

# 不同处理的豚草残留物对小麦的化感作用\*

张凤娟<sup>1,2</sup> 郭建英<sup>2</sup> 龙 茹<sup>1</sup> 万方浩<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup> 河北科技师范学院野生植物资源研究所, 河北昌黎 066600; <sup>2</sup> 中国农业科学院植物保护研究所植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100081)

**摘 要** 豚草是一种危害性恶性入侵杂草, 对农业生态系统造成了严重危害。本实验主要研究了燃烧及未燃烧的豚草残留物及其水浸提液对小麦的化感作用, 探讨了是否可用燃烧的方法来消除或减弱豚草残留物的化感作用。结果表明: 豚草的残留物及其水浸提液均对小麦的早期生长有抑制作用, 且残留物水浸提液对苗长的影响较残留物大, 说明豚草残留物的化感物质可能是一些水溶性的物质, 水的浸提使植物体中的一些化感物质得到了较完全的释放; 混有豚草残留物的土壤的理化性质也发生变化, 且随着土壤中豚草残留物浓度的增加, 土壤的 pH、电导率、有机碳含量及酚酸含量均有不同程度的升高, 这些因素的综合作用抑制了小麦幼苗的生长, 其中酚酸是其主要化感组分之一; 通过对燃烧和未燃烧的豚草残留物的化感作用比较研究发现, 燃烧过的残留物与未燃烧的残留物对苗长均有显著的抑制作用, 但二者之间的差异不显著, 因此不能用燃烧的方法消除豚草残留物对本地植物的影响。

**关键词** 豚草; 化感作用; 化感物质

**中图分类号** X8 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)4-0669-05

**Allelopathy of different treated residues of *Ambrosia artemisiifolia* L. on wheat growth.**

ZHANG Feng-juan<sup>1,2</sup>, GUO Jian-ying<sup>2</sup>, LONG Ru<sup>1</sup>, WAN Fang-hao<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Research Institute of Wild Plant Resources Application, Hebei Normal University of Science & Technology, Changli 066600, Hebei, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection (South Campus), Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4): 669–673.

**Abstract:** *Ambrosia artemisiifolia* L. is a major invasive weed in many regions of the world, and has significant impact on agricultural ecosystems. This paper studied the allelopathic effects of the burned and unburned *A. artemisiifolia* residues and their water extracts on wheat growth, aimed to approach whether burning could eliminate or weaken the allelopathic effects of *A. artemisiifolia* residue. Both the residue and its water extracts had inhibitory effects on the early growth of wheat, but the impact of the residue was smaller than that of the extracts, suggesting that the allelochemicals in *A. artemisiifolia* residue were water-soluble, and water extraction could release the allelochemicals into soil to a great extent. The addition of the residue also made the soil physical and chemical properties changed. With the increasing amount of added *A. artemisiifolia* residue, the soil pH, conductivity, organic carbon content, and the contents of phenolic compounds (main components of allelochemicals) all increased to some extent, which in integration inhibited wheat growth. Both the burned and unburned residues inhibited wheat growth significantly, and no significant difference was observed between the residues. Therefore, it was not the good way to burn the *A. artemisiifolia* residue to eliminate its allelopathic effects on native plants.

**Key words:** *Ambrosia artemisiifolia* L.; allelopathy; allelochemicals.

\* 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB119200)、河北省教育厅项目(20091220)和河北科技师范学院博士基金资助项目。

\*\* 通讯作者 E-mail: wanfangh@public3.bta.net.cn

收稿日期: 2009-09-14 接受日期: 2009-12-08

豚草(*Ambrosia artemisiifolia* L.)原产北美,属菊科一年生草本,是一种危害人体健康和农、牧业生产的恶性危险性杂草,被国家环保总局列为第一批16种外来入侵物种之一(陈永亨等,2006)。自20世纪40—50年代传入中国以来,已在东北地区广泛蔓延,南方许多省市也有较大的发生,对自然植被、农业生产的巨大危害。豚草广泛蔓延的原因有多方面,植物本身强大的吸水与吸肥能力、旺盛的生命力、强大的繁殖力以及种子的2次休眠特性等都可造成豚草的蔓延(万方浩等,1993;陈红松等,2009)。

研究表明,三裂叶豚草入侵麦田的化感干涉机制主要是通过残株在土壤生物和非生物因子作用下释放二萜化感物质而对下茬作物显示化感抑制效应,因此及时清除耕作地中的三裂叶豚草残株是减少其对作物危害的必要措施(Kong *et al.*, 2007;王朋等,2008)。豚草属的另一种多年生杂草——毛果破布草(*A. psilostachya*)的化感作用也有研究报道,发现它在弃耕地的演替中的作用可能是由于根系分泌物、枯落物腐败以及挥发物等的化感活性造成的。另外,这些物质对豆科植物的根瘤的大小、数量、颜色等都有影响,同时对几种固氮菌和硝化菌也有相当的影响(Rice, 1965, 1968)。一般认为,化感作用(allelopathy)是植物入侵的机制之一。豚草的化感作用已有一些研究。林嵩等(2005)研究表明,豚草释放化感物质对其周围植物的种子萌发和幼苗生长产生抑制作用。Jackson和Willemssen(1976)研究认为,豚草的化感作用在弃耕地的次生演替中扮演的先锋植物角色中起着主要的作用,但目前有关豚草残留物的化感作用还未见报道。在国内,人们常用燃烧的方法消除杂草,因此,本实验探讨了燃烧和未燃烧的豚草残留物对小麦幼苗的生长,以期探讨是否可用燃烧的方法来防治豚草,并进一步揭示豚草残留物的化感作用机制,为豚草的防治提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

2007年10月采集成熟的豚草植株,采回的植株用蒸馏水洗净后风干,一部分植株粉碎处理后作为未燃烧残留物(UR),装进塑料袋作进一步的使用;另一部分植株进行燃烧处理,得到的灰分作为燃烧残留物(BR)。采集豚草未入侵域的土壤(pH

7.6,电导率  $531.0 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,有机质含量 1.70%,水解性氮的含量  $108.35 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,速效磷  $26.21 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,速效钾  $90.65 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ),风干,1 mm 孔径筛选,放入塑料袋保存作进一步使用。受体植株的小麦种子购于昌黎县种子站。

### 1.2 试验方法

豚草残留物水浸提液的提取 将4 g 残留物浸泡在100 ml 蒸馏水中,24 °C下保存24 h后用滤纸进行双层过滤,所得滤液的浓度为4% (W/V)。然后将原液进一步稀释,所得浓度分别为0.5、1.0、2.0和4.0% (W/V)。溶液被保存在4 °C的冰箱中待用。在每一次处理中,15粒小麦种子放在直径为15 cm的铺有双层滤纸的培养皿中,滤纸上滴加7 ml 提取物的水溶液,以蒸馏水作为对照。每种处理3次重复。在光照条件下培养,培养条件为温度  $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度  $75\% \pm 3\%$ ,光照 16L/8D,光照强度  $250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。7 d后测量小麦幼苗的根长和苗高。

不同浓度豚草残留物的土壤制备 分别用0.5、1.0、2.0和3.0 g 未燃烧和燃烧的豚草残留物和100 g 土壤混合,并加100 ml 蒸馏水,室温下保存18 h。以未加豚草残留物的100 g 土样作为对照。然后从每个土壤样品中取50 g,放入直径为5 cm的培养皿中,每个培养皿中放入15粒小麦种子,然后用薄膜封口并在上面扎上小孔,放于光照培养箱中进行培养,培养条件为温度  $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度  $75\% \pm 3\%$ ,光照 16L/8D,光照强度  $250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。培养7 d后测其根长、苗长和干质量。

豚草水浸提液和土壤理化性质的测定 分别测定不同浓度的豚草水浸提液和土壤的pH、电导率、有机碳含量及酚酸含量等指标。土壤酸碱度(pH)测定采用电位法(水土比为1:1)测定,电导率(EC)测定采用电导仪测定法(水土比为5:1)测定(刘永军等,2002),有机碳含量的测定采用重铬酸钾法(许光辉等,1986),酚酸含量的测定采用福林(Folin-Ciocalteu)比色法(刘永军等,2002)。

### 1.3 数据分析

用SPSS 12.0 数据分析软件 One-way ANOVA 进行方差分析,利用Duncan 复极差法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 豚草残留物水浸提液对小麦幼苗生长的影响

由图1可知,未燃烧和燃烧后的豚草残留物水

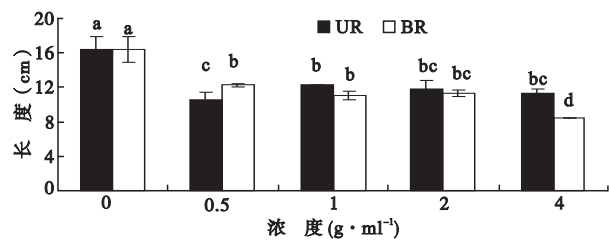


图1 不同浓度的未燃烧和燃烧的豚草残留物浸提液对小麦幼苗根长的影响

Fig.1 Effect of different concentrations of extracts prepared from UR and BR of *Ambrosia artemisiifolia* on root length of wheat

UR 代表未燃烧处理;BR 代表燃烧处理浓度,下同。

浸提液均抑制了小麦幼苗根的伸长,且与对照相比均达到显著程度。浓度为 0.5% 时,未燃烧的豚草残留物水浸提液对小麦根长的抑制作用较燃烧后的豚草残留物浸提液大,其他浓度下未燃烧的豚草残留物水浸提液和燃烧后的豚草残留物浸提液对小麦根长的抑制作用差异不显著。

由图2可知,未燃烧和燃烧后的豚草残留物水浸提液均抑制了小麦幼苗苗长的伸长,且与对照相比均达到显著的程度,但 0.5、1.0、2.0、和 4.0 g · 100g<sup>-1</sup> 各个处理间差异不显著。

2.2 含豚草残留物的土壤对小麦幼苗生长的影响

土壤中豚草残留物对小麦幼苗的生长有一定的抑制作用,且随着土壤中残留物浓度的增加抑制作用逐渐增强(表1)。含未燃烧的豚草残留物土壤对小麦苗长的抑制作用不明显,而对根长具有显著的抑制作用,方差分析表明,除 0.5 g · 100 g<sup>-1</sup> 浓度外,其他浓度与对照相比对根长的抑制作用均达到显著水平;含燃烧的豚草残留物的土壤对根长的抑制作用也强于对苗长的抑制作用,与对照相比,在 2.0 g · 100 g<sup>-1</sup> 和 3.0 g · 100 g<sup>-1</sup> 的浓度下培养的幼苗其苗长及根长差异均达到显著水平。含未燃烧的豚草

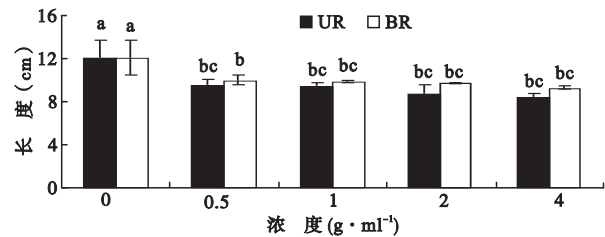


图2 不同浓度的未燃烧和燃烧的豚草残留物浸提液对小麦幼苗苗长的影响

Fig.2 Effect of different concentrations of extracts prepared from UR and BR of *Ambrosia artemisiifolia* on shoot length of wheat

表1 在含燃烧和未燃烧豚草残留物的土壤中的小麦的生长情况

Tab.1 Growth of wheat in soil amended with water extracts of unburned ( UR ) and burned ( BR ) residues of *Ambrosia artemisiifolia*

残留物 ( g · 100g <sup>-1</sup> 土壤)	残留物 类 型	苗 长 ( cm )	根 长 ( cm )
0	—	6.69±1.25 ab	10.22±2.65 ab
0.5	UR	6.41±1.02 ab	9.01±2.56 abc
	BR	6.64±1.35 a	10.13±3.10 a
1.0	UR	5.98±1.01 abc	7.83±2.01 cd
	BR	5.31±0.98 abcd	7.91±1.65 bcd
2.0	UR	5.85±1.24 abc	6.53±1.48 de
	BR	4.72±1.11 cd	6.59±2.58 de
3.0	UR	5.30±1.24 bcd	5.88±1.68 de
	BR	4.33±1.06 d	5.01±1.22 e

显著水平为 5%,UR 为未燃烧残留物,BR 为燃烧后的残留物。

残留物土壤与含燃烧的豚草残留物的土壤对小麦幼苗生长抑制作用的差异不明显。

2.3 不同浓度豚草残留物水浸提液 pH 值、电导率和酚酸含量

由表2可知,燃烧后的豚草残留物水浸提液的 pH 值随着浓度的增加而增加,方差分析结果表明,除高浓度(4%)外,其他浓度处理与对照相比差异均不显著;对于未燃烧的豚草残留物水浸提液而言随着浓度的增加 pH 也逐渐增加,但各浓度处理的 pH 值均小于对照,且 0.5%、1% 两浓度处理的 pH 值与对照差异显著。燃烧和未燃烧处理后豚草残留物水浸提液的电导率均高于对照,且随着浓度的增加逐渐增加。随着残留物浓度的增加水浸提液中酚酸的含量逐渐增加,且相同浓度的残留物处理,燃烧后的豚草残留物水浸提液的酚酸含量显著低于未燃烧的豚草残留物水浸提液中酚酸含量。

表2 豚草的未燃烧和燃烧的残留物水提取液的 pH 值、电导率和酚酸含量

Tab.2 The pH and phenolic content in the water extracts of unburned ( UR ) and burned ( BR ) residues of *Ambrosia artemisiifolia*

浓度 ( % )	残留物 类型	pH	电导率 ( μS · cm <sup>-1</sup> )	酚酸 ( μg · ml <sup>-1</sup> )
0	—	7.0±0.23 bcd	0.7×10 <sup>3</sup>	—
0.5	UR	5.2±1.03 e	1.6×10 <sup>3</sup>	15.12±1.02 d
	BR	7.5±1.21 abc	2.4×10 <sup>3</sup>	10.02±1.34 d
1	UR	5.1±0.98 e	2.2×10 <sup>3</sup>	27.34±2.36 c
	BR	8.0±1.12 ab	2.8×10 <sup>3</sup>	16.35±2.31 d
2	UR	5.7±0.68 de	2.4×10 <sup>3</sup>	52.03±6.23 b
	BR	8.1±0.80 ab	2.9×10 <sup>3</sup>	26.12±2.13 c
4	UR	6.0±1.05 cde	2.6×10 <sup>3</sup>	78.29±5.26 a
	BR	9.0±2.15 a	3.0×10 <sup>3</sup>	46.32±4.12 b



表 3 含燃烧和未燃烧豚草残留物或豚草浸提液的土壤中 pH、电导率、有机碳及酚酸含量的变化  
Tab. 3 Difference in pH, conductivity and total phenolic content in soils amended with either residues (R) or water extracts (W) of unburned (UR) and burned (BR) residues of *Ambrosia artemisiifolia*

浓度 (%)	残留物类型	pH		电导率( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )		有机碳含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )		总酚含量( $\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ )	
		R	W	R	W	R	W	R	W
0	-	6.15±0.02d	6.15±0.21c	618.73±5.21i	618.73±10.23f	0.95±0.12e	0.95±0.12d	5.16±0.46e	5.16±0.46g
0.5	UR	6.75±0.03c	6.84±0.16bc	866.80±6.16h	570.98±6.35h	10.12±2.12d	1.25±0.10cd	5.66±0.34b	5.98±0.57efg
	BR	6.78±0.12c	6.89±0.46bc	1227.37±8.32e	790.23±10.34e	1.17±0.12e	1.12±0.12cd	5.39±0.32e	5.71±0.33fg
1.0	UR	7.06±0.10c	7.26±0.19abc	948.27±10.34g	605.28±7.35g	15.61±2.56c	1.45±0.14bc	7.36±0.39bc	7.88±0.40c
	BR	7.09±0.14c	7.33±0.32abc	1640.98±12.03c	1005.44±11.35c	1.32±0.12e	1.17±0.11cd	6.15±0.74de	6.41±0.26def
2.0	UR	7.67±0.24b	7.84±1.02ab	1169.49±12.35f	725.77±8.79f	18.87±1.14b	2.59±0.85a	8.22±0.65b	8.89±0.68b
	BR	7.84±0.21b	7.87±0.68ab	2786.13±23.01b	1482.50±18.32b	1.57±0.11e	1.42±0.11cd	6.92±0.32cd	6.98±0.54cde
4.0	UR	8.76±0.58a	8.19±1.06a	1399.94±16.87d	811.76±11.54d	24.78±2.18a	2.88±0.65a	10.15±1.03a	11.29±1.02a
	BR	8.84±0.61a	8.20±1.20a	11332.19±21.03a	2017.60±19.36a	1.90±0.21e	2.18±0.54ab	7.72±0.35c	7.34±0.47cd

显著水平为 5%, UR 为未燃烧的残留物, BR 为燃烧后的残留物, R 为残留物, W 为浸提液。

2.4 不同浓度豚草残留物的土壤和不同浓度残留物水浸提液的土壤理化性质

从表 3 可以看出,含不同浓度燃烧后的豚草残留物的土壤与对照相比,其有机碳含量差异不显著,土壤的 pH 和电导率均显著高于对照,酚酸含量随着浓度的增加而增加,且浓度>1.0 % 时土壤中的酚酸含量显著高于对照。对于含未燃烧残留物的土壤而言,土壤的 pH、电导率、有机碳和酚酸的含量随着浓度的增加而增加,且均显著高于对照。

含燃烧后的豚草残留物的水浸提液的土壤 pH 值随着残留物浓度的增加逐渐增加,当残留物浓度高于 2% 时,与对照差异达到显著水平;所有浓度下浸提液的电导率与对照相比均达到显著水平,且随着浓度的增加而增加;有机碳含量随着浓度的增加逐渐增加,但只有高浓度(4.0%) 处理的水浸提液的有机碳含量与对照的差异达到显著水平;酚酸的含量随着浓度的增加也逐渐增加,当浓度高于 1.0% 时豚草残留物水浸提液中的酚酸含量显著高于对照。对于未燃烧的豚草残留物的水浸提液而言,pH 值随着浓度的增加而增加,但只有 2.0%、4.0% 浓度处理的 pH 值与对照差异达到显著水平;电导率随着浓度的增加而增加,且与对照达到显著水平;有机碳和酚酸含量随着浓度的增加逐渐增加,当浓度高于 0.5% 时水浸提液的有机碳和酚酸含量与对照的差异达到显著水平。

3 讨 论

3.1 豚草残留物可通过改变土壤的理化性质来影响小麦幼苗的生长

外来植物在入侵过程中与本地植物之间的相互作用是极其复杂的。外来入侵植物可以通过化感作用直接或间接地影响本地植物的生长,植物释放的化感物质可以通过根系分泌、雨水淋溶、微生物分解有机残体等方式释放进入土壤,因此这些化感物质与土壤环境息息相关的,它是土壤群落影响植物种群的一个重要因素( Castells *et al.* ,2005; Batish *et al.* ,2007)。Ehrenfeld(2003) 研究表明,在土壤中入侵植物的残留物较本地植物的残留物分解速度快,且这些释放物质可以调节 C 循环和 N 循环。Knicker等(2002) 研究表明,由于在土壤中添加残留物的种类和量的不同,从而导致土壤有机物组分的改变。本研究表明,含燃烧和未燃烧豚草残留物土壤的 pH 值、电导率、有机碳和酚酸含量等理化性质均发生了改变,但是这种改变与植物残株覆盖及土壤混合对土壤的影响显著不同。国内外实验和实践都证明了植物残株覆盖及土壤混合既有利于更新土壤有机质,保持和提高土壤有机质含量,又可增加土壤中营养元素的储量,促进土壤中某些营养元素的有效供应,还可改善土壤的孔隙、团聚、坚实性等物理性质,还可以提高土壤微生物生物量及增强各种土壤酶的活性,使作物较好较快地生长,提高作物的产量( Charles, 1999; 任万军等, 2009)。在本实验

中,含燃烧的豚草残留物的土壤与含未燃烧的豚草残留物土壤均对小麦幼苗的生长有着显著的抑制作用,二者之间的这种抑制作用差异不显著,且随着浓度的提高抑制作用增强,这表明豚草残留物对小麦生长的影响是由多种因素造成的,一部分是由于豚草残留物释放的化感物质直接影响小麦幼苗的生长,另一方面是因为豚草残留物改变了土壤的理化性质,从而影响小麦幼苗对土壤养分的吸收和利用。该结果也表明不能用燃烧的方法消除豚草残留物对本地植物的影响。

### 3.2 酚酸是豚草残留物释放的主要化感组分

酚酸是最为普遍的一类化学他感物质,是土壤和植物根系分泌物中普遍存在且对植物生长发育起抑制作用的物质,其中对羟基苯甲酸、香草酸、丁香酸、香豆酸和阿魏酸是重要的化感物质(Chou & Leu, 1992)。酚酸对植物起抑制作用,可能直接影响作物根系细胞膜的特性,或者通过改变土壤微生物类群等,从而影响植物的生长与发育(Blum, 1998; Li *et al.*, 2002)。

本研究表明,残留物水浸提液较含豚草残留物的土壤对幼苗生长的抑制作用强,原因可能是种间感应化合物是水溶性的,浸提使残留物中的这些化合物得到了较好的释放,从而对幼苗的生长产生了较大的影响。酚酸含量的测定表明,豚草残留物水浸提液和残留物处理的土壤中均含有大量酚酸,且土壤中的酚酸含量低于水浸提液中的酚酸含量。究其原因可能是植物释放的酚酸进入土壤后经一系列化学转变过程致使酚酸含量降低,如土壤微生物的分解、有机物或土壤颗粒的吸附等(Blum *et al.*, 1999)。研究表明,只有小剂量的酚酸就可影响植物根系的生长(Elliot & Cheng, 1987)。因而,我们推断豚草残留物对小麦生长的影响可能是其向土壤释放了水溶性的化感物质(如酚酸),在自然条件下这些化感物质可能对小麦的生长造成影响,因此加强对豚草残留物的管理可防止其对农作物早期生长影响,这对持续控制入侵植物豚草具有重要的意义。

### 参考文献

陈红松, 周忠实, 郭建英, 等. 2009. 豚草种群控制研究概况. 植物保护, **35**(2): 20–24.  
陈永亨, 吴降星, 陆军良. 2006. 豚草的生物学特性及防除. 安徽农学通报, **12**(4): 136.  
林 嵩, 翁伯琦. 2005. 外来植物化感作用研究综述. 福建农业学报, **20**(3): 202–210.

刘永军, 郭守华, 杨晓玲. 2002. 植物生理生化实验. 北京: 中国农业科技出版社: 154–155.  
任万军, 刘代银, 吴锦秀, 等. 2009. 免耕高留茬抛秧对稻田土壤肥力和微生物群落的影响. 应用生态学报, **20**(4): 817–822.  
万方浩, 关广清, 王 韧. 1993. 豚草及豚草的综合防治. 北京: 中国科学技术出版社.  
王 朋, 王 莹, 孔垂华. 2008. 植物挥发性单萜经土壤载体的化感作用——以三裂叶豚草为例. 生态学报, **28**(1): 62–68.  
许光辉, 郑洪元. 1986. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 中国农业出版社.  
Batish DR, Singh HP, Kaur S, *et al.* 2007. Root-mediated allelopathic interference of nettle-leaved goosefoot (*Chenopodium murale*) on wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Agronomy and Crop Science*, **193**: 37–44.  
Blum U, Shafer SR, Lehman ME. 1999. Evidence for inhibitory allelopathic interactions involving phenolic acids in field soils: Concepts vs. an experimental model. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **18**: 673–693.  
Blum U. 1998. Effects of microbial utilization of phenolic acids and their phenolic acid breakdown products on allelopathic interactions. *Journal of Chemical Ecology*, **24**: 685–708.  
Castells E, Penuelas J, Valentine DW. 2005. Effects of plant leachates from four boreal understorey species on soil N mineralization, and white spruce (*Picea glauca*) germination and seedling growth. *Annals of Botany*, **95**: 1247–1252.  
Charles AN. 1999. Water use and yield of dryland row crops as affected by tillage. *Agronomy Journal*, **91**: 108–115.  
Chou CH, Leu L. 1992. Allelopathy substances and activities of *Delonix regia* Raf. *Journal of Chemical Ecology*, **18**: 353–367.  
Ehrenfeld JG. 2003. Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes. *Ecosystems*, **6**: 503–523.  
Elliot LF, Cheng HH. 1987. Assessment of allelopathy among microbes and plants// Waller GR, ed. *Allelochemicals: Role in Agriculture and Forestry*. Washington DC: American Chemical Society: 505–514.  
Jackson JR, Willemsen RW. 1976. Allelopathy in the first stages of secondary succession on the piedmont of New Jersey. *American Journal of Botany*, **63**: 1015–1023.  
Li ST, Zhou JM, Wang HY, *et al.* 2002. Phenolic acids in plant-soil-microbe system: A review. *Pedosphere*, **12**: 1–14.  
Knicker H, Saggar S, Baumler R, *et al.* 2000. Soil organic matter transformations induced by *Hieracium pilosella* L. in tussock grassland of New Zealand. *Biology and Fertility of Soils*, **32**: 194–201.  
Kong CH, Wang P, Xu XH. 2007. Allelopathic interference of *Ambrosia trifida* with wheat (*Triticum aestivum*). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **119**: 416–420.  
Rice EL. 1965. Inhibition of nitrogen-fixing and nitrifying bacteria by seed plant. II. Characterization and identification of inhibitors. *Physiologia Plantarum*, **18**: 255–269.  
Rice EL. 1968. Inhibition of nodulation of inoculated legumes by pioneer plant species from abandoned fields. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, **95**: 346–358.

作者简介 张风娟,女,1969年5月,博士,教授。研究方向为入侵植物的入侵机制。E-mail: fengjuanzhang@126.com  
责任编辑 李凤芹