

李 博, 袁兴超, 湛方栋, 等. 异质Cd胁迫对蚕豆和富集植物续断菊根系生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 62-70.

LI Bo, YUAN Xing-chao, ZHAN Fang-dong, et al. Effects of heterogeneous Cd stress on root growth of *Vicia faba* and *Sonchus asper*[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1): 62-70.

异质Cd胁迫对蚕豆和富集植物续断菊根系生长的影响

李 博^{1,2}, 袁兴超^{1,2}, 湛方栋^{1,2}, 尹晓青^{1,2}, 蒋 明^{1,2}, 秦 丽^{1,2}, 祖艳群^{1,2}, 李 元^{1,2*}

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南省农业环境污染控制与生态修复工程实验室, 云南农业大学, 昆明 650201)

摘 要: 为了研究蚕豆和续断菊根系对异质Cd胁迫的生态学响应, 探讨间作体系影响Cd累积的根系可塑性机理, 以蚕豆和Cd富集植物续断菊为试验材料, 设置异质Cd胁迫根箱模拟试验, 将根箱平均分为左、右两室, 分别填充Cd处理(50 mg·kg⁻¹)土壤和无Cd土壤, 分别测定蚕豆和续断菊的根长、根表面积、根体积等形态指标, 比较异质Cd胁迫对蚕豆和续断菊根系生长影响的差异。结果表明, 异质Cd胁迫下, 蚕豆的根长、根表面积、根体积表现为无Cd右室大于Cd胁迫左室, 续断菊表现为Cd胁迫左室大于无Cd右室。蚕豆根系直径为0~0.5 mm、土壤深度为15~20 cm时, 无Cd右室根长、根表面积和根体积是Cd胁迫左室的4.63、3.14倍和2.39倍; 根系直径为0.5~1 mm和大于1 mm、土壤深度为30~35 cm时, 无Cd右室根长分别是Cd胁迫左室的1.69倍和5.04倍, 根表面积分别是Cd胁迫左室的1.78倍和5.05倍, 根体积分别是Cd胁迫左室的1.85倍和33.00倍。续断菊根系直径为0~0.5 mm、土壤深度为0~5 cm时, Cd胁迫左室根长、根表面积和根体积是无Cd右室的1.66、1.36倍和1.57倍; 根系直径为0.5~1 mm、土壤深度为35~40 cm时, Cd胁迫左室根长、根表面积和根体积是无Cd右室的2.86、2.16倍和2.81倍; 根系直径大于1 mm、土壤深度为15~20 cm时, Cd胁迫左室根长、根表面积和根体积是无Cd右室的26.94、52.26倍和139.33倍。综上所述表明Cd胁迫抑制了蚕豆根系的生长, 促进了续断菊根系的生长, 这可能是蚕豆和续断菊间作模式修复Cd污染土壤的机理之一。

关键词: 蚕豆; 续断菊; Cd胁迫; 根长; 根表面积; 根体积

中图分类号: X171.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2019)01-0062-09

doi: 10.13254/j.jare.2017.0313

Effects of heterogeneous Cd stress on root growth of *Vicia faba* and *Sonchus asper*

LI Bo^{1,2}, YUAN Xing-chao^{1,2}, ZHAN Fang-dong^{1,2}, YIN Xiao-qing^{1,2}, JIANG Ming^{1,2}, QIN Li^{1,2}, ZU Yan-qun^{1,2}, LI Yuan^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Engineering Laboratory for Agricultural Environment Pollution Control and Ecological Remediation, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: A controlled glasshouse experiment was conducted to explore the effects of heterogeneous Cd stress on root growth of *Vicia faba* and *Sonchus asper*. The root length, root surface area and root volume were examined. The results showed that the root length, root surface area and root volume of *Vicia faba* was greater increase in no Cd patches than in the Cd stress patches. The root length, root surface area and root volume of *Sonchus asper* was greater increase in Cd stress patches than in no Cd patches. When the root diameter of *Vicia faba* was 0~0.5 mm and the soil depth was 15~20 cm, the root length, root surface area and root volume in no Cd patches were 4.63, 3.14 times and 2.39 times that in the Cd stress patches; Root diameter for 0.5~1 mm and greater than 1 mm, soil depth of 30~35 cm, root length in no Cd patches were 1.69 times and 5.04 times that in the Cd stress patches, root surface area in no Cd patches were 1.78 times and 5.05 times that in the Cd stress patches, root volume in no Cd patches were 1.85 times and 33 times that in the Cd stress patches. When the root diameter of *Sonchus asper* was 0~0.5mm and the soil depth was 0~5 cm, the root length, root surface area and root volume in the Cd stress patches were 1.66, 1.36

收稿日期: 2017-12-08 录用日期: 2018-04-18

作者简介: 李 博(1986—), 男, 陕西镇安人, 讲师, 从事环境生态学研究。E-mail: libo@ynau.edu.cn

*通信作者: 李 元 E-mail: liyuan@ynau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1802603); 云南省科技计划项目(2017FD078, 2018BB017); 云南省科技创新团队计划项目(2017HC015); 国家污染耕地修复示范项目(YNBY2016-002)

Project supported: National Key Research and Development Projects of China (2018YFC1802603); Science and Technology Planning Project of Yunnan Province (2017FD078, 2018BB017); The Innovation Team of Yunnan Province (2017HC015); The Soil Pollution Comprehensive Treatment Major Projects of Ministry of Environmental Protection of China (YNBY2016-002)

times and 1.57 times that in no Cd patches; Root diameter for 0.5~1 mm, soil depth of 35~40 cm, the root length, root surface area and root volume in the Cd stress patches were 2.86, 2.16 times and 2.81 times that in no Cd patches; Root diameter for greater than 1 mm, soil depth of 15~20 cm, the root length, root surface area and root volume in the Cd stress patches were 26.94, 52.26 times and 139.33 times that in no Cd patches. The root growth of *Vicia faba* was alleviated, and the root growth of *Sonchus asper* was promoted under Cd stress.

Keywords: *Vicia faba*; *Sonchus asper*; heterogeneous Cd stress; root length; root surface area; root volume

随着社会经济的快速发展,矿山开采、金属冶炼、化工生产和农药、化肥等生产活动加剧了土壤重金属污染^[1-3],其中,Cd 污染最为严重和复杂^[4]。2014 年《全国土壤污染状况调查公报》公布,全国土壤点位重金属总的超标率为 16.1%,无机污染物超标点位占全部超标点位的 82.8%,其中 Cd 点位超标率为 7.0%^[5]。Cd 等重金属能够通过食物链对生产者和消费者产生毒害作用^[6]。因此,解决土壤中 Cd 等重金属污染问题迫在眉睫。

植物修复因其可原位修复、成本低、不破坏土壤结构、不引起二次污染等优点,具有广阔的市场前景^[7-8]。但是只通过超积累植物修复污染土壤,耗费时间长,通过低积累作物与超积累植物间作的方式修复污染土壤,有可能在修复污染土壤的同时收获符合卫生标准的农产品,达到边修复边生产的目的^[9]。课题组前期研究发现续断菊对 Cd 有较强的富集能力,其 Cd 的转移系数及累积量达到了 Cd 富集植物的标准^[10],并运用其与玉米、蚕豆等作物间作,结果表明续断菊与作物间作促进了富集植物吸收重金属,减少了作物吸收重金属^[11-15],然而对此间作系统中根系行为特征尚不清楚。

植物根系具有较强的可塑性,并且对植物间的相互作用起到了重要的作用,养分在土壤中的分布具有异质性,植物根系对土壤中的异质性养分资源存在生理和形态上的一系列可塑性反应,植物通过根系形态和生理的一系列可塑性的变化来探寻、获取并利用资源这种行为被定义为根系的觅食行为^[16]。在重金属污染土壤中,富集植物根系对重金属吸收可能存在类似觅食行为,而普通植物为了减轻重金属的生物毒性,其根系可能避开重金属生长。间作体系的理论基础是植物的种间相互作用^[17],植物种间相互作用主要表现为植物对资源的竞争和互补利用^[18-19]。因此,理论上可以假设,在重金属污染土壤中,由于富集植物

和普通作物对重金属偏好性不同,间作体系中这两种植物存在种间竞争,进而引起植物根系形态变化,从而使得富集植物多吸收重金属、作物少吸收重金属。

为了检验上述假设,本研究以课题组前期研究的续断菊/蚕豆间作模式中的蚕豆和 Cd 超富集植物续断菊为研究对象,采用 Cd 胁迫土培模拟试验,设计异质 Cd 胁迫装置,利用根系图像分析系统,分析异质 Cd 胁迫条件下蚕豆和续断菊根长、根体积、根表面积等形态指标,研究蚕豆和续断菊根系对异质 Cd 胁迫的形态学响应,探讨间作体系影响 Cd 累积的根系可塑性机理,为全面揭示富集植物和作物间作促进富集植物吸收重金属、减少作物吸收重金属的根际机理提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

续断菊[*Sonchus asper* (L.) Hill.]为菊科苦苣菜属植物,为 Cd 富集植物,在续断菊的种子成熟期,野外采集云南会泽铅锌矿区续断菊的种子,带回实验室保存备用。

蚕豆(*Vicia faba* L.)品种为尼加拉,为云南会泽铅锌矿广泛种植的作物之一。

选择颗粒饱满的种子在恒温培养箱中进行发芽,待种子发芽后将幼苗小心移栽至营养袋中,继续在培养箱中培养,待幼苗长至 10 cm 左右时移出培养箱,供胁迫试验备用。

1.2 供试土壤

供试土壤为云南农业大学后山试验田土壤,土壤类型为山地红壤,土壤风干后过 5 mm 尼龙筛备用,土壤中的养分及主要重金属含量见表 1。

1.3 试验设计

设置 Cd 处理浓度为 50 mg·kg⁻¹,采用根箱设置水平方向的土壤 Cd 斑块。根箱由 3 mm 厚有机玻璃

表 1 供试土壤的养分和重金属含量

Table 1 Contents of nutrients and heavy metals in the soil used

pH	有机质/g·kg ⁻¹	全 N/g·kg ⁻¹	全 P/g·kg ⁻¹	全 K/g·kg ⁻¹	碱解 N/mg·kg ⁻¹	有效 P/mg·kg ⁻¹	速效 K/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹
5.78	7.83	2.59	0.31	8.21	18.41	9.56	81.03	0.05	20

板加工而成,规格为长×高×厚=20 cm×42 cm×2 cm,将根箱平均划分为左、右2部分,左室填充Cd处理土壤,右室填充未处理土壤,每个根箱移栽1株蚕豆或续断菊,将蚕豆或续断菊移栽在根箱中间(图1),每种植物分别设置5个重复。

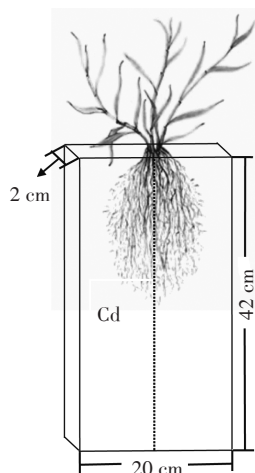


图1 土培试验装置

Figure 1 Diagram for experimental unit

1.4 采样方法

在移栽90 d后采用方块取样法采集续断菊与蚕豆的根系,每个土块为5 cm×5 cm×2 cm的长方体,从左到右、从上到下依次采样,最终每个根箱采样32个,再依次将每个土块中的根系挑选出来。放在0.5 mm筛子上反复冲洗,直至根系上无泥土及异物,断落在筛子上的细小根系也全部收集起来。

1.5 测量指标与方法

将用自来水洗干净的植株根系再用蒸馏水冲洗,然后平铺入放有蒸馏水的根系扫描仪(Epson Express-

sion 10000XL1.0,日本)的根盘中,进行根系的扫描。根系扫描得到的图片利用图像分析软件WinRHIZO Pro V2007d进行分析,获得植物根系的根长、根表面积、根体积、根直径等指标。

1.6 数据统计

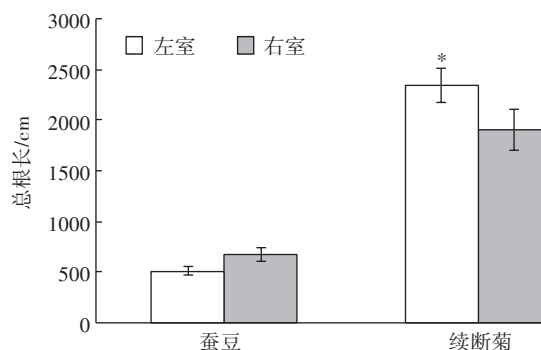
用Excel 2013记录、整理数据并作图;用SPSS 19.0对数据进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 异质Cd胁迫对蚕豆和续断菊根长特征的影响

由图2可知,异质Cd胁迫条件下,蚕豆无Cd右室的总根长大于Cd胁迫左室,续断菊刚好相反,表现为无Cd右室的总根长小于Cd胁迫左室。

分土层看,由图3可知,土壤深度为0~20 cm时,蚕豆无Cd右室的总根长显著高于Cd胁迫左室;土壤深度为20~25 cm时,蚕豆无Cd右室的总根长显著低



图中左室为添加50 mg·kg⁻¹ Cd土壤,右室为未处理土壤,*表示同种植物左、右室之间差异显著(P<0.05)。下同

图2 异质Cd胁迫对蚕豆和续断菊总根长的影响

Figure 2 Total root length of *Vicia faba* and *Sonchus asper* under heterogeneous Cd stress

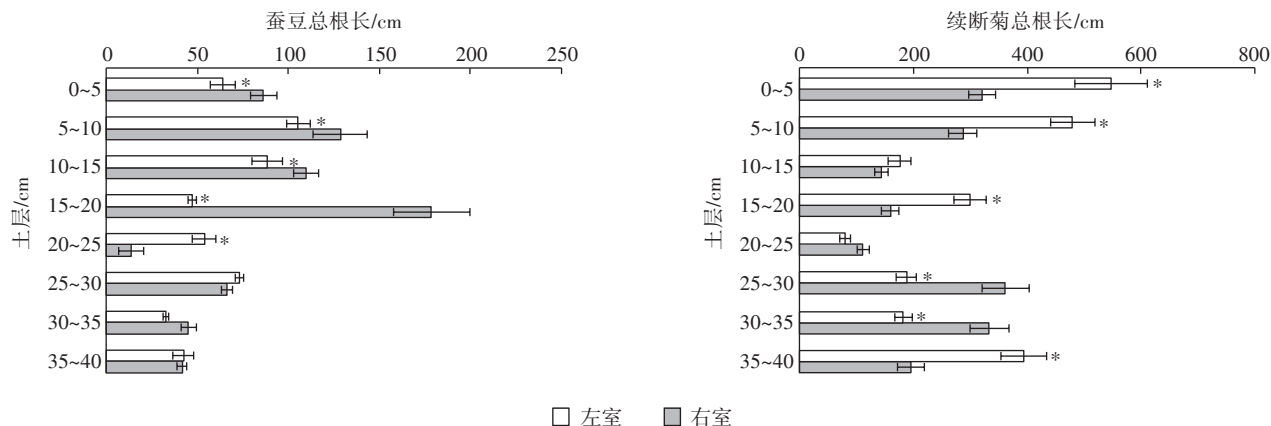


图3 异质Cd胁迫对蚕豆和续断菊不同土层总根长的影响

Figure 3 Total root length in different soil layers of *Vicia faba* and *Sonchus asper* under heterogeneous Cd stress

于Cd胁迫左室;土壤深度为25~40 cm时,蚕豆无Cd右室和Cd胁迫左室的总根长无显著差异。

当土壤深度为0~10、15~20、35~40 cm时,续断菊Cd胁迫左室的总根长显著高于无Cd右室;土壤深度为25~35 cm时,续断菊Cd胁迫左室的总根长显著低于无Cd右室;当土壤深度为10~15 cm、20~25 cm时,续断菊Cd胁迫左室和无Cd右室的总根长无显著差异。

分根径级看,由表2可知,蚕豆根系直径为0~0.5 mm、土壤深度为15~20 cm时,蚕豆无Cd右室根长大于Cd胁迫左室,无Cd右室根长是Cd胁迫左室的4.63倍;根系直径为0.5~1 mm和大于1 mm、土壤深度为30~35 cm时,Cd胁迫左室根长低于无Cd右室,无Cd右室根长分别是Cd胁迫左室的1.69倍和5.04倍。

由表3可知,续断菊根系直径为0~0.5 mm、土壤深度为0~5 cm时,Cd胁迫左室根长大于无Cd右室,Cd胁迫左室根长是无Cd右室的1.66倍;根系直径为0.5~1 mm、土壤深度为35~40 cm时,Cd胁迫左室根长大于无Cd右室,Cd胁迫左室根长是无Cd右室的2.86

倍;根系直径大于1 mm、土壤深度为15~20 cm时,Cd胁迫左室根长大于无Cd右室,Cd胁迫左室根长是无Cd右室的29.94倍。

2.2 异质Cd胁迫对蚕豆和续断菊根面积特征的影响

由图4可知,异质Cd胁迫条件下,蚕豆无Cd右室的总根表面积大于Cd胁迫左室,续断菊刚好相反,表现为无Cd右室的总根表面积小于Cd胁迫左室。

分土层看,由图5可知,土壤深度为0~20 cm时,蚕豆无Cd右室的总根表面积显著高于Cd胁迫左室;土壤深度为20~25 cm时,蚕豆无Cd右室的总根表面积低于Cd胁迫左室;土壤深度为35~40 cm时,蚕豆无Cd右室和Cd胁迫左室的总根表面积无显著差异。

当土壤深度为0~10、15~20、35~40 cm时,续断菊Cd胁迫左室的总根表面积均显著高于无Cd右室;土壤深度为25~35 cm时,续断菊Cd胁迫左室的总根表面积显著低于无Cd右室;当土壤深度为10~15、20~25 cm时,续断菊Cd胁迫左室和无Cd右室的总根表面积无显著差异。

分根径级看,由表4可知,蚕豆根系直径为0~0.5

表2 异质Cd胁迫下蚕豆根系不同直径下的根长分布特征(cm)

Figure 2 Root length in different diameters of *Vicia faba* under heterogeneous Cd stress(cm)

土层	左室			右室		
	0<d≤0.5	0.5<d≤1	d>1	0<d≤0.5	0.5<d≤1	d>1
0~5 cm	20.01±1.99	38.84±0.76	5.33±0.07	14.43±1.67	56.84±7.77	14.95±2.21
5~10 cm	32.64±2.22	60.77±1.23	11.95±0.09	27.26±5.55	76.95±4.32	24.39±1.12
10~15 cm	32.72±1.88	50.68±1.32	5.32±0.33	30.55±2.67	56.80±7.78	22.44±3.42
15~20 cm	29.98±1.22	33.52±4.44	7.52±0.91	138.74±25.15	25.26±1.11	14.52±7.77
20~25 cm	6.14±0.55	20.21±0.12	3.34±0.76	2.09±0.15	3.22±0.09	8.35±0.67
25~30 cm	29.58±3.78	34.86±5.55	8.63±0.43	8.83±1.23	39.16±2.52	18.42±2.45
30~35 cm	14.94±0.08	16.22±2.22	1.70±0.05	9.12±1.23	27.56±3.33	8.58±0.32
35~40 cm	22.76±5.44	17.83±2.11	1.85±0.03	23.40±1.11	13.11±3.44	5.16±0.23

注:d表示根系直径,单位为mm,下同。

表3 异质Cd胁迫下续断菊根系不同直径下的根长分布特征(cm)

Figure 3 Root length in different diameters of *Sonchus asper* under heterogeneous Cd stress(cm)

土层	左室			右室		
	0<d≤0.5	0.5<d≤1	d>1	0<d≤0.5	0.5<d≤1	d>1
0~5 cm	466.41±31.19	53.51±4.23	26.83±3.01	281.41±17.52	23.81±1.99	11.04±0.89
5~10 cm	430.26±23.22	36.27±3.22	12.89±0.89	261.50±25.01	18.27±2.12	2.44±0.38
10~15 cm	164.00±21.12	9.21±0.18	0.90±0.01	132.28±9.99	9.23±1.52	0.39±0.05
15~20 cm	261.71±33.21	23.00±3.22	13.74±2.11	149.47±16.33	8.83±0.67	0.51±0.04
20~25 cm	76.50±9.78	2.89±0.41	0.04±0.00	101.67±8.88	8.93±1.01	0.32±0.02
25~30 cm	171.48±22.23	10.89±1.55	4.52±0.78	305.96±28.93	32.35±2.78	22.17±1.99
30~35 cm	167.62±9.11	10.05±1.11	4.17±0.66	271.42±12.33	20.05±1.33	26.24±3.88
35~40 cm	325.045±42.33	41.64±3.84	26.04±3.81	169.44±5.55	14.55±1.28	10.61±2.22

mm、土壤深度为15~20 cm时,蚕豆无Cd右室根表面积大于Cd胁迫左室,无Cd右室根表面积是Cd胁迫左室的3.14倍;根系直径为0.5~1 mm和大于1 mm、土壤深度为30~35 cm时,Cd胁迫左室根表面积低于无Cd右室,无Cd右室根表面积分别是Cd胁迫左室的1.78倍和5.05倍。

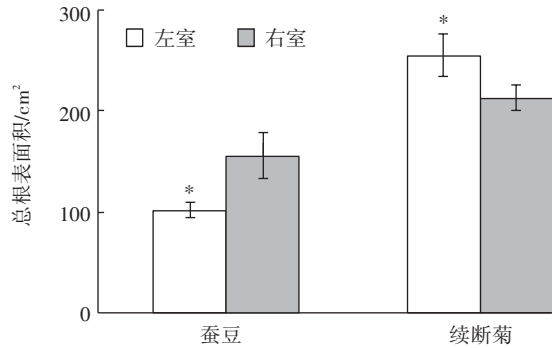


图4 异质Cd胁迫对蚕豆和续断菊总根表面积的影响

Figure 4 Root surface area of *Vicia faba* and *Sonchus asper* under heterogeneous Cd stress

由表5可知,续断菊根系直径为0~0.5 mm、土壤深度为0~5 cm时,Cd胁迫左室根表面积大于无Cd右室, Cd胁迫左室根表面积是无Cd右室的1.36倍;根系直径为0.5~1 mm、土壤深度为35~40 cm时,Cd胁迫左室根表面积大于无Cd右室, Cd胁迫左室根表面积是无Cd右室的2.16倍;根系直径大于1 mm、土壤深度为15~20 cm时,Cd胁迫左室根表面积大于无Cd右室, Cd胁迫左室根表面积是无Cd右室的52.26倍。

2.3 异质Cd胁迫对蚕豆和续断菊根体积特征的影响

由图6可知,异质Cd胁迫条件下,蚕豆无Cd右室的总根体积大于Cd胁迫左室,续断菊刚好相反,表现为无Cd右室的总根体积小于Cd胁迫左室。

分土层看,由图7可知,土壤深度为0~15、25~30 cm时,蚕豆无Cd右室的总根体积显著高于Cd胁迫左室;土壤深度为15~25、35~40 cm时,蚕豆无Cd右室和Cd胁迫左室的总根体积无显著差异。

当土壤深度为0~15 cm时,续断菊Cd胁迫左室的总根体积显著高于无Cd右室;土壤深度为25~35

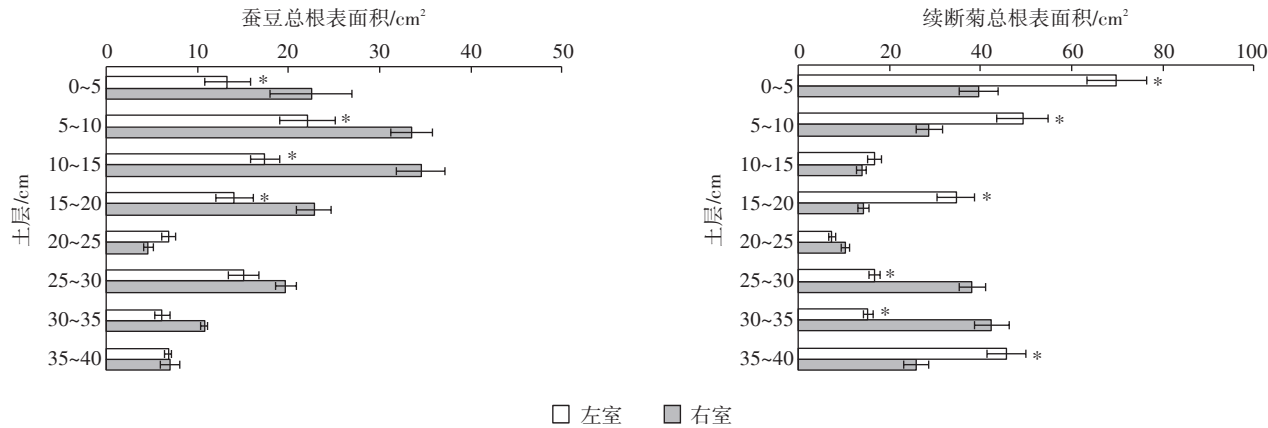


图5 异质Cd胁迫对蚕豆和续断菊不同土层总根表面积的影响

Figure 5 Root surface area in different soil layers of *Vicia faba* and *Sonchus asper* under heterogeneous Cd stress

表4 异质Cd胁迫下蚕豆根系不同直径下的根表面积分布特征(cm²)

Figure 4 Root surface area in different diameters of *Vicia faba* under heterogeneous Cd stress(cm²)

土层	左室			右室		
	0<d≤0.5	0.5<d≤1	d>1	0<d≤0.5	0.5<d≤1	d>1
0~5 cm	1.59±0.08	8.95±0.99	2.00±0.13	1.38±0.23	13.16±2.23	6.80±1.02
5~10 cm	2.34±0.55	13.67±0.98	5.00±0.33	2.24±0.12	18.56±0.55	10.97±1.54
10~15 cm	2.53±0.44	11.96±0.97	2.05±0.45	2.44±0.55	13.54±0.08	15.82±2.33
15~20 cm	2.29±0.04	7.95±0.22	2.98±0.07	7.19±0.33	5.68±0.78	7.78±0.93
20~25 cm	0.80±0.10	4.52±0.22	1.21±0.24	0.18±0.03	0.72±0.06	3.55±0.44
25~30 cm	3.02±0.45	7.61±0.93	3.57±0.11	0.82±0.03	9.52±1.01	8.70±0.06
30~35 cm	1.37±0.03	3.75±0.09	0.63±0.23	0.57±0.08	6.66±0.88	3.18±0.62
35~40 cm	1.62±0.21	3.97±0.42	0.64±0.04	1.41±0.23	3.14±0.43	1.96±0.37

表5 异质Cd胁迫下续断菊根系不同直径下的根表面积分布特征(cm²)

Figure 5 Root surface area in different diameters of *Sonchus asper* under heterogeneous Cd stress(cm²)

土层	左室			右室		
	0<d≤0.5	0.5<d≤1	d>1	0<d≤0.5	0.5<d≤1	d>1
0~5 cm	25.93±4.44	18.48±2.22	16.75±1.14	19.13±0.99	9.16±1.77	5.56±0.78
5~10 cm	23.26±3.33	13.86±2.09	6.79±0.88	17.87±2.05	6.18±0.99	1.07±0.12
10~15 cm	10.33±1.22	3.71±0.06	0.38±0.05	8.17±1.07	3.74±0.09	0.14±0.09
15~20 cm	10.50±1.09	9.92±1.08	9.93±0.05	8.33±0.08	3.38±0.54	0.19±0.04
20~25 cm	4.05±0.07	2.23±0.04	0.02±0.00	6.37±0.09	2.26±0.78	0.11±0.02
25~30 cm	8.45±0.09	3.99±0.22	2.26±0.32	11.64±0.08	11.26±1.08	12.54±1.09
30~35 cm	7.96±0.22	3.39±0.55	2.11±0.08	10.05±1.03	12.94±1.09	16.70±1.71
35~40 cm	11.39±1.45	15.71±1.78	15.70±1.88	4.54±0.43	7.26±0.99	8.09±1.02

cm时,续断菊Cd胁迫左室的总根体积显著低于无Cd右室;当土壤深度为15~25 cm时,续断菊Cd胁迫左室和无Cd右室的总根体积无显著差异。

分根径级看,由表6可知,蚕豆根系直径为0~0.5 mm、土壤深度为15~20 cm时,蚕豆无Cd右室根体积

大于Cd胁迫左室,无Cd右室根体积是Cd胁迫左室的2.39倍;根系直径为0.5~1 mm和大于1 mm、土壤深度为30~35 cm时,Cd胁迫左室根体积低于无Cd右室,无Cd右室根体积分别是Cd胁迫左室的1.85倍和33.00倍。

由表7可知,续断菊根系直径为0~0.5 mm、土壤深度为35~40 cm时,Cd胁迫左室根体积大于无Cd右室,Cd胁迫左室根体积是无Cd右室的2.29倍;根系直径为0.5~1 mm、土层深度为35~40 cm时,Cd胁迫左室根体积大于无Cd右室,Cd胁迫左室根体积是无Cd右室的2.81倍;根系直径大于1 mm、土壤深度为15~20 cm时,Cd胁迫左室根体积大于无Cd右室,Cd胁迫左室根体积是无Cd右室的139.33倍。

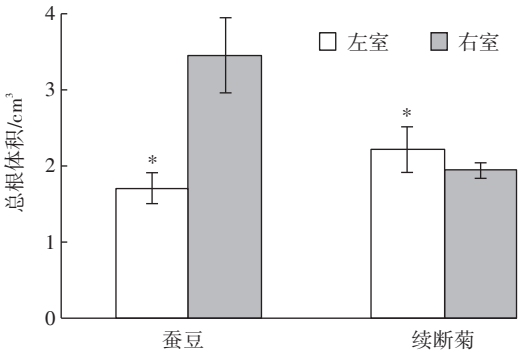


图6 异质Cd胁迫对蚕豆和续断菊总根体积的影响

Figure 6 Root volume of *Vicia faba* and *Sonchus asper* under heterogeneous Cd stresses

3 讨论

3.1 蚕豆根系形态对异质Cd胁迫的响应

根系作为植物重要的吸收和代谢器官,控制着植

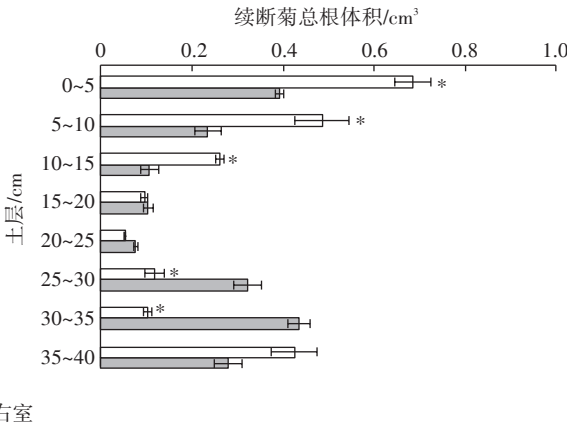
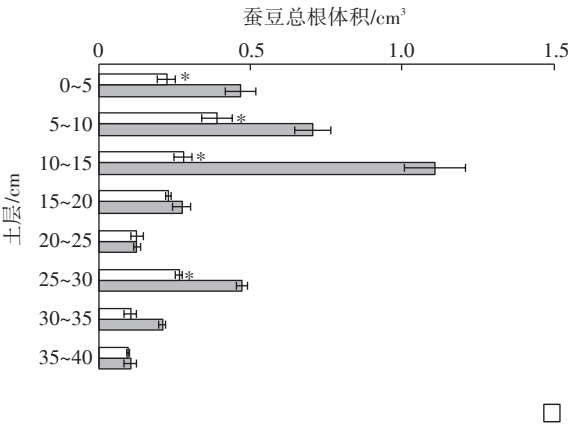


图7 异质Cd胁迫对蚕豆和续断菊不同土层总根体积的影响

Figure 7 Root volume in different soil layers of *Vicia faba* and *Sonchus asper* under heterogeneous Cd stress

表6 异质Cd胁迫下蚕豆根系不同直径下的根体积分布特征(cm^3)Table 6 Root volume in different diameters of *Vicia faba* under heterogeneous Cd stress(cm^3)

土层	左室			右室		
	$0 < d \leq 0.5$	$0.5 < d \leq 1$	$d > 1$	$0 < d \leq 0.5$	$0.5 < d \leq 1$	$d > 1$
0~5 cm	0.014±0.001	0.170±0.009	0.439±0.078	0.014±0.001	0.249±0.025	2.165±0.444
5~10 cm	0.018±0.002	0.251±0.067	0.706±0.023	0.020±0.002	0.367±0.052	2.064±0.432
10~15 cm	0.012±0.000	0.230±0.009	0.531±0.031	0.021±0.003	0.264±0.038	3.454±0.008
15~20 cm	0.018±0.002	0.154±0.012	0.600±0.023	0.043±0.001	0.105±0.091	1.291±0.098
20~25 cm	0.009±0.001	0.084±0.012	0.036±0.009	0.002±0.000	0.013±0.008	1.131±0.008
25~30 cm	0.029±0.004	0.136±0.033	0.120±0.004	0.008±0.001	0.189±0.037	1.297±0.001
30~35 cm	0.012±0.000	0.071±0.008	0.019±0.001	0.004±0.002	0.131±0.052	0.627±0.123
35~40 cm	0.012±0.006	0.073±0.002	0.023±0.007	0.009±0.000	0.061±0.003	0.413±0.111

表7 异质Cd胁迫下续断菊根系不同直径下的根体积分布特征(cm^3)Table 7 Root volume area in different diameters of *Sonchus asper* under heterogeneous Cd stress(cm^3)

土层	左室			右室		
	$0 < d \leq 0.5$	$0.5 < d \leq 1$	$d > 1$	$0 < d \leq 0.5$	$0.5 < d \leq 1$	$d > 1$
0~5 cm	0.231±0.030	0.207±0.009	1.214±0.231	0.147±0.023	0.111±0.023	0.269±0.050
5~10 cm	0.208±0.009	0.133±0.013	0.339±0.078	0.142±0.009	0.080±0.013	0.041±0.003
10~15 cm	0.088±0.001	0.030±0.008	0.014±0.006	0.072±0.008	0.035±0.005	0.004±0.000
15~20 cm	0.101±0.009	0.088±0.005	0.836±0.123	0.065±0.001	0.030±0.001	0.006±0.001
20~25 cm	0.041±0.001	0.009±0.002	0.000±0.000	0.047±0.008	0.029±0.002	0.003±0.001
25~30 cm	0.063±0.006	0.042±0.002	0.104±0.008	0.092±0.001	0.131±0.009	0.694±0.088
30~35 cm	0.057±0.008	0.038±0.008	0.099±0.011	0.067±0.007	0.144±0.023	1.168±0.232
35~40 cm	0.112±0.032	0.166±0.009	1.063±0.222	0.049±0.009	0.059±0.008	0.861±0.111

物对水分和养分的吸收,也是最先感受土壤逆境胁迫的重要部位。植物在逆境胁迫条件下往往通过改变其根系形态及分布来适应不利的生长环境^[20],根系的总根长、总根表面积、总根体积均是反映其根系生长发育状况的指标。通常认为,植物对镉毒害的反应首先表现在根系上,因此通过研究植物根系对镉毒害的反应,可明确植物对镉毒害的耐性,已有研究表明,高浓度Cd胁迫条件下,根的长度变短,根系变小^[21]。植物根系的生长具有一定的可塑性,在逆境条件下如干旱、低磷、重金属污染等,往往造成植物水分和养分的缺乏,植物可能通过根的向地性和适应性等变化来吸收更多的水分和难移动的养分,这被认为是植物生长的一种补偿效应,通过在局部区域大量增加的根长、根表面积等抵消了其余根系由于无法获取资源对植物生长所带来的影响^[22]。本研究结果表明蚕豆在异质Cd胁迫条件下,其总根长、总根表面积、总根体积都表现为无Cd右室大于Cd胁迫左室,说明局部Cd胁迫下蚕豆表现出较强的根系可塑性,原因可能在于Cd斑块中根系的养分利用效率较低,因此需通过无

Cd斑块根系的增生获取养分。

3.2 富集植物续断菊根系形态对异质Cd胁迫的响应

重金属超富集植物是指能够大量吸收并能在体内积累重金属的一类特殊植物。本研究发现Cd胁迫条件下,续断菊总根长、总根表面积和总根体积均表现为Cd胁迫斑块大于无Cd斑块,说明续断菊根系对Cd胁迫具有较强的适应能力,且可通过根长和表面积的增加,增大与土壤Cd的接触,从而提高对Cd的富集。有研究表明,植物根系具有觅食行为,在土壤养分空间异质性的条件下,可通过根系形态和生理的一系列可塑性的变化来探寻、获取并利用资源^[23-24]。本研究结果表明异质Cd胁迫条件下续断菊根系存在一定形态可塑性,可通过调节根系生物量在不同斑块的分配,加快Cd胁迫斑块根系的生长,从而提高对Cd的富集。但由于植物根系形态十分复杂,本研究仅探讨了Cd胁迫条件下续断菊根系生长指标的变化,富集植物根系对重金属胁迫的形态学响应以及植物根系对逆境胁迫的生理响应机制尚不完全清楚,还有待进一步研究。

3.3 蚕豆和续断菊根形态对异质Cd胁迫的响应差异是蚕豆和续断菊间作修复Cd污染土壤的可能机理

间作是我国农业的重要耕作模式之一,利用植物间作修复重金属污染土壤的研究已经开展^[19,25]。有研究表明,重金属富集植物和作物间作,既促进富集植物对重金属的吸收,又减少作物对重金属的积累,在提高修复效率的同时,降低了农作物重金属含量^[26-28],其中续断菊与蚕豆间作模式^[11]尤其具代表性,其修复机理也在探讨当中^[29]。但是,对富集植物和作物间作促进富集植物吸收重金属、减少作物吸收重金属的根系特征和作用机理尚不清楚,本研究中Cd胁迫抑制了蚕豆根系的生长,促进了续断菊根系的生长,表明蚕豆和续断菊对Cd偏好性不同,使得富集植物多吸收重金属、作物少吸收重金属。富集植物和作物根系形态对异质Cd胁迫的响应差异可能是蚕豆和续断菊间作修复重金属污染土壤的机理之一。

4 结论

异质Cd胁迫条件下,蚕豆的根长、根表面积、根体积表现为无Cd斑块大于Cd胁迫斑块,续断菊表现为Cd胁迫斑块大于无Cd斑块,表明Cd胁迫抑制了蚕豆根系的生长,促进了续断菊根系的生长,这可能是蚕豆和续断菊间作模式修复Cd污染土壤的机理之一。

参考文献:

- [1] 陈 洪,特拉津·那斯尔,杨剑虹.伊犁河流域土壤重金属含量空间分布及其环境现状研究[J].水土保持学报,2013,27(3):100-105.
CHEN Hong, TE Lajin·NA Si-er, YANG Jian-hong. Study of spatial distribution of heavy metal elements content and its environment status in the Ili River valley region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3): 100-105.
- [2] 陈印军,杨俊彦,方琳娜.我国耕地土壤环境质量状况分析[J].中国农业科技导报,2014,16(2):14-18.
CHEN Yin-jun, YANG Jun-yan, FANG Lin-na. Analysis of soil environmental quality status of arable land in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 16(2): 14-18.
- [3] 吴 荣,刘善江,杜 颖.城乡有机废弃物农用资源化研究进展[J].农学学报,2014,4(6):45-48.
WU Rong, LIU Shan-jiang, DU Ying. Research advances in agricultural reutilization of urban-rural organic wastes[J]. *Journal of Agriculture*, 2014, 4(6): 45-48.
- [4] 李 庆,王应军,宗贵仪,等.铈缓解Cd对玉米种子的毒害效应研究[J].稀土,2013(6):1-6.
LI Qing, WANG Ying-jun, ZONG Gui-yi, et al. Moderating effect of cerium on toxic action of cadmium to corn seed[J]. *Chinese Rare Earths*, 2013(6): 1-6.
- [5] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[J].中国环保产业,2014,36(5):10-11.
Ministry of Environment of the People's Republic of China, Ministry of National Resources of the People's Republic of China. Report on the national general survey of soil contamination[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014, 36(5): 10-11.
- [6] Veltman K, Huijbregts M A J, Hendriks A J. Cadmium bioaccumulation factors for terrestrial species: Application of the mechanistic bioaccumulation model OMEGA to explain field data[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 406(3): 413-418.
- [7] 骆永明.金属污染土壤的植物修复[J].土壤,1999,31(5):261-265.
LUO Yong-ming. Plant repair of heavy metal contaminated soil[J]. *Soils*, 1999, 31(5): 261-265.
- [8] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2009, 14: 277-282.
- [9] 卫泽斌,吴启堂,龙新宪.利用套种和混合添加剂修复重金属污染土壤[J].农业环境科学学报,2003,24(6):1262-1263.
WEI Ze-bin, WU Qi-tang, LONG Xin-xian. Phytoremediation of heavy metal contaminated soil with mixed chelators in co-crop system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 24(6): 1262-1263.
- [10] 李 元,方其仙,祖艳群.2种生态型续断菊对Cd的累积特征研究[J].西北植物学报,2008,28(6):1150-1154.
LI Yuan, FANG Qi-xian, ZU Yan-qun. Accumulation characteristics of two ecotypes *Sonchus asper* to Cd[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(6): 1150-1154.
- [11] 谭建波,湛方栋,刘宁宁,等.续断菊与蚕豆间作下土壤部分化学特征与Cd形态分布状况研究[J].农业环境科学学报,2016,35(1):53-60.
TAN Jian-bo, ZHAN Fang-dong, LIU Ning-ning, et al. Soil chemical properties and Cd form distribution in *Vicia faba* and *Sonchus asper* intercropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 53-60.
- [12] 秦 丽,祖艳群,湛方栋,等.续断菊与玉米间作对作物吸收积累镉的影响[J].农业环境科学学报,2013,32(3):471-477.
QIN Li, ZU Yan-qun, ZHAN Fang-dong, et al. Absorption and accumulation of Cd by *Sonchus asper* and maize in intercropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3): 471-477.
- [13] 谭建波,陈 兴,郭先华,等.续断菊与玉米间作系统不同植物部位Cd、Pb分配特征[J].生态环境学报,2015,24(4):700-707.
TAN Jian-bo, CHEN Xing, GUO Xian-hua, et al. Distribution characteristics of Pb and Cd in different parts of *Sonchus asper* and *Zea mays* in an intercropping system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(4): 700-707.
- [14] 卢 鑫,胡文友,黄 标,等.丛枝菌根真菌对玉米和续断菊间作镉吸收和累积的影响[J].土壤,2017,49(1):111-117.
LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, et al. Effects of Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on Cd absorption and accumulation in maize and *Sonchus asper* using intercropping system[J]. *Soils*, 2017, 49(1): 111-117.

- [15] Zhan F D, Qin L, Guo X H, et al. Cadmium and lead accumulation and low-molecular-weight organic acids secreted by roots in an intercropping of a cadmium accumulator *Sonchus asper* L. with *Vicia faba* L.[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(40):33240–33248.
- [16] Hodge A. The plastic plant: Root responses to heterogeneous supplies of nutrients[J]. *New Phytologist*, 2011, 162:9–24.
- [17] Hauggaard-Nielsen H, Jørgensen B, Kinane J, et al. Grain legume-cereal intercropping: The practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems[J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2012, 23:3–12.
- [18] Brooker R W. Plant-plant interactions and environmental change[J]. *New Phytologist*, 2009, 171(2):271–284.
- [19] Li Y, Ran W, Zhang R, et al. Facilitated legume nodulation, phosphate uptake and nitrogen transfer by arbuscular inoculation in an upland rice and mung bean intercropping system[J]. *Plant and Soil*, 2009, 315(1):285–296.
- [20] 刘莹, 盖钧镒, 吕慧能. 作物根系形态与非生物胁迫耐性关系的研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2003(4):265–269.
LIU Ying, GAI Jun-yi, LÜ Hui-neng. Advances of the relationship between crop root morphology and tolerance to antibiotic stress[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2003(4):265–269.
- [21] 白嵩, 李青芝, 白岩, 等. 水体镉污染对水稻种苗初期生长的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(2):128–130.
BAI Song, LI Qing-zhi, BAI Yan, et al. Effect of water cadmium pollution on primary growth of rice seedlings[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2003, 25(2):128–130.
- [22] Robinson D. The responses of plants to nonuniform supplies of nutrients[J]. *New Phytologist*, 1994, 127:635–674.
- [23] Rosendal K, Kuznetsova T, Ostonen I, et al. Rhizosphere effect and fine-root morphological adaptations in a chronosequence of silver birch stands on reclaimed oil shale post-mining areas[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(7):1027–1034.
- [24] Johnson H A, Biondini M E. Root morphological plasticity and nitrogen uptake of 59 plant species from the Great Plains grasslands, U. S. A.[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2001, 2(2):127–143.
- [25] Chen Z, Setagawa M, Kang Y, et al. Zinc and cadmium uptake from a metalliferous soil by a mixed culture of *Athyrium yokoscense* and *Arabis flagellosa*[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(2):315–324.
- [26] 居述云, 汪洁, 宓彦彦, 等. 重金属污染土壤的伴矿景天/小麦-茄子间作和轮作修复[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8):2181–2186.
JU Shu-yun, WANG Jie, MI Yan-yan, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils by intercropping with *Sedum plumbizincicola* and *Triticum aestivum* and rotation with *Solanum melongena* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(8):2181–2186.
- [27] 李志贤, 陈章, 陈国梁, 等. 镉富集植物油菜与玉米间作对玉米吸收积累镉的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1):26–31.
LI Zhi-xian, CHEN Zhang, CHEN Guo-liang, et al. Effects of maize-rapeseed intercropping on Cd uptake and accumulation by maize[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(1):26–31.
- [28] 赵冰, 沈丽波, 程苗苗, 等. 麦季间作伴矿景天对不同土壤小麦-水稻生长及锌镉吸收性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10):2725–2731.
ZHAO Bing, SHEN Li-bo, CHENG Miao-miao, et al. Effects of intercropping *Sedum plumbizincicola* in wheat growth season under wheat-rice rotation on the crops growth and their heavy metals uptake from different soil types[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10):2725–2731.
- [29] 秦丽, 何永美, 李元, 等. Cd胁迫对连续断菊Cd吸收分配及有机酸代谢的影响[J]. 环境化学, 2016, 35(8):1592–1600.
QIN Li, HE Yong-mei, LI Yuan, et al. Effects of Cd stress on uptake and distribution of Cd and the low molecular weight organic acid metabolism in *Sonchus asper*[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(8):1592–1600.