殷志遥, 和君强, 秦 华, 等. 覆膜对伴矿景天生长和吸镉动态影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1043-1050.
YIN Zhi-yao, HE Jun-qiang, QIN hua, et al. Effect of film mulching on plant growth and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5): 1043-1050.

覆膜对伴矿景天生长和吸镉动态影响研究

殷志遥[1], 和君强[1], 秦 华[1], 刘代欢[1,2*], 邓 林[1], 常海伟[1], 桂 娟[1], 李 柱[2], 周 通[2]

(1.永清环保股份有限公司, 长沙 410330; 2.农田土壤污染防控与修复技术国家工程实验室, 南京 210008)

摘 要:为探讨覆膜对伴矿景天生长和吸镉动态影响,以湖南某休耕地试验区为供试农田,研究了镉锌超积累植物伴矿景天在垄上覆膜和未覆膜两种栽培条件下,移栽后不同时间的植物生物量、地上部镉浓度变化与吸取修复动态。结果表明:伴矿景天的单株鲜质量和干质量在移栽后157~214 d范围内增速最快。覆膜和未覆膜处理的单株鲜质量增速分别为3.92 g·d^{-1}和3.25 g·d^{-1},单株干质量增速则分别为0.23 g·d^{-1}和0.17 g·d^{-1}。随着生长时间的延长,伴矿景天地上部镉浓度呈先降低后升高再降低的变化趋势;而吸镉量则因生物量的增加而呈现逐渐增大的趋势,其中在30~63 d范围内的日平均吸镉量较高(覆膜和未覆膜处理分别为3.62 g·hm^{-2}·d^{-1}和3.10 g·hm^{-2}·d^{-1}),最小值为移栽初期的0~30 d(覆膜和未覆膜处理分别为0.90 g·hm^{-2}·d^{-1}和0.26 g·hm^{-2}·d^{-1})和生育后期的214~240 d(覆膜和未覆膜处理分别为0.20 g·hm^{-2}·d^{-1}和0.25 g·hm^{-2}·d^{-1})。覆膜和未覆膜处理下,伴矿景天的镉总吸收量分别为447.00 g·hm^{-2}和329.85 g·hm^{-2};供试田块0~20 cm土层土壤镉去除率分别为16.18%和12.16%。研究表明,相对于未覆膜处理,覆膜能显著提高伴矿景天地上部生物量、镉吸收量及对污染土壤中镉的吸取修复效率。

关键词:伴矿景天;覆膜;镉;植物吸收

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2019)05-1043-08 doi:10.11654/jaes.2018-1022

Effect of film mulching on plant growth and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola*

YIN Zhi-yao[1], HE Jun-qiang[1], QIN hua[1], LIU Dai-huan[1,2*], DENG Lin[1], CHANG Hai-wei[1], GUI Juan[1], LI Zhu[2], ZHOU Tong[2]

(1.Yonker Environmental Protection Co., Ltd., Changsha 410330, China; 2.National Engineering Laboratory of Soil Pollution Control and Remediation Technologies, Nanjing 210008, China)

Abstract: In order to determine the effect of plastic film mulching on the growth and Cd uptake of *Sedum plumbizincicola*, which is a Cd and Zn hyperaccumulator, a fallow field located in Hunan Province was selected, *S. plumbizincicola* plant seedlings were transplanted, the dynamics of plant biomass and shoot Cd concentration after transplanting were determined during all growth stages, and the amount of Cd uptake was calculated. The results showed that the single-plant fresh and dry weight of *S. plumbizincicola* increased very quickly during 157~214 days after transplanting(the increase rates of fresh weight of each plant for the film mulching and no film mulching treatment were 3.92 g·d^{-1} and 3.25 g·d^{-1}, respectively; the increase rates of dry weight were 0.23 g·d^{-1} and 0.17 g·d^{-1}, respectively). With the increase in growth time, shoot Cd concentration decreased at the early stage, increased gradually, and then decreased again at the last growth stage. However, the Cd uptake amount increased at all stages. The effect of mulching on average daily Cd uptake was the greatest during the range of 30~63 days, which was 3.62 g·hm^{-2}·d^{-1} and 3.10 g·hm^{-2}·d^{-1} for the film mulching and no film mulching field treatment, respectively. The two lowest average daily Cd uptake stages were in the range of 0~30 days(0.90 g·hm^{-2}·d^{-1} and 0.26 g·hm^{-2}·d^{-1}, respectively) and 214~240 days(0.20 g·hm^{-2}·d^{-1} and 0.25 g·hm^{-2}·d^{-1}, respectively). Under the film mulching and no film mulching field treatment, the total Cd uptake by *S. plumbizincicola* was 447.00 g·hm^{-2} and 329.85 g·hm^{-2}, respectively, and the soil Cd removal rate was 16.18% and 12.16%, respectively. In general, compared with the no film mulching field treatment, film mulching significantly increase plant biomass, Cd uptake, and the soil Cd removal rate by *S. plumbizincicola*.

Keywords: *Sedum plumbizincicola*; film mulching; cadmium; plant uptake

收稿日期:2018-08-10 **录用日期:**2018-11-14

作者简介:殷志遥(1993—),男,湖北武汉人,助理研发工程师,主要从事农田重金属修复等方面的研究。E-mail:18271390486@163.com

***通信作者:**刘代欢 E-mail:36882233@qq.com

基金项目:湖南省中青年科技基金项目(2017NK2141)

Project supported: The Research Foundation of Education Bureau of Hunan Province, China(2017NK2141)

现代工业的快速发展以及人类对矿产资源的不合理开发利用，使得土壤重金属污染成为当今社会主要的环境问题之一，其中以镉污染相对较为严重[1-3]。镉是常见的重金属“五毒”元素之一，在自然界中，土壤镉污染具有分解周期长、移动性大、毒性高、难降解等特点，容易通过食物链在生物体内富集，最终被人体吸收而危害健康[4]。

目前修复土壤重金属污染的主要技术有物理、化学以及生物修复技术（主要包括植物修复、动物修复以及农业生态修复等）。其中植物修复技术通过吸收、挥发、根滤、降解、稳定等作用，可以有效降低土壤镉污染环境风险，是目前被社会上广泛关注的绿色环保、无二次污染的热点技术[5-6]。但目前植物修复技术在土壤重金属修复治理过程中也存在一些问题，如有些重金属的生物有效性低，部分超积累植物生长速度慢、生物量低、修复周期长等[7]。

相关研究表明，伴矿景天（*Sedum plumbizincicola*）是一种生物量大、生长速度快、富集效果好的镉锌超积累植物[8]。研究者对伴矿景天的重金属耐性与积累性、农艺措施和外界环境因素对其生长和重金属吸收的调控作用及原理等方面作了系统的研究[9]。居述云等[10]研究表明，单作伴矿景天一年的土壤降镉率能达到42%。李思亮等[11]发现伴矿景天新叶中镉的浓度（69.9±10.5 mg·kg^{-1}）是成熟叶中的（22.3±2.5 mg·kg^{-1}）3.1倍。在伴矿景天的野外种植过程中，适当增大种植密度可促进伴矿景天的生长，显著提高地上部生物量，但过分密植则效果不明显[12]。在施肥处理上，增施氮肥是伴矿景天地上部干物质生物量增加的主要原因，而增施钾肥是增加地上部镉浓度和吸收量的主要影响因素[13]。土壤水分特征方面，土壤的水分状况对于伴矿景天吸取修复重金属也起到重要作用，其中当最大田间持水量在70%时，伴矿景天生长最好[14]。李娜等[15]研究表明，一定程度上降低光照强度并不会影响伴矿景天的生长和对锌、镉的吸收，但过度的庇荫和减弱光强会使伴矿景天的干物质生物量急剧降低。此外，在伴矿景天和经济作物间作对锌、镉吸收效果的影响等方面相关研究者也做了相应研究[16-18]。

伴矿景天在镉、锌污染土壤的修复治理方面具有广泛的应用前景，但目前针对伴矿景天在田间不同生长时期其生物量及镉吸收效果的动态变化研究比较少，实际工程应用及各生育期的管理过程通常不容易把控。垄上覆膜是土壤保水、保墒以及杂草控制的一种重要农艺措施[19]。Wang等[20]研究表明，相较于未覆膜，覆膜处理能显著增加玉米的籽粒产量以及地上部生物量（增幅分别达到30%~107%和37%~69%）。对于超积累植物而言，生物量的增加对镉吸收效果也会产生一定的影响。而有关覆膜对不同生育期伴矿景天生长及其镉吸收效果的研究目前还相对较少。因此，本文以湖南省某休耕地作为试验点，在覆膜和未覆膜两种处理下，通过连续监测伴矿景天在不同时间段内的鲜质量、干质量、单株镉浓度的变化，探讨伴矿景天生长及镉吸收效果的动态变化以及覆膜对其变化的影响，为伴矿景天在土壤镉污染修复的实际应用及管理提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本次试验区域设在湖南省某休耕区，该地区属亚热带季风气候。年均气温18 ℃左右，年平均无霜期288 d左右，年平均日照1500~1910 h，年平均降水量在1300~1600 mm之间，土壤类型属于紫泥土。

1.2 试验设计

试验共设两个小区，每个小区的面积为666.7 m^2。小区A垄上覆黑膜（FM），小区B垄上不覆膜（NFM）。两小区的土壤基本性质如表1所示。伴矿景天于2017年10月中旬种植，种植方式为扦插繁殖，选取长势一致的植株进行移栽，苗源来自中国科学院

表1 试验小区土壤基本性质

Table 1 Basic properties of soil in test plot

试验点 Sites	试验方案 Treatment	pH	有机质 Organic matter/ g·kg^{-1}	全磷 Total phosphorus/ g·kg^{-1}	全氮 Total nitrogen/ g·kg^{-1}	全镉 Total cadmium/ mg·kg^{-1}	有效镉 Effective cadmium/ mg·kg^{-1}
A	覆膜FM	4.70± 0.23a	25.48±1.02a	0.53±0.03a	1.39±0.06a	0.68±0.04a	0.56±0.06a
B	未覆膜NFM	4.63± 0.31a	25.32±0.87a	0.55±0.02a	1.41±0.11a	0.74±0.03a	0.59±0.04a

注：不同小写字母表示不同处理间差异显著（P<0.05）。下同。

Note：Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments（P<0.05）. The same below.

南京土壤研究所农田土壤污染控制与修复技术国家工程实验室，为同一批次刈割种苗。种植密度为15 cm×20 cm，即约30万株·hm^{-2}。保持田间水量充足，并定时施肥、除草。为保证伴矿景天安全度冬、度夏以及减小温度对伴矿景天生长的影响，分别在2017年12月—2018年2月及2018年5—6月搭建温室大棚和遮阳网。

2017年12月—2018年2月温室大棚内温度及湿度采用温湿度计测定，当月的温度及湿度取平均值，如表2所示。

1.3 取样与分析

在移栽前测定刈割种苗的鲜质量、干质量和镉浓度（随机采集10株），并在种植后的第30、63、108、157、214 d（部分已开花）和240 d（已全面开花）采集各小区伴矿景天地上部植株以及土壤样品。每个小区采用网格采样法采集伴矿景天及0~20 cm土层土壤样品各6个，其中所取土样为非根际土壤。植物样先去除表面泥土，称量鲜质量，然后用自来水和去离子水洗净、杀青、烘干、称质量、粉碎。土壤样品混合均匀后风干、研磨、过筛（20目和100目）、混匀备用。

土壤样品全镉用HNO_3-$HClO_4$-HF消煮，有效态镉用0.1 mol·L^{-1}的$CaCl_2$浸提，采用石墨炉测定。植物样品镉含量用HNO_3-$HClO_4$浸提，采用ICP-MS测定。测定过程中分别以国家标准参比物质（土壤：GBW 07401；植物：GBW 07603）进行质量控制，所用试剂均为优级纯，标准样品测定结果在允许误差范围内。

1.4 数据计算与分析

每公顷净吸镉量=（单株镉浓度×单株干质量-移栽前单株镉浓度×移栽前单株干质量）×每公顷的株数。移栽前单株镉浓度和干质量分别为118±10.52 mg·kg^{-1}和1.02±0.14 g。

某一时间段内的净吸镉量（g·hm^{-2}）=当前时间段伴矿景天的总吸镉量（g·hm^{-2}）-上一个时间段的总吸镉量（g·hm^{-2}）

日平均吸镉速率（g·hm^{-2}·d^{-1}）=某时间段内的净吸镉量（g·hm^{-2}）/此时间段内的总天数（d）

生物量日平均增长量=此时间段内的生物量增加量（g）/此时间段内的总天数（d）

土壤降镉率=[修复前土壤全镉浓度（mg·kg^{-1}）-修复后土壤全镉浓度（mg·kg^{-1}）]/修复前土壤全镉浓度（mg·kg^{-1}）×100%

试验数据采用Excel和SPSS 13.0进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 覆膜对伴矿景天生长的影响

从图1可以看出，在整个试验周期内（0~240 d），伴矿景天的单株鲜质量与干质量的变化趋势相似。在0~108 d范围内FM和NFM两种处理的单株鲜质量分别增加了720.19%和730.77%，干质量分别增加了662.75%和664.71%，但两种处理间的差异不显著。而在157~240 d范围内，FM处理伴矿景天的鲜质量和干质量要显著高于NFM处理。截止到240 d时，FM处理下伴矿景天的单株干质量为26.32 g，地上部干物质生物量约7.90 t·hm^{-2}；而NFM处理的单株干质量为21.01 g，地上部干物质生物量约6.30 t·hm^{-2}。说明相较于NFM处理，FM处理能显著提高伴矿景天地上部干物质生物量（增幅为25.40%）。

在0~108 d范围内，生物量整体呈一定的线性增长（R^2=0.969 6~0.993 5），其中FM和NFM处理下的单株鲜质量日均增长量分别为0.70 g·d^{-1}和0.69 g·d^{-1}，干质量日均增长量均为0.06 g·d^{-1}。在108~240 d范

表2 冬季温室大棚内平均温度及湿度

Table 2 Average temperature and humidity in greenhouses in winter

时间 Time	处理 Treatments	温度 Temperature/℃			湿度 Humidity/%		
		早 Morning	中 Noon	晚 Night	早 Morning	中 Noon	晚 Night
12月 December	FM	21.5±7.5a	35.3±5.1a	13.1±4.2a	57.3±9.1a	31.4±6.4a	75.5±8.5a
	NFM	19.3±6.8a	33.4±5.8a	13.4±5.6a	61.9±7.6a	39.7±7.2a	65.2±10.1a
1月 January	FM	10.2±6.5a	16.3±7.2a	9.5±4.9a	70.6±8.4a	68.5±6.8a	70.6±5.3a
	NFM	8.5±5.8a	14.1±8.1a	9.3±3.8a	70.2±7.6a	67.4±7.1a	71.2±7.0a
2月 February	FM	16.4±7.8a	35.7±3.2a	15.3±7.5a	69.9±7.1a	50.1±9.7a	60.4±10.3a
	NFM	14.3±7.2a	33.1±3.5a	15.4±7.2a	70.0±6.3a	55.4±6.1a	64.2±7.8a

注：早、中、晚的测量时间分别为8:00、13:00以及20:00。表中所示数据均为当月平均值。

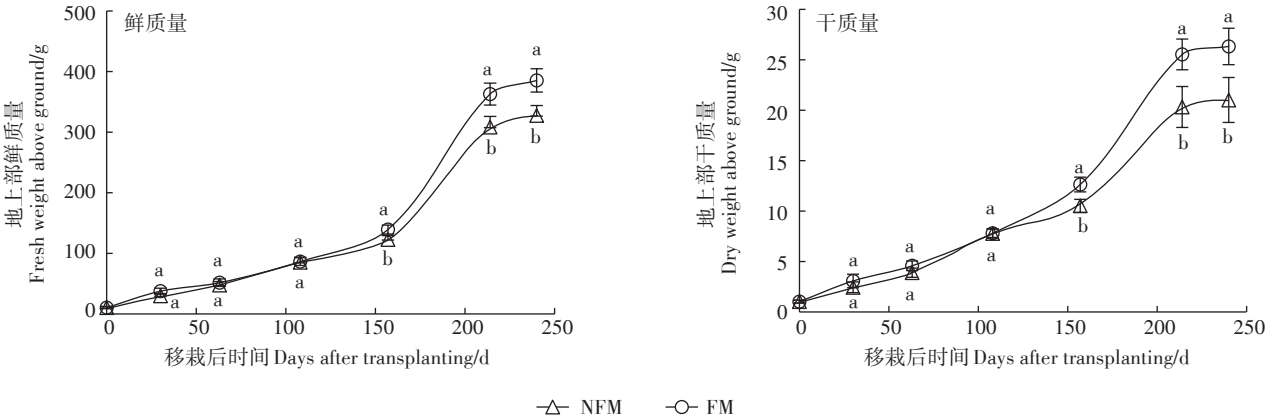
Note: The morning, noon and night measurement times are 8:00, 13:00 and 20:00 respectively. The data shown in the table are all monthly averages.

围内生物量则呈S型曲线增长，其中在157~214 d范围内的增长速度最快（此时间段FM和NFM处理的单株鲜质量日均增长量分别为3.92 g·d^{-1}和3.25 g·d^{-1}，干质量日均增长量分别为0.23 g·d^{-1}和0.17 g·d^{-1}），远高于其他时期（图2）。此外，伴矿景天的含水率在FM（90.2%~93.2%，均值91.6%）和NFM（90.2%~93.6%，均值91.9%）处理下均呈先增加（0~30 d）后降低再增加的变化趋势，且在240 d时含水率达到最高，分别为93.2%和93.6%。

2.2 覆膜对伴矿景天吸镉的影响

在整个试验周期内（0~240 d），伴矿景天的吸镉量随着时间的延长整体呈逐步增加的趋势，其中吸镉量最多的时间段主要集中于30~63 d（FM和NFM处理净吸镉量分别为119.58 g和102.31 g），63~108 d（FM和NFM分别为95.11 g和96.65 g）以及157~214 d（FM和NFM分别为142.87 g和114.89 g），而108~157 d范围内的吸镉量相较于这3个时间段较低（图3）。单株伴矿景天的地上部镉浓度呈现先降低后升高再降低的变化趋势（图3）。在0~30 d范围内，两种处理下的伴矿景天单株镉浓度均有一定程度的降低，其中FM处理降低了41.80%，NFM处理降低了49.32%。而在30~63 d范围内，FM和NFM两种处理下的单株镉浓度相较于0~30 d分别增加了93.75%和109.33%。63~240 d范围内的单株景天镉浓度则逐渐降低。造成这种变化的差异可能是因为除了30~63 d时间段内吸镉量的增长幅度（FM和NFM处理分别为440.52%和1 334.68%）远高于生物量的增长幅度（FM和NFM分别为59.43%和40.19%）外，其他时间段内的镉吸收量增长幅度均小于生物量的增长幅度（表3）。

相较于NFM处理，FM处理显著增加了伴矿景天



不同小写字母表示同一时间段内不同处理间差异显著（$P<0.05$）。下同

Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments in the same time period（$P<0.05$）. The same below

图1 伴矿景天单株鲜质量和干质量的动态变化

Figure 1 Dynamic changes of fresh weight and dry weight by per *Sedum plumbizincicola*

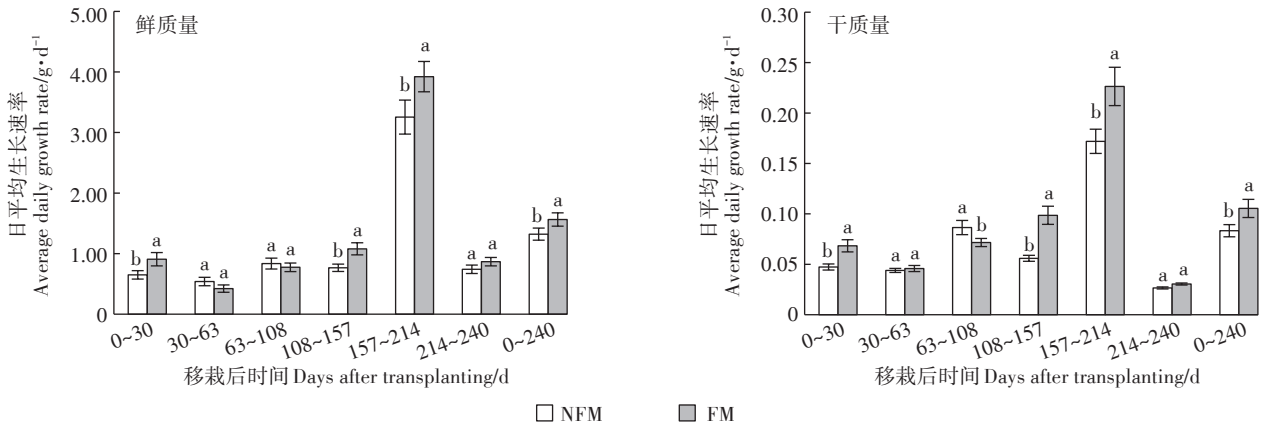


图2 不同时期单株伴矿景天生物量的日均增长量

Figure 2 Average daily growth of biomass in different periods by per *Sedum plumbizincicola*

的吸镉量，截止到240 d时，显著增加了35.53%，且日平均吸镉速率也显著增长了38.52%（图4）。其中伴矿景天在NFM处理修复157 d及240 d后，其累积吸镉量分别为208.51 g·hm^{-2}和329.85 g·hm^{-2}，而FM处理达到此效果分别仅需80~90 d和170~180 d。说明垄上覆膜对于伴矿景天的吸镉效果有一定程度的促进作用。单株伴矿景天的镉浓度除了第30、108、157 d时表现为FM处理显著高于NFM处理外，其余均无显著差异。

从图4可以看出，30~63 d的日平均吸镉量最高，FM和NFM处理分别为3.62 g·hm^{-2}·d^{-1}和3.10 g·hm^{-2}·d^{-1}，表明此时间段吸镉效果相对最好。最低则主要集中于0~30 d（FM和NFM处理净吸镉量分别为27.15 g和7.67 g，日平均吸镉量分别为0.90 g·hm^{-2}·d^{-1}和0.26 g·hm^{-2}·d^{-1}）和214~240 d（FM和NFM处理净吸镉量分别为5.10 g和6.45 g，日平均吸镉量分别为0.20 g·hm^{-2}·d^{-1}和0.25 g·hm^{-2}·d^{-1}）范围内。

2.3 土壤镉含量的变化

如图5所示，土壤全镉含量整体呈逐渐降低的趋势，其中30~63 d（FM和NFM处理的全镉含量分别降低了0.05 mg·kg^{-1}和0.02 mg·kg^{-1}）以及157~240 d范围内（全镉含量均降低了0.07 mg·kg^{-1}）的土壤降镉效果相对较好。在0~30 d和63~157 d范围内，两种处理的土壤全镉含量降低效果不明显。经过240 d的植物修复后，FM处理的土壤降镉率为16.18%，显著高于（P<0.05）NFM处理（12.16%）。说明覆膜能显著提高伴矿景天的镉修复效果。

土壤有效镉的变化趋势与全镉有较大差异。在0~63 d范围内，土壤有效镉显著降低（P<0.05），其中FM和NFM处理的降幅分别为10.71%和8.47%，而在63~240 d范围内的变化两种处理有一定的差异。反映出土壤中有效镉含量处于一种被吸收以及活化的动态过程。截止到240 d，FM和NFM处理的土壤速效镉含量分别降低了55.36%和49.15%。

此外，有效镉占全镉的比例变化与有效镉含量相

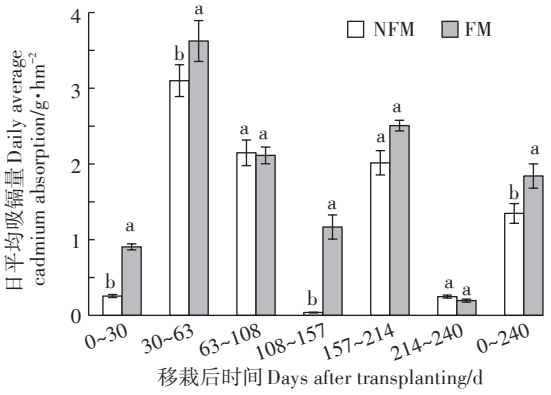


图4 不同时期伴矿景天的日平均吸镉量

Figure 4 Daily average cadmium absorption at different time periods by *Sedum plumbizincicola*

表3 不同时间段内Cd吸收及干质量增长幅度（%）

Table 3 Growth range of Cd uptake and dry weight in different time periods（%）

移栽后时间 Days after transplanting/d	NFM		FM	
	Cd吸收 Cd absorption	干质量 Dry weight	Cd吸收 Cd absorption	干质量 Dry weight
30~63	1 334.68	59.43	440.52	49.19
63~108	87.88	100.00	64.82	70.31
108~157	0.91	35.22	23.65	61.92
157~214	55.10	93.16	47.78	102.14
214~240	1.99	3.40	1.15	3.09

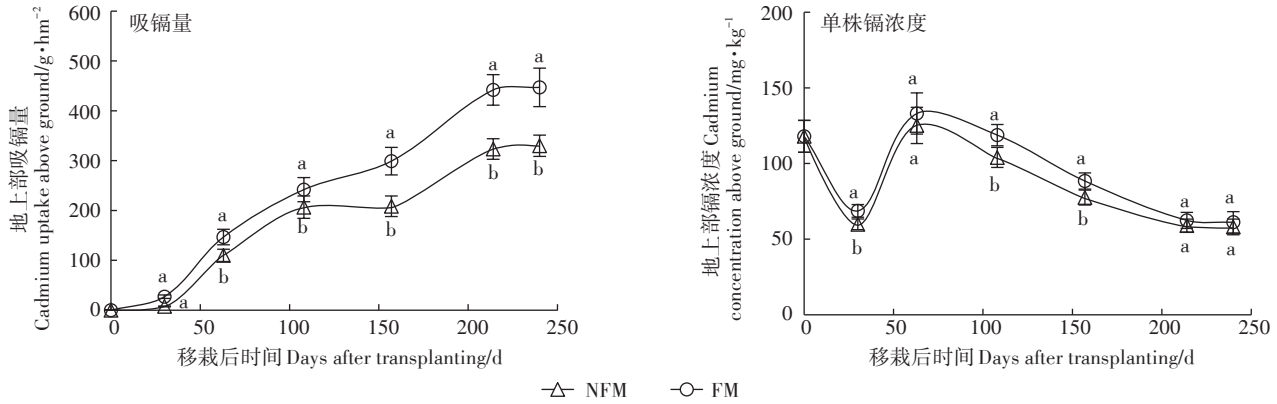


图3 伴矿景天吸镉量及单株镉浓度的动态变化

Figure 3 Dynamic changes of cadmium uptake and cadmium concentration by per *Sedum plumbizincicola*

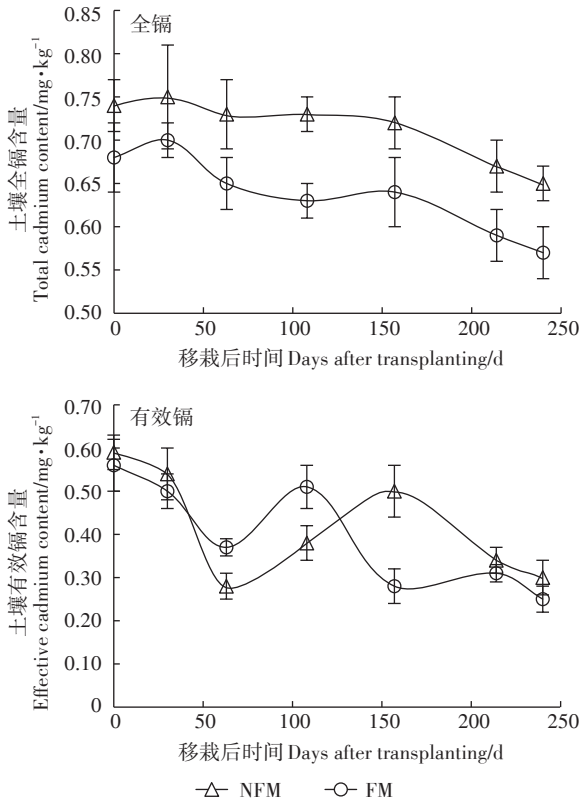


图5 土壤镉含量的动态变化

Figure 5 Dynamic changes in soil cadmium content

似，也是呈现先降低后升高再降低的波动（FM处理的变化范围为43.75%~82.35%，NFM处理为38.36%~79.73%）。240 d时，FM和NFM处理的土壤速效镉占全镉的比例分别为43.86%和46.15%，相较于第0 d（FM和NFM处理分别为82.35%和79.73%）分别降低了46.74%和42.11%。

3 讨论

重金属要被植物吸收，首先要与根细胞的细胞壁结合，然后通过质外体或者共质体等途径向细胞内转运[21]。本研究发现，在移栽初期的0~30 d内，伴矿景天的吸镉效果较差（FM和NFM处理的日均吸镉量分别为0.90 g·hm^{-2}·d^{-1}和0.26 g·hm^{-2}·d^{-1}），且地上部的镉浓度相较于移栽前有显著降低，主要是由于伴矿景天在0~30 d内处于生根阶段，此阶段的根系对镉的吸收与转运能力相对较弱，使得伴矿景天地上部镉浓度一定程度被稀释。杜菡影[22]通过超积累型东南景天与非耐受型东南景天相互嫁接的研究表明，根对超积累型东南景天耐受与富集镉具有主导作用，而地上部分对镉的高效转运也是东南景天超富集镉的一个重要因素。生根过程完成后，随着生物量的增长，伴矿景天的吸镉量逐渐增加。唐希望等[23]研究表明，植株地上部镉浓度的变化与地上部生物量的变化高度相关。镉被植物根系吸收向地上部转移时，会在各组织器官间分配转移，因此伴矿景天在生长过程中分枝数量及生物量的增加对于地上部镉浓度有显著影响[24]。生育后期伴矿景天开花后，其生物量以及吸镉量的增加速度逐渐降低，一方面可能是由于伴矿景天在开花后各方面的生理机能有一定程度下降，另一方面则可能是由于夏天的高温气候对伴矿景天的生长及镉的吸收有一定负面的影响。

植物的生长发育及产量的形成不是某单一因素影响的结果，而是受各生态因素综合作用的影响[25]。本研究表明，相对于NFM处理，FM处理能显著提高伴矿景天地上部干物质生物量、吸镉量以及土壤降镉率。这可能是由于覆膜阻挡了水分的垂直蒸发，阻断了近地面层与大气之间的气流交换，增大了光热交换阻力，使膜内土壤温、光、水、肥、气等条件发生了变化，从而影响了伴矿景天的生长及镉吸收[26]。韩秀锋等[27]研究表明，相对于NFM处理，垄上覆黑膜能显著增加土壤含水量（增幅为46.04%），适当增温（增加了1.2 ℃），有效抑制杂草生长（杂草数量降低了63.46%），显著增加作物的株高、主茎数及产量（增产23.46%）。陈登峰等[28]研究也表明，薄膜覆盖增加了0~25 cm土层的土壤温度（日均地温最大可提高5.33 ℃，空气温度最大可提高0.34 ℃），降低空气湿度（最低可低2.35%），增加土壤含水率（最大增幅可达46.65%），且土壤温度越高，根系呼吸速率越大，这有利于改善植物的生长和光合作用，从而使得植株的鲜质量以及干质量增加。在本研究中，FM处理下杂草多集中于种植穴附近或地膜破损裸露处等，数量显著低于NFM处理（杂草数量降低了80%~90%）。垄上覆膜阻碍了膜下杂草进行光合作用，使其长期处于养分缺乏状态，抑制了杂草的生长，从而降低了与伴矿景天之间的竞争[29]。也有研究表明，土壤理化性质的改变对土壤镉的生物有效性、植物根系的生长以及对镉的吸收会产生一定的影响[30-31]。综合来看，垄上覆膜对于伴矿景天的生长以及镉修复效果均有一定的积极意义。

4 结论

（1）伴矿景天的鲜质量和干质量在10月移栽后的第4~7个月之间增长速度最快，移栽初期和生育后期相对较慢。

（2）伴矿景天在10月移栽后的2~7个月之间是主要的吸镉时期，其中第2~4个月的吸镉效果最好。最差为移栽后的第一个月内和临近开花前后。

（3）相对于NFM处理，FM能显著提高伴矿景天地上部干物质生物量（增幅为25.40%），吸镉量（增幅为35.52%），以及土壤降镉率（增幅为33.06%）。

参考文献：

[1] Li Z Y, Ma Z W, van der Kuijp T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China：Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468/469：843-853.

[2] Liu Y, Su C, Zhang H, et al. Interaction of soil heavy metal pollution with industrialisation and the landscape pattern in Taiyuan City, China [J]. *PLoS One*, 2014, 9(9)：e105798.

[3] Shi W L, Ma X Y. Effects of heavy metal Cd pollution on microbial activities in soil[J]. *Annals of Agricultural & Environmental Medicine Aaem*, 2017, 24(4)：722-725.

[4] Hoseinzadeh E, Rahmanie A R. Evaluation of cadmium removal efficiency from aqueous solution by activated carbon derived from scrap tire[J]. *Koomesh*, 2014, 15(4)：557-566.

[5] 徐剑锋，王　雷，熊　瑛，等. 土壤重金属污染强化植物修复技术研究进展[J]. 环境工程技术学报，2017，7(3)：366-373.
XU Jian-feng, WANG Lei, XIONG Ying, et al. Research progress on strengthening phytoremediation technologies for heavy metals contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2017, 7(3)：366-373.

[6] Sarwar N, Imran M, Shaheen M R, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals：Modifications and future perspectives[J]. *Chemosphere*, 2016, 171：710-721.

[7] 张继舟，王宏韬，袁　磊，等. 重金属污染土壤的植物修复技术研究[J]. 中国农学通报，2013，29(14)：134-139.
ZHANG Ji-zhou, WANG Hong-tao, YUAN Lei, et al. Research on phytoremediation of soil contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(14)：134-139.

[8] 吴龙华，李　娜，毕　德，等. 锌镉复合污染土壤的植物修复方法[P]. 200710020380. 5. 2007-08-15.
WU Long-hua, LI Na, BI De, et al. Phytoremediation method for zinc-cadmium complex contaminated soil[P]. 200710020380. 5. 2007-08-15.

[9] 骆永明. 镉锌污染土壤的超积累植物修复研究[M]. 北京：科学出版社，2015.
LUO Yong-ming. Study on hyperaccumulatory phytoremediation of cadmium and zinc contaminated[M]. Beijing：Science Press, 2015.

[10] 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.

[11] 李思亮，李　娜，徐礼生，等. 不同生境下锌镉在伴矿景天不同叶龄叶中的富集与分布特征[J]. 土壤，2010，42(3)：446-452.
LI Si-liang, LI Na, XU Li-sheng, et al. Characters of Zn and Cd accumulation and distribution in leaves of *Sedum plumbizincicola* at different ages[J]. *Soils*, 2010, 42(3)：446-452.

[12] 刘　玲，吴龙华，李　娜，等. 种植密度对镉锌污染土壤伴矿景天植物修复效率的影响[J]. 环境科学，2009，30(11)：3422-3426.
LIU Ling, WU Long-hua, LI Na, et al. Effect of planting densities on yields and zinc and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11)：3422-3426.

[13] 沈丽波，吴龙华，韩晓日，等. 养分调控对超积累植物伴矿景天生长及锌镉吸收性的影响[J]. 土壤，2011，43(2)：221-225.
SHEN Li-bo, WU Long-hua, HAN Xiao-ri, et al. Effects of nutrient regulation and control on plant growth and Zn/Cd uptake by hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Soils*, 2011, 43(2)：221-225.

[14] 崔立强，吴龙华，李　娜，等. 水分特征对伴矿景天生长和重金属吸收性的影响[J]. 土壤，2009，41(4)：572-576.
CUI Li-qiang, WU Long-hua, LI Na, et al. Effects of soil moisture on growth and uptake of heavy metals of *Sedum plumbizincicola*[J]. *Soils*, 2009, 41(4)：572-576.

[15] 李　娜，唐明灯，崔立强，等. 光照强度对伴矿景天生长和锌镉吸收性的影响[J]. 土壤学报，2010，47(2)：370-373.
LI Na, TANG Ming-deng, CUI Li-qiang, et al. Effects of light intensity on plant growth and zinc and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2)：370-373.

[16] 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.

[17] 能凤娇，吴龙华，刘鸿雁，等. 芹菜与伴矿景天间作对污泥农用锌镉污染土壤化学与微生物性质的影响[J]. 应用生态学报，2013，24(5)：1428-1434.
NENG Feng-jiao, WU Long-hua, LIU Hong-yan, et al. Effects of intercropping *Sedum plumbizincicola* and *Apium graceolens* on the soil chemical and microbiological properties under the contamination of zinc and cadmium from sewage sludge application[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5)：1428-1434.

[18] Deng L, Li Z, Wang J, et al. Long-term field phytoextraction of zinc/cadmium contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* under different agronomic strategies[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, 18(2)：134-140.

[19] 崔纪菡，孟　建，刘　猛，等. 不同类型地膜的谷地杂草防除效果和土壤水温效应研究[J]. 河北农业科学，2017，21(1)：6-11.
CUI Ji-han, MENG Jian, LIU Meng, et al. Effect of plastic mulch types on weeds control and soil moisture and temperature of foxtail millet field[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2017, 21(1)：6-11.

[20] Wang Y P, Li X G, Jing Z, et al. Multi-site assessment of the effects

of plastic-film mulch on dryland maize productivity in semiarid areas in China[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2016, 220:160-169.

[21] Clemens S, Palmgren M G, Krämer U. A long way ahead:Understanding and engineering plant metal accumulation[J]. *Trends in Plant Science*, 2002, 7(7):309-315.

[22] 杜菡影. 超积累植物东南景天对镉的耐受作用研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2013.
DU Han-ying. Studies on the mechanisms of cadmium tolerance in hyperaccumulating *Sedium alfredii*[D]. Wuhan:Central China Normal University, 2013.

[23] 唐希望, 吉普辉, 同延安, 等. 生菜地上部镉累积规律及其与矿质元素浓度的关系[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5):860-867.
TANG Xi-wang, JI Pu-hui, TONG Yan-an, et al. Cadmium accumulation in above-ground parts of lettuce(*Lactuca sativa* L.)and its relationship between mineral nutrients concentration[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(5):860-867.

[24] Perrier F, Yan B, Candaudap F, et al. Variability in grain cadmium concentration among durum wheat cultivars: Impact of aboveground biomass partitioning[J]. *Plant & Soil*, 2016, 404(1/2):307-320.

[25] 余 利, 刘 正, 王 波, 等. 行距和行向对不同密度玉米群体田间小气候和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8):938-942.
YU Li, LIU Zheng, WANG Bo, et al. Effects of different combinations of planting density, row spacing and row direction on field microclimatic conditions and grain yield of maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(8):938-942.

[26] 李 睿. 地膜覆盖对菜地生态系统N_2O排放的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
LI Rui. Effects of plastic mulching on nitrous oxide emission from a vegetable field[D]. Chongqing:Southwest University, 2016.

[27] 韩秀锋, 郭伟锋, 高 山, 等. 不同膜色覆膜对马铃薯生育、产量及淀粉含量的影响[J]. 塔里木大学学报, 2012, 24(3):10-14.
HAN Xiu-feng, GUO Wei-feng, GAO Shan, et al. Effects of different color of plastic mulching methods on growth, tuber yield and starch content of potato[J]. *Journal of Tarim University*, 2012, 24(3):10-14.

[28] 陈登峰, 王秀茹, 杜 韬, 等. 东北黑土区覆膜滴灌下田间微气候和作物生长特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4):296-302.
CHEN Deng-feng, WANG Xiu-ru, DU Tao, et al. Study of field microclimate and crop growth characteristics with mulched drip irrigation in black soil region of northeast China[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2016, 30(4):296-302.

[29] 高 赟, 张建明, 李明霞, 等. 马铃薯覆膜种植对杂草群落的影响[J]. 植物保护, 2018(2):195-198.
GAO Yun, ZHANG Jian-ming, LI Ming-xia, et al. Effects of plastic film mulching on the weed community in potato field[J]. *Plant Protection*, 2018(2):195-198.

[30] 张 鹏, 潘丽萍, 张超兰. 水分条件对湿地植物红蛋吸收镉及其根际土壤中镉化学形态变化的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(5):1177-1182.
ZHANG Peng, PAN Li-ping, ZHANG Chao-lan. Effect of water conditions on *Echinodorus osiris* absorption of cadmium and on Cd speciation changes in rhizosphere soil[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(5):1177-1182.

[31] 杨 勇, 江荣风, 李花粉, 等. 土壤容重改变对锌/镉超累积植物遏兰菜根系特征及吸镉的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(12):3043-3049.
YANG Yong, JIANG Rong-feng, LI Hua-fen, et al. Effect of the soil bulk density on the root morphology and cadmium uptake by *Thlaspi caerulescens* grown on Cd-contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(12):3043-3049.