

土壤萘污染对玉米苗期生长和生理的影响

孙成芬^{1,2}, 马 丽^{1,2}, 盛连喜^{1,2}, 吴东芳³

(1.东北师范大学城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024; 2.东北师范大学国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室, 吉林 长春 130024; 3.吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130024)

摘 要:以玉米幼苗为实验材料,研究了不同浓度的土壤萘污染对其生理指标和生长发育的影响。结果表明,土壤萘污染浓度小于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时对玉米地上部分的生长发育有促进作用,对根部的影响是污染初期有促进作用,但随着处理时间的增加则抑制根部的生理活动。土壤萘污染浓度为 $100 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,第 1 周时对玉米的生长发育也有促进作用,第 2 周开始抑制玉米的生长发育。当土壤萘污染浓度大于 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,污染胁迫作用对玉米幼苗生长发育的影响明显。研究证实,高浓度污染的胁迫能使幼苗体内蓄积大量的活性氧和超氧自由基,破坏了其脂膜和代谢所需的蛋白酶,导致生理指标活动发生变化和代谢系统的紊乱。各项生理指标的变化表明,玉米苗期第 2 周是对萘污染进行生理调节和适应的关键时期。

关键词:萘;土壤污染;玉米(*Zea mays* L.);生理生化指标;生长发育;过氧化氢酶(CAT)

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)03-0443-06

Soil Naphthalene Pollution Stress on Corn(*Zea mays* L.) Seedling Physiological Effect

SUN Cheng-fen^{1,2}, MA Li^{1,2}, SHENG Lian-xi^{1,2}, WU Dong-fang³

(1.College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2.State Environmental Protection Key Laboratory of Wetland Ecology and Vegetation Restoration, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 3.College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130024, China)

Abstract: The effect of soil naphthalene pollution on growth of maize seedlings was investigated in this paper. We found that the influence of soil naphthalene pollution stress on content of Chlorophyll was not obvious, but the negative influence on Chlorophyll b was stronger than on Chlorophyll a. The inhibition on photosynthetic rate by soil naphthalene pollution was much stronger than on the content of Chlorophyll. We found that both the upper and under-ground parts of maize plants were sensitive to soil naphthalene pollution. At a lower concentration ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), the pollution stimulated growth of both the above-ground plants and their roots, though this stimulating effect diminished and followed by inhibiting effect after a longer treatment. At higher concentrations ($100 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), the soil naphthalene pollution still exhibited a stimulating effect on the growth and development of the maize seedlings in first week, but became inhibitory starting from the second week. When the concentration was above $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the soil naphthalene pollution seriously restrained maize development, probably due to accumulating of a large amount of reactive oxygen and superoxide radicals. Reactive oxygen and superoxide radicals might damage the pericarp and proteases that were essential for normal metabolism. Thus, our results indicated that the second week was the key period for physiologic accommodation and adaptation of the maize seedlings to soil naphthalene pollution.

Keywords: naphthalene; soil pollution; maize(*Zea mays* L.); physiological and biochemical index; development; catalase(CAT)

多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)是美国环保局制定的 129 种优先污染物中的一类,是

指两个或两个以上芳环耦合在一起的一类化合物,普遍存在于环境中^[1]。石油开采是其产生的一大来源,该类污染物在水中溶解度很小,会强烈地分配到非水相中且易吸附于颗粒物上。因此,沉积物和土壤是多环芳烃的主要环境归宿^[2-4]。目前,多环芳烃在环境中呈不断累积的趋势。

萘是多环芳烃中常见的污染物^[5],美国环保局

收稿日期:2008-05-17

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20065021);国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB418505)

作者简介:孙成芬(1981—),女,河南省新乡市人,硕士,主要研究方向为污染生态学。

责任作者:盛连喜 E-mail:shenglx@nenu.edu.cn

(EPA)将其列为环境优先污染物,我国也将其列为优先控制污染物^[6]。萘是煤焦油中苯的可溶部分挥发组分中分子量较低的多环芳烃,工业上是经煤焦油、切取煤油、脱喹啉、蒸馏的成品,可用作制造染料、塑料、合成纤维、杀真菌剂、杀虫剂和油漆等的原料,还常用作木材防腐剂和家用防虫剂^[7]。

2005年,全球工业萘产量约121万t。我国工业萘产量占全球总产量的37.2%,这些萘最终都以不同的形式排放到环境中。土壤中多环芳烃污染的主要途径有污水灌溉、大气沉降、废物倾倒和工业漏渗。污水灌溉是我国土壤多环芳烃污染的最主要方式^[8-10]。莫斯科地区土壤多环芳烃调查表明,土壤中多环芳烃的含量为59~1350 ng·g⁻¹,其中萘和菲的含量最多^[11];2000年我国珠江三角洲表层土壤多环芳烃的含量调查表明,在污染源PAHs含量中以萘、苊、菲等2~3环化合物为主(平均占总含量的59%)^[12];段永红等对天津地区土壤的多环芳烃进行了调查,结果也是表土中PAHs含量为537~4210 ng·g⁻¹,其中萘的含量最高^[13]。

由于多环芳烃在土壤中污染严重,近年来的研究主要集中于对其污染的修复,其中微生物和植物修复的研究居多。国内外已经对PAHs的环境行为展开的大量研究中,有关PAHs的植物毒性的研究却鲜有报道^[14]。万寅婧等^[14]研究了土壤中萘对小麦发芽及幼苗的生态毒性影响,刘建武、袁蓉等研究了水葫芦、水花生、浮萍、紫萍等水生植物净化萘污水能力和萘对水生生物生理指标的影响。而有关土壤萘污染对农作物毒性和生长发育影响的研究报道更为少见^[15-16]。

本文选择在世界上分布最广的农作物——玉米(*Zea mays* L.)为试验材料,研究土壤萘污染对玉米幼苗生理指标的影响,旨在探讨萘污染浓度不同的土壤对玉米苗期生长发育的影响,以便为分析多环芳烃对玉米生态毒理效应提供依据,为多环芳烃污染地区农作物的生产和管理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试剂

氯化三苯基四氮唑(分析纯),乙酸乙酯(分析纯),次硫酸钠(分析纯),丁二酸(分析纯),浓硫酸(分析纯),丙酮(分析纯),碳酸钙粉(分析纯),过氧化氢(分析纯),钼酸铵(分析纯),淀粉(分析纯),硫代硫酸钠(分析纯),重铬酸钾(分析纯),邻菲罗啉(分析纯),FeSO₄·7H₂O(分析纯),萘(分析纯)。萘的分子量为128.2,溶解度(25℃)为31.00 mg·L⁻¹。

1.2 材料

供试土壤采自吉林省农安县小合龙镇表层土(0~20 cm),其基本理化性质为pH7.32,有机质34.1 g·kg⁻¹,总氮、总磷、总钾含量分别为12.7、2.66、1.84 g·kg⁻¹,土壤类型为黑钙土。实验所用的玉米品种为嘏单四号。

1.3 土壤萘溶液的配制

用含丙酮的水溶液溶解萘,每100 mL水中含10 mL丙酮。并将溶解的萘溶液均匀拌到风干的土壤中。依据萘污染土壤对玉米发芽期根的半抑制浓度的预试验,分别配置土壤萘溶液为0、50、100、150、200、400 mg·kg⁻¹ 5个实验组。土壤质量按风干的质量计算。

1.4 盆栽试验

将配置好的含不同浓度萘的土壤置于直径25 cm、高18 cm的花盆中,每个浓度设3个平行。挑选均匀的已发芽的玉米种子分别种植于各个花盆里,每盆按密度均匀种植15粒玉米种子。将它们放置在阳光充足的室内培养。玉米全部出苗后,每隔1周分别测定1次根系活力、叶绿素含量、过氧化氢酶活性和光合速率。测定时间的选择为全部玉米出苗后的第1周到第3周(玉米长到5片叶子),采样时间覆盖整个幼苗期。

1.5 各项生理指标的测定方法^[17-18]

根系活力的测定采用TTC法,叶绿素含量的测定采用分光光度计法,过氧化氢酶活性的测定采用滴定法,光合速率采用TPS-1便携式光合作用仪测定。光合速率、叶绿素含量和过氧化氢酶活性的测定,保证各个浓度梯度采样部位、测定的叶片和测定时间的一致。光照强度在12:00—14:00时测定,每次检测均在30 min内完成。

1.6 土壤理化性质的测定方法

pH值的测定采用电位测定法,有机质的测定采用重铬酸钾法,总磷的测定采用ICP-AES(离子体原子发射光谱法),总钾的测定采用ICP-AAS(原子吸收法),总氮的测定采用凯氏定氮法。

1.7 数据处理和分析

本文所列数据为3次重复的平均值±标准误差,实验数据采用SPSS 10.0和Sigmaplot 9.0软件进行分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤萘污染胁迫对玉米幼苗期叶绿素含量的影响

植物95%以上的干物质是由光合作用提供的,光合作用效率是植物生产力和作物产量高低的决定性因素^[19]。而叶片是光合作用的主要器官,叶片中的叶绿体是光合作用最主要的细胞器,高等植物的光合

作用反应中吸收光能的主要光合色素是叶绿素^[20]。因此叶片中叶绿素含量的高低是反映植物光合能力的一个重要指标。叶绿素的含量和组成则是影响光合作用的物质基础^[21]。

从图1可以看出,实验第1周时,各污染浓度组叶片中的叶绿素总量都高于对照组,表明土壤萘污染对玉米苗期叶绿素含量有一定促进作用,这种促进作用在第1周时以 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度组最明显。第2周时,这种促进作用仍然存在,且仍以 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的浓度组为最明显。但污染浓度大于 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的其他3个实验组,叶中的叶绿素总量均低于对照组,表现出污染的抑制作用。进入第3周后,只有土壤萘污染浓度为 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的实验组叶绿素总量低于对照组,表现出抑制作用,其他各实验组的这种作用与第2周的趋势并不相同。这一结果表明,低浓度(低于 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的土壤萘污染不会造成玉米苗期叶绿素总含量的下降,甚至能提高其含量(如低于 $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时),这种结果可能是有机污染的特征之一,而本实验所揭示的重要结果,是玉米苗期对土壤萘污染调节和适应过程的关键期主要发生在出苗后的第2周(3~4片叶)。

不同浓度萘污染对玉米苗期的叶绿素a/叶绿素b比值的影响如图2所示。很明显,实验第1周的曲线与第2、第3周的差别显著(One-way ANOVA, $P<0.05$),第2周与第3周差别不显著(One-way ANOVA, $P>0.05$);其二,对照组的比值在不同时间是变动的,但不同污染浓度的差别也是存在的;其三,叶绿素a/b比值是判断叶片功能变化的指标,许多重金属污染结果是使两者的比值变小,产生的危害是促进植物叶片的衰老^[22]。而有机污染物(萘)对叶绿素a/b比值的影响与许多重金属的作用结果并不同,浓度的增加不是使两者比

值变小而是增大。土壤萘污染后,玉米幼苗叶绿素a/b比值为何增高,其机理还需深入研究。但土壤萘浓度为 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的实验组,玉米叶片中的叶绿素a/b值明显高于其他浓度组的结果已经说明,高浓度萘污染的胁迫作用,对叶绿素b的影响大于对叶绿素a的影响,换言之,叶绿素b对萘污染的胁迫作用比叶绿素a更敏感^[23]。

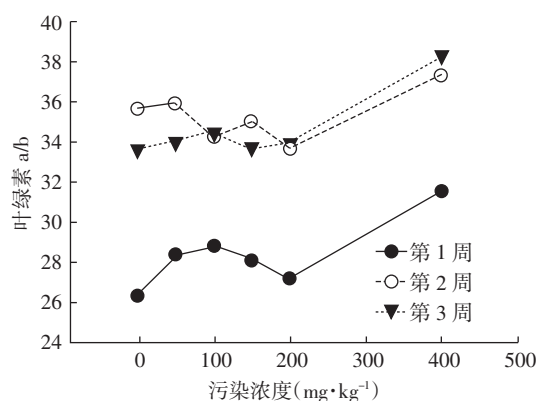


图2 不同浓度处理对玉米叶绿素a/b的影响

Figure 2 Effect of soil naphthalene pollution stress on chlorophyll a/ chlorophyll b of corn seedlings

2.2 土壤萘污染对玉米幼苗期光合速率的影响

光合速率是植物叶绿素总量和叶绿素a/b值两个功能指标的综合反映。从图3可以清楚地看出,虽然土壤萘污染浓度能增加玉米苗期叶绿素总量(高浓度除外),也能使叶绿素a/b比值增大,但从第2周开始,萘污染对光合速率的不良影响就开始显现,至第3周时,除 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 组外,其他各组的光合作用速率均明显低于对照组。这个结果与许多重金属污染的效应是一致的。在第2周,光合速率也表现出与第1和第3周的明显不同,高于 $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的各实验组

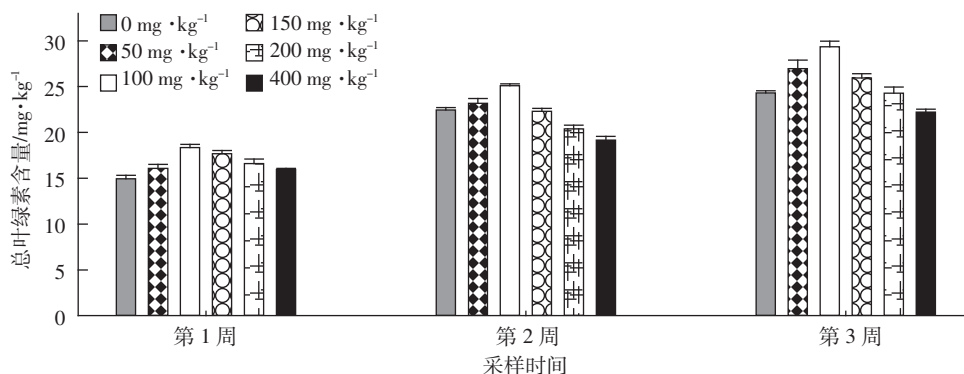


图1 不同浓度的土壤萘污染对玉米幼苗叶绿素含量的影响

Figure 1 Effect of soil naphthalene pollution stress on chlorophyll content of leave of corn seedlings

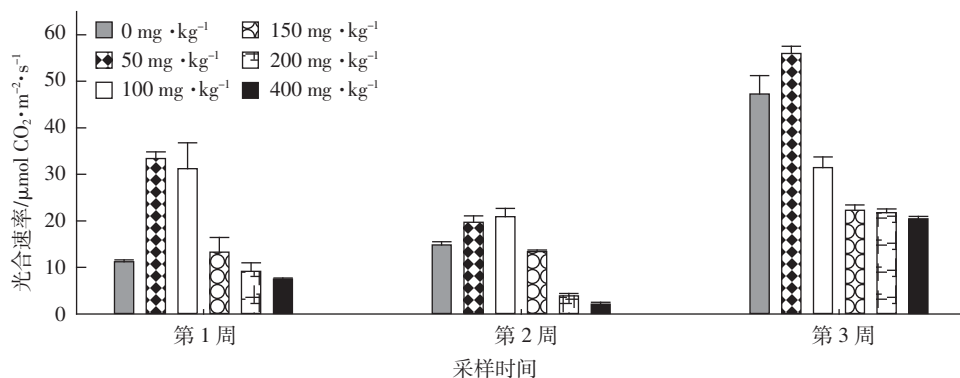


图3 不同浓度的土壤萘污染对玉米幼苗光合速率的影响

Figure 3 Effect of soil naphthalin pollution stress on photosynthesis of corn seedlings

的光合速率都是降低的。这从另一个角度再次证实,第2周是玉米苗期对萘污染进行生理调节和适应的关键期。

2.3 土壤萘污染对玉米幼苗期根系活力的影响

根系是植物生长发育的重要器官,与植物的生长和产量有密切的关系。根系活力泛指根系的吸收、合成、氧化和还原能力等,是一种客观地反映根系生命活动的生理指标^[24]。从图4可看出,根系活力对土壤萘污染的反应是敏感的。虽然试验的头两周低浓度组的根系活力较对照组增高,但高浓度组都是下降的。第3周的结果更明显,各实验组的根系活力都明显低于对照组,并随着污染浓度的增加而递减。由于根系活力在植物生长发育中起着重要作用,土壤萘污染对苗期根系活力的降低可能对玉米生长发育造成长期的影响。

2.4 土壤萘污染胁迫对玉米幼苗期CAT活性的影响

过氧化氢酶(CAT)是存在生物体内的非常重要的抗氧化防御性功能酶,可清除植物在逆境胁迫下过多的超氧阴离子自由基(O_2^-)和活性氧产生的过氧化氢(H_2O_2),因而在生物体的抗氧化防御系统中占有重

要地位^[15]。

土壤萘污染对玉米苗期CAT的胁迫作用是明显的,但是3周的实验结果差别很大(图5,表1)。实验第1周和第2周CAT的曲线变化基本相同,除 $50\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 低浓度组的CAT值高于对照组外,其他各实验组的CAT值均低于对照组,表明低浓度的土壤萘污染短时间内虽然能对玉米体内的CAT含量增加有一定的刺激作用,但玉米苗期CAT的合成路径对土壤萘污染的抑制或扰乱作用是很敏感的。图5的结果还可看出,即使没有萘污染的胁迫,玉米苗期的CAT也是变化的,对照组第3周的CAT值还不及第1和第2周的一半,除 $100\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度组略高于前两周对照组外,其他各实验组第3周的CAT值都低于第1和第2周。值得指出的是,第3周所测曲线的变化虽然也呈单峰型,但与对照组相比,除 $400\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 高浓度组外,其他各实验组的CAT值都有所增高,增加的比例从19.4%到175.9%(表1)。这个结果表明,如果说低浓度的土壤萘污染在一定时段内能刺激植物体内CAT升高,长时间的作用就可能转化为一种胁迫,而植物要维持体内正常生理活动,就需要通过提升体内

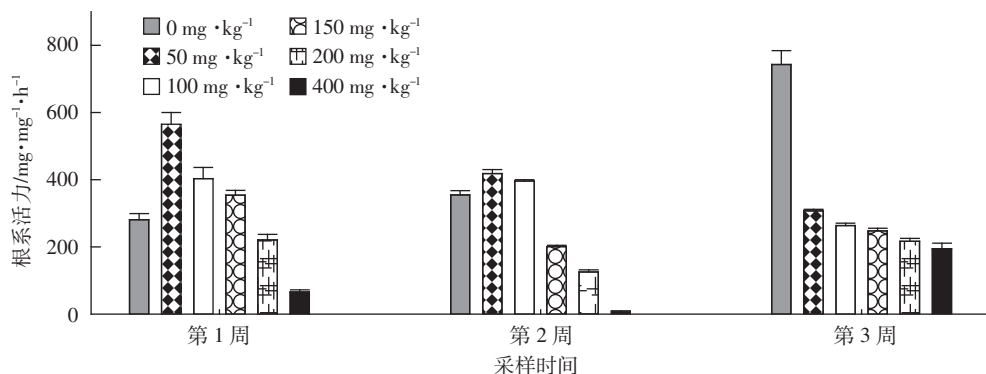


图4 不同浓度的土壤萘污染对玉米幼苗根系活力的影响

Figure 4 Effect of soil naphthalin pollution stress on root activity of corn seedlings

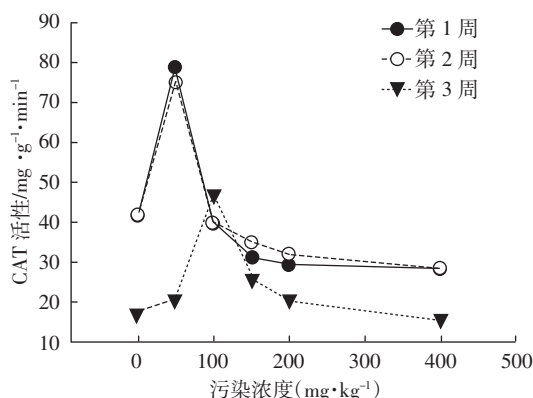


图 5 不同浓度的土壤萘污染对玉米幼苗过氧化氢酶活性的影响

Figure 5 Effect of soil naphthalin pollution stress on CAT activity of corn seedlings

表 1 不同处理浓度的过氧化氢酶活性与空白比较的增长值

Table 1 Increasing percentage of CAT activities in the treat group compared with control group

项目	第 1 周	第 2 周	第 3 周
50 mg·kg ⁻¹	87.8%	82.2%	19.8%
100 mg·kg ⁻¹	-4.8%	-4.3%	175.9%
150 mg·kg ⁻¹	-24.7%	-18.6%	51.8%
200 mg·kg ⁻¹	-30.2%	-26.7%	19.4%
400 mg·kg ⁻¹	-32.1%	-31.8%	-10%

防御系统的功能。本试验第 3 周时,多数试验组的玉米苗体内 CAT 的升高,可能就是增强对萘污染防御功能的一种适应调节的必然结果。

3 结论

土壤萘污染对玉米苗期叶片中叶绿素总量的影响趋势,在 3 周试验期间是相同的,除高浓度组(400 mg·kg⁻¹)外,其他浓度组基本都高于对照组,土壤萘污染对玉米苗期叶片中叶绿素总量的影响不大,但受萘污染胁迫后,叶绿素 a/叶绿素 b 的比值升高并存在周际之间的显著差异。萘污染胁迫对叶绿素 a 的作用大于叶绿素 b。

土壤萘污染对玉米苗期光合速率的胁迫作用要比对叶绿素总量的影响明显,而且有时段差别,光合速率最低的时间出现在第 2 周。土壤萘污染对玉米苗期光合速率的影响与对叶绿素总量的影响趋势基本相同,低浓度的土壤萘污染对其有一定的刺激效应,但其他浓度组均存在胁迫作用。

玉米苗期根系活力对土壤萘污染敏感,受土壤萘污染胁迫,生长到第 3 周后,各实验组的活力均低于

对照组。苗期根系活力的显著下降,可能对玉米后期的生长发育产生长远影响。玉米苗期对土壤萘污染胁迫在 CAT 的变化中也得到相应反映,多项生理指标的检测结果均证实,玉米苗期第 2 周是对萘污染进行生理调节和适应的关键时期。

参考文献:

- [1] Chuang J C, Van Emon J M, Chou Y L, et al. Comparison of immunoassay and gas chromatography mass spectrometry for measurement of polycyclic aromatic hydrocarbons in contaminated soil [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2003, 486:31-39.
- [2] 王晓蓉. 环境化学[M]. 南京:南京大学出版社, 2001.
WANG Xiao-rong. Environmental chemistry[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001.
- [3] 马 健, 翟永越, 王东辉, 等. 多环芳烃在松花江水环境中的富集及对生态环境的影响[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(1):91-92.
MA Jian, ZHAI Yong-yue, WANG Dong-hui, et al. Concentration of PAHs in aquatic environment in Songhua River and effect to ecological environment[J]. *Environmental Science and Management*, 2006, 31(1):91-92.
- [4] Stnias M K A, Baren-Jammali M, Mahro B. Impact of inoculation protocols, salinity, and pH on the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and survival of PAH-degrading bacteria introduced in to soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(1):359-362.
- [5] Kozlova E V, Puntus I F, Slepkin A V, et al. Naphthalene degradation by *Pseudomonas putida* strains in soil model systems with arsenite[J]. *Process Biochemistry*, 2004, 39:1305-1308.
- [6] 余 刚, 牛军峰, 黄 俊, 等. 持久性有机污染物——新的全球性环境问题[M]. 北京:科学出版社, 2005.
YU Gang, NIU Jun-feng, HUANG Jun, et al. Persistent organic pollutants——the new global environmental problem[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [7] 丛黎明, 胡家庆, 李爱师. 萘毒性的研究进展[J]. 中国预防医学杂志, 2002, 3(3):252-254.
CONG Li-ming, HU Jia-qing, LI Ai-shi. Research advance of the toxicity of naphthalene[J]. *China Preventive Medicine*, 2002, 3(3):252-254.
- [8] 杨发忠, 颜 阳, 张泽志, 等. 多环芳烃研究进展[J]. 云南化工, 2005, 32(2):44-48.
YANG Fa-zhong, YAN Yang, ZHANG Ze-zhi, et al. Research advance of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2005, 32(2):44-48.
- [9] 吉云秀, 邵秘华. 多环芳烃的污染及其生物修复[J]. 交通环保, 2003, 24(5):33-36.
JI Yun-xiu, SHAO Mi-hua. Pollution and bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Environmental Protection in Transportation*, 2003, 24(5):33-36.
- [10] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京:高等教育出版社, 1997:321-322.
DAI Shu-gui. Environmental chemistry[M]. Beijing: China Higher Education Press, 1997:321-322.

- [11] Wilcke W, Krauss M, Safronov G, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils of the moscow region—concentrations, temporal trends, and small-scale distribution[J]. *Environmental Quality*, 2005, 34: 1581–1590.
- [12] 余莉莉, 李 军, 刘国卿, 等. 珠江三角洲表层土壤中的多环芳烃[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1683–1687.
- YU Li-li, LI Jun, LIU Guo-qing, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of the Pearl River Delta, south China[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6): 1683–1687.
- [13] 段永红, 陶 澍, 王学军, 等. 天津表层土壤中多环芳烃的主要来源[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 524–527.
- DUAN Yong-hong, TAO Shu, WANG Xue-jun, et al. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the topsoil of Tianjin[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(3): 524–527.
- [14] 万寅婧, 占新华, 周立祥. 土壤中芘、菲、萘、苯对小麦的生态毒性的影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 563–566.
- WAN Yin-jing, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang. Influence of pyrene, phenanthrene, naphthalene and benzene in soil to wheat[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(5): 563–566.
- [15] 刘建武, 林逢凯, 王 郁, 等. 多环芳烃(萘)污染对水生植物生理指标的影响[J]. 华东理工大学学报, 2002, 28(1): 520–524.
- LIU Jian-wu, LIN Feng-kai, WANG Yu, et al. Effects of PAHs (naphthalene) pollution on the physiological index of hydrophyte[J]. *Journal of East China University of Science and Technology*, 2002, 28(1): 520–524.
- [16] 刘建武, 林逢凯, 王 郁. 水生植物净化萘污水能力研究[J]. 上海环境科学, 2002, 21(7): 412–415.
- LIU Jian-wu, LIN Feng-kai, WANG Yu. Study on purification ability of hydrophytes in naphthalene contaminated water[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2002, 21(7): 412–415.
- [17] 韩锦峰. 植物生理生化[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- HAN Jin-feng. Plant physiological biochemistry[M]. Beijing: China Higher Education Press, 1990.
- [18] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. (第二版), 北京: 高等教育出版社, 1990: 59–62, 88–92.
- ZHANG Zhi-liang. Plant physiological experiment(2nd)[M]. Beijing: China Higher Education Press, 1990: 59–62, 88–92.
- [19] 徐宝华. DNA 甲基化对小麦根系早期生长发育影响的研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2005: 4.
- XU Bao-hua. Studies of the effect of DNA methylation on the growth and development of the primary root in *Triticum Aestivum* L.[D]. Beijing: Capital Normal University, 2005: 4.
- [20] 李德明, 朱祝军. 镉对植物光合作用的影响[J]. 广东微量元素科学, 2005, 12(5): 61–65.
- LI De-ming, ZHU Zhu-jun. Effects of cadmium on plant photosynthesis[J]. *Trace Elements Science*, 2005, 12(5): 61–65.
- [21] 王素平, 郭世荣, 胡晓辉, 等. 盐胁迫对黄瓜幼苗叶片光合色素含量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2006, 28(1): 32–38.
- WANG Su-ping, GUO Shi-rong, HU Xiao-hui, et al. Effects of NaCl stress on the content of photosynthetic pigments in the leaves of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2006, 28(1): 32–38.
- [22] 朱宇林, 曹福亮, 汪贵斌, 等. Cd、Pb 胁迫对银杏光合特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(1): 47–50.
- ZHU Yu-lin, CAO Fu-liang, WANG Gui-bin, et al. Effects of Cd single and combined stress on chlorophyll content and photosynthetic characteristics of ginkgo[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(1): 47–50.
- [23] 仇正华. 褐飞虱与农药胁迫下水稻体内玉米素核苷含量的动态[D]. 扬州: 扬州大学, 2005: 12.
- QIU Zheng-hua. Dynamics of zeatin ribosides content in riceplant under brown planthopper and pesticides stresses[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2005: 12.
- [24] 杨志峰, 史衍玺. 芘胁迫对辣椒生理指标的影响[J]. 山东农业科学, 2006(4): 21–22.
- YANG Zhi-feng, SHI Yan-xi. Effects of pyrene stress on physiological index of hot pepper[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2006(4): 21–22.