

萘对松前水稻(*Oryza sativa* cv. Matsumae)生长和生理的影响及其残留

马 丽^{1,2}, 盛连喜¹, 何春光¹, 范建成¹

(1.东北师范大学城市与环境科学学院, 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; 2.绵阳师范学院资源环境工程学院, 四川 绵阳 621200)

摘 要:以松前水稻为试验材料,研究了5种浓度萘污染土壤对松前水稻生长和生理生化指标的影响,以及植物成熟期时土壤中萘的残留。结果表明:①萘浓度低于 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时促进幼苗茎径、茎长、株高的生长,高浓度对其生长有显著的抑制作用。②萘胁迫对水稻叶片游离脯氨酸和蛋白质代谢均有一定的影响,且影响程度以苗期最为明显,其次是分蘖期和拔节期;水稻幼苗阶段萘的高浓度组MDA累积量极显著高于对照,水稻幼苗阶段受到膜脂过氧化影响较为显著,分蘖期次之;拔节期水稻开始新器官,抗性较弱,萘胁迫产生的过氧化作用超过了水稻的承受范围,使SOD活性显著降低。③在试验所设萘浓度范围内,水稻各生长期叶片叶绿素和光合作用速率均呈不同的变化趋势,但是变化幅度均不超过对照的 $\pm 5\%$,说明萘胁迫对松前水稻的光合作用没有显著影响,水稻对萘胁迫有一定的耐受性。④经过水稻一个生长周期,萘在种子中的残留量最多,其次是根部,且土壤中萘各浓度组的残留量与对照组均无显著差异;水稻根部和种子中萘的含量均随萘浓度的增加呈先增加后逐渐降低趋势,但各浓度组均高于对照组, $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时均达到最大值,分别为对照组的0.37倍、4.27倍。

关键词:萘;松前水稻;生长指标;生理生化指标;萘的残留

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)10-1997-08

The Effect of Naphthalene on Growth and Physiology of *Oryza sativa* cv. Matsumae and Residues of Nap

MA Li^{1,2}, SHENG Lian-xi¹, HE Chun-guang¹, FAN Jian-cheng¹

(1.State Environmental Protection Key Laboratory of Wetland Ecology and Vegetation Restoration, College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2.School of Resources and Environmental Engineering, Mianyang Normal University, Mianyang 621200, China)

Abstract: The effects of Naphthalene(Nap), one of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons(PAHs), on the growth and physiological characteristics of rice(*Oryza sativa* cv. Matsumae) as well as the residue of Nap in the soil at maturity were determined by comparing several morphological, physiological, biochemical indices of rice at three growth stages, and amounts of Nap in the soil, roots, seeds respectively among five different concentration of Nap stresses. The results showed that, ① when the concentration of Nap was lower than $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the growth of stem diameter, stem height and plant height were promoted, but these growth were significantly inhibited under higher concentrations of Nap. ② Nap stress seriously impacted on the proline content and protein metabolism at seedling stage, followed by tillering stage and jointing stage. Malondialdehyde(MDA) content of plants growing under Nap stresses were significantly higher than those of plants growing without Nap at seedling stage, indicating the occurrence of lipid peroxidation at this stage. At jointing stage, rice grew new organs, with weak resistance, peroxidation resulting from Nap stress was more than the tolerance range of rice, and made a significant reduction in superoxide dismutase(SOD) activity. ③ Within the range of the conducted concentration of Nap, there were different trends of the changes of chlorophyll content and the photosynthesis rate of leaf at seedling stage and tillering stage, with less than $\pm 5\%$ variation compared to the control. This insignificant effect of the Nap on the photosynthesis of *Oryza sativa* cv. Matsumae showed that a certain mechanism might exist to help rice to resist the Nap

收稿日期:2009-02-12

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

作者简介:马 丽(1983—),女,硕士,主要研究方向为环境生态学。E-mail:malil2008@163.com

通讯作者:盛连喜 E-mail:shenglx@nenu.edu.cn

stress. ④a growth period, maximum residue of Nap was found in seeds, then in the roots. The residues of the Nap in the polluted soil were similar to that of the control soil. However, increased Nap residues of the seeds and roots were found in stressed rice plants, which increased gradually at first, then decreased, with maximal 0.37 and 4.27 times (at 20 mg·kg⁻¹ treatment) than the control, respectively.

Keywords: naphthalene (Nap); *Oryza sativa* cv. *Matsumae*; growth index; physiological and biochemical; residues of naphthalene

多环芳烃(PAHs)指由两个及两个以上苯环稠合而成的一类化合物,是被认识最早的一类化学致癌物。一些研究已表明,土壤中 PAHs 浓度和植物体(尤其是植物根部)中 PAHs 的浓度之间有直接的相关关系。亲脂性多环芳烃和它们的衍生物因其疏水性、辛醇/水分配系数高,而易于在生物体内积累,并在体内代谢过程中产生多种中间产物,其中许多中间产物参与机体内的氧化还原循环,产生大量活性氧,从而对 DNA、蛋白质及膜脂等生物大分子造成氧化损伤,可能干扰生物膜结构和功能。一些组织通过自由基的形成、脂质合成的抑制或脂质合成类型的变化直接干扰一些组织器官^[1],进而引发机体的毒害效应。

萘(Nap)是具有两个苯环的最简单的多环芳烃,美国国家环保局(EPA)将其列为 16 种 PAHs 优先污染物之一,主要来源于煤矿、各种石油馏分的燃烧、煤的汽化和液化过程、石油的裂解过程。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。

随着全球工业化的快速发展,越来越多的 PAHs 进入环境。我国由于各种矿物燃料的燃烧、工业及石油废水排放,加之农业生产上大量使用化肥、农药等化学物质,致使土壤中 PAHs 污染问题也很突出^[2-4]。据调查研究结果,莫斯科地区土壤中多环芳烃的含量为 59~1 350 ng·g⁻¹,其中萘和菲的含量最多^[5];段永红等对天津地区土壤的多环芳烃进行了调查,结果表明,表土中 PAHs 含量为 537~4 210 ng·g⁻¹,其中萘的含量最高^[6];丁爱芳等^[7]研究结果也表明,太湖地区吴江市表层水稻土 PAHs 总量为 219.5~1 628.6 μg·kg⁻¹,在检测的 PAHs 中,二环、三环、四环的含量之和约为总量的 67.9%~98.3%,所以耕种土壤受多环芳烃影响较为严重。

目前,诸多研究集中于多环芳烃对凤眼莲、芦苇和香蒲等高等水生植物的毒害效应^[8-9],以及研究多环芳烃对大豆、玉米、黑麦草、白菜、小麦等高等陆生植物短期毒害效应^[10-12],而研究萘对日本松前水稻生长发育影响的报道较少。我国水稻种植面积约占粮食作物面积的 30%,产量接近粮食总产量的一半,主要产区包括长江中下游地区、华南、东南及台湾省、海南省

等沿海地区,因此,研究耕种土壤多环芳烃污染对农作物的生长影响有重要的实际意义。

本文选择日本松前水稻为试验材料,研究土壤萘污染对水稻营养生长期生长和生理指标的影响,以及一个生长周期后,萘在土壤、水稻根部和种子中的残留。旨在探讨不同浓度萘胁迫对水稻生长发育的影响,为分析多环芳烃对水稻生态毒理效应提供依据,同时本文对一些机理性的探讨也为今后研究有机污染胁迫下,作物的生长和耐性适应机制奠定一定基础。

1 材料与方法

1.1 试剂

萘(Naphthalene, Nap),纯度>97%,北京化工厂,产品理化性质见表 1。

表 1 供试有机污染物的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested organic pollutants

有机 污染物	分子式	结构式	分子量	溶解度/ mg·L ⁻¹ (25 ℃)	logK _{ow} (辛醇- 水分配系数)
萘(Nap)	C ₁₀ H ₈		128.2	1.3	2.28

L-脯氨酸(分析纯)、茚三酮(分析纯)、磺基水杨酸(分析纯)、乙酸(冰醋酸)(优级纯)、冰乙酸(分析纯)、丙酮(分析纯)、无水乙醇(分析纯)、95%乙醇(分析纯)、磷酸氢二钠(分析纯)、磷酸二氢钠(分析纯)、三氯乙酸(TCA)(分析纯)、牛血清白蛋白(生化试剂)、考马斯亮蓝 G-250(生化试剂),二氯甲烷(分析纯),甲醇(分析纯)。

1.2 材料

优质水稻品种:日本松前水稻(*Oryza sativa* cv. *Matsumae*),纯系。

土壤:吉林农业大学黑土(调酸土:营养土:黑土=1.25 kg:1.25 kg:320 kg)。

1.3 供试材料的培养

优质松前水稻种子经浮选,去掉瘪粒,用水充分漂洗后,选取 400 粒,用蒸馏水浸泡 12 h 后,按照同心圆平铺方式将水稻种子排列在铺有滤纸的培养皿

里,然后置于 28 ℃恒温暗光培养箱中催芽,芽长为种子长度时,置于土壤中培养种苗,长至三叶期待用。

1.4 种苗处理

用 5 mL 丙酮作助溶剂,按几何级数配制萘有机溶液浓度分别为 0、10、20、40、80 mg·kg⁻¹(浓度以风干土壤计),采用直径 25 cm、高 30 cm 盆钵,每盆装土 3 kg,用调酸土和营养土按比例搅拌均匀。将上述有机溶液分别均匀灌溉于各盆钵中,过夜待丙酮挥发后,把培养至三叶期的种苗移植到处理过的盆钵中,每盆 10 株,每一浓度梯度 3 个平行,共 15 盆钵。定时浇水保留水层模拟自然生长状态,以研究萘对松前水稻伤害的长期效应。

分别在幼苗期测定茎径、茎长、株高,分蘖期测定分蘖数生长指标。同时分别在幼苗期、分蘖期、拔节期取水稻每个时期新生健康叶片,每株取 3~5 片测定游离脯氨酸、蛋白质、超氧化物歧化酶(SOD)活性、丙二醛(MDA)、光合作用速率、叶绿素和类胡萝卜素含量各项生理生化指标。成熟期分别测定土壤中、水稻根部和种子中萘的残留。

1.5 各项生理指标的测定方法

游离脯氨酸含量采用茚三酮比色法,蛋白质含量的测定采用考马斯亮蓝 G-250 法^[13],超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法^[14],光合作用速率的测定采用 TPS-1 便携式光合作用仪测定,叶绿素和类胡萝卜素含量的测定采用分光光度计法^[14]。

萘的提取分别参照 Simonich 和宋玉芳的方法略作改进,然后用液相色谱测定萘的含量。称取 10 g 自然风干的土样于 25 mL 刻度管中,加入 20 mL V(二氯甲烷):V(丙酮)=1:1 混合液,摇匀,放入超声波清洗器中,在室温下萃取 30 min。萃取液过 2 cm 无水硫酸钠柱(使用前先用 10 mL 二氯甲烷淋洗以除去干扰),净化后的浓缩液收集在 50 mL 三角烧瓶中,再分别用 20 mL 上述萃取混合溶液萃取样品 2 次,过无水硫酸

钠柱,萃取液合并收集于 50 mL 三角烧瓶中,用 KD 浓缩器在 50 ℃下浓缩至干,然后用甲醇定容至 1 mL,用液相色谱进行定性定量分析。

植物根和种子,经风干、剪碎、用粉碎机粉碎,然后全部置于保干器内保存。称取 2 g 植物样品于 25 mL 刻度管中,用 30 mL 有机萃取剂(1:1 的丙酮和正己烷溶液)分 3 次,每次 10 mL 并在超声水浴中超声萃取 30 min;将萃取液收集、过无水硫酸钠柱后,收集全部滤液转移至 KD 浓缩器中,浓缩至干,用甲醇定容至 1 mL,过 0.22 μm 孔径滤膜后,用 HPLC/UV 进行分析测定。

1.6 数据处理与分析

试验数据用统计学方法进行处理,所得结果为平均值±标准差。处理组与对照组之间的比较采用 SPSS 统计软件,单因素方差分析采用 ANOVA,其中 $P < 0.05$ 可认为是差异显著, $P < 0.01$ 可认为是差异极显著, $P > 0.05$ 可认为是无显著差异。

2 结果与讨论

2.1 萘对松前水稻幼苗生长的影响

由表 2 可看出,随萘浓度的增大,松前水稻幼苗茎径、茎长、株高均呈先升高后逐渐降低的趋势。其中当萘浓度为 20 mg·kg⁻¹ 时,水稻幼苗茎长极显著高于对照组 26.76%($P < 0.01$);浓度为 10 mg·kg⁻¹ 时,茎长和株高分别高于对照 27.84%、24.55%;而 80 mg·kg⁻¹ 时,茎径、茎长、株高分别显著低于对照组 42.25%、16.27%、13.60%。刘亚云^[15]研究 PCBs 对桐花树幼苗茎径生长的影响和陈志强^[9]研究不同浓度萘和萘对红树植物幼苗的生长影响均有类似结果,即低浓度促进幼苗生长,高浓度对生长有抑制作用,这与 Edward J^[16]的毒物兴奋效应一致。这可能是萘具有与植物生长激素相类似的环状结构,因其结构的相似性而具有与生长激素类似的作用,从而促进松前水稻的生长,但是高浓度组表现出一定的抑制效应。

表 2 萘对松前水稻幼苗生长状况的影响

Table 2 Effect of Nap on growth of Matsumae seedlings

萘处理浓度/mg·kg ⁻¹	茎径/mm	处理/对照	茎长/cm	处理/对照	株高/cm	处理/对照
0	2.13±0.32	100.00%	5.10±0.93	100.00%	18.67±3.23	100.00%
10	2.21±0.25	103.76%	6.52±0.95*	127.84%	23.25±2.64*	124.55%
20	2.70±0.34**	126.76%	6.09±0.58	119.41%	18.87±2.22	101.07%
40	2.06±0.27	96.71%	4.62±0.37	90.59%	17.44±1.46*	93.41%
80	1.23±0.25**	57.75%	4.27±0.19	83.73%	16.13±0.92*	86.40%

注:n=10,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$ 。

2.2 萘对松前水稻叶片脯氨酸含量的影响

脯氨酸(PRO)作为渗透调节物质,它能调节植物细胞膜的稳定性,保持原生质和环境渗透平衡,除可阻止水分丧失外,还可直接影响蛋白质的稳定性,保持膜结构的完整,并作为含氮的储藏物质和恢复生长的能源。脯氨酸的累积是由脯氨酸合成酶的活化、生物降解的抑制以及参与合成蛋白的减少而产生的,脯氨酸的累积在植物胁迫响应和不同阶段的发育中具有重要作用,其累积与植物发育阶段和组织器官类型有关。

从图 1 看出,随萘浓度的升高,水稻各生长期叶片脯氨酸含量总体均呈逐渐升高的趋势。其中苗期,各萘浓度组的脯氨酸含量均与对照组呈极显著差异,分别为对照的 1.14 倍、1.33 倍、1.41 倍、1.61 倍($P<0.01$),分蘖期和拔节期各萘浓度组叶片游离脯氨酸与对照无显著差异。这说明与分蘖期和拔节期相比较,萘胁迫下,水稻幼苗叶片中脯氨酸含量在逆境胁迫下表现得更为敏感。肖用森等^[17]研究表明,水稻体内脯氨酸的积累同膜透性的增加呈显著正相关,本试验结果也说明,随萘浓度的增大对水稻叶片细胞膜的渗透性的影响逐渐加强,且苗期受到的影响最为严重,拔节期次之。

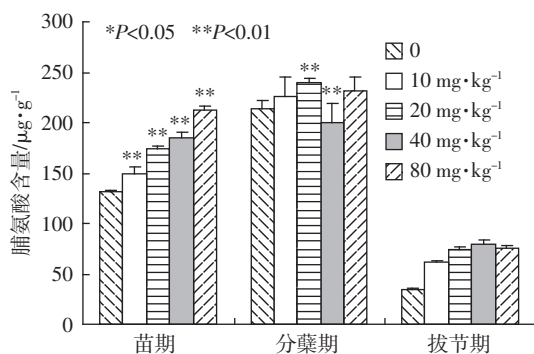


图 1 萘对松前水稻叶片脯氨酸含量的影响

Figure 1 Effect of Nap on proline content of Matsumae leaves

2.3 萘对松前水稻叶片蛋白质含量的影响

氮代谢是植物的基本生理过程之一,包括无机氮(硝态氮)的还原、同化及有机含氮化合物的转化和合成等过程。在此过程中,植物把所吸收的硝酸盐经硝酸还原酶的作用形成氨,然后与碳水化合物中间代谢产物酮酸发生氨基化作用,形成氨基酸,进而形成蛋白质。蛋白质是原生质的部分,所以细胞可溶性蛋白质是植物代谢的主要调控和促进物质,其含量的变化反映了植物合成和代谢的能力。

从图 2 可看出,萘对松前水稻各生长期叶片蛋白质含量的影响是不尽相同的。苗期,低浓度萘促进叶片蛋白质的合成,10 mg·kg⁻¹ 时蛋白质含量达到最大值,显著高于对照组 58.49%,随萘浓度的增大呈明显的抑制作用,直至 80 mg·kg⁻¹ 时,比对照组减少了 20.66%。而萘胁迫对水稻分蘖期和拔节期叶片蛋白质含量的影响不明显,其中萘浓度为 40 mg·kg⁻¹ 时,分蘖期叶片中蛋白质含量比对照组显著增加了 13.64% ($P<0.05$),而其他各浓度组与对照组间无显著差异。

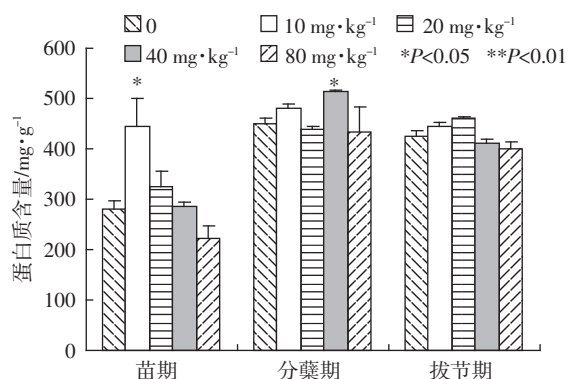


图 2 萘对松前水稻叶片蛋白质含量的影响

Figure 2 Effect of Nap on protein content of Matsumae leaves

由上述分析可知,低浓度萘有利于蛋白质的合成,而萘的高浓度组蛋白质含量有显著的下降,对其合成表现出一定的抑制作用,可能是由于高浓度萘提高了蛋白酶活性,加速了蛋白质的水解,也可能是萘胁迫使 RNA 转录和翻译受到抑制,造成蛋白质含量的减少,从而使氮素代谢调节失调,影响植物的正常生长。

此外,发现萘对水稻苗期叶片蛋白质含量影响更为明显,与萘对叶片中脯氨酸含量的影响相似,这表明水稻苗期氮代谢可能受到显著的抑制效应。随萘浓度的增加幼苗蛋白质含量逐渐降低,而脯氨酸含量呈逐渐增加的趋势。统计分析表明,脯氨酸累积与蛋白含量的降低呈不显著负相关,这与刘丹^[18]的结论是一致的,说明萘胁迫下,水稻苗期叶片游离脯氨酸的积累可能部分来源于可溶性蛋白质的降解。因为早在种子萌发时蛋白质已开始水解,三叶期水稻秧苗进入独立生长,根原基的分化,根细胞的增殖,要求有充分的蛋白质、核酸等含氮的有机物质,所以氮素在此时占有重要作用。萘抑制了蛋白质的合成,从而使水稻氮代谢循环较弱,也可能是萘提高了脯氨酸合成酶的活性,植物体通过提高自身脯氨酸含量应对逆境胁迫,以保持原生质与环境的渗透平衡,这是其自身调节渗

透平衡的机制的体现。

2.4 萘对松前水稻叶片 SOD 活性的影响

超氧化物歧化酶(SOD)普遍存在于绿色植物体中,是重要的活性氧防御酶,是目前发现的唯一以 O_2^- 为底物的酶,其主要功能是清除机体所产生的超氧物自由基,阻止自由基对器官和生理过程的破坏,抑制膜脂过氧化作用发生。正常情况下,植物体内的活性氧产生和清除处于一种动态平衡状态。当植物处于逆境条件下,这种动态平衡遭到破坏,抗氧化系统清除活性氧能力下降,造成活性氧大量积累对细胞造成伤害^[9]。作为植物抗氧化系统的第一道防线,SOD 在维持植物体内活性氧动态代谢平衡中起着极其重要的作用。

从图 3 看出:(1)随萘浓度升高,幼苗叶片 SOD 活性呈先升高后逐渐降低又上升的趋势,10 和 80 $mg \cdot kg^{-1}$ 萘浓度组 SOD 活性分别高于对照 9.45%、11.82%,表现出一定的诱导作用;(2)分蘖期,SOD 活性随萘浓度的增大而逐步升高,直至 80 $mg \cdot kg^{-1}$ 时高于对照的 10.67%;(3)拔节期,随萘浓度的增大 SOD 活性呈逐渐降低的趋势,20 和 40 $mg \cdot kg^{-1}$ 萘浓度组分别比对照减少了 15.87% ($P < 0.01$)、18.02% ($P < 0.01$),虽然 80 $mg \cdot kg^{-1}$ 时表现一定的诱导作用,但与对照组无显著差异,故拔节期水稻受到膜脂过氧化的影响较为严重。

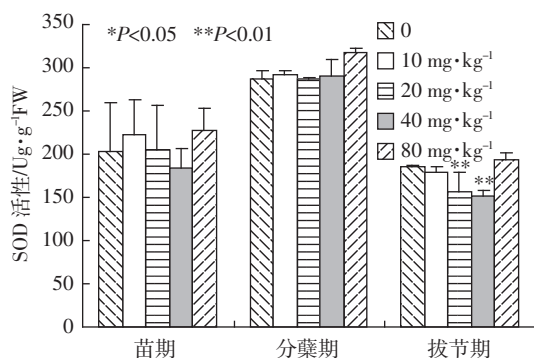


图3 萘对松前水稻叶片 SOD 活性的影响

Figure 3 Effect of Nap on the activity of SOD of Matsumae leaves

以上分析说明,不同浓度萘胁迫对松前水稻不同生长期叶片 SOD 活性的影响不同。萘胁迫对水稻苗期和分蘖期叶片 SOD 活性均有一定的诱导作用,表明萘胁迫使植物体内产生较少的超氧自由基,水稻启动抗氧化系统较为有效地调动并积极响应,通过提高 SOD 活性来清除超氧自由基,这也是水稻对逆境的一种代谢性调节。但是水稻拔节期各萘浓度组叶片 SOD 活性显著低于对照组,这可能是由于拔节期是水

稻一生建成新生器官时期,体内需要消耗更多的养分,抗性比较弱,超过了 SOD 清除超氧自由基的能力,使 SOD 活性逐渐降低,也可能是植物体自身通过提高过氧化物酶(POD)、过氧化氢(CAT)等抵御抗氧化作用,致使 SOD 活性相对减弱。

2.5 萘对松前水稻叶片丙二醛(MDA)含量的影响

膜脂过氧化是指生物膜中不饱和脂肪酸在自由基诱发下发生的过氧化反应。膜脂过氧化作用不仅可使膜相分离,破坏膜的正常功能,而且过氧化产物 MDA 及其类似物也能直接对植物细胞起毒害作用。在常温下,植物体内 MDA 含量极少,但遇逆境伤害时,其含量便会升高,丙二醛(MDA)是植物膜脂过氧化物作用的最终产物,具有细胞毒性,其含量直接影响生物膜的功能,是膜系统受害的重要标志之一。

如图 4 所示:(1)水稻幼苗叶片中 MDA 含量随萘浓度的增高而逐步上升,直至 80 $mg \cdot kg^{-1}$ 高于对照组 59.97% ($P < 0.01$),这与骆剑锋^[20]研究的结果类似;(2)分蘖期和拔节期各萘浓度组叶片中 MDA 含量均低于对照组,其中 10 和 80 $mg \cdot kg^{-1}$ 浓度组分别降低了 19.59%、14.55% ($P < 0.05$),说明此时萘胁迫对松前水稻叶片受到膜脂过氧化影响较小。

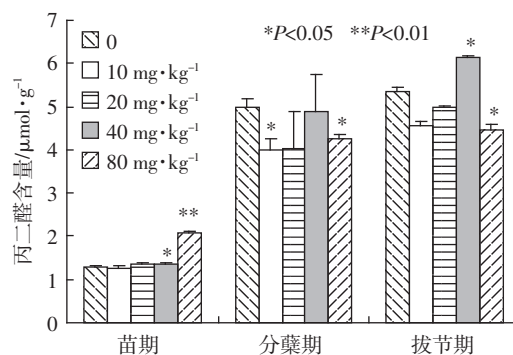


图4 萘对松前水稻叶片丙二醛(MDA)含量的影响

Figure 4 Effect of Nap on MDA content of Matsumae leaves

由上可知,苗期水稻体内膜脂过氧化程度严重。PAHs 和它们的代谢可能影响细胞和亚细胞水平的结构和功能。细胞水平的亲脂性物质的第一个目标就是血浆膜,可能使膜脂质过氧化。在水稻幼苗生长初期,由于水稻机体防御水平突然受到外来不良环境的影响,高浓度萘导致水稻叶片膜脂不饱和脂肪酸过氧化,使膜脂组分发生变化,改变膜透性、膜脂流动性及膜结合酶活力,植物体内产生过多的过氧化产物丙二醛(MDA)。

分蘖期和拔节期各萘浓度组水稻叶片中 MDA

含量有所减少,这可能与水稻机体本身通过自我调节,为抵抗外来不良环境的影响而诱导体内防御水平的提高有一定的关系。

2.6 萘对松前水稻叶片光合作用的影响

2.6.1 萘对松前水稻叶片叶绿素含量的影响

叶绿素含量是反映光合强度的重要指标。叶绿素是光合作用过程中将光能转变为化学能的关键色素,其含量高低是叶片光合性能的重要生理指标,反映了叶片光合性能的高低。

从图 5 可看出,萘各浓度组总体表现为促进水稻苗期和分蘖期的光合作用,而拔节期各萘浓度组表现出抑制叶绿素的合成。

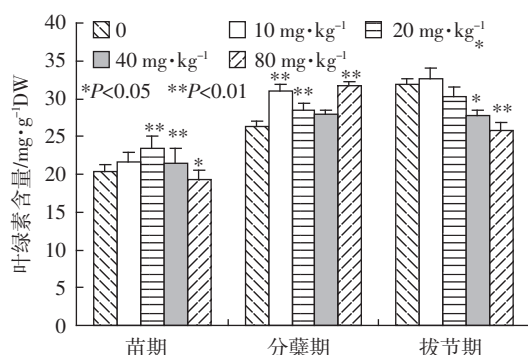


图 5 萘对松前水稻叶片叶绿素含量的影响

Figure 5 Effect of Nap on chlorophyll content of Matsumae leaves

(1)当萘浓度小于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,对水稻幼苗叶片叶绿素的合成有一定促进作用,虽然 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度组略低于对照 4.73%,但是不低于对照组 5%,故仍在叶片光合色素水平,对光合作用影响不明显。(2)分蘖期各萘浓度组均显著高于对照组, $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时高于对照 20.14%。骆剑锋^[20]研究也表明,高浓度的 TCB 和萘都会导致水稻叶绿素含量的降低,但低浓度萘诱导水稻叶绿素含量的少量增加(增加 4.4%),本试验也有类似的结果。(3)拔节期,叶绿素含量随萘浓度的增大而逐渐降低,直至 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时叶绿素含量减少了 18.82% ($P<0.01$)。这可能是由于此时高浓度萘影响叶绿素合成相关的酶类抑制叶片中叶绿素的合成,也可能是萘胁迫引起活性氧的积累,加速了叶绿素的降解,造成叶片中叶绿素含量的降低,但不低于对照的 20%,所以萘胁迫对水稻叶片叶绿素合成的影响不严重。

Flocco CG 等研究了苯酚对苜蓿生长的影响,发现 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的苯酚会导致苜蓿叶绿素含量显著降低^[21],这可能是由于硝基苯和苯酚毒性高于萘所致,

也可能是作物品种差异的原因。

正常情况下,水稻插植返青后叶绿素含量逐渐增加,分蘖盛期最高,以后就减少,孕穗期再次增加,由试验结果发现,萘胁迫下,拔节期叶绿素含量略低于分蘖期,基本符合水稻正常生长规律,因此萘胁迫对水稻正常的光合作用影响不明显。

2.6.2 萘对松前水稻叶片光合作用速率的影响

由图 6 看出,苗期光合作用速率随萘浓度的增大逐渐增大,至 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时比对照增加了 2.78%;分蘖期和拔节期呈类似的却与苗期相反的变化趋势,即随着萘浓度的增大,光合作用速率逐渐下降,直至 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时分别降低了 4.28%、2.58%。

由上分析可知,虽然萘胁迫下不同生长期光合作用速率呈不同的变化趋势,但是变化幅度均不超过对照的 $\pm 5\%$,所以此胁迫对松前水稻叶片光合作用速率的影响并不大。这与叶片叶绿素的合成有类似的结果,均表明在所设萘浓度范围内,对松前水稻的光合作用没有显著影响,植物自身通过自动调节机制,对此胁迫有一定的耐受性。

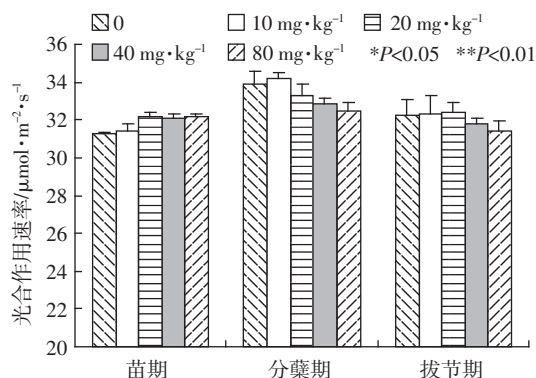


图 6 萘对松前水稻叶片光合作用速率的影响

Figure 6 Effect of Nap on rate of photosynthesis of Matsumae leaves

2.7 萘的残留

植物体内的多环芳烃(PAHs),除了少量是由植物本身合成外,大部分都来自空气、水和土壤等环境介质。植物可以从浓度较高的土壤中吸收挥发性有机物,植物的根可以吸收水和土壤溶液中的 PAHs,并可以将部分化合物转移到地上部分。Briggs 等发现有机化合物的许多环境行为、生物活性与其疏水性能(一般用该化合物的正辛醇-水分配系数 $\log K_{ow}$ 表示)密切相关,有机污染物能否进入植物体内很大程度上取决于此^[22]。正辛醇-水分配系数 $\log K_{ow}$ 值在 0.5~3 之间的有机污染物最易被植物吸收进而在体内运输; $\log K_{ow}$ 值大于 3 的疏水性有机化合物易被植物根表

强烈吸附而难以运输到植物体内;具有较强水溶性的有机化合物即其 $\log K_{ow}$ 值小于 0.3, 则不易被根表吸附或主动通过植物细胞膜^[23]。萘的 $\log K_{ow}$ 表达为 2.28, 是一种亲脂性有机污染物, 基于上述理论应该是最易被植物根部吸收进而在体内迁移和分配^[24]。植物根系能够促进土壤微生物生长使土壤中有有机污染物降解, 植物种子是人类食用的主要部分, 有机污染物在种子的累积量会影响人类的身体健康。因此, 为进一步了解植物对土壤中多环芳烃萘的吸收, 以及萘的迁移, 本试验在水稻一个生长期之后测定了萘在土壤、水稻根部和种子中的残留。

由图 7 可看出, 松前水稻经过 4 个月的生长之后, 土壤中各浓度组萘的含量与对照组均无显著差异, 各浓度组萘经过长期土壤微生物的降解和水稻根系的吸收已逐渐减少接近至土壤本底值。Yoshiomi 等发现玉米根系能促进土壤微生物生长与芘的降解^[25], Liste 等研究发现, 9 种不同种类的植物都能促进污染土壤中芘的降解^[26], 本试验有类似结果, 说明松前水稻也能够促进土壤中萘的降解。

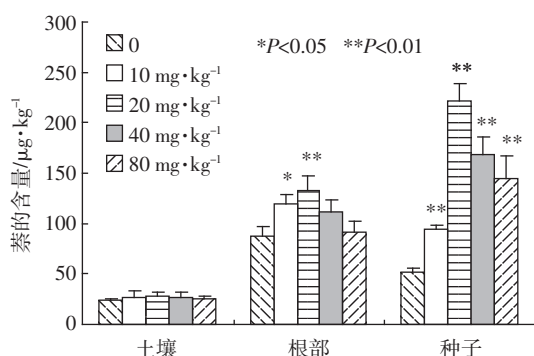


图 7 松前水稻一个生长周期后萘在土壤、水稻根部和种子中的残留

Figure 7 Residue of Nap in the soil, root and seed of Matsumae, respectively

由图 7 可看出, 经过水稻一个生长期之后, 随萘胁迫浓度的增加, 水稻根部萘含量和种子中萘的残留量呈现类似趋势, 即先增加后逐渐降低, 但各萘浓度组的残留量均高于对照组且呈极显著差异。萘浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 萘在根部和种子中的残留量最高, 分别为对照组的 0.51 倍、3.24 倍。综合上述试验结果, 发现萘浓度低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 对水稻营养生长表现为一定的促进作用, 且萘的 $\log K_{ow}$ 表达为 2.28, 所以低浓度萘可能更易被植物根部吸收在体内迁移和分配, 被植物分解的较少, 更多的累积于种子中, 且降解的产物也具类似

生长素的苯环结构, 以促进水稻的生长。

而萘浓度大于 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 萘在根部和种子中的残留量呈逐渐降低趋势, 直至 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时萘在根部的残留量仅高于 4.59%, 而萘在种子中的残留量为对照组的 2.8 倍。这可能是因为高浓度萘在水稻体内迁移较慢, 而使其主要集中于茎中, 致使对植物生长有一定抑制作用, 表现为对抗氧化作用、蛋白质含量等的影响, 使萘累积到种子中的含量有所降低, 具体萘如何在水稻体内迁移还有待进一步研究。

3 结论

(1) 萘浓度低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时促进幼苗茎径、茎长、株高生长, 而高浓度萘对其生长有明显抑制作用, $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 茎径、茎长、株高分别显著低于对照组 42.25%、16.27%、13.60%。

(2) 萘胁迫对水稻叶片游离脯氨酸和蛋白质代谢均有一定的影响, 且影响程度苗期最为明显, 其次是分蘖期和拔节期; 萘胁迫下, 水稻启动抗氧化防御系统, 提高脯氨酸和 SOD 活性来减少萘胁迫对自身的伤害, 但是超过了自身调节范围, 高浓度萘胁迫使水稻幼苗和拔节期叶片中 SOD 活性显著降低, 幼苗阶段萘的高浓度组 MDA 累积量极显著高于对照, 说明水稻幼苗阶段受到膜脂过氧化影响较为显著, 分蘖期次之。

(3) 水稻营养生长期叶片叶绿素和光合作用速率随萘浓度的增大均呈不同的变化趋势, 但均不超过对照的 $\pm 5\%$ 。试验结果表明萘胁迫对松前水稻的光合作用没有显著影响, 植物自身对此胁迫有一定的耐受性。

(4) 水稻一个生长周期后, 萘在种子中的残留量最多, 其次根部, 土壤中各浓度组萘的残留几乎全部被降解, 接近土壤中的本底值。而水稻根部和种子中萘的残留量均在 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到最大值, 分别为对照组的 0.37 倍、4.27 倍。

参考文献:

- [1] Tukaj Z, Aksmann A. Toxic effects of anthraquinone and phenanthrene-quinone upon *Scenedesmus* strains (green algae) at low and elevated concentration of CO_2 [J]. *Chemosphere*, 2007, 66: 480-487.
- [2] Wu Ying, Zhang Jing, Zhu Zhi-Jian. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the Yalujiang Estuary, North China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 46: 619-625.
- [3] Quan-Ying Cai, Ce-Hui Mo, Athanasios Katsoyiannis, et al. Occurrence and assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from vegetable fields of the Pearl River Delta, South China [J]. *Chemosphere*, 2007, 68: 159-168.

- [4] 孙 娟, 郑文教, 陈文田. 红树林湿地多环芳烃污染研究进展 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1211-1214.
SUN Juan, ZHENG Wen-jiao, CHEN Wen-tian. Research advance in ecological effects of polynuclear aromatic hydrocarbons in mangrove wetland[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(10): 1211-1214.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 丁爱芳, 潘根兴, 张旭辉. 吴江市水稻土中多环芳烃 (PAHs) 含量及来源的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1166-1170.
DING Ai-fang, PAN Gen-xing, ZHANG Xu-hui. Contents and origin analysis of PAHs in paddy soils of Wujiang County[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1166-1170.
- [8] 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(5): 520-526.
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(5): 520-526.
- [9] 陆志强, 郑文教, 马 丽, 等. 不同浓度萘和芘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.
LU Zhi-qiang, ZHENG Wen-jiao, MA Li, et al. Effect of naphthalene and pyrene on hypocotyls germination and growth of mangrove plant *Kandelia candel* (L.) Druce[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2005, 44(4): 580-583.
- [10] 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.
SHEN Xiao-ming, WANG Mei-nong, DAI Jing-yu. Uptake of phenanthrene by maize from hydroponic solutions with different concentrations [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1148-1152.
- [11] 刘 宛, 孙铁珩, 李培军, 等. 1, 2, 4-三氯苯胁迫对萌发大豆种子中活性氧的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1655-1658.
LIU Wan, SUN Tie-heng, LI Pei-jun, et al. Effects of 1, 2, 4-trichlorobenzene stress on active oxygen in germinated soybean seeds[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1655-1658.
- [12] 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 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.
- [13] 郝再彬. 植物生理学实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
HAO Zai-bin. Plant physiology experiment[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006.
- [14] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 第二版, 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
CHEN Jian-xun, WANG Xiao-feng. Plant physiology experimental direction[M]. Second Edition, Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006.
- [15] 刘亚云, 孙红斌, 陈桂珠. 多氯联苯对桐花树幼苗生长及膜保护酶系统的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 123-128.
LIU Ya-yun, SUN Hong-bin, CHEN Gui-zhu. Effects of PCBs on *Aegiceras corniculatum* seedlings growth and membrane protective enzyme system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 123-128.
- [16] Edward J Calabrese. 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.
- [17] 肖用森, 王正直, 郭绍川. 渗透胁迫下稻苗中游离脯氨酸累积与膜脂过氧化的关系[J]. 武汉植物学研究, 1996, 14(4): 334-340.
XIAO Yong-sen, WANG Zheng-zhi, GUO Shao-chuan. The relationships between free proline and membrane lipid peroxidation in rice seedlings under osmotic stress[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1996, 14(4): 334-340.
- [18] 刘 丹, 陈祥伟, 于成龙. Vc 对水分胁迫下紫丁香和小叶锦鸡儿生理活动的影响[J]. 东北林业大学学报, 2004, 32(3): 16-18.
LIU Dan, CHEN Xiang-wei, YU Cheng-long. The effect of Vc on physiological activities of *Syringa oblata* and *Caragana microphylla* seedlings under water stress[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2004, 32(3): 16-18.
- [19] 尹永强, 胡建斌, 邓明军. 植物叶片抗氧化系统及其对逆境胁迫的响应研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(1): 105-110.
YIN Yong-qiang, HU Jian-bin, DENG Ming-jun. Latest development of antioxidant system and responses to stress in plant leaves[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(1): 105-110.
- [20] 骆剑锋. 1, 2, 4-三氯苯和萘对水稻的伤害及耐性机理研究 [D]. 扬州: 扬州大学农学院, 2005.
LUO Jian-feng. Study on the damage and tolerance mechanisms of 1, 2, 4-trichlorobenzene and naphthalene in rice[D]. Yangzhou: Yangzhou University Agricultural College, 2005.
- [21] Flocco C G, Lubalbo A. Removal of phenol by alfalfa plants (*Medicago Sativa* L.) grown in hydroponics and its effect on some physiological parameters[J]. *Acta Biotechnology*, 2002, 22: 43-54.
- [22] Simonich S T, Hites R A. Organic pollutant accumulation in vegetation [J]. *Environmental Science and Technology*, 1995, 29(12): 2905-2913.
- [23] Schnoor J L, Licht L A, Mccutcheon S C. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants[J]. *Environmental Science and Technology*, 1995, 29(7): 318-323.
- [24] Gao Y Z, Zhu L Z. Plant uptake, accumulation and translocation of phenanthrene and pyrene in soils[J]. *Chemosphere*, 2004, 55: 1169-1178.
- [25] Yoshitomi K J, Shann J R. Corn (*Zeamay* L.) root exudates and their impact on ^{14}C -pyrene mineralization[J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, 33: 1769-1776.
- [26] Liste H H, Alexander M. Plant-promoted pyrene degradation in soil[J]. *Chemosphere*, 2000, 40: 7-10.