₁₅ H ₂₄	1416	21.95
16	α-金合欢烯 α-farnesene	C ₁₅ H ₂₄	1428	2.62
17	β-紫罗兰酮 β-ionone	C ₁₃ H ₂₂ O	1453	1.15
18	α-雪松烯 α-himachalene	C ₁₅ H ₂₄	1456	4.66
19	α-佛手烯 α-bergamotene	C ₁₅ H ₂₄	1465	1.59
20	α-绿叶烯 α-patchoulene	C ₁₅ H ₂₄	1485	10.77
21	7-pentadecyne	C ₁₅ H ₂₈	1521	1.08
22	十六烷酸 Cetyllic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	1947	4.14
23	油酸 Oleic acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	1998	0.28
24	硬脂酸 Octadecanoic acid	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	2015	1.16
25	9-n-hexylheptadecane	C ₂₃ H ₄₈	2138	1.02
26	二十五烷 Pentacosane	C ₂₅ H ₅₂	2465	0.76

表 2 假高粱挥发油对作物及杂草幼苗生长的影响

Table 2 Effect of saturated aqueous solution of volatile oil from *Sorghum halepense* on seedling growth of the tested crop and weed species

指标 Indicator	化感作用效应指数 Response index (R ₁)						
	小麦 Wheat	黄瓜 Cucumber	大豆 Soybean	苣荬 Lettuce	反枝苋 Redroot pigweed	稗草 Barnyardgrass	牛筋草 Goose grass
苗高 Shoot height	-0.39 ± 0.03 **	-0.15 ± 0.02 *	-0.22 ± 0.02 **	-0.23 ± 0.04 **	-0.21 ± 0.02 **	-0.14 ± 0.03 *	-0.25 ± 0.04 **
根长 Root length	-0.11 ± 0.02 *	-0.27 ± 0.04 **	-0.07 ± 0.02 *	-0.35 ± 0.04 **	-0.14 ± 0.02 *	-0.07 ± 0.04 *	0.04 ± 0.03
苗干重 Shoot dry weight	-0.32 ± 0.02 **	-0.26 ± 0.02 **	-0.22 ± 0.04 **	-0.25 ± 0.02 **	-0.20 ± 0.04 *	-0.23 ± 0.02 **	-0.12 ± 0.02 *
根干重 Root dry weight	-0.07 ± 0.01 *	-0.41 ± 0.07 *	-0.04 ± 0.02	-0.39 ± 0.03 **	-0.09 ± 0.03 *	-0.17 ± 0.03 *	-0.08 ± 0.02 *

注:数据为 8 次重复平均值 ± 标准误。t 检验结果: * 表示在 0.05 水平差异显著; ** 表示在 0.01 水平差异显著。Note: The data are the average of eight replicates ± standard error. The results of t-test for the significant difference are represented by asterisk. * Showed the level 0.05; ** showed the level 0.01.

表 3 假高粱挥发油饱和水溶液对土壤微生物种群数量的影响

Table 3 Effect of saturated aqueous solution of volatile from *Sorghum halepense* on soli microbial populations

土壤 The soil	试剂 Agent	真菌数量 Fungi number ($\times 10^6$ cfu/g)	抑制率 Inhibition rate(%)	放线菌数量 Actinomycetes number ($\times 10^6$ cfu/g dry soil)	抑制率 Inhibition rate(%)	细菌数量 Bacteria number ($\times 10^6$ cfu/g dry soil)	抑制率 Inhibition rate(%)
小麦	VOC	20.5 \pm 0.5 **	60.1	65.4 \pm 2.1 **	34.7	246.0 \pm 2.2 **	-17.0
Wheat	CK	51.4 \pm 1.8	-	100.1 \pm 2.3	-	210.4 \pm 2.0	-
大豆	VOC	82.6 \pm 1.6 **	34.4	109.5 \pm 2.4 **	20.2	532.6 \pm 1.9 **	-22.0
Soybean	CK	125.9 \pm 1.6	-	137.3 \pm 2.5	-	436.7 \pm 2.9	-
稗草	VOC	16.7 \pm 0.5 **	53.4	26.5 \pm 1.2 **	31.5	123.8 \pm 1.9 **	-27.9
Barnyardgrass	CK	35.8 \pm 1.1	-	38.7 \pm 0.8	-	96.8 \pm 2.1	-
反枝苋	VOC	9.8 \pm 0.5 **	65.5	32.4 \pm 1.4 **	39.9	80.2 \pm 2.9 **	-28.7
Redroot pigweed	CK	28.4 \pm 0.8	-	53.9 \pm 2.1	-	62.3 \pm 2.5	-
空白 无植物	VOC	4.7 \pm 0.7 **	48.9	10.1 \pm 0.5 **	61.9	54.0 \pm 1.1 **	-45.6
Without plants	CK	9.2 \pm 0.5	-	26.5 \pm 1.9	-	37.1 \pm 1.1	-

注:数据为 12 次重复平均值 \pm 标准误。CK 是去离子水,VOC 是假高粱挥发油饱和水溶液。** 表示在 0.01 水平相关显著。

Note: The data are the average of twelve replicates \pm standard error. CK is deionized water and VOC is saturated aqueous solution of volatile from *S. halepense*. **The two asterisk show significant correlative at 0.01 level respectively.

鉴定化学成分挥发油的 55% 以上,如反式- α -佛手烯、 α -金合欢烯、 α -雪松烯、 α -佛手烯、 α -绿叶烯和 7-pentadecyne 等,除此之外还有单萜类如甘菊环、加州月桂酮、冰片、 β -环柠檬醛以及其它醇类和酸类等。王朋等^[8]和 Weidenhamer 等^[9]认为挥发性化感物质在水中具有一定的溶解度。本试验中,假高粱挥发油饱和水溶液对植物和土壤微生物表现出较强的生物活性,表明假高粱挥发油具有一定的水溶性,但要明确其具体挥发性化感成分,还需进一步研究。

研究证实,植物释放的挥发性物质可以直接或经雨雾淋溶到附近土壤而影响邻近植物的正常生长^[7]。假高粱挥发油饱和水溶液对所有受试植物幼苗苗高及其干重均有较强的抑制作用。除黄瓜和苘麻外,对其它 5 种植物幼苗苗高及其干重的抑制作用明显大于对幼苗根长及其干重的影响。这表明在假高粱挥发油饱和水溶液的作用下,大多数植物幼苗生长比根长生长具有更高的敏感性。在种子萌发试验中,假高粱挥发油饱和水溶液对作物种子萌发影响甚微,但是对其幼苗生长的影响很明显,显示出较强的化感抑制活性。综合种子萌发和幼苗生长试验可以看出,假高粱挥发油对杂草以抑制种子萌发为主,同时对其幼苗生长表现出抑制作用;而对作物,则是以抑制其幼苗生长为主。这些特性使得假高粱挥发油在与自然存在的杂草和人工种植的作物

竞争中处于有利地位,助其成功入侵、定制和蔓延。

有些外来植物可以通过改变土壤微生物群落结构明显增强其入侵能力^[21-23]。本研究结果表明,假高粱挥发油能够明显影响土壤微生物的活动,改变植物生长的土壤环境,影响了本地植物与土壤微生物之间经过长期选择形成的平衡共生关系,从而影响本地植物的正常生长。可见,假高粱挥发油对土壤微生物活动的影响也为其成功入侵新生境创造了条件。

参 考 文 献(References)

- [1] 李扬汉. 中国杂草志. 北京: 中国农业出版社, 1998: 1008, 1338
- [2] Monaghan N. The biology of Johnsongrass (*Sorghum halepense*). Weed Research, 1979, 19: 261-267
- [3] 蒋青. 应用农业气候相似距分析假高粱在我国的适生范围. 植物检疫, 1994, 8(5): 257-262
- [4] Callaway R M, Aschehoug E T. Invasive plants versus their new and old neighbors: A mechanism for exotic invasion. Science, 2000, 290(5491): 521-523
- [5] Hierro J L, Callaway R M. Allelopathy and exotic plant invasion. Plant and Soil, 2003, 256(1): 29-39
- [6] 王朋, 梁文举, 孔垂华, 等. 外来杂草入侵的化学机制. 应用生态学报, 2004, 15(4): 707-711
- [7] 孔垂华, 胡飞. 植物化感(相生相克)作用及其应用. 北京: 中国农业出版社, 2001

- [8] 王朋,王莹,孔垂华. 植物挥发性单萜经土壤载体的化感作用——以三裂叶豚草(*Ambrosia trifida* L.)为例. 生态学报, 2008, 28(1): 62-68
- [9] Weidenhamer J D, Macias F A, Fischer N H, et al. Just how insoluble are monoterpenes? *Journal of Chemical Ecology*, 1993, 19(8): 1799-1807
- [10] Macias F A. Allelopathy in the search for natural herbicide models. // Inderjit, Dakshini K M M, Einhellig F A. Allelopathy: organisms, processes and applications. American Chemical Society Symposium Series, Washington, DC., 1995, 582: 310-329
- [11] Vasilakoglou I, Dhima K, Eleftherohorinos I. Allelopathic potential of Bermudagrass and Johnsongrass and their interference with cotton and corn. *Agronomy Journal*, 2005, 97: 303-313
- [12] 黄红娟,张朝贤,孟庆会,等. 外来入侵杂草假高粱的化感潜力. 生态学报, 2008, 27(7): 1234-1237
- [13] 王建书,李扬汉. 假高粱与同属7种植物营养器官的比较解剖学研究. 杂草学报, 1995, 9(1): 27-33
- [14] McMhorter C G. Factor affecting Johnsongrass rhizomes production and germination. *Weed Science*, 1972, 20: 41-45
- [15] 魏守辉,张朝贤,黎春花,等. 外来恶性杂草假高粱种子萌发特性研究. 中国农业科学, 2008, 41(1): 116-121
- [16] De Wet J M J. Systematics and evolution of *Sorghum* sect. *Sorghum* (Gramineae). *American Journal of Botany*, 1978, 65(4): 477-484
- [17] 张瑞平,詹逢吉. 假高粱的生物学特性及防除方法. 杂草科学, 2000(3): 11-14
- [18] 吴海荣,强胜,段惠,等. 假高粱的特征特性及控制. 杂草科学, 2004(1): 52-54
- [19] 赵斌,何绍江. 微生物学实验. 北京: 科学出版社, 2005: 69-75
- [20] Williamson G B, Richardson D. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment response with independent controls. *Journal of Chemical Ecology*, 1988, 14(1): 181-187
- [21] Callaway R M, Thelen G C, Rodriguez A, et al. Soil biota and exotic plant invasion. *Nature*, 2004, 427(6976): 731-733
- [22] Wolfe B E, Klironomos J N. Breaking new ground: soil communities and exotic plant invasion. *BioScience*, 2005, 55(6): 477-487
- [23] Reinhart K O, Callaway R M. Soil biota and invasive plants. *New Phytologist*, 2006, 170(3): 445-457