

9 个油菜品种根系形态与镉铅累积关系 及机理初步分析*

杨志新, 钟 伟, 秦 丽, 季李伟, 祖艳群, 湛方栋**

(云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】研究油菜的根系形态与镉铅累积特征, 分析油菜植株镉铅含量、累积量与根系形态间的关系。【方法】以云南铅锌矿周边镉铅污染的原状农田土壤为供试基质, 采用根箱种植云南主栽的 9 个油菜品种。【结果】(1) 油菜根体积和根尖数品种间的差异较大, 根长和根表面积差异较小。(2) 油菜地上部和地下部的铅含量与累积量品种间的差异较大, 地下部镉含量品种间的差异较大, 而地上部镉含量、地上部和地下部镉累积量品种间的差异较小。(3) 油菜根体积与地上部铅累积量呈显著正相关, 根尖数与地上部、地下部镉含量呈极显著正相关。(4) 根际有效态铅含量与油菜地下部铅含量、累积量呈极显著和显著正相关, 根际有效态镉含量与油菜地上部镉累积量呈显著负相关。【结论】油菜根体积和根尖数存在明显的品种差异, 并与油菜镉含量、铅累积量的关系密切。

关键词: 油菜品种; 根系形态; 镉铅含量; 累积量

中图分类号: S 157. 433; X 171. 4

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2018) 05-0916-09

Relationship between Root Morphology and Cd/Pb Accumulation Characteristics of Nine Rape Varieties and Its Mechanism

YANG Zhixin, ZHONG Wei, QIN Li, JI Liwei, ZU Yanqun, ZHAN Fangdong

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] To study the root morphology and Cd/Pb accumulation characteristics, and analyze their relationship. [Method] Nine rape varieties widely cultivated in Yunnan Province were cultivated in a rhizobox filled with heavy metals-polluted soils from a farmland in a lead-zinc mining area of Yunnan Province under a greenhouse condition. [Results] (1) There was a big difference between the nine varieties on the root volume and tips number, and a small difference on root length and surface area. (2) The difference is obvious on the Pb content and accumulation in the above-ground and underground part between the nine varieties, and on the Cd content in the underground part; and the difference is small on the Cd content in the aboveground part and the Cd accumulation in the aboveground and underground part. (3) A significant positive correlation between root volume and the Pb accumulation in aboveground part, and very significant positive correlations between root tip and the Cd content in aboveground and underground part were found. (4) There were very significant

收稿日期: 2017-01-22

修回日期: 2017-03-02

网络出版时间: 2018-07-09

*基金项目: 国家自然科学基金(41461093, 41661056); 云南省农田无公害生产创新团队(2017HC015)。

作者简介: 杨志新(1969—), 男, 云南鹤庆人, 硕士, 副教授, 主要从事烟草栽培和环境资源研究。

E-mail: 1213594226@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 湛方栋(1980—), 男, 江西赣县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤污染与修复研究。

E-mail: zfd97@ynau.edu.cn

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201701029](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201701029)

and significant positive correlations between the available Pb concentration in the rhizosphere with the Pb content and accumulation in the underground part of rape; and a significant positive correlation between the available Cd concentration in the rhizosphere and the Cd accumulation in the above-ground part of rape. [Conclusion] There was a notable difference on root volume and tips number, which had a close relationship with Cd content and Pb accumulation in the nine rape varieties.

Keywords: rape variety; root morphology; content of cadmium and lead; accumulation

近年来,由于金属矿产开采与冶炼、污水灌溉、工业三废未经处理直接排放等原因,导致镉、铅等重金属进入农田土壤,使中国农田受到不同程度的重金属污染^[1-2]。由于中国人多地少,即使在重金属污染的农田上,仍广泛种植了农作物,其对污染农田重金属的吸收与累积,引起了广泛的关注^[3-4]。

植物对镉的吸收存在品种差异,如关于玉米^[5]和油菜^[6]的研究表明:同一作物的不同品种对镉的吸收、累积和转运有显著差异。油菜是中国的重要作物之一,在金属矿区周边重金属污染的农田仍广泛种植,具有较强的吸收与累积重金属的能力^[7],并存在明显的品种差异^[8-9]。如22个油菜品种中,3个油菜品种的地上部镉含量和累积量高于其余油菜品种^[7]。

根系是作物主要的吸收器官,根系形态与作物对养分、重金属的吸收能力存在密切的关系,被认为是作物品种间重金属累积差异的重要机理之一^[10-11]。有学者认为根系形态与作物对水分、矿物元素和重金属的吸收有直接关系。王一喆等^[12]的研究显示:当作物受到镉离子毒害时,植物根部的形态和生理功能发生改变。何俊瑜等^[13]关于镉胁迫对不同水稻品种幼苗根系形态和生理特性的影响的研究显示:5~500 $\mu\text{mol/L}$ 镉浓度胁迫下,根系的总长度、根系表面积、根体积受到抑制。对于草坪草的研究也得出相同的结论^[14],大的根长、根表面积、根体积和根尖数等根系形态特征,有助于油菜吸收营养物质^[11];同时,也可能增加油菜对重金属的吸收累积,使得不同油菜品种的根表面积、根体积与地上部镉含量及累积量呈显著正相关,根长与镉累积量呈显著正相关^[10],但2个冬小麦植株体内镉累积量与根长、根表面积、根体积呈极显著负相关^[15]。因此,为明确根系形态特征与作物重金属吸收累积间的关系,需要开展更多的研究。

云南地处中国西南部,铅锌矿产资源丰富,是中国重要的铅锌矿生产基地,长期的铅锌矿开采和冶炼,导致矿区和周边农田土壤严重的镉、铅等重金属污染^[16-17]。油菜是云南铅锌矿周边农田冬季主要种植的作物之一,但有关云南冬季主栽的油菜根系形态与重金属累积特征及其关系,尚未见报道。因此,以云南会泽铅锌矿周边重金属污染农田土壤为栽培基质,以云南主栽的9个油菜品种为供试材料,开展根箱试验,研究油菜品种根系形态与镉、铅累积的特征,分析油菜植株镉铅含量、累积量与根系形态间的关系,评价云南主栽油菜镉铅累积的累积特征与品种差异,为矿区重金属污染农田油菜种植品种选择提供初步的科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采集自云南省会泽铅锌矿周边的农田,地处E 103°38'12.9"、N 26°34'21.1",海拔2 130 m。土壤类型为山原红壤,背景值为:pH 6.56,有机质含量 20.9 g/kg,全氮含量 2.2 g/kg,全磷含量 13.5 g/kg,全钾含量 5.4 g/kg。土壤镉含量 4.6 mg/kg,铅含量 392.0 mg/kg;对照中国《土壤环境质量标准》的二级标准,镉、铅分别超标 14、0.3 倍。土壤经过风干,过 2 mm 筛孔,用于根箱盆栽试验。

1.2 供试油菜

供试的9个油菜(*Brassica napus* L.)品种为云花油9号、川油33号、云杂油2号、花油6号、川油18号、德杂5号、常油杂61号、花油3号和花油5号,购买于云南省昆明市小板桥种子批发市场,为云南主栽的油菜品种。

1.3 试验设计

试验采用的根箱尺寸为25 cm×20 cm×2 cm,每个根箱装入1.0 kg的农田土壤,每个油菜品种

种植 4 个根箱。油菜种子在 25 °C 培养箱催芽 3 d 后, 每个根箱种植 4 粒出芽程度一致的种子。在根箱中部挖取深为 1~2 cm 的播种穴, 将 4 粒出芽的油菜种子播于穴中并盖上土。油菜出苗 1 周后进行间苗, 每个根箱留下 1 株生长良好的幼苗。由于油菜是喜肥作物, 试验根箱内的土壤体积有限, 为保障油菜的正常生长, 试验期间每个根箱每 3 d 浇灌 100 mL 霍格兰溶液^[18]; 浇水根据天气情况来定, 选择晴天傍晚浇灌, 保持含水量 70% 左右, 6 周后收获油菜植株。

1.4 指标测定方法

1.4.1 植株生物量测定

收获时将油菜地上部和地下部分开, 先用自来水冲洗, 然后用蒸馏水漂洗干净, 晾干, 放在 105 °C 的烘箱内杀青 0.5 h 后, 经烘干 (75 °C, 72 h), 称重获得生物量。

1.4.2 根系形态指标测定

将油菜根系尽可能完整地从中取出, 冲根后, 选取完整根系, 用吸水纸吸干根系表面水分, 均匀铺开, 经 Epson Perfection V700 扫描仪 (Seiko Epson, 日本) 扫描后, 用 WinRHIZO PRO STD4800 型 (Regent, 加拿大) 根系图像处理软件分析得出根长、根系表面积等根系生长参数。

1.4.3 植株镉、铅含量测定

烘干的植株样品用不锈钢材质的粉碎机全部粉碎、混匀, 过 0.25 mm 孔径的筛, 以促进样品与硝酸充分反应, 用于镉、铅含量测定。称取 0.5 g 植物样品, 置于 150 mL 三角瓶中, 用少量水湿润样品, 采用湿法消解, 加浓硝酸 10 mL, 低温加热至微沸 (140~160 °C), 待棕色氮氧化物基本干完后, 取下冷却。沿壁加入高氯酸 5~10 mL, 继续加热消化呈灰白色糊状, 取下冷却, 加蒸馏水过滤、定容至 50 mL, 采用原子吸收火焰光度法 (TAS-990 型原子吸收分光光度计, 普析通用, 北京) 测定溶液中的镉、铅浓度^[19]。植物金属元素累积量、转移系数、富集系数按以下公式计算。

金属元素累积量=含量×植株生物量; 转移系数=植株地上部金属元素含量/植株地下部金属元素含量×100%。

富集系数=植株体内金属元素含量/土壤中金属元素含量×100%。

1.4.4 土壤镉、铅有效态含量测定

打开根箱, 尽可能完整的从根箱中取出油菜

根系, 置于牛皮纸上。由于油菜根系较细嫩, 先用镊子夹取, 去除根系上大颗粒的土壤, 然后采用刷子将黏附在油菜根系上的土壤分离出来, 作为油菜根际土。

称取过 1 mm 孔径尼龙筛的风干根际土 10.0 g, 置于 150 mL 具塞三角瓶中, 加入 20 mL DTPA-TEA (二乙三胺五乙酸-三乙醇胺) 浸提液 (0.005 mol/L DTPA-0.1 mol/L TEA-0.01 mol/L CaCl₂)。将瓶塞盖紧, 于 25 °C、180 r/min 振荡 2 h 后, 提取土壤有效态镉、铅, 过滤到 50 mL 容量瓶中, 加蒸馏水定容。采用原子吸收火焰光度法 (TAS-990 型原子吸收分光光度计, 普析通用, 北京) 测定 50 mL 容量瓶中溶液镉的浓度, 火焰—原子吸收光谱法测定铅的浓度^[15], 计算土壤镉、铅有效态含量。

1.5 数据处理分析

运用 Microsoft Excel 对数据进行处理, 计算平均值和标准偏差。采用 DPS 7.05 数据分析软件进行统计分析, 用 Duncan 新复极差法检验处理间数据差异的显著性, 分析油菜植株金属元素含量、累积量与根系形态间的相关系数。

2 结果与分析

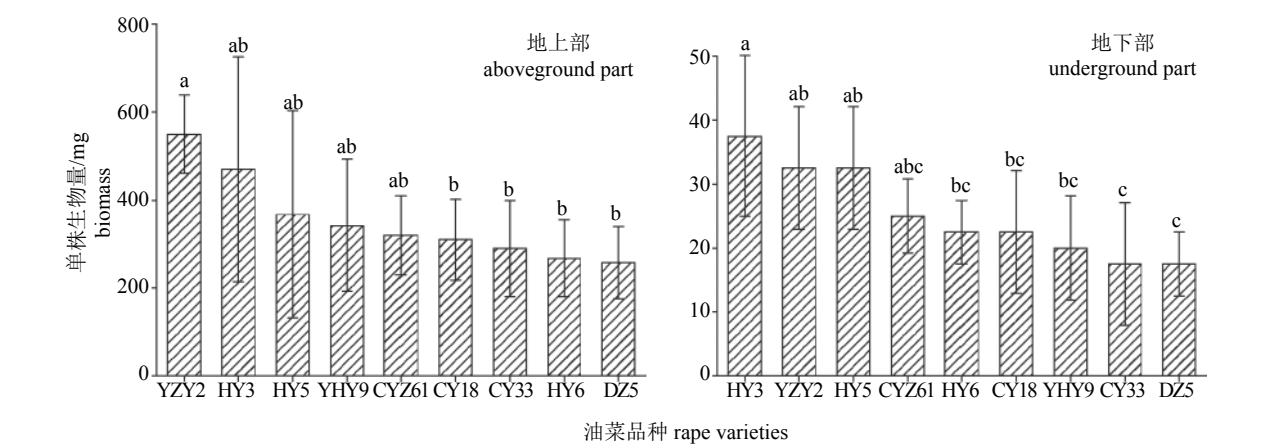
2.1 9 个油菜品种的单株生物量

由图 1 可知: 云杂油 2 号的地上部单株生物量最高, 显著高于川油 18 号、川油 33 号、花油 6 号和德杂 5 号, 与其余品种无显著差异。花油 3 号的地下部单株生物量最高, 显著高于大多数油菜品种, 川油 33 号和德杂 5 号的地下部单株生物量较低, 显著低于花油 3 号、花油 5 号和云杂油 2 号。

2.2 9 个油菜品种的根系形态

由表 1 可知: 油菜根长和根表面积以花油 3 号最大, 根体积以花油 5 号最大, 根尖数以云杂油 2 号最大; 根长、根表面积和根体积以川油 18 号最小, 而根尖数以川油 33 号最小; 9 个品种油菜的根体积和根尖数差异较大, 根体积最大差异 2.2 倍, 根尖数最大差异 1.9 倍; 而根长和根表面积差异较小。

相关性分析表明: 根长与其余 3 个形态指标呈极显著正相关; 根尖数与根长及根体积呈极显著正相关, 与根表面积呈显著正相关 (表 2)。



注: 不同小写字母表示不同油菜品种间差异显著 ($P<0.05$); YZY2、HY3、HY5、YHY9、CYZ61、CY18、CY33、HY6 和 DZ5 分别代表油菜品种云杂油 2 号、花油 3 号、花油 5 号、云花油 9 号、常油杂 61 号、川油 18 号、川油 33 号、花油 6 号和德杂 5 号; 下同。
Note: Different letters in the above columns indicate significant differences between different rape varieties at $P<0.05$ level; YZY2, HY3, HY5, YHY9, CYZ61, CY18, CY33, HY6 and DZ5 represent rape varieties of Yunzayou 2, Huayou 3, Huayou 5, Yunhuayou 9, Changyouza 61, Chuanyou 18, Chuanyou 33, Huayou 6 and Deza 5, respectively; the same as below.

图 1 9 个品种油菜植株生物量
Fig. 1 The plant biomass of nine rape varieties

表 1 9 个油菜品种的根系形态 ($n=4$)

Tab. 1 The root morphology of nine rape varieties

品种 varieties	根长/cm root length	根表面积/cm ² root surface area	根体积/cm ³ root volume	根尖数 root tips number
YHY9	1 055±134 ab	43.1±2.5 abc	3.8±1.4 a	3 369±910 ab
CY33	1 400±32 ab	41.1±0.5 bcd	2.2±0.8 bc	2 463±894 b
YZY2	1 510±51 ab	44.5±1.8 ab	3.4±0.9 abc	4 601±1 249 a
HY6	1 456±81 ab	42.0±1.4 abcd	3.1±1.2 abc	3 168±1 708 ab
CY18	1 315±254 b	38.5±3.8 d	1.9±0.3 c	3 144±1 448 ab
DZ5	1 355±158 ab	40.9±1.5 bcd	2.9±1.1 abc	3 624±1 125 ab
CYZ61	1 505±123 ab	43.5±1.2 ab	3.3±0.9 abc	4 324±647 ab
HY3	1 565±83 a	44.9±1.1 a	3.6±0.7 ab	3 439±891 ab
HY5	1 476±186 ab	39.7±3.8 cd	4.2±0.9 a	2 553±933 b

表 2 9 个油菜品种各根系形态指标间的相关性 ($n=36$)

Tab. 2 The correlation among the root morphology in nine rape varieties

根系形态 root morphology	根长 root length	根表面积 root surface area	根体积 root volume
根表面积 root surface area	0.770**		
根体积 root volume	0.598**	0.246	
根尖数 root tips number	0.450**	0.358*	0.582**

注: “*”表示显著相关 ($P<0.05$), “**”表示极显著相关 ($P<0.01$), 下同。
Note: “*” indicates significant correlation at $P<0.05$ level, “**” indicates highly significant correlation at $P<0.01$ level; the same as below.

2.3 9 个油菜品种镉铅含量

油菜地上部镉含量以川油 18 号、常油杂 61 号和花油 6 号较高, 云杂油 2 号地上部镉含量较低, 但 9 个油菜地上部镉含量的品种间差异较小, 最大相差 2.0 倍。油菜地下部镉含量以云花油 9 号、花油 6 号、德杂 5 号、常油杂 61 号、川油 18 号和川油 33 号较高, 显著高于花油

5 号、花油 3 号和云杂油 2 号, 9 个油菜地下部镉含量的品种间差异较大, 最大差异 4.1 倍(图 2)。

由图 3 可知: 油菜地上部铅含量以川油 33 号、花油 6 号、常油杂 61 号、德杂 5 号和云花油 9 号较高, 显著高于花油 3 号和川油 18 号。油菜地下部铅含量以花油 5 号、云杂油 2 号、常油杂 61 号和德杂 5 号较高, 花油 6 号和花油

3 号地下部铅含量较低。9 个油菜地上部和地下部铅含量的品种间差异较大, 最大差异分别为 4.4 和 4.2 倍。

2.4 9 个油菜品种镉、铅累积量

由图 4 可知: 油菜地上部镉累积量以花油 3 号最高, 川油 33 号和德杂 5 号地上部镉累积量较低, 最高者与最低者间差异显著, 其余品种间差异不显著。油菜地下部镉累积量以云花油 9 号、常油杂 61 号、花油 6 号和川油 18 号较高, 显著高于镉累积量最低的云杂油 2 号。9 个油菜地上部和地下部镉累积量的品种间差异较小, 最大差异分别为 2.1 和 2.6 倍。

由图 5 可知: 油菜地上部铅累积量以云杂油 2 号、川油 33 号、花油 6 号、花油 5 号和常油杂 61 号较高, 显著高于地上部铅累积量较低的德杂 5 号、花油 3 号和川油 18 号。地下部铅累积量以花油 5 号和云杂油 2 号较高, 显著高于

除常油杂 61 号的其余品种。9 个油菜地上部和地下部铅累积量的品种间差异较大, 最大差异分别为 4.7 和 6.2 倍。

2.5 9 个油菜品种根际土壤有效态镉、铅含量

由图 6 可知: 种植油菜后, 根箱土壤有效态镉含量除云杂油 2 号显著高于云花油 9 号和德杂 5 号外, 其余品种间差异不显著。土壤有效态铅含量以川油 18 号较高, 显著高于花油 5 号、花油 6 号、常油杂 61 号和德杂 5 号, 其余品种间差异不显著。

2.6 9 个油菜品种镉、铅富集系数与转移系数

由表 3 可知: 油菜镉、铅富集系数及转运系数存在品种间差异。其中, 镉富集系数以云花油 9 号最大, 云杂油 2 号最小; 镉转移系数以云杂油 2 号和花油 3 号最大, 云花油 9 号和德杂 5 号最小。铅富集系数以花油 5 号最大, 花油 3 号最小; 铅转移系数以花油 6 号最大, 川油 18 号最小。

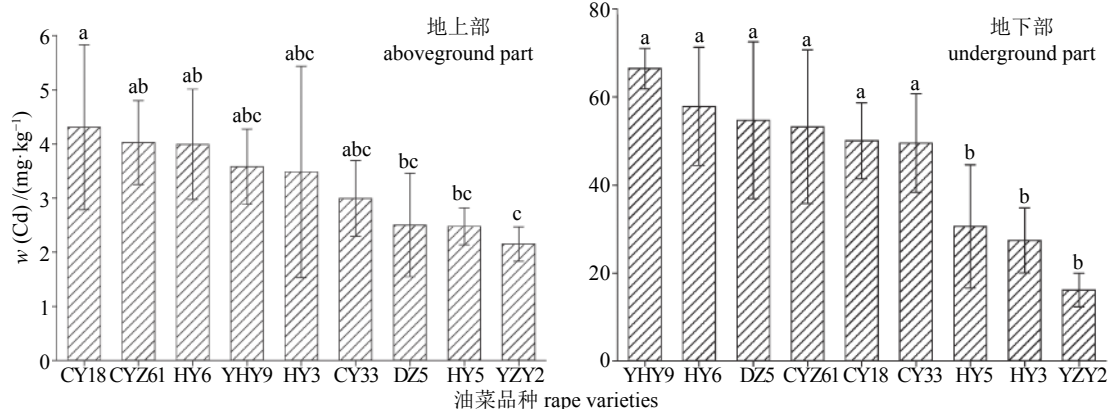


图 2 9 个品种油菜植株镉含量

Fig. 2 The Cd content in the plant of nine rape varieties

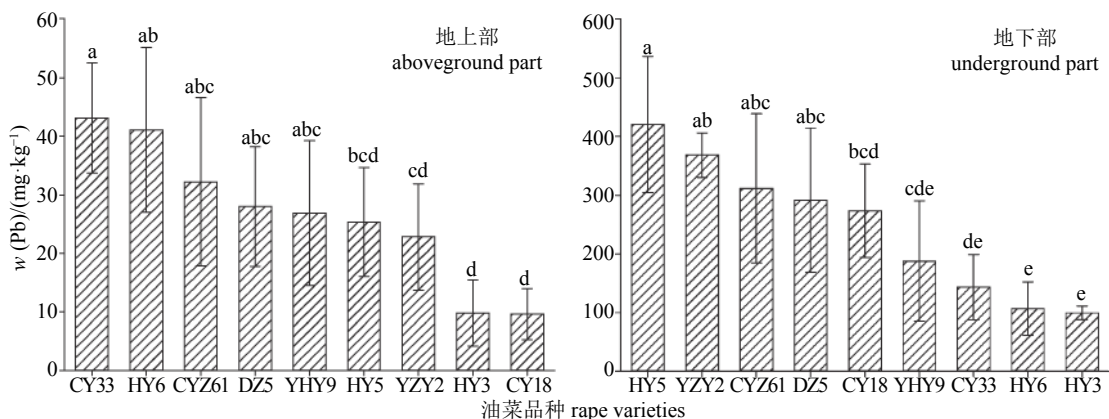


图 3 9 个品种油菜铅含量

Fig. 3 The Pb content in the plant of nine rape varieties

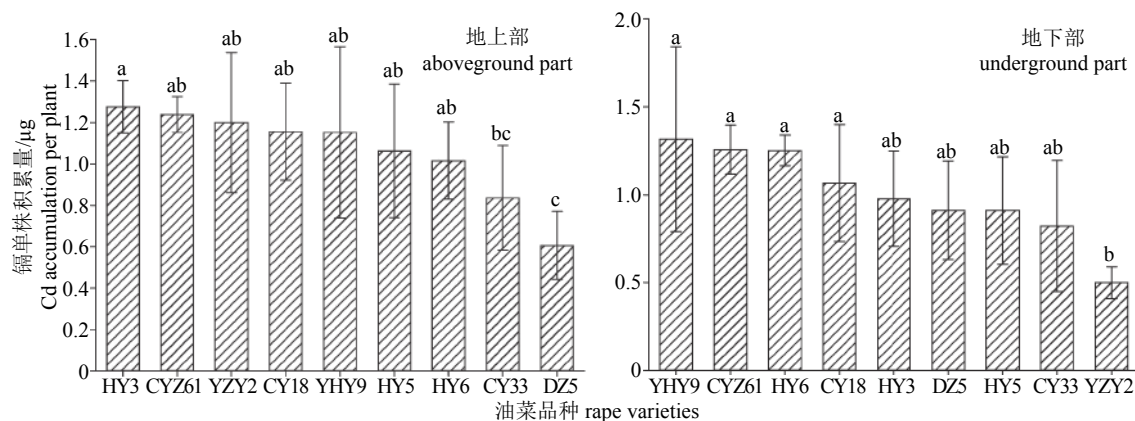


图4 9个品种油菜植株镉累积量

Fig. 4 The Cd accumulation in the plant of nine rape varieties

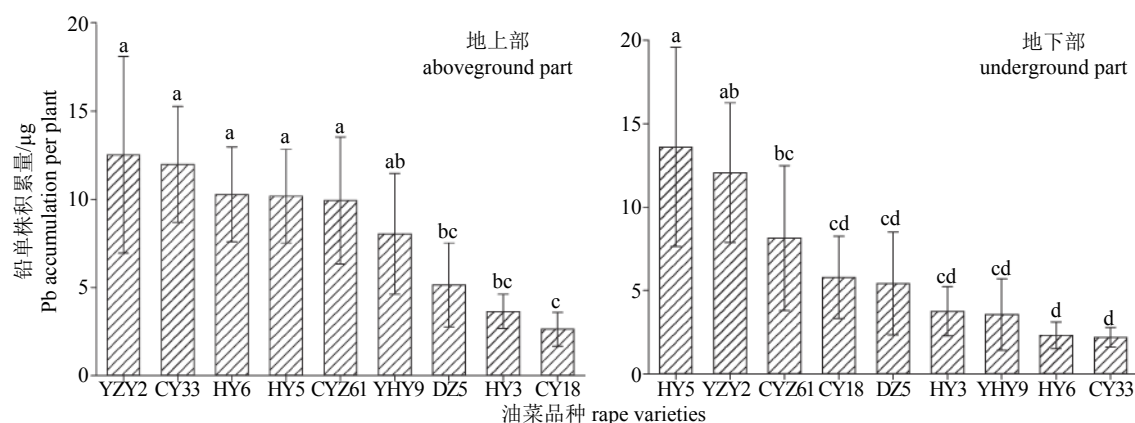


图5 9个品种油菜植株铅累积量

Fig. 5 The Pb accumulation in the plant of nine rape varieties

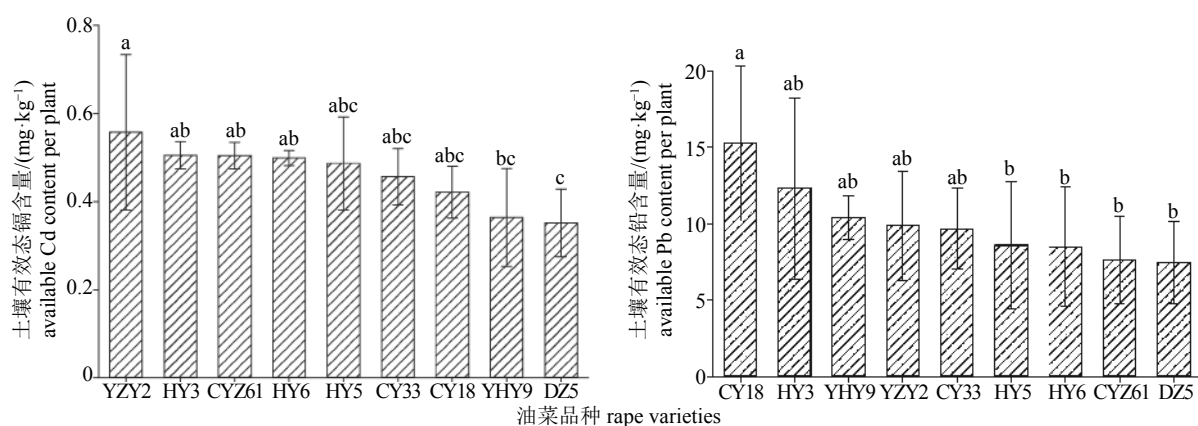


图6 9个品种油菜根际土壤有效态镉、铅含量

Fig. 6 The available Cd and Pb contents in the rhizosphere soil of nine rape varieties

2.7 相关性分析

相关分析表明:油菜根尖数与地上部、地下部镉含量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 根体积与地上部铅累积量呈显著正相关 ($P<0.05$) (表4)。

此外,油菜根际土壤有效态铅含量与地下部铅含量呈极显著正相关 ($r=0.935$, $P<0.01$), 与地下部铅累积量呈显著正相关 ($r=0.701$, $P<0.05$), 与植株对铅的富集系数和转移系数均不存在相关

性。根际有效态镉含量与油菜地上部分镉累积量呈显著负相关 ($r=-0.585$, $P<0.05$), 与植株对镉的富集系数呈显著负相关 ($r=-0.760$, $P<0.05$), 与镉转移系数呈显著正相关 ($r=0.691$, $P<0.05$)。

表 3 9 个品种油菜镉、铅富集系数与转移系数
Tab. 3 The enrichment factor and transfer coefficient of Cd and Pb in nine rape varieties

品种 varieties	镉富集系数 Cd enrichment factor	镉转移系数 Cd transfer coefficient	铅富集系数 Pb enrichment factor	铅转移系数 Pb transfer coefficient
YHY9	15.24	0.05	0.55	0.14
CY33	11.43	0.06	0.48	0.30
YZY2	3.97	0.13	1.00	0.06
HY6	13.45	0.07	0.38	0.38
CY18	11.83	0.09	0.72	0.04
DZ5	12.45	0.05	0.82	0.10
CYZ61	12.45	0.08	0.88	0.10
HY3	6.73	0.13	0.28	0.12
HY5	7.20	0.08	1.14	0.06

表 4 9 个品种油菜根系形态与植株镉/铅含量、累积量的相关性
Tab. 4 The correlation between root morphology and Cd/Pb content, accumulation in nine rape varieties

根系形态 root morphology	地上部/(mg·kg ⁻¹) aboveground part				地下部/(mg·kg ⁻¹) underground part			
	镉含量 Cd content	镉累积量 Cd accumulation	铅含量 Pb content	铅累积量 Pb accumulation	镉含量 Cd content	镉累积量 Cd accumulation	铅含量 Pb content	铅累积量 Pb accumulation
根长 root length	0.228	0.149	-0.111	0.207	0.209	0.112	-0.009	-0.077
根表面积 root surface area	0.012	0.123	-0.288	0.039	0.039	0.264	0.134	0.037
根体积 root volume	0.010	0.229	0.188	0.361*	-0.038	0.152	0.065	-0.043
根尖数 root tips number	0.715**	0.014	0.176	0.182	0.534**	-0.013	0.067	-0.172

3 讨论

3.1 作物根系形态与重金属累积品种差异的关系

一方面, 土壤重金属污染对作物产生的毒害作用, 首先会表现在根系生长与形态的改变上^[12], 并与土壤重金属浓度有关。根系作为吸收水分、矿物元素的关键部位, 根系形态的改变会影响根系对镉的吸收。研究表明: 重金属胁迫下根系形态变化是植物根系对重金属适应的重要方式, 植物体内镉的积累量与根系形态、大小密切相关。低浓度重金属对植物根系侧根生长有一定的促进作用, 但随着重金属浓度增加, 高浓度重金属抑制植物根系生长^[20]。当土壤环境中存在高浓度的重金属, 就会对根系产生毒害作用, 通常会抑制主根和侧根的生长^[21], 从而导致根系生物量、根长、根表面积、根体积、根尖数等指标下降, 而根系平均直径有所增加^[13-22], 显著影响作物根系的生长与形态特征。

另一方面, 根系形态对作物吸收累积重金属

也存在显著的影响, 不同的根系形态直接影响作物获取土壤重金属的能力^[23]。本试验中, 油菜根尖数与地上部、地下部镉含量呈极显著正相关, 根体积与地上部铅累积量呈显著正相关。这之前报道的油菜^[10]、冬小麦^[15]、薤菜^[24]等作物地上部镉含量及累积量与根长、根表面积、根体积呈显著或极显著正相关的结论类似。但有研究表明: 冬小麦品种新麦 9817 和洛优 9909 植株体内镉累积量与根长、根表面积、根体积呈极显著负相关^[15]。BERKELAAR 等^[25]的研究也证明了硬质小麦籽粒镉高累积品种 Kyle 的根表面积、根尖数低于镉低累积品种 Arcola, 其原因可能与不同作物及品种对重金属胁迫的根系响应差异有关。不同油菜品种的根系对重金属胁迫的响应不同, 这是由品种特性差异决定的。

3.2 作物重金属累积的品种差异与根系机理

油菜属于十字花科作物, 相对于其他作物, 具有较强的铅吸收和累积能力。盆栽条件下, 油菜具有强吸收和积累镉、铅的能力, 植株地上部

镉、铅的积累量高于地下部,表现出富集特征,且镉在油菜中的转运系数高于铅的转运系数^[26]。本试验中,根箱种植油菜植株的镉、铅含量为地下部>地上部。大田条件下,在湖北省大冶矿区周边重金属农田,油菜植株镉、铅含量范围变化幅度较大,各部位含量为根>茎叶>籽粒,地下部镉和铅含量的最大值为1.06和13.75 mg/kg^[7];在湖南郴州市某尾矿区,甘蓝型油菜叶中镉的含量最高为7.7 mg/kg,地下部镉含量在2~5 mg/kg;地下部铅含量为226.5~251.0 mg/kg,远高于地上部^[8]。因大田与盆栽试验,在水肥供应、根系生长空间、气候等环境因素差异大,导致大田油菜植株重金属含量与盆栽试验存在明显的差异性,往往大田油菜植株镉、铅的含量低于盆栽试验得到的结果。所以,盆栽试验得到的油菜重金属累积方面的结果,还需要进一步开展大田试验进行验证。

根系是作物从污染土壤吸收重金属的主要器官,其形态与作物重金属吸收累积存在密切的关系。大的根长、根表面积、根体积和根尖数等根系形态特征,不仅有助于提高作物根系与土壤的接触面积,促进作物根系吸收土壤中的矿质养分^[27],而且也可能促进作物对土壤重金属的吸收累积。如与高累积镉的蔬菜品种相比,低累积镉的蔬菜品种根系根长、平均直径、根表面积及根体积均较低^[28]。作物根系中的须根生理活性强,具有较强的吸收能力,须根数量高的花生品种具有高吸收和累积重金属的特点^[23]。因此,不同重金属积累特性的作物品种根系形态的差异,被认为是作物品种重金属累积差异的主要机理之一。

此外,作物根系吸收和木质部转运能力,很大程度上决定了地上部镉的含量与累积量。不同镉累积能力的油菜根系吸收和转运能力存在明显品种差异,如吸收镉能力强的油菜品种朱苍花籽地上部镉主要转运至叶中,而低吸收镉的油菜品种川油Ⅱ-93则主要转运至茎中^[29]。油菜镉吸收和累积的品种差异与根系吸收和木质部转运镉相关蛋白编码基因的表达密切相关,如油菜品种L338相比于品种L351具有较强根系镉吸收能力,在于L338根系IRT1(铁转运蛋白)基因的表达较高;而品种L351根中P_{1B}-ATP酶基因家族中的HMA2和HMA4基因表达更强,导致镉更多的转移至该品种的地上部^[30]。另一方面,镉在油

菜地上部的累积还与蒸腾速率等因素有关,油菜的蒸腾速率在不同品种间差异较大,蒸腾速率与油菜地上部镉含量及累积量呈极显著正相关,表明高蒸腾强度有利于镉随蒸腾流通过木质部导管向地上部迁移,从而增加地上部的镉含量^[10]。

因此,作物对重金属的吸收和累积能力,受品种基因型和环境因素的共同影响。需要从根系形态、根系重金属吸收转运能力、蒸腾作用等方面综合考虑,筛选重金属低富集的作物品种^[31],并通过施用钝化剂、抗蒸腾剂、拮抗剂等农艺措施^[32],减小作物对重金属的吸收,降低重金属从作物地下部向地上部的迁移,减少地上部可食部分重金属的累积量,提高金属矿区周边等重金属污染农田生产的农作物产品质量安全,对于中国当前严峻的农田土壤重金属污染问题,具有重要的理论和实践意义。

4 结论

9个油菜根系形态和植株镉铅累积存在明显的品种差异,且根系形态(根体积和根尖数)与植株镉含量、铅累积量间的关系密切,表明油菜根系形态在影响植株镉铅累积中起着重要作用。

[参考文献]

- [1] LI Z A, 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]. The Science of the Total Environment, 2014, 468/469: 843. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.090.
- [2] HE B, ZHAO J Y, JIAN B S, et al. Research progress of heavy metal pollution in China: sources, analytical methods, status, and toxicity[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(2): 134. DOI: 10.1007/s11434-012-5541-0.
- [3] ZHANG X Y, ZHONG T Y, LIU L, et al. Impact of soil heavy metal pollution on food safety in China[J]. PLoS One, 2015, 10(8): e0135182. DOI: 10.1371/journal.pone.0135182.
- [4] CLEMENS S, JIAN F M. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods[J]. Institute of Plant Science and Resources, 2016, 67(1): 489. DOI: 10.1146/annurev-arplant-043015-112301.
- [5] 陈建军, 于蔚, 祖艳群, 等. 玉米(*Zea mays*)对镉积累与转运的品种差异研究[J]. 生态环境学报, 2014(10): 1671. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.10.016.
- [6] 王俊丽, 任建国. 镉在不同类型蔬菜(*Ipomoea aquatica* Forsk.)中的积累及其化学形态和分子分布[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1594.
- [7] 孙清斌, 尹春芹, 邓金锋, 等. 大冶矿区周边农田土壤和

- 油菜重金属污染特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 85.
- [8] 杨洋, 黎红亮, 陈志鹏, 等. 郴州尾矿区不同油菜品种对重金属吸收积累特性的比较[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(4): 370. DOI: [10.13254/j.jare.2014.0210](#).
- [9] 王激清, 张宝悦, 苏德纯. 修复镉污染土壤的油菜品种的筛选及吸收累积特征研究—高积累镉油菜品种的筛选(II)[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2005, 21(2): 35. DOI: [10.3969/j.issn.1673-1492.2005.01.016](#).
- [10] 高茜蕾, 郑瑞伦, 李花粉. 蒸腾作用及根系特征对不同品种油菜吸收镉的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1794.
- [11] 宋海星, 刘强, 荣湘民, 等. 不同品种油菜氮效率差异及其成因分析[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 159. DOI: [10.3321/j.issn:1009-2242.2007.05.037](#).
- [12] 王一喆, 王强. 镉对植物根系的毒害作用[J]. 广东微量元素科学, 2008, 15(4): 1. DOI: [10.3969/j.issn.1006-446X.2008.04.001](#).
- [13] 何俊瑜, 王阳阳, 任艳芳, 等. 镉胁迫对不同水稻品种幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1863. DOI: [10.3969/j.issn.1674-5906.2009.05.049](#).
- [14] 陈伟, 张苗苗, 宋阳阳, 等. 重金属离子对2种草坪草荧光特性及根系形态的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(3): 333. DOI: [10.11686/cyxb20140339](#).
- [15] 肖亚涛, 吴海卿, 李中阳, 等. 不同基因型冬小麦镉累积差异及其与根系形态的关系[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 276. DOI: [10.13870/j.cnki.stbcxb.2015.06.048](#).
- [16] 李敬伟, 湛方栋, 何永美, 等. 云南会泽铅锌矿区土壤理化与生物学性质[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(5): 906. DOI: [10.3724/SP.J.1145.2014.01047](#).
- [17] WEN H J, ZHANG Y X, CLOQUET C, et al. Tracing sources of pollution in soils from the Jinding Pb-Zn mining district in China using cadmium and lead isotopes[J]. Applied Geochemistry, 2015, 52: 147. DOI: [10.1016/j.apgeochem.2014.11.025](#).
- [18] 李文杰, 方正, 贾志国. 丽格海棠无土栽培营养液配方的筛选[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2007, 23(2): 30. DOI: [10.3969/j.issn.1673-1492.2007.02.010](#).
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] LUX A, MARTINKA M, VACULÍK M, et al. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(1): 21. DOI: [10.1093/jxb/erq281](#).
- [21] HUANG B F, XIN J L, DAI H W, et al. Root morphological responses of three hot pepper cultivars to Cd exposure and their correlations with Cd accumulation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(2): 1151. DOI: [10.1007/s11356-014-3405-7](#).
- [22] 李希铭, 宋桂龙. 镉胁迫对紫花苜蓿镉吸收特征及根系形态影响[J]. 草业学报, 2016, 25(2): 178. DOI: [10.11686/cyxb2015401](#).
- [23] KELLER C, HAMMER D, KAYSER A, et al. Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: comparison of different plant species in the field[J]. Plant and Soil, 2003, 249(1): 67. DOI: [10.1023/A:1022590609042](#).
- [24] 龚玉莲, 杨中艺. 蕹菜典型品种的根系形态学特征及与Cd吸收积累的关系[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2012, 44(3): 100. DOI: [10.6054/j.jscn.2012.06.022](#).
- [25] BERKELAAR E, HALE B. The relationship between root morphology and cadmium accumulation in seedlings of two durum wheat cultivars[J]. Canadian Journal of Botany, 2000, 78(3): 381. DOI: [10.1139/cjb-78-3-381](#).
- [26] 林昕, 高建培. 油菜对镉、铅复合污染土壤修复潜力的研究[J]. 大理学院学报, 2010, 9(4): 76. DOI: [10.3969/j.issn.1672-2345.2010.04.020](#).
- [27] LU Z W, ZHANG Z, SU Y, et al. Cultivar variation in morphological response of peanut roots to cadmium stress and its relation to cadmium accumulation[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 91(4): 147. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2013.01.017](#).
- [28] 龚玉莲, 杨中艺. 蕹菜不同镉积累品种的根际土壤化学特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2377.
- [29] 向丹, 焦卫平, 苏德纯. 不同吸镉能力油菜各器官累积镉的差异[J]. 中国油料作物学报, 2009, 31(1): 29. DOI: [10.3321/j.issn:1007-9084.2009.01.006](#).
- [30] WU Z C, ZHAO X H, SUN X C, et al. Xylem transport and gene expression play decisive roles in cadmium accumulation in shoots of two oilseed rape cultivars (*Brassica napus*)[J]. Chemosphere, 2015, 119: 1217. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2014.09.099](#).
- [31] ASHRAFZADEH S, LEUNG D W. Development of cadmium-safe crop cultivars: a mini review[J]. Journal of Crop Improvement, 2016, 30(2): 107. DOI: [10.1080/15427528.2015.1134743](#).
- [32] BOLAN N, KUNHIKRISHNAN A, THANGARAJAN R, et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils-to mobilize or to immobilize?[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 266(4): 141. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2013.12.018](#).

责任编辑: 何承刚