

中文核公期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

## 磷灰石、石灰对Cd胁迫下黑麦草根形态及Cd吸收影响研究

杜志敏, 向凌云, 杜凯敏, 杨文玲, 王继雯, 雷高, 郭雪白, 郭亮, 周静, 巩涛, 陈国参, 甄静

引用本文:

杜志敏,向凌云,杜凯敏,等.磷灰石、石灰对Cd胁迫下黑麦草根形态及Cd吸收影响研究[J].农业环境科学学报,2021,40(1): 92-101.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0376

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

EDTA与耐性细菌对黑麦草吸收复合污染红壤中铅镉的影响

史鼎鼎,梁小迪,徐少慧,蒋代华,黄智刚 农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1634-1641 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1349

石灰与黑麦草对Cu污染土壤的修复及对微生物群落的影响

杜志敏, 郭雪白, 王继雯, 岳丹丹, 周静, 巩涛, 杨文玲, 甄静, 慕琦, 陈国参 农业环境科学学报. 2017, 36(3): 515-521 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1297

## 黑麦草与丛枝菌根对大田番茄抗性及Cd吸收的影响

秦余丽, 江玲, 徐卫红, 李桃, 张春来, 李彦华, 王卫中, 迟荪琳, 陈序根, 陈永勤, 赵婉伊, 张进忠, 熊治廷 农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1053-1061 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1515

黑麦草对铀胁迫的光合响应及铀吸收特性研究

赵继武, 罗学刚, 王焯, 黄强 农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2456-2464 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0235

保水剂对土壤重金属镉形态及生物有效性的影响

秦端端,姚粉霞,陈亚军,徐冰,周燕,赵海涛,王小治,封克 农业环境科学学报.2016,35(12):2327-2333 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0972



关注微信公众号,获得更多资讯信息

杜志敏,向凌云,杜凯敏,等.磷灰石、石灰对Cd胁迫下黑麦草根形态及Cd吸收影响研究[J].农业环境科学学报,2021,40(1):92-101.

DU Zhi-min, XIANG Ling-yun, DU Kai-min, et al. Effects of apatite and lime on root morphology and cadmium uptake by ryegrass under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1): 92–101.



## 磷灰石、石灰对Cd胁迫下黑麦草根形态 及Cd吸收影响研究

杜志敏<sup>1,2</sup>, 向凌云<sup>1</sup>, 杜凯敏<sup>3</sup>, 杨文玲<sup>1</sup>, 王继雯<sup>1</sup>, 雷高<sup>1</sup>, 郭雪白<sup>4</sup>, 郭亮<sup>3</sup>, 周静<sup>5</sup>, 巩涛<sup>1</sup>, 陈国参<sup>1</sup>, 甄静<sup>1\*</sup>

(1.河南省科学院生物研究所有限责任公司,郑州 450008;2.河南工业大学环境工程学院,郑州 450001;3.河南省河川工程监理 有限公司,郑州 450000;4.河南水利与环境职业学院,郑州 450008;5.中国科学院南京土壤研究所,南京 210008)

摘 要:为考察磷灰石、石灰和黑麦草对 Cd 污染土壤的修复效果,通过盆栽试验研究了不同剂量磷灰石(0,6、12、24 g·kg<sup>-1</sup>风干 土,编号为 CK、L1、L2、L3)和石灰(1、2、4 g·kg<sup>-1</sup>风干土,编号为 S1、S2、S3)对 Cd 胁迫下黑麦草生物量、根形态、黑麦草 Cd 含量、Cd 富集量、富集系数、土壤 pH、土壤有效态 Cd 含量等的影响。结果表明,磷灰石、石灰处理(L1,S1 除外)显著增加了黑麦草生物量、 根长、根表面积、根体积、根尖数、Cd 富集量和土壤 pH,显著降低了黑麦草 Cd 含量、Cd 富集系数、根平均直径和土壤有效态 Cd 含 量。相关性分析结果表明:除根平均直径为正相关关系外,黑麦草根长、根表面积、根体积、根尖数与土壤有效态 Cd 含 量。d 关性分析结果表明:除根平均直径为正相关关系。其中,L3 处理黑麦草地上部分及根系生物量达到 CK 处理(不添加改良剂)的 176.0 倍和 174.4 倍;根平均直径相比 CK 降低了 29.4%,根长、根表面积、根体积和根尖数分别为 CK 处理的 20.2、21.0、21.3 倍和 24.5 倍;黑麦草地上部分及根系 Cd 富集量达到 CK 处理的 89.6 倍和 100.9 倍。研究表明,根形态受土壤有效态 Cd 含量的影响显 著,并可通过影响黑麦草生物量及 Cd 吸收决定其 Cd 富集量,施用 24 g·kg<sup>-1</sup>的磷灰石并种植黑麦草能很好地修复 Cd 污染土壤。 关键词:Cd;黑麦草;根形态;Cd 吸收;磷灰石;石灰

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)01-0092-10 doi:10.11654/jaes.2020-0376

#### Effects of apatite and lime on root morphology and cadmium uptake by ryegrass under cadmium stress

DU Zhi-min<sup>1,2</sup>, XIANG Ling-yun<sup>1</sup>, DU Kai-min<sup>3</sup>, YANG Wen-ling<sup>1</sup>, WANG Ji-wen<sup>1</sup>, LEI Gao<sup>1</sup>, GUO Xue-bai<sup>4</sup>, GUO Liang<sup>3</sup>, ZHOU Jing<sup>5</sup>, GONG Tao<sup>1</sup>, CHEN Guo-can<sup>1</sup>, ZHEN Jing<sup>1\*</sup>

(1.Institute of Biology Co. Ltd., Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450008, China; 2.School of Environmental Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 3.Henan Hechuan Construction Supervision Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China;
4. Henan Vocational College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou 450008, China; 5. Institute of Soil Science, Chinese Academy Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract**: A pot experiment was conducted to test the remediation effects in Cd contaminated soil by applying apatite (CK, L1, L2, and L3 at dosages of 0, 6, 12, and 24  $g \cdot kg^{-1}$ , respectively) and lime (S1, S2, and S3 at dosages of 1, 2, and 4  $g \cdot kg^{-1}$ , respectively). The biomass,

收稿日期:2020-04-03 录用日期:2020-08-04

作者简介:杜志敏(1985—),女,河南武陟人,博士研究生,助理研究员,主要从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:duzhimin324@163.com

<sup>\*</sup>通信作者:甄静 E-mail:13629843529@163.com

**基金项目**:国家自然科学基金项目(32001206, 31800361);河南省重点研发与推广专项(212102310227);河南省科学院科研开发专项(210605007, 210905004, 200605005, 190305003)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (32001206, 31800361); Key Research and Development and Promotion Projects in Henan Province (212102310227); The Research and Development Project of Henan Academy of Sciences (210605007, 210905004, 200605005, 190305003)

root morphology, Cd concentration and accumulation, bioaccumulation factors, soil pH, and available Cd content in soil were measured. The results showed that apatite and lime(except L1 and S1) significantly increased soil pH, biomass, and root length, surface area, volume, tips number, and Cd accumulation in ryegrass, but significantly decreased Cd concentration, bioaccumulation factors, average root diameter, and soil Cd availability. Correlation analysis showed that the root length, surface area, volume, and tips number (root average diameter), had significant negative (posivive) linear correlations with the available Cd content in soil, Cd concentration, and bioaccumulation factors in ryegrass, while these had significant positive (negative) linear correlations with aboveground and root biomass and Cd accumulation in ryegrass. Compared to controls, L3 increased the aboveground and root biomass of ryegrass by 176.0 and 174.4 times; decreased the average root diameter by 29.4%; increased the root length, surface area, volume, and tips number by 20.2, 21.0, 21.3, and 24.5 times, respectively; and increased Cd accumulation in the aboveground parts and the root by 89.6 and 100.9 times, respectively. In general, root morphology could significantly be affected by the availability of Cd in soil, which in turn affects the biomass and uptake of Cd, and also determines the Cd accumulation in ryegrass. Thus, combining apatite at a dosage of 24 g·kg<sup>-1</sup> with ryegrass could effectively remediate Cd–contaminated soil.

Keywords: Cd; ryegrass; root morphology; Cd uptake; apatite; lime

随着城市化、工业化进程加快及农业集约化的发 展,土壤重金属污染问题日益加剧,严重危害食品安 全并威胁人类健康,已成为影响我国社会、经济发展 的重要环境问题。Cd是人体非必需营养元素,具有 致癌、致畸和致突变作用,会造成骨骼病变、肾功能损 伤、肝肾和肺机能不全、遗传及免疫系统等损伤,并诱 发多种癌症[1-3]。众所周知的公害病"痛痛病"就是由 于日本当地居民长期食用"镉米"和饮用含Cd的水而 引起的疾病<sup>[4]</sup>。2014年我国原环境保护部和原国土 资源部公布的《全国土壤污染状况调查公报》指出,全 国土壤总超标率为16.1%,污染类型以无机型为主, 其中Cd的点位超标率达到7.0%,超标率为无机污染 物之首,Cd污染土壤的治理和修复工作迫在眉睫。 相对于重金属污染土壤的物理修复和化学修复,利用 富集植物将重金属从土壤中提取出来的植物修复技 术表现出许多优势,如修复成本低、环境扰动小、不破 坏土壤结构、二次污染少或无二次污染、利于污染区 域景观恢复、适用于大面积重金属污染场地修复 等15]。而重金属污染严重区域,植物生长因受到重金 属胁迫常表现出生长缓慢、生物量低等症状,因此,将 生物修复与化学修复相结合的联合修复技术受到研 究者推崇,以期通过此方法快速、高效治理重金属污 染土壤。

黑麦草是Cd、Zn等重金属的富集植物,虽然其吸收重金属的能力不如超积累植物,但其拥有先锋植物特性,生长快、生物量大、再生能力强、易于种植、抗病虫害能力强、对重金属Cd、Zn等有很强的抗性和蓄积作用,因此常作为修复植物被用于重金属污染土壤的修复研究<sup>16-71</sup>。根系作为植物与土壤直接接触的器

官,是植物体吸收和代谢营养物质及毒性物质的器官,一方面植物根系形态会受到环境变化的影响,表现出很好的发育可塑性<sup>[8]</sup>;另一方面根系形态结构影响着植物对 Cd 的吸收和木质部装载,进而影响 Cd 在植物组织中的积累<sup>[9-10]</sup>。Cd 胁迫引起的根损伤可能与其抑制酶活性相关,主要表现为损伤根尖细胞核、抑制核糖核酸酶活性、改变 RNA 合成;抑制植物根部 Fe<sup>3+</sup>还原酶活性,导致植物 Fe<sup>2+</sup>缺乏;抑制根部硝酸还原酶活性,减少根部对硝酸盐的吸收及向地上部的转运<sup>[11]</sup>。

植物根系形态、生长和空间分布直接决定着植物 对重金属的吸收能力及效率。植物在Cd胁迫下积累 过量重金属后,根系生长会受到抑制,从而降低植物 对Cd的吸收能力<sup>[9,12]</sup>。王效瑾等<sup>[13]</sup>研究发现,在高浓 度Cd处理下,小麦幼苗的根长、根体积和总根尖数降 低,但根系平均直径逐渐增加。夏雪姣等四研究指 出,Cd浓度升至40 mg·L<sup>-1</sup>时,小麦根的生长受到强烈 抑制,中育10号根长下降69%,洛麦23根长下降 80%。Ostonen 等[15]研究发现花生在Cd胁迫下,其根 长、根表面积、根体积和总根尖数均下降,根系平均直 径增加。植物根尖是重要的吸收部位,土壤有效态 Cd含量高的对照处理,黑麦草根尖数量最低,表明黑 麦草根系侧根形成受Cd胁迫的抑制,这是植物对Cd 胁迫的重要响应[10.14]。冯汉青等[16]研究发现,小麦幼 苗水培条件下加入Cd会导致小麦幼根根长降低,鲜 质量及干质量下降。研究植物根系对重金属Cd胁迫 的响应对于揭示植物抵抗重金属胁迫机理具有重要 意义。目前,根形态受Cd胁迫影响的研究多为人工 添加Cd的水培或土培试验,但条件更为复杂的原位 Cd污染土壤研究较少。本研究针对目前严峻的土壤 Cd污染形势,通过盆栽试验研究磷灰石、石灰对Cd 胁迫下黑麦草生长、根形态、Cd含量、Cd富集量和Cd 富集系数等的影响,研究黑麦草根系对Cd胁迫的响 应及根形态对黑麦草吸收和转运Cd的影响,为植物 修复技术顺利开展提供理论与技术支持。

## 1 材料与方法

## 1.1 供试材料

供试土壤:土壤样品采集自江西省贵溪市某冶炼 厂周边的污染农田,该处田块因重金属污染严重已经 废弃数年,土壤沙化及酸化严重。去除土壤表层枯枝 落叶等杂物,采集 0~20 cm 的表层土壤,带回实验室 后备用。土壤样品自然风干后,一部分用于后期盆栽 试验,一部分用于土壤理化性质检测。土样基本理化 指标如下:土壤 pH(土水质量比1:2.5)5.60;容重  $1.32 \text{ g·cm}^3;$ 有机质1.62 g·kg<sup>-1</sup>;全氮 0.88 g·kg<sup>-1</sup>;有效 磷 66.90 mg·kg<sup>-1</sup>;速效钾 45.10 mg·kg<sup>-1</sup>;全 Cd 8.24 mg·kg<sup>-1</sup>;全 Hg 0.06 mg·kg<sup>-1</sup>;全 As 32.30 mg·kg<sup>-1</sup>;全 Pb 60.21 mg·kg<sup>-1</sup>;全 Cr 11.86 mg·kg<sup>-1</sup>。参照《土壤环 境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),土壤 Hg、As、Pb、Cr含量均低于农用地 土壤污染风险筛选值,而 Cd 含量达到农用地土壤污 染风险管制值(5.5<pH<6.5,2.0 mg·kg<sup>-1</sup>)的4.12倍。

供试改良剂:石灰购自郑州建材大市场,pH12.4, Cd含量0.16 mg·kg<sup>-1</sup>,粒径0.25 mm。磷灰石购自郑 州建材大市场,pH8.2,Cd含量0.07 mg·kg<sup>-1</sup>,粒径 0.16 mm。供试肥料:河南"心连心"牌复合肥(总养分 45%,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O各为15%)购自河南省新乡市心连 心化肥有限公司。供试植物:重金属富集植物黑麦草 (*Lolium perenne* L.)购自河南秋乐种业科技股份有限 公司。

#### 1.2 试验设计

试验共设置7个处理,每个处理设置3次重复。 不添加改良剂的对照处理记为CK,添加低、中、高剂 量磷灰石(磷灰石占风干土壤质量比分别为6、12、24 g·kg<sup>-1</sup>)的处理分别记为L1、L2、L3,添加低、中、高剂 量石灰(石灰占风干土壤质量比分别为1、2、4g·kg<sup>-1</sup>) 的处理分别记为S1、S2、S3。

土样自然风干后过2mm尼龙筛,选取直径32 cm、高23cm的塑料花盆进行盆栽试验。每盆称取 (4.00±0.05)kg风干土,3.0g复合肥,施入相应剂量磷 灰石和石灰后充分混匀。浇水至田间持水量的70%, 根据土壤干湿情况浇水并平衡2周。每盆均匀种植 100粒黑麦草种子,覆土厚度0.5 cm左右。此后根据 土壤干湿情况适时浇水,保持每盆浇水量一致。待黑 麦草生长至刚抽穗时,分地上和根系两部分采集植物 样品,并采集根际土壤样品,装入无菌自封袋带回实 验室进行相应分析。植物样品按照杜志敏等<sup>101</sup>的方 法进行处理,测定黑麦草地上部分、根系干质量和Cd 含量,土壤样品风干后过尼龙筛,测定其pH和Cd含 量。

#### 1.3 样品分析

在黑麦草生长至刚抽穗时(黑麦草播种后45 d), 采集植物样品,用去离子水冲洗干净后沥干水,取一 部分植物样品置于烘箱中105 ℃杀青30 min,70 ℃烘 干至恒质量,分别称量黑麦草地上部分和根系干质 量。黑麦草根系样品尽可能完整采集,用去离子水冲 洗干净,吸水纸吸干根系表面水分,均匀铺开,使用 EPSON全自动根系扫描仪(Seiko Epson,日本)扫描根 系,用WinRHIZO PRO 2009(Regent,加拿大)根系图 像分析软件分析获得黑麦草根平均直径、根长、根尖 数、根表面积和根体积等指标。土壤有效态Cd含量、 黑麦草 Cd含量按鲁如坤<sup>1181</sup>的方法提取,并用原子吸 收分光光度计(Hitachi z2000)测定。

Cd 在植物体内由根系向地上部分转运的转运系数、富集系数计算公式分别为:

转运系数=植物地上部分Cd含量 $(mg \cdot kg^{-1})/植物$ 根系Cd含量 $(mg \cdot kg^{-1})$ 

地上部分Cd富集系数=地上部分Cd含量(mg·kg<sup>-1</sup>)/土壤Cd含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

根系 Cd 富集系数=根系 Cd 含量(mg·kg<sup>-1</sup>)/土壤 Cd 含量(mg·kg<sup>-1</sup>)。

#### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 对相关试 验数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

#### 2.1 磷灰石、石灰对黑麦草生物量的影响

CK处理黑麦草出芽率低,出苗5d后,大部分幼 苗枯萎变黄,表现出中毒症状。Cd污染土壤施入磷 灰石和石灰后,黑麦草生物量有不同程度增加,结果 如图1所示。黑麦草地上部分及根系生物量增加幅 度均随着磷灰石和石灰添加剂量的增加而增大,L2 处理黑麦草根系生物量达到CK的38.6倍,L3处理黑 麦草地上部分和根系生物量分别达到CK的176.0倍







Figure 1 Effects of apatite and lime on the biomass of ryegrass

和174.4倍,S2、S3处理地上部分生物量分别达到CK的72.2倍和130.2倍,S1、S2、S3处理根系生物量分别达到CK的53.3、80.1、154.8倍,且均与CK达到显著差异水平。

## 2.2 磷灰石、石灰对黑麦草根形态的影响

磷灰石和石灰处理后黑麦草根系形态变化情况 如图 2 所示。与 CK 相比,黑麦草根系平均直径显著 降低,根长、根尖数、根表面积和根体积有不同程度增 加。L2、L3、S2、S3处理黑麦草根长均显著高于 CK 处 理,分别是 CK 的 6.7、20.2、15.2、15.4 倍。中、高剂量 磷灰石和石灰处理黑麦草根尖细胞分裂增多,根尖数 显著增加,其中 L3处理根尖数显著高于其他处理,达 到 CK 处理的 24.5 倍。L3 处理黑麦草根表面积和根



Figure 2 Effects of apatite and lime on root morphology of ryegrass

体积均最高,与CK相比显著增加了21.0倍和21.3倍, 与其他6种处理均达到显著差异。

黑麦草生物量与根形态指标的相关性分析如表 1所示。黑麦草地上部分和根系生物量呈极显著正 相关关系,相关系数为0.979;黑麦草地上部分和根系 生物量与根长、根表面积、根体积、根尖数均呈极显著 正相关关系,与根平均直径呈极显著负相关关系;黑 麦草根长、根表面积、根体积和根尖数4种根形态指 标两两之间均呈极显著正相关关系;黑麦草根平均 直径与根长、根表面积、根体积、根尖数均呈极显著负 相关关系,相关系数分别为-0.746、-0.693、-0.651 和-0.805。

## 2.3 磷灰石、石灰对黑麦草不同部位Cd含量的影响

由图3可知,磷灰石和石灰处理不同程度地降低 了黑麦草地上部分和根系的Cd含量。与CK相比, L1、L2和L3处理黑麦草地上部分Cd含量分别下降了 36.4%、46.1%和47.1%,L2和L3处理黑麦草根系Cd 含量分别下降了29.3%和41.9%,均与CK达到显著 差异水平;S2和S3处理黑麦草地上部分Cd含量分别 下降了28.2%和36.5%,S1、S2和S3处理黑麦草根系 Cd含量分别下降了22.5%、31.5%和42.1%,均与CK 达到显著差异水平。

## 2.4 磷灰石、石灰对黑麦草Cd富集量的影响

磷灰石、石灰对黑麦草地上部分和根系Cd富集量的影响如图4所示。CK处理地上部分和根系Cd富集量均最低,施入磷灰石和石灰后Cd富集量有不同程度提高。与CK相比,L2和L3处理黑麦草地上部分Cd富集量分别增加了20.8倍和89.6倍,根系Cd富集量分别增加了27.1倍和100.9倍,均达到显著差异水平;S1、S2和S3处理黑麦草地上部分Cd富集量分别增加了37.3、51.0倍和79.8倍,根系Cd富集量分别增加了41.5、55.3倍和89.3倍,均达到显著差异水平。

黑麦草 Cd 富集量与干质量、Cd 含量的相关性分析结果如表2所示,黑麦草地上部分与根系 Cd 富集量呈极显著正相关关系,相关系数为0.980。黑麦草地上部分和根系Cd 富集量与地上部分和根系干质量

表1 黑麦草生物量与根形态指标的相关性分析

Table 1	Correlation	analysis	hotwoon	hiomaga	and root	morphology	of	miograd
rable r	Correlation	anarysis	between	DIOMASS	and root	morphology	01	ryegrass

		2			1 05 5	0	
相关系数 Correlation index	地上部分生物量 Aboveground biomass	根系生物量 Root biomass	根长 Root length	根表面积 Root surface area	根体积 Root volume	根尖数 Root tips number	根平均直径 Root average diameter
地上部分生物量	1						
根系生物量	0.979**	1					
根长	0.890**	0.884**	1				
根表面积	0.890**	0.867**	0.988**	1			
根体积	0.874**	0.857**	0.959**	0.984**	1		
根尖数	0.799**	0.785**	0.945**	0.941**	0.927**	1	
根平均直径	-0.631**	-0.669**	-0.746**	-0.693**	-0.651**	-0.805**	1

注:n=21,\*表示P<0.05水平显著相关,\*\*表示P<0.01水平上极显著相关。下同。

Note: n=21, \* and \*\* indicate significant correlation at P<0.05 and P<0.01 level, respectively. The same below.











Figure 4 Effects of apatite and lime on Cd accumulation

of ryegrass

2021年1月

#### 表2 黑麦草Cd富集量与黑麦草干质量、Cd含量的相关性分析

Table 2 Correlation analysis among Cd accumulation and biomass, root morphology of ryegrass

相关系数 Correlation index	地上部分Cd富集量 Aboveground Cd accumulation	根系 Cd 富集量 Root Cd accumulation	地上部分干质量 Aboveground biomass	根系干质量 Root biomass	地上部分 Cd 含量 Aboveground Cd concentration	根系 Cd 含量 Root Cd concentration
地上部分Cd富集量	1	0.980**	0.967**	0.982**	-0.403	-0.840**
根系Cd富集量	0.980**	1	0.962**	0.986**	-0.475*	-0.810**

均呈极显著正相关关系,与黑麦草根系Cd含量均呈极显著负相关关系。

## 2.5 磷灰石、石灰对土壤有效态 Cd含量及 pH 变化的 影响

本试验结束时 CK 和磷灰石、石灰处理土壤 Cd 全量大小范围为 7.98~8.24 mg·kg<sup>-1</sup>,且不同处理间无显著差异(数据未列出)。磷灰石、石灰对土壤有效态 Cd 含量及 pH 的影响如图 5 所示。CK 处理土壤有效态 Cd 含量为 6.89 mg·kg<sup>-1</sup>,施入磷灰石、石灰后土壤有效态 Cd 含量出现不同程度降低。与 CK 相比,L1、L2 和 L3 处理土壤有效态 Cd 含量分别降低了 15.8%、27.2% 和 36.9%,S1、S2 和 S3 处理土壤有效态 Cd 含量分别降低了 6.3%、13.0% 和 17.6%,降低幅度随添加剂量增加而增大,均与 CK 达到显著差异水平。CK 处理土壤 pH 为 4.73,施入磷灰石、石灰后土壤 pH 显著提高,磷灰石和石灰对土壤 pH 的增加幅度均随添加剂量增加而增大,其中 L3 和 S3 处理增加效果最为显著,与其他处理均达到显著差异水平。土壤有效态 Cd 含量



n=3,图中不同小写字母表示土壤有效态Cd处理间差异显著(P<0.05);不同大写字母表示土壤pH处理间差异显著(P<0.05)</li>
 n=3,the different lowercase(uppercase) letters indicate significant differences in soil available Cd content(soil pH) among treatments(P<0.05)</li>

#### 图5 磷灰石、石灰对土壤有效态Cd含量及pH的影响

Figure 5 Effects of apatite and lime on soil available Cd content and pH 表明土壤有效态Cd含量随土壤pH升高而降低。

## 2.6 黑麦草Cd转运系数和富集系数

磷灰石、石灰对黑麦草 Cd转运系数和富集系数 的影响如图 6 所示。与 CK 相比,磷灰石和石灰处理



图 6 磷灰石、石灰对黑麦草 Cd 转运系数和富集系数的影响 Figure 6 Effects of apatite and lime on translocation and

bioconcentration factors

的黑麦草 Cd转运系数无显著差异(图6A)。CK处理 黑麦草地上部分和根系 Cd富集系数均最高(图6B和 图6C),施入磷灰石和石灰后,黑麦草地上部分和根 系 Cd富集系数有不同程度降低,其中中、高剂量磷 灰石和石灰处理后地上部分和根系 Cd富集系数显著 降低。

# 2.7 土壤有效态 Cd含量、黑麦草 Cd含量、Cd富集量与根形态指标的相关性

土壤有效态 Cd 含量、黑麦草 Cd 含量、Cd 富集量 与根形态指标的相关性分析如表3所示。土壤有效 态Cd含量与黑麦草地上部分、根系Cd含量均呈极显 著正相关关系,与黑麦草地上部分、根系Cd富集量均 呈极显著负相关关系;土壤有效态Cd含量与黑麦草 根长、根表面积、根体积、根尖数均呈极显著负相关关 系,与黑麦草根平均直径呈显著正相关关系。黑麦草 地上部分和根系Cd含量与根长、根表面积、根体积、 根尖数呈显著或极显著负相关关系,与黑麦草根平均 直径呈显著或极显著正相关关系。黑麦草地上部分 和根系Cd富集量与黑麦草根长、根表面积、根体积、 根尖数均呈极显著正相关关系,与黑麦草根平均直径 均呈极显著负相关关系。黑麦草地上部分和根系Cd 富集系数与土壤有效态 Cd 含量呈极显著正相关关 系,与根长、根表面积、根体积、根尖数均呈显著或极 显著负相关关系,与黑麦草根平均直径呈显著或极显 著正相关关系。

## 3 讨论

#### 3.1 磷灰石、石灰对土壤 pH 及有效态 Cd 含量的影响

磷灰石、石灰是常见的重金属污染土壤改良剂, 作为碱性改良剂,其降低重金属毒性主要通过提高土 壤pH来实现<sup>[17,19]</sup>。首先,土壤pH增加会增强土壤中

#### 农业环境科学学报 第40卷第1期

有机/无机胶体及土壤黏粒对重金属离子的吸附能 力,使土壤及土壤溶液中活性较高的有效态和交换态 重金属离子数量减少,从而降低植物体的重金属含 量<sup>[20]</sup>:其次,土壤pH增加(OH 浓度高时),OH 易与重 金属离子形成羟基态金属离子,该形态比自由态金属 离子更易与土壤吸附位点结合<sup>[20-21]</sup>;再次,土壤pH增 加,土壤溶液OH-浓度升高,OH-易与重金属阳离子结 合并生成难溶的M(OH)。沉淀物,进而降低土壤中重 金属有效态含量。本试验结果显示,Cd污染土壤中 施入磷灰石、石灰后,土壤pH显著增加,土壤有效态 Cd含量显著降低,且土壤pH与土壤有效态Cd含量 呈极显著负相关关系,这与前人研究结果一致[22-24]。 此外,磷灰石作为常用的基肥,一方面可为植物生长 提供磷素营养,另一方面能形成磷酸盐类重金属沉 淀,从而降低土壤重金属生物有效性,最终达到促进 植物生长的目的。石灰中的Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等离子半径与 Cd<sup>2+</sup>半径接近,对Cd<sup>2+</sup>有拮抗作用,极大地影响了Cd 在土壤中的化学行为[25]。对于酸性及偏中性重金属 污染土壤而言,施加磷灰石、石灰等碱性改良剂增加 了土壤pH,能有效降低土壤有效态重金属含量,减轻 土壤重金属对植物的毒性,达到促进植物生长及增加 生物量的效果。

#### 3.2 Cd胁迫对黑麦草生长及根形态的影响

Cd是植物生长的非必需营养元素,Cd<sup>2+</sup>的高度移动性致使其极易进入植物体,累积到一定程度后会损伤细胞膜及细胞活性物质,抑制光合作用及酶活性,影响植物正常新陈代谢,对植物生长产生毒害作用<sup>[26-29]</sup>。植物生物量是表征植物生长状况最直观的指标,能反映植物受毒害程度<sup>[30]</sup>。本试验结果显示,CK处理黑麦草地上部分和根系生物量均最低,施入高剂量磷灰石、石灰后,土壤有效态 Cd 含量显著降

表3 土壤有效态Cd含量、黑麦草Cd含量、根形态指标的相关性分析

Table 3 Correl	ation analysis am	ong soil available	Cd and root	t morphol	logy , Co	l concentration of	ryegrass
----------------	-------------------	--------------------	-------------	-----------	-----------	--------------------	----------

_							
	相关系数 Correlation index	土壤有效态 Cd 含量 Soil available Cd content	根长 Root length	根表面积 Root surface area	根体积 Root volume	根尖数 Root tips number	根平均直径 Root average diameter
	土壤有效态Cd含量	1	-0.565**	-0.567**	-0.588**	-0.592**	0.539*
	土壤Cd全量	0.393	-0.189	-0.214	-0.266	-0.173	0.097
	地上部分Cd含量	0.704**	-0.520*	-0.500*	-0.466*	-0.577**	0.590**
	根系Cd含量	0.643**	-0.744**	-0.728**	-0.729**	-0.580**	0.534*
	地上部分Cd富集量	-0.548**	0.878**	0.867**	0.857**	0.765**	-0.665**
	根系Cd富集量	-0.553**	0.863**	0.844**	0.833**	0.762**	-0.689**
	Cd转运系数	0.190	0.151	0.158	0.198	-0.039	-0.087
	地上部分富集系数	0.671**	-0.511*	-0.484*	-0.442*	-0.570**	0.588**
	根系富集系数	0.619**	-0.756**	-0.736**	-0.729**	-0.586**	0.545*

低,黑麦草生物量显著增加。这表明CK处理黑麦草 遭受Cd毒害作用最大,黑麦草新陈代谢及生长受到 严重影响,施入磷灰石、石灰后Cd对黑麦草的毒性降 低,Cd对黑麦草生长的抑制作用减弱。

土壤有效态Cd含量与黑麦草根形态指标均呈极 显著相关关系,而土壤Cd全量与黑麦草根形态各指 标均无显著相关关系。这在一定程度上验证了总量 法难以反映土壤重金属的生物有效性和移动性,而土 壤有效态重金属可较好反映重金属的牛物有效性和 移动性,更易被植物吸收并影响植物根系牛长及形态 发育,对植物产生的毒害作用更强[31-32]。根系作为植 物与土壤直接接触的器官,是植物吸收、代谢营养物 质及毒性成分的主要器官[13]。根系形态与植物对养 分、重金属的吸收能力有密切关系,在响应环境变化 方面表现出高度的发育可塑性[9-10]。本试验结果表 明,黑麦草生物量与根形态指标均呈极显著相关关 系,表明根形态指标对植物吸收营养元素,促进植物 生物量增加的重要性。Ostonen等[15]研究指出,花生 在Cd胁迫条件下,根长、根表面积、根体积和总根尖 数下降,根系平均直径增加。Lu等100对5个不同品种 花生研究发现,Cd胁迫降低了花生根长、根表面积、 比根长、总根尖数,但增加了根系平均直径。CK处理 黑麦草根长、根尖数、根表面积和根体积均最低,根系 平均直径最大,当土壤有效态Cd含量随着磷灰石、石 灰施入而降低后,Cd对黑麦草的毒性降低,黑麦草的 根长、根尖数、根表面积和根体积有不同程度增加,根 系平均直径降低,即植物受到Cd胁迫后表现出根变 短变粗、根毛缺乏、侧根分枝减少等症状,这与前人研 究结果[13-16]基本一致。Cd胁迫下植物根系平均直径 增加,一方面由于Cd诱导小麦根部皮层细胞数量增 多,另一方面由于Cd胁迫下根毛及侧根减少,主根在 根系中相对比重增大,使得根系平均直径增加。

## 3.3 黑麦草根形态与Cd吸收转运的相互关系

植物根系形态发育可塑性是植物在特定环境下的生存策略<sup>[33]</sup>, Cd胁迫严重影响植物的根系发育<sup>[34]</sup>, 而植物根系形态和结构变化又能反过来影响根系对 Cd吸收和木质部的装载效率,从而影响Cd在植物体 内的转运和积累<sup>[9,35]</sup>。修复植物的重金属富集量,特 别是地上部分重金属富集量是影响其修复潜力的重 要指标。通常认为,作为植物吸收器官的根系越发 达,越利于植物对重金属Cd的吸收,这在小麦<sup>[13-14,16]</sup>、 花生<sup>[36]</sup>、油菜<sup>[32,37]</sup>、拟南芥<sup>[34]</sup>等多种植物品种或生态型 的比较研究中得到证实。本研究结果表明,反映黑麦 草根系大小的形态学指标(根长、根表面积、根体积、 根尖数)均与地上部分及根部Cd富集量呈极显著正 相关关系,根平均直径与地上部分及根部Cd富集量 均呈极显著负相关关系,这与前人研究结果<sup>[10,12,38]</sup>基 本一致。但与高茜蕾等<sup>[38]</sup>和Lu等<sup>[10]</sup>研究结果不同,本 研究中黑麦草根形态学指标与地上部分及根系Cd含 量呈显著或极显著负相关关系。这一方面由于在黑 麦草根形态指标(根长、根表面积、根体积、根尖数)较 高的磷灰石、石灰处理中,生物有效性高的土壤有效态 Cd含量低,导致植物吸收的Cd含量低;另一方面,黑 麦草根形态与植物吸收营养物质密切相关,根长、根表 面积、根体积、根尖数等指标与生物量呈极显著正相关 关系,较发达的根系可有效促进黑麦草的生长,稀释了 黑麦草吸入植株体内的Cd,从而导致磷灰石、石灰处 理下黑麦草地上部分及根系Cd含量降低。

转运系数和富集系数是表征植物对重金属转移 和吸收能力的重要指标[13]。本研究不同处理间黑麦 草对Cd的转运系数(转移能力)无显著差异,黑麦草 对Cd的转运系数与根形态指标间均无显著相关性, 这表明对于某特定植物种类而言,土壤酸碱性、重金 属有效性、植物根形态等变化对其转移重金属能力影 响不显著,特定植物转移重金属的能力可能与其本身 遗传特征有很大关系。而磷灰石(低剂量磷灰石除 外)、石灰处理后黑麦草对Cd的富集系数(吸收能力) 显著高于CK处理,这表明磷灰石、石灰处理显著影响 了黑麦草对Cd的吸收能力。由黑麦草Cd富集系数 的计算方法可知,Cd富集系数由黑麦草Cd含量及土 壤Cd含量决定,与黑麦草Cd含量呈正比,与土壤Cd 含量呈反比,试验中土壤Cd含量变化不显著,所以 Cd富集系数变化主要来自于黑麦草Cd含量的变化。 植物根长、根表面积、根体积、根尖数等指标增加,可 有效增大植物根系与土壤及土壤溶液接触面积,在促 进植物根系对营养物质吸收的同时增加了植物对重 金属Cd的吸收,试验结果显示黑麦草Cd富集系数与 根长、根表面积、根体积、根尖数均呈极显著负相关关 系,这表明植物对营养物质的吸收速率高于其对Cd 的吸收速率。

## 4 结论

Cd污染土壤施入中、高剂量磷灰石、石灰后,土 壤pH显著增加,土壤有效态Cd含量显著降低,黑麦 草地上部分及根系生物量、根长、根表面积、根体积、 根尖数均显著增加,但黑麦草根平均直径显著降低; 黑麦草地上部分及根系Cd含量显著降低,Cd富集量显著增加,黑麦草Cd富集系数显著降低。

选取土壤pH、有效态Cd含量、植物生物量、Cd含量、Cd富集量、根形态、Cd富集系数等指标综合考察Cd污染土壤"改良剂-植物"联合修复技术的效果,表明磷灰石和石灰等改良剂能显著降低土壤有效态Cd含量,促进植物的生长及其对Cd的富集,进而保证植物修复技术更好地实施,其中施入24g·kg<sup>-1</sup>剂量磷灰石并种植黑麦草的联合修复技术对Cd污染土壤的修复效果显著,适于在酸性、中度Cd污染土壤上推广应用。

#### 参考文献:

- 彭少邦,蔡乐,李泗清.土壤镉污染修复方法及生物修复研究进展
   [J].环境与发展,2014,26(3):86-90. PENG Shao-bang, CAI Le, LI Si-qing. Remediation methods of cadmium contaminated soil and research progress on bioremediation[J]. *Environment and Development*, 2014, 26(3):86-90.
- [2] Qing Y, Yang J Q, Zhu Y S, et al. Cancer risk and disease burden of dietary cadmium exposure changes in Shanghai residents from 1988 to 2018[J]. Science of the Total Environment, 2020, 734:139411.
- [3] Gustin K, Tofail F, Vahter M, et al. Cadmium exposure and cognitive abilities and behavior at 10 years of age: A prospective cohort study[J]. *Environment International*, 2018, 113:259–268.
- [4] Yoshida F. Environmental restoration of Minamata: New thinking brings new advances[J]. Sustainability Science, 2007, 2(1):85–93.
- [5] Rizwan M, Ali S, Zia ur Rehman M, et al. Cadmium phytoremediation potential of *Brassica* crop species: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632; 1175–1191.
- [6] 盛洁.黑麦草对重金属的响应及修复调控研究进展[J]. 作物研究, 2014, 28(8):948-952. SHENG Jie. Research progress of ryegrass response to heavy metals and remediation regulation[J]. *Crop Research*, 2014, 28(8):948-952.
- [7] Hu Z Y, Wang Y F, Fang Z G, et al. Italian ryegrass-rice rotation system for biomass production and cadmium removal from contaminated paddy fields[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20:874–882.
- [8] Malamy J E. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture[J]. *Plant Cell and Environment*, 2005, 28 (1):67–77.
- [9] 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):21-37.
- [10] Lu Z, 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, 91:147-155.
- [11] Shi G R, Xia S L, Liu C F, et al. Cadmium accumulation and growth response to cadmium stress of eighteen plant species[J]. *Environmen*tal Science and Pollution Research, 2016, 23:23071–23080.

#### 农业环境科学学报 第40卷第1期

- [12] Dawuda M M, Liao W, Hu L, et al. Root tolerance and biochemical response of Chinese lettuce (*Lactuca sativa* L.) genotypes to cadmium stress[J]. *PeerJ*, 2019, 7:e7530.
- [13] 王效瑾, 高巍, 赵鹏, 等. 小麦幼苗根系形态对镉胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6):1218-1225. WANG Xiao-jin, GAO Wei, ZHAO Peng, et al. Changes to wheat seedling root morphology in response to cadmium stress[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(6):1218-1225.
- [14] 夏雪姣, 菅明阳, 韩玉翠, 等. 镉胁迫对小麦形态发育及生理代谢 的影响[J]. 农业生物技术学报, 2018, 26(9):1494-1503. XIA Xue-jiao, JIAN Ming-yang, HAN Yu-cui, et al. Effects of cadmium stress on morphological development and physiological metabolism in wheat (*Triticum aestivum*)[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2018, 26(9):1494-1503.
- [15] Ostonen I, Püttsepp Ü, Biel C, et al. Specific root length as an indicator of environmental change[J]. *Plant Biosystems*, 2007, 141(3):426– 442.
- [16] 冯汉青, 杜变变, 王庆文, 等. 镉胁迫下活性炭对小麦幼根的保护 作用[J]. 生态学报, 2016, 36(10):2962-2968. FENG Han-qing, DU Bian-bian, WANG Qing-wen, et al. The role of activated carbon in protecting the roots of wheat seedlings under cadmium stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10):2962-2968.
- [17] 杜志敏, 郝建设, 周静, 等. 四种改良剂对铜和镉复合污染土壤的 田间原位修复研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(3):508-517. DU Zhimin, HAO Jian-she, ZHOU Jing, et al. Field in-situ remediation of Cu-Cd polluted soil by four amendments[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3):508-517.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,
  1999. LU Ru-kun. Analytical methods of soil and agro-chemistry
  [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [19] Jin Z H, Zhang M, Li R, et al. Spent mushroom substrate combined with alkaline amendment passivates cadmium and improves soil property[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 16317–16325.
- [20] Cao X Y, Hu P J, Tan C Y, et al. Effects of a natural sepiolite bearing material and lime on the immobilization and persistence of cadmium in a contaminated acid agricultural soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25:22075-22084.
- [21] Xu L, Cui H B, Xing X Y, et al. Long-term stability and risk assessment of copper and cadmium in a smelter-impacted soil treated by four amendments[J]. *Chemistry and Ecology*, 2018, 34(9):871-883.
- [22] 冉洪珍, 郭朝晖, 肖细元, 等. 改良剂连续施用对农田水稻 Cd 吸收 的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(3):1117-1123. RAN Hongzhen, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, et al. Effects of continuous application of soil amendments on cadmium availability in paddy soil and uptake by rice[J]. China Environmental Science, 2019, 39(3): 1117-1123.
- [23] 李明, 陈宏坪, 王子萱, 等. 石灰钝化法原位修复酸性镉污染菜地 土壤[J]. 环境工程学报, 2018, 12(10): 2864-2873. LI Ming, CHEN Hong-ping, WANG Zi-xuan, et al. In-situ lime immobilization of cadmium in vegetable field of acid soil zone[J]. *Chinese Jour-*

nal of Environmental Engineering, 2018, 12(10):2864-2873.

- [24] 范玉超, 吴求刚, 崔红标, 等. 磷灰石和石灰稳定化修复对污染土 壤铜和镉垂直迁移的影响[J]. 土壤, 2017, 49(6):1187-1194. FAN Yu-chao, WU Qiu-gang, CUI Hong-biao, et al. Vertical migration of Cu and Cd in soils immobilized by lime and apatite[J]. Soils, 2017, 49 (6):1187-1194.
- [25] Chen Y H, Xie T H, Liang Q F, et al. Effectiveness of lime and peat applications on cadmium availability in a paddy soil under various moisture regimes[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23:7757-7766.
- [26] 陈辰,朱园辰,喇乐鹏,等.典型黑土环境下的高、低镉积累白菜品 种筛选及耐性比较[J].农业环境科学学报,2020,39(3):462-472. CHEN Chen, ZHU Yuan-chen, LA Yue-peng, et al. Screening and tolerance comparison of high and low cadmium accumulating cabbage cultivars in a typical black soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(3):462-472.
- [27] He S, Yang X, He Z, et al. Morphological and physiological responses of plants to cadmium toxicity: A review[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(3): 421-438.
- [28] Kumbhakar D V, Datta A K, Das D, et al. Assessment of oxidative stress, antioxidant enzyme activity and cellular apoptosis in a plant based system(*Nigella sativa* L.; black cumin) induced by copper and cadmium sulphide nanomaterials[J]. *Environmental Nanotechnology*, *Monitoring and Management*, 2019, 11:100196.
- [29] 张欣, 王华忠, 王利, 等. 不同品种小麦幼苗耐镉差异[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 61-65. ZHANG Xin, WANG Hua-zhong, WANG Li, et al. Different varieties of wheat seedling resistance to cadmium[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(7):61-65.
- [30] Zhang X, Gao B, Xia H. Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of bana grass and vetiver grass[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 106: 102– 108.
- [31] 章明奎, 方利平, 周翠. 污染土壤重金属的生物有效性和移动性评价: 四种方法比较[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8):1501-1504. ZHANG Ming-kui, FANG Li-ping, ZHOU Cui. Evaluation of heavy metals bioavailability and mobility in polluted soils: A comparison of four methods[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(8):1501-1504.

- [32] 王凌,张国印,张小龙,等.蔬菜土壤重金属生物有效性及有效态 与全量相关性研究[J]. 华北农学报, 2011, 26(增刊):85-88. WANG Ling, ZHANG Guo-yin, ZHANG Xiao-long, et al. Study on the bioavailability of heavy metal and correlation between the available concentration and the total in vegetable soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2011, 26(Suppl):85-88.
- [33] 王艺霖,周玫,李苹,等.根系形态可塑性决定黄栌幼苗在瘠薄土 壤中的适应对策[J].北京林业大学学报,2017,39(6):60-69.
  WANG Yi-lin, ZHOU Mei, LI Ping, et al. Root morphological plasticity determing the adaptive strategies of *Cotinus coggygria* seedlings in barren soil environment[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(6):60-69.
- [34] 陈杰, 许长征, 曹颖倩, 等. 不同重金属对拟南芥根系特征的影响 比较[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(6):1122-1128. CHEN Jie, XU Chang-zheng, CAO Ying-qian, et al. Heavy-metal-induced morphological changes of root characteristics in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, 23 (6):1122-1128.
- [35] Vaculík M, Konlechner C, Langer I, et al. Root anatomy and element distribution vary between two Salix caprea isolates with different Cd accumulation capacities[J]. Environmental Pollution, 2012, 163:117– 126.
- [36] 曹莹, 周国驰, 王晓旭, 等. 生物炭对镉胁迫下花生根系形态学特 性及根镉含量的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(1):197-203. CAO Ying, ZHOU Guo-chi, WANG Xiao-xu, et al. Effects of biochar on root morphology and cadmium content in peanut under cadmium stress[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(1):197-203.
- [37] 杨志新, 钟伟, 秦丽, 等. 9个油菜品种根系形态与镉铅累积关系及 机理初步分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2018, 33(5): 916-924. YANG Zhi-xin, ZHONG Wei, QIN Li, et al. Relationship between root morphology and Cd/Pb accumulation characteristics of nine rape varieties and its mechanism[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2018, 33(5):916-924.
- [38] 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):1794-1798. GAO Qian-lei, ZHENG Rui-lun, LI Hua-fen. Effects of transpiration rate and root character on cadmium absorption by pakchoi cultivars[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(9):1794-1798.