

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 24 期 Vol.31 No.24 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 24 期

2011 年 12 月 (半月刊)

目 次

柑橘黄龙病株不同部位内生细菌群落结构的多样性·····	刘 波,郑雪芳,孙大光,等 (7325)
小兴安岭红松径向生长对未来气候变化的响应·····	尹 红,王 靖,刘洪滨,等 (7343)
污水地下渗透系统脱氮效果及动力学过程·····	李海波,李英华,孙铁珩,等 (7351)
基于生态系统服务的海南岛自然保护区体系规划·····	肖 燚,陈圣宾,张 路,等 (7357)
羌塘地区草食性野生动物的生态服务价值评估——以藏羚羊为例·····	鲁春霞,刘 铭,冯 跃,等 (7370)
湖北省潜江市生态系统服务功能价值空间特征·····	许倍慎,周 勇,徐 理,等 (7379)
滇西北纳帕海湿地景观格局变化及其对土壤碳库的影响·····	李宁云,袁 华,田 昆,等 (7388)
基于连接性考虑的湿地生态系统保护多预案分析——以黄淮海地区为例·····	宋晓龙,李晓文,张明祥,等 (7397)
青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力·····	韩道瑞,曹广民,郭小伟,等 (7408)
影响黄土高原地物光谱反射率的非均匀因子及反照率参数化研究·····	张 杰,张 强 (7418)
基于 GIS 的下辽河平原地下水生态敏感性评价·····	孙才志,杨 磊,胡冬玲 (7428)
厦门市土地利用变化下的生态敏感性·····	黄 静,崔胜辉,李方一,等 (7441)
我国保护地生态旅游发展现状调查分析·····	钟林生,王 婧 (7450)
黄腹山鹧鸪稳定的配偶关系限制雄性欺骗者·····	褚福印,唐思贤,潘虎君,等 (7458)
食物蛋白含量和限食对雌性东方田鼠生理特性的影响·····	朱俊霞,王 勇,张美文,等 (7464)
具有捕食正效应的捕食-食饵系统·····	祁 君,苏志勇 (7471)
桑科中 4 种桑天牛寄主植物的挥发物成分研究·····	张 琳,WANG Baode,许志春 (7479)
栗山天牛成虫羽化与温湿度的关系·····	杨忠岐,王小艺,王 宝,等 (7486)
人工巢箱条件下杂色山雀的巢位选择及其对繁殖成功率的影响·····	李 乐,万冬梅,刘 鹤,等 (7492)
鸭绿江口湿地鸕鹚类停歇地的生物生态研究·····	宋 伦,杨国军,李 爱,等 (7500)
锡林郭勒草原区气温的时空变化特征·····	王海梅,李政海,乌 兰,等 (7511)
UV-B 辐射胁迫对杨桐幼苗生长及光合生理的影响·····	兰春剑,江 洪,黄梅玲,等 (7516)
小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变化耦合机理·····	赵风华,王秋凤,王建林,等 (7526)
利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较·····	巩国丽,陈 辉,段德玉 (7533)
2010 年冬季寒冷天气对闽江口 3 种红树植物幼苗的影响·····	雍石泉,仝 川,庄晨辉,等 (7542)
人参皂苷与生态因子的相关性·····	谢彩香,索风梅,贾光林,等 (7551)
苈对黑麦草根系几种低分子量有机分泌物的影响·····	谢晓梅,廖 敏,杨 静 (7564)
盐碱地柠条根围土中黑曲霉的分离鉴定及解磷能力测定·····	张丽珍,樊晶晶,牛 伟,等 (7571)
不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响·····	安 娟,郑粉莉,李桂芳,等 (7579)
煤电生产系统的能值分析及新指标体系的构建·····	楼 波,徐 毅,林振冠 (7591)
专论与综述	
东南亚高山森林植被变化对流域产水量的影响·····	张远东,刘世荣,顾峰雪 (7601)
干旱荒漠区斑块状植被空间格局及其防沙效应研究进展·····	胡广录,赵文智,王 岗 (7609)
利用农业生物多样性持续控制有害生物·····	高 东,何霞红,朱书生 (7617)
研究简报	
洪湖湿地生态系统土壤有机碳及养分含量特征·····	刘 刚,沈守云,闫文德,等 (7625)
氯氰菊酯和溴氰菊酯对萼花臂尾轮虫生殖的影响·····	黄 林,刘昌利,韦传宝,等 (7632)
学术信息与动态	
SCOPE-ZHONGYU 环境论坛(2011)暨环境科学与可持续发展国际会议成功举办·····	(7639)
《生态学报》3 篇文章入选 2010 年中国百篇最具影响国内学术论文 等·····	(I)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2011-12	



封面图说: 泥炭藓大多生长在多水、寒冷和贫营养的生境,同时有少数的草本、矮小灌木也生长在其中,但优势植物仍然是泥炭藓属植物。泥炭藓植物植株死后逐渐堆积形成泥炭。经过若干年的生长演变,形成了大片的泥炭藓沼泽。这种沼泽地有黑黑的泥炭,绿绿的草甸和亮晶晶的斑块状水面相间相衬,远远看去就像大地铺上了锦绣地毯一样美丽壮观。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

谢晓梅, 廖敏, 杨静. 芘对黑麦草根系几种低分子量有机分泌物的影响. 生态学报, 2011, 31(24): 7564-7570.

Xie X M, Liao M, Yang J. Effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of ryegrass (*Lolium perenne* L.). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24): 7564-7570.

芘对黑麦草根系几种低分子量有机分泌物的影响

谢晓梅¹, 廖敏^{2,3,*}, 杨静^{2,3}

(1. 浙江大学环境与资源学院实验教学中心, 杭州 310058; 2. 浙江大学环境与资源学院资源科学系, 杭州 310058;
3. 浙江省亚热带土壤与植物营养重点实验室, 杭州 310058)

摘要:植物根系释放分泌物与有机污染物的植物修复机制密切相关, 研究具有有机污染物修复潜力植物在污染胁迫条件下的根系分泌物特征有助于揭示其修复机制。以多环芳烃修复研究中常用的黑麦草为材料(*Lolium perenne* L.)为材料, 在营养液栽培方式下研究了在芘胁迫处理下, 黑麦草根系几种低分子量有机物分泌特征。结果表明, 黑麦草对芘具有较强的耐受能力, 芘胁迫处理下, 生物量无显著变化。黑麦草根系分泌的低分子量有机酸主要为草酸。3、6 mg/L 和 9 mg/L 芘胁迫处理下, 低分子量有机酸的组成无明显变化, 但含量随芘胁迫处理浓度上升而显著增加($P < 0.05$); 总糖分泌量随着芘胁迫处理浓度升高而呈现先略微上升后下降的趋势, 相对高峰值出现在芘胁迫处理浓度 3 mg/L, 但差异不显著; 氨基酸分泌总量随着芘胁迫处理浓度的增加而显著增多, 芘胁迫浓度在 3、6 mg/L 和 9 mg/L 时, 根系氨基酸的分泌总量分别是空白的 1.37、2.02 倍和 2.65 倍, 但根系分泌的氨基酸组成无明显变化, 19 种常见氨基酸分泌的数量变化情况却不相同, 分泌量总体均随着芘胁迫处理浓度的提高而增加, 其中苏氨酸、丝氨酸、脯氨酸、甘氨酸、丙氨酸、亮氨酸、组氨酸和鸟氨酸的分泌量显著增多, 差异显著($P < 0.05$)。

关键词:芘; 黑麦草; 根系分泌物

Effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of ryegrass (*Lolium perenne* L.)

XIE Xiaomei¹, LIAO Min^{2,3,*}, YANG Jing^{2,3}

1 The Center of Experiment Teaching, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

2 Department of Resource Science, College of Environmental and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

3 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Subtropic Soil and Plant Nutrition, Hangzhou 310029

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) is one kind of persistent organic pollutants in environment, some previous researches have indicated plant could facilitate the dissipation of PAHs in contaminated soil. Phytoremediation is an important measure to remove organic pollutants from contaminated soil, and the root secretion of plant is considered to be closely related to the mechanisms of phytoremediation to organic pollutants. It is in favor of revealing the mechanisms of remediation by studying the characteristics of root exudates of plant with phytoremediation potential under the stress of pollutant. In the present research, pyrene and ryegrass (*Lolium perenne* L.) which has been testified to be tolerant to PAHs stress were selected as studied objects. A solution culture experiment with series of pyrene concentration was conducted to investigate the effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of ryegrass (*Lolium perenne* L.). The series concentration of pyrene in culture solution were designed as 0 mg/L, 3 mg/L, 6 mg/L and 9 mg/L. The results showed that, ryegrass had stronger tolerance to pyrene stress and grew well in culture solution spiked with 9 mg/L pyrene. Despite the biomass raised appreciably at relative low pyrene concentrations treatment (< 3 mg/L) and reduced at relative high pyrene concentrations treatments (> 3 mg/L), no significant changes of ryegrass biomass were found in all

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y5090001); 浙江省教育厅资助项目(Y200906259)

收稿日期: 2010-10-30; 修订日期: 2011-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liaomin@zju.edu.cn

pyrene stress treatment ($P<0.05$). At the pyrene spiked levels of 3 mg/L, 6 mg/L and 9 mg/L pyrene stress, the organic acids, including oxalic acid, lactic acid and malic acid, were found in the root exudates of ryegrass, such component of organic acid in root exudates of ryegrass was stabilization in all pyrene stress treatment, but oxalic acid was the main composition of organic acid in root exudates of ryegrass, with a percentage greater than 97%, and its content increased significantly with the increase of pyrene spiked level ($P<0.05$). Compared with control treatment (0 mg/L), oxalic acid content in root exudates of ryegrass increased from 24.6 mg/kg to 53.7 mg/kg in 9 mg/L pyrene treatment. The content of carbohydrate in root exudates of ryegrass raised appreciably at relative low pyrene spiked level (<3 mg/L) and reduced at relative high pyrene spiked level (>3 mg/L), the highest carbohydrate content in root exudates took on 3 mg/L pyrene treatment, but the differences of carbohydrate content in root exudates were insignificant in all pyrene treatments ($P<0.05$). Total amount of amino acids secreted increased significantly with the pyrene concentration increase, which were 1.37, 2.02 and 2.65 times than that of control treatment (0 mg/L) under 3 mg/L, 6 mg/L and 9 mg/L pyrene treatment, respectively. Data also indicated that 19 types of familiar amino acids were found in root exudates of ryegrass and the component of amino acids in root exudates of ryegrass was stabilization under all pyrene stress treatments, but the each content of 19 types of amino acids examined was different in those root exudates under the stress of different pyrene concentration. The contents of all amino acid in those root exudates was increased with the pyrene concentration increase, especially, the contents secreted of threonine, serine, proline, glycine, alanine, histidine and ornithine increased significantly among 19 types of amino acids and the differences were significantly among different treatments with different pyrene concentration ($P<0.05$).

Key Words: pyrene; ryegrass; root exudates

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类环境中普遍存在的典型的持久性有机污染物。PAHs 有显著的致癌致畸效应,严重影响人类健康和生态环境,受到社会的广泛关注,16 种 PAHs 被美国国家环保署列为优先控制污染物黑名单^[1]。水溶性差、辛醇分配系数高,常被吸附于土壤颗粒上,土壤就成为环境中多环芳烃的储库和中转站^[2]。土壤环境中 PAHs 的迁移规律、生态效应、污染的修复治理等已成为污染土壤修复研究领域的热点^[3-5]。

已有的研究表明植物的存在能够加快土壤中 PAHs 的去除^[6-9],植物修复已成 PAHs 污染土壤治理的重要手段之一。但是由于 PAHs 的高疏水性,植物直接吸收和积累作用在 PAHs 污染的修复中作用并不大^[10],而是根系分泌物发挥了巨大的作用,根系分泌物所营造的根际微域环境是有机污染物有效性和毒性得以快速消减的重要原因^[6, 11]。研究表明,根际环境中伴随植物根系生长而主动释放的根系分泌物为根际微生物提供营养,增强微生物活性和提高微生物多样性,促进根际微生物对 PAHs 的降解^[3, 12-14]。因此探明植物根系分泌物释放对 PAHs 胁迫响应的生理生态特征,对于研究植物修复中根际微生物的种群分布变化及其促进 PAHs 降解的机理具有重要意义。目前对根分泌物影响 PAHs 降解的研究集中于根系分泌物提高土壤微生物活性、促进根际微生物降解 PAHs 方面,相对而言有关 PAHs 胁迫下植物根系分泌物组成及数量上的生理生态变化的研究却较少。

芘是 PAHs 中 4 个苯环的代表物,在环境中广泛存在,是检测 PAHs 污染的指示物,因此,本研究选取芘作为 PAHs 的代表物,以 PAHs 修复研究中常用的黑麦草为材料研究了 PAHs 胁迫下植物根系低分子量有机分泌物的变化特征,为进一步深入探讨 PAHs 的植物根际修复机理提供依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试药品芘(Pyrene,纯度 $>98\%$),为 Aldrich 公司产品。供试植物为多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)。

1.2 水培试验

用 3% 过氧化氢溶液对黑麦草种子消毒 20 min, 蒸馏水冲洗干净后于烧杯中浸泡吸胀 24 h, 转入培养皿中催芽, 催芽后的种子放入温室中育苗, 预培养 15 d 左右, 选择长势一致的植株转入烧杯中。移苗后的植株先用蒸馏水缓苗 2 d, 并测定其生物量。然后更换为半量 Hogland 营养液, 培养 3 d 后, 将营养液更换为含系列浓度芘的半量 Hogland 营养液, 进行芘胁迫处理。系列浓度芘的半量 Hogland 营养液配置如下: 现将芘先用丙酮溶解成母液, 然后将母液按比例加入配好的半量 Hogland 营养液中, 使培养液中芘的质量浓度分别为 0、3、6、9 mg/L, 同时将培养液中丙酮的质量百分数调节到 0.1% 以及 pH 值调节至 5.5, 并在超声波清洗仪中处理 2 h, 使液体得到充分的混匀, 处理时保持水浴温度低于 40 °C。为排除助溶剂丙酮对植物的影响, 胁迫试验中另设只含有 0.1% 丙酮的培养液对照和纯培养液对照, 试验中发现含有 0.1% 丙酮的培养液基本没有对黑麦草生长产生影响。每只水培试验烧杯内盛装 300 mL 培养液, 烧杯用锡纸包裹避光以防止芘的光降解。每天补充营养液维持液面高度。

1.3 根系分泌物的收集

根系分泌物采用溶液培养法收集^[15]。即, 幼苗经胁迫处理 6 d 后, 由胁迫液中移出, 用超纯水洗去根表面吸附的物质, 同时小心去除胚乳, 不要伤根, 然后吸去根表面的水份, 将根浸入装有 5 mL 超纯水的试管中, 每管放 10 株苗, 用锡纸包裹试管, 保证根部避光, 在玻璃温室中, 于光照条件下收集根系分泌物, 2 h 后, 取出植株, 定容至 5 mL, 过 0.45 μm 膜后保存于冷冻室内, 用于测定根系分泌物中常见的低分子量有机酸、总糖、氨基酸组分的含量^[16]。收集完分泌物的植株在超纯水中洗净, 分割根部 and 地上部分, 分别用于生物量测定。

1.4 幼苗生物量以及根系分泌物组分含量测定

幼苗生物量分为根部和地上部分, 生物量测定采用烘干法^[17]。

收集到的根系分泌物溶液过 0.45 μm 膜后, 直接进行相关分析, 根系分泌物中低分子量有机酸分析采用 HPLC 进行分析^[18], 仪器为 Agilent 1100 色谱仪, XB-C18 色谱柱, 紫外检测器, 检测波长为 210 nm, 流动相为 0.025 mol/L 的 $\text{H}_3\text{PO}_4\text{-KH}_2\text{PO}_4$ 缓冲液 (pH 2.3), 流速为 0.7 mL/min, 进样量为 20 μL , 柱温 30 °C。根系分泌物中总糖含量采用蒽酮比色法^[19]。根系分泌物中氨基酸组成采用日立 L-8900 型氨基酸自动分析仪进行测定^[20]。

1.5 数据处理

每组处理设 3 个重复, 实验数据基本处理采用 Microsoft Excel 2003。处理组间的差异显著性采用 LSD 法用数据处理软件 SPSS 11.5 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 芘胁迫对黑麦草生物量的影响

经测定, 胁迫处理前黑麦草每株的生物量茎叶为 (0.0257 ± 0.0023) g/株, 根为 (0.0051 ± 0.0012) g/株。图 1 是黑麦草经过芘胁迫处理 6 d 后, 不同芘浓度处理下的植株生物量, 与胁迫处理前相比, 6 d 胁迫试验后各处理的植株生物量变化增加显著, 如空白的生物量增加了近 40% (茎叶为 (0.0361 ± 0.0033) g/株, 根为 (0.0083 ± 0.0011) g/株)。胁迫试验中观察发现, 黑麦草在所用芘胁迫浓度下, 除了生物量略有变化, 无其他表观受害症状, 显示出较强的耐受能力。由图 1 可知, 根和地上部分生物量随升高而发生的变化趋势相同, 均表现为芘胁迫浓度 < 3 mg/L 时, 根和地上部分生物量随芘胁迫浓度升高而升高, 之后相应的根和地上部分生物

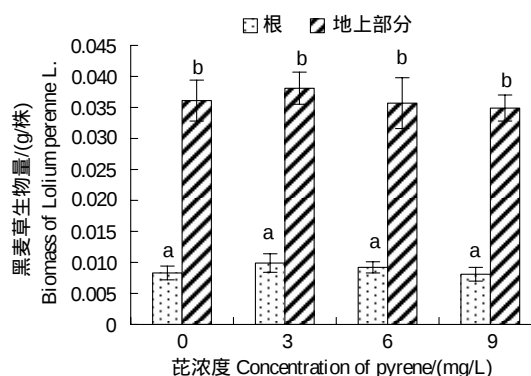


图 1 芘胁迫对黑麦草生物量的影响

Fig. 1 Effects of pyrene stress on the biomass of *Lolium perenne* L.

图中相同字母代表 $P < 0.05$ 水平差异不显著; 图柱线为误差线

量随芘胁迫浓度升高而略有减少。在 3 mg/L 芘处理时, 黑麦草根和地上部分的干物质量均达到最大, 但试验条件下黑麦草的生物量与对照相比总体无显著差异 ($P < 0.05$), 即使在最高芘胁迫浓度 9 mg/L 下。

2.2 芘胁迫对黑麦草根分泌低分子量有机酸的影响

为了解黑麦草根分泌物中有机酸组成, 本研究采用根系分泌物中有机酸的常用方法 HPLC 法, 采用以草酸、酒石酸、苹果酸、乳酸、乙酸、顺丁烯二酸、柠檬酸、反丁烯二酸 8 种分子量相对小且在植物根系分泌物中常见的有机酸作为标样^[16], 对黑麦草根分泌物中的低分子量有机酸进行组分定性。经过与标样比对, 发现黑麦草的根系分泌物低分子量有机酸组分主要由草酸、乳酸和苹果酸组成, 其中, 草酸是其主要成分, 草酸的质量百分含量超过了总有机酸的 97%, 并且在各芘浓度胁迫处理下, 根系分泌低分子量有机酸的组成基本不变。鉴此, 本研究以草酸作为根系分泌的低分子量有机酸代表, 定量分析了不同芘浓度胁迫下草酸分泌量的变化, 结果见图 2。由图 2 可知, 随着芘胁迫浓度的增加, 黑麦草根分泌的草酸量逐渐增加, 变化显著 ($P < 0.05$)。草酸分泌量从 0 mg/L 芘胁迫处理时的 24.6 mg/kg 升高至 9 mg/L 芘胁迫处理时的 53.7 mg/kg, 差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 芘胁迫对黑麦草根分泌总糖的影响

图 3 是芘胁迫对黑麦草根分泌总糖的影响, 由图 3 可看出, 芘胁迫下, 黑麦草根分泌物中总糖含量随芘胁迫浓度变化趋势呈现出与有机酸不同的变化趋势, 但与黑麦草生物量变化趋势一致。即总糖分泌量在芘胁迫浓度 < 3 mg/L, 总糖分泌量随芘胁迫浓度升高而略微升高, 之后相应的总糖分泌量随芘胁迫浓度升高而逐渐减少。在 3 mg/L 芘处理时, 黑麦草根分泌总糖分泌量达到相对最大。但是试验条件下, 与对照组黑麦草根分泌总糖分泌量相比, 芘胁迫浓度在 3 mg/L、6 mg/L 和 9 mg/L 时, 根系总糖分泌量差异不显著 ($P > 0.05$)。

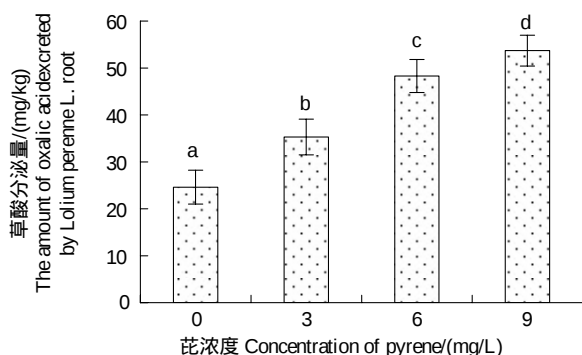


图 2 芘胁迫对黑麦草草酸分泌的影响

Fig. 2 Effect of pyrene stress on the amount of oxalic acid excreted by *Lolium perenne* L. root

不同字母代表 $P < 0.05$ 水平差异显著; 图柱线为误差线

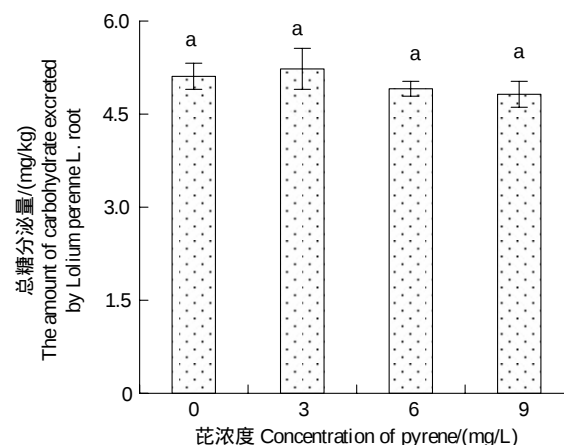


图 3 芘胁迫对黑麦草总糖分泌的影响

Fig. 3 Effect of pyrene stress on the amount of carbohydrate excreted by *Lolium perenne* L. root

相同字母代表 $P < 0.05$ 水平差异不显著; 图柱线为误差线

2.4 黑麦草根分泌的氨基酸

由表 1 可以发现, 在不同质量浓度芘处理下, 黑麦草根分泌氨基酸的分泌总量与草酸分泌量的变化趋势类似, 即氨基酸分泌总量随着芘胁迫浓度的增加而显著增多 ($P < 0.05$), 芘胁迫浓度在 3、6 mg/L 和 9 mg/L 时, 根系氨基酸的分泌总量分别是空白 (无芘处理) 的 1.37、2.02 倍和 2.65 倍 (表 1), 可见芘胁迫处理浓度增加促进了黑麦草根分泌氨基酸的分泌。对常见的 19 种氨基酸组分分析结果显示, 芘胁迫处理浓度变化对黑麦草根分泌的氨基酸组成无影响, 但对具体的不同氨基酸成分的分泌量影响明显, 且对不同氨基酸组分分泌量的影响各不相同 (表 1)。同时由表 1 可知, 苏氨酸、丝氨酸、脯氨酸、甘氨酸、丙氨酸、亮氨酸、组氨酸和鸟氨酸的分泌量随着芘胁迫处理浓度的增大显著增多, 分泌量在 4 个处理之间的差异显著 ($P < 0.05$)。其他 11 种氨

氨基酸的分泌量随着茈葜迫处理浓度的提高而总体增加,但存在波动,不同处理之间分泌量的差异性也存在波动($P>0.05$),但与对照相比,茈葜迫处理浓度为 9 mg/L 时,黑麦草根系这 11 种氨基酸分泌量大大增加,且分泌量间存在差异显著($P<0.05$)(表 1)。综合上述结果,说明黑麦草根系分泌氨基酸的活动显著受到茈葜迫处理的影响。

表 1 茈对黑麦草根系分泌氨基酸的影响

Table 1 Effect of pyrene stress on amino acid excreted by *Lolium perenne* L. root/(mg/kg)

氨基酸 Amino acid	茈葜迫处理 Pyrene stress treatment			
	0	3	6	9
天门冬氨酸	15.37±1.12b	15.47±1.34b	24.31±1.78a	30.95±2.53c
苏氨酸	7.36±0.43a	19.76±1.77c	31.05±2.34b	39.52±3.74d
丝氨酸	34.84±2.89c	70.91±5.32a	111.44±8.31d	141.83±9.23b
谷氨酸	12.24±1.03a	13.38±0.89a	21.02±1.85c	26.75±1.51b
脯氨酸	11.53±1.19a	14.81±0.77b	23.28±1.43c	29.63±1.37d
甘氨酸	3.40±0.14c	6.70±0.23a	10.53±0.45d	13.41±0.79b
丙氨酸	4.10±0.21d	18.15±0.94b	28.51±1.65c	36.29±1.85a
胱氨酸	13.98±0.97c	5.97±0.21a	8.26±0.53a	11.93±1.32b
缬氨酸	14.03±1.17a	15.76±1.21a	21.82±0.79c	31.51±1.77d
甲硫氨酸	5.47±0.63a	4.11±0.37c	5.68±0.43a	8.21±0.46b
异亮氨酸	7.60±0.67d	6.82±0.51d	9.45±0.78c	13.64±1.14a
亮氨酸	4.45±0.46a	5.88±0.42b	8.15±0.61c	11.77±0.73d
酪氨酸	3.32±0.29a	3.46±0.25a	4.27±0.31d	6.05±0.27c
苯丙氨酸	10.8±0.87b	9.60±0.36b	11.86±0.88a	16.81±1.34c
赖氨酸	3.59±0.27a	3.02±0.17c	3.74±0.13a	5.29±0.33b
组氨酸	2.78±0.33d	3.2±0.15c	3.95±0.29a	5.59±0.65b
精氨酸	4.07±0.51c	3.69±0.21b	3.93±0.41b	5.42±0.47a
γ-氨基丁酸	12.51±1.02a	15.00±1.03c	15.83±1.17c	21.92±2.21b
鸟氨酸	1.44±0.11d	1.53±0.13b	1.61±0.16a	2.23±0.23c
总量	172.87±14.31a	237.22±16.28b	348.66±24.31c	458.73±31.94d

同一行不同字母代表 $P<0.05$ 水平差异显著; ±表示标准偏差

3 讨论

植物根系分泌物中低分子量有机分泌物(包括有机酸、糖类以及氨基酸)是其重要组成部分,这些低分子量有机分泌物的释放为植物根际微生物提供了大量容易被利用的有机碳,有利于微生物的生长和形成特殊的区系,这一特征往往使得根系分泌物所营造的根际微域环境有利于有机污染物的快速消减^[6, 11]。

许多研究发现,植物在受到一定有害物质毒害时,根系分泌物组成成分的浓度会发生变化,增加根系分泌物中部分组分的产生和累积^[21-23],这主要是植物对有害物质毒害的应激反应,通过增加根系分泌物调节根际微域环境,使得根际微域环境利于有害物质的分解^[24-27]。本研究发现,随着有机物茈葜迫处理浓度的提高,黑麦草根系分泌物中有机酸、氨基酸的分泌会显著增加(图 2,表 1)。其中草酸分泌量从 0 mg/L 茈处理时的 24.6 mg/kg 升高至 9 mg/L 茈处理时的 53.7 mg/kg(图 2),差异显著($P<0.05$);茈葜迫浓度在 3、6 mg/L 和 9 mg/L 时,根系氨基酸的分泌总量分别是空白(无茈处理)的 1.37、2.02 倍和 2.65 倍(表 1)。这可能是,黑麦草为了提高自身对茈葜迫的适应性,通过根系分泌的有机酸和氨基酸的增加、提高土壤中茈的生物有效性,从而有利于帮助根际微生物对茈的清除。这一结果与许超和夏北成研究茈对玉米根系分泌氨基酸影响的结果一致^[24],相似结果在王大娟等人关于多氯代有机污染物胁迫下植物(黑麦草和大豆)根系分泌物的变化以及张玲和王焕校关于镉胁迫下小麦根系分泌物变化的研究中得到证实^[23, 25]。同时在一定茈葜迫处理浓度范围内,茈葜迫也可以略微促进黑麦草根系低分子量分泌物糖类的分泌(图 3)。即总糖分泌量在茈葜迫浓度<3

mg/L 时,总糖分泌量随苳胁迫浓度升高而略微升高,之后相应的总糖分泌量随苳胁迫浓度升高而逐渐减少。相似的结果在万大娟等人关于多氯代有机污染物胁迫下植物(黑麦草和大豆)根系分泌物的变化的研究中得到证实^[25],其变化主要取决于污染物胁迫对植株生长趋势的影响^[25]。

此外已有研究表明,根系分泌物促进根际有机污染物的清除的途径主要有:(1)根系分泌的酶直接参与有机污染物降解^[26];(2)根系分泌物能为根际微生物提供充足的营养,增加根际微生物的数量、提高微生物降解活性,从而有利于降解根际的有机污染物^[26];(3)根系分泌物,特别是根系分泌的有机酸还可以改变土壤特性、提高有机污染物的生物有效性,从而有利于帮助根际微生物对有机污染物的清除^[27]。因此,从本研究结果看,作为根系分泌物的主要组分低分子有机酸和氨基酸随着有机物苳胁迫处理浓度的提高而显著增加,由此可以推测,黑麦草根系的这两类分泌物的变化不仅可对根际微生物产生积极影响,而且可对有机污染物苳在土壤中的吸附-解吸附平衡产生重要的影响,从而有利于土壤中苳的消除。

4 结论

(1)黑麦草对苳具有较强的耐受能力,培养液中苳浓度达到 9 mg/L 时仍生长良好,生物量无显著变化。

(2)黑麦草根系低分子量有机酸的分泌总量随苳胁迫处理浓度升高而显著上升,但有机酸组成无明显变化。而试验条件下,即苳胁迫浓度在 3、6 mg/L 和 9 mg/L 时,根系总糖分泌量随着苳胁迫处理浓度升高而呈现先略微上升后下降的趋势,但分泌量差异不显著。

(3)黑麦草根系氨基酸分泌总量随着苳胁迫处理浓度的增加而显著增多,苳胁迫浓度在 3、6 mg/L 和 9 mg/L 时,根系氨基酸的分泌总量分别是空白的 1.37、2.02 倍和 2.65 倍。但根系分泌的氨基酸组成无明显变化,19 种氨基酸分泌数量的变化情况却不相同,分泌量总体均随着苳胁迫处理浓度的提高而增加,其中苏氨酸、丝氨酸、脯氨酸、甘氨酸、丙氨酸、亮氨酸、组氨酸和鸟氨酸的分泌量显著增多,差异显著($P < 0.05$)。

References:

- [1] Jian Y, Wang L, Fu P P, Yu H T. Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list. *Mutation Research*, 2004, 557(1): 99-108.
- [2] Duan Y H, Tao S, Wang X J, Li B G, Zhu L Z, Luo Y M. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the topsoil of Tianjin. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2006, 27(3): 524-527.
- [3] Yoshitomi K J, Shann J R. Corn (*Zea mays* L.) root exudates and their impact on ¹⁴C-pyrene mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(12/13): 1769-1776.
- [4] Corgié S C, Joner E J, Leyval C. Rhizospheric degradation of phenanthrene is a function of proximity to roots. *Plant and Soil*, 2003, 257(1): 143-150.
- [5] Xing W Q, Luo Y M, Li L P, Liu S L, Ding K Q. Rhizosphere remediation from persistent organic pollutants and research approaches. *Soils*, 2004, 36(3): 258-263.
- [6] Wilson S C, Jones K C. Bioremediation of soil contaminated with polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs): a review. *Environmental Pollution*, 1993, 81(3): 229-249.
- [7] Joner E J, Leyval C. Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dissipation in two industrial soils and the impact of arbuscular mycorrhiza. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(11): 2371-2375.
- [8] Gao Y Z, Ling W T, Wong M H. Plant-accelerated dissipation of phenanthrene and pyrene from water in the presence of a nonionic-surfactant. *Chemosphere*, 2006, 63(9): 1560-1567.
- [9] Sun T H, Song Y F, Xu H X, Zhang H R, Yang G F. Plant bioremediation of PAHs and mineral oil contaminated soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(2): 225-229.
- [10] Simonich S L, Hites R A. Organic pollutant accumulation in vegetation. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29(12): 2905-2914.
- [11] Meharg A A, Cairney J W G. Ectomycorrhizas-extending the capabilities of rhizosphere remediation? *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11/12): 1475-1484.
- [12] Miya R K, Firestone M K. Enhanced phenanthrene biodegradation in soil by slender oat root exudates and root debris. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(6): 1911-1918.
- [13] Kim Y B, Park K Y, Chung Y, Oh K C, Buchanan B B. Phytoremediation of anthracene contaminated soils by different plant species. *Journal of*

Plant Biology, 2004, 47(3): 174-178.

- [14] Rentz J A, Alvarez P J J, Schnoor J L. Benzo[a] pyrene co-metabolism in the presence of plant root extracts and exudates: implications for phytoremediation. Environmental Pollution, 2005, 136(3): 477-484.
- [15] Mao D R, Shen J B. Research Methods in Plant Nutrition. Second Edition. Beijing: China Agricultural University Press, 2005.
- [16] Liu J, Wen X S, Lang A D. Progress in components and effects of plant root exudates. Food and Drug, 2007, 9(3): 63-65.
- [17] Bao S D. Analysis of Soil and Agricultural Chemistry. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [18] Wang P, Zhou R. Determination of organic acids exuded from plant roots by high performance liquid chromatography. Chinese Journal of Chromatography, 2006, 24(3): 239-242.
- [19] Xiong Q E. The Experimental Guide for Plant Physiology. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003.
- [20] Qu Y, Xu L C. Determination of amino acid in *Protuber a borealis* Imai. Journal of Anhui Agricultural Science, 2010, 38(12): 6527-6527, 6550-6550.
- [21] Ma J F, Zheng S J, Matsumoto H. Specific secretion of citric acid induced by Al stress in *Cassia tora* L. Plant Cell Physiology, 1997, 38(9): 1019-1025.
- [22] Li Q, Chen Y X, Chen H M, Zheng C R. The ecological effects of Pb and Cd on the root activities of wheat. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(4): 634-638.
- [23] Zhang L, Wang H X. Changes of root exudates to cadmium stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(4): 496-502.
- [24] Xu C, Xia B C. Effect of pyrene on amino acid in root exudates of maize (*Zea mays* L.). Ecology and Environment, 2009, 18(1): 172-175.
- [25] Wan D J, Jia X S, Chen X. Effects of PCOPs on some root exudates of plants. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, 46(1): 110-113, 118-118.
- [26] Kuang Y W, Wen D Z, Zhong C W, Zhou G Y. Root exudates and their roles in phytoremediation. Chinese Journal of Plant Ecology, 2003, 27(5): 709-717.
- [27] Singh O V, Jain R K. Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, 63(2): 128-135.

参考文献:

- [2] 段永红, 陶澍, 王学军, 李本纲, 朱利中, 骆永明. 天津表层土壤中多环芳烃的主要来源. 环境科学, 2006, 27(3): 524-527.
- [5] 刑维芹, 骆永明, 李立平, 刘世亮, 丁克强. 持久性有机污染物的根际修复及其研究方法. 土壤, 2004, 36(3): 258-263.
- [9] 孙铁珩, 宋玉芳, 许华夏, 张海荣, 杨桂芬. 植物法生物修复 PAHs 和矿物油污染土壤的调控研究. 应用生态学报, 1999, 10(2): 225-229.
- [15] 毛达如, 申建波. 植物营养研究方法 (第二版). 北京: 中国农业大学出版社, 2005.
- [16] 刘军, 温学森, 郎爱东. 植物根系分泌物成分及其作用的研究进展. 食品与药品, 2007, 9(3): 63-65.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [18] 王平, 周荣. 高效液相色谱法测定植物根系分泌物中的有机酸. 色谱, 2006, 24(3): 239-242.
- [19] 熊庆娥. 植物生理学实验教程. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.
- [20] 曲宜, 徐凌川. 泰山块菌氨基酸成分测定. 安徽农业科学, 2010, 38(12): 6527-6527, 6550-6550.
- [22] 林琦, 陈英旭, 陈怀满, 郑春荣. 小麦根际铅、镉的生态效应. 生态学报, 2000, 20(4): 634-638.
- [23] 张玲, 王焕校. 镉胁迫下小麦根系分泌物的变化. 生态学报, 2002, 22(4): 496-502.
- [24] 许超, 夏北成. 苡对玉米根系分泌氨基酸的影响. 生态环境学报, 2009, 18(1): 172-175.
- [25] 王大娟, 贾晓珊, 陈娴. 多氯代有机污染物胁迫下植物某些根系分泌物的变化. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(1): 110-113, 118-118.
- [26] 旷远文, 温达志, 钟传文, 周国逸. 根系分泌物及其在植物修复中的作用. 植物生态学报, 2003, 27(5): 709-717.

CONTENTS

The community structure of endophytic bacteria in different parts of huanglongbing-affected citrus plants	LIU Bo, ZHENG Xuefang, SUN Daguang, et al (7325)
A research on the response of the radial growth of <i>Pinus koraiensis</i> to future climate change in the XiaoXing'AnLing	YIN Hong, WANG Jing, LIU Hongbin, et al (7343)
Efficiency and kinetic process of nitrogen removal in a subsurface wastewater infiltration system (SWIS)	LI Haibo, LI Yinghua, SUN Tieheng, et al (7351)
Designing nature reserve systems based on ecosystem services in Hainan Island	XIAO Yi, CHEN Shengbin, ZHANG Lu, et al (7357)
Assessing ecological services value of herbivorous wild animals in Changtang grassland: a case study of Tibetan antelope	LU Chunxia, LIU Ming, FENG Yue, et al (7370)
Spatial characteristics analysis of ecological system service value in QianJiang City of Hubei Province	XU Beishen, ZHOU Yong, XU Li, et al (7379)
Landscape pattern change and its influence on soil carbon pool in Napahai wetland of Northwestern Yunnan	LI Ningyun, YUAN Hua, TIAN Kun, et al (7388)
Multi-scenarios analysis for wetlands ecosystem conservation based on connectivity: a case study on HuangHuaiHai Region, China ...	SONG Xiaolong, LI Xiaowen, ZHANG Mingxiang, et al (7397)
The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau	HAN Daorui, CAO Guangmin, GUO Xiaowei, et al (7408)
The relations of spectrum reflectance with inhomogeneous factors and albedo parameterization ...	ZHANG Jie, ZHANG Qiang (7418)
Groundwater ecological sensitivity assessment in the lower Liaohe River Plain based on GIS technique	SUN Caizhi, YANG Lei, HU Dongling (7428)
Ecological sensitivity of Xiamen City to land use changes	HUANG Jing, CUI Shenghui, LI Fangyi, et al (7441)
Investigation and analysis on situation of ecotourism development in protected areas of China	ZHONG Linsheng, WANG Jing (7450)
Handicapping male-cheaters by stable mate relationship in yellow-bellied prinia, <i>Prinia flaviiventris</i>	CHU Fuyin, TANG Sixian, PAN Hujun, et al (7458)
Effects of dietary protein content and food restriction on the physiological characteristics of female <i>Microtus fortis</i>	ZHU Junxia, WANG Yong, ZHANG Meiwen, et al (7464)
Predator-prey system with positive effect for prey	QI Jun, SU Zhiyong (7471)
Volatile constituents of four moraceous host plants of <i>Apriona germari</i>	ZHANG Lin, WANG Baode, XU Zhichun (7479)
Relationship between adult emergence of <i>Massicus raddei</i> (Coleoptera: Cerambycidae) and temperature and relative humidity	YANG Zhongqi, WANG Xiaoyi, WANG Bao, et al (7486)
Nest site selection and reproductive success of <i>Parus varius</i> in man-made nest boxes	LI Le, WAN Dongmei, LIU He, et al (7492)
A study on bio-ecology of the stopover site of waders within China's Yalu River estuary wetlands	SONG Lun, YANG Guojun, LI Ai, et al (7500)
The spatial-temporal change variations of temperature in Xilinguole steppe zone	WANG Haimei, LI Zhenghai, WU Lan, et al (7511)
The growth and photosynthetic responses of <i>Cleyera japonica</i> Thunb. seedlings to UV-B radiation stress	LAN Chunjian, JIANG Hong, HUANG Meiling, et al (7516)
Photosynthesis-transpiration coupling mechanism of wheat and maize during daily variation	ZHAO Fenghua, WANG Qiufeng, WANG Jianlin, et al (7526)
Comparison of the methods using stable hydrogen and oxygen isotope to distinguish the water source of <i>Nitratia Tangutorum</i>	GONG Guoli, CHEN Hui, DUAN Deyu (7533)
Effects of cold weather on seedlings of three mangrove species planted in the Min River estuary during the 2010 winter	YONG Shiquan, TONG Chuan, ZHUANG Chenhui, et al (7542)
Correlation between ecological factors and ginsenosides	XIE Caixiang, SUO Fengmei, JIA Guanglin, et al (7551)
Effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of ryegrass (<i>Lolium perenne</i> L.)	XIE Xiaomei, LIAO Min, YANG Jing (7564)
Isolation of phosphate solubilizing fungus (<i>Aspergillus niger</i>) from <i>Caragana</i> rhizosphere and its potential for phosphate solubili- zation	ZHANG Lizhen, FAN Jingjing, NIU Wei, et al (7571)
Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near -surface soil hydraulic conditions on black soil slope	AN Juan, ZHENG Fenli, LI Guifang, et al (7579)
Emergy analysis of coal-fired power generation system and construction of new emergy indices	LOU Bo, XU Yi, LIN Zhenguan (7591)
Review and Monograph	
The impact of forest vegetation change on water yield in the subalpine region of southwestern China	ZHANG Yuandong, LIU Shirong, et al (7601)
Reviews on spatial pattern and sand-binding effect of patch vegetation in arid desert area	HU Guanglu, ZHAO Wenzhi, WANG Gang (7609)
Sustainable management on pests by agro-biodiversity	GAO Dong, HE Xiahong, ZHU Shusheng (7617)
Scientific Note	
Characteristics of organic carbon and nutrient content in five soil types in Honghu wetland ecosystems	LIU Gang, SHEN Shouyun, YAN Wende, et al (7625)
Effects of cypermethrin and deltamethrin on reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	HUANG Lin, LIU Changli, WEI Chuanbao, et al (7632)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 24 期 (2011 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 24 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元