

杨鸿波,廖朝选,赵亚洲,等. 3 种作物初期生长对全氟辛烷磺酸盐和全氟辛酸的响应及富集特征[J]. 江苏农业科学,2018,46(15):232-237.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.15.060

### 3 种作物初期生长对全氟辛烷磺酸盐和全氟辛酸的响应及富集特征

杨鸿波<sup>1,2</sup>, 廖朝选<sup>2</sup>, 赵亚洲<sup>2</sup>, 谢 勋<sup>2</sup>, 谭 红<sup>1,2</sup>

(1. 北京化工大学, 北京 100029; 2. 贵州省分析测试研究院, 贵州贵阳 550002)

**摘要:**为评价全氟化合物对非靶标植物生长发育的影响以及在植物体内的富集特征,以水稻、大豆、油菜分别作为禾本科、豆科、十字花科的代表作物研究不同全氟辛烷磺酸盐(perfluorooctane sulphonate,简称PFOS)和全氟辛酸(perfluorooctanoic acid,简称PFOA)暴露浓度下的作物生长发育情况,并对其在作物体内的分布情况进行比较分析。结果表明,当PFOS、PFOA的暴露浓度为1.0~25.0 mg/kg时,水稻、大豆、油菜的出苗率、株高、生物量与对照组均无明显差异。PFOS、PFOA在3种植物体内均表现出根中浓度大于茎叶中浓度的特点;水稻、大豆、油菜等3种不同科属作物对PFOS的富集能力表现为水稻>大豆>油菜,对PFOA的富集能力表现为油菜>水稻>大豆;同时添加1.0、5.0、25.0 mg/kg PFOS、PFOA对3种作物的出苗率、株高、生物量未见明显抑制作用,且在植株中的总富集量与二者单独试验时富集量无明显差异。

**关键词:**PFOS;PFOA;作物;生长发育;富集因子;传输因子

**中图分类号:**X592 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)15-0232-05

全氟化合物具有极高的化学稳定性和良好的疏水疏油性,在民用和工业产品生产中被广泛应用<sup>[1-2]</sup>。随着经济的快速发展,大量的全氟化合物被暴露于环境中,通过呼吸和摄食被生物体吸收,在生物体内蓄积,由于其持久性强,已成为当前环境中最难降解的污染物之一<sup>[3-4]</sup>。全氟辛烷磺酸盐(perfluorooctane sulphonate,简称PFOS)和全氟辛酸(perfluorooctanoic acid,简称PFOA)是被普遍检出的全氟化合物<sup>[5-6]</sup>,具有高生物蓄积性,同时对生物体具有生殖毒性、免疫毒性、神经内分泌毒性、肝脏毒性、发育神经毒性等<sup>[7-8]</sup>,且由其引起的神经毒性具有潜伏性,往往在个体成熟后才显现出来<sup>[9]</sup>;其中PFOA还可影响胚胎发育、生物行为,并可造成DNA损伤<sup>[10]</sup>。PFOS和PFOA的大量生产与广泛利用,使得在动、植物体内被广泛检出,其对环境产生了严重危害<sup>[11]</sup>;PFOS或PFOA通过人类摄食蔬菜、禽蛋、肉类等食物而间接进入人体,正威胁着人类的健康。了解PFOS和PFOA对植物的生长影响以及在体内的分布,可为植物中全氟化合物的污染阻控提供数据支持。

针对PFOS和PFOA对植物生长发育的影响,Stahl等在2009年率先系统研究春小麦、燕麦、马铃薯、玉米、多年生黑麦草等5种植物对土壤中PFOA和PFOS的生物利用性,结果发现,0.25~50.00 mg/kg范围内高浓度的PFOA和PFOS对

植物的生长会产生影响,特别是对马铃薯而言,土壤中的PFOA和PFOS浓度就越高,植物中全氟化合物(perfluorinated compounds,简称PFCs)浓度就越高,且营养器官比储能器官更敏感<sup>[12]</sup>。吕振娥等通过研究小麦、大麦、白菜、白车轴草、绿豆等5种植物在短期内受PFOS的抑制作用发现,小麦根伸长的半效应浓度(median effect concentration,简称EC<sub>50</sub>)为352 mg/kg,最为敏感<sup>[13]</sup>。Qu等发现,低浓度的PFOS可以轻微刺激小麦幼苗的生长,诱导小麦幼苗中叶绿素和可溶性蛋白质的合成,而当PFOS浓度超过10 mg/L时可抑制根生长,影响根、叶生物量,并阻碍叶绿素的累积和可溶性蛋白质的合成<sup>[14]</sup>。由此可知,PFOA和PFOS可以被植物从土壤中吸收并对植物产生影响,但影响程度不同。

植物可以从土壤中吸收富集PFOS和PFOA,并由根部向茎叶部分迁移,且主要富集在植物的营养器官中<sup>[15]</sup>。通过研究小麦对PFCs的吸收动力学特性发现,小麦根部对PFOA的吸收速度远大于PFOS,在暴露100 h时,趋近于稳定,且根部的吸收大于茎的吸收,温度、盐度、pH值、受试物浓度对根部吸收2种全氟化合物均具有一定程度的影响<sup>[16-17]</sup>,总体来看,PFOS主要被根部吸收。Krippner等通过水培法研究3种全氟羧酸(perfluorocarboxylic acids,简称PFCAs)和7种全氟烷基磺酸(perfluoroalkylsulfonic acids,简称PFSA)全氟化合物的碳链以及pH值对玉米富集全氟化合物的影响,结果发现,玉米对PFSA类化合物吸收速率最快的是长链PFOS,短链PFCAs容易在茎叶中富集,长链PFCAs和PFOS主要富集在根部<sup>[18]</sup>。在真实环境中,Zhang等通过分析辽宁省大连市阔叶和针叶植物中10种PFCAs和4种PFSA的分布发现,针叶对PFCAs和PFSA的吸收均大于阔叶,叶片中PFCAs含量大于PFSA,短链PFSA含量高于长链等<sup>[19]</sup>。

当前,众多专家学者使用小麦进行了大量的吸收动力学

收稿日期:2017-03-20

基金项目:国家国际科技合作专项(编号:2015DFA41280);贵州省科技计划(编号:[2012]7003、[2015]7001);中央引导地方科技科技发展专项(编号:黔科中引地[2016]4001)。

作者简介:杨鸿波(1976—),男,贵州贵阳人,博士研究生,副研究员,主要从事环境毒理学研究。E-mail:hyang@gzata.cn。

通信作者:谭 红,研究员,主要从事环境毒理学研究。E-mail:43606528@qq.com。

研究,并对比研究了植物对不同碳链及不同基团全氟化合物的吸收作用,而对于相同碳链不同基团的 PFOA、PFOS 在单独和联合作用的研究较少;不同作物对 PFOA、PFOS 的吸收利用情况不同,目前针对油类作物大豆、油菜以及粮食作物水稻对全氟化合物富集作用的研究较少。我国土壤中的 PFOS、PFOA 含量大多在 5 ng/g 以内,最高值为 62.45 ng/g<sup>[20-22]</sup>。低浓度的 PFOS 会轻微刺激根的生长和酶活性的提高,而当浓度增至 200 mg/kg 时,会抑制根的生长和酶活性的提高,且会提高渗透性。研究 PFOS 和 PFOA 对水稻、大豆、油菜的生长发育影响及在 3 种作物体内的分布特征,以期为全面评价全氟化合物对人类的潜在危害提供理论数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1.1.1 供试种子 禾本科单子叶植物水稻(*Oryza sativa*)种子由四川省绿丹种业有限责任公司生产(批次:201512);豆科双子叶植物大豆(*Glycine max*)种子由江西省丰城市航城种业有限公司生产(批次:20160303);十字花科双子叶植物油菜(*Brassica campestris* L.)种子由贵州农业科学研究院研制(批次:201609)。

试验前将作物种子在 10% 次氯酸钠消毒液中浸泡 10 min,然后把种子转移到培养皿中并用去离子水漂洗后浸泡,大豆种子浸泡 20 min,油菜种子浸泡 30 min,水稻种子浸泡 1 h。

1.1.2 试验土壤 试验土壤为黄壤土,采集于贵州省植物园天然林内,未使用化肥并远离化学污染源,风干后过 2 mm 筛备用。土壤的 pH 值为 5.90,有机质含量为 2.92%,阳离子交换量为 18.1 cmol/kg。

1.1.3 仪器与设备 人工气候培养箱(北京科伟永兴仪器有限公司制造),箱内密布 LED 灯。

试验用花盆为一次性花盆,直径为 18 cm,有效播种面积约为 250 cm<sup>2</sup>,带储水盘。

液相色谱-质谱联用仪:Agilent LC-MS/MS, 1290-6460 Agilent 1290 Infinity 二元泵(G4220A),Agilent 1290 Infinity 高效自动进样器(G4226A),Agilent 1290 Infinity 系列柱温箱(G1316C),Agilent 6460 三重四级杆电喷雾离子源(electron spray ionization,简称 ESI),MassHunter(B.08.00)工作站。N-EVAP-24 氮吹仪(美国 Organomation Associates, Inc. 制造)。梅特勒-托利多电子天平,测量精度为 0.000 1 g;Milli-Q 超纯水仪(默克密理博公司制造)。

1.1.4 试剂与固相萃取柱 全氟辛酸磺酸钾盐(PFOS-K, CAS:2795-39-3,百灵威科技有限公司,纯度>98%);全氟辛酸(PFOA, CAS:335-67-1,百灵威科技有限公司,纯度>98%);甲醇(液相色谱-质谱联用级,Merck Drugs & Biotechnology);丙酮[分析纯,重庆川东化工(集团)有限公司];甲醇、氨水、甲酸、乙酸铵、异丙醇均为分析纯,均购自国药集团化学试剂有限公司。

CNWBOND WAX 弱阴离子交换固相萃取柱(solid-phase extraction,简称 SPE)(上海安普实验科技股份有限公司),500 mg×6 mL。

### 1.2 试验方法

1.2.1 浓度设置 分别设置 1.0、5.0、25.0 mg/kg PFOS 组和 PFOA 组,2.0、10.0、50.0 mg/kg 联和试验组( $C_{PFOS}:C_{PFOA}=1:1$ )。

1.2.2 暴露试验土壤制备 准确称取 0.287 0 g PFOS、0.287 1 g PFOA,分别置于 25 mL 容量瓶中,用丙酮溶解并稀释得到浓度均为 11.25 mg/mL 的 PFOS、PFOA 储备液。(1)PFOS 试验组:分别取 0.4、2.0、10.0 mL PFOS 储备液加入到 3 份质量均为 100 g 的试验土壤中,搅拌混匀并挥干溶剂备用。另称取 4.4 kg 试验土壤,将制备的 100 g 加药土壤加入其中,趁干搅拌混匀,然后加入 800 mL 去离子水继续搅拌混匀,得到 1.0、5.0、25.0 mg/kg PFOS 暴露试验土壤,然后将各浓度土壤平均分为 3 份置于花盆中备用。(2)PFOA 试验组:取样量与操作方法同 PFOS 试验组,且同样将制备得到的 1.0、5.0、25.0 mg/kg 的 PFOA 暴露试验土壤平均分为 3 份置于花盆中备用。(3)联和试验组( $C_{PFOS}:C_{PFOA}=1:1$ ):依次取 PFOS、PFOA 储备液各 0.4、2.0、10.0 mL 加入到 3 份质量均为 100 g 的试验土壤中,搅拌混匀并挥干溶剂备用。另称取 4.4 kg 试验土壤,将制备的 100 g 加药土壤加入其中,趁干搅拌混匀,然后加入 800 mL 去离子水继续搅拌混匀,得到 2.0、10.0、50.0 mg/kg 混合暴露试验土壤,然后将各浓度土壤平均分为 3 份置于花盆中备用。(4)对照组:取 100 g 试验土壤,加入 20.0 mL 丙酮,搅拌混匀并挥干溶剂备用。另称取 4.4 kg 试验土壤,将制备的 100 g 加丙酮的土壤加入其中,趁干搅拌混匀,然后加入 800 mL 去离子水继续搅拌混匀,得到对照组试验土壤,然后将该土壤平均分为 3 份置于花盆中备用。

1.2.3 暴露试验 参照 GB/T 31270.19—2014《化学农药环境安全评价试验准则》“第 19 部分:非靶标植物影响试验”中 300~1 000 粒/m<sup>2</sup> 的播种密度要求,结合种子大小与分析测试要求,每盆播种的种子数量为水稻 20 粒、大豆 10 粒、油菜 25 粒,种植密度分别约为 800、400、1 000 粒/m<sup>2</sup>。试验时将预处理后的水稻、大豆、油菜种子分别播种于各浓度系列及对照组的花盆中,然后置于培养箱中准备试验,并将储水盘蓄水以保证试验所需水分供应。培养箱的光-暗周期设置为 16 h—8 h;光照时温度为(25±2)℃,黑暗时温度为(22±2)℃;在种子萌芽前,湿度保持在 80% 以上,种子萌芽后控制湿度在 70%~85% 之间。

试验开始后,记录种子的出苗情况,并在对照组种子半数萌芽后第 14 天,取出各盆试验植物,进行株高、生物量测定。

1.2.4 全氟化合物在植物体内的分布特征分析 将各植物根、茎、叶分离并分别剪碎制得的根、茎、叶样品。称取 1.0 g 样品,加 20 mL 甲醇振荡提取,经涡旋、离心处理使其上部澄清;然后取 1 mL 上清液,加入 5 mL 2% 甲酸水溶液,经涡旋处理后制备得试样初提取液。

取 wax-SPE 小柱,使用 2 mL 甲醇和 1 mL 去离子水分别活化,再使用 2% 甲酸水溶液平衡。然后将试样初提取液加入柱中,使用 2 mL 2% 甲酸水溶液淋洗,再用 4 mL 3% 氯化甲醇洗脱,经氮气吹干后,用甲醇和水(体积比为 1:1)混合液定容至 1 mL,制备得试样提取液,然后用液相色谱-质谱联用仪测定。试验时分别使用茎、叶、根进行基质加标回收率试

验,其回收率在 88.9%~98.4% 之间,样品的测定不进行回收率校正。

仪器及条件为色谱柱:Agilent ZORBAX Eclipse Plus C<sub>18</sub>, 2.1 mm×50 mm,1.8 μm;柱温为 40℃;进样体积为 2 μL;进样针冲洗:端口清洗(异丙醇:水体积比为 1:1),2 s;流动相:A=5 mmol/L 乙酸铵水溶液,B=甲醇,流速为 0.20 mL/min。梯度洗脱程序:0~0.50 min,70.00% A+30.00% B;0.51 min,50.00% A+50.00% B;4.50 min,20.00% A+80.00% B;5.00 min,70.00% A+30.00% B,总运行时间 6 min(平衡时间 1 min)。质谱(mass spectrometry,简称 MS)配置和条件:负离子模式;扫描模式:多反应监测(multiple reaction monitoring,简称 MRM),毛细管电压为 -3 500 V,喷嘴电压为 -500 V,雾化器压力为 0.31 MPa,干燥器温度为 300℃,干燥器流速为 6 L/min,鞘气温度为 300℃,鞘气流速为 10 L/min,电子倍增器电压为 400 V,质谱 MRM 参数见表 1。

表 1 质谱仪参数

化合物	母离子 质荷比	子离子 质荷比	驻留时间 (ms)	碎裂电压 (V)	碰撞能量 (eV)
PFOS	499.0	98.8;79.9	100	140	50;60
PFOA	413.3	369.0;69.0	100	70	5;15

1.2.5 数据分析 PFOS 和 PFOA 对作物出苗率、株高、生物量的影响采用 SPSS 11.5 软件进行统计和分析,以  $P<0.05$  作为显著性差异水平。

采用茎、叶、根对 PFOS 和 PFOA 的富集因子(root concentration factor,简称 RCF)、传输因子(transfer factor,简称 TF)进行作物体内的富集体征分析,并评价其对植物的潜在

影响。采用色谱工作站 MussHunter 对数据进行采集和定量分析,采用 Origin Pro 8.0 对数据进行统计和绘图。根富集因子<sup>[9]</sup>的计算公式为

$$RCF = \frac{C_{\text{根}}}{C_{\text{土壤}}} \tag{1}$$

式中: $C_{\text{根}}$ 为作物根中 PFOS 或 PFOA 浓度,mg/kg 干基; $C_{\text{土壤}}$ 为有机质归一化后土壤中 PFOS 或 PFOA 浓度,mg/kg<sub>oc</sub> 干基。

传输因子可指示供试植物自根向茎、叶传输化合物的能力,其计算公式为

$$TF = \frac{C_{\text{茎叶}}}{C_{\text{根}}} \tag{2}$$

式中: $C_{\text{茎叶}}$ 为作物茎、叶中 PFOS、PFOA 浓度,mg/kg 干基; $C_{\text{根}}$ 为作物根中 PFOS、PFOA 浓度,mg/kg 干基。

2 结果与分析

2.1 PFOS、PFOA 对 3 种植物出苗率、株高、生物量的影响

在各浓度的 PFOS、PFOA 暴露试验土壤以及 PFOS 和 PFOA 混合暴露试验土壤中,所有种子全部发芽;水稻株高约 30 cm,生物量约 0.055 g/株;大豆株高约 21 cm,生物量约 0.53 g/株;油菜株高约 3.4 cm,生物量约 0.007 g/株,对照组与各处理组出苗率、株高、生物量差异较小。

2.2 PFOS、PFOA 在 3 种植物植株根内的富集情况

由图 1 可知,水稻、大豆、油菜根中 PFOS、PFOA 浓度与土壤中供试物浓度均呈极显著的线性相关关系,且随土壤中供试物浓度的增大而增加。与 Stahl 等的结论<sup>[12]</sup>相似,即随着土壤中 PFOS、PFOA 浓度的增加,PFOS、PFOA 向植物中转移的量也增加。

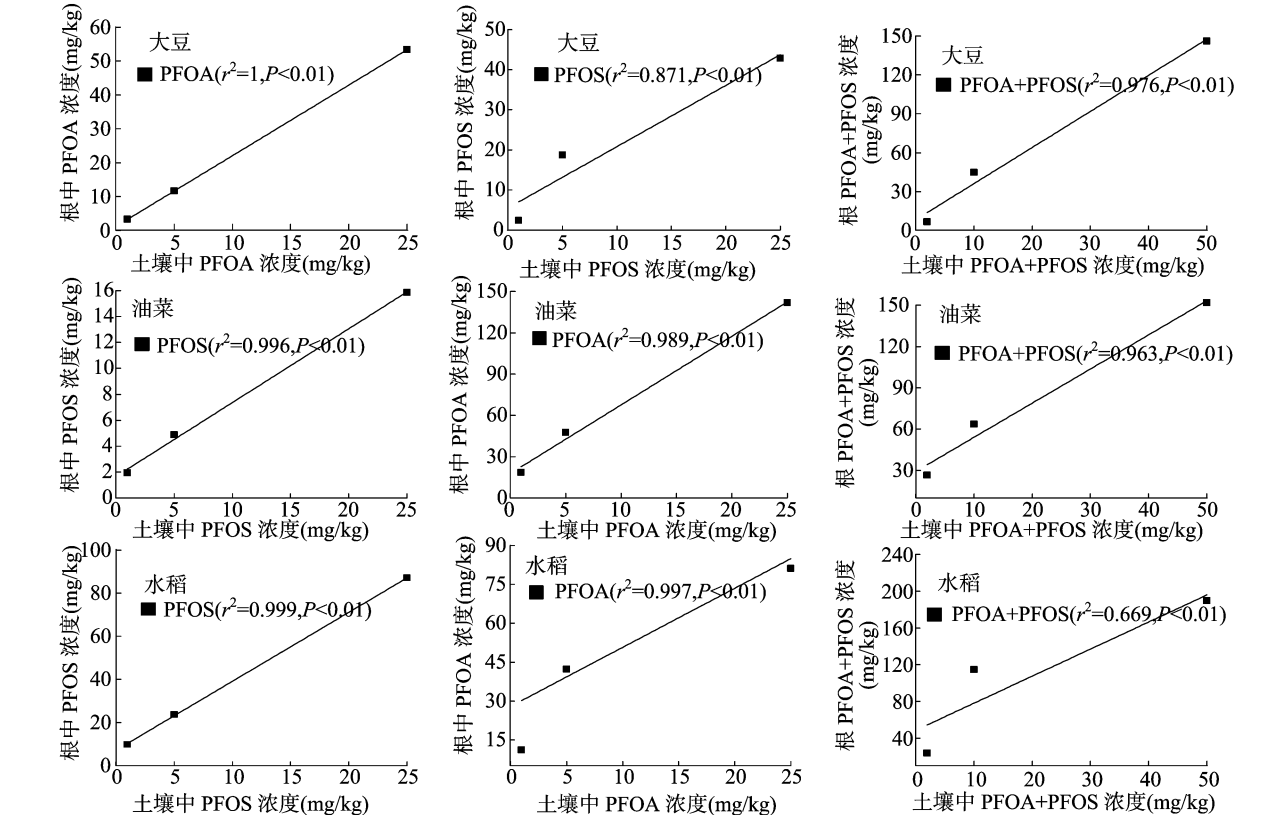


图 1 土壤中 PFOS、PFOA、PFOA+PFOS 浓度与植物根中 PFOS、PFOA、PFOA+PFOS 浓度的关系

由表 2、表 3 可知,PFOS 在水稻、大豆、油菜根中的富集浓度分别为 9.9~87.0、2.4~42.8、1.9~15.9 mg/kg,经有机质归一化后其富集因子分别为 0.103~0.292、0.051~0.111、0.019~0.058,表明 3 种作物对 PFOS 的富集能力表现为水稻>大豆>油菜;水稻、大豆、油菜对 PFOS 的传输因子分别为 0.220~0.262、0.193~0.345、0.316~0.368,均小于 1,表明 3 种植物均可自根向茎叶传输 PFOS,根中浓度大于茎叶<sup>[11]</sup>。

PFOA 在水稻、大豆、油菜根中的富集浓度分别为 11.0~81.1、3.3~53.4、18.6~141.7 mg/kg,经有机质归一化后其富集因子分别为 0.096~0.368、0.063~0.097、0.168~0.549,表明 3 种作物对 PFOA 的富集能力表现为油菜>水稻>大豆;水稻、大豆、油菜对 PFOA 的传输因子分别为 0.236~0.675、0.056~0.143、0.099~0.120,均小于 1,表明 3 种植物均可自根向茎叶传输 PFOA,根中浓度大于茎叶。

表 2 3 种植物对 PFOS 和 PFOA 的富集情况

作物名称	PFOS 浓度(mg/kg)			PFOA 浓度(mg/kg)			PFOS + PFOA 浓度(mg/kg)		
	土壤	根	茎叶	土壤	根	茎叶	土壤	根	茎叶
水稻	1.0	9.9±0.12	2.2±0.34	1.0	11.0±1.3	7.4±0.68	2.0	23.8±4.30	5.1±0.54
	5.0	23.7±0.28	6.2±0.55	5.0	42.2±3.5	14.7±1.58	10.0	114.8±19.3	27.0±3.40
	25.0	87.0±0.25	20.1±0.32	25.0	81.1±7.8	19.8±2.50	50.0	189.9±23.3	56.5±6.90
大豆	1.0	2.4±0.26	0.8±0.10	1.0	3.3±1.2	0.2±0.04	2.0	6.7±0.68	3.0±0.34
	5.0	18.7±0.77	3.6±0.35	5.0	11.7±1.3	1.7±0.23	10.0	44.7±5.50	16.4±1.40
	25.0	42.8±0.39	9.6±0.87	25.0	53.4±4.9	5.7±0.67	50.0	146.2±13.60	91.0±8.60
油菜	1.0	1.9±0.14	0.6±0.14	1.0	18.6±1.7	1.8±0.21	2.0	26.4±3.40	12.3±1.50
	5.0	4.9±0.39	1.6±0.19	5.0	47.6±4.8	5.7±0.65	10.0	63.4±7.80	15.5±1.90
	25.0	15.9±0.51	5.8±0.68	25.0	141.7±17.3	17.0±2.30	50.0	151.7±14.50	45.2±5.60

表 3 3 种植物对 PFOA、PFOS 的 RCF 和 TF

作物名称	PFOS			PFOA			PFOS + PFOA		
	$C_{\text{土壤}}$ (mg/kg)	RCF	TF	$C_{\text{土壤}}$ (mg/kg)	RCF	TF	$C_{\text{土壤}}$ (mg/kg)	RCF	TF
水稻	1.0	0.292±0.160	0.220±0.018	1.0	0.325±0.019	0.675±0.005 1	2.0	0.352±0.024	0.213±0.016
	5.0	0.140±0.081	0.262±0.031	5.0	0.368±0.230	0.236±0.019 0	10.0	0.340±0.170	0.235±0.038
	25.0	0.103±0.071	0.231±0.018	25.0	0.096±0.006	0.244±0.270 0	50.0	0.112±0.016	0.298±0.027
大豆	1.0	0.070±0.008	0.345±0.045	1.0	0.097±0.061	0.056±0.003 6	2.0	0.099±0.008	0.439±0.035
	5.0	0.111±0.012	0.193±0.017	5.0	0.069±0.005	0.143±0.022 0	10.0	0.132±0.027	0.366±0.031
	25.0	0.051±0.004	0.223±0.019	25.0	0.063±0.002	0.107±0.009 0	50.0	0.087±0.057	0.075±0.006
油菜	1.0	0.058±0.003	0.316±0.042	1.0	0.549±0.035	0.099±0.001 2	2.0	0.390±0.027	0.466±0.032
	5.0	0.029±0.002	0.327±0.029	5.0	0.282±0.018	0.120±0.015 0	10.0	0.188±0.019	0.245±0.021
	25.0	0.019±0.003	0.368±0.039	25.0	0.168±0.017	0.120±0.019 0	50.0	0.090±0.002	0.298±0.031

由图 2 可以看出,在 PFOS、PFOA 联和试验中,3 种作物对 PFOS、PFOA 的富集量随供试物浓度增大而增加,与单独试验一致;由表 2 可知,水稻、大豆、油菜根中的富集浓度分别为 23.8~189.9、6.7~146.2、26.4~151.7 mg/kg,茎叶中的富集浓度分别为 5.1~56.5、3.0~91.0、12.3~45.2 mg/kg,PFOS、PFOA 联合试验与单独试验的总富集量无明显差异。

### 3 讨论

当土壤中 PFOS、PFOA 浓度为 1.0~25.0 mg/kg 时,PFOS、PFOA 对水稻、大豆、油菜的出苗率、株高、生物量均无明显影响,这与赵淑艳研究中 PFAs 对小麦的生物量无明显影响<sup>[15]</sup>一致。水稻和小麦、大豆、油菜分别所属的禾本科、豆科、十字花科农作物在我国种植范围最广、生产量最多,表明在当前土壤背景下,PFOS 和 PFOA 不足以影响作物的生产。但在 Zhou 等的研究中,当 PFOS 的浓度升高至 200 mg/L 时,超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,简称 SOD)和过氧化物酶(oxidase,简称 POD)活性明显降低<sup>[23]</sup>,表明在高浓度 PFOS 条件下,小麦幼苗抗氧化防御系统可能会受到损害,PFOS 和 PFOA 对作物的影响仍不可忽视。

植物中的 PFOS、PFOA 浓度与土壤中的 PFOS、PFOA 浓

度呈线性相关关系,且随土壤中供试物浓度的增大而增加。在 3 种植物中,不管 PFOS、PFOA 是单独存在,还是等比例存在于土壤中时,在植物根部的富集量均高于在茎叶中的富集量。Wen 等研究发现,较短链全氟磺酸(perfluorosulfonic acids,简称 PFSA)主要通过转移集中在茎叶中,而长链 PFCA 如全氟辛酸(PFOA)、全氟壬酸(PFNA)、全氟癸酸(PFDA)、全氟辛烷磺酸己烷磺酸(PFHxS)、全氟辛烷磺酸(PFOS),主要通过吸收集集中在根部<sup>[24]</sup>,由于二者具有相同的碳链结构(C>4),说明在由土壤转移到根部时,由土壤转移到根部时,土壤孔隙中的化合物经被动扩散被植物根吸收,再经过木质部的水相或韧皮部汁液的蒸腾作用转移到植物体内,起主要作用的是亲脂性结构端;从韧皮部汁液到茎叶的传输过程中,水溶性更强的有机物能更多地从根部传输到茎叶,PFOS 和 PFOA 的亲水端不同,所以二者的 TF 不同。同时也有研究发现,植物根系中 PFOS、PFOA 的累积量与根系蛋白质含量呈显著正相关关系(P<0.05),而与根系脂肪含量呈显著负相关关系(P<0.05),表明蛋白质对根吸收 PFOS、PFOA 具有促进作用,脂质具有抑制作用;传输因子与茎叶和根中蛋白质含量比例呈正相关关系<sup>[25]</sup>,说明蛋白质和脂质对 PFOS 的积累和分布作用不同;而在 PFOA 和 PFOS 联合作用

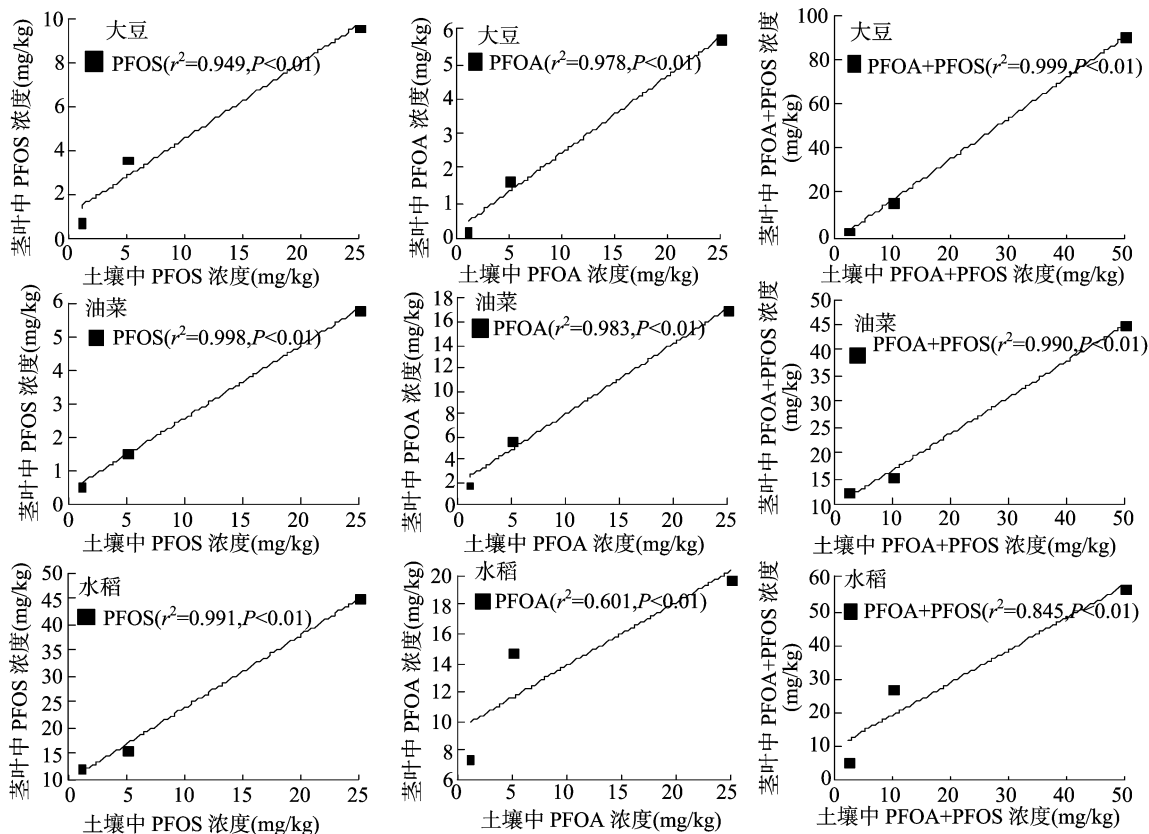


图2 土壤中 PFOS、PFOA、PFOA+PFOS 含量与植物茎叶中 PFOS、PFOA、PFOA+PFOS 含量的关系

时,未体现协同作用,只是浓度加和作用,即 PFASs 在植物中的传输和富集作用机制会因为植物的不同而不同,同时受土壤有机碳影响。进一步的机制还须要更深入的研究。

#### 参考文献:

- [1] 葛建楼,姜祖林,杨瑞丰,等. 纸张用含氟防油剂的制备及应用[J]. 中国造纸,2015,34(4):22-25.
- [2] 宋 韬,鲁 钢,陆 宇,等. 低损耗大芯径能量光纤涂料的配方设计与应用[J]. 表面技术,2015,44(5):15-19.
- [3] 张 鸿,赵 亮,何 龙,等. 不同功能区表层土中全氟化合物污染指纹及其来源解析[J]. 环境科学,2014,35(7):2698-2704.
- [4] 刘 琰,江秋枫,韩 梅,等. 红枫湖流域表层沉积物中全氟化合物的污染特征[J]. 环境科学研究,2015,28(4):517-523.
- [5] 杨永亮,路国慧,杨伟贤,等. 沈阳地区水环境和生物样品中全氟化合物的污染分布特征[J]. 环境科学学报,2010,30(10):2097-2107.
- [6] 刘晓湾,张 鸿,李 静,等. 中国沿海地区鸡蛋中全氟化合物污染水平及分布[J]. 食品科学,2016,37(4):191-196.
- [7] 杨 帆,施致雄. 全氟辛烷磺酸和全氟辛酸的人群暴露水平和毒性研究进展[J]. 环境与健康杂志,2014,31(8):730-734.
- [8] 孔祥云,王 华,陈 虹,等. 全氟化合物的环境污染与毒性研究[J]. 环境科学与技术,2015,38(增刊1):5-9.
- [9] Butenhoff J L, Ehresman D J, Chang S C, et al. Gestational and lactational exposure to potassium perfluorooctanesulfonate (K + PFOS) in rats; developmental neurotoxicity [J]. Reproductive Toxicology,2009,27(3/4):319-330.
- [10] Yao X F, Zhong L F. Genotoxic risk and oxidative DNA damage in

HepG2 cells exposed to perfluorooctanoic acid [J]. Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2005,587(1/2):38-44.

- [11] 齐彦杰,周 珍,史亚利,等. 北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究[J]. 环境科学,2013,34(1):244-250.
- [12] Stahl T, Heyn J, Thiele H, et al. Carryover of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) from soil to plants [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2009,57(2):289-298.
- [13] 吕振娥,苏玉红,乔 敏. 全氟辛烷磺酸短期暴露对不同作物苗期生长的影响[J]. 生态毒理学报,2013,8(5):695-701.
- [14] Qu B C, Zhao H X, Zhou J T. Toxic effects of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on wheat (*Triticum aestivum* L.) plant [J]. Chemosphere,2010,79(5):555-560.
- [15] 赵淑艳. 土壤中全氟化合物的生物可利用性研究[D]. 天津:南开大学,2013:42.
- [16] Zhao H X, Guan Y, Zhang G L, et al. Uptake of perfluorooctane sulfonate (PFOS) by wheat (*Triticum aestivum* L.) plant [J]. Chemosphere: Environmental Toxicology and Risk Assessment, 2013,91(2):139-144.
- [17] 关 月. 小麦对全氟化合物的吸收研究[D]. 大连:大连理工大学,2012:32-43.
- [18] Krippner J, Brunn H, Falk S, et al. Effects of chain length and pH on the uptake and distribution of perfluoroalkyl substances in maize (*Zea mays*) [J]. Chemosphere,2014,94:85-90.
- [19] Zhang H H, Liu W, He X, et al. Uptake of perfluoroalkyl acids in the leaves of coniferous and deciduous broad-leaved trees [J]. Environmental Toxicology and Chemistry,2015,34(7):1499-1504.

李 华,刘世平,陈 畅,等. 连续免耕与秸秆还田对土壤养分含量的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(15):237-241.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.15.061

# 连续免耕与秸秆还田对土壤养分含量的影响

李 华,刘世平,陈 畅,王 静

(扬州大学农学院,江苏扬州 225009)

**摘要:**为探讨连续免耕与秸秆还田对土壤养分含量的影响,在扬州大学遗传生理重点实验室试验田进行连续 10 年不同耕作方式的稻麦两熟定位试验。结果表明,连续免耕(免耕覆盖 NTS 与免耕高茬 NTH)与翻耕秸秆直接还田(全量还田 CTS1、半量还田 CTS2)均有利于增加土壤有机质的含量,无论在麦后还是稻后整个土层的有机质含量都处于较高的水平。土壤全氮含量的变化方向与有机质相似,但秸秆还田量的多少对全氮影响并无明显差异。免耕可以提高土壤表层碱解氮含量,秸秆还田有利于提高土壤整个耕层的碱解氮含量。连续免耕与秸秆还田对速效磷影响效果不明显。免耕覆盖(NTS)和秸秆全量还田(CTS1)均有利于提高土壤速效钾的含量。麦免耕稻(RNT)、麦耕稻免(RCT)处理土壤有机质、全氮、碱解氮、速效钾含量均有所增加,但没有免耕和翻耕秸秆还田效果显著。免耕与秸秆还田处理 10 年有机质和全氮平均含量均高于翻耕无秸秆还田(CT)处理。

**关键词:**免耕;秸秆还田;耕作方式;土壤肥力;保护性耕作

**中图分类号:** S158;S345 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)15-0237-05

保护性耕作作为世界上应用范围最广、效果最好的一项农业技术,越来越受到世界各国的关注<sup>[1-2]</sup>。我国保护性耕作的研究开始于 20 世纪 60 年代,关于免耕与秸秆还田技术的研究取得了巨大发展,研究表明保护性耕作在我国可行<sup>[3]</sup>。农作物秸秆含有丰富的氮、磷、钾和微量元素,是一种重要的可再生资源,免耕与秸秆还田具有改变土壤容重,增加土壤通气、田间持水量和水稳性团粒结构的功能,从而改善土壤物理性状,提高土壤保肥、保水能力。稻秆在覆盖还田后通过雨水和土壤微生物的共同作用进入土壤,能够促进土壤有机质的形成,增加土壤中氮、磷,尤其是可溶性钾的含量。作物秸秆本身含有各种营养元素,是土壤养分的主要补给源。

保护性耕作能够减轻小麦冻害,降低死苗率,保证小麦安全越冬,促进小麦的根系发育,秸秆还田可以增加酶的数量,提高酶的活性,可以使土壤中脲酶、中性磷酸酶、蔗糖酶等酶的活性均高于不还田处理,还田后土壤中转化酶活性明显提高,是促进土壤中氮素养分增加的有效途径之一<sup>[4-6]</sup>。少免耕配合秸秆还田有利于籽粒的充实,从而能提高作物产量<sup>[7-8]</sup>。保护性耕作适宜大面积推广,它不仅能够实现增产增效,也是解决生态环境问题,促进旱区农业可持续发展的措施之一。江苏省位于我国东部沿海,虽然水资源丰富,风蚀现象发生概率小,但由于传统翻耕模式、化学肥料和粗放型植保机械施药技术的长期使用,部分地区土壤板结严重,渗透性差,水、肥不能有效利用,土壤肥力下降。保护性耕作技术的推广能够明显减少风对土壤的侵蚀,提高土壤蓄水保墒能力,可以培肥土壤,改善土壤结构,达到节本增效、增产增收,解决了长期传统性耕作带来的土壤贫瘠、水土流失严重等问题,同时避免秸秆焚烧,改善了生态环境,实现农业的可持续发展<sup>[9]</sup>。目前,国内外大量研究结果证明,秸秆还田对农业生态系统是有利的<sup>[10-13]</sup>,但对不同耕法与秸秆还田所引起的生态效应,尚缺乏系统定位研究。因此,本研究选择稻麦两熟地区进行连续定位试验,意在探讨免耕与秸秆还田相配套的耕作技术体系

收稿日期:2017-02-20

基金项目:科技部重点攻关项目(编号:2004BA520A03);国家科技支撑计划(编号:2006BAD02A03、2011BAD16B03);江苏高校优势学科建设工程资助项目。

作者简介:李 华(1990—),男,江苏徐州人,硕士,研究方向为作物生理与品质。E-mail:741391529@qq.com。

通信作者:刘世平,教授,研究方向为农业生态与作物品质。E-mail:spliu@yzu.edu.cn。

[20]李法松,倪 卉,黄涵宇,等. 安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析[J]. 环境科学,2017,38(1):327-332.

[21]胡国成,郑 海,张丽娟,等. 珠江三角洲土壤中全氟化合物污染特征研究[J]. 中国环境科学,2013,33(增刊1):37-42.

[22]陈 舒,焦杏春,盖 楠,等. 中国东部农村地区土壤及水环境中全氟化合物的组成特征和来源初探[J]. 岩矿测试,2015,34(5):579-585.

[23]Zhou L N,Xia M J,Wang L,et al. Toxic effect of perfluorooctanoic acid(PFOA) on germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Chemosphere,2016,159:420-425.

[24]Wen B,Wu Y L,Zhang H N,et al. The roles of protein and lipid in the accumulation and distribution of perfluorooctane sulfonate(PFOS) and perfluorooctanoate(PFOA) in plants grown in biosolids-amended soils[J]. Environmental Pollution,2016,216:682-688.

[25]Lechner M,Knapp H. Carryover of perfluorooctanoic acid(PFOA) and perfluorooctane sulfonate(PFOS) from soil to plant and distribution to the different plant compartments studied in cultures of carrots(*Daucus carota* ssp. *sativus*),potatoes(*Solanum tuberosum*), and cucumbers(*Cucumis sativus*)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2011,59(20):11011-11018.