

平邑甜茶根毛细胞离子流动性对 PAHs 胁迫的响应

徐 金,黄翠香,刘 青,毛云飞,倪 伟,于文章,沈 向* (山东农业大学园艺科学与工程学院,作物生物学国家重点实验室,山东 泰安 271018)

摘要: 以苹果砧木-平邑甜茶(*Malus hupehensis* Rehd)幼苗为实验材料,采用营养液栽培,利用非损伤微测技术,研究多环芳烃(PAHs)中荧蒹和苯并(b)荧蒹胁迫处理对平邑甜茶幼苗根毛细胞 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 H^{+} 流速的影响。结果表明:(1)经荧蒹及苯并(b)荧蒹胁迫处理后,平邑甜茶幼苗根毛细胞 Ca^{2+} 平均流速由对照的 $(-63.53\pm 9.30)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 分别增加到 $(+62.85\pm 10.00)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 、 $(91.33\pm 19.72)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$; K^{+} 流速平均值由基础流速 $(-60.56\pm 14.56)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 分别增至 $(+32.60\pm 5.44)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 、 $(+36.76\pm 5.23)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$; H^{+} 平均流速由对照的 $(+44.38\pm 5.19)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 分别降低至 $(-0.72\pm 0.055)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 、 $(-6.34\pm 0.79)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 。经荧蒹及苯并(b)荧蒹处理,根毛细胞表面 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 H^{+} 流动性发生明显逆转。 Ca^{2+} 、 K^{+} 表现为外排趋势,且外排量逐渐降低,最终趋于稳定; H^{+} 表现较稳定的内吸趋势。(2)苯并(b)荧蒹胁迫对平邑甜茶幼苗根毛细胞离子流动性造成的毒性效应高于荧蒹。说明 PAHs 胁迫会破坏植物根毛细胞离子流动性,影响植物正常生长,为深入研究植物受 PAHs 胁迫所产生的响应提供理论依据。

关键词: 平邑甜茶; 荧蒹; 苯并(b)荧蒹; 胁迫; 离子流动性

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2016)10-3107-05

The ion mobility in root hair cells of *Malus hupehensis* in response to stress from PAHs. XU Jin, HUANG Cui-xiang, LIU Qing, MAO Yun-fei, NI Wei, YU Wen-zhang, SHEN Xiang (College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, State Key Laboratory for Crop Biology, Taian 271018, China). *China Environmental Science*, 2016,36(10): 3107~3111

Abstract: Apple stock-Pingyitiancha (*Malus hupehensis* Rehd) was selected as experimental materials, hydroponic experiments were conducted with or without fluoranthene and benzo (b) fluoranthene. Non-invasive Micro-test Technique was used to detect the effects of Ca^{2+} , K^{+} , H^{+} fluxes in response to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) treatments. Our results showed that: (1) fluoranthene and benzo (b) fluoranthene treatments resulted in the liquidity of Ca^{2+} increased from $(-63.53\pm 9.30)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ to $(+62.85\pm 10.00)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 、 $(91.33\pm 19.72)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$; the liquidity of K^{+} increased from $(-60.56\pm 14.56)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ to $(+32.60\pm 5.44)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 、 $(+36.76\pm 5.23)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$; the liquidity of H^{+} reduced from $(+44.38\pm 5.19)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ to $(-0.72\pm 0.055)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 、 $(-6.34\pm 0.79)\text{pmol}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$. fluoranthene and benzo (b) fluoranthene treatments resulted in the liquidity of Ca^{2+} , K^{+} , H^{+} in root epidermis obvious reversal. A dramatic Ca^{2+} , K^{+} efflux was observed in root epidermis under stress, and gradually reduced to a stable level. Meanwhile, H^{+} showed influx and did not affect the PAHs treatments. (2) Benzo[b]fluoranthene Stress showed more toxic effects on ion mobility in root hair cells than that of fluoranthene. The results indicated that PAHs stress could damage the ion mobility of root hair cells, interfere plants growth and development, providing a theoretical basis for further study on the response of plants to PAHs stress.

Key words: *Malus hupehensis* Rehd; fluoranthene; benzo[b]fluoranthene; stress; the ion mobility

多环芳烃(PAHs)是指2个或2个以上芳香环稠合成的有机污染物,在环境中普遍存在,具有致癌、致畸、致突变效应^[1-3]。随着苯环数的增大,其水溶性越差,降解速度越低^[4]。目前 PAHs 引起的环境问题已得到各国的广泛关注,而土壤成为 PAHs 的重要归宿,有研究表明滞留在土壤耕作

层中的 PAHs 约达 90%^[5-6]。PAHs 进入土壤后可

收稿日期: 2016-02-29

基金项目: 山东省果品创新团队(SDAIT-06-07);支撑计划专项(2014BAD16B02);现代农业产业技术体系专项(CARS-28);公益性行业科技专项(201303093)

* 责任作者, 教授, guanshanghaitang@126.com

通过挥发、迁移以及食物链等途径在生态系统中富集,影响植物生长,威胁人体健康及食品安全,也给其他生物造成严重危害^[7-8]。现在 PAHs 种类已达 100 种以上,我国也将 7 种 PAHs 列入优先控制污染物黑名单中^[9]。近年来,我国经济持续发展,却忽视了对环境的保护,能源的高需求低利用导致 PAHs 排放量不断增加,环境污染问题日益严重^[10],所以广泛开展我国生态环境中 PAHs 的研究具有重要意义。

荧蒹(Fla)和苯并(b)荧蒹(Bbf)是我国 7 种优控 PAHs 的代表性化合物,荧蒹具有潜在的致癌性、弱致突变性及免疫毒性,会破坏生物体正常防御体系^[11-12],且能长时间残留在土壤中,并通过食物链给生态环境带来风险^[13];苯并(b)荧蒹分子量较大,其光解、水解、生物降解很微弱,相对致癌性强,是检验食品中 PAHs 的标记^[14]。这 2 种物质在土壤中含量较多,但目前有关这 2 种化合物对植物的毒性效应尚未见报道。植物离子流的变化是反应逆境胁迫后最初快速信号,通过离子流可以快速诊断和预测细胞的关键发生过程,随着非损伤微测技术(扫描离子选择性微电极技术)的出现,离子跨膜流动的研究得到迅速发展^[15-17]。本研究采用无融合生殖、抗性强的苹果砧木-平邑甜茶幼苗为实验材料,利用非损伤微测技术,检测荧蒹和苯并(b)荧蒹胁迫处理对其幼苗根毛细胞 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 H^{+} 流速的影响,揭示 PAHs 对植物的毒性效应,为深入研究植物受 PAHs 胁迫所产生的响应提供理论依据,为 PAHs 的生态风险评估积累基础研究数据。

1 材料与方法

1.1 主要试剂

标准样品:荧蒹(25mg,98.5%,上海安谱科学仪器有限公司),苯并(b)荧蒹(10mg,99.0%,上海安谱科学仪器有限公司)荧蒹和苯并(b)荧蒹溶液配制:用甲醇溶解荧蒹、苯并(b)荧蒹,将荧蒹及苯并(b)荧蒹的甲醇储备液加入适量的 Hoagland 半强度培养液中,振荡均匀,定容在 2L 的容量瓶中(控制甲醇浓度<1%),制得浓度为 0.2mg/L 的荧蒹培养液和 5 $\mu\text{g/L}$ 的苯并(b)荧蒹培养液,在低温

条件下避光保存备用^[18-21]。

1.2 材料处理

选取苹果砧木-平邑甜茶(*Malus hupehensis Rehd*)幼苗为供试材料,于 2014 年 10 月在山东农业大学园艺学院果树根系实验室进行水培试验。

为保证试验准确性,所用平邑甜茶幼苗生长状况应一致且普遍长出 5~7 片真叶,对其进行水培,水培期间加入适量 Hoagland 半强度营养液。启动通气设备,为植物生长提供良好环境。每 7d 换一次营养液,每盆加营养液 2L。一个月后待幼苗适应水环境后,株高 10cm、长出 4 对叶片有大量白色吸收根长出时,采用非损伤微测技术检测荧蒹及苯并(b)荧蒹胁迫下平邑甜茶幼苗根毛 K^{+} 、 Ca^{2+} 、 H^{+} 流动性。非损伤微测试验于 2015 年 5 月在旭月(北京)科技有限公司进行。

1.3 试验方法

测定方法:取平邑甜茶幼苗白色新生根尖 1cm 左右于培养皿,分别加入含 0.2mg/L 荧蒹和 5 $\mu\text{g/L}$ 苯并(b)荧蒹培养液处理 15min,然后将幼苗根部放入测试液(Ca^{2+} 、 K^{+} 、 H^{+} 所用测试液相同)清洗根部,放根部于测试液中固定,对根尖部分生区周围 500 μm 进行测定,检测净 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 H^{+} 离子流,每个测试点测 2min,大约 10min 流速稳定后,结束测试,重复 5 次。

利用非损伤微测技术,测定平邑甜茶根毛细胞表面 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 H^{+} 离子流变化。测试液配方:0.1mmol/LKCl,0.1mmol/LCaCl₂,0.1mmol/LMgCl₂,0.5mmol/LNaCl,0.2mmol/LNa₂SO₄,0.3mmol/LMES,pH 6.0。测定前微电极前端灌充有 15~25 μm 的选择性液态离子交换剂(LIX)液柱,LIX 分别为 Ca^{2+} (Sigma #21048)、 H^{+} (Sigma #95293)、 K^{+} (Sigma #60031),其后灌充 10mm 左右的电解质。电解质为 H^{+} (15mmol/LNaCl+40mmol/LKH₂PO₄, pH 7.0), Ca^{2+} (100mmol/L CaCl₂), K^{+} (100mmol/L KCl)。将电极固定器(EHB-1; World Precision Instruments)上的 Ag/AgCl 丝从电极后面插入,使其与电解质接触^[22]。参比电极(DRIF-2; World Precision Instruments)为固体电极。选用校正中能斯特斜率>56mV/decade H^{+} 微电极使用,校正液为 pH5.5 和 pH6.5 的缓冲

液^[23].

1.4 数据分析

离子流数据通过旭月公司提供的 MageFlux 软件计算得出.采用 EXCEL 对所得数据进行统计分析,利用 DPS v7.05 软件作不同处理之间差异显著性差异分析.

2 结果

2.1 荧蒽和苯并(b)荧蒽对平邑甜茶根毛细胞 Ca^{2+} 流动性影响

图 1 为荧蒽,苯并(b)荧蒽胁迫处理后,10min 内平邑甜茶根毛细胞表面 Ca^{2+} 流速变化.正值代表离子外排,负值代表离子吸收.从图 1 可看出,根毛细胞在正常环境条件下有基础性 Ca^{2+} 吸收,进行荧蒽和苯并(b)荧蒽胁迫后, Ca^{2+} 流动性发生逆转,表现为外排趋势,外排量随处理时间的延长逐渐降低,最终呈稳定趋势.此时经荧蒽及苯并(b)荧蒽胁迫后的平邑甜茶幼苗根毛细胞 Ca^{2+} 流速分别为 $(+38.08 \pm 8.33) \text{ pmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 和 $(+52.27 \pm 9.21) \text{ pmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$.

10min 内平邑甜茶幼苗根毛细胞 Ca^{2+} 流速平均值为 $(-63.53 \pm 9.30) \text{ pmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,经荧蒽和苯并(b)荧蒽胁迫处理后,分别增加到 $(+62.85 \pm 10.00) \text{ pmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 和 $(91.33 \pm 19.72) \text{ pmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,与对照差异显著($P < 0.01$).分析 2 种处理可以看出,苯并(b)荧蒽胁迫对平邑甜茶 Ca^{2+} 流动性的毒性效应高于荧蒽.

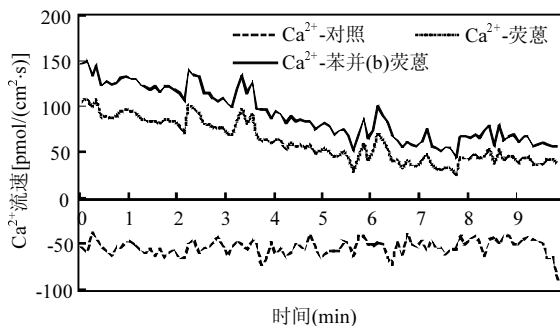


图 1 荧蒽,苯并(b)荧蒽处理根毛细胞表面 Ca^{2+} 流速变化
Fig.1 Change of the cell surface Ca^{2+} flow rate of root hair cells treated with fluoranthene and Benzo[b]fluoranthene

2.2 荧蒽和苯并(b)荧蒽对平邑甜茶根毛细胞 K^{+} 流动性影响

从图 2 可以看出,根毛细胞在正常环境中基础性的 K^{+} 吸收,受荧蒽和苯并(b)荧蒽胁迫后,平邑甜茶幼苗根毛细胞 K^{+} 流动性也发生逆转,表现为外排趋势,起初流速迅速降低,后趋于稳定.最终流速达到 $(+23.55 \pm 6.74) \text{ pmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 和 $(+32.15 \pm 5.31) \text{ pmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$.

平邑甜茶幼苗根毛细胞在受荧蒽和苯并(b)荧蒽胁迫后, K^{+} 流速平均值由基础流速 $(-60.56 \pm 14.56) \text{ pmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 分别增至 $(+32.60 \pm 5.44) \text{ pmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 和 $(+36.76 \pm 5.23) \text{ pmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,与对照差异极显著($P < 0.01$).分析可以看出,2 种胁迫处理对平邑甜茶幼苗 K^{+} 流动性毒性效应同样是苯并(b)荧蒽高于荧蒽.

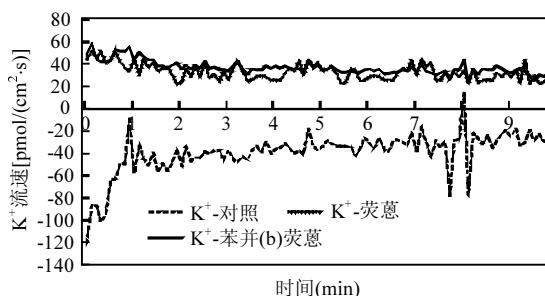


图 2 荧蒽,苯并(b)荧蒽处理根毛细胞表面 K^{+} 流速变化
Fig.2 Change of the cell surface K^{+} flow rate of root hair cells treated with fluoranthene and Benzo[b]fluoranthene

2.3 荧蒽和苯并(b)荧蒽对平邑甜茶根毛细胞表面 H^{+} 流动性影响

从图 3 可以看出,根毛细胞表面 H^{+} 在正常环境中表现为外排趋势,受荧蒽及苯并(b)荧蒽胁迫后, H^{+} 流动性发生逆转,表现为比较稳定的内吸趋势.

测得平邑甜茶幼苗根毛细胞表面 H^{+} 基础流速平均为 $(+44.38 \pm 5.19) \text{ pmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,经荧蒽和苯并(b)荧蒽处理后,分别降低至 $(-0.72 \pm 0.055) \text{ pmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, $(-6.34 \pm 0.79) \text{ pmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,与对照差异极显著($P < 0.01$).分析可以看出,苯并(b)荧蒽胁迫处理对平邑甜茶幼苗 H^{+} 流动性造成的影响高于荧蒽.

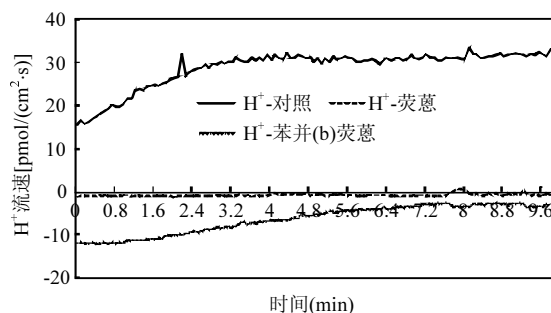


图3 荧蒽,苯并(b)荧蒽处理根部细胞表面 H^+ 流速变化
Fig.3 Change of the cell surface H^+ flow rate of root hair cells treated with fluoranthene and Benzo[b]fluoranthene

3 讨论

PAHs 对植物的影响越来越引起人们的关注.Maria Isabel Cerezo 等研究发现 PAHs 减少了原绿球藻的 DNA 合成,延缓其细胞分裂,导致原绿球藻生长量降低^[24].洪有等为^[25]对秋茄幼苗进行胁迫处理,发现随菲浓度加大,根细胞受伤害程度增加,根系活力下降,叶绿素 a、b 含量也呈下降趋势.丁克强等^[26]研究认为苯并(a)芘污染土壤会抑制小麦种子发芽以及根的伸长,对于不同植物,污染物的毒性效应也有区别.本试验选取 PAHs 中荧蒽及苯并(b)荧蒽这 2 种物质对苹果砧木-平邑甜茶幼苗进行胁迫处理,发现受胁迫后的平邑甜茶幼苗根毛细胞表面 Ca^{2+} 、 K^+ 、 H^+ 流动性相比正常环境中发生明显逆转, Ca^{2+} 、 K^+ 表现为外排趋势, H^+ 表现较稳定的内吸趋势.说明 PAHs 的存在严重干扰植物的正常生长,破坏了植物对矿质元素的吸收.

平邑甜茶幼苗在受到 PAHs 胁迫后,根毛细胞表面 Ca^{2+} 外排.导致这种结果的原因可能是根毛细胞受外来 PAHs 刺激后,胞质 Ca^{2+} 浓度出现短暂上升,从而激起细胞应答,做出相应调节反应. Ca^{2+} 泵和 Ca^{2+}/H^+ 反向转运体存在于细胞内,当细胞受到刺激后,跨膜释放胞质 Ca^{2+} 到胞外及胞内“钙库”,以维持 Ca^{2+} 浓度稳态^[27-28]. Ca^{2+} 是维持植物细胞正常生理功能的重要离子,参与大多数细胞生理代谢过程,在稳定植物细胞壁、细胞膜,调控细胞内外离子浓度平衡、诱导细胞抗逆基因表达中起重要作用^[29-31].平邑甜茶受到荧蒽和苯并(b)荧蒽胁迫后,体内 Ca^{2+} 会大量外排,细

胞内离子稳态失衡,细胞膜结构的完整性、功能稳定性被破坏,不利于钙的储藏及吸收,影响平邑甜茶的正常生长发育.

受外源 PAHs 胁迫,平邑甜茶幼苗根毛细胞 K^+ 流动性发生逆转,表现为外排趋势.与顾闽峰等通过对结球甘蓝幼苗根进行盐胁迫,导致 K^+ 含量下降结果相似^[32].导致这种结果可能是由于 PAHs 对根毛细胞膜造成损伤,致使根毛丧失选择性吸收离子的功能.细胞内离子稳态失衡,导致 K^+ 外流^[33-35].此外,根毛细胞受 PAHs 胁迫会导致更多活性氧的产生,从而发生氧化胁迫,细胞膜通透性改变,内部电解质外渗, K^+ 外排,引起细胞死亡^[36].此外,根毛细胞膜电势的去极化也会造成 K^+ 外排^[37]. K^+ 是植物生长发育中必需的大量元素,对调节细胞渗透压,维持细胞电荷平衡、酶活性调节、蛋白质合成、细胞生长、气孔开闭、细胞极性以及叶片运动都有着重要意义^[38]. K^+ 外流,植物生长所需的营养元素得不到补充,营养失调,生长受到抑制,甚至死亡.

待测幼苗根部 H^+ 受 PAHs 胁迫后,表现为内吸趋势.原因可能是 Ca^{2+} -ATPase、 Ca^{2+}/H^+ 反向转运体受荧蒽和苯并(b)荧蒽胁迫后被活化,同时 H^+ -ATPase 水解 ATP 产生能量,将 H^+ 从细胞质中泵出,产生跨质膜 H^+ 电化学势梯度,驱动质膜 Ca^{2+}/H^+ 反向转运蛋白进行离子转运: H^+ 顺着电化学势梯度进入细胞, Ca^{2+} 逆着电化学势梯度排出细胞.同时平邑甜茶幼苗根毛细胞由于受 PAHs 胁迫导致膜电势去极化,外向 K^+ 通道被激活,介导 K^+ 向细胞膜外流动,促进 K^+ 的释放,由此产生细胞内外电化学势梯度,在 H^+/K^+ 反向转运体作用下,胞外 H^+ 进入细胞, K^+ 排出细胞^[39]. H^+ 参与光合作用等植物生理活动,PAHs 胁迫导致细胞内 H^+ 稳态失衡,对平邑甜茶光合作用等一系列生理活动造成不利影响,影响其正常生长.

荧蒽及苯并(b)荧蒽这两种物质对根系细胞膜结构的完整性、稳定性的破坏,及其吸收转运等毒性机理有待于进一步研究.

4 结论

4.1 受荧蒽及苯并(b)荧蒽胁迫,根毛细胞表面

Ca^{2+} 、 K^{+} 、 H^{+} 流动性发生明显逆转, Ca^{2+} 、 K^{+} 表现为外排趋势,且外排量逐渐降低,最终趋于稳定; H^{+} 表现较稳定的内吸趋势。

4.2 苯并(b)荧蒹胁迫对平邑甜茶幼苗根毛细胞表面 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 H^{+} 流动性造成的毒害效应高于荧蒹。

参考文献:

- [1] 杜芳芳,杨毅,刘敏,等.上海市表层土壤中多环芳烃的分布特征与源解析[J]. 中国环境科学, 2014,34(4):989-995.
- [2] 张明,唐访良,吴志旭,等.千岛湖表层沉积物中多环芳烃污染特征及生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2014,34(1):253-258.
- [3] 于紫玲,林钦,孙国霞,等.海南岛沿海牡蛎体中 PAHs 的时空分布及其健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2015,35(5):1570-1578.
- [4] 戚霁,邓慧萍,刘浩.应用铈-活性炭催化剂的臭氧催化氧化工艺处理水中的芘和荧蒹[J]. 吉林大学学报, 2013,51(6):1200-1206.
- [5] 卢晓霞,张妹,陈超琪,等.天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险[J]. 环境科学, 2012, 33(10):3426-3433.
- [6] 章迪,曹善平,孙建林,等.深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究[J]. 环境科学, 2014,35(2):711-718.
- [7] 史兵方,吴启琳,欧阳辉祥,等.百色市工业区表层土壤中多环芳烃污染特征及来源分析[J]. 中国环境科学, 2014,34(10):2593-2601.
- [8] 刘魏魏,尹睿,林先贵,等.多环芳烃污染土壤的植物-微生物联合修复初探[J]. 土壤, 2010,42(5):800-806.
- [9] 高剑琴,董栋.多环芳烃含量限制法规及测试方法比较[J]. 橡胶科技, 2015(7):43-51.
- [10] 梁慧姣,刘小龙,白莉,等.多环芳烃在水生环境食物链中的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014,42(29):10261-10265.
- [11] 李霁,周俊丽,曹莹,等.荧蒹的淡水沉积物预测无效应浓度推导及生态风险评价[J]. 环境化学, 2015,34(4):664-670.
- [12] Ahmed R Z, Ahmed N. Effect of yeast extract on fluoranthene degradation and aromatic ring dioxygenase expressing bacterial community structure of a fluoranthene degrading bacterial consortium[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014,88:56-61.
- [13] 阴启蓬,胡锋,徐莉,等.不同土培条件下荧蒹在水稻和小麦中的分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2012,31(8):1467-1474.
- [14] Lilianne A Z, Bianca M M. Fluoranthene and phenanthrene, two predominant PAHs in heat-prepared food, do not influence the frequency of micronucleated mouse erythrocytes induced by other PAHs[J]. *Toxicology Reports*, 2015,2:1057-1063.
- [15] 左照江,张汝民,高岩.盐胁迫下植物细胞离子流变化的研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2014,31(5):805-811.
- [16] 刘蕾,高海波,沈应柏.MeJA 熏蒸叶片对新疆沙冬青根细胞跨膜离子流及抗盐性的影响[J]. 植物生理学报, 2014,50(4):477-482.
- [17] 孙健.胡杨响应盐胁迫与离子平衡调控信号网络研究[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
- [18] 焦婷婷.多环芳烃荧蒹对植物和土壤生物毒害的剂量-效应关系及其土壤环境基准初探[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
- [19] 刘泓,叶媛蓓,崔波,等.多环芳烃荧蒹诱导拟南芥氧化胁迫[J]. 应用生态学报, 2008,19(2):413-418.
- [20] 沈小明,王梅农,代静玉.不同浓度条件下玉米吸收菲的水培实验研究[J]. 农业环境科学学报, 2006,25(5):1148-1152.
- [21] 凌婉婷,高彦征,李秋玲,等.植物对水中菲和芘的吸收[J]. 生态学报, 2006,26(10):3332-3338.
- [22] 肖家欣,杨慧,张绍铃.丛枝菌根真菌对根际净离子流及锌污染下枳苗矿质营养的影响[J]. 生态学报, 2012,32(7):2127-2134.
- [23] 宋瑾,唐勇,许越.用非损伤微测技术研究肿瘤细胞的耐药性与其胞外 H^{+} 流变化的相关性[J]. 生物物理学报, 2008, 24(3):191-196.
- [24] Maria I C, Susana A. PAHs reduce DNA synthesis and delay cell division in the widespread primaryproducer *prochlorococcus* [J]. *Environmental Pollution*, 2015,196:147-155.
- [25] 洪有为,袁东星.秋茄幼苗对菲和荧蒹污染的生理生态效应[J]. 生态学报, 2009,29(1):445-455.
- [26] 丁克强,骆永明,刘世亮.多环芳烃对土壤中小麦发育的生态毒性效应[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2008(2):52-56.
- [27] 沈国明.水稻根质膜 $\text{Ca}^{2+}/\text{H}^{+}$ 反向转运体的存在及其特性[J]. 中国水稻科学, 2005,19(4):308-314.
- [28] 黄翠香,夏燕飞,王荣,等.菲和芘胁迫对平邑甜茶根毛细胞钙、钾和氢离子流动性的影响[J]. 中国农业科学, 2013,46(20):4321-4327.
- [29] 龚伟,王伯初.钙离子在植物抵抗非生物胁迫中的作用[J]. 生命的化学, 2011,31(1):107-111.
- [30] 陈惠萍,车秀霞,严巧娣,等.外源钙离子对南方菟丝子寄生入侵植物喜旱莲子草效果的影响[J]. 生态学报, 2014,34(14):3900-3907.
- [31] 薛延丰,刘兆普.钙离子对海盐和 NaCl 胁迫下菊芋幼苗生理特征的响应[J]. 水土保持学报, 2006,20(3):177-181.
- [32] 顾闽峰,王乃顶,王伟义,等. NaCl 胁迫对结球甘蓝幼苗生长及体内离子分布的影响[J]. 江苏农业学报, 2015,31(3):638-644.
- [33] 王家源.苦楝种苗耐盐胁迫的生理响应机制研究[D]. 南京:南京林业大学, 2013.
- [34] 尤佳.盐胁迫对盐生植物黄花补血草幼苗生理生化特性的影响[D]. 兰州:西北师范大学, 2012.
- [35] 夏尚光,张金池,梁淑英. NaCl 胁迫对 3 种榆树幼苗生理特性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2008,31(2):52-56.
- [36] 孟繁昊,王聪,徐寿军.盐胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报:自然科学版, 2014,29(3):315-318.
- [37] 凌桂芝,石保峰,黄永禄,等.铝胁迫下黑麦根尖分泌有机酸和钾离子的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010,16(4):893-898.
- [38] 王威,张联合,李华,等.水稻营养吸收和转运的分子机制研究进展[J]. 2015,45(6):569-590.
- [39] 朱晓玲.大豆耐低钾胁迫相关基因的筛选与功能验证[D]. 北京:中国农业科学院, 2013.

致谢: 文章中的英语写作部分,谢兴斌老师给予了很大帮助,在此表示感谢。

作者简介: 徐金(1992-),女,山西运城人,在读硕士研究生,主要从事果树生理学方向研究。