

引用格式:

王思元, 王仁才, 石浩, 王芳芳, 韩宁. 镉胁迫下猕猴桃对镉的吸收及转运[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(6): 698–705.

WANG S Y, WANG R C, SHI H, WANG F F, HAN N. Study on the absorption and metabolism of cadmium in kiwifruit under cadmium stress[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2020, 46(6): 698–705.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



镉胁迫下猕猴桃对镉的吸收及转运

王思元, 王仁才*, 石浩, 王芳芳, 韩宁

(湖南农业大学园艺学院, 湖南 长沙 410128)

摘 要: 在对湖南省猕猴桃成年果园 8 个猕猴桃品种(金魁、金艳、翠玉、东红、红阳、丰悦、魁蜜、米良一号)镉含量调查分析的基础上, 选取镉富集能力有差异的米良一号与金艳猕猴桃进行镉胁迫(5、10、15、20 mg/kg)下对镉的吸收、转运的差异研究。结果表明: 成年果园 8 个猕猴桃品种在土壤中度镉污染(0.9 mg/kg)时, 果实镉含量均未超过国家标准值(0.05 mg/kg); 猕猴桃果实成熟期镉含量最高; 镉胁迫下, 米良一号和金艳镉含量随镉处理浓度增大而上升, 且在镉浓度较低情况下富集能力较强; 根的镉分配系数最大(> 0.90), 果实的最小, 说明猕猴桃主要由根部吸收累积镉; 米良一号整株吸收和积累镉量显著高于金艳, 但金艳对镉的转移能力强于米良一号, 金艳果实镉含量高于米良一号。

关 键 词: 猕猴桃; 镉胁迫; 镉吸收; 品种

中图分类号: Q945.78

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2020)06-0698-08

Study on the absorption and metabolism of cadmium in kiwifruit under cadmium stress

WANG Siyuan, WANG Rencai*, SHI Hao, WANG Fangfang, HAN Ning

(College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: Based on the investigation and analysis of the cadmium content in 8 kiwifruit varieties(Jinkui, Jinyan, Cuiyu, Donghong, Hongyang, Fengyue, Kuimi, Miliang No. 1) in partial adult kiwifruit orchards in Hunan Province, Miliang No.1 and Jinyan Kiwifruit with different cadmium enrichment capacity were selected to study the difference in cadmium absorption and transportation under cadmium stress(5, 10, 15, 20 mg/kg). The results showed that the cadmium content of the eight kiwifruit varieties in the adult orchard did not exceed the national standard value(0.05 mg/kg) when the soil was polluted by moderate cadmium(0.9 mg/kg). The cadmium content of kiwi fruit is the highest in ripening period. Under cadmium stress, the cadmium content in the organs of Miliang No. 1 and Jinyan increased with the increase of cadmium treatment concentration, and the enrichment ability was stronger when the cadmium concentration was lower. The cadmium distribution coefficient in the root is the largest(> 0.90) and the fruit is the smallest. indicating kiwifruit mainly absorbs and accumulates cadmium from the root. The absorption and accumulation of cadmium in the whole plant of Miliang No. 1 were significantly higher than that in the whole plant of Jinyan, but the transfer ability of cadmium of Jinyan is stronger than that of Miliang No. 1 and the cadmium content of Jinyan fruit is significantly higher than that of Miliang No. 1.

Keywords: kiwifruit; cadmium stress; cadmium uptake; variety

收稿日期: 2019-08-07

修回日期: 2020-07-18

基金项目: 湖南省财政厅项目(湘财农指 2015167)

作者简介: 王思元(1996—), 女, 湖南娄底人, 硕士研究生, 主要从事果树栽培学研究, 791775064@qq.com; *通信作者, 王仁才, 博士, 教授, 主要从事果树学研究, wangrenc@163.com

镉对作物并非仅有抑制作用,若土壤镉浓度较低,植物体内的镉含量较少,则镉对植物生长有促进作用,即“低促高抑”^[1]。植物吸收镉超过本身生理代谢承受值,将影响其正常生理活动,植株生长受抑制,即出现毒害症状^[2],表现为减缓地下部生长,减小总根长度,导致根部变色、坏死,细胞分泌物异常等^[3];也会使植株地上部矮小,新生茎减少,生长速度降低,顶芽、花芽分化减少或推迟^[4];株高净生长量、整株生物量明显下降^[5-6],降低结实率和果实品质,导致减产^[7-8];镉对果树的生长和果实品质均有影响^[9]。若植株对镉不耐受,其受毒害表现愈明显,如地上部萎缩,叶片黄化,产量显著降低,甚至导致植株死亡。

湖南省为猕猴桃原产地,土壤与气候条件适合猕猴桃的栽植^[10-12],是优质猕猴桃主要产区^[13]。笔者于 2017 年至 2019 年,在对湖南省猕猴桃成年果园的 8 个品种果实的镉富集情况进行调查分析的基础上,选取 2 个镉富集能力有明显差异的猕猴桃品种进行盆栽镉梯度胁迫试验,分析猕猴桃对镉的吸收和转运特点,以期为低镉猕猴桃品种的筛选培育及猕猴桃果品安全生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

湖南省郴州市北湖区、桂阳县猕猴桃成年果园美味猕猴桃金魁和米良一号,中华猕猴桃金艳、翠玉、东红、红阳、丰悦、魁蜜,共 8 个品种。

1.2 方法

1.2.1 猕猴桃成年果园的调查与取样

对猕猴桃果园土壤和植株取样,测定镉含量。果园土壤采用“S”形取样。在各品种种植区分别取 10 处 30 cm 深土壤 100 g 混合成 1 个样品。采集各品种猕猴桃根、当年生枝、新枝基部上第一片成熟叶、果实,各 5 次重复。共采集 8 个品种猕猴桃土壤、根、茎、叶、果实 40 组样品。

1.2.2 盆栽试验设计

选取米良一号和金艳猕猴桃 3 年生各 30 株树苗为盆栽材料,进行镉胁迫处理。在盆栽土壤中分别添加镉质量浓度为 5、10、15、20 mg/kg,以不添加镉为对照。单株区组,5 次重复。为使盆栽容器中施镉量恒定,先注入 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 和适量自来水,至土壤全部浸润,搅拌使土壤中的镉尽量均匀分布。

分别于蕾期(4 月)、果实成熟期(8 月)和落叶期(12 月)取盆栽试验土壤(表深 30 cm 处)及猕猴桃植株的根、茎、叶、果实样品,烘干,过筛,均送广电计量检测(湖南)有限公司测定镉含量。

1.3 数据处理

依据 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[14],当土壤 pH 值小于 7.5 时,果园土壤镉含量应小于 0.3 mg/kg。依据 GB 2762—2012《食品中污染物的限量》^[15],果实中的镉含量应小于 0.05 mg/kg。

依据文献[6-8],计算镉富集系数、镉转移系数、镉分配系数。

试验数据均采用 SPSS 20 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 成年果园不同猕猴桃品种镉富集的差异

成年果园 8 个猕猴桃品种的镉含量差异较大(表 1)。土壤镉污染均低于 0.9 mg/kg(国家标准中度污染),猕猴桃果实镉含量均未超过国家规定标准值(0.05 mg/kg),果实品质安全。品种间果实的镉含量无差异。在土壤污染等级为警戒值时(国家标准 0.3 mg/kg),金艳猕猴桃根部镉含量较高,且金艳果实镉含量最高,为 0.009 mg/kg。米良一号猕猴桃在近中度污染的土壤中,根部镉含量最低,果实镉含量也最低,仅为 0.005 mg/kg。

表 1 不同品种猕猴桃的镉含量

Table 1 Cadmium content in different varieties of kiwifruit							mg/kg
品种	pH	镉含量					
		土壤	根	茎	叶	果实	
金魁	6.19	(0.22±0.02)d	(0.39±0.09)abc	0.07±0.02	(0.07±0.01)abcd	0.009±0.006	
金艳	6.53	(0.26±0.02)cd	(0.23±0.04)bcd	0.06±0.02	(0.10±0.01)ab	0.009±0.002	
翠玉	5.60	(0.28±0.05)cd	(0.31±0.27)abcd	0.04±0.01	(0.08±0.04)abc	0.006±0.002	
东红	5.19	(0.29±0.05)cbd	(0.12±0.17)a	0.04±0.05	(0.10±0.03)a	0.005±0.001	
红阳	5.48	(0.37±0.07)abc	(0.45±0.07)ab	0.04±0.01	(0.06±0.01)abcd	0.005±0.001	
丰悦	6.08	(0.41±0.07)ab	(0.11±0.02)cd	0.03±0.01	(0.05±0.03)cd	0.005±0.001	
魁蜜	6.13	(0.48±0.09)a	(0.27±0.07)bcd	0.06±0.01	(0.05±0.01)bcd	0.006±0.001	
米良一号	6.01	(0.49±0.06)a	(0.05±0.02)d	0.03±0.01	(0.03±0.01)d	0.005±0.001	

同列数据后不同字母表示品种间差异显著($P<0.05$)。

2.2 镉胁迫下米良一号和金艳猕猴桃镉含量的差异

由表 2 可知,猕猴桃在不同镉浓度处理下,根部的镉含量最高,果实的最低。猕猴桃在各生育期中,各器官镉含量无显著差异,仅于果实成熟期米良一号根部在高浓度镉(20 mg/kg)处理下,镉含量明显高于金艳。蕾期米良一号和金艳的根、茎、叶镉含量与土壤镉质量浓度呈正相关。蕾期和果实成熟期猕猴桃的根、叶、果实的镉含量与土壤镉质量浓度呈正相关;果实成熟期猕猴桃茎部的镉含量与

落叶期米良一号根、茎和金艳根、茎、叶镉含量随着土壤镉质量浓度提升而升高,到土壤镉 15 mg/kg 时达到最大,随后有所下降。金艳猕猴桃果实的镉含量高于米良一号。在 5 mg/kg 镉处理下,均未超过国家标准(GB 2762—2017)规定限量值(0.05 mg/kg)^[14]。当土壤镉质量浓度达 15 mg/kg 时,米良一号和金艳猕猴桃的果实镉含量均超标;当土壤镉质量浓度达到 20 mg/kg 时,米良一号的果实镉含量为金艳的 1.67 倍。

表 2 镉胁迫下米良一号和金艳猕猴桃镉含量

Table 2 Cadmium content in Miliang No. 1 and Jinyan kiwifruit under different cadmium stress							mg/kg
生育期	品种	施镉量	镉含量				
			根	茎	叶	果实	
蕾期	米良一号	CK	(0.95±0.24)f	(0.04±0.01)d	(0.05±0.01)e		
		5	(26.59±2.36)d	(1.61±0.21)b	(0.07±0.02)de		
		10	(32.38±3.64)c	(1.83±0.32)b	(0.19±0.03)b		
		15	(38.42±2.86)b	(1.94±0.28)b	(0.18±0.06)bc		
		20	(48.84±4.31)a	(2.9±0.73)a	(0.33±0.05)a		
	金艳	CK	(0.58±0.03)c	(0.02±0.01)d	(0.06±0.01)e		
		5	(10.96±1.62)b	(0.22±0.02)cd	(0.06±0.01)e		
		10	(14.35±1.49)b	(0.34±0.05)cd	(0.09±0.02)de		
		15	(15.39±1.74)b	(0.68±0.12)c	(0.13±0.03)cd		
		20	(37.13±3.65)a	(0.37±0.07)cd	(0.21±0.05)b		
果实成熟期	米良一号	CK	(0.97±0.05)f	(0.06±0.01)d	(0.01±0.00)d	(0.00±0.00)d	
		5	(31.87±2.14)d	(0.23±0.03)c	(0.02±0.01)c	(0.00±0.00)d	
		10	(46.24±5.16)c	(0.53±0.09)b	(0.03±0.01)c	(0.03±0.01)c	
		15	(74.56±9.46)b	(0.68±0.23)a	(0.13±0.04)b	(0.06±0.03)b	
		20	(97.79±12.32)a	(0.51±0.07)b	(0.07±0.01)a	(0.12±0.06)a	
	金艳	CK	(0.08±0.02)d	(0.22±0.05)d	(0.03±0.01)d	(0.00±0.00)d	
		5	(11.04±1.48)c	(0.51±0.17)c	(0.06±0.02)c	(0.02±0.01)c	
		10	(11.6±1.74)c	(1.09±0.31)b	(0.10±0.04)c	(0.04±0.01)b	
		15	(20.62±1.69)b	(1.84±0.43)a	(0.13±0.04)b	(0.08±0.02)a	
		20	(43.39±3.25)a	(1.69±0.64)a	(0.25±0.13)a	(0.07±0.03)a	

表 2(续)

生育期	品种	施镉量	镉含量		
			根	茎	叶
落叶期	米良一号	CK	(1.68±0.36)e	(0.07±0.03)d	(0.02±0.01)e
		5	(10.47±1.62)d	(0.34±0.11)c	(0.14±0.1)d
		10	(39.14±3.54)c	(0.58±0.07)b	(0.34±0.1)b
		15	(63.06±7.62)a	(0.99±0.23)a	(0.2±0.06)c
		20	(45.53±5.57)b	(0.29±0.07)c	(0.42±0.16)a
	金艳	CK	(0.22±0.02)e	(0.07±0.01)e	(0.01±0.00)d
		5	(6.78±1.27)d	(0.29±0.05)d	(0.07±0.02)c
		10	(10.4±1.31)c	(0.82±0.17)c	(0.22±0.05)b
		15	(30.19±2.24)a	(1.58±0.61)a	(0.56±0.17)a
		20	(16.13±2.16)b	(1.17±0.04)b	(0.27±0.11)b

同一生育期、同一品种同列数据后不同字母表示品种间差异显著($P<0.05$)。

2.3 镉胁迫下米良一号和金艳猕猴桃镉富集系数的差异

米良一号和金艳对镉的富集系数有显著差异

(表 3)。米良一号根、茎的镉富集系数较金艳的高；叶和果实仅在低镉处理水平下米良一号的镉富集系数较高。

表 3 镉胁迫下米良一号和金艳猕猴桃的镉富集系数

Table 3 Cadmium enrichment coefficients in various organs of Miliang No. 1 and Jinyan kiwifruit under different cadmium stresses						
生育期	品种	施镉量/ (mg·kg ⁻¹)	镉富集系数			
			根	茎	叶	果实
蕾期	米良一号	CK	(1.914±0.325)b	(0.024±0.007)de	(0.034±0.012)b	
		5	(0.953±0.172)c	(0.058±0.016)b	(0.003±0.001)c	
		10	(0.792±0.103)cd	(0.045±0.014)bc	(0.005±0.002)c	
		15	(0.395±0.057)def	(0.02±0.007)de	(0.002±0.001)c	
		20	(0.448±0.12)def	(0.027±0.011)cd	(0.003±0.001)c	
	金艳	CK	(2.526±0.51)a	(0.094±0.024)a	(0.26±0.047)a	
		5	(0.689±0.164)cde	(0.014±0.003)de	(0.004±0.001)c	
		10	(0.421±0.074)def	(0.01±0.004)de	(0.003±0.001)c	
		15	(0.273±0.063)f	(0.012±0.004)de	(0.002±0.001)c	
		20	(0.374±0.061)ef	(0.004±0.001)e	(0.002±0.001)c	
果实成熟期	米良一号	CK	(8.619±0.282)a	(0.549±0.12)a	(0.07±0.008)a	(0.030±0.003)a
		5	(2.074±0.46)b	(0.015±0.002)c	(0.002±0.001)c	(0.000±0.001)b
		10	(1.696±0.132)c	(0.019±0.007)c	(0.001±0.000)c	(0.001±0.000)b
		15	(1.436±0.162)c	(0.013±0.001)c	(0.002±0.000)c	(0.001±0.000)b
		20	(1.484±0.47)c	(0.008±0.001)d	(0.001±0.000)c	(0.002±0.000)b
	金艳	CK	(0.054±0.031)d	(0.162±0.008)b	(0.02±0.004)b	(0.001±0.000)b
		5	(0.583±0.143)d	(0.027±0.004)c	(0.003±0.000)c	(0.001±0.000)b
		10	(0.211±0.043)e	(0.02±0.004)c	(0.002±0.001)c	(0.001±0.000)b
		15	(0.356±0.124)e	(0.032±0.007)c	(0.002±0.001)c	(0.001±0.001)b
		20	(0.69±0.103)c	(0.018±0.006)c	(0.003±0.006)c	(0.001±0.000)b
落叶期	米良一号	CK	(14.867±2.76)a	(0.601±0.24)a	(0.202±0.07)a	
		5	(0.681±0.23)b	(0.022±0.01)b	(0.009±0.004)b	
		10	(1.435±0.427)b	(0.021±0.004)b	(0.013±0.001)b	
		15	(1.214±0.51)b	(0.019±0.011)b	(0.004±0.002)b	
		20	(0.691±0.113)b	(0.004±0.001)b	(0.006±0.003)b	
	金艳	CK	(0.155±0.071)b	(0.051±0.02)b	(0.006±0.001)b	
		5	(0.358±0.131)b	(0.016±0.01)b	(0.004±0.001)b	
		10	(0.188±0.062)b	(0.015±0.007)b	(0.004±0.001)b	
		15	(0.521±0.18)b	(0.027±0.001)b	(0.01±0.003)b	
		20	(0.174±0.024)b	(0.013±0.003)b	(0.003±0.001)b	

同一生育期、同一品种同列数据后不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

蕾期猕猴桃在施镉量大于 5 mg/kg 时, 其镉富集系数与施镉量呈负相关。果实成熟期米良一号镉富集系数变化与蕾期一致, 金艳则无明显规律。落叶期猕猴桃在施镉量低于 10 mg/kg 时, 镉富集系数基本与施镉量呈正相关, 而当施镉量大于 10 mg/kg 时, 镉富集系数则与施镉量呈负相关。

从表 3 中还可看出, 不同生育期猕猴桃各器官对镉富集能力存在差异。成熟期, 猕猴桃根、茎、叶镉富集系数较蕾期有所上升, 而落叶期根部镉富集系数低于果实成熟期与蕾期。蕾期的米良一号、果实成熟期与落叶期的金艳在低镉处理(5 mg/kg)下, 根的镉富集系数大于 1, 说明猕猴桃根系对镉的富集能力大于地上部。

2.4 镉胁迫下米良一号和金艳猕猴桃各器官的镉分配系数的差异

表 4 结果表明, 在各生育期中, 不同镉胁迫处理下, 猕猴桃根部的镉分配系数均最高, 果实的最低, 根中镉分配系数大于 90%, 说明猕猴桃植株吸收的镉主要分配至根部, 分配至果实中的最少(少于 0.01)。落叶期猕猴桃根部镉分配系数较果实成熟期的低, 表明随镉处理浓度提升, 为缓解根部镉浓度过高造成的毒害, 各器官的镉分配系数得到调节。米良一号根部镉分配系数高于金艳的, 而在茎、叶和果实中镉分配比例绝大部分低于金艳, 即在同一镉处理浓度下, 金艳果中分配的镉较米良一号高。

表 4 米良一号和金艳猕猴桃的镉分配系数

Table 4 Distribution coefficient of cadmium in different organs of Miliang No.1 and Jinyan in flower bud stage						
生育期	品种	施镉量/ (mg·kg ⁻¹)	镉分配系数			
			根	茎	叶	果实
蕾期	米良一号	CK	0.971	0.012	0.017	
		5	0.940	0.057	0.003	
		10	0.941	0.053	0.006	
		15	0.948	0.048	0.004	
		20	0.938	0.056	0.006	
	金艳	CK	0.877	0.033	0.090	
		5	0.975	0.019	0.005	
		10	0.971	0.023	0.006	
		15	0.950	0.042	0.008	
		20	0.985	0.010	0.006	
	米良一号	CK	0.930	0.059	0.007	0.003
		5	0.992	0.007	0.001	0.000
		10	0.987	0.011	0.001	0.001
		15	0.989	0.009	0.002	0.001
		20	0.993	0.005	0.001	0.001
	金艳	CK	0.228	0.686	0.080	0.006
		5	0.950	0.044	0.005	0.001
		10	0.905	0.085	0.008	0.003
		15	0.911	0.081	0.006	0.003
		20	0.956	0.037	0.005	0.002
落叶期	米良一号	CK	0.949	0.038	0.013	
		5	0.956	0.031	0.013	
		10	0.977	0.015	0.009	
		15	0.981	0.015	0.003	
		20	0.985	0.006	0.009	
	金艳	CK	0.731	0.241	0.027	
		5	0.949	0.041	0.010	
		10	0.909	0.072	0.019	
		15	0.934	0.049	0.017	
		20	0.918	0.067	0.015	

2.5 镉胁迫下米良一号和金艳猕猴桃各器官镉转移系数的差异

猕猴桃在不同镉浓度处理下，果实镉转移系数最低。米良一号各器官(除蕾期茎外)在各生育期的转移系数均在 5 mg/kg 时达到峰值，之后随镉处理浓度的上升而降低。两品种的茎镉转移系数在蕾期存在显著差异，米良一号的茎镉转移系数基本高于金艳。从蕾期到果实成熟期，茎镉转移系数基本呈

上升趋势，而叶片镉转移系数有所下降，说明果实成熟期镉向叶片转移的速率较蕾期低。果实中镉转移系数与镉浓度有显著相关性，米良一号果实的镉浓度与土壤镉浓度呈正相关。由表 5 还可以看出，落叶期猕猴桃叶镉转移系数基本高于其他 2 个时期，说明落叶期镉从根部向叶转移速度较蕾期及果实成熟期更快。

表 5 镉胁迫下米良一号和金艳猕猴桃的镉转移系数

Table 5 Cadmium transfer coefficient of Miliang No. 1 and Jinyan kiwifruit under different cadmium stresses					
生育期	品种	施镉量/ (mg·kg ⁻¹)	镉转移系数		
			茎	叶	果实
蕾期	米良一号	CK	(0.012±0.004)cd	(0.018±0.006)b	
		5	(0.057±0.018)a	(0.006±0.003)b	
		10	(0.059±0.016)a	(0.007±0.002)b	
		15	(0.020±0.005)bcd	(0.006±0.003)b	
		20	(0.044±0.015)ab	(0.008±0.003)b	
	金艳	CK	(0.061±0.021)a	(0.003±0.001)b	
		5	(0.05±0.023)a	(0.005±0.002)b	
		10	(0.037±0.011)abc	(0.103±0.034)a	
		15	(0.024±0.003)bcd	(0.006±0.002)b	
		20	(0.010±0.003)d	(0.006±0.001)b	
果实成熟期	米良一号	CK	(0.064±0.034)b	(0.008±0.002)b	(0.004±0.001)b
		5	(0.007±0.002)b	(0.000±0.000)b	(0.000±0.000)b
		10	(0.012±0.05)b	(0.001±0.000)b	(0.001±0.000)b
		15	(0.009±0.002)b	(0.002±0.001)b	(0.001±0.000)bc
		20	(0.005±0.002)b	(0.001±0.000)b	(0.001±0.000)b
	金艳	CK	(3.002±1.46)a	(0.349±0.137)a	(0.027±0.015)a
		5	(0.046±0.014)b	(0.005±0.002)b	(0.002±0.000)b
		10	(0.094±0.042)b	(0.008±0.003)b	(0.003±0.001)b
		15	(0.089±0.035)b	(0.006±0.002)b	(0.004±0.001)b
		20	(0.039±0.011)b	(0.006±0.002)b	(0.002±0.000)b
落叶期	米良一号	CK	(0.041±0.017)b	(0.014±0.005)bc	
		5	(0.032±0.014)bc	(0.013±0.004)bc	
		10	(0.015±0.004)c	(0.009±0.003)c	
		15	(0.016±0.005)c	(0.003±0.002)c	
		20	(0.006±0.002)d	(0.009±0.004)bc	
	金艳	CK	(0.33±0.141)a	(0.037±0.016)a	
		5	(0.043±0.015)b	(0.01±0.002)bc	
		10	(0.079±0.031)b	(0.021±0.007)bc	
		15	(0.052±0.018)bc	(0.019±0.017)b	
		20	(0.073±0.031)b	(0.017±0.006)b	

同一生育期、同一品种同列数据后不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

3 讨论

猕猴桃根的镉含量、镉积累量最高，果实的最低；猕猴桃吸收积累镉主要在根部。在蕾期与果实

成熟期，米良一号及金艳镉含量与施镉量呈正相关，米良一号从土壤中吸收的总镉量高于金艳。

在果实成熟期，猕猴桃根部仍未减少对镉的吸收；米良一号茎的镉含量低于蕾期，表明通过根部

吸收的镉,绝大部分被保留并储存,茎部镉则转移至叶和果实中;金艳转移镉的能力比米良一号强,其茎、叶和果实镉分配系数高于米良一号。米良一号在镉胁迫下,其果实镉含量较金艳果实镉含量低,且在施镉量低于 10 mg/kg 土壤中果实镉含量均未超标。结合前人研究,分析土壤中镉含量对果实的影响,得出猕猴桃在低镉土壤种植时,果实吸收积累镉较少,果实镉含量均未超出国家食品安全标准^[16-18],可初步认定米良一号猕猴桃在低镉污染土壤中可栽植且不影响果实安全。

在 3 个取样时期,米良一号和金艳根的镉含量、镉积累量最高,叶的最低,说明根部对镉具有较大的吸收、累积能力,这与张连忠等^[19]报道的苹果各器官中 Cd 累积量的结论一致。在蕾期与果实成熟期,米良一号和金艳含镉量(除茎外)随处理浓度增大显著上升。果实成熟期米良一号根和金艳的根、茎、叶镉含量高于蕾期,说明猕猴桃在果实成熟期时,根部仍未减少对镉的吸收。

猕猴桃各器官中果实的镉含量最低,这与禾本类植物水稻^[20]不同。国外研究发现,除浓度因素外,同为浆果类植物的葡萄根部镉含量还与树龄相关^[21],这可作为后续试验的研究方向。米良一号果实成熟期茎的镉含量低于蕾期,表明根部吸收的镉绝大部分被保留下来,茎部镉则转移至叶和果实中。在低镉处理下,果实未超过食品污染限量值。这与王娟等^[22]对存在中度及以上土壤污染桂北罗汉果主产区测试分析结果相似,生长的罗汉果果实中 Cd 含量远低于绿色食品限量值。李富荣等^[23]调查结果显示,茄果类蔬菜中镉超标率低于其对应的土壤样品超标率。

米良一号和金艳根系的镉富集系数最高,果实的最低,可见猕猴桃吸收积累镉主要为植株的地下部分,果实生长时间短,离污染土壤远,吸收富集镉的量少。米良一号的镉富集系数远高于金艳的,说明米良一号从土壤中吸收的镉总量高于金艳。金艳的茎、叶部和果实的镉分配系数高于米良一号的,而与米良一号相比更多的储存于根部。

参考文献:

- [1] 祝社民. 镉胁迫对小麦种子萌发特性的影响[J]. 陕西农业科学, 2019, 65(12): 51-52.
ZHU S M. The effect of cadmium stress on the germination characteristics of wheat seeds[J]. Shaanxi

- Journal of Agricultural Sciences, 2019, 65(12): 51-52.
- [2] 杨红霞, 陈俊良, 刘巍. 镉对植物的毒害及植物解毒机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 1-8.
YANG H X, CHEN J L, LIU W. Research progress on the toxicity of cadmium to plants and the mechanism of plant detoxification[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(2): 1-8.
- [3] 王利芬, 孔丛玉, 吴思琳, 等. 2 种菊科植物对镉胁迫的生长和生理响应[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(22): 164-166.
WANG L F, KONG C Y, WU S L, et al. Growth and physiological response of two species of compositae to cadmium stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(22): 164-166.
- [4] 铁得祥, 胡红玲, 陈洪, 等. 桢楠幼树生长及抗性生理对镉胁迫的响应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 104-114.
TIE D X, HU H L, CHEN H, et al. Response of growth and resistant physiology of *Phoebe zhennan* saplings in response to cadmium stress[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2019, 47(12): 104-114.
- [5] 麻云霞, 李钢铁, 梁田雨, 等. 外源 H₂O₂ 对镉胁迫下酸枣幼苗生长及生理特性的缓解效应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 361-369.
MA Y X, LI G T, LIANG T Y, et al. Alleviative effects of exogenous H₂O₂ on the growth and physiological characteristics of *Zizyphus jujuba* seedlings under cadmium stress[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 361-369.
- [6] 熊春晖, 卢永恩, 欧阳波, 等. 重金属铅镉胁迫对芋生长发育和产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 560-567.
XIONG C H, LU Y E, OUYANG B, et al. Effects of heavy metal lead and cadmium stress on growth, development and yield of alfalfa[J]. Journal of Agro-Resource and Environment, 2016, 33(6): 560-567.
- [7] 袁珍贵, 陈平平, 郭莉莉, 等. 土壤镉含量影响水稻产量与稻穗镉累积分配的品种间差异[J]. 作物杂志, 2018(1): 107-112.
YUAN Z G, CHEN P P, GUO L L, et al. Varietal difference in yield and Cd accumulation and distribution in panicle of rice affected by soil Cd content[J]. Crops, 2018(1): 107-112.
- [8] 张琦, 李仁英, 徐向华, 等. 土壤镉污染对小麦生长及镉吸收的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 522-527.
ZHANG Q, LI R Y, XU X H, et al. Effects of soil cadmium pollution on wheat growth and cadmium uptake of wheat[J]. Journal of Agricultural Resources and

- Environment, 2019, 36(4): 522–527.
- [9] 张虹, 郭俊明, 袁盛勇, 等. 果树对重金属吸收能力的研究[J]. 江苏农业科学, 2008, 36(4): 269–270.
ZHANG H, GUO J M, YUAN S Y, et al. Study on the absorption ability of fruit tree to heavy metals[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2008, 36(4): 269–270.
- [10] 黄诚, 周长春, 李伟. 猕猴桃的营养保健功能与开发利用研究[J]. 食品科技, 2007, 32(4): 51–55.
HUANG C, ZHOU C C, LI W. Nutrition and health care function of kiwi fruit and its processing technique[J]. Food Science and Technology, 2007, 32(4): 51–55.
- [11] 王仁才, 熊兴耀, 庞立. 湖南猕猴桃产业发展的现状及建议[J]. 湖南农业科学, 2015(5): 124–127.
WANG R C, XIONG X Y, PANG L. Problems and solution of kiwifruit industry development in Hunan Province[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2015(5): 124–127.
- [12] 龙成良. 湖南猕猴桃资源及其开发利用途径[J]. 经济林研究, 2000, 18(2): 60–61.
LONG C L. Survey of *Actinidia* resource in Hunan with reference to utilization approaches[J]. Economic Forest Researches, 2000, 18(2): 60–61.
- [13] 杨玉, 何科佳, 卜范文, 等. 湖南猕猴桃主产区生产集聚与波动现状及产业发展对策[J]. 湖南农业科学, 2013(23): 97–100.
YANG Y, HE K J, BU F W, et al. Production cluster and fluctuation situation of *Actinidia chinensis* in Hunan and its industry developing strategies[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2013(23): 97–100.
- [14] GB 15618—2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].
GB 15618—2018 Soil Environmental Quality Agricultural Land Soil Pollution Risk Control Standard(Trial) [S].
- [15] GB 2762—2012 食品安全国家标准 食品中污染物的限量[S].
GB 2762—2012 National Food Safety Standard Limits of Contaminants in Food [S].
- [16] 杨玉, 童雄才, 王仁才, 等. 湖南猕猴桃园土壤重金属含量分析及污染评价[J]. 农业现代化研究, 2017, 38(6): 1097–1105.
YANG Y, TONG X C, WANG R C, et al. Analysis and safety evaluation of heavy metal contamination in kiwifruit orchard soils in Hunan Province[J]. Journal of Agricultural Modernization Research, 2017, 38(6): 1097–1105.
- [17] 卜范文, 汤佳乐, 杨玉, 等. 湖南省猕猴桃果园土壤镉含量及镉吸收规律研究[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(3): 468–475.
BU F W, TANG J L, YANG Y, et al. A study of soil cadmium content and its absorption law in kiwifruit orchards in Hunan Province[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis(Natural Sciences Edition), 2017, 39(3): 468–475.
- [18] 王仁才, 石浩, 庞立, 等. 湘西猕猴桃种植基地土壤和猕猴桃中重金属积累状况研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(3): 280–285.
WANG R C, SHI H, PANG L, et al. Accumulation of heavy metals in soil and kiwifruit of kiwifruit planting base in western Hunan Province, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(3): 280–285.
- [19] 张连忠, 路克国, 杨洪强. 苹果幼树铜、镉分布特征与累积规律研究[J]. 园艺学报, 2006, 33(1): 111–114.
ZHANG L Z, LU K G, YANG H Q. The distribution and accumulation of cuprum and cadmium in young apple tree[J]. Acta Horticulture Sinica, 2006, 33(1): 111–114.
- [20] 李其林, 黄昀, 王萍, 等. 三峡库区主要粮食作物和土壤中重金属的相关性及富集特征分析[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 764–769.
LI Q L, HUANG Y, WANG P, et al. Character of heavy metals of main foodstuff crop and soil in three gorges reservoir[J]. Ecology and Environment, 2012, 21(4): 764–769.
- [21] ANGELOVA V R, IVANOV A S, BRAIKOV D M, et al. 'Heavy Metals(Pb, Cu, Zn and Cd) in the system soil-grapevine-grape'[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999, 79(5): 713–721.
- [22] 王娟, 韩子钧, 彭培好, 等. 罗汉果主产区土壤重金属潜在生态危害评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(2): 179–183.
WANG J, HAN Z J, PENG P H, et al. Evaluation of potential ecological risk from heavy metals in soil of main producing *Siraitia grosvenorii* areas[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2013, 40(2): 179–183.
- [23] 李富荣, 李敏, 杜应琼, 等. 茄果类蔬菜对其产地土壤重金属的吸收富集与安全阈值研究[J]. 农产品质量与安全, 2018(1): 52–58.
LI F R, LI M, DU Y Q, et al. Study on absorption, enrichment and safety threshold of heavy metals in solanum fruit vegetables[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2018(1): 52–58.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 罗维