

# 炭肥混施下土壤养分缓释特征与芥菜镉富集响应模拟

李转玲<sup>1,2</sup> 李培岭<sup>3</sup> 黄国勤<sup>1</sup> MUHAAMAD A<sup>1</sup>

(1. 江西农业大学生态科学研究中心, 南昌 330045; 2. 江西青年职业学院经济管理系, 南昌 330045;

3. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045)

**摘要:** 土壤养分有效性是影响重金属富集植物的重要因素, 为研究炭肥混施下土壤养分缓释特征及芥菜镉富集趋势, 试验设置施肥比例(分别为基准施肥量的0%、20%、40%、70%、100%, 基准施肥量为 N 350 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 180 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 180 kg/hm<sup>2</sup>)以及施炭比例(炭肥质量比0%、3%、9%)完全组合设计。结果表明: 基于 Logistic 曲线模型模拟炭肥混施下土壤养分缓释特征及镉富集趋势效果较好, 均方根误差占实测平均值的3.29%~8.37%且 R<sup>2</sup> 不小于0.957 0。炭肥混施下土壤养分高效缓释的施肥比例区间为0.99%~55.18%, 相比未施炭的有效氮、有效磷最大缓释效率值分别提升49.17%~90.00%、13.25%~37.35%, 高效缓释下土壤养分含量提高17.38%~40.93%。镉富集下芥菜生物量通过土壤养分高效缓释增长119.65%~263.36%, 且地上部相比根部的生物量高效累积最大效率值提高166.67%~300.00%, 有效氮、有效磷响应区间分别扩大150.00%、12.51%, 为镉由根部向地上部的转运提供动力基础; 芥菜镉含量、富集系数在土壤养分高效缓释区间增长97.79%~201.96%。为满足芥菜镉高效富集并兼顾肥料节约, 通过模型反算得炭肥混施策略优化为: 9%施炭下有效氮、有效磷和有效钾肥的比例分别为60.58%、61.32%、21.48%。

**关键词:** 芥菜; 炭肥混施; 土壤养分缓释; 镉富集

中图分类号: S278 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)02-0250-08

## Soil Nutrient Release Characteristics and Response Simulation of Cadmium Accumulation in Mustard Plants under Mixed Bio-carbon and Fertilizer

LI Zhuanling<sup>1,2</sup> LI Peiling<sup>3</sup> HUANG Guoqin<sup>1</sup> MUHAAMAD A<sup>1</sup>

(1. Ecological Sciences Research Center, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2. Department of Economic Management, Jiangxi Youth Vocational College, Nanchang 330045, China

3. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** Soil nutrient availability is an important factor influencing heavy metal enrichment plant. The characteristics of soil nutrient slow-release and the tendency of cadmium accumulation of mustard were studied. A complete combination design of fertilization rate (0, 20%, 40%, 70% and 100% of the benchmark fertilizer application amount respectively, and the benchmark fertilizer application amount was N 350 kg/m<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 180 kg/hm<sup>2</sup> and K<sub>2</sub>O 180 kg/hm<sup>2</sup>) and carbon application ratio (carbon fertilizer quality ratio of 0, 3% and 9%) were set up in the experiment. The results showed that the soil nutrient slow-release characteristics and cadmium enrichment trend were well fitted based on the Logistic curve model, and the measured root mean square error ratio was 3.29%~8.37%, and R<sup>2</sup> was no less than 0.957 0. The fertilizer proportion of soil nutrient with high efficient and slow-release under combined application of carbon fertilizer was 0.99%~55.18%, the maximum sustained-release efficiency of nitrogen and phosphorus was increased by 49.17%~90.00%, 13.25%~37.35%, respectively, and the soil nutrient content was increased by 17.38%~40.93%, compared with that without carbon

收稿日期: 2018-11-20 修回日期: 2018-12-14

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51469008、41661070)、江西省青年科学基金重点项目(20171ACB21024)、江西省科技计划项目(20151BBF60059)和江西农业大学研究生创新专项资金项目(NDYC2017-B002)

**作者简介:** 李转玲(1983—),女,博士生,江西青年职业学院讲师,主要从事农田重金属污染植物修复研究,E-mail: 616396687@qq.com

**通信作者:** 黄国勤(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生态修复理论与技术研究,E-mail: hgqjnc@sina.com

application. The biomass of mustard with cadmium concentration was increased by 119.65% ~ 263.36% through efficient slow-release of soil nutrients, and the maximum efficiency value of the biomass in the aboveground part was increased by 166.67% ~ 300.00% compared with the biomass in the root part. The content of cadmium and enrichment coefficient of mustard greens was increased by 97.79% ~ 201.96% in the highly efficient slow-release interval of soil nutrients. Therefore, in order to meet the requirement of both high efficiency and high concentration of mustard cadmium and fertilizer conservation, the combined application strategy of carbon fertilizer was optimized as follows: the proportion of nitrogen, phosphorus and potash fertilizer under 9% carbon was 60.58%, 61.32% and 21.48%.

**Key words:** mustard; mixed application of bio-carbon and fertilizer; soil nutrients release; cadmium enrichment

## 0 引言

生物质炭具有特殊的孔隙结构、较大的比表面积和多种化学官能团,可以吸附和负载肥料养分,延缓肥料在土壤中的释放,降低养分淋失<sup>[1-3]</sup>,因此炭肥混合是提高土壤养分有效性的重要方式。生物质炭作为一种新型多功能材料,多用来改良土壤理化性质<sup>[4]</sup>,增加土壤碳汇,提高土壤有机质含量<sup>[5]</sup>,还能有效地保存土壤水分和养料,提高土壤肥力<sup>[6]</sup>。生物质炭输入土壤后,通过提高土壤的碳氮比,增强了土壤对矿质氮的吸持容量,提高了矿质氮肥的利用率<sup>[7]</sup>。生物质炭对氮肥影响主要是通过吸附土壤中极性化合物,并通过微孔储存氮素得以保持<sup>[8-10]</sup>,另外生物质炭施入土壤后可抑制微生物的反硝化作用以降低氮氧化物的排放<sup>[11]</sup>,从而减少氮肥的损失,因此在生物质炭基肥吸附铵态氮和硝态氮作用下<sup>[12-14]</sup>,显著减少土壤速效养分的损失,从而提高肥料的利用率。在土壤重金属污染植物修复领域,肥料有效性是影响重金属富集植物生育特性以及修复效率的重要因素<sup>[15-16]</sup>。目前的常规施肥方式,容易随灌溉等因素影响造成养分流失<sup>[17-18]</sup>,施肥调控对于植物修复特性影响有限。本试验借助于炭肥混施方式提高土壤养分有效性,以改善富集植物生理特性;研究炭肥混施下土壤养分有效性及印度芥菜镉富集特征,以提高重金属富集植物的生育水平和富集能力,为农业生态环境的重金属污染修复提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

试验区位于江西省南昌市江西农业大学农业科技园内,属亚热带季风区,以双季稻等耕种为主,近年来随周围工业发展以及农田过量施肥等影响致使土壤重金属污染呈现加重趋势,试验区内土壤重金属及养分含量见表 1。依据土壤重金属植物修复模式及芥菜吸收、转移和富集镉元素特性,本文于 2016 年 1 月—2017 年 12 月进行了炭肥混施下土壤养分缓释特征及芥菜镉富集响应试验。通过起垄(垄顶开沟 5 cm)撒种、炭肥混施和灌溉后进行回填,每垄种植两行(垄顶间距 30 cm,行距 15 cm)。试验设置不同施炭量(C0、C1、C2 分别为炭肥质量比 0、3%、9%)和不同施肥量(F0、F0.2、F0.4、F0.7、F1.0 分别为基准施肥量的 0、20%、40%、70%和 100%,基准施肥量:N 350 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 180 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 180 kg/hm<sup>2</sup>)共 15 个处理。生物炭由水稻秸秆通过 SK2-1-12 型管式炉(上海实验电炉厂)500~600℃的高温缺氧状态下,对其有控制地进行高温分解得到,生物炭比表面积 5 次取样均值为(338±52) m<sup>2</sup>/g, pH 值为 10.08±2.30, N 质量比为(1.23±0.18) g/kg, P 质量比为(0.42±0.11) g/kg。肥料为尿素、磷酸二氢钾、硫酸钾(分析纯),作为底肥一次性施入,试验灌水定额整个生育期共灌溉 5 次,灌水日期和灌水量各处理均一致,试验材料为湖北太谷科技公司生产的印度芥菜。

表 1 播种前芥菜主要根区范围内土壤镉及养分含量(质量比)

年份	总镉	水溶性镉	有效氮	有效磷	有效钾
2016	3.38 ± 0.51	2.11 ± 0.17	15.02 ± 1.08	12.14 ± 1.22	102.25 ± 25.50
2017	3.03 ± 0.39	2.05 ± 0.11	15.96 ± 1.16	12.84 ± 1.52	108.25 ± 29.50

### 1.2 测定项目及方法

土壤镉含量背景值:取土时间为播种前 35 d,考

虑炭肥混施作用、芥菜生长的关键期以及生物炭作用范围,土壤养分及镉含量检测的采样时间均为种

植后 110 d,并在垂直垄方向及种植行中间(距离茎秆底端水平 7.5 cm)及地表以下 0~30 cm 土层采样并混合均匀检测。

芥菜生物量:从土壤中挖出芥菜,将根系冲洗干净,用滤纸吸去明水,称量。植株于干燥箱内 105℃ 杀青 2 h,70℃ 干燥,地上部和根部分别称量。

土壤养分(碱解氮、有效磷、有效钾)含量:碱解氮含量采用碱解扩散法测定,速效磷含量采用盐酸氟化铵浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾含量则采用乙酸铵浸提-原子吸收分光光度法测定。芥菜镉含量采用石墨炉原子吸收光谱法检测(GB/T 5009.15—2003),提取地上部和根部分别检测。土壤镉含量采用原子吸收分光光度计(Z-5000 ASS 型)测定。富集系数(Bioaccumulation factors, BCFs)为植物重金属含量与土壤中的重金属含量的比值。

### 1.3 数据分析方法

采用 SPSS 18.0 软件进行统计分析。每个处理 3 次重复,共有 9 个样本计算平均值和误差。依据两年炭肥对土壤养分和植物生理指标影响,采用 Logistic 累积曲线模拟该模型,表述为

$$y = \frac{K}{1 + ae^{-bx}} \quad (1)$$

式中  $K$ 、 $a$ 、 $b$ ——模型待定参数

当研究炭肥混施下土壤养分缓释对施肥比例响应时, $y$  表示土壤养分(有效氮、有效磷、有效钾)含量, $x$  表示肥料施用比例,分别为 0、20%、40%、70%、100%。当研究芥菜生物量及富集特性对土壤养分响应时, $y$  表示模拟指标值(生物量、镉含量和镉富集系数), $x$  表示土壤养分(有效氮、有效磷、有效钾)含量。

对式(1)进行一阶、二阶、三阶求导可以得到模拟指标高效增长的变量起始值( $X_1$ )、高效增长结束的变量值( $X_2$ )、最高效率的变量值( $X_0$ )以及最大效率值( $V_{\max}$ ),各参数的计算公式分别为

$$X_1 = \frac{1}{b} \ln a(2 - \sqrt{3}) \quad (2)$$

$$X_2 = \frac{1}{b} \ln a(2 + \sqrt{3}) \quad (3)$$

$$X_0 = \frac{1}{b} \ln a \quad (4)$$

$$V_{\max} = \frac{Kb}{4} \quad (5)$$

模型各参数依据 2016 年试验数据进行计算,通过 2017 年试验数据进行对比验证,计算分析均方根误差(RMSE),均方根误差越小,表明各指标变化一致性越好。模型验证中均方根误差计算式为

$$P_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (6)$$

式中  $P_{\text{RMSE}}$ ——均方根误差

$x_i$ ——实测值  $\bar{x}$ ——模拟值

$n$ ——样本数

## 2 结果与分析

### 2.1 炭肥混施下土壤养分含量变化趋势及缓释特征

通过模型模拟炭肥混施下土壤养分对施肥比例的响应,结果表明有效氮、有效磷和有效钾含量的 RMSE 占实测平均值 3.29%~6.70%,相关系数  $R^2$  不低于 0.9835(表 2)。从土壤养分缓释的实测值变化趋势来看(图 1),土壤养分含量在施肥比例区间 F0 至 F0.7 的增幅为 48.74%~362.58%,F0.7 至 F1.0 处理下增幅为 1.85%~23.91%;施炭处理下 C1、C2 的土壤养分含量比 C0 分别增长 5.75%~101.46%、9.39%~106.42%。从土壤养分模型拟合曲线及特征参数来看(表 3),有效氮、有效磷和有效钾高效缓释的施肥比例区间( $X_1 \sim X_2$ )为 0.99%~55.18%,施炭缓释作用下有效氮、有效磷和有效钾的最高含量比未施炭处理提高 25.89%~40.93%、24.86%~36.08% 和 17.38%~26.68%,有效氮、有效磷的缓释最大效率值( $V_{\max}$ )提高 49.17%~90.00%、13.25%~37.35%。因此施炭有利于土壤养分缓释,提高了土壤养分有效含量和缓释效率,为芥菜镉富集提供养分支持。

### 2.2 镉污染下土壤养分含量变化对芥菜生物量累积的影响

生物量反映生长发育程度而且是影响芥菜镉富集的重要因素。依据芥菜镉富集对土壤养分响应模型模拟(表 4),结果表明地上部和根部生物量的 RMSE 分别占其平均值 5.81% 和 6.57% 且  $R^2$  不小于 0.9570。图 2 表明土壤镉污染下芥菜生物量随养分含量增加呈上升趋势,其中土壤养分高效缓释区间地上部和根部生物量分别增长 119.65%~141.77%、246.20%~263.36%,而生物量最高的地上部、根部实测均值分别达模型预测最高值( $K$  值)的 60.94%~93.32%、44.86%~63.30%。生物量高效累积对土壤养分有效氮、有效磷和有效钾含量的响应区间分别为 6.26~137.96 mg/kg、6.22~41.43 mg/kg 和 97.25~382.00 mg/kg,其中地上部生物量高效累积相比根部的有效氮、有效磷响应区间( $X_1 \sim X_2$ )分别扩大 150.00%、12.51%,最大效率值( $V_{\max}$ )提高 166.67%~300.00%,实现了芥菜同化物质由根部至地上部的有效转移,为芥菜镉由根

表 2 炭肥混施下土壤养分含量变化的模型参数

Tab. 2 Regression model parameters and soil nutrient content under mixed carbon-fertilizer treatment

土壤养分含量	施炭处理	模型参数			$R^2$	均方根误差/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	
		$K/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$a$	$b$		2016 年	2017 年
有效氮	C0	79.93	4.09	0.06	0.995 6	1.885 8	4.516 9
	C1	102.10	4.00	0.07	0.991 0	3.371 4	3.805 0
	C2	113.80	4.50	0.08	0.988 8	3.268 6	4.586 2
有效磷	C0	66.42	4.23	0.05	0.995 1	0.641 1	2.592 4
	C1	74.93	4.19	0.05	0.993 6	0.340 4	0.777 7
	C2	75.95	4.18	0.06	0.983 5	0.555 1	2.232 3
有效钾	C0	763.00	4.06	0.05	0.987 6	8.339 4	15.145 5
	C1	772.20	4.08	0.05	0.993 0	4.223 2	10.933 3
	C2	825.20	4.14	0.05	0.991 1	13.836 6	12.038 2

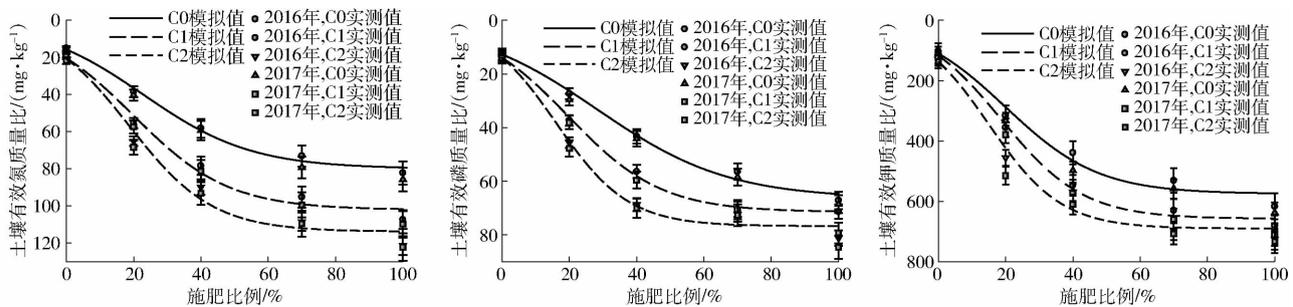


图 1 炭肥混施下土壤养分含量的变化曲线

Fig. 1 Changing trend of soil nutrient content under combined application of carbon and fertilizer

表 3 炭肥混施下土壤养分高效缓释的特征参数

Tab. 3 Characteristic parameters of soil nutrient efficient sustained release under mixed fertilizer-carbon application

土壤养分	施炭处理	特征参数				土壤养分高效缓释含量/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )		
		$X_1/\%$	$X_2/\%$	$X_0/\%$	$V_{\max}$	初始值	结束值	效率最高值
有效氮	C0	1.53	45.43	23.48	1.20	16.86	63.96	40.75
	C1	0.99	38.62	19.80	1.79	21.53	80.52	50.80
	C2	2.34	35.26	18.80	2.28	24.07	90.14	57.43
有效磷	C0	2.50	55.18	28.84	0.83	14.10	53.02	33.70
	C1	2.31	54.99	28.65	0.94	15.87	66.20	46.99
	C2	1.89	45.79	23.84	1.14	16.10	72.15	51.54
有效钾	C0	1.68	54.36	28.02	9.54	121.40	531.18	368.36
	C1	1.78	54.46	28.12	9.65	131.53	623.50	448.65
	C2	2.07	54.75	28.41	10.32	166.80	672.92	535.48

表 4 芥菜生物量累积对土壤养分响应的模型参数及特征参数

Tab. 4 Model parameters and characteristic parameters of mustard biomass accumulation in response to soil nutrients

参数	有效氮含量		有效磷含量		有效钾含量		
	地上部	根部	地上部	根部	地上部	根部	
模型参数	$K/(\text{g}\cdot\text{株}^{-1})$	16.95	2.48	11.07	2.59	15.71	3.50
	$a$	4.23	6.54	7.37	6.53	12.22	9.87
	$b$	0.04	0.05	0.08	0.09	0.01	0.01
	$R^2$	0.957 0	0.997 6	0.980 5	0.969 3	0.987 1	0.982 9
均方根误差/( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ )	2016 年	0.288 1	0.046 6	0.231 0	0.065 1	0.195 8	0.048 0
	2017 年	0.423 3	0.050 7	0.422 1	0.070 5	0.423 4	0.055 7
特征参数	$X_1/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	3.13	11.22	8.51	6.22	118.61	97.25
	$X_2/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	68.98	63.90	41.43	35.48	382.00	360.65
	$X_0/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	36.05	37.56	24.97	20.85	250.31	228.95
	$V_{\max}$	0.17	0.03	0.22	0.06	0.04	0.01

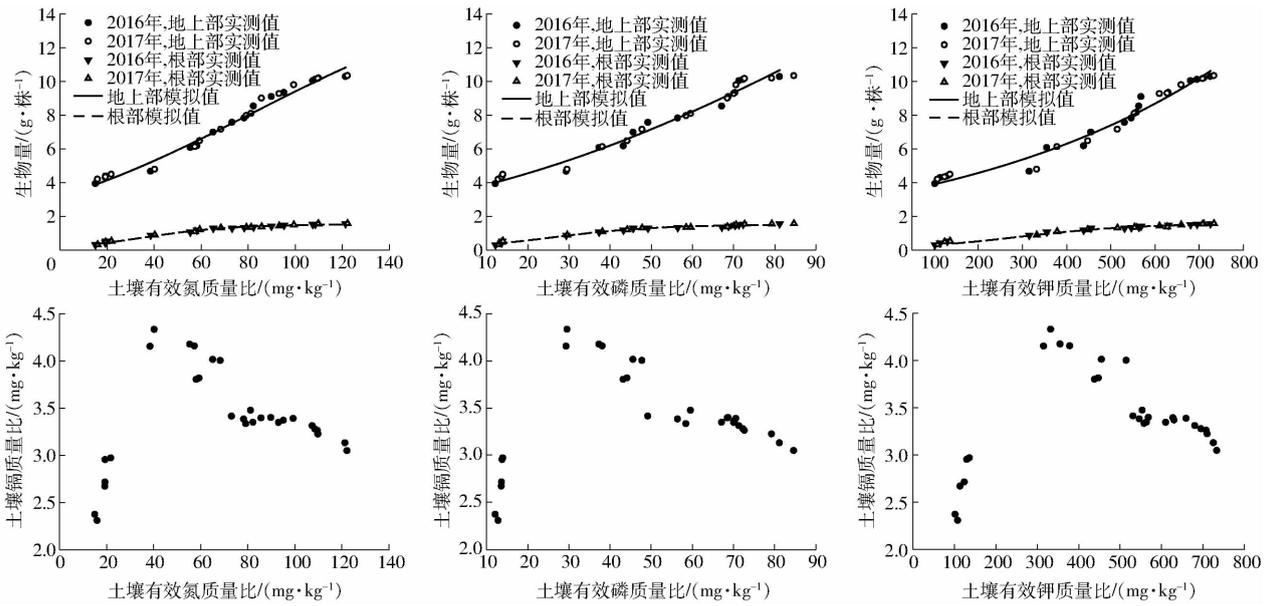


图2 芥菜生物量累积对土壤养分的响应趋势

Fig. 2 Response trends of biomass accumulation of mustard to soil nutrients

部向地上部转移提供动力。依据表4中参数 $K$ 值及对应自变量排序,比较土壤养分对生物量累积的驱动潜力影响,则地上部由大到小顺序为有效氮、有效钾、有效磷含量;根部由大到小顺序为有效钾、有效磷、有效氮含量。

### 2.3 镉污染下土壤养分含量对芥菜镉富集趋势影响

依据芥菜镉富集对土壤养分响应模型,镉含量、富集系数的模拟结果表明(表5)RMSE值占实测平均值为4.76%~8.37%, $R^2$ 不小于0.9730,模型较好地反映了芥菜镉富集对土壤养分的响应趋势。图3表明芥菜镉富集随土壤养分含量增加呈上升趋势,在土壤养分高效缓释区间内(有效氮、有效磷和有效钾质量比分别为:16.86~91.14 mg/kg、14.10~72.15 mg/kg和121.40~672.92 mg/kg),镉

含量、富集系数分别增长97.79%~201.96%、122.40%~143.02%,并随土壤养分增加地上部、根部的镉含量试验处理最高均值达模型预测最高值( $K$ 值)的80.49%~98.85%、62.07%~90.33%,富集系数则为26.78%~60.08%、45.27%~66.30%,可见芥菜镉含量随土壤养分含量增加已达较高水平,而富集系数仍有上升潜力。依据表5中参数 $K$ 值及相应自变量排序,比较土壤养分的驱动潜力,镉含量由大到小排序为:有效钾、有效磷、有效氮含量;富集系数由大到小排序为:有效磷、有效钾、有效氮含量。

### 2.4 芥菜镉高效富集的土壤养分含量及炭肥混施策略

从芥菜镉富集对土壤有效养分响应的特征参数

表5 芥菜镉富集特性对土壤养分响应的模型参数及特征参数

Tab. 5 Model parameters and characteristic parameters of mustard cadmium enrichment in response to soil nutrient

参数	有效氮含量		有效磷含量		有效钾含量		
	地上部	根部	地上部	根部	地上部	根部	
$K/(mg \cdot kg^{-1})$	62.79	123.90	63.29	130.20	77.12	180.30	
$a$	5.00	4.78	15.65	9.24	23.46	15.75	
$b$	0.05	0.04	0.11	0.09	0.01	0.01	
$R^2$	0.9951	0.9905	0.9818	0.9730	0.9847	0.9908	
RMSE/( $mg \cdot kg^{-1}$ )	2016年	1.8258	1.8258	1.5795	1.4171	1.4171	2.6023
	2017年	2.8557	2.8557	3.4147	3.3845	3.3845	2.1141
$K$	33.90	57.86	76.06	84.73	55.75	72.70	
$a$	4.88	4.11	11.73	6.26	8.24	5.14	
$b$	0.03	0.03	0.05	0.05	0.01	0.01	
$R^2$	0.9743	0.9824	0.9785	0.9811	0.9891	0.9957	
RMSE	2016年	0.7430	0.7430	0.7588	0.2572	0.2572	0.8528
	2017年	1.4164	1.4164	1.1584	1.0617	1.0617	1.2718

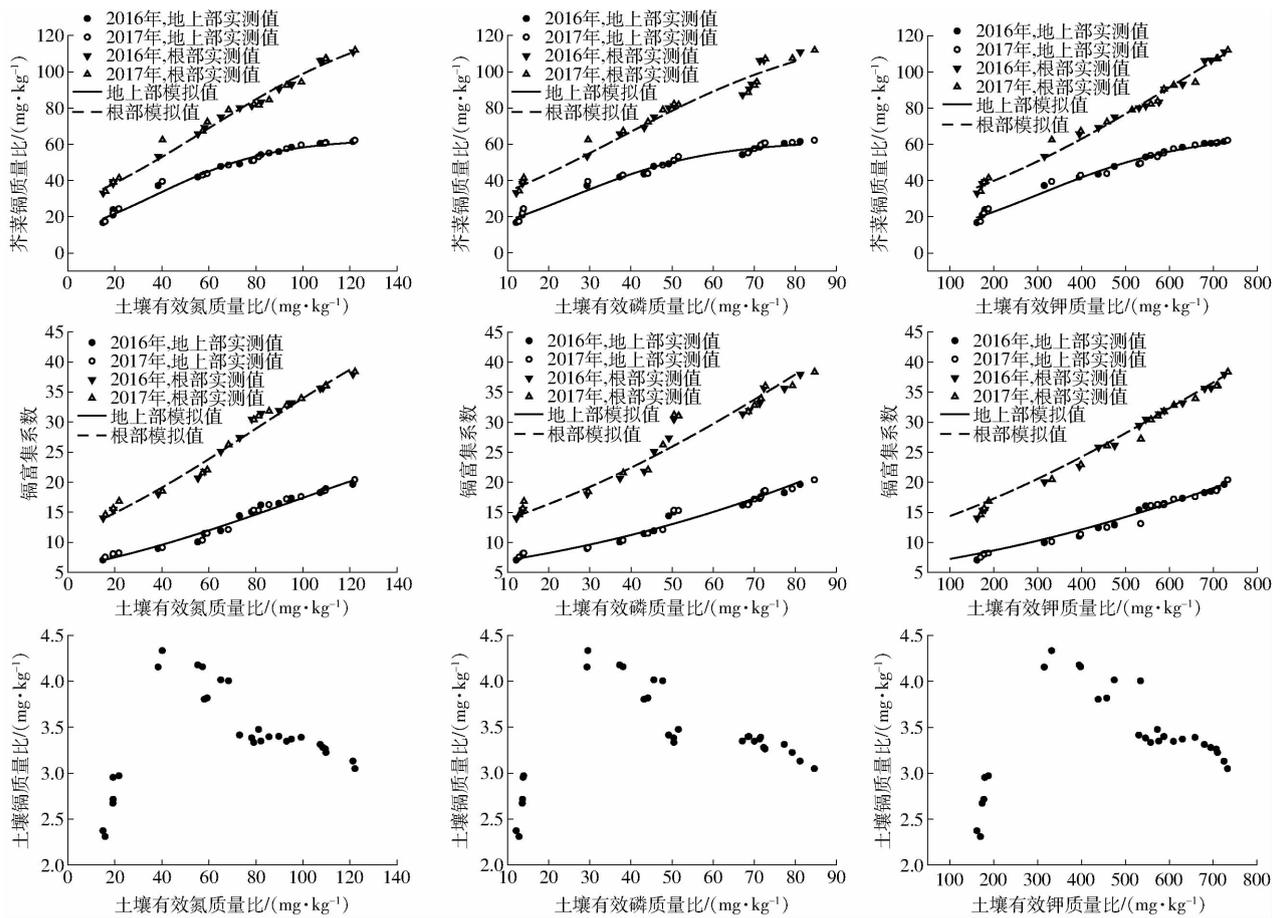


图 3 芥菜镉含量和富集系数对土壤养分的响应趋势

Fig. 3 Response trends of cadmium content and enrichment coefficient of mustard to soil nutrients

来看(表 6), 镉含量高效累积的土壤有效氮、有效磷和有效钾质量比响应区间分别为 5.76 ~ 67.01 mg/kg、10.07 ~ 39.34 mg/kg 和 143.99 ~ 447.23 mg/kg, 而土壤养分高效缓释的有效氮、有效磷和有效钾质量比分别在 91.14、72.15、672.92 mg/kg 以下, 表明本试验中炭肥混施下高效缓释土壤养分含量能够满足镉含量高效累积需求。另外镉含量高效累积中根部比地上部的有效氮、磷响应区间 ( $X_1 \sim X_2$ ) 扩大 9.30%、22.21%, 且最大效率值 ( $V_{max}$ ) 提高 68.39% ~ 136.84%, 表明地上部镉含量提升可通过土壤养分

缓释驱动根部镉的转移实现。富集系数高效提升的有效氮、有效磷和有效钾质量比响应区间分别为 3.22 ~ 96.74 mg/kg、10.34 ~ 75.58 mg/kg、32.01 ~ 342.60 mg/kg, 表明富集系数提升所需的有效氮、有效磷含量略高于土壤养分高效缓释区间。综合比较芥菜镉含量、富集系数高效提升需求, 土壤有效氮、有效磷和有效钾含量分别应满足 96.74、75.58、447.23 mg/kg。结合土壤养分缓释特征及节约肥料的原则, 通过模型式(1)反算, 确定芥菜镉高效富集的炭肥混施策略: C2 情况下有效氮、有效磷和有效

表 6 芥菜镉含量和富集系数对土壤养分响应的特征参数

Tab. 6 Characteristic parameters of response of cadmium accumulation in mustard plants to soil nutrient content

参数	有效氮含量		有效磷含量		有效钾含量		
	地上部	根部	地上部	根部	地上部	根部	
镉含量	$X_1 / (mg \cdot kg^{-1})$	6.22	5.76	13.03	10.07	183.83	143.99
	$X_2 / (mg \cdot kg^{-1})$	62.26	67.01	36.98	39.34	447.23	407.38
	$X_0 / (mg \cdot kg^{-1})$	34.24	36.38	25.00	24.71	315.53	275.68
	$V_{max}$	0.74	1.33	1.74	2.93	0.19	0.45
镉富集系数	$X_1 / (mg \cdot kg^{-1})$	8.94	3.22	22.90	10.34	79.20	32.01
	$X_2 / (mg \cdot kg^{-1})$	96.74	91.01	75.58	63.02	342.60	295.40
	$X_0 / (mg \cdot kg^{-1})$	52.84	47.11	49.24	36.68	210.90	163.71
	$V_{max}$	0.25	0.43	0.95	1.06	0.14	0.18

钾肥的比例为 60.58%、61.32%、21.48%。

### 3 讨论

土壤重金属污染植物修复技术已经取得了一定的研究成果,其中土壤养分管理、植物生长发育调控、重金属富集特性等是影响植物修复效率的重要环节<sup>[19-22]</sup>。目前施肥对植物修复调控效应有限,主要是土壤养分损失问题突出,而施加生物炭能够提高土壤养分有效性和利用效率,因此本文采用炭肥混施方式研究土壤养分缓释特征。同目前相关炭肥混施或施加生物炭对肥料利用等研究相比<sup>[23-25]</sup>,本研究的特点是依据 Logistic 曲线模型模拟土壤养分缓释特征,通过对比土壤养分高效缓释区间和最大缓释效率值等参数,分析炭肥混施对土壤养分缓释的影响。结果表明在肥料中添加施炭量相比未施炭的有效氮、有效磷最大缓释效率值分别提升 49.17%~90.00%、13.25%~37.35%,高效缓释下土壤养分含量提高 17.38%~40.93%,因此施炭提高了土壤养分含量和缓释效率。但超过土壤养分高效缓释区间的施肥比例,可能由于一定施炭量情况下肥料养分维持和储存能力有限,随施炭量增加土壤有效养分含量增幅有所下降,生物炭的缓释作用有所降低<sup>[26]</sup>,因此提高土壤养分缓释效率可以考虑减少施炭量或增加施炭量,尤其是对于重金属污染土壤植物修复的养分需求持续性具有重要意义。

生物量反映生长发育程度而且是影响重金属富集植物的重要因素。通过同化物质由根部向地上部有效转移驱动植物重金属富集,在本试验中镉富集下芥菜生物量在土壤养分高效缓释区间增长 119.65%~263.36%,且地上部相比根部的生物量

高效累积最大效率值提高 166.67%~300.00%,有效氮、有效磷响应区间分别扩大 150.00%、12.51%,说明在土壤养分缓释作用下提升了光合产物合成与转移效率<sup>[26-27]</sup>,为芥菜镉由根部向地上部的转运提供动力基础。土壤养分可能有助于消减根部的重金属胁迫影响进而提升重金属富集特性,为土壤重金属芥菜修复效率的提升奠定基础<sup>[28-29]</sup>。本试验中芥菜镉含量、富集系数在土壤养分高效缓释区间增长 97.79%~201.96%,表明土壤养分缓释作用下芥菜镉富集效率较高;镉含量高效累积中根部比地上部的有效氮、有效磷响应区间扩大 9.30%、22.21%,且最大效率值提高 68.39%~136.84%,表明地上部镉含量提升可通过土壤养分缓释驱动根部镉的转移实现。因此总体上炭肥混施土壤养分缓释作用促进了芥菜生物量累积以及镉高效富集,实现芥菜镉富集提升并节约肥料资源的目的。

### 4 结束语

Logistic 曲线模型模拟炭肥混施下土壤养分缓释特征及芥菜镉富集趋势效果较好,模型反映出炭肥混施相比未施炭可显著提高土壤养分的含量和缓释效率,高效缓释作用下土壤养分含量提高 17.38%~40.93%。在土壤养分高效缓释区间内生物量增长 119.65%~263.36%,镉含量、富集系数增长 97.79%~201.96%,可见炭肥混施对土壤养分的缓释作用驱动了芥菜生长发育及镉高效累积。为满足芥菜镉高效富集并兼顾肥料节约原则,通过模型计算得炭肥混施最优策略为:9%施炭下有效氮、有效磷和有效钾肥的比例为 60.58%、61.32%、21.48%。

### 参 考 文 献

- [1] WILLSCHE S, JABLONSKI L, FONAZ, et al. Phytoremediation experiments with *Helianthus tuberosus* under different pH and heavy metal soil concentrations[J]. Hydrometallurgy, 2017, 168:153-158.
- [2] ARITZ B, LUR E, FERNANDO B, et al. Ecosystem services and plant physiological status during endophyte-assisted phytoremediation of metal contaminated soil[J]. Science of the Total Environment, 2017, 584-585:329-338.
- [3] TOPAK R, ACAR B, UYANÖZ R, et al. Performance of partial root-zone drip irrigation for sugar beet production in a semi-arid area[J]. Agricultural Water Management, 2016, 176:180-190.
- [4] HAFIZ M T, SHAFAT A, MUHAMMAD R, et al. Phytoremediation of heavy metals by *Alternanthera bettzickiana*: growth and physiological response[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 126:138-146.
- [5] SEBASTIAN W, DANIEL B, ANNA K, et al. Phytoremediation as an effective method to remove heavy metals from contaminated area-TG/FT-IR analysis results of the gasification of heavy metal contaminated energy crops[J]. Journal of the Energy Institute, 2017, 90(3):408-417.
- [6] 张秋霞,张合兵,张会娟,等.粮食主产区耕地土壤重金属高光谱综合反演模型[J/OL].农业机械学报,2017,48(3):148-155.  
ZHANG Qiuxia, ZHANG Hebing, ZHANG Huijuan, et al. Hybrid inversion model of heavy metals with hyperspectral reflectance in cultivated soils of main grain producing areas[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):148-155. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170319&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170319&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.019. (in Chinese)

- [7] KHOKAN K, AKANDA M, BISWAS S, et al. Field performance of alternate wetting and drying furrow irrigation on tomato crop growth, yield, water use efficiency, quality and profitability[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(10):2380–2392.
- [8] XIAO Yu, ZHANG Jing, JIA Tingting, et al. Effects of alternate furrow irrigation on the biomass and quality of alfalfa (*Medicago sativa*) [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 161:147–154.
- [9] NAVARRO-TORRE S, MATEOS-NARANJO E, CAVIEDES M A, et al. Isolation of plant-growth-promoting and metal-resistant cultivable bacteria from *Arthrocnemum macrostachyum* in the Odiel marshes with potential use in phytoremediation[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016,110(1): 133–142.
- [10] ZHANG Zengqiang, WANG J, TANG Cilai, et al. Heavy metals and metalloids content and enrichment in Gulf Coast sediments in the vicinity of an oil refinery[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 159 :93–100.
- [11] JUAN M M L, MARÍA J, SARA M, et al. Evaluation of the potential of *Atriplex halimus* stem cuttings for phytoremediation of metal-polluted soils[J]. *Ecological Engineering*, 2016,97: 553–557.
- [12] LIAO Changjun, XU Wending, LU Guoning, et al. Biosurfactant-enhanced phytoremediation of soils contaminated by crude oil using maize (*Zea mays*. L) [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 92: 10–17.
- [13] KIDANE W, HINTSA L. Effect of different furrow and plant spacing on yield and water use efficiency of maize [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 177: 215–220.
- [14] HECKENROTH A, RABIER J, DUTOIT T, et al. Selection of native plants with phytoremediation potential for highly contaminated Mediterranean soil restoration: tools for a non-destructive and integrative approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183(3):850–863.
- [15] CHILUNDO M, JOEL A, WESSTRÖM I, et al. Response of maize root growth to irrigation and nitrogen management strategies in semi-arid loamy sandy soil[J]. *Field Crops Research*, 2017, 200:143–162.
- [16] MANI D, KUMAR C, KUMAR P. Integrated micro-biochemical approach for phytoremediation of cadmium and lead contaminated soils using *Gladiolus grandiflorus* L cut flower[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 124:435–446.
- [17] SIYAL A A, MASHORI A S, BRISTOW K L, et al. Alternate furrow irrigation can radically improve water productivity of okra [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 173:55–60.
- [18] PARVIZI H, SEPASKHAH A R, AHMADI S H. Physiological and growth responses of pomegranate tree (*Punica granatum* (L.) cv. *Rabab*) under partial root zone drying and deficit irrigation regimes[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 163:146–158.
- [19] ULLAH A, SUN Heng, MUHAMMAD F, et al. Phytoremediation of heavy metals assisted by plant growth promoting (PGP) bacteria: a review[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 117:28–40.
- [20] XI Mao, HAN Fengxiang, SHAO Xiaohou, et al. Electro-kinetic remediation coupled with phytoremediation to remove lead, arsenic and cesium from contaminated paddy soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 125:16–24.
- [21] BAUDDH K, SINGH K, SINGH B, et al. *Ricinus communis*: a robust plant for bio-energy and phytoremediation of toxic metals from contaminated soil [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 84:640–652.
- [22] BALDANTONI D, CICATELLI A, BELLINO A, et al. Different behaviours in phytoremediation capacity of two heavy metal tolerant poplar clones in relation to iron and other trace elements[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 146: 94–99.
- [23] DONI S, MACCI C, PERUZZI E, et al. Heavy metal distribution in a sediment phytoremediation system at pilot scale[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81:146–157.
- [24] ZHU Chuanyong, TIAN Hezhong, CHENG Ke, et al. Potentials of whole process control of heavy metals emissions from coal-fired power plants in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114: 343–351.
- [25] 王豹,黄标,齐雁冰,等. 风干对淹水稻田土重金属形态及其作物有效性的影响[J/OL]. *农业机械学报*,2013,44(5): 89–95. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20130517&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130517&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.017.
- WANG Bao, HUANG Biao, QI Yanbing, et al. Effect of air drying on speciation and plant availability of heavy metals in flooded rice paddies [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 89–95. (in Chinese)
- [26] GALAL T M, SHEHATA H S. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 244–251.
- [27] YANG Zhuo, HAN Decai, LI Bowen. Comparative study of different cultivation conditions on the absorption of heavy metals in *Brassica juncea* [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(3): 295–300.
- [28] SUN Zheng, CHEN Jiajun, WANG Xingwei, et al. Heavy metal accumulation in native plants at a metallurgy waste site in rural areas of Northern China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 86: 60–68.
- [29] SUN Yuebing, ZHOU Qixing, XU Yingming, et al. Phytoremediation for co-contaminated soils of benzo[a]pyrene (B[a]P) and heavy metals using ornamental plant *Tagetes patula* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2–3):2075–2082.