

镉、铅及其相互作用对小白菜根系生理生态效应的研究*

秦天才
(华中农业大学 武汉 430070)

吴玉树^U 王焕校 李启任
(云南大学 昆明 650091)

S634.01 X503.231

摘要 采用溶液培养方法,以镉、铅作为胁迫因子,研究了不同镉、铅浓度对小白菜根系生理生态的影响。实验结果表明,培养液中镉超过0.1 mg/L以后,侧根数目减少,根的分枝程度降低,根系生物量和体积下降,根系生长发育受阻,根系不发达,根系对锰、锌的吸收能力受到抑制,根系活动降低,对硝酸盐吸收能力下降,蛋白质分解加快,游离氨基酸积累,氮代谢紊乱,失调。在含镉的培养液中,施入铅,由于铅的加入,加强了镉对根系的生理生态效应。

关键词: 镉,铅,小白菜,根系,生理生态效应。

EFFECT OF CADMIUM, LEAD AND THEIR INTERACTIONS ON THE PHYSIOLOGICAL AND ECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ROOT SYSTEM OF *Brassica chinensis*

Qin Tiancai

(Huazhong Agricultural University, Wuhan, 430070, China)

Wu Yushu Wang Huanxiao Li Qiren

(Yunnan University, Kunming, 650091)

Abstract The physiological and ecological effects on root system of *Brassica chinensis* grown in hydroponic culture under the stresses at different concentration of Cd and Pb were studied. The experimental results show that the Cd solution concentration of greater than 0.1 mg/L significantly inhibited the root growth, decreased the number of lateral roots, suppressed the root branching, lowered the root biomass and volume, hindered the development of root system, depressed the uptake of Mn, Zn by root, reduced the root activities, accelerated the decomposition of protein in root, made the free amino acid accumulation, led to a reduction in nitrate contents in *Brassica chinensis*, and caused nitrogen metabolism disorder. When Pb had added to the culture solution containing Cd, physiological and ecological effects (toxicity) of Cd on root system was strengthened.

Key words: cadmium, lead, *Brassica chinensis*, root system, physiological and ecological effect.

* 国家自然科学基金资助项目

收稿日期:1996-01-10,修改稿收到日期:1997-02-21。

重金属污染对生态系统的影响是当今世界上普遍关注的环境问题之一。在重金属污染中,镉、铅污染尤为突出。镉、铅在生态系统中迁移积累,最终影响人类,危害人体健康。

国内外对镉、铅研究做了大量工作,多是集中在研究镉、铅对植物地上部分的影响方面,如抑制植物光合作用和蒸腾作用,干扰植物的代谢进程,降低植物产品的产量和质量,加速植物衰老等^[1~3]。但对根系生态效应研究报道不多,由于根系生长在地下,研究起来较为困难。根系是植物与土壤环境接触的重要界面,对土壤环境更为敏感,更易对土壤环境作出反应。为了探讨镉、铅胁迫对植物根系生态效应,本文以小白菜为试验材料,采用溶液培养方法,研究了不同镉、铅浓度对小白菜根系生长发育状况,根系对矿质元素的吸收,根系活力,植物体中硝酸盐含量,根中游离氨基酸含量和可溶性蛋白质含量等方面的影响,以期对污染生态学的研究提供理论依据。

1 实验和方法

1.1 材料为江苏小白菜(*Brassica chinensis* L.)由云南省蔬菜种子公司提供,处理方法同文献[4],即:种子消毒,在含腐殖质土苗床上发芽、生长,待长出3片真叶后,选择均匀一致的苗,移栽至塑料盆中,用Hoagland完全培养液进行培养。一定天数后,更换溶液,然后一次性施入氯化镉或醋酸铅,使培养液中镉(以纯镉计)的浓度为0 mg/L、0.1 mg/L、5 mg/L、10 mg/L、50 mg/L,铅(以纯铅计)的浓度为0 mg/L、100 mg/L、200 mg/L。镉、铅单独及复合一共15个组合,其中培养液中镉、铅浓度为0的组合是对照,实验设3个重复,施入镉、铅7d后收获材料,进行各指标的分析。

1.2 测试指标 根的数量,统计长>2mm的根;根系长度直接测量,单位为cm;根系生物量,根系烘干,直接称量,单位为mg;根系体积用排水法测定^[5],单位为ml;锰、锌、铁含量测定,用HNO₃~HClO₄湿法消化,用E.P-700型原子吸收分光光度计测定,单位为μg/g干重;根系活力的测定,采用α-萘酚氧化法^[5],单位为μg/g·h鲜重;硝酸盐含量用比色法测定^[5],单位为μg/g鲜重;游离氨基酸用HITACHI MODEL 835~50氨基酸自动分析仪测定,单位为mg/100g鲜重;可溶性蛋白质含量采用考马斯亮兰染色法测定^[6],单位为mg/g鲜重。

2 结果与讨论

2.1 Cd、Pb及其相互作用对小白菜根系生长发育的影响

2.1.1 对根的数目和根系长度的影响 小白菜的根系是由主根和侧根组成,其根的数目和根系长度是反映根系发育状况的一个指标。小白菜经Cd、Pb处理后,其根的数目和根系长度都发生变化(表1)。培养液中施入0~50mg/L的Cd,小白菜根系的1级侧根、2级侧根、3级侧根数目随Cd的浓度增大而减少(0.1mg/L的Cd除外),相对减少的幅度其大小顺序是:3级侧根>2级侧根>1级侧根,说明Cd影响侧根的发生。在含Cd的培养液中施入Pb,由于Pb的加入,进一步减少了侧根的数目。根系长度的变化也与Cd、Pb浓度有关,随着培养液中Cd的浓度增加,根系长度逐渐减短,说明Cd对根的伸长生长有抑制作用;在含Cd的培养液中施入Pb,小白菜根系长度要比单独Cd处理时要短,但Cd、Pb浓度达到一定阈值后,根系生长出现停止,本文的结论与Burton等人^[7]和Hassett等人^[8]的结论一致。

2.1.2 对根系生物量和体积的影响 根系生物量和体积是反映根系生长发育状况的另一个指标。从表2中可看出,不同Cd、Pb浓度处理,小白菜根系生物量和体积的变化情况。培养液中单独施入0~50mg/L的Cd,根系生物量和体积表现出相同的变化趋势,即随着Cd的浓度增加而降低。Cd处理后,引起小白菜根变短变粗,根毛缺乏,侧根分枝减少,根幅变小(数据未列出),根系不发达,从而使小白菜根系的生物量和体积比对照少。在含Cd的培养液中施入Pb,随着Pb的浓度增加,根系生物量和体积进一步降低,说明Cd、Pb抑制根系生长发育。根系的生长介质中存在过多的Cd、Pb时,对根系直接产生毒害作用,抑制根系生长,导致根系生物量和体积下降。另外Cd、Pb干扰根的细胞分裂^[9],抑制根系生长发育,从而使根系生物量和体积下降。根系生长发育受阻,相应地会影响根系的生理生化活动。

表1 Cd、Pb 及其相互作用对根的数目和根系长度的影响

Table 1 Effect of Cd and Pb and their interaction on the number of root and the length of root system

处理 Treatment Cd+Pb(mg/L)	根的数目 The number of root			根系长度(cm) Root system length
	1级侧根 First order lateral root	2级侧根 Second order lateral root	3级侧根 Third order lateral root	
0+0(Control)	55	171	77	9.50
0.1+0	54	180	85	9.55
5+0	52	154	46	8.41
10+0	48	141	25	7.17
50+0	45	114	6	5.85
0+100	54	143	54	8.83
0+200	48	125	31	7.58
0.1+100	51	131	43	8.16
5+100	47	118	22	7.54
10+100	44	110	11	6.62
50+100	38	99	5	5.57
0.1+200	48	112	19	7.34
5+200	45	106	15	6.79
10+200	41	95	8	6.24
50+200	35	84	5	5.30

从上述结果(表1、表2)可见,微量 Cd($\leq 0.1\text{mg/L}$)对植物根系的生长有促进作用。

2.2 Cd、Pb 及其相互作用对根系生理的影响

2.2.1 对根系吸收矿质元素的影响 表3反映了 Cd、Pb 及其复合处理根中 Mn、Zn、Fe 含量的变化情况,实验结果表明,培养液中施入 0~50mg/L 的 Cd,除 Cd 在 0.1mg/L 时,短期内根中 Mn、Zn 含量略高于对照外,其它处理,根中 Mn、Zn 含量均随 Cd 的浓度增加而降低,而 Fe 表现出另外一种趋势,即随着 Cd 的浓度增加而增加,说明 Cd 影响根系对 Mn、Zn、Fe 的吸收。在含 Cd 的培养液中施入不同浓度的 Pb, Pb 的浓度越高,根中 Mn、Zn 含量下降越快,而 Fe 含量均比对照高,说明 Cd、Pb 协同抑制根系对 Mn、Zn 的吸收,而对 Fe 的吸收有促进作用。已知 Cd、Pb 与 Mn、Zn 具有接近相等的离子半径和相同的价态(+2价),化学上具有相似性, Cd、Pb、Mn、Zn 在根的表面有类似的吸收位点,它们之间易发生拮抗作用,即存在竞争吸收^[10],根中 Cd、Pb 含量增加,占据了大量吸收位点,从而影响了对 Mn、Zn 的吸收,而且 Cd、Pb 含量越高,占据的位点越多^[11],对 Mn、Zn 的吸收就越少,根中 Mn、Zn 含量就越低。关于 Cd、Pb 对根中 Fe 含量的影响,有不同的报道,即 Cd、Pb 抑制或促进根系对 Fe 的吸收^[12],其机理尚不清楚。

表2 Cd、Pb 及其相互作用对根系生物量和体积的影响

Table 2 Effect of Cd and Pb and their interaction on the biomass and volume of root system

处理 Treatment Cd+Pb(mg/L)	根系生物量 Biomass of root system (mg)	根系体积 Volume of root system (ml)
0+0(control)	169.85	2.01
0.1+0	172.35	2.11
5+0	155.84	1.83
10+0	142.78	1.69
50+0	114.11	1.31
0+100	156.74	1.84
0+200	145.87	1.68
0.1+100	150.52	1.80
5+100	138.57	1.64
10+100	131.35	1.50
50+100	101.15	1.19
0.1+200	135.26	1.60
5+200	127.43	1.52
10+200	89.96	1.09
50+200	64.87	0.72

表3 Cd、Pb 及其相互作用对根中 Mn、Zn、Fe 含量的影响

Table 3 Effect of Cd and Pb and their interaction on the contents of Mn, Zn and Fe in root

Treatment Cd+Pb(mg/L)	Mn ($\mu\text{g/g}$)	Zn ($\mu\text{g/g}$)	Fe ($\mu\text{g/g}$)	Cd [*] ($\mu\text{g/g}$)	Pb [*] ($\mu\text{g/g}$)
0+0(Control)	71.18	230.8	462.5	22.23	127.3
0.1+0	72.93	235.4	470.1	46.12	—
5+0	68.02	218.2	494.3	1508	—
10+0	64.63	183.2	530.4	2250	—
50+0	53.43	120.9	600.5	6605	—
0+100	67.71	190.9	480.2	—	4649
0+200	65.34	177.0	515.0	—	5842
0.1+100	66.24	185.9	506.6	69.11	4571
5+100	62.41	163.1	528.2	1900	4479
10+100	57.26	131.3	582.4	2835	4029
50+100	49.47	103.3	673.2	7096	3476
0.1+200	61.39	159.6	539.5	121.9	5697
5+200	59.19	140.5	565.4	2128	5546
10+200	54.38	102.9	594.5	3171	5486
50+200	41.51	85.71	709.0	7443	4921

* 引自参考文献[4], Quoted from reference[4].

2.2.2 对根系活力的影响 根系活力与根系生命活动的强弱有直接的关系,它是植物生长的重要生理指标之一。表4反映了不同 Cd、Pb 浓度处理,小白菜根系活力的变化情况。培养液中单独施入 0~50mg/L 的 Cd,根系活力与 Cd 的浓度密切相关,Cd 的浓度越高,根系活力越低,说明 Cd 降低根系活力。在 Cd、Pb 复合处理时,含 Cd 的培养液中加入 Pb,根系活力比培养液中仅含 Cd 时下降更快,说明 Pb 的加入,协同 Cd 起作用,降低了根系活力,这可能与 Cd、Pb 对根系的直接毒害作用有关,Cd、Pb 处理导致根系活力的降低,无疑会影响植物一系列生理生化过程,进而使根系对矿质元素和水分吸收能力降低。

2.2.3 对根中游离氨基酸组成和含量的影响 经对17种氨基酸的分析结果表明,Cd、Pb 处理没有造成氨基酸组分的差异,只是对各氨基酸变化幅度有所影响(表5)。培养液中单独施入 0~50mg/L 的 Cd,在 Cd 为 0.1mg/L 时,根中游离氨基酸总量比对照低,可能是低浓度的 Cd 刺激了蛋白质的合成,减少了游离氨基酸的缘故;随着培养液中 Cd 的浓度增加,根中游离氨基酸总量随之增加,大多数氨基酸如天门冬氨酸、谷氨酸、丙氨酸、脯氨酸、苯丙氨酸等表示出相同的趋势,Cd 处理浓度与游离氨基酸总量之间呈显著正相关,说明 Cd 处理导致了根中游离氨基酸积累。在含 Cd 的培养液中施入 Pb,由于 Pb 的加入,造成了根中游离氨基酸的进一步积累。渗透调节被认为是植物适应逆境的主要生理调节机制,游离氨基酸的积累参与了渗透调节,Cd 能抑制植物对水分的吸收和运输,引起植物体内水势降低,导致植物体内水分不平衡^[1-3,10],游离氨基酸的积累能提高植物细胞的渗透压,使植物避免失水,对 Cd、Pb 胁迫产生一种生理适应。

2.2.4 对根中可溶性蛋白质含量的影响 表6反映了不同 Cd、Pb 浓度处理时,根中可溶性蛋白质含量的变化情况。结果表明,在培养液中单独施入 0~50mg/L 的 Cd, Cd 在 0.1mg/L 时短期内能使

表4 Cd、Pb 及其相互作用对根系活力的影响*

Table 4 Effect of Cd and Pb and their interaction on root activities

Pb ($\mu\text{g/L}$)	Cd(mg/L)				
	0	0.1	5	10	50
0	69.15	74.89	61.92	48.47	34.43
100	64.53	58.78	50.66	39.50	23.28
200	51.65	49.81	38.23	26.74	11.62

* 根系活力以 α -萘胺氧化力来表示。Root activity was expressed by α -NA oxidizing power.

表5 Cd、Pb 及其相互作用对根中游离氨基酸和氮的含量影响

Table 5 Effect of Cd and Pb and their interaction on the contents of free amino acid and NH_4^+ in root

Treatment Cd+Pb(mg/L)	Asp	Glu	Gly	Phe	Ala	Pro	NH_4^+	Others	Total
0+0(Control)	0.49	2.48	0.55	0.60	3.32	0.02	10.53	4.19	22.18
0.1+0	0.48	1.94	0.54	0.48	1.56	0.81	8.18	3.39	17.38
5+0	0.72	3.45	1.01	0.80	3.36	0.84	10.20	6.83	27.21
10+0	2.06	10.03	1.62	1.35	7.29	1.41	15.07	11.77	50.60
50+0	3.66	14.49	2.17	1.51	9.61	4.99	13.04	35.99	85.46
0+100	0.61	3.05	0.52	0.62	2.41	0.76	9.73	5.20	22.90
0+200	1.00	7.44	0.85	0.88	9.72	0.91	12.71	5.77	39.28
0.1+100	1.06	4.39	1.04	1.17	2.19	0.84	10.69	8.23	29.61
5+100	2.28	9.36	1.47	1.23	4.48	1.35	11.96	14.55	46.68
10+100	3.82	15.36	2.18	1.45	6.26	1.86	13.35	23.01	67.29
50+100	5.08	21.36	2.74	1.80	11.31	6.00	15.71	34.12	98.14
0.1+200	2.99	9.10	1.78	1.75	4.47	1.39	13.73	20.03	55.24
5+200	4.60	16.55	1.91	1.84	7.08	1.71	14.35	27.18	75.22
10+200	7.49	27.41	2.27	1.64	10.31	4.06	16.58	33.66	103.42
50+200	10.23	38.18	4.75	2.54	18.13	10.84	24.58	45.35	154.60

根中可溶性蛋白质含量略高于对照;Cd 超过0.1mg/L 以后,根中可溶性蛋白质含量均随 Cd 的浓度增加而降低,虽 Cd 能迅速启动一种新的蛋白质合成基因,合成一类称为金属硫蛋白的蛋白质^[15],但根中可溶性蛋白质含量仍呈下降趋势,说明低浓度的 Cd 能促进蛋白质合成,高浓度的 Cd 对蛋白质合成起破坏作用。在含 Cd 的培养液中,加入 Pb 后,根中可溶性蛋白质含量比单独 Cd 处理时下降要快得多,说明 Pb 与 Cd 一起,参与对蛋白质的破坏作用。一般来讲,植物在逆境条件下,体内蛋白质含量降低而小分子的有机化合物如氨基酸的积累,这是由于蛋白质分解加快而合成受到抑制的结果^[16]。Cd 处理导致蛋白质含量下降有两方面的原因:一是 Cd 加强了原有蛋白质分解,二是 Cd 抑制了新蛋白质合成。从本实验结果来看,Cd 引起蛋白质含量下降,是蛋白质分解大于合成的缘故。

2.3 Cd、Pb 及其相互作用对植物体内硝酸盐含量的影响

表7反映了 Cd、Pb 及其复合污染处理时,小白菜体内硝酸盐含量变化情况。实验结果表明:培养液中单独施入0~50mg/L 的 Cd,小白菜体内硝酸盐的含量均比对照低(Cd 在0.1mg/L 时除外),而且施入 Cd 的浓度越高,体内硝酸盐含量越低,说明 Cd 达到一定浓度后,能阻止根系对硝酸盐的吸收和转运。在含 Cd 的培养液中,加入 Pb 以后,植物体内硝酸盐含量进一步降低,说明 Pb 加强了 Cd 的作用。硝酸盐是植物体内重要的氮源,植物吸收同化硝酸盐后为蛋白质合成提供了氨基酸原料,Cd 处理能降低硝酸还原酶活性^[17],使植物体内硝酸盐含量下降,从而影响氮供应,使合成氨基酸的氮源受阻,蛋白质合成也受以抑制。

3 结论

根系是植物的重要器官,在植物的生长发育、生理功能和物质代谢中发挥重要作用,它能感受逆境信号,并在形态和生理上产生一系列反应。

3.1 生长在 Cd、Pb 胁迫环境中的植物,直接受

表6 Cd、Pb 及其相互作用对根中可溶性蛋白质含量的影响

Table 6 Effect of Cd and Pb and their interaction on the contents of soluble protein in root

Pb (mg/L)	Cd(mg/L)				
	0	0.1	5	10	50
0	9.61	9.98	8.31	6.56	3.72
100	9.51	8.64	7.20	5.57	3.21
200	8.49	7.97	6.74	4.93	2.55

害的器官是根系,在形态上表现为侧根数目减少,根系生物量和体积下降,根系生长发育受阻,根系不发达。

3.2 Cd、Pb 对根系生长的抑制作用与环境中 Cd、Pb 浓度有关。环境中 Cd、Pb 浓度越高,植物体内积累越多,对根系生长的抑制作用越强,根系发育越差。

3.3 Cd、Pb 对植物的毒害与破坏植物代谢有关。Cd、Pb 能使植物的根系活力降低,对 Mn、Zn 的吸收能力下降,引起植物体内元素不平衡。同时,Cd、Pb 能降低根系对硝酸盐的吸收,加快蛋白质的分解,造成游离氨基酸的积累,使氮代谢紊乱、失调,进而使植物受害。

表7 Cd、Pb 及其相互作用对植物体内硝酸盐含量的影响

Talbe 7 Effect of Cd and Pb and their interaction on the nitrate contents of *Brassica chinensis*

Pb (mg/L)	Cd(mg/L)				
	0	0.1	5	10	50
0	2267	2275	2170	1880	1402
100	2362	2193	1964	1631	1057
200	2254	2070	1746	1534	838

参 考 文 献

- 1 Bazzaz F A, Rolfe G L, Garlson R W. The effect of cadmium on photosynthesis and transpiration of excised leaves of corn and sunflower. *Physiol Plant*, 1974, **32**: 373~377
- 2 Lee K C, Cunningham B A, Paulsen G M. *et al.* Effects of cadmium on respiration rate and activities of several enzymes in soybean seedlings. *Physiol Plant*, 1976, **36**: 4~6
- 3 Lakshamm K C, Virinder K G, Surinder K S. Effect of cadmium on enzyme of nitrogen metabolism in pea seedling. *Phytochemistry*, 1992, **31**(2): 395~400
- 4 秦天才, 吴玉树, 王焕校. 镉、铅及其相互作用对小白菜生理生化特性的研究. *生态学报*, 1994, **14**(1): 46~50
- 5 华东师范大学生物系植物生理教研组. 植物生理学实验指导. 北京: 人民教育出版社, 1980. 66~70
- 6 Marion M B. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.*, 1976, **72**: 248~250
- 7 Burton K W, Morgan E, Roig A. Interactive effects of cadmium, copper and nickel on the growth of sitka spruce and studies of metal uptake from nutrient solutions. *New Phytol.*, 1986, **103**: 549~557
- 8 Hassett J J, Miller J E, Koeppe D E. Interaction of lead and cadmium on corn root growth and uptake of lead and cadmium by roots. *Environ. Pollut.*, 1976, **11**: 297~302
- 9 Mukherji S and Maitra P. Toxic effects of lead on growth and metabolism of germinating rice (*Oryza sativa* L.) seeds and mitosis of onion (*Allium cepa* L.). *India J. Exp. Bio.*, 1976, **14**: 519~521
- 10 Jarvis J C, Jones L H P, Hopper M J. Cadmium uptake from solution by plants and its transport from roots to shoots. *Plant and Soil*, 1976, **44**: 179~191
- 11 Cataldo D A, Garland T R, Wildung R E. Cadmium uptake kinetics in intact soybean plants. *Plant Physiol.*, 1983, **73**: 844~848
- 12 Wong M K, Chuah G K, Ang K P *et al.* Interactive effects of lead, cadmium and copper combination in the uptake of metals and growth of *Brassica chinensis*. *Environ. Experi. Bot.*, 1986, **26**: 311~339
- 13 Barcelo J, Poschenrieder C, Andren I. *et al.* Cadmium-induced decrease of water stress resistance in bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L. cv. contender) I. Effects of Cd on water potential, relative water content and cell wall elasticity. *J. Plant Physiol.*, 1986, **125**: 17~25
- 14 Poschenrieder C, Gunse B, Barcelo J. Influence of cadmium on water relation, stomatal resistance, and abscisic acid content in expanding bean leaves. *Plant Physiol.*, 1989, **90**: 1365~1371
- 15 Grunhage C, Welgel H H, Ilge D *et al.* Isolation and partial characterization of cadmium-binding protein from *Pisum sativum*. *J. Plant Physiol.*, 1985, **119**: 327~334
- 16 赵可夫, 王韶唐. 作物抗性生理. 北京: 农业出版社, 1990. 153