

棕壤小白菜施镍生物效应及临界值

马建军，朱京涛，张淑侠，于凤鸣，刘永军

(河北科技师范学院, 河北秦皇岛 066004)

摘要：利用盆栽试验，研究了棕壤土施镍 (Ni) 对小白菜生长发育及矿质营养吸收与积累的影响，并通过小白菜生物量、地上部茎叶 Ni 含量及土壤有效态 Ni 含量的变化确定了土壤 Ni 污染的毒性临界值。结果表明，土壤施 Ni 量在 0~25 mg/kg 范围，小白菜生物量随施 Ni 量的增加而增加，施 Ni 量>25 mg/kg，随施 Ni 量增加，生物量呈极显著下降。小白菜茎叶和根系中矿质营养吸收与 Ni 含量表现为一定的协同或拮抗关系。以生物减产量突变点为依据，确定棕壤土施 Ni 毒害临界值为：土壤全量 Ni 为 66.36 mg/kg，有效态 Ni 含量为 6.21 mg/kg (DTPA)和茎叶 Ni 含量为 16.40 mg/kg。

关键词：棕壤；小白菜；生物效应；镍；毒性临界值

中图分类号：S634.3；S153.6[†]1

镍 (Ni) 作为植物生长所必需的微量营养元素，表现为低浓度促进生长，高浓度抑制生长的生理特性^[1-2]。在探明 Ni 营养生理作用的同时，对 Ni 污染也不容忽视。Ni 是一种具有潜在毒性的元素，据估算，每年全球以各种途径进入土壤中的 Ni 有数十吨之多，进入土壤中的 Ni 极易被土壤吸附，不易被生物降解，我国菜园土壤已不同程度地受到重金属的污染且随时空和土壤性质而发生变化^[4]。土壤中过量的 Ni 不仅阻滞植物的生长发育，同时造成植物体内 Ni 的残留，通过食物链进入人体产生毒害^[5]。由于不同植物对 Ni 的忍耐力和抗性的强弱不同，各种植物对土壤重金属的反应，皆以植物的苗期最为敏感^[6]。蔬菜对重金属富集能力强弱因品种而异，而小白菜属富集能力较强的蔬菜种类之一^[7]，本文通过盆栽试验，研究棕壤土施 Ni 对小白菜生长发育、水分代谢及矿质营养生理代谢的生物效应，并以小白菜生物减产量为依据，确定 Ni 的毒性临界值，为合理指导 Ni 肥施用与土壤环境质量标准建立提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自河北省唐山市迁西县黄槐峪乡青山口村，土壤类型为棕壤，土壤基本营养特性见表 1；生物效应指示蔬菜品种为小白菜。

1.2 试验设计

试验在日光温室内进行，Ni 污染土壤采用人工模拟方法^[8-9]获得。设 0 (CK)、25、50、100、200、400 mg/kg 共 6 个 Ni 浓度水平，以 NiSO₄·6H₂O 配成溶液均匀投加混入土中，同时按 N 0.2 g/kg、P₂O₅ 0.1 g/kg、K₂O 0.1 g/kg 加入 N、P、K 3 种肥料，混合均匀，放置 30 天，装入直径为 10 cm × 10 cm 的塑料钵中，每钵装土 500 g。每一处理重复 6 次，随机排列。以小白菜为指示植物，待长出第一片真叶后定苗，每钵 10 株，在常规条件下管理，土壤湿度保持在 75% 左右，培育生长 30 天收获。分别测定小白菜茎叶和根系的生物量、Ni 含量及矿质营养含量以及土壤中的全量 Ni 及有效态 Ni 含量。

表 1 供试土壤基本营养特性

Table 1 Basic properties of the soil in the experiment

类别	pH 值	有机质 (g/kg)	全 Ni (mg/kg)	全 Cu (mg/kg)	全 Zn (mg/kg)	全 Fe (g/kg)	全 Mn (g/kg)	全 Ca (g/kg)	全 Mg (g/kg)
棕壤	5.90	24.3	48.84	34.31	63.19	33.73	0.45	4.93	8.92

①基金项目：河北省教育厅科研基金项目 (2003242) 资助。

作者简介：马建军 (1964—)，男，副研究员，主要从事植物营养与农业环境化学研究。E-mail: kycmjj@163.com

1.3 分析方法

土壤和植物样品矿质营养全量测定：精确称取土壤样品 1.000 g、植物样品 0.500 g，土壤样品采用王水-HClO₄ 消煮，植物样品采用 HNO₃-HClO₄ 消煮，按常规操作要求进行处理制备样品待测液，分析测定 Cu、Zn、Fe、Mn、Ca、Mg、Ni 等元素。

土壤有效态 Ni 含量测定：称取过 2 mm 尼龙筛的风干土 5.00 g，提取剂分别选用：去离子水、0.1 mol/L HCl 溶液、0.1 mol/L CaCl₂ 溶液和 0.005 mol/L DTPA-0.1 mol/L TEA-0.01 mol/L CaCl₂ 溶液（pH 7.30）；提取温度为 25℃；提取时间，除 DTPA 为 2 h 外，其他提取剂均为 1 h；土液比分别为 1:2、1:5、1:5、1:2，180 次/min 往复振荡，定量滤纸过滤，收

集滤液待测^[10]

所有待测液采用 3200 型原子吸收分光光度计测定。数据处理与分析均采用 DPS 分析软件完成。

2 结果与分析

2.1 棕壤土施 Ni 对小白菜生物量的影响

2.1.1 对茎叶生长的影响 棕壤土施 Ni 量低于 25 mg/kg 促进小白菜生长，茎叶鲜重和干物重较 CK 分别增加 15.38% 和 4.55%。随施 Ni 量增加，茎叶鲜重和干物重呈明显下降（ $P<0.01$ ），且减产百分率基本持平，表现出明显的毒害效应。施 Ni 量低于 100 mg/kg，促进水分代谢，施 Ni 量高于 100 mg/kg，水分代谢受到抑制（表 2）。

表 2 棕壤土施 Ni 对小白菜生物量的影响

Table 2 Effects of Ni application on biomass of pakchois in brown soil

Ni 投加量 (mg/kg)	茎叶				
	鲜重 (mg/株)	增减 (%)	干重 (mg/株)	增减 (%)	含水量 (g/kg)
CK	429.36 ± 57.93 ABa	—	31.63 ± 5.20 Aa	—	92.63
25	495.40 ± 52.90 Aa	15.38	33.07 ± 0.93 Aa	4.55	93.32
50	304.97 ± 52.14 BCb	-28.97	19.30 ± 2.12 Bb	-38.98	93.67
100	196.93 ± 8.96 CDc	-54.13	14.47 ± 1.50 BCc	-54.25	92.65
200	155.13 ± 23.07 CDcd	-63.87	12.67 ± 0.95 Ccd	-59.94	91.83
400	66.23 ± 12.55 Dd	-84.57	8.93 ± 1.00 Cd	-71.77	86.52
Ni 投加量 (mg/kg)	根系				
	鲜重 (mg/株)	增减 (%)	干重 (mg/株)	增减 (%)	含水量 (g/kg)
CK	30.57 ± 2.30 Aa	—	4.30 ± 0.85 Aa	—	85.93
25	29.47 ± 4.25 Aa	-3.60	3.10 ± 0.36 ABb	-27.91	89.48
50	23.27 ± 2.06 ABb	-23.88	2.20 ± 0.70 Bb	-48.84	90.55
100	16.03 ± 0.80 Bc	-47.56	2.13 ± 0.51 Bb	-50.47	86.71
200	21.23 ± 2.71 Bbc	-30.55	2.20 ± 0.26 Bb	-48.84	89.64
400	18.07 ± 3.97 Bbc	-40.89	2.93 ± 0.76 ABb	-31.86	83.79

注：同一列中不同小写字母代表在 $P<0.05$ 水平差异显著，不同大写字母代表在 $P<0.01$ 水平显著差异。

2.1.2 对根系生长的影响 棕壤土施 Ni，根系生长明显受到抑制。经方差分析，除 25 mg/kg 处理鲜重无明显降低外（ $P>0.05$ ），其他处理根系鲜重和干物重均呈明显下降（ $P<0.01$ ），且根系减产百分率干物重明显大于鲜重。根系含水百分率变化规律与茎叶变化大体一致（表 2）。

由表 2 还可以看出，植株茎叶和根系干物重的减产百分率均大体高于相应处理鲜重的减产百分率，表明棕壤土施 Ni 对小白菜干物重的影响较大。同时，棕壤土施 Ni 对小白菜所产生的毒害效应，表现为茎叶较根系明显。

2.2 棕壤土施 Ni 对小白菜 Ni 吸收和累积的影响

2.2.1 对土壤有效态 Ni 含量的影响 棕壤土施 Ni 可明显增加土壤中有有效态 Ni 含量（表 3）。4 种提取试剂因其性质不同，提取的有效态 Ni 含量大小有所差异，提取能力表现为 HCl>DTPA>CaCl₂>H₂O，且提取能力随土壤施 Ni 量的增加而增加，平均提取百分率 H₂O 为 0.60、CaCl₂ 为 1.26、DTPA 为 11.50、HCl 为 21.33。4 种提取试剂提取的有效态 Ni 含量与土壤全量 Ni 均呈极显著正相关（表 4）。

2.2.2 对植株 Ni 吸收累积的影响 土壤中水溶交换态 Ni 是植物最易吸收利用的形态，能够反映植

表 3 棕壤土施 Ni 对小白菜植株中 Ni 吸收和累积的影响

Table 3 Effect of Ni application on Ni absorption and accumulation in pakchoi

Ni 投加量 (mg/kg)	土壤全 Ni 量 (mg/kg)	土壤有效态 Ni 含量 (mg/kg)				茎叶 Ni		根系 Ni		迁移率 (%)
		H ₂ O	HCl	CaCl ₂	DTPA	含量 (mg/kg)	累积量 (μg/株)	含量 (mg/kg)	累积量 (μg/株)	
0 (CK)	48.84	0.20	1.19	0.17	0.33	12.20 ± 0.75	0.39	21.03 ± 1.26	0.64	59.92
25	66.36	0.40	11.07	0.61	6.21	16.40 ± 0.86	0.54	34.03 ± 3.65	1.00	54.07
50	109.45	0.70	27.60	1.05	16.05	28.02 ± 2.13	0.54	78.71 ± 10.21	1.83	29.50
100	156.68	1.20	48.20	2.61	27.39	42.77 ± 2.98	0.62	168.71 ± 21.74	2.70	22.98
200	251.17	1.60	76.96	5.04	40.83	86.25 ± 5.74	1.10	239.16 ± 18.54	5.07	21.60
400	479.84	2.50	106.80	7.93	50.75	94.05 ± 8.92	0.84	315.03 ± 32.78	5.70	14.68

表 4 4 种提取剂提取土壤有效态 Ni 含量与小白菜生物量及 Ni 含量的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of contents of available Ni extracted with four different kinds of extractants with biomass and Ni contents of pakchoi

相关因子	土壤有效态 Ni			
	H ₂ O	HCl	CaCl ₂	DTPA
茎叶鲜重	-0.936**	-0.945**	-0.901*	-0.958**
茎叶干重	-0.899*	-0.914*	-0.847*	-0.940**
根系鲜重	-0.784	-0.782	-0.695	-0.824*
根系干重	-0.437	-0.496	-0.385	-0.551
茎叶 Ni	0.957**	0.980**	0.971**	0.978**
根系 Ni	0.989**	0.995**	0.980**	0.994**
土壤全 Ni	0.980**	0.963**	0.985**	0.931**

注: * 代表在 P<0.05 水平上显著, ** 代表在 P<0.01 水平上极显著。

物的生态危害状况^[11]。研究结果显示,棕壤土施 Ni 明显增加小白菜茎叶和根系中的 Ni 含量,表现为根系中 Ni 含量及累积量明显大于相应处理茎叶中的 Ni 含量及累积量 (P<0.01),表明小白菜 Ni 富集能力:根系>茎叶。小白菜植株的迁移率(茎叶 Ni 累积量/根系 Ni 累积量)呈明显下降,表明随土壤施 Ni 量增加,根系中 Ni 向茎叶中的转移能力逐渐降低(表 3)。小白菜茎叶和根系中 Ni 与 4 种提取剂提取土壤有效态 Ni 均达极显著正相关(表 4)。

2.3 棕壤土施 Ni 对小白菜矿质营养吸收的影响

2.3.1 对茎叶中矿质营养吸收的影响 随土壤施 Ni 量的增加,茎叶中 Cu、Fe、Ca、Mg 元素的含量大体呈增加趋势,Zn、Mn 元素的含量大体呈下降趋势(表 5)。表明 Ni 与其他矿质营养元素之间存在一定的协同和拮抗关系,这与张西科等^[2]的报道一致。高浓度 Ni 造成植物失绿黄化是影响植物对 Fe 的吸收而导致的^[1],试验结果显示,茎叶中 Fe 含量与 Ni 含量存在高度正相关,表明茎叶失绿黄化并非由缺 Fe 造成,而主要是由 Ni 积累毒害所致^[12]。

2.3.2 对根系中矿质营养吸收的影响 随土壤

施 Ni 量的增加,根系中 Zn、Ca 元素含量大体呈增加趋势,Cu、Fe、Mn、Mg 元素含量大体呈下降趋势(表 5)。试验结果显示,根系与茎叶矿质营养含量变化存在着一定的对应关系。表明 Ni 对茎叶和根系矿质营养元素的协同与拮抗作用存在差异,这可能与 Ni 影响不同矿质营养元素的迁移能力大小差异有关。随土壤施 Ni 量增加,除小白菜茎叶中 Fe 的累积量呈增加趋势外,其他矿质元素在茎叶和根系中的累积量均呈下降趋势。由此看出,Ni 积累影响小白菜植株矿质营养生理代谢,以致造成离子代谢平衡失调,进而阻碍小白菜正常生长发育。

2.4 棕壤土有效态 Ni 提取试剂的选择

在土壤环境学中,通常采用有效态重金属的含量来评价土壤的污染状况,不同提取试剂所建立的土壤环境质量标准存在明显差异。本试验选用 4 种不同性质的提取剂对土壤有效态 Ni 进行提取。各提取试剂的提取能力存在明显差异(表 3),经相关分析,各提取剂提取的有效态 Ni 含量与茎叶、根系 Ni 含量及土壤全 Ni 含量均达极显著正相关,且 HCl 和 DTPA 提取剂的相关系数基本持平且均高于其他

表 5 棕壤土施 Ni 对小白菜植株矿质营养吸收和积累的影响

Table 5 Effect of Ni application on absorption and accumulation of mineral nutrients in pakchoi in brown soil

Ni 投加量 (mg/kg)	茎叶											
	Cu		Zn		Fe		Mn		Ca		Mg	
	含量	累积量	含量	累积量	含量	累积量	含量	累积量	含量	累积量	含量	累积量
	(mg/kg)	(μ g/株)	(mg/kg)	(μ g/株)	(g/kg)	(μ g/株)	(g/kg)	(μ g/株)	(mg/kg)	(μ g/株)	(mg/kg)	(μ g/株)
0 (CK)	9.92(100.00)	0.31	81.53(100.00)	2.53	0.76(100.00)	24.03	0.26(100.00)	8.37	28.94(100.00)	0.91	5.15(100.00)	27.43
25	10.12(102.02)	0.33	84.62(103.79)	2.80	1.15(151.18)	38.06	0.22(83.74)	7.34	29.13(100.66)	0.96	4.94(95.92)	16.00
50	12.47(125.71)	0.24	88.55(108.61)	1.71	1.95(256.02)	37.58		5.10	30.66(105.94)	0.59	5.30(102.91)	13.64
100	10.72(108.06)	0.15	77.81(95.44)	1.13	2.37(311.20)	34.32	0.20(74.85)	2.88	30.43(105.15)	0.44	6.08(118.06)	20.40
200	10.86(109.48)	0.14	55.62(68.22)	0.71	1.90(250.49)	24.19	0.18(69.29)	2.33	31.26(108.02)	0.40	6.76(131.26)	13.86
400	11.79(118.85)	0.02	66.71(81.81)	0.59	1.12(147.43)	9.98	0.09(34.79)	0.82	23.86(82.45)	0.21	6.51(126.41)	20.97

Ni 投加量 (mg/kg)	根系											
	Cu		Zn		Fe		Mn		Ca		Mg	
	含量	累积量	含量	累积量	含量	累积量	含量	累积量	含量	累积量	含量	累积量
	(mg/kg)	(μ g/株)	(g/kg)	(μ g/株)	(mg/kg)	(μ g/株)	(g/kg)	(μ g/株)	(mg/kg)	(μ g/株)	(mg/kg)	(μ g/株)
0 (CK)	25.64(100.00)	0.11	0.11(100.00)	0.46	7.29(100.00)	31.35	0.58(100.00)	2.48	27.71(100.00)	119.15	6.38(100.00)	27.43
25	21.01(81.94)	0.065	0.10(93.70)	0.31	5.46(74.90)	16.93	0.22(39.11)	0.70	27.45(100.95)	85.10	5.16(80.88)	16.00
50	21.01(81.94)	0.046	0.12(113.36)	0.27	6.09(83.54)	13.40	0.26(45.50)	0.58	34.95(126.13)	76.89	6.20(97.18)	13.64
100	31.71(123.67)	0.098	0.19(182.63)	0.60	7.56(103.70)	23.44	0.39(67.00)	1.20	42.79(154.42)	133.15	6.80(106.58)	20.40
200	22.59(88.10)	0.050	0.17(157.25)	0.37	5.39(73.94)	11.86	0.36(63.22)	0.80	32.18(116.13)	70.80	6.30(98.75)	13.86
400	21.81(85.06)	0.15	0.09(84.66)	0.26	4.34(59.53)	12.59	0.24(42.47)	0.71	31.56(113.89)	91.52	7.23(113.23)	20.97

注：括号内数据为相对百分含量。

两种提取试剂，同时与茎叶鲜重、干物重表现为显著或极显著的负相关（表 5）。由此看出，棕壤土有效态 Ni 提取试剂选择，4 种提取剂皆可选用，综合试验结果，DTPA 的相关性最好，且灵敏度较高，因此，DTPA 是一种较为理想的提取试剂。

3 讨论

棕壤土小白菜施 Ni 表现为低浓度促进生长，高浓度抑制生长，并且随土壤施 Ni 量的增加其毒害效应加剧，表现出生物产量下降、植株矮小、叶片黄化等现象。其原因主要是 Ni 在植株根系和茎叶中过量积累所致，影响植物抗氧化酶活性，扰乱活性氧代谢，由此造成 H₂O₂ 和 MDA 在植物组织内积累^[13]，造成植物叶绿体结构破坏，叶绿素含量降低，叶片黄化^[12]。

棕壤土施 Ni 影响小白菜植株矿质营养生理代谢。结果显示，随土壤施 Ni 量的增加，茎叶与根系中 Ca 含量增加、Mn 含量下降，而其他矿质营养含量表现为茎叶中增加、根系中下降的对应变化，同时表现出 Fe 元素在茎叶中累积增加，而其他矿质营

养元素在茎叶和根系中均表现出下降的变化规律。由此推断，Ni 导致离子代谢平衡失调是阻碍小白菜正常生长发育的原因之一。

有研究报道，DTPA 和 HCl 均属较强的代换剂，可将土壤中碳酸盐结合态、有机结合态 Ni 等置换出来；CaCl₂ 是一种较弱的代换剂，主要置换水溶态和交换态 Ni；H₂O 主要置换水溶态 Ni，代换能力较弱^[14]。涂从等^[5]提出水溶交换态 Ni 是植物可利用的主要形态，碳酸盐结合态和有机态 Ni 有一定贡献，铁锰氧化物结合态和残渣态 Ni 对植物几乎无效。经相关分析，4 种提取剂提取的土壤有效态 Ni 含量与小白菜茎叶和根系中 Ni 含量均达到极显著正相关（表 4），并且茎叶 Ni 与茎叶鲜重和干重均达显著负相关（ $r_{\text{鲜重}} = -0.915$ ， $r_{\text{干重}} = -0.878$ ， $P < 0.05$ ），较好地反映了植物的危害状况。试验中发现弱代换试剂提取 Ni 含量较低的土壤时，表现出提取能力和灵敏度较差。综合试验结果分析，DTPA 提取试剂的生物相关性和提取灵敏度均优于其他提取试剂，因此，推荐 DTPA 作为棕壤土壤有效态 Ni 的提取试剂。

土壤有效性重金属浓度可作为植物受重金属毒

害的临界指标。植物苗期对土壤重金属反应最为敏感^[10]。马建军等^[12, 16]运用小麦幼苗苗期（三叶期）毒性指标表征土壤 Cd、Ni 污染，认为该方法可行。确定土壤重金属的毒性临界值，从安全角度出发，应以农产品可食部分中重金属含量不超过食品卫生标准为依据，但目前我国食品卫生标准还很不完善，尚无 Ni 的标准可供引用，所以暂以减产临界值，即以小白菜生物量减产突变点作为棕壤土重金属 Ni 的毒害临界值：土壤全量 Ni 含量为 66.36 mg/kg，土壤有效态 Ni 含量为 6.21 mg/kg (DTPA)，茎叶 Ni 含量为 16.40 mg/kg。

参考文献：

- [1] 王煜, 田延亮. 镍在植物生命活动中的作用. 植物生理学通讯, 1996, 32 (1): 45-49
- [2] 张西科, 张福锁, 李春俭. 植物生长必需的微量元素—Ni. 土壤, 1996, 28 (4): 176-179
- [3] 张民, 龚子同. 我国菜园土壤中某些重金属元素的含量与分布. 土壤学报, 1996, 33 (1): 85-93
- [4] Tu C. Distribution and transformation of native and added Ni fractions in purple soils from Sichuan Province. Pedosphere, 1996, 6 (2): 183-192
- [5] 王夔. 生命科学中的微量元素 (下册). 北京: 中国计量出版社, 1992: 482
- [6] 楼程富. 植物体内镍的存在形态及其耐性的关系. 农业环境保护, 1996, 15 (1): 5-8
- [7] 薛艳, 沈振国, 周东美. 蔬菜对土壤重金属吸收的差异与机理. 土壤, 2005, 37 (1): 32-36
- [8] 夏曾禄. 土壤容量化学. 北京: 气象出版社, 1989
- [9] 涂从. 土壤中活性镍变化的动力学及其应用. 土壤学报, 1998, 35 (1): 49-54
- [10] 马建军. 褐土中有效态镍提取剂及提取条件的选择. 河北农业技术师范学院学报, 1999, 13 (2): 10-14
- [11] 青长乐, 牟树森, 蒲富永. 论土壤重金属毒性临界值. 农业环境保护, 1992, 11 (2): 51-56
- [12] 马建军. 利用作物苗期毒性指标表征土壤 Ni 污染的研究. 农业环境科学学报, 2003, 22 (3): 297
- [13] 王海华, 康健, 富曾华. 高浓度镍对水稻幼苗生长及酶活性的影响. 作物学报, 2001, 27 (6): 954-957
- [14] 杨定清. 土壤-植物系统中镍研究述评. 西南农业学报, 1996, 9 (4): 109-115
- [15] 涂从. 土壤镍各形态的生物可利用性研究. 环境科学学报, 1997, 17 (2): 179-186
- [16] 杨书林, 王宏康. 用小麦幼苗毒性指标表征土壤 Cd 污染的研究. 农业环境保护, 1996, 15 (2): 81-85

Biological Effect and Critical Value of Nickel Application on *Pakchoi* in Brown Soil

MA Jian-jun, ZHU Jing-tao, ZHANG Shu-xia, YU Feng-ming, LIU Yong-jun

(Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: A pot experiment was carried out to study effect of application of Ni on growth and uptake and accumulation of mineral nutrients of *pakchoi* in brown soil, and critical value for soil Ni pollution to be toxic to *pakchoi* through monitoring change in biomass production of *pakchoi*. The critical value is characterized by Ni content in the shoot and content of available Ni in the soil. Results showed that biomass increased significantly with the increase in Ni application rate within the range of 0 ~ 25 mg/kg, while it decreased obviously when the Ni application rate beyoned 25 mg/kg. The uptake of mineral nutrients of the plant showed a certain relationship of synergism or antagonism to Ni content. With the point where biomass dropped by 10% set as the critical point for soil Ni pollution to be toxic to *pakchoi* in brown soil, the critical value is 66.36 mg/kg for total Ni, 6.21mg/kg for available Ni (DTPA), and 16.40 mg/kg for Ni content in stem and leaves.

Key word: Brown soil, *Pakchoi*, Biological effect, Nickel, Critical value