

## 北京 11 种宿根地被植物对镍的耐性和富集转运特征

朱妙馨,张灵巧,巫丽华,任瑞芬,刘 燕\*

(北京林业大学 园林学院,花卉种质创新与分子育种北京市重点实验室,国家花卉工程技术研究中心,  
城乡生态环境北京实验室,北京 100083)

**摘 要:**为研究北京常用宿根地被植物对 Ni 胁迫的耐受和富集能力,对绢毛匍匐委陵菜、匍匐委陵菜、青绿苔草、涝峪苔草、荆芥、射干、马蔺、麦冬、大花萱草、‘金娃娃’萱草、玉簪 11 种宿根地被植物展开为期 3 个月的不同浓度含 Ni 土壤栽培试验,4 种处理 CK、T1、T2、T3 土壤重金属 Ni 含量分别为:26.99、539.78、1 028.83、1 545.58 mg·kg<sup>-1</sup>。结果表明,本试验条件下未出现 Ni 超富集植物,但几乎所有处理组植物 Ni 转运系数均>1,具备较强的 Ni 转运能力。耐性方面:青绿苔草、大花萱草、麦冬、射干和马蔺 Ni 耐性较强,匍匐委陵菜、玉簪、‘金娃娃’萱草和涝峪苔草 Ni 耐性较弱。富集方面:匍匐委陵菜和青绿苔草在 T1 和 T2 浓度下具有较强 Ni 富集能力;马蔺和麦冬在 Ni 浓度达到 T3 时表现出相对较强的 Ni 富集能力。而绢毛匍匐委陵菜和荆芥在本试验条件下对 Ni 胁迫不具有耐性和富集性。青绿苔草、马蔺和麦冬兼具较强耐性和富集性,可作为净化北京园林绿地 Ni 污染的理想地被植物。

**关键词:**重金属胁迫;宿根地被植物;镍;耐性;富集;转运

**中图分类号:**S688.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2021)05-0069-07

### Characteristics of Nickel Tolerance, Accumulation and Translocation of 11 Species of Perennial Ground Cover Plants in Beijing

ZHU Miao-xin, ZHANG Ling-qiao, WU Li-hua, REN Rui-fen, LIU Yan\*

(Beijing Municipal Key Laboratory of Flower Germplasm Innovation and Molecular Breeding / National Engineering Research Center for Floriculture / Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment / Landscape Architecture School, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Nickel pollution ranks the second in soil heavy metal pollution in China, but there are few reports on the research and application of native plants in the management of soil heavy metal Ni. A 3-month-long study was conducted on the tolerance and accumulation ability of 11 species of common perennial ground cover plants occurring in Beijing to Ni stress, i. e., *Potentilla reptans* var. *sericophylla*, *P. reptans*, *Carex breviculmis*, *C. giraldiana*, *Nepeta cataria*, *Iris domestica*, *I. lactea* var. *chinensis*, *Ophiopogon japonicus*, *Hemerocallis hybrida*, *H. fulva* ‘Golden Doll’, and *Hosta plantaginea*. Seedlings tested were cultivated in the soils with the Ni concentrations of 26.99 (original content of Ni in the soil, control), 539.78 (T1), 1 028.83 (T2) and 1 545.58 mg·kg<sup>-1</sup> (T3), respectively. No Ni-hyperaccumulation plant species was found in this study, however, almost all the plant species in the treatment groups had Ni translocation factors greater than 1, demonstrating their strong Ni transport capacities. Among the 11 species tested, *C. breviculmis*, *H. hybrida*, *O. japonicus*, *I. domestica* and *I. lactea* var. *chinensis* exhibited strong Ni tol-

收稿日期:2020-10-05 修回日期:2020-11-11

基金项目:北京林业大学建设世界一流学科和特色发展引导专项资金(2019XKJS0322);北京市教委科学研究与研究生培养共建科研项目(2019GJ-03)。

作者简介:朱妙馨。研究方向:园林植物应用与园林生态。E-mail:zhumiaoxin@163.com

\* 通信作者:刘 燕,教授,博士生导师。研究方向:园林植物应用与园林生态。E-mail:chblyan@sohu.com

erance capability, while *P. reptans*, *H. plantaginea*, *H. fulva* ‘Golden Doll’ and *C. giraldiana* showed weak Ni tolerance capability. In terms of Ni accumulation, *P. reptans* and *C. breviculmis* had strong Ni enrichment capacity at T1 and T2 concentrations. When the Ni concentration in soil reached the level of T3, *I. lactea* var. *chinensis* and *O. japonicus* showed relatively strong Ni accumulation ability. However, *P. reptans* var. *sericophylla* and *N. cataria* had no tolerance or accumulation to Ni stress under the experimental conditions. It was concluded that *C. breviculmis*, *I. lactea* var. *chinensis* and *O. japonicus* had strong Ni tolerance and accumulation capabilities, these plant species could be used as ideal groundcovers to purify the Ni pollution of greenland in Beijing.

**Key words:** heavy metal stress; perennial ground cover plant; nickel; tolerance; accumulation; translocation

土壤重金属污染已成为一个全球性问题,我国首次土壤污染状况调查显示,总的土壤中 Ni 污染点位超标率达 6.4%<sup>[1]</sup>。根据 CJT 340-2016《绿化种植土壤》<sup>[2]</sup> Ni 含量要求,北京园林绿地也已出现 Ni 超标现象,且主要集中在主干道路两侧绿化带。如二环路两侧绿化带的 46 个土壤样本中,有 12 个 Ni 含量超过Ⅲ级标准( $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),7 个超过Ⅳ级标准( $220 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),最高达  $1\,633 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[3]</sup>;四环路和朝阳路两侧绿化带土壤样点中 Ni 含量超过Ⅳ级标准( $220 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )的占到 13.6%和 10.0%<sup>[4]</sup>。

植物具有清洁土壤重金属的功能。植物提取主要是利用超富集植物将土壤重金属转运到地上部分,再通过收获植物将重金属移除从而降低土壤重金属含量<sup>[5]</sup>,该技术具有成本低、效果好、原位修复,操作简便、不易造成二次污染、对土壤环境扰动小等优点,是目前研究较多且最具发展前途的一种重金属污染土壤治理方法。而在此基础上,应用观赏植物改善园林绿地环境污染,还兼具美学价值<sup>[6]</sup>。

研究表明, Ni 超富集植物一般生长在天然的镍、钴或某些超镁铁质土壤中,主要分布在地中海、巴西、古巴、新喀里多尼亚、土耳其、印度尼西亚和东南亚地区<sup>[7]</sup>。世界上已发现的超富集植物大多为 Ni 超富集植物,正如全球超富集植物数据库显示,截止 2017 年 7 月,全球共有 754 种超富集植物,而 Ni 超富集植物多达 52 科、130 属、532 种<sup>[8]</sup>。其中,常见的 Ni 超富集植物有庭荠属(*Alyssum*)、遏蓝菜属(*Thlaspi*)、柞木属(*Xylosma*)、叶下珠属(*Phyllanthus*)、苞复花属(*Geissois*)、鲍姆勒氏属(*Bornmuellera*)、鼠鞭草属(*Hybanthus*)等<sup>[9]</sup>。我国目前所发现的 Ni 富集植物相对较少,如李氏禾(*Leersia hexandra*)<sup>[10]</sup>。

宿根植物具有管理粗放、生物量较大、大多种类冬季自然枯萎、便于移走地上部分等特点,这些决定了若其具有重金属富集能力,将是良好的环境修复植物。鉴于国内对提取土壤 Ni 的植物研究较少,本

研究评述了 11 种在北京宜作地被的宿根植物对 Ni 胁迫的耐性和富集性,旨在筛选出适宜北京目前土壤 Ni 污染水平的地被植物,为净化北京园林绿地重金属 Ni 污染提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于北京市海淀区东升双清路八家村委会北 300 m 的三顷园苗圃,  $116^{\circ}20'45.06''\text{E}$ ,  $40^{\circ}8'16.55''\text{N}$ 。属暖温带半湿润大陆性季风气候型,年降水量 511.1 mm,年均温  $12.5^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.2 供试材料

栽培土壤为地表 0~20 cm 园土(褐色砂壤土)与珍珠岩以 7:3 比例混匀。栽培土壤基本理化性质: pH 值 8.24, 有机质  $33.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全 N  $1\,236.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 水解 N  $137.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全 P  $695 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有效 P  $15.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全 K  $19\,378.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效 K  $157.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 重金属 Ni  $26.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

绢毛匍匐委陵菜(*Potentilla reptans* var. *sericophylla*)、匍匐委陵菜(*P. reptans*)、青绿苔草(*Carex breviculmis*)、涝峪苔草(*C. giraldiana*)、荆芥(*Nepeta cataria*)、射干(*Iris domestica*)、马蔺(*Iris lactea* var. *chinensis*)、麦冬(*Ophiopogon japonicus*)、大花萱草(*Hemerocallis hybrida*)、‘金娃娃’萱草(*H. fulva* ‘Golden Doll’)、玉簪(*Hosta plantaginea*)。以上材料均为盆径 > 9 cm 的园林绿化工程用苗,试验当年购于北京绿普方圆花卉科技有限公司。

### 1.3 试验设计

试验于 2019 年 8—11 月进行,为防止污染场地,在试验地设置 4 个特殊种植床:以金属架支撑起长 480 cm×宽 90 cm×高 30 cm 的防水帆布袋槽做成栽培床,内部依次铺设排水板、土工布、栽培土壤 20 cm。8 月 11 日种植植物,各栽培床中按相同方

式栽植 11 种植物材料,每种 10 株/丛。隔 2 周待所有植物长势良好后,向 4 个栽培床均匀喷施 99% 的  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  溶液,剂量为 0、552.26、1 104.52、2 209.04 g,喷施前 3 天不浇水以确保土面干燥,进行充分松土、整平后,分多次将处理液均匀喷施于土面,最后用自来水喷淋植物表面,确保无处理液残留。4 种处理 CK、T1、T2、T3 土壤重金属 Ni 含量分别为:26.99、539.78、1 028.83、1 545.58  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。栽培过程中,4 组处理采用相同管理,同一般宿根常规管理。不定期浇水,保持田间持水量 70% 左右,除雨天覆盖透明雨布,防止植物被过度水淹和处理液被淋溶外,其他天气均露天栽培。11 月 12 日,对所有植物进行生长状况评价,然后每个处理每种植物随机选取 3 株/丛进行采收,同时进行鲜样采集。土样采用梅花形布点法采取 10 个 $\cdot$ 床 $^{-1}$ ,单个土样 $>300$  g。

1.4 样品处理与指标测定

光合色素含量:参照陈伟<sup>[11]</sup>的方法,95%乙醇提取,分光光度法测定。植物生物量:采收整株植物样品,先用自来水冲洗干净,后用去离子水润洗,在室内晾干后分成地上和地下两部分,105℃杀青 30 min 后于 80℃烘箱烘干至恒重。称重得到生物量,干燥保存。重金属含量:土壤 Ni 含量采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),参照 DZ/T 0279.3-2016 区域地球化学样品分析方法 第 3 部分:钡、铍、铋等 15 个元素量<sup>[12]</sup>测定;植物 Ni 含量采用微波消解-电感耦合等离子体质谱法<sup>[13-14]</sup>,参照 DD 2005-03 生态地球化学评价样品分析技术要求<sup>[15]</sup>测定。土壤 pH 值:参照 NY/T 1121.2-2006 土壤检测<sup>[16]</sup>进行。

指标计算公式:耐性指数(TI)=处理组地上部

干重/对照组地上部干重;死亡率(DR)=1-处理组存活数量/对照组存活数量;叶绿素比值=处理组叶绿素含量/对照组叶绿素含量;地上部富集系数(BCF)=地上部重金属质量分数/土壤重金属质量分数;转运系数(TF)=地上部重金属质量分数/地下部重金属质量分数;富集量=重金属含量 $\times$ 该部分生物量;分配系数=地上部富集量/整株富集量

1.5 数据处理与分析

使用 Excel 2019 和 SPSS 25 进行数据处理、统计分析和图表绘制。显著性分析采用 Duncan 多重比较法;对 Ni 胁迫下可存活的 9 种宿根植物进行 Q 型系统聚类分析,耐性特征选择耐性指数、死亡率和叶绿素比值 3 项指标,吸收选择地上部 Ni 含量、转运系数、富集系数和分配系数 4 项指标,原始数据标标准化,聚类方法选择最远邻元素法,计算距离为平方欧氏距离。

2 结果与分析

2.1 11 种植物对 Ni 的耐性特征

由表 1 可见,不同含 Ni 土壤中植物地上部干重变化。T1 浓度下,1、5 号死亡,其余 9 种植物能存活。其中 7、8、9 号地上、地下部干重均无显著变化;2、6 号仅地上部分干重显著降低;3、4、10、11 号地上、地下部分干重均显著降低。T2 浓度下,1、4、5 号死亡,其余 8 种植物存活。其中 7 号地上、地下部干重没有显著变化,2、3、6、8、9、10、11 号地上、地下部分干重显著减少。而在 T3 浓度下,仅 6、7、8 号 3 种植物可存活,7 号地下部干重无显著变化,7 号地上部及 6、8 号地上和地下部干重显著下降。

耐性指数(TI)为处理组与对照组地上部干重的比值,一般认为 TI $>0.5$  且植物长势良好时表示

表 1 不同浓度 Ni 处理下植物地上、地下部分干重变化

Table 1 The change of shoot and root dry weight at different Ni concentration treatments (g $\cdot$ 株 $^{-1}$ )

编号	植物	各处理下植物地上部分干重				各处理下植物地下部分干重			
		CK	T1	T2	T3	CK	T1	T2	T3
1	绢毛匍匐委陵菜	3.19 $\pm$ 0.43	—	—	—	2.56 $\pm$ 0.48	—	—	—
2	匍匐委陵菜	4.13 $\pm$ 0.42a	2.57 $\pm$ 0.21b	0.99 $\pm$ 0.04c	—	2.14 $\pm$ 0.22A	1.77 $\pm$ 0.37A	0.58 $\pm$ 0.06B	—
3	青绿苔草	12.57 $\pm$ 2.07a	7.88 $\pm$ 0.55b	4.96 $\pm$ 0.99b	—	4.35 $\pm$ 0.95A	1.81 $\pm$ 0.13B	1.22 $\pm$ 0.07B	—
4	涝峪苔草	5.97 $\pm$ 0.53	3.86 $\pm$ 0.66	—	—	0.86 $\pm$ 0.06	0.59	—	—
5	荆芥	12.94 $\pm$ 1.43	—	—	—	3.35 $\pm$ 1.17	—	—	—
6	射干	7.42 $\pm$ 0.54a	5.13 $\pm$ 0.29b	2.32 $\pm$ 0.24c	0.67d	14.61 $\pm$ 0.71A	15.22 $\pm$ 0.82A	7.99 $\pm$ 0.74B	2.64C
7	马蔺	5.28 $\pm$ 0.06a	5.23 $\pm$ 0.68a	5.14 $\pm$ 0.18a	4.1b	2.84 $\pm$ 0.49A	2.47 $\pm$ 0.67A	2.14 $\pm$ 0.31A	2.02A
8	麦冬	12.58 $\pm$ 0.11a	12.53 $\pm$ 3.07a	6.99 $\pm$ 1.16b	1.32c	6.68 $\pm$ 0.89A	7.71 $\pm$ 2.4A	4.6 $\pm$ 0.56AB	1.79B
9	大花萱草	5.26 $\pm$ 0.9a	4.63 $\pm$ 0.52a	1.74 $\pm$ 0.2b	—	14.42 $\pm$ 2.24A	12.41 $\pm$ 1.33A	6.91 $\pm$ 1.03B	—
10	‘金娃娃’萱草	1.89 $\pm$ 0.21a	1.09 $\pm$ 0.07b	0.61 $\pm$ 0.06c	—	3.76 $\pm$ 0.48A	2.23 $\pm$ 0.18B	1.74 $\pm$ 0.41B	—
11	玉簪	4.08 $\pm$ 1.27a	1.37 $\pm$ 0.32b	0.73b	—	6.74 $\pm$ 0.63A	2.73 $\pm$ 0.87B	2.02B	—

注:小(大)写字母表同一植物地上(下)部分不同处理之间有显著性差异;(P $<0.05$ ,n=3)。下同。

其对该胁迫耐性较好<sup>[17]</sup>。不同 Ni 处理下植物的 TI 和死亡率 DR(表 2)表明:T1 浓度下有 6 种植物 TI>0.5,死亡率最高仅 20%;而 11 号受害较严重,1 和 5 号无法存活。T2 浓度下 7,8 号 TI>0.5,死亡率最高仅 10%;1,4,5 号无法存活,其他植物损害严重。到 T3 浓度时,仅 6,7,8 号能存活,但也严重受损。

表 2 不同浓度 Ni 处理下植物耐性指数和死亡率

Table 2 Tolerance indexes and death rates under different Ni concentrations

编号	各处理下植物 TI			各处理下植物 DR		
	Ni concentrations					
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
1	—	—	—	1	1	1
2	0.62	0.23	—	0.2	0.8	1
3	0.62	0.39	—	0	0.3	1
4	0.64	—	—	0	1	1
5	—	—	—	1	1	1
6	0.69	0.31	0.09	0	0.4	0.8
7	0.99	0.97	0.77	0	0	0.8
8	0.99	0.55	0.10	0	0.1	0.9
9	0.88	0.33	—	0	0.4	1
10	0.57	0.32	—	0	0.5	1
11	0.33	0.17	—	0.2	0.8	1

由表 3 可见,不同浓度 Ni 胁迫下植物叶绿素含量变化。其中 6 号叶绿素含量在各处理浓度下均无显著变化;7,8 号叶绿素含量在 T1 浓度下变化不显著,而在 T2 和 T3 浓度下显著降低;其他存活植物叶绿素含量均从 T1 开始显著下降,且随土壤 Ni 含量升高而显著降低。

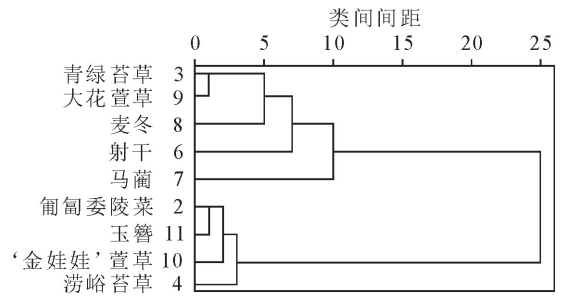
表 3 不同浓度 Ni 处理下植物叶绿素含量

Table 3 Chlorophyll contents under different Ni concentrations

编号	各处理下植物叶绿素含量/(mg·g <sup>-1</sup> )			
	CK	T1	T2	T3
1	33.42±1.66	—	—	—
2	36.06±1.12a	31.16±1.24b	22.49±0.45c	—
3	35.15±0.72a	31.79±0.48b	20.60±0.68c	—
4	39.56±2.96a	32.06±1.85b	—	—
5	27.49±1.83	—	—	—
6	13.20±2.17a	12.10±5.11a	15.14±2.34a	10.77±2.82a
7	22.32±1.71a	23.57±0.70a	17.12±0.60b	9.60±0.96c
8	14.40±1.95a	12.99±3.54ab	4.76±1.05c	8.32±0.60bc
9	21.96±0.31a	23.05±0.44b	17.52±0.07c	—
10	25.45±1.77a	19.03±2.96b	6.67±0.65c	—
11	15.32±0.19a	11.79±0.31b	5.10±0.21c	—

由图 1 可见,Ni 胁迫下可存活的 9 种植物对 Ni 耐性的树状聚类情况,主要分为 2 大类:耐性较强植物包括 3,9,8,6,7 号;以 7 号马蔺耐性最好,在 3 种处理下的 TI 均最高,且在最高浓度时为 0.77,远高

于其他植物;其次 6 号射干的耐性也较高,在 3 种处理下叶绿素含量没有明显变化。而耐性较差的植物有 2,11,10,4 号;其中最差的是 4 号涝峪苔草,土壤浓度为 T2 时已无法存活。此外,在 3 个 Ni 浓度胁迫下均无法存活的绢毛匍匐委陵菜和荆芥(1,5 号)显然是供试植物中耐性最差的种类。



注:选择耐性指数、死亡率和叶绿素比值 3 项指标。

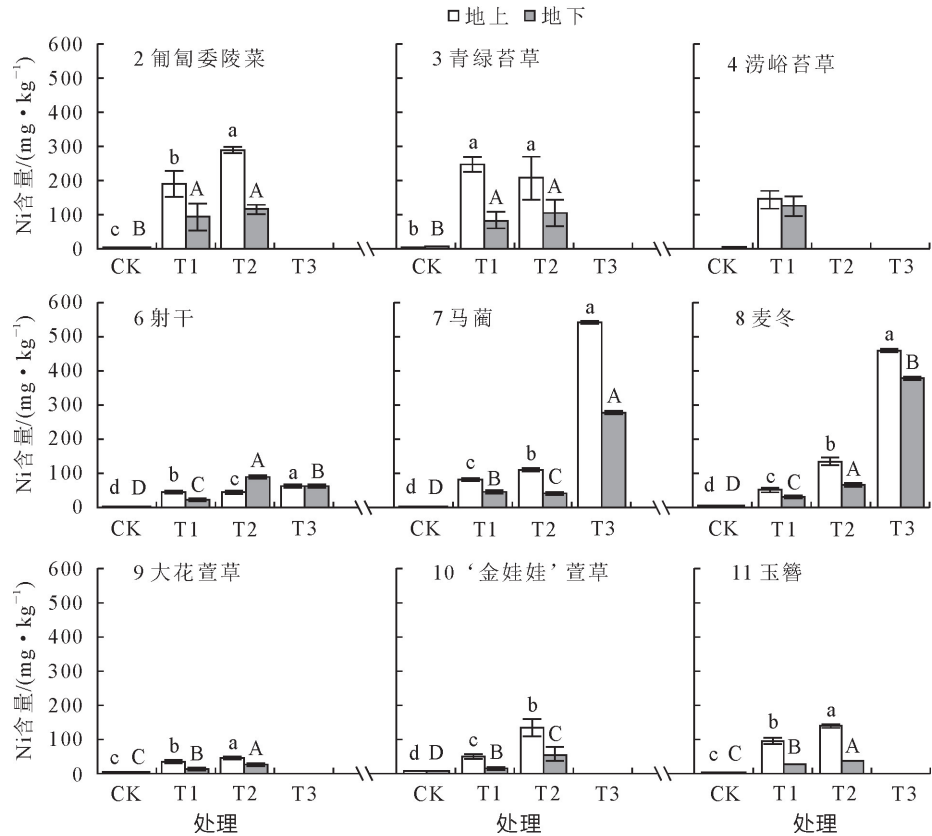
图 1 9 种植物耐 Ni 性的树状聚类图

Fig. 1 Dendrogram of Ni tolerance characteristics of 9 species of perennial plants

## 2.2 11 种植物对 Ni 的吸收特性

各处理下可存活的 9 种植物地上、地下 Ni 含量见图 2:各处理下 9 种植物地上、地下部 Ni 含量大多差异显著,呈现随土壤 Ni 含量增加而增加的趋势,具有明显的浓度效应。T1 处理下有 5 种植物(2,3,4,7,11 号)地上部 Ni 含量>50 mg·kg<sup>-1</sup>;Ni 含量较高的有 3,2,4 号,地上和地下部 Ni 含量分别为 246.12、190.2、146.65 mg·kg<sup>-1</sup>和 83.01、93.82、126.75 mg·kg<sup>-1</sup>。T2 处理下,有 7 种植物(2,3,7,8,9,10,11 号)地上部 Ni 含量>50 mg·kg<sup>-1</sup>;其中 2,3 号 Ni 含量较高,地上和地下部 Ni 含量分别为 288.97、206.79 mg·kg<sup>-1</sup>和 117.85、102.43 mg·kg<sup>-1</sup>。而 T3 处理下,3 种可存活植物地上部 Ni 含量均>50 mg·kg<sup>-1</sup>,7,8 号地上和地下部 Ni 含量分别达到了 546.03、457.88 mg·kg<sup>-1</sup>和 279.33、379.50 mg·kg<sup>-1</sup>。然而各处理下所有植物地上部 Ni 含量均未达到超富集植物 1 000 mg·kg<sup>-1</sup> 的临界值。

富集系数(BCF)是植物地上部与土壤中重金属含量的比值。转运系数(TF)则是地上部与地下部重金属含量的比值,代表植物向上转移重金属的能力。由图 3 可见,各处理下 9 种植物地上部富集系数和转运系数变化情况。除 T2 处理下的 6 号外,其他植物处理组 TF>1,具有较强的转运能力。T1 处理下 3,10,11 号 TF 较高,约为 3。T2 处理下 7 号 TF 最高为 3.43;6 号 TF 最低为 0.49;其他植物 TF>2。T3 处理下,7,8,6 号 TF 依次为 1.95、1.21、1.01。本试验条件下,所有植物 BCF>1。T1



注:小(大)写字母表各处理下植物地上(下)部 Ni 含量的差异性;(P<0.05,n=3);不包含 Ni 胁迫下全部死亡的 2 种植物(下同)。

图 2 不同浓度 Ni 处理下植物地上部与地下部的 Ni 含量

Fig. 2 Shoot and root Ni accumulation under different Ni concentrations

处理下 3、2、4 号 BCF 相对较高,分别为 0.46、0.35、0.27;7、11 号  $0.1 < \text{BCF} < 0.2$ ;其他植物  $\text{BCF} < 0.1$ 。T2 处理下 2、3 号 BCF 较高,分别为 0.28、0.20;6、9 号  $\text{BCF} < 0.1$ ;其他植物  $0.1 < \text{BCF} < 0.2$ 。T3 处理下 7、8 号 BCF 分别为 0.35、0.30;而 6 号 BCF 仍然  $< 0.1$ ,仅 0.04。

对同种植物不同处理下的 TF 进行方差分析结果表明,除 6 号外其他植物 TF 都具有处理组  $>$  对照组的特点;其中 4、6 号 TF 随处理浓度增大而显著增大,2、9、10 号 TF 随处理浓度增大而不显著增大,3、7、8 号随处理浓度升高而先增大后减小,6 号较特殊,TF 随处理浓度增大而来回波动。对同种植物不同处理下的 BCF 进行方差分析显示:除 9 号 BCF 在 CK 最高且随土壤 Ni 浓度增大而持续减小外,其他植物 BCF 均在某一 Ni 胁迫下达到最高;如 4、7、8、10 号均在可耐受最高浓度下达到最高 BCF,而 2、3、6、11 号都在可耐受最高浓度前达到最高 BCF,均出现在 T1 浓度下。

Ni 分配系数是植物地上部 Ni 富集量与全株 Ni 富集量的比值。由表 4 可见,不同浓度 Ni 胁迫下植物体内 Ni 的分配系数。其中,5 种植物(2、3、7、11 号)在 Ni 胁迫下分配系数均  $> 0.5$ ,即这些植物能将

体内大部分 Ni 富集在地上部;8、10 号也能在较低浓度时将体内大部分 Ni 富集在地上部;而 6、9 号分配系数始终  $< 0.5$ 。在 T1 处理下,3、4 号分配系数最高,达到了 0.93、0.88。T2 处理下,3、7、2、8 号分配系数最高,分别为 0.89、0.86、0.81、0.75。T1 处理下,7 号分配系数最高,为 0.8。

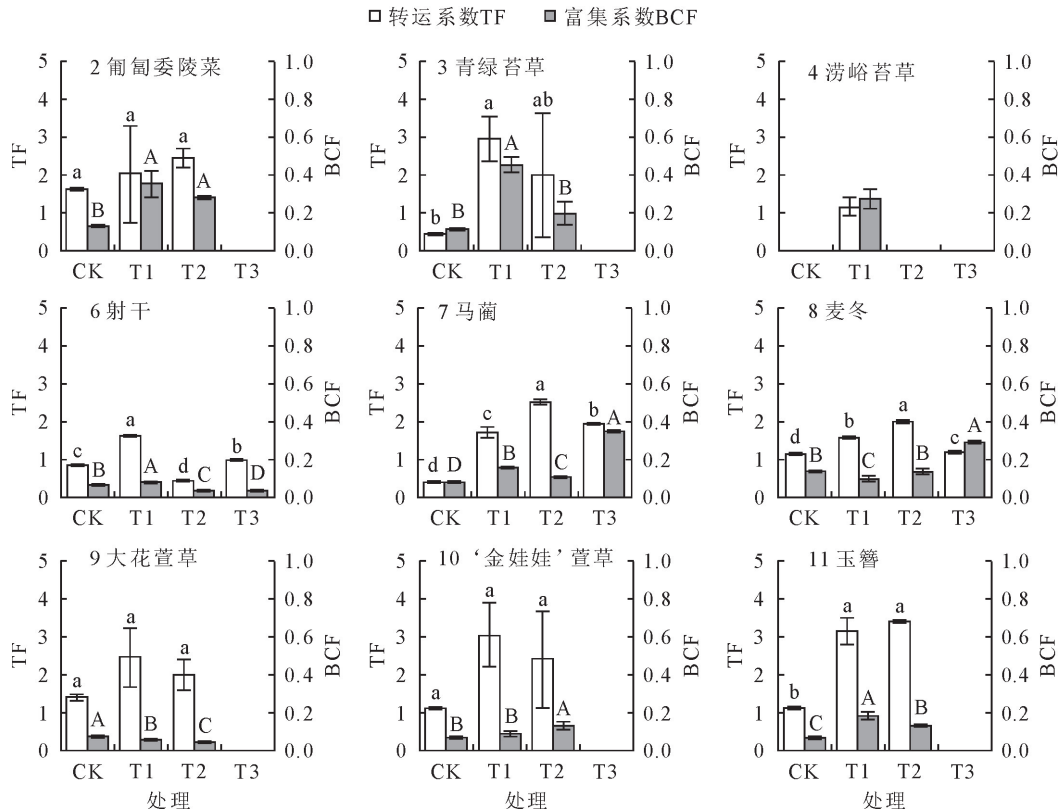
由图 4 可见,Ni 胁迫下可存活的 9 种植物 Ni 富集特征的树状聚类分析情况,第 1 类有 7、8 号,表

**表 4 不同浓度 Ni 处理下植物体内 Ni 分配系数**

Table 4 The distribution coefficient of Ni in plants under different Ni concentrations

编号	各处理下植物地上部 Ni 分配系数			
	CK	T1	T2	T3
2	0.76±0.01Aa	0.77±0.08Ac	0.81±0.03Aa	
3	0.58±0.02Bc	0.93±0.01Aa	0.89±0.06Aa	
4	0	0.88±0.04ab		
6	0.3±0Bf	0.36±0Af	0.12±0Cd	0.2±0Dc
7	0.45±0.05Bd	0.79±0.04Abc	0.86±0.01Aa	0.8±0Aa
8	0.69±0.03Ab	0.71±0.08Acd	0.75±0.04Aa	0.47±0Bb
9	0.34±0.02Aef	0.48±0.06Ae	0.33±0.1Ac	
10	0.36±0.05Bef	0.6±0.05Ad	0.43±0.14ABbc	
11	0.41±0.06Bde	0.62±0.01Ad	0.55±0Ab	

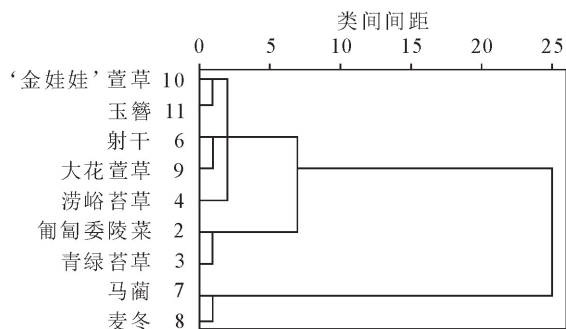
注:大写字母表同种植物不同处理下具有显著差异,小写字母表相同 Ni 浓度下各植物之间具有显著性差异;(P<0.05,n=3)。



注:小写字母表各处理下植物从地下部到地上部转运系数的差异性、大写字母表各处理下植物从土壤到体内富集系数的差异性;( $P < 0.05$ ,  $n=3$ )。

图3 不同浓度 Ni 处理下植物转运系数和地上部富集系数

Fig. 3 Translocation and shoot bioaccumulation factors under different Ni concentrations



注:选择地上部 Ni 含量、转运系数、富集系数和分配系数 4 项指标。

图4 9种植物 Ni 积累特征的树状聚类图

Fig. 4 Dendrogram of Ni accumulation characteristics of 9 species of perennial plants

现为在 T3 胁迫下具有较强的 Ni 富集能力;第 2 类为 2、3 号,表现为在 T1 和 T2 胁迫下均具有较强的 Ni 富集能力;第 3 类包括 10、11、6、9、4 号,表现为在 Ni 胁迫下富集能力较弱。此外,3 种处理下均无法存活的绢毛匍匐委陵菜和荆芥(1、5 号)在本试验中未表现出 Ni 富集能力。

### 3 结论与讨论

以北京园林绿地为背景,评述了 11 种宿根植物对 Ni 胁迫的耐性和富集性。结果表明:青绿苔草、大花萱草、麦冬、射干和马蔺对 Ni 耐性较强;匍匐委

陵菜、玉簪、'金娃娃'萱草和涝峪苔草对 Ni 耐性较弱。马蔺和麦冬具有较强的 Ni 富集能力;匍匐委陵菜和青绿苔草次之;其他植物 Ni 富集能力均相对较弱。此外,青绿苔草、马蔺以及麦冬同时兼具有较强耐性和富集性;而绢毛匍匐委陵菜和荆芥在本试验条件下对 Ni 胁迫不具有耐性和富集性。

目前,筛选重金属污染土壤修复植物的方法主要有 3 种:野外调查-重金属浓度梯度法、特殊植物-重金属浓度梯度法和土壤种子库-重金属浓度梯度法。我国在 Ni 修复植物筛选方面研究较少,且主要采用野外调查-重金属浓度梯度法或单纯的野外调查法。如陆引昱等<sup>[18]</sup>在云南富镍地区发现车前草(*Plantago asiatica*)能在含 Ni  $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的土壤中正常生长;魏雪芳等<sup>[19]</sup>在淮南市某煤矿复垦区发现车前草、狗尾草(*Setaria viridis*)和苦苣菜(*Sonchus oleraceus*)  $\text{BCF} > 1$ 。本研究采用特殊植物-重金属浓度梯度法,选择北京常用园林宿根植物进行筛选,能够快速而直接地获知其适用性。

#### 3.1 11 种植物对 Ni 的耐性特征

一般认为 Ni 含量  $> 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  且生长良好( $\text{TI} > 0.5$ )<sup>[17]</sup>的植物具有中度 Ni 耐性<sup>[20]</sup>。因此本试验中:T1 处理下有 4 种植物(2、3、4、7 号)具有中

度 Ni 耐性; T2 处理下有 2 种植物(7、8 号)具有中度 Ni 耐性; T3 处理下 7 号具有中度 Ni 耐性。而前文 Ni 耐性的树状聚类分析得到 5 种植物(3、6、7、8、9 号)耐性较强。两处结果的差异表明: 射干和大花萱草(6、9 号)所表现出来的耐性为体外排斥型; 匍匐委陵菜和涝峪苔草(2、4 号)仅在 T1 浓度下具有较强耐性, T2 浓度下受严重毒害。

光合作用是植物获取能量的重要方式, 叶绿素含量与植物光合作用密切联系<sup>[21]</sup>。本研究中, 除射干叶绿素含量在各个处理下没有显著变化, 其他植物叶绿素含量均在 Ni 胁迫下显著下降。而射干的其他耐性特征并不突出。在试验中, 供试植物中只有射干在 Ni 胁迫下出现了地上部先死亡后重新萌发的现象。其 TI 变化表明土壤 Ni 胁迫浓度越高, 萌发越慢; 但所有新萌发的地上部叶绿素含量均无显著差异, 意味着射干经过地上部更新, 耐性有所提升。而已有研究表明, 适度刈割有利于紫花苜蓿保持较好生理状况, 提高其 Cd 抗性<sup>[22]</sup>; 但在该研究中, 随着刈割次数增加叶绿素含量逐渐降低, 与本试验射干的结果相反, 这可能与射干并非 Ni 富集型植物而是 Ni 体外排斥型植物有关。地上部自然更新是宿根植物的特点, 其他宿根植物是否也会因重新萌发而耐性增强, 有待进一步研究。

### 3.2 11 种植物对 Ni 的富集特征

Ni 超富集植物需满足 4 个要求: 1) 能够耐受较高浓度重金属毒害; 2) 植物地上部重金属含量达到一定量, 即  $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[23]</sup>; 3) 植物地上部重金属含量 > 地下部, 即  $\text{TF} > 1$ ; 4) 在非污染或中等污染的土壤上也能富集重金属, 其地上部含量 > 土壤含量, 即  $\text{BCF} > 1$ <sup>[24]</sup>。赵婷<sup>[25]</sup>研究表明, 灯心草(*Juncus effusus*) 在  $300$ 、 $600\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Ni 处理下富集系数为  $0.12$ 、 $0.11$ , 转运系数为  $0.64$ 、 $0.73$ 。紫花苜蓿(*Medicago sativa*) 在  $400$ 、 $600\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Ni 处理下, 体内 Ni 含量 > 土壤 Ni 含量<sup>[26]</sup>。可见, 我国尚未报道发现有 Ni 超富集植物, Ni 富集植物也尚未有明确标准, 但一般需满足上述条件 1) 和 4), 仅有在 Ni 含量  $420.8\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的淤泥中能正常生长, 叶片 Ni 含量  $933.1\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 叶片富集系数  $2.2$ , 叶片转运系数  $3.3$ <sup>[10]</sup> 的李氏禾能视为 Ni 的富集植物。因此在评价筛选本土 Ni 富集植物时, 标准是否应适当降低值得进一步深入考虑。本研究中虽然并未出现  $\text{BCF} > 1$  的 Ni 富集植物, 但几乎所有处理组植物均有  $\text{TF} > 1$ ; 而前人研究中, 车前草、李氏禾、及灯心草也出现了在相同 Ni 胁迫下,  $\text{TF} > \text{BCF}$  的情况, 这与植物对其他重金属(如镉)的响应有所不同。高转运能力是实现植物提取的前提之一, 如

果再通过进一步措施增加植物对 Ni 的吸收, 那么植物 Ni 富集量将大大提高。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿化种植土壤(CJ/T 340-2016)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [2] 中国环保产业. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014(5): 10-11.
- [3] 轩书堂. 北京市二环路两侧土壤重金属污染状况调查[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [4] 王鹏. 北京某公路两侧土壤重金属污染现状及风险评价研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2014.
- [5] LASAT M M. Phytoextraction of toxic metals[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(1): 109-120.
- [6] 冯子龙. 玉米与香根草、伴矿景天间作对重金属 Cd、Pb 污染土壤的修复研究[D]. 温州: 温州大学, 2017.
- [7] JAFFRÉ T, REEVES R D, BAKER A J M, et al. The discovery of nickel hyper accumulation in the New Caledonian tree *Pycnanthus acuminata* 40 years on: An introduction to a Virtual Issue[J]. New Phytologist, 2018, 218(2): 397-400.
- [8] REEVES R D, BAKER A J M, JAFFRÉ T, et al. A global database for plants that hyper accumulate metal and metalloid trace elements [J]. New Phytologist, 2017, 218(2): 407-411.
- [9] 王丙烁, 黄益宗, 王农, 等. 镍污染土壤修复技术研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2392-2402.
- [10] WANG B S, HUANG Y Z, WANG N, et al. Advances in research on remediation technology of nickel-contaminated soil [J]. Journal of Agri-environmental Science, 2018, 37(11): 2392-2402. (in Chinese)
- [11] 张学洪, 陈俊, 王敦球, 等. 李氏禾对镍的富集特征[J]. 桂林工学院学报, 2008, 28(1): 98-101.
- [12] 陈伟. 重金属胁迫对草坪草生长发育及生理特性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
- [13] 中华人民共和国国土资源部. 区域地球化学样品分析方法第 3 部分: 钡、铍、铋等 15 个元素量测定电感耦合等离子体质谱法(DZ/T 0279. 3-2016)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [14] 程佳雪, 万映伶, 巫丽华, 等. 园林树木吸收汞(Hg)的评价方法[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 249-255.
- [15] CHENG J X, WAN Y L, WU L H, et al. Evaluation methods of Hg absorption by ornamental trees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 249-255. (in Chinese)
- [16] 唐敏, 张欣, 王美仙. 北京 37 种园林植物对 4 种重金属的富集力及其分级评价研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 263-268.
- [17] TANG M, ZHANG X, WANG M X. Heavy metal enrichment ability and grade evaluation of 37 garden plants in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(5): 263-268. (in Chinese)
- [18] 中国地质调查局. 生态地球化学评价样品分析技术要求(DD 2005-03)[S]. 北京: 中国地质调查局, 2005.
- [19] 农业标准、土壤检测. 第 2 部分: 土壤 pH 的测定(NY/T 1121. 2-2006)[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.

(下转第 160 页)

- 区域生态脆弱性评价[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(2): 296-302.
- DANG E S, HU W J, CHEN G L, *et al.* Ecological vulnerability assessment of coastal zone in Dongshan County based on VSD model[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(2): 296-302. (in Chinese)
- [11] ZOU T H, YOSHINO K. Environmental vulnerability evaluation using a spatial principal components approach in the Daxing'anling region, China[J]. Ecological Indicators, 2017, 78: 405-415.
- [12] 杨俊, 关莹莹, 李雪铭, 等. 城市边缘区生态脆弱性时空演变——以大连市甘井子区为例[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 778-787.
- YANG J, GUAN Y Y, LI X M, *et al.* Urban fringe area ecological vulnerability space-time evolution research: the case of Ganjingzi District, Dalian[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 778-787. (in Chinese)
- [13] 雷雨菁. 南雄丹霞梧桐自然保护区生态敏感性评价[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [14] 齐姗姗, 巩杰, 钱彩云, 等. 基于 SRP 模型的甘肃白龙江流域生态环境脆弱性评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 224-228.
- QI S S, GONG J, QIAN C Y, *et al.* Assessment of eco-environmental vulnerability of bailongjiang watershed in southern Gansu Province Based on SRP Model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 224-228. (in Chinese)
- [15] 庞立华, 孔范龙, 郝敏, 等. 胶州湾海岸带生态脆弱性时空变化分析[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2018(3): 222-233.
- PANG L H, KONG F L, XI M, *et al.* Spatio-temporal changes of ecological vulnerability in the Jiaozhou Bay coastal zone[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2018(3): 222-223. (in Chinese)
- [16] 张龙. 宁安市土地利用/覆被变化及其生态脆弱性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [17] 钱大文, 颜长珍, 修丽娜. 高寒草甸矿区土地覆被变化及景观格局脆弱性响应——以青藏高原木里矿区为例[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 670-678.
- QIAN D W, YAN C Z, XIU L N. Land cover change and landscape pattern vulnerability response in alpine meadow mining district: a case study of Muli mining area in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 670-678. (in Chinese)
- [18] 宁静, 张树文, 王蕾, 等. 农林交错区景观敏感性分析——以黑龙江省牡丹江地区为例[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(1): 35-38.
- NING J, ZHANG S W, WANG L, *et al.* Sensitivity analysis of landscape in forest agriculture ecotones: a case study of Mudanjiang in Heilongjiang Province[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(1): 35-38. (in Chinese)

(上接第 75 页)

- [17] 田胜尼, 刘登义, 彭少麟, 等. 香根草和鹅观草对 Cu、Pb、Zn 及其复合重金属的耐性研究[J]. 生物学杂志, 2004, 21(3): 15-19, 26.
- TIAN S N, LIU D Y, PENG S L, *et al.* The study on tolerance of *Vetiveria zizanioides* and *Roegneria kamoji* to heavy metal Cu, Pb, Zn and their mixed soluble[J]. Journal of Biology, 2004, 21(3): 15-19, 26. (in Chinese)
- [18] 陆引罡, 黄建国, 滕应, 等. 重金属富集植物车前草对镍的响应[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 108-110, 114.
- LU Y G, HUANG J G, TENG Y, *et al.* Growth and uptake response to Ni by hyperaccumulator plantain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 108-110, 114. (in Chinese)
- [19] 魏芳雪, 杨金香, 李小龙. 淮南矿区不同植物重金属修复能力研究[J]. 淮南职业技术学院学报, 2014, 14(4): 13-16.
- [20] YOUSAF S, ANDRIA V, REICHENAUER T G, *et al.* Phylogenetic and functional diversity of alkane degrading bacteria associated with italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) and birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*) in a petroleum oil-contaminated environment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 184(1).
- [21] 张茂, 徐彦红, 席溢. 铅、锌、镉胁迫对多年生黑麦草生长及生理生化特性的影响[J/OL]. 中国农业科技导报: 1-10[2020-09-04]. <https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2019.0752>.
- [22] 孙宁晓. 刈割对紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 镉富集特性及耐性生理影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [23] BAKER A J M, BROOKS R R, PEASE A J, *et al.* Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaïre [J]. Plant and Soil, 1983, 73(3): 377-385.
- [24] 陈英旭. 土壤重金属的植物污染化学[M]. 北京: 科学出版社, 2008, 43.
- [25] 赵婷. 灯心草对土壤重金属钒、钛、钼、镍、锰污染的抗性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
- [26] 柴琳琳, 朱丽娜, 韩丽林, 等. 镍在土壤和紫花苜蓿中的积累特征[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(5): 1-6.
- CHAI L L, ZHU L N, HAN L L, *et al.* Study on the accumulation effects of heavy metal nickel in the growth of alfalfa and the soil[J]. College of Chemistry and Chemical Engineering, 2013, 13(5): 1-6. (in Chinese)