

# 土壤铅-苯并[a]芘复合污染对小麦种子生长的影响研究

王红旗, 王帅, 宁少尉, 孙艳玲, 侯泽青

(北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

**摘要:**研究了土壤中低含量铅(Pb)-苯并[a]芘(B[a]P)复合污染对小麦种子萌发率、根伸长、芽伸长以及芽根比的影响,以期考察复合污染的生态效应并筛选具有指示土壤污染程度的指标.结果表明,小麦种子萌发率对Pb-B[a]P单一及复合污染均不敏感;Pb和B[a]P单一污染时小麦根伸长均受到一定程度的抑制作用;复合污染条件下Pb-B[a]P间发生明显的交互作用,一方面Pb和B[a]P对小麦根伸长具有协同刺激作用,另一方面Pb削弱B[a]P对小麦根伸长的抑制作用,联合作用以拮抗效应为主.B[a]P单一污染对小麦芽伸长有一定的抑制作用.复合污染条件下,小麦芽伸长与Pb含量间有极显著的正相关性( $p < 0.01$ ),B[a]P及Pb-B[a]P间的交互作用对芽伸长的影响较弱,联合作用的结果均表现为拮抗效应.小麦芽根比的响应规律与芽的响应规律类似,但芽根比与Pb含量间的相关性更显著,更适合于指示土壤Pb污染程度.当Pb以乙酸铅形式投加时,根伸长受到的刺激作用被进一步增强,芽伸长受到的刺激作用被削弱,而芽根比受到的刺激作用则被消除.Pb投加形式对小麦种子生长有显著的影响.

**关键词:**复合污染;苯并[a]芘;铅;根伸长;芽伸长;联合作用;土壤

中图分类号:X171.5 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)03-0886-10

## Effects of Combined Pollution of Lead and Benzo[a]pyrene on Seed Growth of Wheat in Soils

WANG Hong-qi, WANG Shuai, NING Shao-wei, SUN Yan-ling, HOU Ze-qing

(Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Seed germination, root elongation, shoot elongation and ratio of shoot to root of wheat in soils polluted by lead (Pb) and benzo(a)pyrene (B[a]P) with medium-low concentrations were studied to reveal the ecological effects of combined pollution and screen the indicative markers. Results indicated that seed germination was not sensitive to single or combined pollution of Pb or B[a]P. Root elongation was inhibited by single pollution of Pb or B[a]P to different extents. Extensive interactions between Pb and B[a]P occurred to root elongation of wheat, including synergistic-stimulatory effect and antagonistic-inhibitory effect. The joint action was mainly antagonistic. Single pollution of B[a]P had an inhibitory effect on shoot elongation. Under combined pollution conditions, the shoot elongation of wheat correlated well with Pb contents ( $p < 0.01$ ). B[a]P or the interactions between pollutants had little effect on shoot elongation of wheat. The joint action on shoot elongation was consistently antagonistic. The response pattern of the ratio of shoot to root was similar to the response pattern of shoot elongation. However, the former had better correlation than the latter, indicating it as a more suitable indicative marker for Pb pollution. If lead acetate was employed instead of lead nitrate, longer root elongation, shorter shoot elongation and no effect on ratio of shoot to root were found. Therefore, the forms of Pb salt had significant influence on seed growth of wheat in soils.

**Key words:** combined pollution; benzo[a]pyrene; lead; root elongation; shoot elongation; joint action; soil

土壤环境中多种污染物共存并发生相互作用而形成复合污染现象已经得到国内外学者的广泛重视,成为了环境科学发展的一个重要方向之一<sup>[1]</sup>.重金属和多环芳烃类是两类典型的土壤污染物,往往被同时发现<sup>[2]</sup>.目前,有关重金属之间以及多环芳烃之间复合共存的生态效应研究取得了一定的研究成果<sup>[3,4]</sup>.而重金属-多环芳烃复合污染生态效应的研究还很不充分<sup>[1,5,6]</sup>.铅(lead, Pb)和苯并[a]芘(Benzo[a]pyrene, B[a]P)作为重金属和多环芳烃

类的典型代表,其环境危害较大、污染较为持久,因而一直是研究的热点.但有关两者复合污染的研究仍较少,并且缺少对实际中常见的中低含量污染物长期暴露情景的考虑<sup>[7,8]</sup>.高等植物是生态系统中的基本组成部分.利用高等植物的生长状况监测土

收稿日期:2010-01-14;修订日期:2010-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(40772149)

作者简介:王红旗(1960~),男,博士,教授,主要研究方向为污染土壤的生物修复技术及风险评价,E-mail: amba@bnu.edu.cn

壤污染程度,是从生态学角度衡量土壤健康状况,评价土壤质量的重要方法之一<sup>[9,10]</sup>。目前已建立的高等植物毒理试验方法主要包括种子萌发试验、根伸长试验和早期植物幼苗生长试验<sup>[11]</sup>。并已被应用于重金属、多环芳烃等污染物生态效应的研究<sup>[11-13]</sup>。本研究以小麦为供试体,考察了土壤条件下中低含量 Pb-B[a]P 复合污染对种子萌发率、根伸长和芽伸长的影响,以期揭示 Pb-B[a]P 复合污染的生态效应,筛选具有指示土壤污染程度的敏感指标。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

B[a]P 购自美国 Sigma 公司(纯度 >99%);硝

酸铅、乙酸铅为分析纯,购自汕头市西陇化工厂;其他药品均为分析纯,购自北京化工厂。小麦、白菜种子购自中国农业科学院。供试褐土采自北京市昌平区表层农田土壤(0~20 cm 深),土样采集后风干,过 2 mm 筛,去除石块和植物残体。土壤理化性质见表 1。

### 1.2 试验设计

试验采用 2 因子 5 水平完全组合设计方案,Pb 的投加含量分别为 0、100、200、400、800 mg/kg, B[a]P 投加含量分别为 0.0、0.1、0.4、1.6、6.4 mg/kg。为了研究不同类型铅盐对试验结果的影响,部分铅以乙酸铅形式投加,共计 27 种单一或复合污染情景,各污染物的投加含量见表 2。

表 1 供试土壤的一些理化性质

Table 1 Some physical and chemical properties of tested soils

土壤类型	TP	TK	TN	OC	T-Pb	B[a]P	CEC	pH	砂粒	粉粒	黏粒
褐土	0.063%	0.196%	0.078%	1.21%	35 mg/kg	12 μg/kg	17.60 cmol/kg	7.3	54%	33%	13%

表 2 土壤样品中污染物的投放含量/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 2 Contents of pollutants added in soil samples/mg·kg<sup>-1</sup>

样品号	B[a]P 含量	Pb 含量	样品号	B[a]P 含量	Pb 含量
K1	0	0	K15	6.4	200
K2	0.1	0	K16	0	400
K3	0.4	0	K17	0.1	400
K4	1.6	0	K18	0.4	400
K5	6.4	0	K19	1.6	400
K6	0	100	K20	6.4	400
K7	0.1	100	K21	0	800
K8	0.4	100	K22	0.1	800
K9	1.6	100	K23	0.4	800
K10	6.4	100	K24	1.6	800
K11	0	200	K25	6.4	800
K12	0.1	200	K26	6.4	400+400 <sup>1)</sup>
K13	0.4	200	K27	6.4	800 <sup>1)</sup>
K14	1.6	200			

1) 表示此部分铅的投加形式为乙酸铅

土壤 Pb/B[a]P 投加试验:称取相当于烘干土重 600 g 的土壤样品 27 份,根据表 2 的设计加入一定量的 B[a]P 标准溶液(丙酮溶剂),混匀敞口放置于阴凉处。待丙酮挥发干净后,向上述处理土壤中分别加入一定量的硝酸铅溶液或乙酸铅溶液,补加硝酸铵溶液以消除硝酸根的影响。充分混合土样 3 次,使用称重法调节土壤含水量为最大持水量的 60%,置于培养箱中老化一周。

预备试验:将 10 粒小麦种子均匀播种于含有 150 g 对照土的 300 mL 塑料杯中,调节土壤含水率为最大持水量的 60%,封口,置于 25℃ 恒温培养箱

中避光培养 4 d。对照种子发芽率 >65%、根长度、芽长度均 >20 mm 时试验结束。

正式试验:采用与预备试验相同的条件,将 10 粒小麦种子均匀播种于含 150 g 复合污染土样的 300 mL 塑料杯中,在预备试验的条件下培养 4 d 后收获小麦幼苗,统计萌发率、根伸长及芽伸长。所有处理均设 3 次重复,共计 81 次试验。

### 1.3 数据分析

植物根伸长、芽伸长通过成像后使用图形软件测量。测量数据采用 SPSS 11.5 和 Microsoft Office Excel 2003 进行双因子方差分析及 Duncan 多重比较<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤 Pb、B[a]P 复合污染对小麦种子萌发率的影响

各土壤样品中小麦种子的萌发率见表 3,其中 K27 萌发率较大,K11、K23 和 K24 的萌发率较小,其余土壤样品中的种子萌发率均接近对照条件 K1。说明种子萌发率这一指标对土壤 Pb-B[a]P 单一及复合污染并不敏感,其污染指示作用较弱。这与其他研究者的结果一致,宋玉芳等<sup>[11,12]</sup>在研究草甸棕壤中重金属对小麦和白菜的生态毒性效应时发现土壤 Pb 含量为 800 mg/kg 时小麦种子的出芽抑制率基本不受影响。晁雷等<sup>[15]</sup>也发现小麦种子萌发率与土壤中铅和二氯苯含量没有显著相关性。这可能是由

于种子发芽过程除了受外界污染物含量及有效性的影响外,还受胚内养分供应的影响,因而对土壤污染的敏感性不高. Henner 等<sup>[16]</sup>发现,低分子量挥发性芳香族化合物对植物种子萌发有抑制作用,而高分子量多环芳烃(3~5环)则没有毒性作用.

表3 小麦种子在 Pb-B[a]P 复合污染土壤中的萌发率<sup>1)</sup>

Table 3 Seed germinations of wheat exposed to combined pollution of Pb and B[a]P in soils

样品号	萌发率/%	样品号	萌发率/%
K1	96.7 ± 5.8 ab	K15	86.7 ± 23.1 ab
K2	86.7 ± 5.8 ab	K16	83.3 ± 20.8 ab
K3	90.0 ± 0.0 ab	K17	80.0 ± 17.3 ab
K4	93.3 ± 5.8 ab	K18	96.7 ± 5.8 ab
K5	93.3 ± 5.8 ab	K19	90.0 ± 0.0 ab
K6	83.3 ± 11.5 ab	K20	93.3 ± 5.8 ab
K7	90.0 ± 0.0 ab	K21	90.0 ± 10.0 ab
K8	93.3 ± 5.8 ab	K22	90.0 ± 10.0 ab
K9	86.7 ± 5.8 ab	K23	76.7 ± 15.3 b
K10	93.3 ± 5.8 ab	K24	76.7 ± 15.3 b
K11	76.7 ± 5.8 b	K25	93.3 ± 5.8 ab
K12	86.7 ± 5.8 ab	K26	86.7 ± 11.5 ab
K13	86.7 ± 5.8 ab	K27	100.0 ± 0.0 a
K14	83.3 ± 11.5 ab		

1) 同一列数字后的相同字母表示在  $p < 0.05$  水平上不显著 ( $n = 3$ )

## 2.2 土壤 Pb、B[a]P 复合污染对小麦种子根伸长的影响

小麦根伸长受 Pb 和 B[a]P 影响的方差分析如表 4 所示,可以看出 Pb 对小麦根伸长起主要作用, Pb-B[a]P 间交互作用也对小麦根伸长具有一定的影响,而 B[a]P 的影响则不显著. 图 1 为根伸长随 Pb 和 B[a]P 单因子变化规律,由图 1(a)、1(f)可知在 Pb 和 B[a]P 单一污染条件下,根伸长均会受到一定程度的抑制作用,其中 B[a]P 的抑制作用更为明显. 由图 1(b)~1(e)的渐变规律可以看出在相同的 B[a]P 含量条件下,根伸长随 Pb 含量的增加有逐渐变大的趋势,且 B[a]P 含量越大,这一变化趋势越明显,显示出 Pb-B[a]P 间的交互作用. 当 B[a]P 含量为 6.4 mg/kg 时,根伸长与 Pb 含量显著正相关 ( $p < 0.05$ ). 由图 1(g)~1(j)可以看出当 Pb 含量为 100~400 mg/kg 时,根伸长与 B[a]P 含量没有相关性,但是 400 mg/kg Pb 处理使根伸长整体

变大. 800 mg/kg 条件下,小麦根伸长随 B[a]P 含量增大而有变大的趋势,并达到显著水平 ( $p < 0.05$ ). 可以看出 Pb 和 B[a]P 含量较大时,小麦根深长与两者含量均呈正相关,这与两者单一作用时对根伸长的抑制作用明显不同,表明两者间发生显著的交互作用,其复合共存对根伸长的作用机制与各自单一污染时截然不同.

表4 小麦根伸长受 Pb 和 B[a]P 影响的双因子方差分析

Table 4 Two-factor analysis of variance for the root elongation of wheat exposed to Pb and B[a]P

方差来源	自由度	平均方差	F 统计量	显著水平
Pb	4	1.739	4.187	0.005
B[a]P	4	0.151	0.363	0.834
交互作用	16	0.471	1.135	0.351
误差	50	0.415		

多元回归模型是表征复合污染的联合作用,揭示污染物间交互作用的重要方法<sup>[1,17,18]</sup>. 采用多项式模型,并应用多元逐步回归技术得出小麦根伸长与 Pb、B[a]P 的回归方程如表 5 所示. 由回归方程可以看出小麦根伸长主要受到了 2 种 Pb-B[a]P 交互作用的影响,一方面 Pb 和 B[a]P 的共存对小麦根伸长具有协同刺激作用,另一方面 Pb 与 B[a]P 间发生拮抗作用削弱 B[a]P 对小麦根伸长的抑制效应. 这与由图 1 分析的结果相一致.

按照 Bliss 分类方法<sup>[1]</sup>定义各复合污染情景的联合作用类型,结果如表 6 所示. 可以看出绝大多数情况下 Pb-B[a]P 对小麦根伸长的联合作用均体现为拮抗作用,甚至出现抑制率为负值的促进生长现象.

重金属与多环芳烃间的拮抗作用在其它研究中也报道过,但研究受体多为水体中的鱼类. 如 Moreau 等<sup>[19]</sup>的急性毒性研究表明菲和锌对羊头鲮鱼的毒性具有拮抗作用, Van den Hurk<sup>[20]</sup>进行了镉与 B[a]P 复合污染对底鳞鱼的急性毒性试验,发现联合作用与污染物含量有关,或为协同或为拮抗作用. 镉的共存会减少 B[a]P 对底鳞鱼的毒性是由于镉能够直接影响细胞色素 P450 酶系统,从而减少了 B[a]P 致癌代谢产物的产生<sup>[21~23]</sup>. 与此相似,本研

表5 小麦种子生长与土壤 Pb 和 B[a]P 含量的关系

Table 5 Relationships between growth of wheat and contents of Pb and B[a]P in soils

因变量	多元逐步回归方程 <sup>1)</sup>	相关系数 <sup>2)</sup>	模型 F 检验值 <sup>2)</sup>	显著性水平 <sup>2)</sup>
根伸长	$y = 5.70 + 0.000224 \times \text{Pb} \times \text{B[a]P} - 5.41 \times \text{B[a]P}/\text{Pb}$	0.729	12.5	0.000237
芽伸长	$y = 2.98 + 0.00333 \times \text{Pb}$	0.870	71.5	1.63E-8
芽根比	$y = 0.574 + 0.000440 \times \text{Pb}$	0.882	87.7	1.17E-9

1) Pb 含量为本底含量与投加含量之和; 2)  $n = 25$

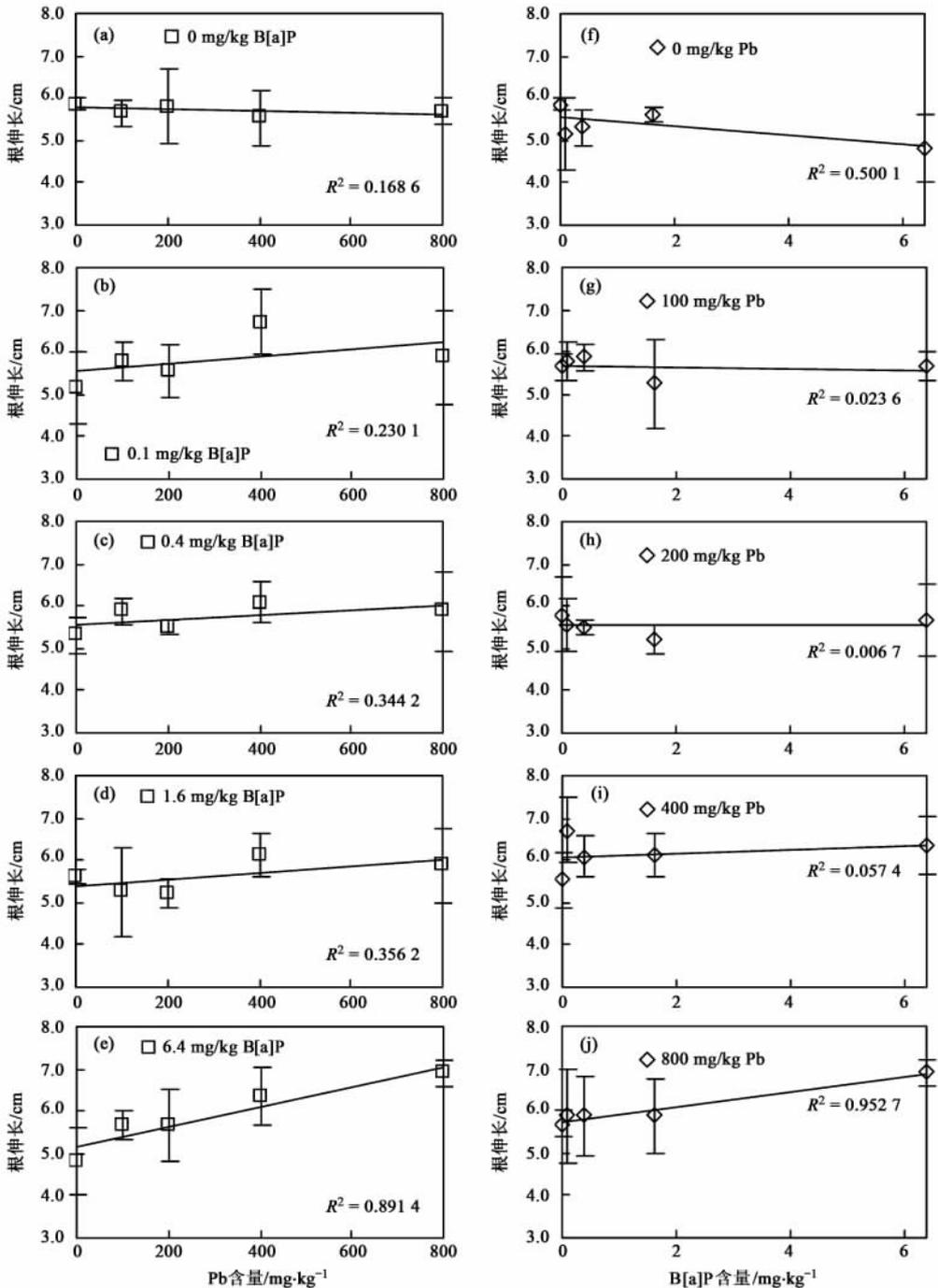


图1 小麦根伸长与Pb和B[a]P含量的关系

Fig. 1 Plots of root elongation of wheat with contents of Pb and B[a]P

究也观察到了Pb会削弱B[a]P对植物根伸长的抑制作用,其机制有待于进一步研究。

### 2.3 土壤Pb、B[a]P复合污染对小麦芽伸长的影响

由于小麦芽组织并不与土壤中的污染物直接接触,因而主要受到污染物间接作用的影响。大多数研

究都偏重根伸长的响应规律却很少报道种子芽伸长的响应规律,主要是因为芽伸长的敏感性及与污染物的相关性均弱于根伸长。但是它可作为一个辅助的生态指标来反映土壤污染的状况,而复合污染情景下其响应规律还未曾被探讨。

小麦芽伸长受Pb和B[a]P影响的方差分析如

表 6 Pb 和 B[a]P 对小麦根伸长抑制作用的联合作用

Table 6 Joint actions of Pb and B[a]P on inhibition of root elongation of wheat

Pb 含量/mg·kg <sup>-1</sup>	抑制率/%	B[a]P 含量/mg·kg <sup>-1</sup>	抑制率/%	Pb + B[a]P/mg·kg <sup>-1</sup>	抑制率/%	联合作用类型
100	3.5	0.10	11.6	100 + 0.1	1.3	拮抗
100	3.5	0.40	9.5	100 + 0.4	-0.3	拮抗
100	3.5	1.60	4.4	100 + 1.6	10.5	协同
100	3.5	6.40	17.7	100 + 6.4	3.3	拮抗
200	0.9	0.10	11.6	200 + 0.1	5.4	拮抗
200	0.9	0.40	9.5	200 + 0.4	5.7	拮抗
200	0.9	1.60	4.4	200 + 1.6	10.6	协同
200	0.9	6.40	17.7	200 + 6.4	3.3	拮抗
400	5.5	0.10	11.6	400 + 0.1	-14.7	拮抗
400	5.5	0.40	9.5	400 + 0.4	-3.7	拮抗
400	5.5	1.60	4.4	400 + 1.6	-4.7	拮抗
400	5.5	6.40	17.7	400 + 6.4	-8.2	拮抗
800	2.8	0.10	11.6	800 + 0.1	-0.3	拮抗
800	2.8	0.40	9.5	800 + 0.4	-0.4	拮抗
800	2.8	1.60	4.4	800 + 1.6	-0.3	拮抗
800	2.8	6.40	17.7	800 + 6.4	-17.7	拮抗

1) Pb 含量为本底含量与投加含量之和; 2)  $n = 25$

表 7 所示,可以看出 Pb 对小麦芽伸长有极显著影响,而 B[a]P 和 Pb-B[a]P 的交互作用对小麦芽伸长的影响不显著. 图 2 为芽伸长随 Pb 和 B[a]P 单因子变化规律,由图 2(a)、2(f)可知在低含量 Pb 污染条件下,小麦芽伸长受到抑制作用,随着 Pb 含量的增大,芽伸长开始受到刺激作用;B[a]P 单一作用时均对小麦芽伸长具有抑制作用,说明 B[a]P 的抑制作用强于 Pb. 由图 2(b)~2(e)的渐变规律可以看出在相同的 B[a]P 含量条件下,芽伸长随 Pb 含量增加的变化趋势与图 2(a)近似,而与 B[a]P 含量的关系不大. 因此 Pb 与 B[a]P 间未发生显著的交互作用. 但随着 B[a]P 含量的增大,芽伸长与 Pb 含量的相关性达到了较显著水平( $p < 0.05$ ). 由图 2(g)~2(j)可以看出在相同的 Pb 含量条件下,芽伸长随 B[a]P 含量的变化幅度较小,随着 Pb 含

表 7 小麦芽伸长受 Pb 和 B[a]P 影响的双因子方差分析

Table 7 Two-factor analysis of variance

for the shoot elongation of wheat exposed to Pb and B[a]P

方差来源	自由度	平均方差	F 统计量	显著水平
Pb	4	18.6	31.9	0.000
B[a]P	4	0.910	1.56	0.199
交互作用	16	0.627	1.08	0.401
误差	50	0.582		

量的增大,芽伸长整体上变大. 这同样也表明了 Pb-B[a]P 间的交互作用较弱,小麦芽伸长主要受到 Pb 含量的影响.

小麦芽伸长的多元逐步回归分析结果见表 9,芽伸长与铅含量间具有极显著的相关性( $p < 0.01$ ),虽然模型不能准确预测各实测结果,但逐步回归方法能够在当前范围内找出最为主要的影响因素. 即 Pb 是影响小麦芽伸长的主要因素,且 Pb 对小麦芽伸长具有刺激作用,B[a]P 和 Pb-B[a]P 间的交互作用与之相比可以忽略.

以芽伸长抑制率为考察指标,按照 Bliss 分类方法定义各复合污染情景的联合作用类型,结果如表 8 所示. 可以看出所有情景下 Pb-B[a]P 对小麦芽伸长的联合作用均体现为拮抗作用,很多情景下小麦的芽伸长不仅没有被抑制,反而受到刺激作用.

## 2.4 土壤 Pb、B[a]P 复合污染对小麦芽伸长/根伸长的影响

由 2.2、2.3 节的分析可知,小麦根伸长主要受到 Pb-B[a]P 交互作用的影响,而芽伸长则主要受到 Pb 含量的影响. 即两者对土壤 Pb-B[a]P 复合污染的响应规律不尽相同,试验中发现随着污染物含量的增大,种子芽伸长与根伸长之比有增大的趋势,据此推测小麦种子芽伸长与根伸长之比(芽根比)

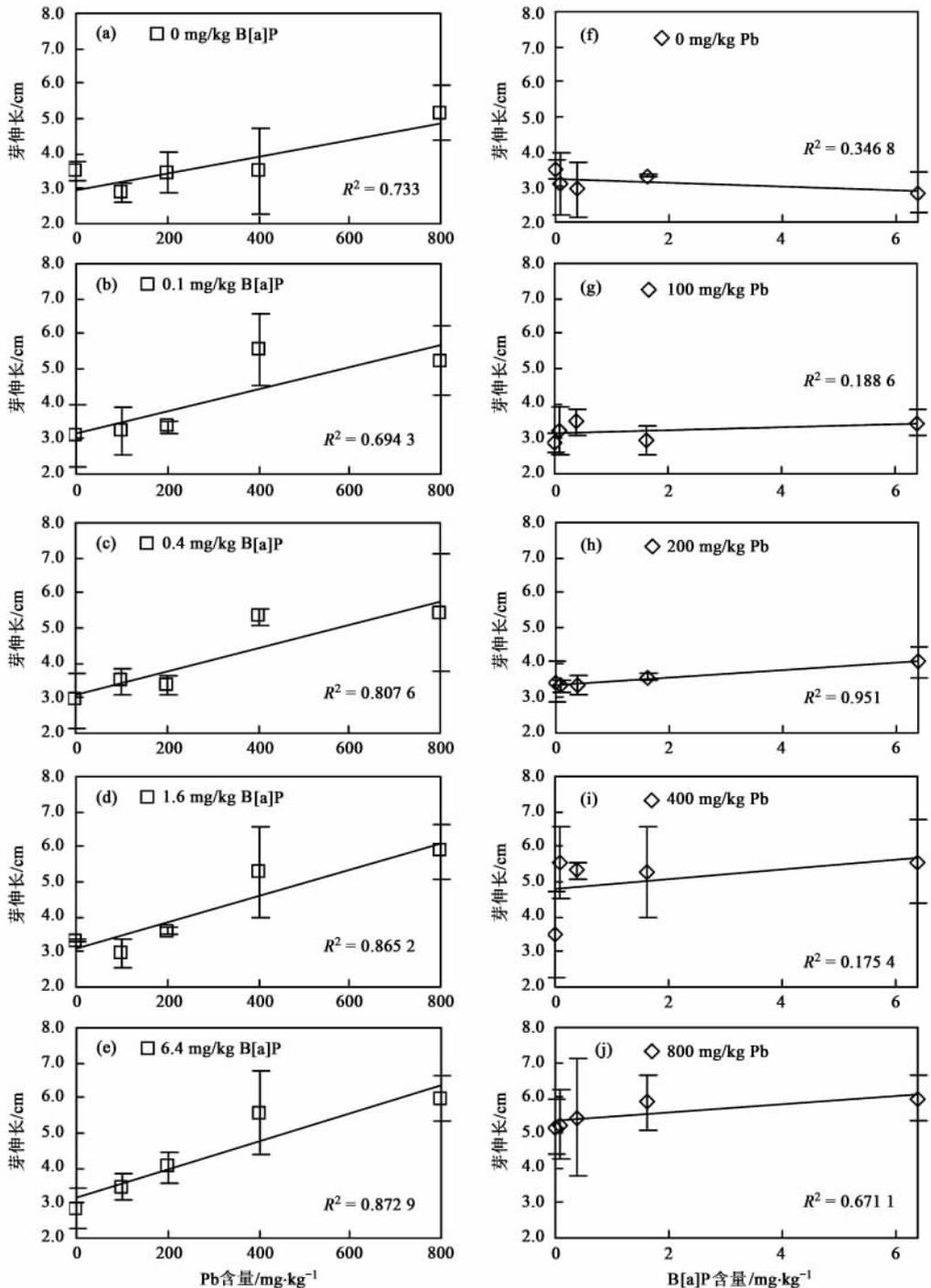


图2 小麦芽伸长与 Pb 和 B[a]P 含量的关系

Fig. 2 Plots of shoot elongation of wheat with contents of Pb and B[a]P

或许是一个敏感的生态指标。这一指标反映了种子发育的整体协调性,目前还未被引入到相关研究中。

小麦芽根比受 Pb 和 B[a]P 含量影响的双因素方差分析结果如表 9 所示,可以看出芽根比主要受到 Pb 含量的影响,与芽伸长情况类似。小麦芽根比

与 Pb 和 B[a]P 含量的关系见图 3。由图 3(a)、3(f)可知在低含量 Pb 污染条件下,芽根比小于对照,随着 Pb 含量的增大,芽根比逐渐增加且与 Pb 含量显著相关( $p < 0.05$ );B[a]P 单一作用对小麦芽根比的影响较小且没有明显相关性。由图 3(b) ~ 3(e)

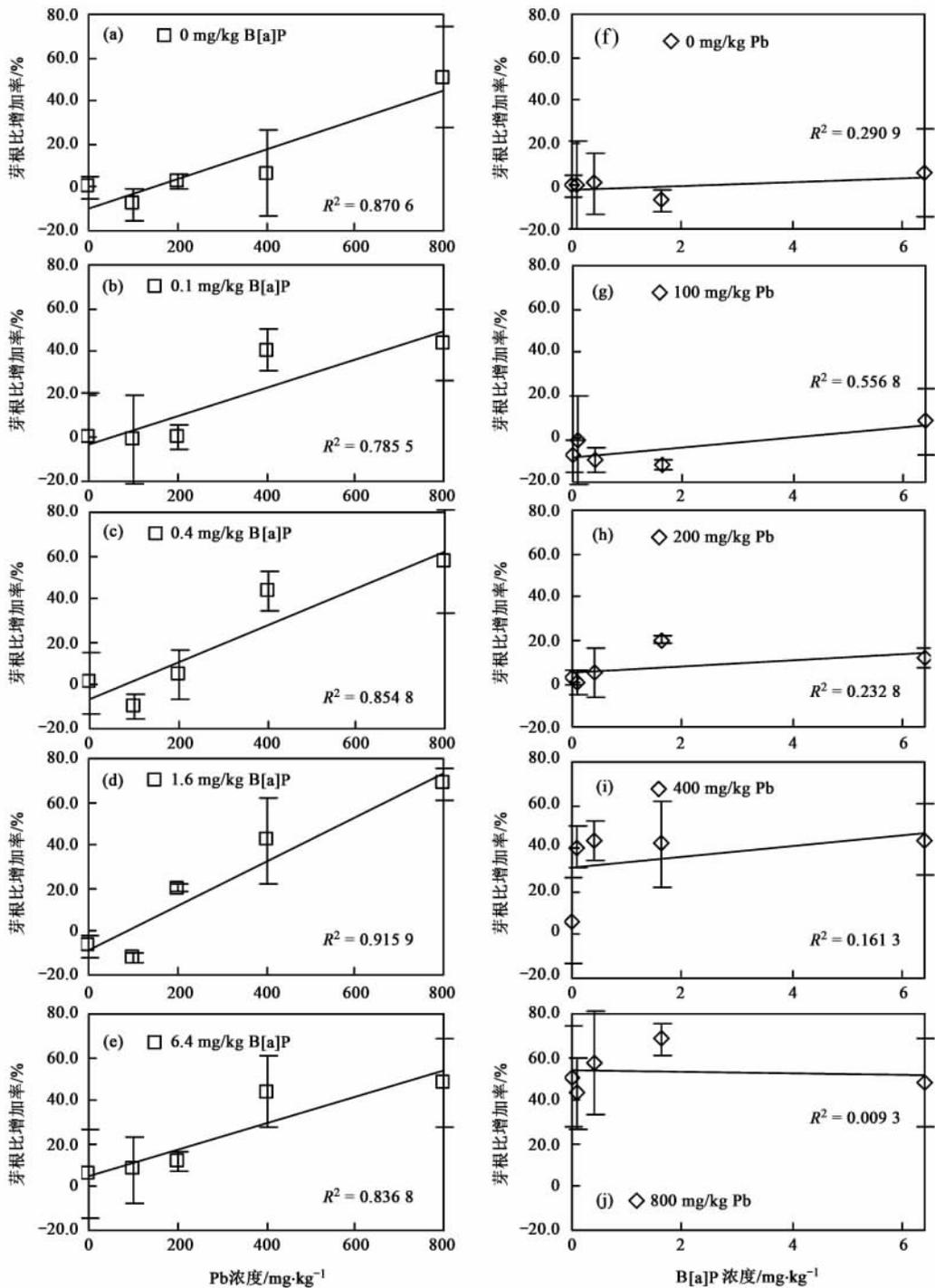


图3 小麦芽根比与 Pb 和 B[a]P 含量的关系

Fig. 3 Plots of the ratio of shoot elongation to root elongation of wheat with contents of Pb and B[a]P

的渐变规律可以看出在相同的 B[a]P 含量条件下, 芽根比随 Pb 含量增加的变化趋势与图 3(a) 近似, 而与 B[a]P 含量的关系不大. 因此 Pb 与 B[a]P 间的交互作用不显著. 无论 B[a]P 含量多少, 芽根比均与 Pb 含量达到了较显著相关 ( $p < 0.05$ ). 由图 3(g) ~ 3(j) 可以看出在相同的 Pb 含量条件下, 芽根

比随 B[a]P 含量的变化幅度较小, 且与 B[a]P 间相关性较差. 随 Pb 含量的增大, 芽根比整体抬高. 这与表 9 的分析结果相一致, 即小麦芽根比主要受到 Pb 含量的影响. 图 3 与图 2 相应图均具有一定的相似性, 但图 3(a) ~ 3(e) 中芽根比与 Pb 含量的相关性普遍好于图 2(a) ~ 2(e) 中芽伸长与 Pb 含量的相

表 8 Pb 和 B[a]P 对小麦芽伸长抑制作用的联合作用

Table 8 Joint actions of Pb and B[a]P on inhibition of shoot elongation of wheat

Pb 含量/mg·kg <sup>-1</sup>	抑制率/%	B[a]P 含量/mg·kg <sup>-1</sup>	抑制率/%	Pb + B[a]P/mg·kg <sup>-1</sup>	抑制率/%	联合作用类型
100	17.6	0.10	11.7	100 + 0.1	7.2	拮抗
100	17.6	0.40	16.1	100 + 0.4	0.8	拮抗
100	17.6	1.60	5.3	100 + 1.6	16.1	拮抗
100	17.6	6.40	19.2	100 + 6.4	1.5	拮抗
200	1.2	0.10	11.7	200 + 0.1	4.9	拮抗
200	1.2	0.40	16.1	200 + 0.4	3.5	拮抗
200	1.2	1.60	5.3	200 + 1.6	-2.6	拮抗
200	1.2	6.40	19.2	200 + 6.4	-14.5	拮抗
400	0.8	0.10	11.7	400 + 0.1	-58.1	拮抗
400	0.8	0.40	16.1	400 + 0.4	-51.6	拮抗
400	0.8	1.60	5.3	400 + 1.6	-50.5	拮抗
400	0.8	6.40	19.2	400 + 6.4	-59.1	拮抗
800	-47.3	0.10	11.7	800 + 0.1	-49.0	拮抗
800	-47.3	0.40	16.1	800 + 0.4	-55.1	拮抗
800	-47.3	1.60	5.3	800 + 1.6	-67.5	拮抗
800	-47.3	6.40	19.2	800 + 6.4	-70.4	拮抗

表 9 小麦芽根比受 Pb 和 B[a]P 影响的双因子方差分析

Table 9 Two-factor analysis of variance for the ratio of shoot elongation to root elongation of wheat exposed to Pb and B[a]P

方差来源	自由度	平均方差	F 统计量	显著水平
Pb	4	0.342	44.11	0.000
B[a]P	4	0.015	1.94	0.118
交互作用	16	0.010	1.33	0.219
误差	50	0.008		

关性. 因此, 芽根比更适合于指示土壤中 Pb 的污染程度.

小麦芽根比的多元逐步回归分析结果见表 5, 即 Pb 是影响小麦芽根比的主要因素, 且 Pb 对小麦芽根比具有刺激作用, 而 B[a]P 及 Pb-B[a]P 间的交互作用与之相比可以忽略. 以芽根比增加率为考察指标, 按照 Bliss 分类方法定义各复合污染情景的联合作用类型, 结果如表 10 所示. 可以看出 Pb 含量

表 10 Pb 和 B[a]P 对小麦芽根比刺激作用的联合作用

Table 10 Joint actions of Pb and B[a]P on stimulation of the ratio of shoot elongation to root elongation of wheat

Pb 含量/mg·kg <sup>-1</sup>	增加率/%	B[a]P 含量/mg·kg <sup>-1</sup>	增加率/%	Pb + B[a]P/mg·kg <sup>-1</sup>	增加率/%	联合作用类型
100	-7.9	0.10	0.1	100 + 0.1	-0.8	拮抗
100	-7.9	0.40	1.0	100 + 0.4	-9.6	拮抗
100	-7.9	1.60	-6.9	100 + 1.6	-12.2	拮抗
100	-7.9	6.40	5.8	100 + 6.4	7.9	协同
200	2.7	0.10	0.1	200 + 0.1	0.8	拮抗
200	2.7	0.40	1.0	200 + 0.4	4.5	协同
200	2.7	1.60	-6.9	200 + 1.6	20.1	协同
200	2.7	6.40	5.8	200 + 6.4	11.7	协同
400	6.5	0.10	0.1	400 + 0.1	40.4	协同
400	6.5	0.40	1.0	400 + 0.4	43.4	协同
400	6.5	1.60	-6.9	400 + 1.6	42.2	协同
400	6.5	6.40	5.8	400 + 6.4	43.9	协同
800	50.9	0.10	0.1	800 + 0.1	43.1	拮抗
800	50.9	0.40	1.0	800 + 0.4	57.4	协同
800	50.9	1.60	-6.9	800 + 1.6	68.2	协同
800	50.9	6.40	5.8	800 + 6.4	48.3	拮抗

为 100 mg/kg 时,联合作用以拮抗为主,当 Pb 含量在 200 ~ 400 mg/kg 时联合作用以协同作用为主。

## 2.5 Pb 投加形式对小麦种子生长的影响

在种子萌发试验中重金属多以无机铅形式投加,而在很多土壤重金属污染研究中也采用有机铅,如乙酸铅。不同 Pb 投加形式对种子生长的影响还未见报道。表 11 为部分样品中小麦种子的生长情况,其中 K25、K26、K27 含有相同的 B[a]P 和 Pb 总含量,但有机铅的比例逐渐增加。可以看出随着有机铅比例的提高,根伸长有增加的趋势并显著高于 K5,芽伸长有变小的趋势,芽根比则显著减小而与 K5、K1 没有差异。说明乙酸根的存在对种子根伸长有进一步的刺激作用,而会削弱铅对芽伸长的刺激作用,并且消除了 Pb 对芽根比的影响。这时根伸长是一个较为敏感的指标。可见,Pb 投加形式对小麦生长特征有显著的影响。有研究表明土壤中低分子量有机酸与重金属的络合作用会减少重金属对植物根的直接毒害<sup>[24,25]</sup>。在土壤 Pb 污染的模拟情景研究中有有机铅和无机铅均被学者广泛使用,以代表不同的 Pb 来源,如含 Pb 汽油中的 Pb 为四乙基铅。因而应根据研究的目的和实际情况来选择合适的 Pb 投加形式。

表 11 部分土壤样品中小麦种子的生长情况<sup>1)</sup>

Table 11 Seed growth of wheat in some soil samples

样品号	根伸长/cm	芽伸长/cm	芽根比
K1	5.9 ± 0.1 cd	3.5 ± 0.3 bc	0.60 ± 0.03 b
K5	4.8 ± 0.8 d	2.8 ± 0.6 c	0.64 ± 0.13 b
K25	6.9 ± 0.3 abc	6.0 ± 0.7 a	0.90 ± 0.12 a
K26	7.3 ± 1.1 ab	5.1 ± 1.0 a	0.69 ± 0.07 b
K27	7.7 ± 0.4 a	4.8 ± 0.2 ab	0.62 ± 0.03 b

1) 同一列数字后的相同字母表示在  $p < 0.05$  水平上不显著 ( $n = 3$ )

## 3 结论

(1) 土壤 Pb-B[a]P 单一及复合污染对小麦种子的萌发率没有明显的抑制作用。

(2) Pb 和 B[a]P 单一污染时小麦根伸长均受到一定程度的抑制作用;复合污染条件下 Pb-B[a]P 间发生明显的交互作用,一方面 Pb 和 B[a]P 对小麦根伸长具有协同刺激作用,另一方面 Pb 与 B[a]P 间发生拮抗作用削弱 B[a]P 对小麦根伸长的抑制效应。联合作用以拮抗效应为主。

(3) B[a]P 单一污染对小麦芽伸长有一定的抑制作用。复合污染下,Pb 对小麦芽伸长有极显著的刺激作用 ( $p < 0.01$ ),B[a]P 及 Pb-B[a]P 间的交互作用对芽伸长的影响较弱。联合作用的结果均表现

为拮抗效应。小麦芽根比的响应规律与芽的响应规律类似,但芽根比与 Pb 含量间存在更显著的相关性,更适合于指示土壤 Pb 污染程度。

(4) 复合污染下,Pb 以乙酸铅形式投加时,根伸长受到的刺激作用被进一步增强,芽伸长受到的刺激作用被削弱,而芽根比的刺激作用则被消除。Pb 投加形式对小麦种子生长特征有显著的影响。

致谢:感谢北京师范大学地理学与遥感科学学院杨胜天老师、刘素红老师为本研究提供的帮助。

## 参考文献:

- [1] 周启星. 复合污染生态学[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1995. 20-21.
- [2] 沈国清,陆贻通,周培. 土壤环境中重金属与多环芳烃复合污染研究进展[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2005, 23(1):102-106.
- [3] 滕应,骆永明,李振高. 土壤重金属复合污染对脲酶、磷酸酶及脱氢酶的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(2):147-152.
- [4] 宋玉芳,王磊,李昕馨,等. 植物 CytP450 和抗氧化酶对土壤菲、芘暴露的生态毒理响应[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 381-388.
- [5] 沈国清,陆贻通,洪静波,等. 菲和镉复合污染对土壤微生物的生态毒理效应[J]. 环境化学, 2005, 24(6):662-665.
- [6] 王铮敏. Bap 和 Cr(VI) 对红树植物秋茄幼苗生长及生理生态效应研究[D]. 厦门:厦门大学, 2008.
- [7] 沈国清,陆贻通,洪静波. 重金属和多环芳烃复合污染对土壤酶活性的影响及定量表征[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(4):479-482.
- [8] 邢维芹,骆永明,吴龙华,等. 铅和苯并[a]芘混合污染酸性土壤上黑麦草生长及对污染物的吸取作用[J]. 土壤学报, 2008, 45(3):485-490.
- [9] ISO 11269-1, Soil quality-Determination of the effects of pollutants on soil flora. Part 1: method for the measurement of inhibition of root growth [S].
- [10] ISO 11269-2, Soil quality-Determination of the effects of pollutants on soil flora. Part 2: Effects of chemicals on the emergence and growth of higher plants [S].
- [11] 宋玉芳,周启星,许华夏,等. 重金属对土壤中小麦种子发芽与根伸长抑制的生态毒性[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4): 459-462.
- [12] 宋玉芳,许华夏,任丽萍,等. 土壤重金属对白菜种子发芽与根伸长抑制的生态毒性效应[J]. 环境科学, 2002, 23(1): 103-107.
- [13] 陆志强. 多环芳烃对秋茄幼苗的生理生态效应及其在九龙江口红树林湿地的含量与分布[D]. 厦门:厦门大学, 2002.
- [14] 潘丽军,陈锦权. 试验设计与数理统计[M]. 南京:东南大学出版社, 2008. 63-74.
- [15] 晁雷,周启星,崔爽,等. 铅与对二氯苯复合污染对小麦和大白菜种子发芽及幼苗期生长的毒性[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8):44-49.
- [16] Henner P, Schiavon M, Druelle V, et al. Phytotoxicity of ancient

- gaswork soils. Effect of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on plant germination [J]. *Organic Geochemistry*, 1999, **30**: 963-969.
- [17] Shen G Q, Lu Y T, Hong J B. Combined effect of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons on urease activity in soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, **63**: 474-480.
- [18] Shen G Q, Lu Y T, Zhou Q X, *et al.* Interaction of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals on soil enzyme [J]. *Chemosphere*, 2005, **61**: 1175-1182.
- [19] Moreau C J, Klerks P L, Haas C N. Interaction Between Phenanthrene and Zinc in Their Toxicity to the Sheepshead Minnow (*Cyprinodon variegatus*) [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1999, **37**: 251-257.
- [20] Van den Hurk P, Faisal M, Roberts Jr M H. Interaction of cadmium and benzo [ a ] pyrene in mummichog (*Fundulus heteroclitus*); effects on acute mortality [ J ]. *Marine Environmental Research*, 1998, **46**: 525-528.
- [21] Van den Hurk P, Roberts Jr M H, Faisal M. Interaction of cadmium and benzo [ a ] pyrene in mummichog (*Fundulus heteroclitus*): biotransformation in isolated hepatocytes [ J ]. *Marine Environmental Research*, 1998, **46**: 529-532.
- [22] George S G. Cadmium effects on plaice liver xenobiotic and metal detoxification systems: dose-response [ J ]. *Aquatic Toxicology*, 1989, **15**: 303-310.
- [23] Lemaire-Gony S, Lemaire P, Pulsford A L. Effects of cadmium and benzo(a) pyrene on the immune system, gill ATPase and EROD activity of European sea bass *Dicentrarchus labrax* [J]. *Aquatic Toxicology*, 1995, **31**: 297-313.
- [24] 黄化刚, 李廷轩, 杨肖娥, 等. 植物对铅胁迫的耐性及其解毒机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(3): 696-704.
- [25] 李红玉, 宗良纲, 黄耀, 等. 不同有机酸对水稻吸收铅的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2002, **25**(3): 45-48.