

不同氮形态对铅胁迫下苏丹草根系形态及铅吸收富集特征的影响

袁菊红¹, 胡绵好², 殷乾亮², 陈 祎²

(1. 江西财经大学 园林系, 江西 南昌 330032; 2. 江西财经大学 资源环境系, 江西 南昌 330032)

摘 要: 为进一步研究富营养化水体中不同氮形态和重金属对修复植物的交互作用, 通过水培试验研究了水体中不同形态氮培养对铅胁迫下苏丹草根系形态及其对铅吸收富集的影响。结果表明, 水体 Pb(0.5 mmol/L) 污染时, 不同氮形态培养虽然对苏丹草根系形态有一定的影响, 但没达到显著性差异, 然而对苏丹草根系中丙二醛(MDA) 含量及其各器官生物量的影响达显著差异($p < 0.05$)。NH₄-N 营养液培养的苏丹草根系 MDA 含量比 NO₃-N、NO₂-N 营养液培养的分别高出了 4.6 和 1.6 倍; NO₃-N 营养液培养的苏丹草根、茎、叶生物量比 NH₄-N 营养液培养的分别高出了 28.7%、19.6% 和 23.9%。比 NO₂-N 营养液培养的高出 37.6%、30.9% 和 36.7%。水体 Pb(0.5 mmol/L) 污染时, NO₃-N 营养液培养的苏丹草根中 Pb 浓度明显比 NH₄-N 营养液培养的高出 2 倍多, 且其地下富集系数最大; NO₂-N 营养液培养的苏丹草茎中 Pb 浓度明显比 NH₄-N 营养液培养的高出近 8 倍, 且其对铅的转运能力影响作用最强。这表明受重金属污染的富营养化水体中如存在不同形态氮, 在一定程度上还有利于削弱重金属对修复植物的毒性作用, 增大水体对某些重金属的环境容量。

关键词: 氮形态; 铅胁迫; 苏丹草

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)02-0069-05

中图分类号: X174

Effects of Nitrogen of Different Forms on *Sorghum Sudanense* Root Morphology and Characteristics of Lead Absorption and Accumulation Under Lead Stress

YUAN Ju-hong¹, HU Mian-hao², YING Qian-liang², CHEN Yi²

(1. Department of Landscape Architecture, Jiangxi University of Finance & Economics, Nanchang, Jiangxi 330032, China;

2. Department of Resource Environment, Jiangxi University of Finance & Economics, Nanchang, Jiangxi 330032, China)

Abstract: Effect of nitrogen of different forms on *Sorghum sudanense* root morphology and lead(Pb) absorption and accumulation under Pb stress were studied using hydroponics experiment, addressing the interaction between the plant and different nitrogen forms and heavy metals for phytoremediation application. The results indicate that the different N forms had some insignificant effects on the root morphology of *S. sudanense* with Pb pollution level of 0.5 mmol/L. However, the MDA(Malon dialdehyde) contents of the roots and the biomass of each organ of *S. sudanense* were significantly($p < 0.05$) influenced: the MDA content of *S. sudanense* root in the NH₄-N culture solution was 4.6 and 1.6 times higher than those in NO₃-N and NO₂-N culture solutions, and the root, stem and leaf biomasses in the NO₃-N culture solution were higher than those in NH₄-N culture solution by 28.7%, 19.6% and 23.9%, and higher than those in NO₂-N culture solution by 37.6%, 30.9% and 36.7%, respectively. With Pb pollution level of 0.5 mmol/L, the root in NO₃-N treatment had the largest enrichment coefficients and Pb concentration that was over 2 times higher than that in NH₄-N culture solution, and Pb concentration of the stem in the NO₂-N treatment was over 8 times higher than that of NH₄-N treatment, indicating a high transport capability of Pb. This suggests that if

收稿日期: 2011-08-22

修回日期: 2011-09-11

资助项目: 江西省自然科学基金项目“鄱阳湖富营养化与重金属污染相互作用及生态效应研究”(2009GQH0027); 江西省教育厅项目“鄱阳湖富营养化水体中氮磷与重金属相互作用机理及其生态效应”(GJJ10115)

作者简介: 袁菊红(1975—), 女(苗族), 湖南省邵阳市人, 博士, 讲师, 主要从事植物资源分类及其应用等方面的研究。E-mail: yuanjuhong@sina.com。

通信作者: 胡绵好(1976—), 男(苗族), 湖南省怀化市人, 博士, 副教授, 主要从事环境植物修复及固体废弃物资源化利用等方面的研究。E-mail: yankeu@gmail.com。

the existence of different forms of nitrogen in the eutrophication water with heavy metal pollution may to some extent weaken the toxic effect of the heavy metal on the remediating plant, and increase the environment capacity of the water.

Keywords: nitrogen form; lead stress; *Sorghum sudanense*

随着人类对大自然的开发与利用,各种环境问题如酸雨、水土流失、沙尘暴、水体、大气及土壤污染等问题日益凸现,环境介质的污染问题越来越引起人们的重视。近年来,水体中由于植物营养元素氮磷含量等快速升高而导致世界各地河流、水库、湖泊等水域发生富营养化现象日益严重,再加之水体中难降解、易积累、毒性大的重金属元素存在,已对水产、人、畜、鸟类等生命健康带来了潜在危害。在富营养化的水体中,氮磷和重金属污染往往是同时存在并相互作用^[1-2],如水体中不同形态氮和磷均可明显降低水体中铜、锌、镉等重金属离子的生物毒性,可在一定程度上减轻重金属污染的危害^[3-4]。然而,有关水体中不同氮和磷形态对重金属生态效应影响的研究资料还不多见,因此,目前还不能完全肯定它们是否存在互作效应。鄱阳湖是我国最大的淡水湖,周边有德兴和永平两铜矿,是我国著名的大型铜业基地,但在其昌江与乐安河交汇后的饶河入湖口一带不仅水域完全达到富营养化水平^[5],且 Pb 的含量也超出地表Ⅲ类水的标准^[6],而有关该段水域中氮磷和重金属污染物之间的相互关系的报道却很少。因此,本研究从该段水域中氮磷和重金属污染出发,研究受铅污染水体中不同形态氮对苏丹草根系形态及铅吸收富集特征的影响,以期为自然污染条件下各种复合污染物生态毒性效应的监测及评价和对富营养化及重金属污染水体的修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及处理

苏丹草(*Sorghum sudanense*)又叫野高粱,是禾本科高粱属一年生牧草,喜温暖,不耐寒,但耐旱力较强,根系发达,吸收水肥能力强,对氮、磷肥料需要量高。该牧草株高茎细,再生性强,茎叶产量高且质地柔嫩,含有丰富的营养物质,适于青饲,也可用于调制干草或夏季放牧。本试验所用的苏丹草种子由江西鄱阳县宝龙生态农庄养殖场提供。

试验前先将苏丹草种子用温水浸泡 8 h,洗净后将种子摊放在铺有一层无纺布的搪瓷盘中,最后移至 28 °C 恒温箱中催芽。当苗长到 5 cm 时将它定植在预先打好孔(孔间距 0.1 m × 0.1 m)的 PVC 板上,每孔定植 15 棵(约 4 g),再将 PVC 板放到装有 5 L 自来水塑料桶中培养一段时间(约 14 d),使植物长出新根,以便更好地适应水环境。然后,把苏丹草幼苗移至不同氮形态的营养液中(营养液中氮的浓度根据文献[7]和历年鄱阳湖水体中氮的浓度进行调整),其中微量元素的组成一致(表 1),营养液的酸碱度调至 pH 值为 6.5。试验用 5 L 的塑料桶,每孔苗约 10 g,苏丹草生长 1 周后,进行加铅处理(0.5 mmol/L PbCl₂,该浓度参照文献[8—9]和鄱阳湖典型区域内水体中铅的浓度进行设置)。不同氮形态处理各重复 4 次,每隔 5 d 换 1 次营养液,同时加入 0.5 mmol/L PbCl₂,处理 25 d 后取样分析。试验前测定苏丹草根茎叶的鲜重。

表 1 不同形态氮素营养液配方

NH ₄ ⁺ —N 营养液		NO ₃ ⁻ —N 营养液		NO ₂ ⁻ —N 营养液		微量元素浓度	
化合物	用量/ (μmol·L)	化合物	用量/ (μmol·L)	化合物	用量/ (μmol·L)	化合物	用量/ (μmol·L)
NH ₄ Cl	1 000	KNO ₃	2 000	NaNO ₂	2000	H ₂ BO ₃	10
KH ₂ PO ₄	250	KH ₂ PO ₄	250	KH ₂ PO ₄	250	MnSO ₄ ·4H ₂ O	1.8
KCl	1 000					ZnSO ₄ ·7H ₂ O	10
MgCl ₂ ·6H ₂ O	500	MgCl ₂ ·6H ₂ O	500	MgCl ₂ ·6H ₂ O	500	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.31
CaCl ₂	1 000	CaCl ₂	1 000	CaCl ₂	1 000	NaMoO ₄ ·2H ₂ O	0.2
						Fe-EDTA	50

1.2 测定项目及方法

试验结束后分别测定苏丹草各部分鲜重,将苏丹草从不同处理中的培养液中取出,用不锈钢剪刀将根、茎、叶分离,用自来水冲洗干净,之后再用于离子

水冲洗 4 次,并用滤纸吸干水分,称量。根系体积用排水法测定,表面积测定采用吸附甲烯蓝法测定^[10],根系中丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定^[11]。苏丹草根、茎、叶各部分铅含量的测定:

将烘干的植物样品磨碎后,采用 $\text{HNO}_3\text{—HClO}_4$ 消化,然后采用澳大利亚 OptiMass 9500 型电感耦合等离子体—质谱(ICP—MS)进行测定。待测样品送至浙江大学教育部重点实验室的污染环境修复与生态健康实验室进行测试分析。生物富集系数($\text{BCF}_{\text{shoot/soil}}$ 和 $\text{BCF}_{\text{root/soil}}$)和转移系数(TF,translocation factors)计算参照文献[12]进行。

地上部富集系数: $\text{BCF}_{\text{shoot/water}} = C_{\text{地上部分}} / C_{\text{生长介质}}$

地下部富集系数: $\text{BCF}_{\text{root/water}} = C_{\text{地下部分}} / C_{\text{生长介质}}$

转运系数: $\text{TF} = C_{\text{地上部分}} / C_{\text{地下部分}}$

式中: C ——污染物的含量(mg/g)。

1.3 数据分析

采用 SPSS 12.0 和 Sigmaplot 10.0 软件对数据进行统计分析和制图。所有数据均以平均值 \pm 标准差($n = 4$)形式给出,试验结果用 LSD 检验 $p < 0.05$ 水平上的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同氮形态对铅胁迫下苏丹草根系及生物量的影响

0.5 mmol/L Pb 胁迫下,不同氮形态处理对苏丹草根系形态的变化没有显著性差异($p > 0.05$),但铵态氮($\text{NH}_4\text{—N}$)处理的苏丹草根系总吸收面积比硝态氮($\text{NO}_3\text{—N}$)和亚硝态氮($\text{NO}_2\text{—N}$)处理的稍高,而 $\text{NO}_3\text{—N}$ 处理的活跃吸收面积和根系比表面积比 $\text{NH}_4\text{—N}$ 和 $\text{NO}_2\text{—N}$ 处理的稍高(表2)。这一方面可能是由于根系清洗时对根系的伤害及测定时的差异所致;另一方面可能是由于铅和各处理间的交互作用所引起的。

表 2 不同氮形态对铅胁迫下苏丹草根系形态的影响

处理	总吸收面积/ m^2	活跃吸收面积/ m^2	比表面积
铵态氮	5.91 ± 0.16^a	2.31 ± 0.31^a	0.59 ± 0.01^a
硝态氮	5.78 ± 0.23^a	2.67 ± 0.05^a	0.74 ± 0.06^a
亚硝态氮	5.73 ± 0.51^a	2.59 ± 0.04^a	0.58 ± 0.02^a

注: 同列不同小写字母表示 $p < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

0.5 mmol/L Pb 胁迫下,不同氮形态处理对苏丹草根系中 MDA 的含量存在显著差异($p < 0.05$),其中以 $\text{NH}_4\text{—N}$ 处理的最高, $\text{NO}_3\text{—N}$ 处理的最低, $\text{NH}_4\text{—N}$ 处理下 MDA 的含量分别比 $\text{NO}_3\text{—N}$ 、 $\text{NO}_2\text{—N}$ 处理高出 4.6 和 1.6 倍(图 1)。由此可见,水体遭受 0.5 mmol/L Pb 污染时,如果富营养化水体中以 $\text{NH}_4\text{—N}$ 为主,则对苏丹草根系膜脂过氧化作用加剧,对苏丹草生长不利。

0.5 mmol/L Pb 胁迫下,不同氮形态对苏丹草根、

茎、叶生物量的影响达显著差异($p < 0.05$),其中 $\text{NO}_3\text{—N}$ 处理的苏丹草根、茎、叶生物量比 $\text{NH}_4\text{—N}$ 处理的分别高出 28.7%、19.6% 和 23.9%,比 $\text{NO}_2\text{—N}$ 处理的高出 37.6%、30.9% 和 36.7%(表 3)。这一方面可能是由于苏丹草是喜铵作物,当供应一定的铵时即能满足苏丹草的生长,但当浓度过高则会对苏丹草的生长产生了危害,如根系膜脂过氧化作用加剧;另一方面可能是由于在 $\text{NH}_4^+\text{—N}$ 营养液中氯离子浓度也较高,加之 Pb 的胁迫可能对苏丹草各器官的生物量也产生的一定的影响。

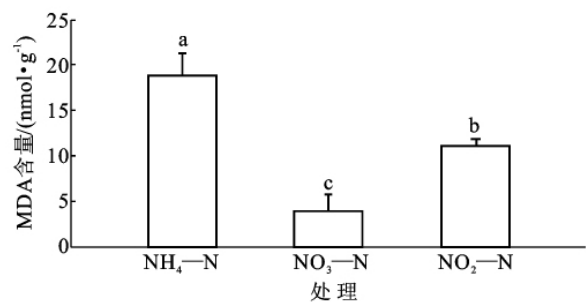


图 1 不同氮形态对铅胁迫下苏丹草根系中丙二醛(MDA)含量的影响

注: 柱状图上面的不同小写字母表示 $p < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

表 3 不同氮形态对铅胁迫下苏丹草生物量的影响 g

处理	根	茎	叶
铵态氮	10.24 ± 0.23^b	15.41 ± 0.12^b	13.12 ± 0.14^b
硝态氮	14.37 ± 0.41^a	19.16 ± 2.81^a	17.25 ± 0.14^a
亚硝态氮	8.96 ± 0.01^c	13.23 ± 0.13^c	10.92 ± 0.11^c

2.2 不同氮形态对铅胁迫下苏丹草吸收、转运、富集铅的影响

0.5 mmol/L Pb 胁迫下,不同氮形态对苏丹草各器官中 Pb 的浓度影响较为明显(图 2),其中 $\text{NH}_4\text{—N}$ 处理的苏丹草其叶片中 Pb 的浓度明显比 $\text{NO}_3\text{—N}$ 和 $\text{NO}_2\text{—N}$ 处理的要高($p < 0.05$),但各处理的叶中 Pb 浓度均较低($< 0.5 \text{ mg/g}$ 干重); $\text{NO}_3\text{—N}$ 处理的苏丹草根中 Pb 浓度明显比 $\text{NH}_4\text{—N}$ 和 $\text{NO}_2\text{—N}$ 处理的要高($p < 0.05$),高出 $\text{NH}_4\text{—N}$ 处理的 2 倍多;而 $\text{NO}_2\text{—N}$ 处理的苏丹草茎中 Pb 浓度明显比 $\text{NH}_4\text{—N}$ 和 $\text{NO}_3\text{—N}$ 处理的要高($p < 0.05$),高出 $\text{NH}_4\text{—N}$ 处理近 8 倍。说明不同氮形态的富营养化水体较单一形态氮的富营养化水体更能促进修复植物各器官对铅的累积。

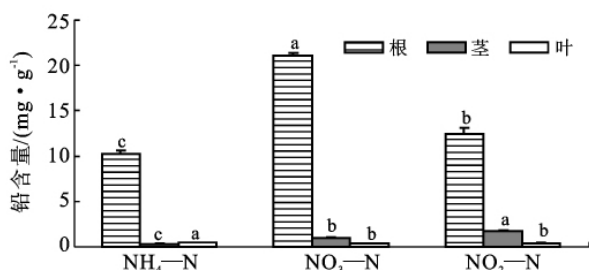


图 2 不同氮形态对铅胁迫下苏丹草各器官中铅浓度的影响

从表 4 可以看出, 水体中遭受 0.5 mmol/L Pb 污染时, 水体中不同氮形态对苏丹草地上部的 $BCF_{shoot/water}$ 值、地下部 $BCF_{root/water}$ 值和 TF 值影响达显著性差异 ($p < 0.05$), 且不同氮形态处理苏丹草 $BCF_{shoot/water}$ 值依次表现为: $NO_2-N > NO_3-N > NH_4-N$; 苏丹草 $BCF_{root/water}$ 值差异也较显著, 以 NO_3-N 处理的地下富集系数最大, 其次是 NO_2-N 处理, 以 NH_4-N 处理效果最差。水体 Pb 污染下, 以 NO_2-N 对铅的转运能力 TF 值最大, NH_4-N 和 NO_3-N 处理最小, 说明苏丹草以 NO_2-N 处理将二价铅转运到地上部分的能力最强, 而 NH_4-N 和 NO_3-N 处理的二价铅转运到地上部分的能力较弱; 同时还说明利用苏丹草修复 Pb 污染的富营养化水体, 如果富营养化水体中存在不同氮形态, 则苏丹草对水体中 Pb 的吸收、积累与转运存在很大的差异。

表 4 不同氮形态对铅胁迫下苏丹草 $BCF_{shoot/water}$, $BCF_{root/water}$ 和 TF 值的影响

处理	地上富集系数	地下富集系数	转运力
铵态氮	6.91 ± 0.91 ^c	98.71 ± 4.11 ^c	0.07 ± 0.04 ^b
硝态氮	12.59 ± 0.33 ^b	203.62 ± 23.02 ^a	0.06 ± 0.01 ^b
亚硝态氮	19.71 ± 2.16 ^a	120.15 ± 2.03 ^b	0.16 ± 0.21 ^a

3 讨论

根系是植物吸收营养物质、水分以及合成某些活性物质的重要器官, 也是植物的一个重要控制中心, 根系受损的影响远大于对地上部分的损害影响^[13]。其中, 根长、根表面积和根体积是反映根系生长发育状况的指标之一, 在重金属胁迫下, 根系往往是最直接的受害器官。本研究结果发现, 水体受 0.5 mmol/L Pb 污染时, 不同氮形态处理对苏丹草根系形态的变化虽然有些差异, 但没达到显著性差异 ($p > 0.05$)。MDA 是膜脂过氧化的重要产物, 其含量的多少可反映出植物膜脂过氧化作用的强弱。水体受到 0.5 mmol/L Pb 污染时, 不同氮形态处理的苏丹草根系中 MDA 的含量存在显著的差异, 其中以 NH_4-N 处理

的最高, NO_3-N 处理的最低。由此可见, 富营养化水体中 Pb 污染时, 如果富营养化水体中以 NH_4-N 为主, 则对苏丹草根系膜脂过氧化作用加剧, 对苏丹草生长不利。本研究结果与温宏睿^[14]和肖龙云等人^[15]的研究报道一致。利用植物修复污染环境介质, 首先要求植物对环境介质中污染物具有一定的耐受性, 表现为植物在污染环境介质能够正常生长发育, 并且在修复过程中有较高的生物量。从目前普遍接受的植物修复 3 种机制(植物吸收、植物降解、植物—环境介质微生物联合降解)来看, 植物生物量是必须考虑的因素之一^[16]。本研究发现在 0.5 mmol/L Pb 污染的富营养化水体中苏丹草能够正常生长, 但不同氮形态对苏丹草根、茎、叶生物量的影响存在显著差异 ($p < 0.05$), 其中 NO_3-N 处理的苏丹草根、茎、叶生物量比 NH_4-N 处理的生物量高出 19% 以上, 比 NO_2-N 处理的高出 30% 以上。该研究结果与李素梅等^[17]和李勇等^[18]人在水稻中的研究报道一致。虽然有关 NH_4-N , NO_3-N 和 NO_2-N 对作物生长和根发育的影响还存在争论, 特别是在重金属胁迫下, 各种作物都能吸收利用 NH_4-N , NO_3-N 和 NO_2-N , 但 3 种形态氮素对作物营养和生长以及根系解剖结构的影响并不相同, 因此, 还需要从生物学及分子水平方面开展深入研究。

生物富集系数和转移系数值可以用来表征不同植物富集和转运污染物的能力。BCF 值越高代表植物富集能力越强, TF 值越高代表植物根系吸收的铅转运到地上部分的能力越强, 越有利于污染环境介质的植物修复, 其中茎叶/根系能反映出重金属在植物体内的运输和分配情况^[19]。本研究结果表明, Pb (0.5 mmol/L) 胁迫下, NH_4-N 处理的苏丹草叶片中 Pb 浓度明显比 NO_3-N 和 NO_2-N 处理的要高, NO_3-N 处理的苏丹草根中 Pb 浓度明显比 NH_4-N 和 NO_2-N 处理的要高, NO_2-N 处理的苏丹草茎中 Pb 浓度明显比 NH_4-N 和 NO_3-N 处理的要高 ($p < 0.05$)。温宏睿^[14]的研究也发现, 铜胁迫下, 硝态氮处理的水稻体内铜的累积比铵态氮处理的要高。由此可以看出, 受重金属污染的富营养化水体中存在不同形态 N, 在一定程度上还有利于削弱重金属对修复植物的毒性作用, 增大水体对某些重金属的环境容量。实验还发现, Pb 污染水体中苏丹草 $BCF_{root/water}$ 值以 NO_3-N 形态存在的水体地下富集系数最大。徐和宝等人^[20]的研究也说明铅在植物中的移动性很小, 根吸收的铅主要积累在根部, 叶片吸收的铅主要积累在叶部, 有少量的铅可以向上或向下转移。氯离子是天然水中重金属的最稳定的络合剂, 它可提高难

溶重金属化合物的溶解度,减弱胶体对重金属离子的吸附作用,且对重金属(如 Hg, Cd, Pb 等)迁移影响必须是在较高的 Cl^- 浓度下作用的,这就很好地说明了本实验 $\text{NH}_4\text{-N}$ 营养液中苏丹草叶片中 Pb 含量较 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 营养液中高而其地下富集系数较小的原因。Pb 胁迫的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 营养液中培养的苏丹草对铅的吸收、转运能力较强,说明 $\text{NO}_2\text{-N}$ 处理能把吸收的 Pb 较多地运输到地上部,其体内可能存在良好的运输机制。总之,富营养化水体中除了 NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- 和 Cl^- 之外,还存在许多重金属配体,如 F^- , S^{2-} , SH^- , SO_3^{2-} , SO_4^{2-} 和 NH_3 等。因此,在实际的植物生态修复工程中应考虑它们对重金属形态分布的影响及这些形态的毒性作用,注意分析重金属的浓度及其存在的形态、富营养化水体中氮的主要形态及其浓度等情况,还要选择一些可在重金属污染的富营养化水体中生存的、生物量大的、去除污染效果好的且能够更好地考虑其资源化利用的不同植物种类,只有这样才能使植物修复技术更高效地在污染环境介质的修复中发挥对环境友好型的作用。

4 结论

(1) 不同氮形态虽然对水体 Pb 污染的苏丹草根系形态有一定的影响,但没达到显著性差异,然而对根系 MDA 的含量影响存在显著差异($p < 0.05$),如 Pb(0.5 mmol/L) 污染水体中存在单一形态的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 苏丹草根系中 MDA 含量比存在单一的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 或 $\text{NO}_2\text{-N}$ 分别高出 4.6 和 1.6 倍。

(2) 不同氮形态对水体 Pb 污染下苏丹草根、茎、叶生物量的影响达显著差异($p < 0.05$),如 Pb(0.5 mmol/L) 污染水体中存在单一形态 $\text{NO}_3\text{-N}$ 苏丹草各器官生物量比存在单一形态 $\text{NH}_4\text{-N}$ 或 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的高出 19% 以上,且其根中 Pb 浓度最高,地下富集系数最大;但存在单一形态 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的苏丹草对铅的转运能力最强。

[参 考 文 献]

- [1] 余国营,徐小清,张晓华. 富营养化与污染物间的相互作用及其生态效应[J]. 生态学杂志,2000,19(4):12-17.
- [2] Jonsson P. EUCON-Interaction between Eutrophication and Contaminants in Aquatic Environment Research Programmer for the period 1995—1999[R]. Swedish: Swendish Environmental Protection Agency Report,1996: 52.
- [3] 吴永贵,熊焱,林初夏,等. 不同氮形态对重金属 Cu, Zn, Cd 生物毒性效应的影响[J]. 农业环境科学学报,2006,25(6):1560-1565.
- [4] 吴永贵,熊焱,林初夏,等. 不同形态 P 对 Cu, Zn, Cd 联合生物毒性效应的影响[J]. 环境科学学报,2006,26(12):2045-2051.
- [5] 林波,刘燕芳,夏雨,等. 鄱阳湖水质污染对湿地生态系统生态功能的影响[J]. 地质灾害与环境保护,2004,15(9):21-25.
- [6] 简敏菲,游海,倪才英. 鄱阳湖饶河段重金属污染水平与迁移特征[J]. 湖泊科学,2006,18(2):127-133.
- [7] 张敬锁,李花粉,张福锁,等. 不同形态氮素对水稻体内镉形态的影响[J]. 中国农业大学学报,1998,3(5):90-94.
- [8] 牛之欣,孙丽娜,孙铁珩. 水培条件下四种植物对 Cd、Pb 富集特征[J]. 生态学杂志,2010,29(2):261-268.
- [9] 王丽燕,郑世英. 镉、铅及其复合污染对小麦种子萌发的影响[J]. 麦类作物学报,2009,29(1):146-148.
- [10] 华东师范大学. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,1988:68-73.
- [11] 孙权,何振立,杨肖娥,等. 铜对小白菜的毒性效应及其生态健康指标[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(2):324-330.
- [12] 段曼莉,胡斌,梁东丽,等. 4 种蔬菜对硒酸盐的吸收、富集与转运特征的研究[J]. 农业环境科学学报,2011,30(3):422-428.
- [13] 赵恒栋,崔世茂,李明,等. CO_2 加富条件下高温高湿对温室黄瓜根系生长的影响[J]. 吉林农业,2010(11):66-67.
- [14] 温宏睿. 不同形态氮素对水稻抗铜性的影响及其机理研究[D]. 江苏南京:南京农业大学,2003.
- [15] 肖龙云,程嘉翎,王俊,等. 铝胁迫下水稻幼苗对供氮形态的生理响应[J]. 江苏农业科学,2010(6):91-93.
- [16] 王世杰,谷庆宝,卢桂兰,等. 高粱修复柴油污染土壤过程中植物生物量及土壤微生物总量的变化[J]. 环境科学研究,2007,20(2):24-27.
- [17] 李素梅,施卫明. 不同氮形态对两种基因型水稻根系形态及氮吸收效率的影响[J]. 土壤,2007,39(4):589-593.
- [18] 李勇,周毅,郭世伟,等. 铵态氮和硝态氮营养对水、旱稻根系形态及水分吸收的影响[J]. 中国水稻科学,2007,21(3):294-298.
- [19] Monni S, Salemaa M, Whitte C, et al. Copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter, in southwest Finland[J]. Environmental Pollution, 2000, 109(2):211-219.
- [20] 徐和宝,汪嘉熙,谢明云. 铅对几种作物生长的影响及其在植物体内的积累[J]. 植物生态学报,1983,7(4):273-279.