

石油中萘对黄土种植玉米的污染生态效应研究

庄鹏宇, 李茜, 梁继东, 贺延龄

(西安交通大学环境科学与工程系, 710049, 西安)

摘要: 通过无土栽培和盆栽试验,研究了石油中萘对陕北石化区黄土种植玉米的各项生理和生长发育指标的污染生态效应,揭示了石油化学品通过生态毒理学机制对黄土典型农作物产生的危害。无土栽培试验结果表明,单位质量河沙中萘对玉米出芽率、根伸长的半抑制浓度 D_{50} 分别为 0.488、0.487 g/kg;盆栽试验结果表明,单位质量黄土中萘对玉米出芽率、根伸长、鲜重、株高、叶绿素 a 和叶绿素 b 的半抑制浓度 D_L 分别为 4.21、1.53、3.99、1.82、3.33、3.29 g/kg。各生理指标对萘污染的敏感程度由大到小依次为根伸长—株高—叶绿素 b—叶绿素 a—鲜重—出苗率。当土壤中萘、黄土质量比小于 0.25 g/kg 时,对玉米的生长发育具有一定的促进作用,而当萘、黄土质量比大于 0.25 g/kg 时,对玉米的生长具有明显的抑制作用,该抑制作用随着萘浓度的提高而增强。

关键词: 萘;玉米;无土栽培;盆栽试验;污染生态效应

中图分类号: X171.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)11-0119-06

Eco-Toxicological Effects of Typical Petroleum Pollutant Naphthalene on Corn in Loess Soil

ZHUANG Pengyu, LI Qian, LIANG Jidong, HE Yanling

(Department of Environmental Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The eco-toxicological effects of typical petroleum pollutant naphthalene on corn, a major crop on loess soil in northern Shaanxi province, were studied by a soilless cultivation experiment and a pot-planting experiment. The toxic effects on the physiological and growing characteristics of corn by different concentration of naphthalene were explored to confirm that the environmental quality of the agricultural production in this region may be adversely affected by the eco-toxicological effects of the typical petroleum pollutants. The results of the soilless cultivation experiment show that the ID_{50} (inhibitory concentration 50%) of naphthalene in sand on the corn germinating rate and the root elongation was 0.488 g/kg and 0.487 g/kg, respectively. The results of the pot-planting experiment indicate that the ID_{50} of naphthalene in loess soil on the germinating rate, the root elongation, the fresh weight, the plant height, chlorophyll a and chlorophyll b was 4.21 g/kg, 1.53 g/kg, 3.99 g/kg, 1.82 g/kg, 3.33 g/kg and 3.29 g/kg, respectively. In addition, the growth of corn was promoted when the concentration of naphthalene was lower than 0.25 g/kg but was inhibited when the concentration was higher than 0.25 g/kg, and the inhibitory effect increased with the increase in the concentration of naphthalene.

Keywords: naphthalene; corn; soilless cultivation; pot-planting experiment; eco-toxicological effect

陕北地处黄土丘陵沟壑区,其自然生态与环境
之间长期维持着生态系统的低位平衡,而石油产业

发展导致的石油类环境污染更加剧了该地区的生态
脆弱性。从以石油为支柱产业的延安为例,原油开采

中的井喷及运输中的泄漏等已造成了延河流域乃至延安地区不同程度的污染^[1]. 值得注意的是,该地区油井绝大部分分布于农田,所以影响了农产品的环境,对植物的生长发育构成了严重的负面影响,进而通过食物链影响了人类和畜牧的健康.

多环芳烃(PAHs)是最重要的一类石油污染物^[2],这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PAHs的主要环境归宿^[3]. 目前,土壤中的PAHs污染问题日益突出,2000年珠江三角洲表层土壤PAHs含量调查的结果表明,PAHs中以萘和菲等2~3个环化合物为主,平均占PAHs总量的59%;天津地区土壤中PAHs的调查结果表明,PAHs含量为537~1 504 210 ng/g^[4];陕北石化区黄土污染严重,储油罐排污口附近的土壤中石油、黄土的质量比高达63 200 mg/kg,井场内的土壤中石油、黄土的质量比可达6 260 mg/kg,农田间石油、黄土的质量比为96~1 254 mg/kg,其中PAHs是最主要的污染物,而萘在PAHs中含量最高,萘、黄土的质量比 W_L 为15~200 mg/kg^[5]. 萘作为PAHs中的典型污染物,会破坏土壤-微生物-植物生态系统的结构和功能^[6],进而导致出现植物发芽、出苗和生长发育受阻等污染生态效应.

目前,国内主要集中于对潮土、水生和黑土等作物的污染生态效应研究^[7-11]. 陕北黄土属于黄锦土,粉粒粒径为0.05~0.005 mm,较之潮土、褐土、黑土等,黄锦土的颗粒粒径小,具有更大的外表面积和较小的颗粒内扩散距离,进而导致PAHs等石油类污染物在黄土中的吸附量及迁移速率大于其他土壤^[12]. 因此,黄土中栽培的作物受到石油污染的影响将更加严重.

本文以陕北石化区为对象,通过无土栽培和盆栽试验研究了石油中萘对黄土种植的玉米的各项生理和生长发育指标的毒性效应,旨在为该地区农作物的安全生产和科学管理提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

(1)试剂与仪器. 分析纯试剂包括萘(相对分子质量为128.2)、石油醚(相对分子质量为60~90)、丙酮、乙醇、尿素等,仪器包括紫外分光光度仪、恒温光照培养箱、恒温振荡摇床、分析天平、培养皿、花盆、量筒、容量瓶等.

(2)试验植物与土壤. 植物为陕北地区广泛种植

的玉米,土壤为采自于远离工业区的西安市郊区白鹿原休耕农田的黄土(地理位置:34°15'N,108°58'E).

1.2 研究方法

1.2.1 无土栽培试验 采用河沙作为无土栽培试验基质,河沙经反复淘洗后,去除其中的杂质和土分,风干后备用. 根据预试验结果确定了5组无土栽培试验,其萘、河沙质量比 W_s 分别为0、0.05、0.25、0.50、1.0、2.5 g/kg,每组数据取3个平行样本. 将700 g淘洗和风干后的河沙均匀地铺设于直径为20 cm的培养皿中,用质量分数为1%的尿素溶液将沙子浸透,以不渗出水为宜. 每个培养皿播种6粒大小均匀的玉米种子. 将播种后的培养皿置于恒温光照培养箱中,白天光照强度为66%,光照时间为12 h,温度为27℃,晚上光照强度为0,光照时间为12 h,温度为25℃. 培养期间,定时为种子浇灌水和营养液. 试验延续5 d,试验结束后检测组玉米的出芽率和根伸长情况.

1.2.2 盆栽试验 黄土经自然风干后,过5目筛备用. 根据预试验和相关文献的研究结果,分别设置了5组盆栽试验,其 W_L 分别为0、0.25、0.5、1.0、2.5、5 g/kg,每组数据取3个平行样本. 将萘溶于易挥发的石油醚中,然后按上述试验浓度剂量将萘的石油醚溶液均匀地拌到2 kg的风干黄土中,装入直径25 cm、高18 cm的花盆中,静置3 d,使其中的石油醚彻底挥发,达到稳定状态. 每个花盆里播种8粒大小均匀的玉米种子,将播种后的花盆置于阳光充足的室外培养. 玉米全部出苗后,记录出芽率,待幼苗长出2个或3个叶片后结束试验,分析测定玉米鲜重、株高、根伸长和叶片中叶绿素的含量等生理指标.

2 结果与讨论

2.1 无土栽培试验

图1、图2所示为无土栽培试验中玉米出芽率和根伸长随萘浓度升高的污染生态效应. 从图中可见:当 W_s 由0上升至0.05 g/kg时,玉米的根伸长从3.4 cm减小到3.29 cm,仅减少了0.11 cm,同时玉米出芽率并未发生变化,说明低浓度的萘污染对植物的生长影响并不明显;当 W_s 由0.05 g/kg升高到2.5 g/kg时,玉米出芽率及根伸长均呈下降趋势,说明随着萘污染浓度的升高,玉米的生长发育受到了严重的抑制.

根据上述试验结果进行数学拟合,得出回归方程和回归系数 R^2 ,并计算沙河中萘的半抑制浓度 D_s (见表1). 从表中可见,在无土栽培试验中,萘对

玉米出芽率和根伸长的半抑制浓度 D_s 分别为 0.488、0.487 g/kg. 这是因为萘首先依附于根系,抑

制了根系细胞的呼吸和吸收作用,影响根的生长,进而影响到作物的出芽率.

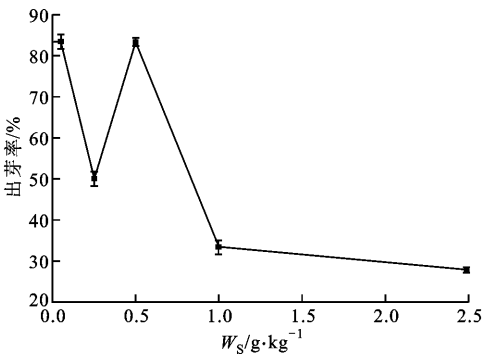


图 1 萘对无土栽培玉米出芽率的影响

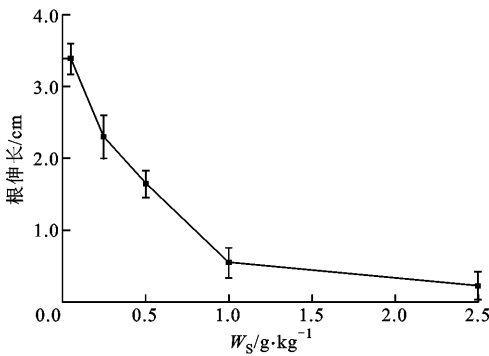


图 2 萘对无土栽培玉米根伸长的影响

表 1 无土栽培玉米出芽率和根伸长的拟合方程及半抑制浓度

玉米的生态效应	回归方程	R^2	$D_s/g \cdot kg^{-1}$
出芽率	$y=80.296\ 8-72.019\ 49x+20.500\ 35x^2$	0.909\ 18	0.488
根伸长	$y=3.384\ 09-3.984\ 22x+1.090\ 23x^2$	0.995\ 68	0.487

2.2 盆栽试验

2.2.1 黄土中萘对玉米各生长指标的影响 图 3~图 6 为盆栽试验中玉米出芽率、根伸长、株高和鲜重随萘浓度升高的污染生态效应. 从图中可见:当 $W_L=0.25$ g/kg 时,玉米的各项生理指标均高于空白对照组数据;当 $W_L>0.25$ g/kg 时,玉米的各项生理指标均小于空白对照组数据,并随 W_L 的升高呈明显下降的趋势. 其原因是,萘具有与植物生长激素相类似的环状结构和功能,从而在低浓度水平时萘表现出促进玉米生长的现象,但当 W_L 升高到一定水平,则萘表现出毒性抑制作用,这与文献[11, 13]的研究有类似的结论,从而印证了 Edward 提出的毒物兴奋效应,即低剂量污染物对作物表现出了适当的兴奋效应,高剂量污染物则表现出抑制效应^[14].

此外,空白对照组数据和 0.25 g/kg 试验组的玉米出芽时间较其他试验组提早了 2 d,虽然 0.5 g/kg 和 1.0 g/kg 这 2 组试验的出芽率未表现出被抑制现象,但出芽时间却延迟了 2 d,说明此时萘污染已经影响了玉米的正常发育周期. 文献[15]研究表明,萘可以通过种皮或将生物膜渗透到种子内部来抑制水解酶的活性,从而抑制贮藏蛋白的分解和营养物质的有效供应,进而导致种子延迟萌发.

2.2.2 黄土中萘对叶绿素的影响 95%以上的植

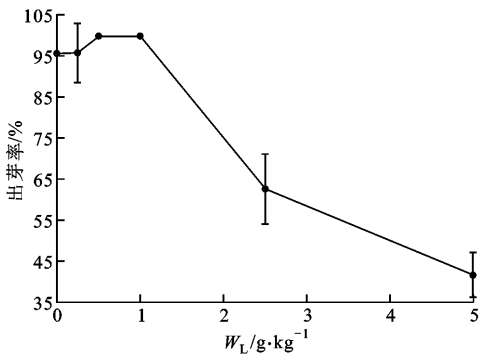


图 3 萘对黄土盆栽玉米出芽率的影响

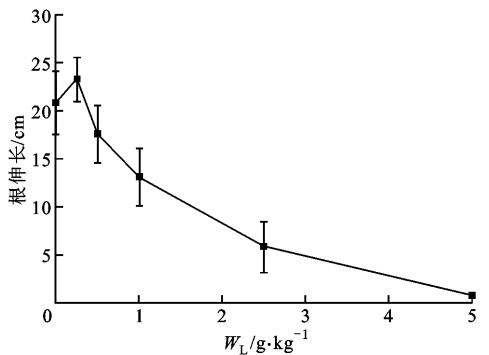


图 4 萘对黄土盆栽玉米根伸长的影响

物干物质是由光合作用提供的^[16]. 叶片是光和作用的主要器官,而吸收光能的光合色素主要是叶绿

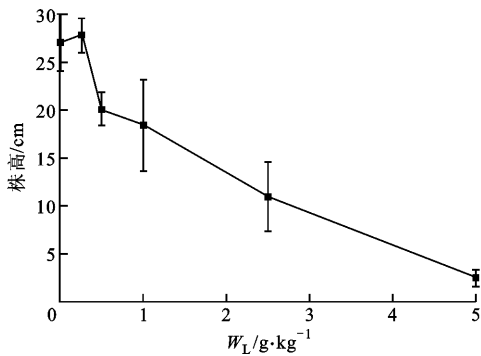


图 5 萘对黄土盆栽玉米株高的影响

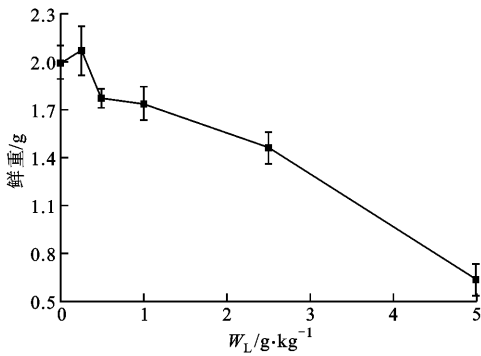


图 6 萘对黄土盆栽玉米鲜重的影响

素^[17],因此叶绿素含量(单位质量鲜叶片中所含叶绿素的质量) W_{Chlo} 和组成是反映植物光合作用能力的一个重要指标^[18].

图 7~图 9 分别为萘对叶绿素 a 含量 W_{Chlo}^a 、叶绿素 b 含量 W_{Chlo}^b 和叶绿素总量的毒性效应.从图中可见,萘对叶绿素 a 和叶绿素总量的影响趋势相近.当 $W_L=0.25 \text{ g/kg}$ 时,叶绿素 a 和叶绿素总量均高于空白对照组数据,说明此时玉米的光合作用较空白对照组的强,可以认为该浓度对应的各项生理指标均高于空白对照组的情况.这是因为:①玉米根系能够将低浓度的萘降解,使石油烃中的碳、氢、氧、氮等矿化为 CO_2 和 H_2O ,并产生能量用于玉米自身的生长;②低浓度的萘能够被玉米通过同化作用直接将部分组分变成有机组成,从而促进了生物量的增加.当 $W_L>0.25 \text{ g/kg}$ 时,叶绿素 a 和叶绿素总量均低于空白对照组数据,且随 W_L 升高呈显著降低的趋势,同时玉米的其他生理指标也呈显著下降的趋势,表现出抑制作用.这是因为:①较高浓度的萘易黏附在土壤或植物根系表面,影响土壤的通透性和植物的呼吸、蒸腾作用;②萘是高脂溶性化合物,与有机物的亲和力较大,能穿过植物细胞壁与细胞膜结合而发生毒性作用,从而抑制植物的生长.萘对

叶绿素 b 的影响与上述二者不尽相同,当 $W_L=0.25 \text{ g/kg}$ 时,叶绿素 b 的含量低于空白对照组数据,说明叶绿素 b 对萘污染的响应敏感于叶绿素 a.

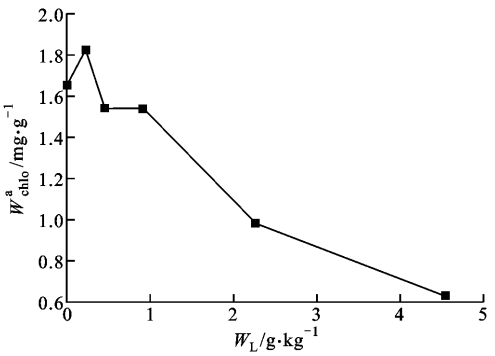


图 7 萘对玉米叶绿素 a 的影响

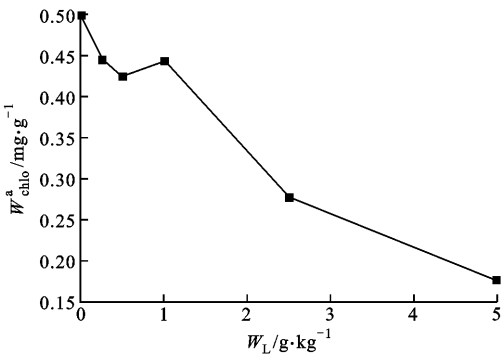


图 8 萘对玉米叶绿素 b 的影响

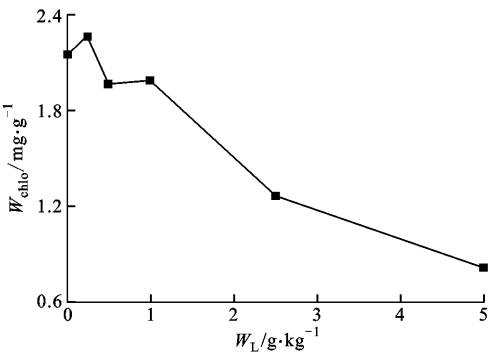


图 9 萘对玉米叶绿素总量的影响

2.2.3 半抑制浓度 根据黄土中萘污染盆栽试验数据进行数学拟合,得出回归方程和 R^2 ,并计算出黄土中萘的半抑制浓度 D_L (见表 2).玉米的出芽率、根伸长、鲜重、株高、叶绿素 a 和叶绿素 b 等的半抑制浓度分别为 4.21、1.53、3.99、1.82、3.33、29 g/kg.各生理指标对萘污染的敏感程度由大到小依次为根伸长—株高—叶绿素 b—叶绿素 a—鲜重—出芽率.

表 2 黄土中萘对各生理指标影响的拟合方程及半抑制浓度

生态效应	线性回归方程	R^2	$D_L/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
出芽率	$y=99.262\ 81-11.697\ 5x$	0.88176	4.21
根伸长	$y=24.005\ 4-10.745\ 55x+1.224\ 39x^2$	0.974\ 31	1.53
鲜重	$y=1.993\ 17-0.195\ 55x-0.014\ 64x^2$	0.970\ 57	3.99
株高	$y=27.175\ 21-8.858\ 18x+0.788\ 09x^2$	0.953\ 61	1.82
叶绿素 a	$y=1.875\ 47-0.445\ 97x+0.039\ 47x^2$	0.974\ 57	3.33
叶绿素 b	$y=0.479\ 26-0.083\ 59x+0.004\ 44x^2$	0.954\ 65	3.29
叶绿素总量	$y=2.354\ 73-0.529\ 56x+0.043\ 91x^2$	0.975\ 59	3.33

3 结 论

本文揭示了石油化学品通过生态毒理学机制对黄土典型农作物产生的危害,该研究结果对黄土区石油类污染的防治和科学管理具有理论指导意义,为陕北地区土地资源的可持续利用、生态环境安全和农副食品生产提供了理论依据。

(1)无土栽培试验结果表明,随着黄土中萘的浓度的提高,玉米的出芽率和根伸长均受到抑制,萘对玉米出芽率和根伸长的半抑制浓度 D_s 为 0.488 g/kg 和 0.487 g/kg,说明玉米出芽率对萘污染的敏感程度略低于根伸长。

(2)盆栽试验结果表明,玉米出芽率、根伸长、鲜重、株高、叶绿素 a 和叶绿素 b 等的半抑制浓度 D_L 分别为 4.21、1.53、3.99、1.82、3.3、3.29 g/kg。各生理指标对萘的敏感程度由大到小依次为根伸长—株高—叶绿素 b—叶绿素 a—鲜重—出芽率。当 $W_L < 0.25$ g/kg 时,对玉米的生长发育具有一定的促进作用,而当 $W_L > 0.25$ g/kg 时,对玉米的生长具有明显的抑制作用,该抑制作用将随着萘浓度的提高而增强。

参考文献:

[1] 任磊,黄廷林. 土壤的石油污染 [J]. 农业环境保护, 2000,19(6):360-363.
REN Lei, HUANG Tinglin. Contamination of soils by petroleum [J]. Journal of Agro-Environ Prot, 2000, 19(6):360-363.

[2] GOPALAN H N B. Ecosystem health and human well being: the mission of the international programme on plant bioassays [J]. Mutation Research,1999,426(2): 99-102.

[3] FARIBA M, SIMIN N, ALIREZA M. Phytoremediation of petroleum-polluted soils: application of polyg-

onum aviculare and its root-associated (penetrated) fungal strains for bioremediation of petroleum-polluted soils[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010,73(4):613-619.

[4] 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 Yonghong, TAO Shu, WANG Xuejun, et al. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the top of Tianjin [J]. Environ Sci, 2006,27 (3):524-527.

[5] 任磊,黄廷林. 黄土高原地区石油类非点源污染试验研究 [J]. 油气田环境保护, 2003,13(2):38-41.
REN Lei, HUANG Tinglin. An experimental study on the petroleum pollutants runoff pollution in the loess plateau of northwest China [J]. Environ Prot Oil & Gas Fields, 2003,13(2):38-41.

[6] IVICA K, SANJA M, FERDO B. The effect of drilling fluids and crude oil on some chemical characteristics of soil and crops [J]. Geoderma, 2009(149):209-216.

[7] 韩言柱,王立成,许学工,等. 黄河三角洲土壤(潮土)石油类含量对小麦的影响研究 [J]. 环境科学与技术, 2000(4):1-4.
HAN Yanzhu, WANG Licheng, XU Xuegong, et al. A study on impact to wheat of the soil (humid soil) oil content in Yellow River Delta [J]. Environ Sci & Technol, 2000(4):1-4.

[8] 万寅婧,占新华,周立祥. 土壤中芘、菲、萘、苯对小麦的生态毒性影响 [J]. 中国环境科学,2005,25(5):563-566.
WAN Yinjing, ZHAN Xinhua, ZHOU Lixiang. Influence of pyrene, phenanthrene, naphthalene and benzene in soil to wheat [J]. China Environ Sci, 2005,25 (5):563-566.

[9] 刘建武,林逢凯,王郁. 水生植物净化蔡污水能力研究 [J]. 上海环境科学, 2002,21(7):412-415.

- LIU Jianwu, LIN Fengkai, WANG Yu. Study on purification ability of hydrophytes in naphthalene contaminated water [J]. Shanghai Environ Sci, 2002,21(7): 412-415.
- [10] 李春荣, 王文科, 曹玉清. 石油污染土壤的生态效应 [J]. 农业环境科学学报, 2007,26(5):1929-1932.
- LI Chunrong, WANG Wenke, CAO Yuqing. Ecological effects of petroleum-contaminated soil [J]. J Agro-Environ Sci, 2007,26(5):1929-1932.
- [11] 佟金, 任露泉, 陈秉聪, 等. 土壤颗粒尺寸分布分维及对粘附行为的影响 [J]. 农业工程学报, 1994, 10(3):27-33.
- TONG Jin, REN Luquan, CHEN Bingcong, et al. Fractal dimensions of soil particle-size distributions and their effects on soil behaviour [J]. Trans Chinese Soc Agric Eng, 1994,10(3):27-33.
- [12] 孙成芬, 马丽, 盛连喜, 等. 土壤萘污染对玉米苗期生长和生理的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2009,28(3):443-448.
- SUN Chengfen, MA Li, SHENG Lianxi, et al. Soil naphthalene pollution stress on corn(*Zea mays* L.) seedling physiological effect [J]. J Agro-Environ Sci, 2009,28(3):443-448.
- [13] 陈志强, 郑文教, 马丽, 等. 不同浓度萘和茈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.
- CHEN Zhiqiang, ZHENG Wenjiao, MA Li, et al. Effect of naphthalene and pyrene on hypocotyl germination and growth of mangrove plant *kandelia candel* [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2005,44(4):580-583.
- [14] EDWARD J C. Paradigm lost, paradigm found: the re-emergence of hormesis as a fundamental dose response model in the toxicological sciences [J]. Environmental Pollution, 2005(138):378-411.
- [15] 马丽, 盛连喜, 何春光, 等. 萘对松前水稻生长和生理的影响及其残留 [J]. 农业环境科学学报, 2009,28(10):1997-2004.
- MA Li, SHENG Lianxi, HE Chunguang, et al. The effect of naphthalene on growth and physiology of *oryza* cv. *Matsumae* and residues of nap [J]. J Agro-Environ Sci, 2009,28(10):1997-2004.
- [16] 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.
- [17] 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 Deming, ZHU Zhujun. Effects of cadmium on plant photosynthesis [J]. Elem Sci, 2005,12(5):61-65.
- [18] 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: 自然科学版, 2006,28(1):32-38.
- WANG Suping, GUO Shirong, HU Xiaohui, et al. Effects of NaCl stress on the content of photosynthetic pigments in the leaves of cucumber seedlings [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis: Natural Sciences Edition, 2006,28(1):32-38.

[本刊相关文献链接]

- 西安市大气 PM₁₀ 中水溶性有机碳的季节变化及来源分析. 西安交通大学学报, 2010,44(9):128-132.
- 西安冬季可吸入颗粒物中多环芳烃的组成及风险评价. 西安交通大学学报, 2009,43(11):114-120.
- 西安冬季大气亚微米颗粒物的化学特征及来源解析. 西安交通大学学报, 2008,42(11):1418-1423.

(编辑 苗凌)

[文摘预登]

具有运动边界的不可压缩黏性流动有限元解法

孙旭, 张家忠

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

基于特征分裂(CBS)算法,提出了一种适用于具有运动边界的不可压缩粘性流动问题的有限元解法. 为不可压缩粘性流动问题建立了控制方程,并推导了方程的无量纲形式,结合传统 CBS 算法和动网格技术,在欧拉坐标系下建立了动边界流动的求解流程,采用基于弹簧近似的动网格方法对静水和均匀来流中的简谐振动圆柱绕流问题进行了求解. 计算所得圆柱受力、圆柱表面压力和涡量分布以及流场速度分布等结果均与已有数值或实验结果相吻合,初步验证了所提方法的可行性.