

尚艺婕, 张秀, 王海波, 等. 秸秆生物质炭对镉污染水稻土根际酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1532-1540.

SHANG Yi-jie, ZHANG Xiu, WANG Hai-bo, et al. Effects of straw biochar on rhizospheric enzyme activities in Cd contaminated paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1532-1540.

秸秆生物质炭对镉污染水稻土根际酶活性的影响

尚艺婕, 张秀, 王海波, 史静*

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要:为了探究不同 Cd 污染程度下生物质炭输入对水稻根际土壤氧化还原类酶、碳循环酶的活性变化的影响,选取水稻作为研究对象,测定不同生物质炭量及 Cd 施入下水稻根际及非根际土壤酶活性的变化状况。研究表明,不同处理下,水稻根际土壤碳循环酶的综合活性指数值介于 1.388~12.029 之间,而非根际土壤碳循环酶的活性指数值介于 0.542~1.713 之间。水稻根际土壤氧化还原类酶的综合活性指数值介于 0.387~1.627 之间,而非根际土壤氧化还原酶指数值介于 0.167~1.201 之间。可见水稻根际碳循环类酶及氧化还原类酶的活性均高于非根际土壤。当生物质炭施入量为 10%, Cd 的含量为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,水稻根际土壤的碳循环类酶活性指数为 12.029,氧化还原类酶活性指数为 1.192,均达到最大。由此可得,该浓度的生物质炭施入对两大类酶活性值的提升均有显著作用。

关键词: 生物质炭; 水稻; 根际土; 土壤碳循环酶; 土壤氧化还原酶

中图分类号: S154.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)08-1532-09 doi:10.11654/jaes.2015-1694

Effects of straw biochar on rhizospheric enzyme activities in Cd contaminated paddy soil

SHANG Yi-jie, ZHANG Xiu, WANG Hai-bo, SHI Jing*

(Yunnan Agriculture University, College of Resource and Environment, Kunming 650201, China)

Abstract: Biochar may reduce heavy metal bioavailability in soils through enhancing adsorption and thus modifies enzymatic activities in polluted soils. Here an experiment was conducted to explore the effects of biochar additions on activities of redox enzymes and carbon cycle enzymes in the rhizosphere of rice under different cadmium (Cd) pollution. Results showed that under different treatments the comprehensive value of carbon cycle enzyme activities varied between 1.388 and 12.029 in the rhizospheric soil, while from 0.542 to 1.713 in non-rhizospheric soil. The composite value of redox enzyme activities in the rhizospheric soil of rice was in the range of 0.387 to 1.627, but from 0.167 to 1.201 in the non-rhizospheric soil of rice. The activities of both redox enzyme and carbon cycle enzyme in the rhizospheric soil of rice were higher than those in non-rhizospheric soil. At 10% of biochar addition and $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ of Cd content, the activities of carbon cycle enzyme and redox enzyme in the rhizospheric soil were 12.029, and 1.192, respectively, which were the highest. Therefore, this rate of biochar has a remarkable enhancing effect on activities of these two enzymes.

Keywords: biochar; rice; rhizospheric soil; soil carbon cycle enzyme; soil redox enzyme

土壤酶是指在土壤中能催化生物学反应的一类蛋白质,其活性表征了土壤生物活性的强弱,是土壤新陈代谢的重要因素。土壤酶活性对土壤质量的生物

活性指标及土壤肥力指标均具有很好的评价作用。目前我国土壤重金属污染问题日益严重,有关部门调查显示,约有 20% 的土壤存在着不同程度的镉污染。大量实验研究已经表明,土壤中 Cd 元素的加入对不同类别的土壤酶活性存在着显著的影响,其中以脲酶、磷酸酶等氧化还原酶类的反应最为敏感,蔗糖酶次之,且其影响以抑制作用为主。生物质炭的施用可以显著改善土壤重金属污染的形态和迁移行为^[1],生物

收稿日期: 2015-12-24

基金项目: 云南省应用基础研究计划项目(2013FB043); 国家自然科学基金项目(41301349)

作者简介: 尚艺婕(1991—),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染与防治。E-mail: 1179460788@qq.com

* 通信作者: 史静 E-mail: 383110966@qq.com

质炭能够降低土壤中 Pb、Cd 的酸可提取态含量,因而可以降低重金属的生物有效性,对重金属表现出很好的固定效果^[2-4]。由于土壤酶活性受重金属元素的影响较为显著,其强弱与重金属污染程度存在着某种相关性,土壤酶活性对重金属污染程度具有良好的恢复及指示效应。课题组前期研究结果表明^[5],在土壤中生物质炭含量较低(0~5%)时,2.5%含量的生物质炭输入对土壤碳循环类酶活性及氧化还原类酶活性均具有最强的修复效应,其中碳循环类酶活性比不加生物质炭高出 7.4%,氧化还原类酶活性比不加生物质炭时高出 18.50%。除此之外,重金属污染对根际土壤也具有很强的影响力。根系分泌物是土壤酶的重要来源,在植物生长发育的过程中,根系作为物质和土壤的重要界面,不仅是吸收和代谢器官,而且是强大的分泌器官,植物根系分泌物、残体(含根系脱落物和凋落物)在土壤分解过程中可刺激微生物活动,从而使根际土壤酶活性得到增强^[1]。前人的研究成果已经证明了这种趋势^[5-6],如玉米、杉木,其根际土壤酶活性值是非根际土壤的 2~5 倍;水稻根际土壤过氧化氢酶活性比非根际土壤高出了 35%,蔗糖酶活性值高出 23%。这便是作物中普遍存在的根系效应。

目前,国内有关生物质炭对重金属污染下土壤酶活性值变化研究较多,然而有关水稻根际土及非根际土酶活性值差异方面的研究仍然较少涉及,有关不同量的生物质炭对不同程度的重金属污染下的作物根系不同类别酶活性的影响方面尚不明确。本文在总结汲取前人及本课题研究成果的基础上,选取水稻这一最为广泛种植和食用但同时却最易受重金属富集危害的农作物作为研究对象,通过改变不同量的生物质炭及重金属元素 Cd 的施入,探究更高浓度的生物质炭添加下的水稻根际土及非根际土中对土壤重金属响应较为灵敏的氧化还原类土壤酶及对生物质炭响应较为灵敏的碳循环类土壤酶活性的变化,探究水稻根际土及非根际土碳循环类酶及氧化还原类酶活性在不同量的生物质炭及重金属 Cd 施用下的变化机理,旨在为生物质炭对重金属 Cd 污染水稻根际土及非根际土酶活性的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

选取云南农业大学后山红壤 8 kg 作为试验供试土壤,将 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 与去离子水配成母液,稀释成处理浓度(10、2.5、5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)后与土壤反复混合均匀,

同时设置空白对照。选取秸秆生物炭按添加量(0、2.5%、5%、10%的质量比)进行原状土添加,即得到 13 种不同处理的土样,分别记作 Cd0B0、Cd1B0、Cd1B2.5、Cd1B5、Cd1B10、Cd2.5B0、Cd2.5B2.5、Cd2.5B5、Cd2.5B10、Cd5B0、Cd5B2.5、Cd5B5、Cd5B10。

经处理的土壤样品分装后置于玻璃温室中,在自然状态下进行老化处理 60 d,保持土壤水分在田间水量的 70%^[7]。选取优良品种的水稻种子分别种植于上述处理的土样中(每类土样均需设平行对照),用塑胶夹板夹住少量土壤,使根系在夹板中生长,保持 5~6 cm 的水层,水稻抽穗前 2 d 适当排水通气,齐穗到蜡熟期间歇灌溉,待黄熟后可开始排水。水稻成熟收获后,取夹板中近根土做根际土,夹板外的土即为非根际土。对所得到的水稻根际土及非根际土的 FDA 水解酶、纤维素酶、蛋白酶、脲酶、蔗糖酶及过氧化氢酶的活性进行测定。表 1 为试验用生物炭的基本性状。

表 1 生物炭的基本性状

Table 1 Basic characteristics of biochar

生物炭	pH	BET 比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	CEC/ $\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$
600R BC	9.03	23.26	185.56

1.2 测定方法

对 FDA 水解酶(又名荧光素二乙酸酯酶)以无色的荧光素二乙酸为基质,采用比色法来测定其活性;采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定纤维素酶解所产生的还原糖量来表示纤维素酶活性;蛋白酶酶活的测定采用茚三酮比色法,以 24 h 后 1 g 土壤中的氨基氮的毫克数表示;脲酶的酶活采用苯酚钠-次氯酸钠比色法,以尿素为基质,测定其活性;蔗糖酶酶活采用二硝基水杨酸比色法测定,以 24 h 后 1 g 土壤中的葡萄糖毫克数来表示;磷酸酶酶活的测定采用磷酸苯二钠比色法来测定,以磷酸苯二钠为基质,在磷酸酶的作用下,以水解基质所生成的苯酚的量来表示;过氧化氢酶酶活采用紫外分光光度法测定,以每 20 min 内每克土壤分解的过氧化氢的毫克数来表示^[8]。

为消除土壤中原有物质对实验结果造成的误差,以上每种土样的酶活测定均需要设置无基质对照,整个实验需做无土对照。为使实验结果精准可靠,每种土样的酶活测定也需做平行对照。

1.3 酶活性综合值的计算

根据前人研究结果及各种酶的具体作用及性质,将所选取的土壤酶分为两大类:第一类为对土壤碳循环变化响应较为明显的酶类,这类酶有 FDA 水解酶、

纤维素酶、蛋白酶;第二类为对 Cd 活性变化响应较为敏感的酶类,这类酶也被称之为土壤氧化还原酶,其中包括脲酶、蔗糖酶、磷酸酶及过氧化氢酶^[8-11]。对这两大类型的酶活性分别求取几何平均数,作为衡量土壤中碳循环相关酶及氧化还原酶活性的指标,其中土壤碳循环酶的公式为:

$$GMea_1 = \sqrt[3]{FDA \times Cel \times Pro}$$

土壤氧化还原酶活性公式为:

$$GMea_1 = \sqrt[3]{Ure \times Inv \times Cat}$$

最后,对不同处理下土样的各种酶活性求几何平均数,作为衡量土壤质量的综合酶活性指标,公式为:

$$GMea = \sqrt[6]{FDA \times Cel \times Ure \times Inv \times Pro \times Cat}$$

式中:FDA 代表 FDA 水解酶活性;Cel 代表纤维素酶活性;Pro 代表蛋白酶活性;Ure 代表脲酶活性;Inv 代表蔗糖酶的活性;Cat 代表过氧化氢酶的活性。

1.4 数据处理

本文中分析数据采用 Excel(2007)统计软件及 SPSS19.0 软件对各种处理下水稻根际及非根际土壤不同酶活性值进行单因素方差分析,检验不同处理之间的差异显著性($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 外加镉处理下生物质炭输入对水稻根际及非根际土壤碳循环酶活性的影响

碳循环酶包括 FDA 水解酶、纤维素酶、蛋白酶三种。从图 1 可以看出,当土壤中 Cd 的施入量为 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,随着生物质炭量的施入,水稻根际土 FDA 酶的活性逐渐升高,生物质炭的用量为 2.5% 时其值最小为 $0.382 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,当生物质炭用量为 5% 及 10% 时, FDA 酶的活性值分别增加 71.64% 及 34.07%;生物质炭的输入量为 2.5% 时,根际土壤蛋白酶的活性最高,其值为 $240.22 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,比不加生物质炭、生物质炭含量 5% 及 10% 分别高出 66.11%、53.10% 及 78.97%;生物质炭含量为 5% 时,纤维素酶的活性值最高为 $0.907 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,比不加生物质炭及生物质炭含量 2.5%、10% 时分别增加了 36.49%、34.07%、40.35%。土壤中 Cd 的施入量为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,根际土 FDA 酶的活性随着生物质炭施入量的增加亦呈上升的趋势,在生物质炭的施入量为 0、2.5%、5% 及 10% 时,该酶的活性值较前者分别增加 1.23%、100.08% 及 47.06%;蛋白酶的活性值变化梯度显著,最高为生物质炭含量 10% 时,其值为 $556.981 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,最低为生物质炭施入量为 0 时,该酶

的活性值为 $13.002 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,下降 97.66%,可见生物质炭对蛋白酶活性值的恢复具有显著作用;生物质炭含量 10% 时,纤维素酶的活性值最高为 $2.079 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,当不加生物质炭以及生物质炭施入量为 2.5% 及 5% 时,较最高值分别下降 79.60%、64.35% 及 79.26%,下降梯度显著。Cd 的施入量为 $5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,当生物质炭的施用量分别为 0、2.5%、5% 及 10% 时, FDA 水解酶的活性值分别为 0.508 、 0.777 、 1.190 、 $1.428 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,上升梯度显著。蛋白酶的活性值介于 $45.323 \sim 136.388 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间;不加生物质炭时,纤维素酶的活性值最高,其值为 $0.520 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。由此可见,在不同量的 Cd 施入下,水稻根际土壤碳循环类酶活性值在不加生物质炭时最小,最大值则随着炭量施入量的变化而变化。这可能与 Cd 的施入对各种土壤酶的抑制及不同种类的酶对于生物质炭的敏感程度有关,多方面因素的共同作用导致土壤碳循环类酶活性的差别及不同变化态势。

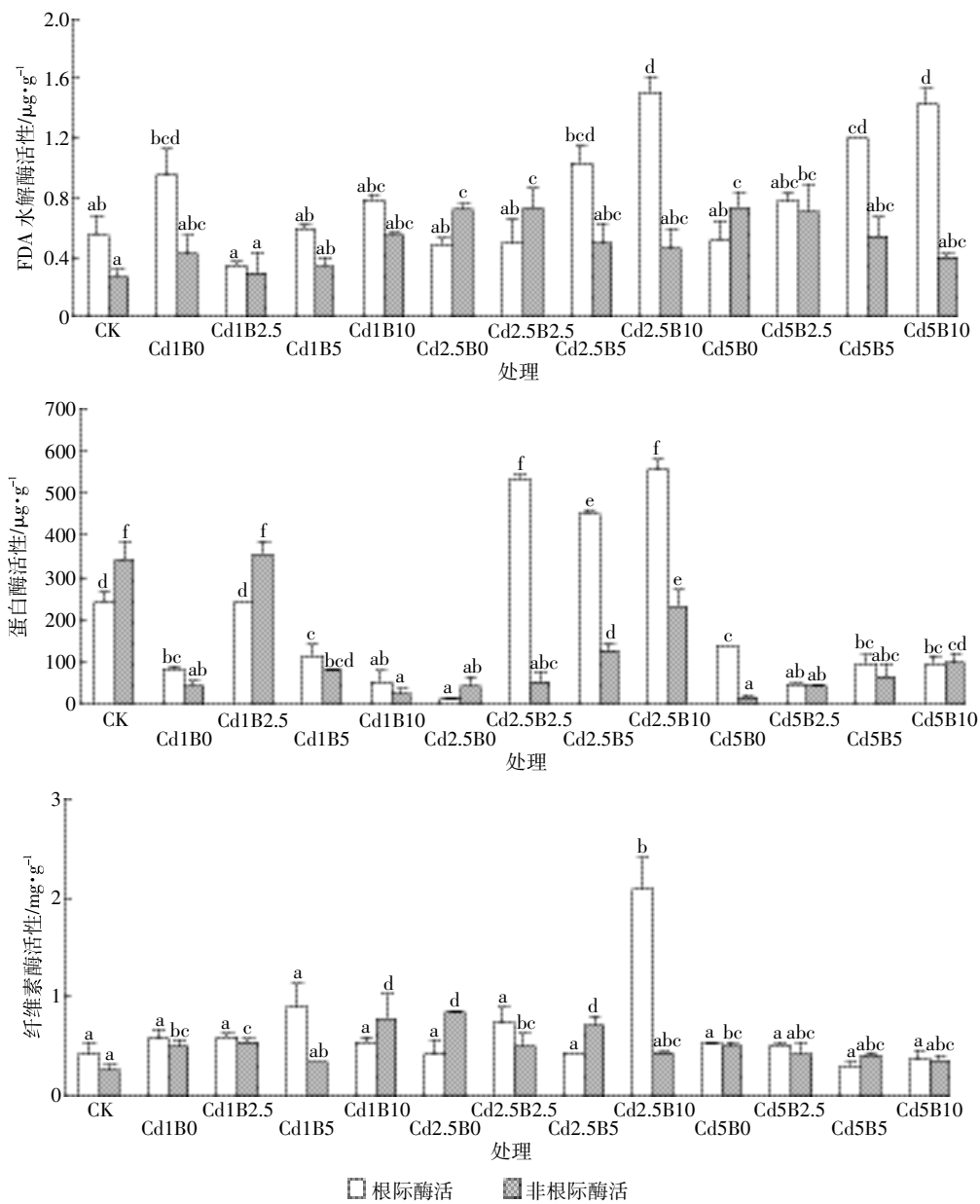
当土壤中 Cd 的施入量为 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,随着生物质炭的施入,水稻非根际土 FDA 酶活性值逐渐升高,非根际土壤蛋白酶的活性值最高为生物质炭的输入量 2.5% 时;纤维素酶的活性值最高为生物质炭施入量 10% 时。当土壤中 Cd 的施入量为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, FDA 水解酶的活性值随着生物质炭用量的增加呈现先增加后逐渐减少的趋势;当土壤中 Cd 的施入量为 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,水稻非根际土 FDA 水解酶的活性随着生物质炭施入量的增加逐渐降低,且下降幅度逐级增加;当土壤中 Cd 的施入量为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,非根际土壤蛋白酶的活性值随着生物炭施入量的升高依次递增,最高均为生物质炭的输入量为 10% 时。可见 10% 的生物质炭施入量对 Cd 污染水稻非根际土壤蛋白酶活性值的恢复具有更显著的效果,而纤维素酶的活性值最高均为不加生物质炭时,其值分别为 0.851 、 $0.496 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。可见水稻非根际土壤碳循环类酶活性值变化趋势同根际土壤酶活相类似。

2.2 外加镉处理下生物质炭输入对水稻根际及非根际土壤氧化还原酶活性的影响

不同处理间水稻根际土壤氧化还原类酶的活性值变化显著,本文研究的是脲酶、蔗糖酶及过氧化氢酶(图 2)。当土壤中 Cd 的施入量为 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,生物质炭的输入量 2.5% 时,水稻根际土壤脲酶的活性值最高,比不加生物质炭及生物质炭含量 5%、10% 时分别高出 42.99%、28.59%、30.35%;蔗糖酶的活性值随着生物质炭施入量的增加而递增,生物质炭含量为

2.5%时,根际土壤蔗糖酶的活性值最高,其值为 $4.496 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。当土壤中 Cd 的施入量为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,生物质炭施入量为 2.5%时,根际土壤脲酶及蔗糖酶的活性值均最高;该处理下的脲酶活性值比生物质炭的施入量为 0、5%及 10%时分别高了 73.12%、58.45%、24.73%;蔗糖酶的活性值比不加生物质炭时高出 79.74%,比生物质炭含量 5%时高出 80%,比生物质炭含量 10%时高出 43.97%。过氧化氢酶的活性值最高为生物质炭含量 5%时的 $4.485 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Cd 的施入

量为 $5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 时,水稻根际土壤脲酶的活性值最高亦为生物质炭施入量为 2.5%时,其值为 $0.621 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;蔗糖酶的活性值最高为生物质炭含量 10%时,其值为 $1.26 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$,比生物质炭含量 0、2.5%及 10%时的 0.096 、 0.123 、 $0.113 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 分别高出 92.38%、90.24%、91.03%;生物质炭含量 5%时,过氧化氢酶的活性值最高,其值为 $4.485 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,比不加生物质炭、生物质炭施入量 2.5%及生物质炭施入量 10%分别高出 17.46%、38.01%、46.46%。可见在生物质炭含量为



不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著

Different letters show significant difference at $P < 0.05$ level

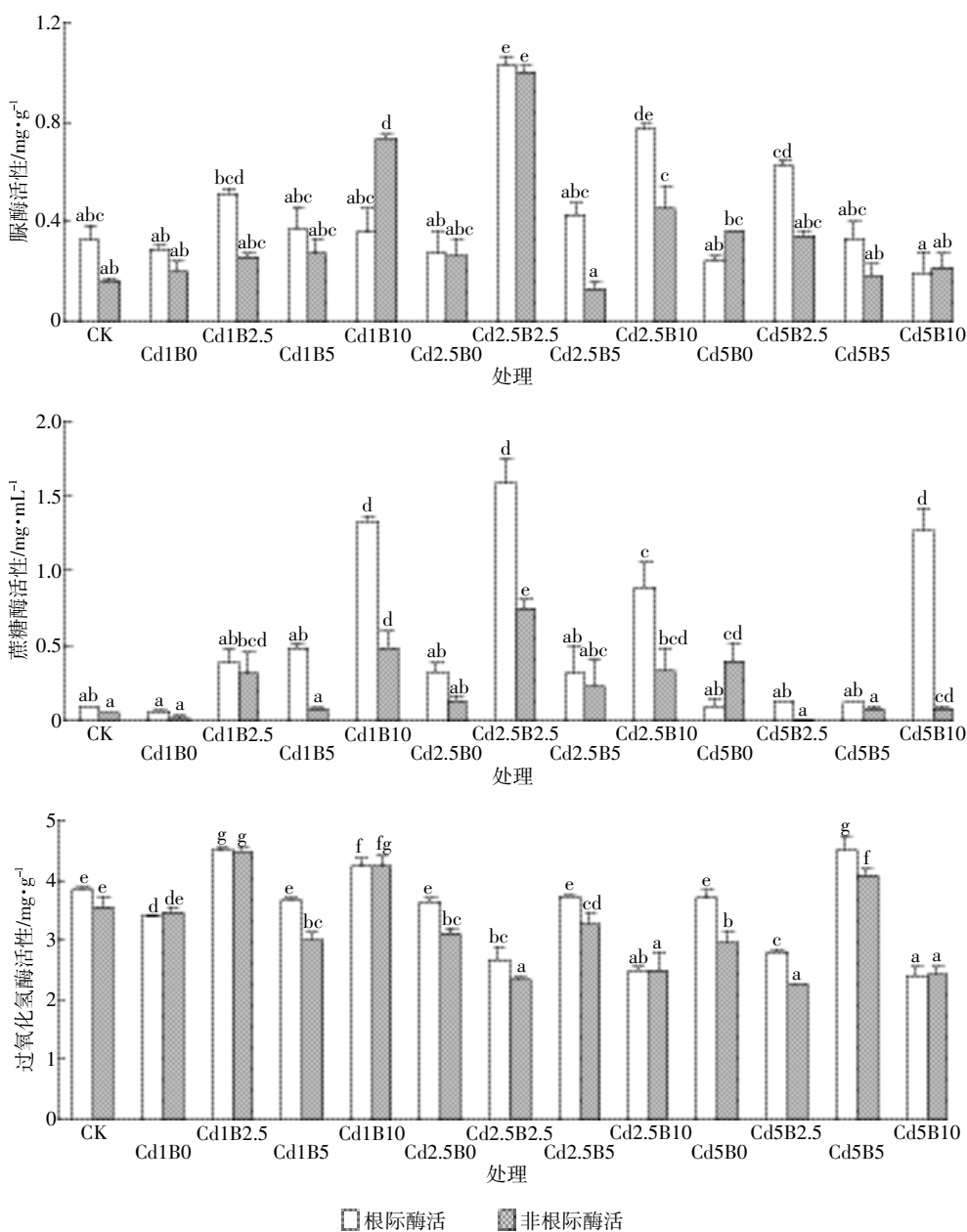
图 1 水稻根际及非根际土壤碳循环酶的综合酶活性

Figure 1 Composite activity of carbon cycle enzymes in rhizospheric and non rhizospheric soils of rice plant

2.5%时,在不同量的 Cd 添加下,土壤脲酶及蔗糖酶的活性值均最大,说明该浓度的生物质炭的输入对该两种酶活性的恢复具有重要意义,能够显著削弱重金属 Cd 的抑制;而过氧化氢酶的活性值在生物质炭含量 5%时达到最大,可能是与过氧化氢酶活性受土壤重金属污染程度的变化比较敏感^[15],需要更多量的生物质炭施入有关。

当土壤中 Cd 的施入量为 1 mg·kg⁻¹ 时,水稻非根

际土壤脲酶的活性值随着生物质炭施入量的增加逐渐升高,最高为生物质炭的输入量 10%;水稻非根际土壤过氧化氢酶的活性值在生物质炭含量为 2.5%时最高。Cd 的施入量为 2.5 mg·kg⁻¹ 时,水稻非根际土壤脲酶及蔗糖酶的活性值均在生物质炭的施入量 2.5%时最高,其值分别为 1.002、0.748 mg·mL⁻¹。当土壤中 Cd 的施入量为 5 mg·kg⁻¹ 时,水稻非根际土壤脲酶的活性值在不加生物质炭时最高,比生物质炭含量 2.5%



不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著

Different letters show significant difference at $P < 0.05$ level

图 2 水稻根际及非根际土壤氧化还原酶的综合酶活性

Figure 2 Composite activity of oxidoreductase enzymes in rhizospheric and non rhizospheric soils

时高 4.43%,比生物质炭施入量 5%高 49.31%,比生物质炭施入量 10%高 40.99%;而蔗糖酶的活性值为不加生物质炭时最高。当土壤中 Cd 的施入量为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,非根际土壤过氧化氢酶的活性值均在生物质炭含量为 5%时最高。本课题之前的研究也表明^[2],生物质炭输入可以提高土壤 pH 值和土壤有机质含量,改变镉在土壤中的赋存比例,使土壤中可交换态镉比例降低并向残渣态转化,从而降低镉的生物有效性;而且生物质炭输入后对根际与非根际土壤各个粒级微团聚体镉形态间的影响效果明显,在不同镉污染浓度下随着生物质炭输入量有逐级递增,各个处理间镉有效态含量均呈现降低趋势,而残渣态含量则呈现上升趋势。这从本质上证明了生物质炭的施入对重金属镉污染的削弱作用是切实可信的。

2.3 外加镉处理下生物炭输入对水稻根际及非根际土壤综合酶活性的影响

2.3.1 不同处理下生物炭输入对水稻根际及非根际土壤碳循环酶的综合酶活性比较

对不同处理下的水稻根际及非根际土壤碳循环相关的酶活性求几何平均数(Geometric mean),作为衡量水稻根际及非根际土壤碳循环酶的综合指标,其计算结果如表 2 所示。可以直观看出,水稻根际土壤与碳循环相关的综合酶活性值普遍高于水稻非根际土壤。从处理 CK 到处理 Cd5B10,水稻根际土壤碳循环酶的综合活性值与非根际土壤碳循环酶的综合活性

值的差值介于 0.542~10.880 之间。差异最大的为 Cd 的施入量 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,生物质炭的施入量 10%时,其值为 10.880。

2.3.2 不同处理下生物炭输入对水稻根际及非根际土壤氧化还原酶的综合酶活性比较

对不同处理下的水稻根际及非根际土壤氧化还原酶活性求几何平均数,作为衡量水稻根际及非根际土壤氧化还原酶的综合指标,其计算结果如表 3 所示。可以看出,水稻土壤氧化还原酶的综合酶活性值根际土与非根际土差异明显,从处理 CK 到处理 Cd5B10,水稻根际土壤氧化还原酶的综合活性值与非根际土氧化还原酶的综合活性值差值介于 -0.307~0.498 之间。差异值最大为 Cd 的施入量 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,生物质炭施入量 10%时,其值为 0.498。当 Cd 的添加量为 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,生物质炭的施入量为 0 时,其差异出现负值(-0.307)。

2.3.3 不同处理下生物炭输入对水稻根际及非根际土壤酶的综合酶活性比较

对不同处理下的水稻根际及非根际土壤各种酶活性求几何平均数,作为衡量水稻根际及非根际土壤的综合酶活性指标,其计算结果如表 4。可以看出,水稻土壤根际土壤酶活性的综合值与非根际土壤酶活性的综合值存在显著差异,从处理 CK 到处理 Cd5B10,水稻根际土壤氧化还原酶的综合活性值与非根际土氧化还原酶的综合活性值差值介于 0.387~2.876 之间。差异最大为 Cd 施入量 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,生物

表 2 水稻根际及非根际土壤碳循环酶的综合酶活性

Table 2 Composite activity of carbon cycle enzymes in rhizospheric and non rhizospheric soils of rice plant

处理	根际	非根际	差值
CK	3.838	1.586	2.252
Cd1B0	3.549	1.117	2.431
Cd1B2.5	3.663	1.592	2.071
Cd1B5	3.914	0.542	3.372
Cd1B10	2.781	1.493	1.288
Cd2.5B0	1.388	0.741	0.647
Cd2.5B2.5	5.786	1.713	4.073
Cd2.5B5	5.828	1.711	4.117
Cd2.5B10	12.029	1.149	10.880
Cd5B0	3.303	0.829	2.474
Cd5B2.5	2.607	1.524	1.083
Cd5B5	3.263	0.983	2.280
Cd5B10	3.669	1.313	2.356

表 3 水稻根际及非根际土壤氧化还原酶的综合酶活性

Table 3 Composite activity of oxidoreductase in rhizospheric and non rhizospheric soils of rice plant

处理	根际	非根际	差值
CK	0.493	0.296	0.197
Cd1B0	0.387	0.236	0.151
Cd1B2.5	0.959	0.712	0.247
Cd1B5	0.863	0.409	0.454
Cd1B10	1.263	1.140	0.123
Cd2.5B0	0.684	0.467	0.217
Cd2.5B2.5	1.627	1.201	0.426
Cd2.5B5	0.795	0.454	0.341
Cd2.5B10	1.192	0.721	0.471
Cd5B0	0.439	0.745	-0.307
Cd5B2.5	0.597	0.167	0.429
Cd5B5	0.553	0.386	0.167
Cd5B10	0.839	0.341	0.498

表 4 水稻根际及非根际土壤综合酶活性
Table 4 Composite enzyme activity in rhizospheric and non rhizospheric soils of rice plant

处理	根际	非根际	差值
CK	1.376	0.686	0.690
Cd1B0	1.172	0.514	0.658
Cd1B2.5	1.874	1.065	0.809
Cd1B5	1.838	0.471	1.367
Cd1B10	1.874	1.305	0.569
Cd2.5B0	0.975	0.588	0.387
Cd2.5B2.5	3.069	1.435	1.633
Cd2.5B5	2.153	0.882	1.272
Cd2.5B10	3.786	0.910	2.876
Cd5B0	1.204	0.786	0.418
Cd5B2.5	1.247	0.505	0.742
Cd5B5	1.343	0.616	0.727
Cd5B10	1.754	0.669	1.085

质炭施入量 10% 时,其差值为 2.876。

3 讨论

3.1 生物质炭对重金属污染土壤酶活性的修复效应

重金属直接作用于酶分子,使酶的构象发生改变,从而影响酶的活性;其抑制土壤微生物的生长繁殖,使微生物体内酶的合成和分泌量减少,进而影响酶的活性;重金属影响到作物的代谢活力,使根分泌、释放酶的能力受影响^[6]。生物质炭的施入可以显著改变土壤中 Cd 的形态和迁移行为,降低土壤中 Cd 的可提取态含量,降低重金属的生物有效性,故对重金属具有很好的固持效应。Beesley^[6]向高 Cd、Cu 含量的土壤中添加生物质炭 60 d 后,土壤毛细管水中这两种重金属的浓度显著降低,其对土壤酶的抑制作用也有所下降;Khodadad 等^[7]研究认为,土壤中施加 Cd 可使微生物群落发生改变,从而引起土壤酶活性的变化,与本文的研究成果一致。Steiner 等^[8]发现通常土壤中生物质炭的施入量为 5%~10% 时,土壤呼吸及土壤微生物量与生物质炭量呈线性关系。由于生物质炭独特的物质组成及其自身特有的性质,使得其向土壤中的施入可以加速土壤中生物化学反应的活跃程度、土壤微生物的活性以及养分物质的循环状况^[9],进而改变土壤酶的活性,且其对土壤重金属污染具有很强的吸附及钝化效应。本文通过研究不同量的生物质炭重金属 Cd 的共同作用下水稻根际及非根际土壤碳循环酶及氧化还原酶活性的变化,得出当生物质炭的施入量为 10% 时,不同量的 Cd 添加下水稻根际及非

根际土壤的酶活性值均高于其他处理,表明 10% 的生物质炭施入量对不同浓度 Cd 污染土壤酶活均具有更好的恢复效果。

3.2 植物根际土壤与非根际土壤酶活性的差异性探究

由于植物根系的细胞组织脱落物和根系分泌物为根系微生物提供了丰富的营养和能量,植物根际的微生物数量和活性值普遍高于根外土壤,使得水稻根际土壤酶活性值通常高于非根际土壤的活性值。土壤各种酶的积累是土壤微生物、土壤动物和植物根系生命活动共同作用的结果,作物可以直接或间接地影响土壤酶含量。前人研究表明,根际土壤磷酸酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、水解酶的活性较非根际土壤均有增强^[10-11]。孟令军等^[12]对鹿蹄草根际及非根际土壤酶活性值测量得知,鹿蹄草的土壤酶也表现出根际酶活性较强的特性,根际土壤脲酶、转化酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶活性值比非根际土壤分别高出 32.04%、22.40%、30.57%、8.17%,与本文中水稻根际土壤酶活性值普遍高于非根际土壤酶活性值的事实一致。这是因为相对于非根际土壤,根际土壤中的可溶性有机碳(DOC)含量及 pH 值显著增高,根系分泌的可溶性有机物质与土壤中的 Cd 离子产生络合作用,导致根际土壤中的 Cd 较难解吸^[13],从而有效降低了重金属对土壤的危害,促进了根际土壤微生物的繁殖和生长,增加了重金属污染下作物体内酶的分泌和形成,最终显著提高了作物根际土壤酶的活性。齐晓娟^[14]通过探究羊蹄(*Rumex patientia*)的根际土壤微生物组成,得知相对于非根际土壤,羊蹄根际微生物群落更多,主成分分析结果显示,自生固氮菌、氨化细菌是根际土壤的最主要影响因子。同时,根际土壤酶活性值受作物的类别影响很大,形成原因可能与不同种类的作物其根际土壤微生物活性以及根际分泌物的组成不同有关。

3.3 土壤碳循环类酶及氧化还原类酶活性值的差异

马瑞萍等^[15-16]通过研究不同量的有机碳施入下黄土高原不同植物群落的土壤团聚体中的各种酶活性,结果表明土壤中碳循环类酶活性值的提高,有助于土壤活性有机碳含量增加;同时也有相关研究证明^[17]土壤氧化还原类酶活性值的提高,有助于土壤腐殖质的积累,从而从根本上提高土壤肥力。牛文静等^[18]研究表明,外源有机物料的施入显著提高了土壤中 200~2000 μm 和 <2 μm 两粒组中酶活性的综合指数,可见土壤酶活性综合指数可以较好反映土壤生物学性状,是土壤生物质量的综合评价指标。本文通过对土壤碳

循环酶及土壤氧化还原酶分别求取几何平均数作为衡量土壤中碳循环类酶及氧化还原类酶活性的指标,结果表明不同处理下的水稻根际及非根际土壤碳循环酶活性差值的平均数为3.024 9,显著高于不同处理下水稻根际及非根际土壤氧化还原酶活性差值的平均数0.262 6。可见在不同量生物质炭及重金属Cd的处理下,水稻根际土壤碳循环酶的活性值有大幅提高。这与前人^[19-21]向水稻土中施入有机肥显著提高了土壤中纤维素酶及FDA水解酶等土壤碳循环酶活性值的结论相吻合。

水稻根际土壤碳循环类酶活性的大幅提高可能是因为生物质炭的施入显著提高了土壤中有有机质及活性碳含量。马玉芳^[22]通过传统耕作及秸秆等有机肥还田耕作对比显示,后者能够大幅提高土壤有机碳含量,其含量分别较初始值增加了74.76%和71.13%,这些有机肥的施入,为纤维素酶及FDA水解酶等参与土壤碳循环的主要酶的酶促反应提供了大量易利用的底物,从根本上激发了水稻根际土壤碳循环类酶的活性。土壤氧化还原类酶的活性值升幅则较小,因为Cd的添加在很大程度上抑制了对重金属污染响应较为灵敏的氧化还原类土壤酶。

4 结论

(1)生物质炭的施入对土壤重金属污染的水稻根际土及非根际土均有显著的修复效应,当生物质炭施入量为10%,不同量的Cd添加下水稻根际及非根际土壤的酶活性值均高于其他处理。

(2)外加Cd处理下水稻根际土的碳循环酶综合活性值显著高于氧化还原酶综合活性值。

(3)水稻根际土壤碳循环酶的综合活性指数值随着生物质炭量的增加,其值总体上升;而根际土壤氧化还原酶的综合活性指数值则呈现先降后升的趋势。

参考文献:

- [1] 朱珊珊. 水稻根际土壤重金属形态分布及其对酶活性的影响[D]. 长沙:中南林业科技大学硕士学位论文, 2013.
ZHU Shan-shan. Effect of rice rhizosphere soil heavy metal speciation and activity of the enzyme[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2013.
- [2] 王海波. 秸秆生物质炭对污染土壤镉形态转化的影响及作用机制研究[D]. 昆明:云南农业大学硕士学位论文, 2015.
WANG Hai-bo. Effects of biochar form on Cd transformation in polluted soil and its mechanism[D]. Kunming: Yunnan Agriculture University, 2015.
- [3] Fellet G, Marchiol L, Delle Vedove G, et al. Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(9): 1262-1267.
- [4] Mendez A, Gomez A, Paz-Ferreiro J, et al. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1354-1359
- [5] 尚艺婕, 王海波, 史静. 外加镉处理下秸秆生物质炭对土壤酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(1): 20-25.
SHANG Yi-jie, WANG Hai-bo, SHI Jing. Effects of straw biomass charcoal on enzyme activity in Cd contaminated soil[J]. *Journal of Agricultural Resource and Environment*, 2015, 32(1): 20-25.
- [6] Beesley L, Moreno-Jimenez E, Gomez-Eyles J L, et al. Effects of biochar and green waste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(6): 2282-2287.
- [7] Khoddadad C L M, Zimmerman A R, Green S J, et al. Taxa-specific changes in soil microbial community composition induced by pyrogenic carbon amendments[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(2): 385-392.
- [8] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(6): 893-899.
- [9] 周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2075-2080.
ZHOU Gui-yu, DOU Sen, LIU Shi-jie. The structure characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2075-2080.
- [10] 黄剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
HUANG Jian. The effect of biochar application on soil microbial biomass and soil enzyme[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2013.
- [11] 刘皎, 曹靖, 南忠仁, 等. 白银市郊区重金属复合污染对土壤酶活性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(5): 38-42.
LIU Jiao, CAO Jing, NAN Zhong-ren, et al. Impact of heavy metal combined pollution on soil enzyme activity in Baiyin Region, Gansu Province[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition)*, 2010, 46(5): 38-42.
- [12] 孟令军, 更增超, 王海涛, 等. 秦岭太白山区鹿蹄草根际与非根际土壤养分及酶活性研究[J]. 西北农业大学学报(自然科学版), 2012, 5(5): 36-39.
MENG Ling-jun, GENG Zeng-chao, WANG Hai-tao, et al. Soil nutrients and enzyme activities of *Pyrola* in rhizosphere and non-rhizosphere on Mt. Taibai, Qinling Mountains[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2012, 5(5): 36-39.
- [13] 郭文娟, 梁雪峰, 林大松, 等. 土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3716-3721.
GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song et al. Adsorption of Cd²⁺ on biochar from aqueous solution[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(9): 3716-3721.
- [14] 齐晓娟. 羊蹄根际土壤微生物研究[D]. 长春: 吉林大学博士学位论

- 文, 2013.
- QI Xiao-juan. Study on microorganism of *Rumex Patientiaon* rhizosphere soil[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [15] 马瑞萍, 安韶山, 党廷辉, 等. 黄土高原不同植物群落土壤团聚体中有机碳和酶活性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 104-113.
- MA Rui-ping, AN Shao-shan, DANG Ting-hui, et al. Soil organic carbon and enzymatic activity in aggregates of soils under different plant communities in Hilly-Gully regions of Loess Plateau[J]. *Journal of Soil*, 2014, 51(1): 104-113.
- [16] 李鑫, 马瑞萍, 安韶山, 等. 黄土高原不同植被带土壤团聚体有机碳和酶活性的粒径分布特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2282-2290.
- LI Xin, MA Rui-ping, AN Shao-shan, et al. Characteristics of soil organic carbon and enzyme activities in soil aggregates under different vegetational zones on the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8): 2282-2290.
- [17] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 517-527.
- SHEN Fang-fang, YUAN Ying-hong, FAN Hou-bao, et al. Effect of nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 517-527.
- [18] 牛文静, 李恋卿, 潘根兴, 等. 太湖地区水稻土不同粒级团聚体中酶活性对长期施肥的响应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2181-2186.
- NIU Wen-jing, LI Lian-qing, PAN Gen-xing, et al. Responses of enzyme activities in different particle-size aggregates of paddy soil in Taihu Lake region of China to long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2181-2186.
- [19] 朱姗姗, 张雪霞, 王平, 等. 多金属硫化物矿区水稻根际土壤中重金属形态的迁移转化[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 944-952.
- ZHU Shan-shan, ZHANG Xue-xia, WANG Ping, et al. Effect of rhizospheric environment of rice on bioavailability and mobility of Cd, Cu, Pb, and Zn in AMD polluted paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 944-952.
- [20] 李金娟, 张雪霞, 王平, 等. 多金属硫化物矿区不同品种水稻根际土壤酶活性的变化[J]. 生态环境学报, 2013, 22(11): 1830-1836.
- LI Jin-juan, ZHANG Xue-xia, WANG Ping, et al. Rhizosphere effect of enzymes under different rice varieties grown in ADM polluted paddy soil[J]. *Ecological and Environmental Sciences*, 2013, 22(11): 1830-1836.
- [21] 王义祥, 叶菁, 肖生美, 等. 铺料厚度对双孢蘑菇栽培过程酶活性和CO₂排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2418-2425.
- WANG Yi-xiang, YE Qing, XIAO Sheng-mei, et al. Effects of substrate thickness on CO₂ emissions and enzyme activities of substrates during *agaricus bisporus* cultivation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12): 2418-2425.
- [22] 马玉芳, 蔡立群, 张仁陟. 不同耕作措施下土壤有机碳含量的模拟研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1546-1554.
- MA Yu-fang, CAI Li-qun, ZHANG Ren-zhi. Study on the simulation of soil organic carbon content under different Tillage Modes[J]. *Journal of Natural Resource*, 2011, 26(9): 1546-1554.