

石油污染土壤对黄豆生长的生态毒性效应

李春荣¹,王文科¹,曹玉清²,田 华¹

(1 长安大学 环境科学与工程学院,陕西 西安 710054;2 吉林大学 资源与环境学院,吉林 长春 130023)

[摘要]【目的】分析石油污染对黄豆的生态毒性。【方法】通过盆栽试验,研究了土壤中不同石油烃质量浓度对黄豆幼苗叶绿素、丙二醛(MDA)含量和 SOD 活性的影响;通过田间试验,探讨了石油污染对黄豆生长性状、籽粒品质和土壤微生物的影响,考察了黄豆不同器官中石油烃的残留量。【结果】盆栽试验表明,当土壤中石油烃的质量浓度为 3~5 g/kg 时,其对黄豆幼苗叶绿素含量、MDA 含量和 SOD 活性影响甚小;当其质量浓度为 10 g/kg 时,叶绿素含量减少 10.8%,MDA 含量增加 12.4%,SOD 活性降低 9.8%。田间试验表明,土壤中石油烃的质量浓度为 10 g/kg 时,黄豆的出苗率、株高、根重及籽粒中的粗脂肪、粗蛋白质含量与对照无显著差异,但单株荚数、百粒重、单株产量和生物量较对照分别降低 8.1%,10.0%,18.6%和 7.7%;当土壤中石油烃的质量浓度由 10 g/kg 增加到 30,50 g/kg 时,黄豆根部石油烃残留量由 3.15 mg/kg 增加到 10.64,17.87 mg/kg,黄豆籽粒中的苯并[a]芘含量由 4.71 μ g/kg 上升到 5.32,5.59 μ g/kg,石油烃对黄豆的生长性状和籽仁品质有明显毒害作用,但对土壤细菌的生长表现出一定的促进作用。【结论】黄豆生长土壤中石油烃污染的安全限量为 5 g/kg,黄豆不同部位石油烃的残留量表现为根>茎>叶>荚>籽粒。

[关键词] 土壤;石油污染;黄豆;生态毒性;石油烃

[中图分类号] S565.106.1;X53

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2008)01-0116-05

Eco-toxicity of petroleum-contaminated soil on the growth of soybean

LI Chun-rong¹, WANG Wen-ke¹, CAO Yu-qing², TIAN Hua¹

(1 College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2 College of Resources and Environment, Jilin University, Changchun, Jilin 130023, China)

Abstract: 【Objective】The eco-toxicity of petroleum-contaminated soil to the growth of soybean was analyzed. 【Method】An experiment in planting soybean in a pot has been carried out to study the effects of petroleum with different concentration on the contents of chlorophyll, malondialdehyde (MDA), superoxide dismutase (SOD) activities, and through field experiments, to study the effects of petroleum with different concentration on soybean in respect of its growth indexes, seed quality and microorganism distribution in polluted soil, and to explore petrolic residual quantity in different parts of soybean. 【Result】The results of the potted plant experiments indicate that the contents of chlorophyll and SOD activities are reduced 10.8% and 9.8%, MDA increases 12.4% in the treatment of 10 g/kg petroleum, which are not significantly affected in the 3~5 g/kg treatment. The results of the field experiments show that the 10 g/kg of petroleum has no effect on the germination percentage, crude grease and protein contents of soybean, but it makes Plant Pod Numbers, 100-Grain Weight, Plant Yield and Biomass to reduce by 8.1%, 10.0%, 18.6% and 7.7% respectively. When the petroleum concentration in the soil is increased to 30 g/kg, 50 g/kg by the 10 g/kg, petroleum hydrocarbon's residual quantity in the root of soybean is increased 10.64 mg/kg and

* [收稿日期] 2006-12-27

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40472131)

[作者简介] 李春荣(1960—),男,陕西洛川人,副教授,博士,主要从事水、土污染生物治理研究。E-mail: changanl @163.com

17.87 mg/kg by 3.15 mg/kg, BaP content in the seed is increased to 5.32 $\mu\text{g/kg}$, 5.59 $\mu\text{g/kg}$ from 4.71 $\mu\text{g/kg}$, they harm obviously for growth indexes, seed quality of soybean, which can promote on the bacteria growth in the soil. 【Conclusion】 For the growth of soybean, the safe capacity of petroleum is 5 g/kg in the soil; the petroleum hydrocarbon's residual quantity in different parts of soybean is root > stalk > leaf > pod > kernel.

Key words: soil; petroleum contamination; soybean; eco-toxicity; petroleum

在原油生产、储运、加工和使用过程中,常由于意外事故或管理不善等原因,导致石油烃溢出或泄露而使大面积土地受到污染^[1],使土壤微生物和土壤-植物生态系统的结构和功能遭受破坏,导致植物发芽出苗率降低,生育期限推迟,贪青晚熟,结实率下降,抗倒伏、抗病虫害能力降低,严重影响粮食产量^[2]。石油在作物体及果实部分残留的多环芳烃,因有致癌、致突变、致畸等活性,可通过食物链在人和动物体内的逐级富积而对人类健康造成危害^[3-4]。因此,石油污染土壤对植物生长的影响受到了国内外专家的普遍重视^[5-11],但迄今尚未见有关石油污染对黄豆生长影响的相关报道。为此,本试验采用盆栽和田间试验,研究了石油烃污染土壤对黄豆(*Glycine max*)生理特性、生长性状、籽粒品质和土壤微生物群落的影响,探讨了石油烃在黄豆不同器官的残留情况,以期为了保护农业生态环境措施的制定和土壤环境的安全评价及石油污染土壤的生物修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

1.1.1 供试种子和土壤 黄豆种子购于陕西洛川县种子公司。供试土质为粉质粘土,含总有机碳21.9 g/kg,总氮1.2 g/kg,总磷(以 P_2O_5 计)0.8 g/kg,总钾(以 K_2O 计)2.0 g/kg。土壤 pH 值为 6.2。

1.1.2 石油 由延安炼油厂提供,相对密度为 0.852~0.893,苯并[a]芘含量为 7.11 mg/kg,属于石蜡基原油。

1.1.3 主要试剂 苯并[a]芘、正十六烷、异辛烷和苯标准品购自 Aldrich Chemical 公司。磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、硅酸镁(60~100 目)等均为分析纯。琼脂粉、牛肉膏-蛋白胨为生化试剂。

1.1.4 主要仪器 GCMS-QP2010 气相色谱质谱联用仪(日本岛津),Oil-460 型红外分光测油仪(北京华夏),752 型紫外分光光度计(上海光谱),AC204-IC 电子天平(瑞士-梅特勒),TOC-VCPH 总有机碳测定仪(日本岛津)。

1.2 试验设计

1.2.1 盆栽试验 通过盆栽试验揭示石油污染土壤对黄豆生理特性的影响。将供试土壤风干,过 1 mm 筛,测定水分含量后,每盆(盆高 22 cm,直径 27 cm)装土样 6 kg,按 0, 3, 5, 10 g/kg 添加不同质量的石油,充分搅拌使之混合均匀。种子精选、消毒后下种,每盆 20 粒。播种当日喷洒灌溉 1 次,以后每 3 d 喷灌 1 次,每次灌水量 306 mL/盆(西安当地年降雨量为 650 mm)。10 d 后每盆选择留苗 10 株,35 d 拔出幼苗测定叶绿素、DMA 含量和 SOD 活性。每处理设 3 个重复,数据进行统计分析。

1.2.2 田间试验 通过田间试验探索石油污染土壤对黄豆生长性状、籽粒品质以及土壤微生物的影响。探讨石油烃在黄豆不同部位的残留情况。试验场地设在陕西长安大学雁塔校区植物园内,每块试验小区面积为 4 m $\times$ 4 m,行距 40 cm,株距 20 cm,共 9 行,每行 15 株。播种时每穴 3 粒,1 周后统计出苗率,15 d 定苗。

土壤预处理时,根据土壤湿比重和土壤水分测定结果,于 15 cm 土层中添加不同质量浓度(0, 10, 30 和 50 g/kg)的石油烃。将换算所得的石油烃均匀喷洒在地面,待大部分下渗后用锄头从不同方向反复锄动,并用铁耙反复耙、耢,当日喷洒灌溉 1 次,次日早、中、晚各锄、耙 1 次,于第三日锄、耙、耢后下种。播种前,生育季节适时灌溉,采用常规田间管理。成熟期分别从各区第 2, 4, 6, 8 行选取编号为奇数的 6 株黄豆,调查株高、单株荚数、单株产量、单株生物量、肉荚比、百粒重和根重 7 个生长性状指标;测定籽粒中的粗脂肪、粗蛋白质和苯并[a]芘含量;测定黄豆根、茎、叶、籽粒和豆荚中的石油烃残留量;统计不同时期土壤中的细菌和嗜油细菌数量。

1.3 测定项目及方法

株高用直尺测量,干重用电子天平或电子台秤称量。叶绿素含量用丙酮浸提法测定^[12],以每 g 鲜叶中的叶绿素(a+b)总量表示;丙二醛(MDA)含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性用试剂盒测定(南京建成生物工程研究所生产)。采用稀释平板计数法

统计土壤中的细菌总数和嗜油细菌数量。植物不同器官中的石油烃含量采用非分散红外分光光度法测定^[13]。籽粒中的苯并[a]芘含量采用 GC-MS 法测定^[13-14];粗蛋白质和粗脂肪含量按照国家标准规定的方法测定^[15-16]。

2 结果与分析

2.1 石油污染对土壤中微生物群落的影响

由表 1 可以看出,试验开始时,石油污染土壤中的细菌数量较对照明显减少,这是因为污染初期土壤中低分子量烷烃的浓度较高,这部分烷烃会对部分微生物产生极性毒性作用。试验进行 45 d 后,10,30,50 g/kg 3 个处理土壤中的细菌数均高于同期对照,说明当土壤中的石油烃质量浓度≤50 g/kg 时,其对微生物的生长有明显的促进作用。

表 1 石油污染土壤中细菌数的统计结果

石油烃质量浓度/ (g · kg ⁻¹) Petroleum concentration	测定时间/d Determination time			
	g ⁻¹			
	0	45	90	120
0(CK)	5.2×10 ⁷	3.1×10 ⁷	1.2×10 ⁸	1.6×10 ⁸
10	1.7×10 ⁷	6.5×10 ⁸	7.3×10 ⁸	3.1×10 ⁹
30	2.4×10 ⁷	6.7×10 ⁸	4.3×10 ⁸	5.8×10 ⁸
50	6.2×10 ⁶	2.9×10 ⁹	4.6×10 ⁸	7.8×10 ⁸

由表 2 可见,试验进行 45 d 后,污染区嗜油菌数量比对照高出 2~3 个数量级。这是因为土壤被石油污染后,污染点的微生物经过一段时间驯化后,产生了代谢污染物的能力,使原本在溢漏时不能够转化或转化非常慢的污染物被代谢降解,微生物的这种适应性促使嗜油菌数量增加^[17]。

表 2 石油污染土壤中嗜油细菌数的统计结果

石油烃质量浓度/ (g · kg ⁻¹) Petroleum concentration	测定时间/d Determination time			
	g ⁻¹			
	0	45	90	120
0(CK)	1.3×10 ³	4.6×10 ³	2.6×10 ³	5.7×10 ³
10	2.3×10 ³	3.6×10 ⁵	1.5×10 ⁶	6.1×10 ⁵
30	6.4×10 ³	7.4×10 ⁵	5.8×10 ⁶	7.2×10 ⁶
50	5.6×10 ³	2.6×10 ⁶	1.1×10 ⁶	1.9×10 ⁶

2.2 石油污染对黄豆幼苗叶绿素、MDA 含量和 SOD 活性的影响

叶绿素含量是植物光合作用水平的特征性指标之一,该值大小可以表征植物逆境下受害的程度。MDA 是膜脂过氧化的产物,其含量可以反映细胞膜脂过氧化的程度和植物对逆境条件反应的强弱。而 SOD 作为植物体内超氧阴离子自由基的专一性

清除剂,在维持机体活性氧代谢的平衡中起着十分重要的作用。由表 3 可见,土壤中石油烃质量浓度达到 3 和 5 g/kg 时,黄豆幼苗叶中的叶绿素含量、MDA 含量和 SOD 活性与对照相比无显著差异,说明其对黄豆光合作用和超氧化物歧化酶活性无显著影响。当土壤中石油烃的质量浓度达到 10 g/kg 时,与对照相比,黄豆的叶绿素含量降低了 10.8%,SOD 活性降低 9.8%,MDA 含量增加 12.4%,此时的石油烃质量浓度对黄豆生理特性影响显著。当土壤中石油烃的质量浓度为 0~10 g/kg 时,SOD 活性表现出先升后降的变化趋势。这是因为 SOD 作为超氧化物自由基的清除剂,在低浓度石油烃胁迫下,植物体内的防御机能和具抗性特征的生理活动被刺激而加快,引起植物体内自身防御系统中的 SOD 活性升高,从而加速了因石油污染所增加的活性氧的分解,使植物生长免受伤害;但当石油烃质量浓度增大到一定程度时,活性氧的增加超过了植物正常的歧化能力,过多的氧自由基使细胞内的多种功能膜及酶系统遭受不同程度的破坏,植物生理代谢紊乱,SOD 活性显著下降,引发膜脂过氧化,MDA 含量亦随之增加。

表 3 石油污染对黄豆幼苗叶绿素和 MDA 含量及 SOD 活性的影响

Table 3 Influences of petroleum-contaminated soil on chlorophyll,MDA contents and SOD activities in soybean seedlings			
石油烃质量浓度/ (g · kg ⁻¹) Petroleum concentration	叶绿素含量/ (mg · g ⁻¹) Chlorophyll content	MDA 含量/ (nmol · g ⁻¹) MDA content	SOD 活性/ (U · g ⁻¹) SOD activities
0	1.86±0.05 a	3.62±0.13 a	61.23±1.94 a
3	1.81±0.02 a	3.65±0.07 a	63.80±2.62 a
5	1.78±0.04 a	3.67±0.09 a	62.01±3.41 a
10	1.66±0.07 b	4.07±0.04 b	55.23±3.26 b

注:数据为“平均值±SD”;同列数据后标不同字母者表示在 α=0.05 水平上差异显著。下表同。

Note:Figures in the table are the Mean±Std. Error. Different letters in each row mean the significant difference at 5% level,same as follows.

2.3 石油污染土壤对黄豆生长性状的影响

田间试验中,黄豆出苗率,成熟期株高、单株荚数、肉荚比、百粒重、根重、单株产量和单株生物量等生长性状的统计结果见表 4。由表 4 可见,当土壤中石油烃的质量浓度为 10 g/kg 时,黄豆株高、根重和出苗率与对照相比无显著差异,其余 5 种性状指标与对照相比差异显著。当土壤中石油烃的质量浓度为 30~50 g/kg 时,黄豆的各项生长性状指标与

对照相比均有显著差异,黄豆生长受到明显抑制。

表 4 石油污染土壤对黄豆生长性状的影响

Table 4 Effects of petroleum polluted soil on the growth indexes of soybean								
石油烃质量浓度/ (g·kg ⁻¹) Petroleum concentration	株高/cm Plant height	单株荚数 Plant pod numbers	肉荚比 Kernel/pod	百粒重/g 100-grain weight	根重/g Root DW	单株产量/g Plant yield	生物量/g Biomass	出苗率/% Germination percentage
0(CK)	72.1 a	74.3 a	71:29 a	22.60 a	4.61 a	38.92 a	87.64 a	97.5 a
10	68.7 a	68.3 b	69:31 b	20.34 b	4.43 a	31.65 b	80.93 b	96.3 a
30	63.4 b	58.5 c	62:38 c	18.12 c	4.16 b	25.14 c	71.37 c	85.2 b
50	57.5 c	48.6 d	48:52 d	16.13 d	3.54 c	18.17 d	42.65 d	70.4 c

注:表中生物量不含叶片质量。
Note:Leaf mass is not included in the biomass.

2.4 石油污染土壤对黄豆籽粒品质的影响

田间试验中,黄豆籽粒中粗脂肪、粗蛋白质和苯并[a]芘含量的测定结果见表 5。

表 5 石油污染土壤对黄豆籽粒品质的影响

Table 5 Effects of petroleum polluted soil on seed quality of soybean			
石油烃质量浓度/ (g·kg ⁻¹) Petroleum concentration	粗脂肪/ (g·kg ⁻¹) Crude grease	粗蛋白质/ (g·kg ⁻¹) Crude protein	苯并[a]芘/ (μg·kg ⁻¹) BaP
0(CK)	216.0 a	427.2 a	2.14 a
10	206.3 a	411.0 a	4.71 b
30	195.3 b	381.5 b	5.32 c
50	190.1 b	366.1 b	5.59 d

由表 5 可见,随着土壤石油污染程度的加剧,黄豆的粗脂肪和粗蛋白质含量逐渐减少。当石油烃的质量浓度为 10 g/kg 时,黄豆的粗蛋白质、粗脂肪含量与对照相比无显著差异,黄豆籽粒中的苯并[a]芘含量低于国家食品标准所规定的限值(<5 μg/kg)^[18]。当石油烃质量浓度分别为 30 和 50 g/kg 时,黄豆的粗蛋白质含量分别下降 10.7% 和 14.3%,粗脂肪含量下降 9.6% 和 12.0%,与对照相比差异均达显著水平。这是因为较高浓度的石油污染物对黄豆的光合作用产生了显著抑制,使其粗脂肪、粗蛋白质等有机物合成能力降低,导致有机物积累量减少。30 和 50 g/kg 石油污染处理时,黄豆籽粒的苯并[a]芘含量分别高出对照 2.5 倍和 2.6 倍,超过国家食品标准所规定的限值。综上可知,当土壤中石油烃的初始质量浓度≥30 g/kg 时,黄豆籽粒质量明显下降。

2.5 石油烃在黄豆不同器官中的残留量

利用非分散红外分光光度法测定黄豆不同器官中的石油烃含量,以测定值减去背景值(CK 处理测定值),即可计算出黄豆不同器官的相对石油烃残留量。由图 1 可见,随着土壤石油污染程度的加重,黄豆各器官中的石油烃残留量增加,增加幅度依次表现为根>茎>叶>荚>籽粒。其中 10 g/kg 石油污

染处理时黄豆各器官中石油烃残留量的增幅≤3.5 mg/kg;30 和 50 g/kg 石油污染处理时各器官中的石油烃残留量分别较 10 g/kg 处理增加 3.0~5.1 倍和 2.5~3.0 倍。

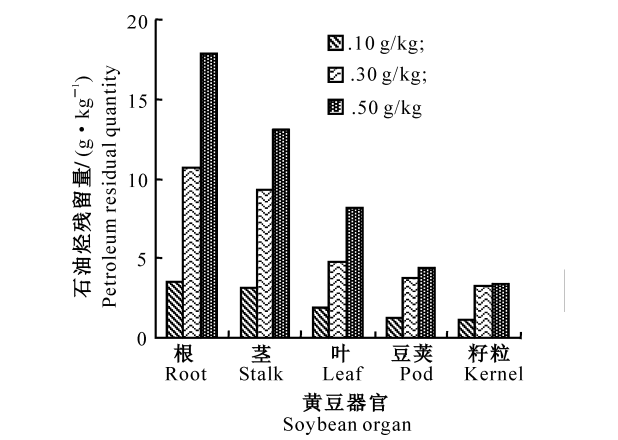


图 1 不同石油污染处理时黄豆各器官中的石油烃残留量
Fig.1 Petroleumresidual quantity in soybean organs of different treatment

3 结 论

- 1)石油烃初始质量浓度为 10~50 g/kg 时,土壤中细菌数量,特别是嗜油菌数量显著增加,石油烃对土壤微生物的生长表现出一定的促进作用。
- 2)土壤中石油烃的初始质量浓度≤5 g/kg 时,其对黄豆幼苗叶绿素、MDA 含量和 SOD 活性无显著影响。当土壤中石油烃的初始质量浓度为 10 g/kg时,黄豆叶绿素含量减少 10.8%,MDA 含量增加 12.4%,SOD 活性降低 9.8%,石油污染对黄豆幼苗有明显的毒害作用。
- 3)土壤中石油污染物的质量浓度≥30 g/kg 时,其对黄豆的生长有明显的抑制作用。
- 4)石油烃初始质量浓度为 10 g/kg 时,黄豆籽粒品质与对照没有显著差异,苯并[a]芘含量低于国家食品标准所规定的限量(<5 μg/kg)。当土壤中

的石油烃质量浓度达到 30 和 50 g/kg 时,黄豆的粗蛋白质含量下降 10.7%和 14.3%,粗脂肪含量下降 9.6%和 12.0%;苯并[a]芘含量分别为 5.32 和 5.59 μg/kg,均高于国家食品标准所规定的限值,即黄豆籽仁品质受到了明显影响。

[参考文献]

[1] Betts W B. Bioremediation;an alternative treatment for oil pollution[J]. The Genetic Engineering and Biotechnology,1993,13:49-59.

[2] 陆秀君,郭书海,孙 清,等. 石油污染土壤的修复技术研究现状及展望[J]. 沈阳农业大学学报,2003,34(1):63-67.
Lu X J,Guo S H,Sun Q,et al. Current situation of remediating techniques of petroleum contaminated soil and its prospects [J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2003,34(1):63-67. (in Chinese)

[3] Brinkmann D,Roehrs J,Schuegerl K. Bioremediation of diesel fuel contaminated soil in a rotating bioreactor part I . Influence of oxygen saturation[J]. Chemical Engineering Technology,1998,21(2):168-172

[4] Vasudevan N,Rajaram P. Bioremediation of oil sludge-contaminated soil [J]. Environment International,2001,26(5-6):409-411.

[5] 周泽义,樊耀波,王敏健. 中国食品中苯并[a]芘的污染与控制[J]. 环境污染治理技术与设备,2000,1(5):66-70.
Zhou Z Y,Fan Y B,Wang M J. Pollution and control of the BaP in chinese food[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control,2000,1(5):66-70. (in Chinese)

[6] 吕志萍,程龙飞. 石油污染土壤中石油含量对玉米的影响[J]. 油气田环境保护,2001,11(1):36-37.
Lu Z P,Cheng L F. The influence on corn growth caused by petroleum concentration of contaminated by petroleum[J]. Environmental Protection in Petroleum and Natural Gas Production,2001,11(1):36-37. (in Chinese)

[7] 李永和. 3-4 苯并芘(BaP)对粮食及食品的污染[J]. 粮食科技与经济,1997(4):37-38.
Li Y H. 3,4-BaP pollutes grain and food[J]. Science & Technology and Economy for Food,1997(4):37-38. (in Chinese)

[8] Gao Y Z,Zhu L Z. Phytoremediation and its models for organic contaminated soils[J]. Journal of Enviromental Science,2003,15:302-310.

[9] Lin Q,Mendelssohn I A. The combined effects phytoremediation and biostimulation in enhancing habitat restoration and oil degration of petroleum contaminated wetlands[J]. Ecological Engineering,1998,10:263-274.

[10] Zappi M E,Rogers B A,Teeter C L,et al. Bioslurry treatment of a soil contaminated with low concentratons of total petroleum hydrocarbons[J]. Journal of Hazardous Materials,1996,46(1):1-12.

[11] 李春荣,王文科,曹玉清,等. 石油污染土壤对向日葵生长的影

响[J]. 地球科学与环境学报,2006,28(4):97-99.

Li C R,Wang W K,Cao Y Q,et al. Influences of petroleum-contaminated soil on growth of sunflower[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2006,28(4):97-99. (in Chinese)

[12] 沈伟其. 测定水稻叶片叶绿素浓度的混合液提取法[J]. 植物生理通讯,1988(3):62-64.
Shen W Q. Extraction of mixed solution for determination of chlorophyll contents in rice leaf blade[J]. Plant Physiology Communication,1988(3):62-64. (in Chinese)

[13] 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002:495.
State Environmental Protection Administration, Editorial Committee for the Methods of the Exemination of Water and Wastewater. Methods for the examination of water and wastewater[M]. 4th Ed. Beijing:China Environmental Science Press,2002:495. (in Chinese)

[14] 张铃金,苏建茹,周立军,等. 固体模拟样品中多环芳烃有机污染物提取方法研究[J]. 岩矿测试,2003,22(2):113-120.
Zhang L J,Su J R,Zhou L J,et al. Study on extraction techniques of polynuclear aromatic hydrocarbons in spiked solid samples[J]. Rock and Mineral Analysis,2003,22(2):113-120. (in Chinese)

[15] 商业部粮食储运局. GB5512—85 粮食、油料检验粗脂肪测定方法[S]. 北京:中国标准出版社,1986.
Grain Storage and Transport Bureau,Ministry of Commerce, People's Republic of China. GB5512—85 Standard methods for the examination of grain and oil plants;Measuring method of crude grease[S]. Beijing:Chinese Standard Press,1986. (in Chinese)

[16] 商业部粮食储运局. GB5511—85 粮食、油料检验粗蛋白质测定方法[S]. 北京:中国标准出版社,1986.
Grain Storage and Transport Bureau,Ministry of Commerce, People's Republic of China. GB5511—85 Standard methods for the examination of grain and oil plants;Measuring method of crude protein[S]. Beijing:Chinese Standard Press,1986. (in Chinese)

[17] 周启星,宋玉芳,丁 颖,等. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京:科学技术出版社,2004:212-218.
Zhou Q X,Song Y F,Ding Y,et al. Remediation of contaminated soil;Principles and methods[M]. Beijing:Science Press,2004:212-218. (in Chinese)

[18] 广西壮族自治区卫生防疫站,中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所. GB 7104—1994 食品中苯并(a)芘限量卫生标准[S]. 北京:中国标准出版社,1994.
Health and Epidemic Prevention Station, Guangxi Zhuang Autonomous Region, Research Institute for Nutrition and Food of Health,China Preventive Medicine Academy of Science. GB 7104—1994 Health standards of B[a]P limiting quantity in food[S]. Beijing:Chinese Standard Press,1994. (in Chinese)