

多氯联苯(PCBs)污染对油菜(*Brassica campestris*)生长的影响及积累效应研究

周佳佳¹, 胡林林², 李 敏², 陈为峰^{1*}, 王 莹¹, 王海翠¹

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘 要: 通过盆栽实验研究了6种多氯联苯(PCB28、PCB52、PCB101、PCB118、PCB153、PCB180)在浓度分别为0、0.05、0.1、0.5 mg·kg⁻¹时对油菜生长的影响及积累效应。结果表明:(1)各处理的叶长、叶宽随处理浓度的增加呈现先升高后降低的趋势,但整体高于对照,说明低浓度PCBs处理对油菜的叶长叶宽有促进作用;(2)PCB28、PCB101随浓度增加光合速率呈下降的趋势,其余呈先升高后降低的趋势,但都低于对照,可以看出PCBs对油菜的光合速率有抑制作用;(3)叶绿素a+b含量、叶绿素a/b值整体表现随处理浓度增加而降低,说明PCBs对油菜叶绿素的含量产生抑制作用;(4)还原性Vc含量除PCB101外其余整体随处理浓度的增加呈现逐渐减小的趋势;(5)油菜体内残留与PCBs处理浓度呈正相关关系,PCB118、PCB153、PCB180与对照差异不显著,PCB28在处理浓度≥0.05 mg·kg⁻¹时,残留大于国家标准(0.1 mg·kg⁻¹),PCB52、PCB101在处理浓度≥0.1 mg·kg⁻¹时,残留大于国家标准。

关键词: 油菜; 多氯联苯; 生长; 残留; 效应

中图分类号: X503.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)10-1959-06 **doi:** 10.11654/jaes.2013.10.008

Effects of PCBs Pollution on Rape (*Brassica campestris*) Growth and Their Accumulation in *Brassica campestris*

ZHOU Jia-jia¹, HU Lin-lin², LI Min², CHEN Wei-feng^{1*}, WANG Ying¹, WANG Hai-cui¹

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In this paper, it was researched the effects of six kinds of polychlorinated biphenyls (PCB28, PCB52, PCB101, PCB118, PCB153, PCB180) on the growth of rape and their accumulation by the pot experiment, and the addition concentrations of polychlorinated biphenyls were 0 mg·kg⁻¹, 0.05 mg·kg⁻¹, 0.1 mg·kg⁻¹, 0.5 mg·kg⁻¹, respectively. The results indicated that: (1) With the concentration increasing, the trends of these treatments were that the length and width of leaves first increased and then decreased with the concentration increasing but higher than control group as a whole. The results show that low concentration of PCBs promoted the length and width of leaves. (2) Photosynthesis rate increased firstly and decreased subsequently with the concentration increasing, except that PCB28 and PCB101 decreased all the time of which photosynthesis rate were lower than control. Both of them were decreased, but all of them were lower than that of control. So we could see that PCBs inhibit photosynthetic rate of rape. (3) With the increasing of the PCBs concentration, the chlorophyll a+b content and chlorophyll a/b were suppressed decreased as a whole, which explained that PCBs inhibited chlorophyll a+b content, chlorophyll a/b of rape. (4) Reducing Vc had a gradually reducing trend with increasing concentrations except for PCB101. (5) Tests have shown that the residues of rape and the concentration of PCBs shared a between positive correlation. PCB118, PCB153, PCB180 were not distinguished with control was not marked different than that of control. PCB28 residues was higher than national standards (0.1 mg·kg⁻¹) with PCBs at concentration no less than 0.05 mg·kg⁻¹. PCB52, PCB101 residues was higher than national standards (0.1 mg·kg⁻¹) with PCBs at concentration no less than 0.1 mg·kg⁻¹.

Keywords: rape; polychlorinated biphenyls; growth; residual; effect

收稿日期: 2013-02-27

基金项目: 国家公益性行业(环保)科研专项(200809047)

作者简介: 周佳佳(1988—), 女, 山东聊城人, 硕士, 研究方向为污水灌溉及土壤生态环境。E-mail: zhoujiajia3550@163.com

* 通信作者: 陈为峰 E-mail: chwef@sdau.edu.cn

多氯联苯(PCBs)是联苯苯环上的氢被氯取代而形成的多氯化合物,物理、化学性质极为稳定,其同分异构体和同系物多达209种,是土壤中典型的持久性有机污染物^[1-3]。由于这些物质难以降解,并可通过食物链富集而直接危害人类的健康,PCBs已被列入世界银行规定的“需要进行评定的有害物质”名单中的有毒物质,影响和制约着人类的生存和可持续发展,长期以来一直是环境科学研究的热点。

目前,多氯联苯和有机氯农药测定的研究对象主要是水^[4-5]、土壤^[6-11]、水产品^[12-15],而农产品^[16-18]较少,且多集中于混合PCBs污染物的研究,大多数集中在植物的生理指标,对于不同种PCBs污染物对植物生长的影响及残留影响的研究较少。本实验以油菜作为供试植物,研究了不同PCBs对油菜叶长、叶宽、光合速率、叶绿素含量、还原性Vc的影响以及油菜体内PCBs的残留。为科学预测与评估PCBs污染物对油菜的生态效应以及油菜等作物安全生产提供重要的科学依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

供试作物为油菜(*Brassica campestris*),山东省青州市宏源蔬菜种子有限公司生产的四月慢品种,盆栽试验于2012年3—6月在山东农业大学南校区试验站网室内进行。

供试土壤为棕壤,基本农化性状为:pH 6.34,有机质 16.31 g·kg⁻¹,碱解氮 92.98 mg·kg⁻¹,速效磷 34.77 mg·kg⁻¹,速效钾 95.45 mg·kg⁻¹。

供试试剂:PCB28(2,4,4'-trichlorobiphenyl)、PCB52(2,2',5,5'-tetrachlorobiphenyl)、PCB101(2,2',4,5,5'-pentachlorobiphenyl)、PCB118(2,3',4,4',5-pentachlorobiphenyl)、PCB153(2,2',4,4',5,5'-hexachlorobiphenyl)、PCB180(2,2',3,4,4',5,5'-heptachlorobiphenyl),纯度>99.3%,美国AccuStandard公司产。

PCB残留测定仪器及试剂:高速万能粉碎机、TH-50超声波清洗器、旋转蒸发仪、氮吹浓缩仪、GC-EDC气相色谱仪。无水硫酸钠(优级纯),在450℃马弗炉中烘烤4h,冷却后装入磨口具塞玻璃瓶内,置于干燥器中备用。Envicarb/NH₂复合固相萃取柱,正己烷、丙酮、乙酸乙酯,所用试剂均为分析纯。6种多氯联苯单体标准储备液:1 mg·mL⁻¹。

1.2 实验设计

实验共设1个对照组(CK)和3个不同浓度处理

组,对照组不加PCBs,其他组PCBs的浓度分别为0.05、0.1、0.5 mg·kg⁻¹,各处理均设3个重复。

将事先配制的有机污染物的丙酮溶液分别倒入2 kg土壤中,搅拌均匀,置于黑暗中放置24 h,待丙酮挥发干净,将含各浓度有机物的土壤装于塑料盆(直径为15 cm,高为17 cm)中,整平后加等量自来水调节土壤含水量,往盆内移栽长势一致的油菜幼苗(5~6叶)5棵,将各处理置于避雨自然条件下培养,常规管理,培养42 d后收获。

1.3 指标及其测定方法

1.3.1 油菜叶长叶宽的测定

油菜生长期间观察其生长情况,最后一次灌溉后(收获前第3 d)用精确到0.1 cm的刻度尺测定植株的最大叶长和叶宽,每个处理测5处,取平均值。

1.3.2 油菜植株光合速率的测定

油菜植株光合速率采用北京雅欣理仪科技有限公司生产的Yaxin-1102型便携式光合蒸腾仪测定。

1.3.3 油菜叶绿素a、b及总量的测定

取植物功能叶片,采用95%乙醇研磨提取,用可见光分光光度计(722G)测定波长665、649、470 nm下光密度,计算叶绿素含量^[19]。

1.3.4 油菜还原性Vc的测定

采用2,6-二氯酚法进行还原性Vc含量的测定^[20]。

1.3.5 油菜地上部分PCBs残留的测定

(1)前期处理

准确称取经磨碎的样品0.50 g,加入1.0 g无水硫酸钠,用15 mL正己烷-丙酮混合提取溶剂(体积比2:1)超声提取20 min,将提取液置于离心管中,以4000 r·min⁻¹离心5 min,旋转蒸发干,加入1 mL正己烷-丙酮混合提取溶剂(体积比2:1),依次用5 mL正己烷、5 mL正己烷-乙酸乙酯(体积比10:1)预淋洗Envicarb/NH₂复合固相萃取柱,将浓缩后的提取液转移至柱内,用10 mL正己烷-乙酸乙酯(体积比10:1)洗脱剂洗脱,洗脱液在40℃下氮吹至尽干,用正己烷定容至1 mL,进行GC-EDC分析。

(2)色谱条件

色谱柱(db-1701) 30.0 m×0.25 μm×0.32 mm id;柱箱温度220℃;气化温度280℃;检测器温度300℃;载气N₂(99.999%);柱流量1.2 mL·min⁻¹;不分流进样;进样量1 μL。

(3)色谱分析

定性:以试样的保留时间与标准溶液的保留时

间相比较来定性。定性的保留时间窗口宽度为±0.05 min。

定量:用外标法,根据单点峰面积计算。

6 种待测组分标准色谱图见图 1。

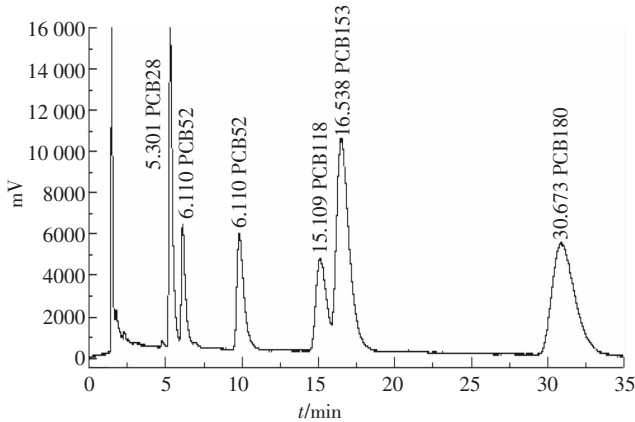


图 1 6 种多氯联苯标准图谱

Figure 1 Chromatogram of 6 polychlorinated biphenyls standards

2 结果与讨论

2.1 对油菜叶长叶宽的影响

叶长叶宽是反映植物生长状况的一个重要标志。由表 1 可以看出,在 PCB52、PCB180 处理浓度为 0.05 mg·kg⁻¹ 时,叶长明显高与对照,分别比对照组高了 35.91%、33.33%;PCB118 处理浓度分别为 0.05、0.10 mg·kg⁻¹ 时,叶长分别比对照组高了 25.96%、25.08%;PCB28 处理浓度为 0.05 mg·kg⁻¹ 时,叶宽明显高于对照,比对照高了 29.71%;PCB101 各浓度处理时叶宽明显高于对照,分别比对照高了 27.13%、22.31%、22.06%,与对照相比差异性显著 ($P<0.05$)。PCB101 在处理浓度 ≥ 0.10 mg·kg⁻¹ 时叶长低于对照组,但与对照差异不显著。PCB118 在浓度 ≥ 0.50 mg·kg⁻¹ 时叶宽明显低于对照,与对照差异性显著。

本研究在所设 PCBs 浓度范围内,油菜叶长叶宽均呈现先升高后降低的趋势,且基本都高于对照处理,说明低浓度下 PCBs 处理对油菜的叶长叶宽有促进作用,随浓度增加逐渐降低。这种较低浓度毒物的促进作用在其他高等植物中也得到了证实^[21-23],可能是因为植物生长激素如生长素和赤霉素大都具有与 PCBs 类似的环状结构,生长素和赤霉素促进植物茎的生长,PCBs 可能因这种结构的相似性而具有与生长激素类似的作用,从而促进叶长叶宽的生长。

2.2 对油菜光合速率的影响

由图 2 可知,PCBs 各处理浓度小于 0.05 mg·kg⁻¹

表 1 不同 PCBs 处理对油菜叶长叶宽的影响

Table 1 Effects of different PCBs treatments on leaf length and leaf width of rape

PCBs 种类	PCBs 浓度/ mg·kg ⁻¹	叶长/ cm	处理/ 对照(%)	叶宽/ cm	处理/ 对照(%)
CK	0.00	10.543±1.000a	100.00	8.010±0.574a	100.00
PCB28	0.05	13.290±0.791a	126.06	10.390±0.723b	129.71
	0.10	13.213±0.327a	125.32	9.390±0.240ab	117.23
	0.50	13.557±0.979a	128.59	9.957±0.590ab	124.31
PCB52	0.05	14.243±1.196b	135.09	9.767±0.617a	121.94
	0.10	13.533±0.532ab	128.36	9.120±0.163a	113.86
	0.50	13.503±0.612ab	128.08	9.057±0.572a	113.07
PCB101	0.05	10.963±0.058a	103.98	10.183±0.546b	127.13
	0.10	10.060±0.465a	95.42	9.797±0.262b	122.31
	0.50	10.410±0.292a	98.74	9.777±0.107b	122.06
PCB118	0.05	13.280±0.355b	125.96	9.090±0.143a	113.48
	0.10	13.187±0.563b	125.08	8.990±0.693a	112.23
	0.50	11.823±1.064ab	112.14	7.133±0.252b	89.05
PCB153	0.05	12.957±0.768a	122.90	10.443±1.184a	130.25
	0.10	11.133±0.406a	105.60	8.210±0.706a	102.50
	0.50	12.700±0.711a	120.46	9.013±0.433a	112.52
PCB180	0.05	14.057±0.375b	133.33	9.197±0.567a	114.82
	0.10	12.770±0.473ab	121.12	7.600±0.541a	94.88
	0.50	11.767±0.139ab	111.61	8.000±0.373a	99.88

注:每列中字母相同者表示同种不同浓度间差异未达显著水平 ($P>0.05$);字母不同者表示差异达显著水平 ($P<0.05$)。

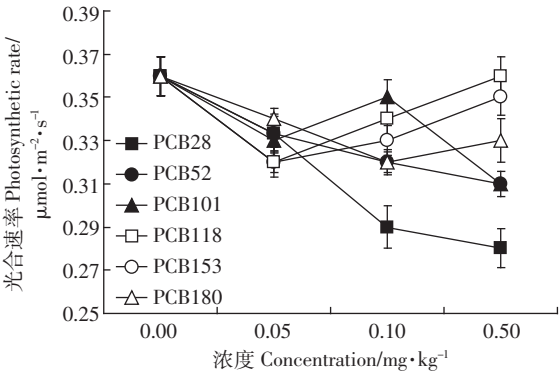


图 2 不同 PCBs 处理对油菜光合速率的影响

Figure 2 Effects of different PCBs treatments on photosynthetic rate of rape

时光合速率均呈现下降的趋势,后随浓度的增加表现出不同的趋势,但总体都低于对照。PCB28 在处理浓度为 0.10、0.50 mg·kg⁻¹ 时光合速率与对照相比分别降低了 19.44%、22.22%,与对照差异显著,其余各处理各浓度的光和速率与对照相比降幅在 15%以内,与对照差异不显著。由此可以看出,低浓度 PCBs 处理油菜,对油菜的光合速率有抑制作用,减小了油菜的

光合强度。究其原因,可能是高浓度下大量 PCBs 进入植物体内,破坏植物体内正常的生理代谢平衡,对植物的光合、呼吸代谢等功能产生不良影响,从而使油菜生长不良。

2.3 对油菜叶绿素含量的影响

叶绿素含量和叶绿素 a/b 值是光合作用的基础参数,常被用来作为植物抗性的指标来评价环境污染对植物的影响^[24-26]。如图 3 所示,各 PCBs 处理对叶绿素含量的影响不尽相同,但从总体上看呈下降的趋势。PCB28、PCB52 在低浓度时呈上升趋势,0.05 mg·kg⁻¹ 浓度处理时达到最大值,叶绿素含量分别高于对照 11.86%、19.05%,后随浓度增大叶绿素逐渐降低,且均低于对照的 15%以上,与对照差异显著。PCB118、PCB180 各处理随处理浓度的增加叶绿素含量是对照组的 86.48%~62.08%,均与对照差异显著。PCB101、PCB153 随浓度增加叶绿素含量先降低后升高,在低浓度下对叶绿素的含量有一定的促进作用。PCB101 处理浓度在 0.50 mg·kg⁻¹ 时,叶绿素含量急速下降为对照的 59.62%且与对照差异性显著。由此可以看出各 PCBs 处理对叶绿素的含量有抑制作用。

由图 4 可知,各 PCBs 处理对叶绿素 a/b 的影响

与对照相比均有不同程度的下降。PCB101 随浓度增加叶绿素 a/b 值逐渐减小,处理浓度在 0.05 mg·kg⁻¹ 时,叶绿素 a/b 值较对照相比下降了 4.40%,与对照相比差异不显著,说明 PCB101 处理在低浓度时对油菜叶绿素 a/b 的影响不大,随浓度增加叶绿素 a/b 值逐渐降低,当浓度达到 0.50 mg·kg⁻¹ 时叶绿素 a/b 值与对照相比降低了 27.7%,与对照差异显著。其余 PCBs 与对照相比,0.05 mg·kg⁻¹ 时叶绿素 a/b 值分别下降了 14.08%、21.17%、23.51%、27.94%、29.79%,低浓度时对叶绿素 a/b 值影响明显,与对照相比差异显著,不能保持相对正常的光合色素水平,耐受性较差。

2.4 对油菜还原性 Vc 的影响

植物体内的还原性 Vc 含量反映了其品质的高低。如图 5 所示,PCB28、PCB52、PCB153、PCB180 均随处理浓度的增加呈现先增加后降低的趋势,处理浓度在 0.05 mg·kg⁻¹ 时还原性 Vc 含量达到最大,比对照分别增加了 59.39%、20.50%、4.98%、26.00%,PCB28 与 PCB180 低浓度处理与对照相比差异性显著。PCB118 随处理浓度的增加呈现逐渐减小的趋势,说明 PCB118 对油菜还原性 Vc 有抑制性作用。

多氯联苯对油菜等还原性 Vc 的影响尚未见报

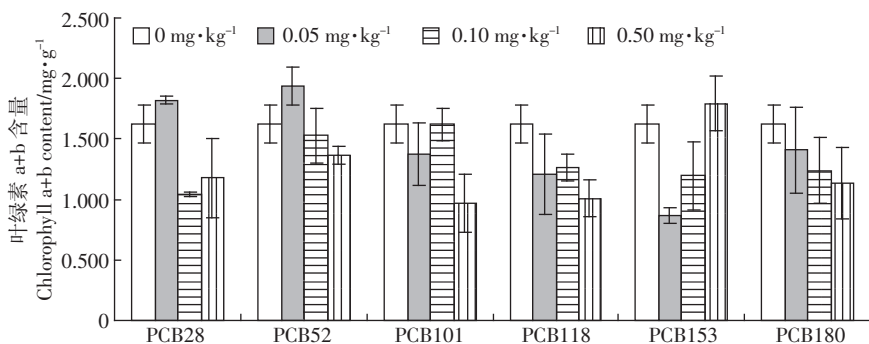


图3 不同 PCBs 处理对油菜叶绿素 a+b 含量的影响

Figure 3 Effects of different PCBs treatments on chlorophyll a+b content of rape

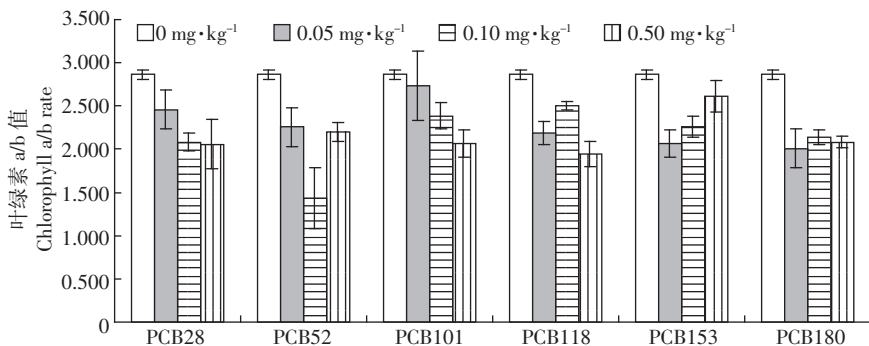


图4 不同 PCBs 处理对油菜叶绿素 a/b 的影响

Figure 4 Effects of different PCBs treatments on chlorophyll a/b of rape

道。本研究中,各 PCBs 处理对油菜 Vc 的影响不尽相同,可能是因为高浓度时多氯联苯的亲脂性对植物细胞的膜系统产生影响,影响到植物细胞的一些生理活动,导致还原性 Vc 的合成降低。而李轶修等^[27]研究认为,一些蔬菜可食部位 Vc 含量减少,使蔬菜品质降低,其原因可能是对绿色植物光合作用的破坏所致。各处理间没有明显规律,有待进一步研究其相关性。

2.5 对油菜中残留的影响

PCBs 可通过食物链进入人体,进而危害人类健康,所以对植物体内 PCBs 残留的测定具有一定的必要性。由图 6 可知,油菜植株内积累的 PCBs 含量与土壤中添加的 PCBs 浓度呈正相关关系,随处理浓度增加,残留积累量逐渐增加。对照中含有微量 PCBs,其中 PCB28、PCB101 处理在对照中未检出。PCB118、PCB153、PCB180 处理与对照差异不显著,在所设的 PCBs 浓度范围内油菜中的残留国家标准 ($0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 范围内。PCB28 处理浓度 $\geq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、PCB52、PCB101 处理浓度 $\geq 0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时油菜体内残留大于国家标准,对人体产生危害。

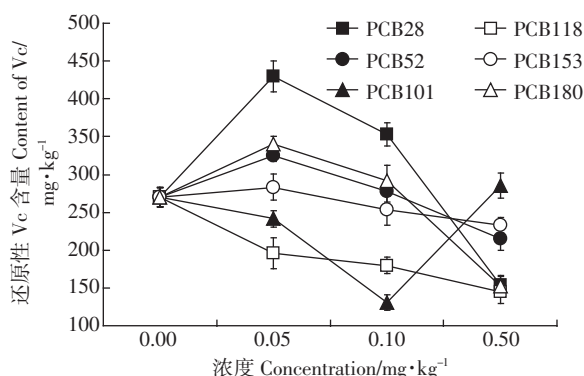


图 5 不同 PCBs 处理对油菜还原性 Vc 的影响

Figure 5 Effects of different PCBs treatments on reducing Vc of rape

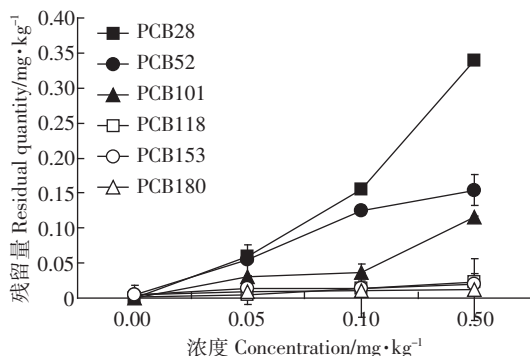


图 6 不同 PCBs 处理对油菜残留的影响

Figure 6 Effects of different PCBs treatments on residues of rape

油菜体内 PCBs 的含量与土壤污染物含量呈正相关,且 $\text{PCB28} > \text{PCB52} > \text{PCB101} > \text{PCB118} > \text{PCB153} > \text{PCB180}$ 。可见,随 PCBs 氯代数目的增加,其亲脂性与疏水性逐渐增加,更易被植物组织紧密吸附,而水溶性相对较高的氯代组分可能进入植物组织内部,随植物体内的蒸腾流或汁液向上迁移^[28]。

3 结论

(1)低浓度 PCBs 污染处理下,对油菜的叶长叶宽没有明显伤害现象,甚至有促进作用。

(2)各 PCBs 处理对光合速率、叶绿素含量、叶绿素 a/b 的影响不尽相同,但总体上呈现下降的趋势。各浓度 PCBs 处理对油菜光合速率整体呈现抑制作用,叶绿素含量整体上呈低浓度 ($< 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 促进、高浓度 ($\geq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 抑制。

(3)除 PCBs101 外,还原性 Vc 含量随 PCBs 处理浓度增加呈现先增加后减小的趋势。

(4)油菜植株内积累的 PCBs 含量与土壤中添加的 PCBs 浓度呈正相关关系,随处理浓度增加,残留积累量逐渐增加。PCB28 处理浓度 $\geq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, PCB52、PCB101 处理浓度 $\geq 0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,油菜体内残留大于国家标准 ($0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),将对人体产生危害。

参考文献:

- [1] Rezek J, Macek T, Mackova M, et al. Hydroxy-PCBs, methoxy-PCBs and hydroxy-methoxy-PCBs: Metabolites of polychlorinated biphenyls formed in vitro by tobacco cells[J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42(15): 5746-5751.
- [2] Campfens J, Mackay D. Fugacity-based model of PCB bioaccumulation in complex aquatic food webs[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31(2): 577-583.
- [3] Valle M D, Jurado E, Dachs J, et al. The maximum reservoir capacity of soils for persistent organic pollutants: Implications for global cycling[J]. *Environ Pollut*, 2005, 134(1): 153-164.
- [4] 史雅娟,吕永龙,任鸿昌,等.持久性有机污染物研究的国际发展动态[J]. *世界科技研究与发展*, 2003, 25(2): 73-78.
SHI Ya-juan, LÜ Yong-long, REN Hong-chang, et al. Recent progress in scientific research on persistent organic pollutants (POPs)[J]. *World Sci Tech R&D*, 2003, 25(2): 73-78.
- [5] 王艳洁,李莉,马新东,等.硅胶分离-气相色谱法测定海水样品中的有机氯农药及多氯联苯[J]. *中国环境监测*, 2009, 25(5): 39-41.
WANG Yan-jie, LI Li, MA Xin-dong, et al. Determination of organochlorine pesticides and PCBs in sea water by silica gel column separation and gas chromatography [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, 25(5): 39-41.
- [6] Goncalves C, Alpendurada M F. Assessment of pesticide contamination in soil samples from an intensive horticulture area, using ultrasonic extraction and gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Talanta*, 2005, 65: 1179-1189.

- [7] 高梦南, 王燕萍, 唐红卫, 等. 凝胶渗透色谱净化在土样有机氯测定中的应用[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(3): 38-40.
GAO Meng-nan, WANG Yan-ping, TANG Hong-wei, et al. Application of gel permeation chromatography to cleaning up soil extracts in determination of organochlorine pesticides[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 29(3): 38-40.
- [8] Sánchez-Bayo F, Baskaran S, Kennedy I R. Ecological relative risk (EcoRR): Another approach for risk assessment of pesticides in agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 91: 37-57.
- [9] 黄园英, 佟玲, 张玲金, 等. 用 ASE 提取和 GPC 净化气相色谱法快速测定土壤中痕量有机氯代化合物[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 184-189.
HUANG Yuan-ying, TONG Ling, ZHANG Ling-jin, et al. Determination of trace persistent organochlorine compounds in soil by gas chromatography with accelerated solvent extraction and gel permeation chromatography cleanup[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(1): 184-189.
- [10] 申荣艳, 骆永明, 章钢娅, 等. 长江三角洲地区城市污泥中多氯联苯和有机氯农药含量与组分研究[J]. 土壤, 2006, 38(5): 539-546.
SHEN Rong-yan, LUO Yong-ming, ZHANG Gang-ya, et al. PCBs and OCPs in municipal sludges from Yangtze River delta area[J]. *Soil*, 2006, 38(5): 539-546.
- [11] 简毅, 杨万勤, 张健, 等. 丘陵平原过渡区土壤农药残留特征及评价: 以四川省五通桥区为例[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 2048-2054.
JIAN Yi, YANG Wan-qin, ZHANG Jian, et al. Investigation and assessment on soil residual pesticide contamination in the mountain-hilly transitional zone: A case from Wutongqiao district in Sichuan[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(7): 2048-2054.
- [12] 方杰, 王凯雄. 气相色谱-离子阱质谱法测定海洋贝类中多残留有机氯农药、多氯联苯和多环芳烃[J]. 分析化学, 2007, 35(11): 1607-1613.
FANG Jie, WANG Kai-xiong. Multiresidual analysis of organochlorine pesticides, polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in marine shellfishes by gas chromatography-ion trap mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2007, 35(11): 1607-1613.
- [13] 于强, 李亚明, 张华, 等. 近海贻贝、牡蛎中有机氯农药和多氯联苯的气相色谱法测定[J]. 分析测试学报, 2002, 21(2): 91-93.
YU Qiang, LI Ya-ming, ZHANG Hua, et al. Determination of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in mussel and oyster by gas chromatography[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2002, 21(2): 91-93.
- [14] Serrano R, Barred A M, Pitarch E. Determination of low concentrations of organochlorine pesticides and PCBs in fish feed and fish tissues from aquaculture activities by gas chromatography with tandem mass spectrometry[J]. *Journal of Separation Science*, 2003, 26: 75-86.
- [15] 王玉飞, 陈晓红, 傅小红. 气相色谱-串联质谱法测定生物样品中的多氯联苯和滴滴涕[J]. 色谱, 2007, 25(1): 112.
WANG Yu-fei, CHEN Xiao-hong, FU Xiao-hong. Determination of PCBs and DDT in biological samples by GC-MS/MS Chinese[J]. *Journal of Chromatography*, 2007, 25(1): 112.
- [16] 靳保辉, 陈沛金, 谢丽琪, 等. 茶叶中 25 种有机氯农药多残留气相色谱测定方法[J]. 分析测试学报, 2007, 26(1): 104-106.
JIN Bao-hui, CHEN Pei-jin, XIE Li-qi, et al. Determination of 25 organochlorine pesticides in tea by GC technique[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2007, 26(1): 104-106.
- [17] 李樱, 储晓刚, 仲维科, 等. 凝胶渗透色谱-气相色谱同时测定糙米中拟除虫菊酯、有机氯农药和多氯联苯的残留量[J]. 色谱, 2004, 22(5): 551-554.
LI Ying, CHU Xiao-gang, ZHONG Wei-ke, et al. Simultaneous determination of the residues of pyrethroids, organochlorines and polychlorinated biphenyl congeners in unpolished rice by gas chromatography with gel permeation chromatography purification[J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2004, 22(5): 551-554.
- [18] 李建科, 吴丽华, 孔祥虹. 基质固相分散-气相色谱法测定苹果中的多种农药残留[J]. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1767-1777.
LI Jian-ke, WU Li-hua, KONG Xiang-hong. Matrix solid-phase dispersion and gas chromatography determination of multi-residue pesticides in apples[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(6): 1767-1777.
- [19] 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学试验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002, 9: 55-57.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 359-363.
BAO Shi-dan. *Agricultural chemistry analyses of soil*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 359-363.
- [21] Cowell E B. The ecological effects of oil pollution on littoral communities[J]. *Essex, England Applied Science Publishers*, 1973: 88-98.
- [22] 陆志强, 郑文教, 马丽, 等. 不同浓度茶和砒处理对红树植物秋茄胚轴萌发和幼苗生长的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2005, 44(4): 580-583.
LU Zhi-qiang, ZHENG Wen-jiao, MA Li, et al. Effect of naphthalene and pyrene on hypocotyl germination and growth of mangrove plant *kandelia candel* druce[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2005, 44(4): 580-583.
- [23] 刘亚云, 孙红斌, 陈桂珠, 等. 秋茄幼苗对多氯联苯污染的生理生态响应[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 746-754.
LIU Ya-yun, SUN Hong-bin, CHEN Gui-zhu, et al. Eco-physiological responses of *Kandelia candel* seedlings to polychlorinated biphenyls (PCBs) treatment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 746-754.
- [24] Huang X D, EL-ALawi Yousef, Penrose D M, et al. Responses of three grass species to creosote during phytoremediation[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 130: 453-463.
- [25] Huang X D, Mcconkey B J, Babu S T. Mechanisms of photo-induced toxicity of photo modified anthracene to plants: Inhibition of photosynthesis in the aquatic higher plants *Lemna gibba* (duckweed)[J]. *Environ Toxicol Chem*, 1997, 16: 1707-1715.
- [26] Marwood C A, Solomon K R, Greenberg B W. Chlorophyll fluorescence as a bioindicator of effects on growth in aquatic macrophytes from mixtures of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2001, 20(4): 890-898.
- [27] 李铁修, 周宝利, 刘娜, 等. 邻苯二甲酸二丁酯对 3 种蔬菜作物种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(2): 217-220, 224.
LI Yi-xiu, ZHOU Bao-li, LIU Na, et al. Effect of different concentration dibutyl phthalate (DBP) on the germination and seedlings growth of three vegetable seeds[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(2): 217-220, 224.
- [28] 孙向辉, 滕应, 骆永明, 等. 多氯联苯在紫花苜蓿体内的积累、分布及形态[J]. 土壤, 2011, 43(4): 595-599.
SUN Xiang-hui, TENG Ying, LUO Yong-ming, et al. Accumulation, distribution and chemical speciation of PCBs in different parts of alfalfa[J]. *Soil*, 2011, 43(4): 595-599.