

北方旱寒区冬油菜不同后茬作物根际与非根际土壤肥力研究

杨刚^{1,2,3}, 孙万仓^{1,2,3}, 王丽萍^{1,2,3}, 慕平^{2,3}, 刘自刚^{1,2,3}, 李学才^{1,2,3},
杨宁宁^{1,2,3}, 孔德晶^{1,2,3}, 鲁美宏^{1,2,3}

(1. 甘肃省油菜工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物重点实验室/
甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 以脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和磷酸酶4种土壤酶活性及土壤理化性状为指标, 研究了冬油菜后茬作物油菜、胡麻、玉米和小麦的根际与非根际土壤肥力状况。结果表明, 4种作物的根际与非根际土壤肥力差异较大。根际土壤的酶活性与理化性状均显著高于休闲对照, 而非根际土壤只有脲酶、有机质含量和速效氮等优于休闲对照。相关性分析表明土壤酶与理化性状之间相关性较大, 它们都是评价土壤肥力的重要指标。利用隶属函数法将各土壤肥力分为3级, 各处理肥力状况依次为: 小麦根际($\bar{F} = 0.72$) > 胡麻根际($\bar{F} = 0.61$) > 油菜根际($\bar{F} = 0.56$) > 玉米非根际($\bar{F} = 0.44$) > 胡麻非根际($\bar{F} = 0.39$) > 小麦非根际($\bar{F} = 0.38$) > 玉米根际($\bar{F} = 0.37$) > 油菜非根际($\bar{F} = 0.29$) > 休闲 CK($\bar{F} = 0.15$)。分析结果表明各项指标采用隶属函数法综合评价冬油菜不同后茬作物根际与非根际土壤肥力是可行的。

关键词: 冬油菜; 后茬作物; 土壤肥力; 根际与非根际土壤

中图分类号: S154.2; S634.3 **文献标志码:** A

Study on rhizosphere and non-rhizosphere soil fertilities of different crops after harvest of winter rape in the north dry-cold area

YANG Gang^{1,2,3}, SUN Wan-cang^{1,2,3}, WANG Li-ping^{1,2,3}, MU Ping^{2,3}, LIU Zi-gang^{1,2,3},
LI Xue-cai^{1,2,3}, YANG Ning-ning^{1,2,3}, KONG De-jing^{1,2,3}, LU Mei-hong^{1,2,3}

(1. Rapeseed Engineering Research Center of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Sciences, Improvement and Key
Laboratory of Crop Genetics and Germplasm Enhancement, Lanzhou, Gansu 730070, China;
3. Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To investigate rhizosphere and non-rhizosphere soil fertilities of different crops after harvest of winter rape, including rape, flax, corn and wheat, activities of four soil enzymes (urease, catalase, invertase and phosphatase) and physicochemical indexes were examined. The results showed that there were considerable differences in rhizosphere and non-rhizosphere soil fertilities among the four crops. Rhizosphere soil enzyme activities and the physicochemical indexes were significantly higher than fallow control. Nevertheless, non-rhizosphere were only superior in urease, available N and organic matter contents. Correlation analysis showed that activities of soil enzymes had certain correlations with physicochemical indexes, both of which were important for evaluations of soil fertilities. In addition, rhizosphere and non-rhizosphere soil fertilities of different crops could be divided into three levels by a subsection function method. The fertility levels of different crops were as the follows: wheat rhizosphere soil ($\bar{F} = 0.72$) > flax rhizosphere soil ($\bar{F} = 0.61$) > rapeseed rhizosphere soil ($\bar{F} = 0.56$) > maize non-rhizosphere soil ($\bar{F} = 0.44$) > flax non-rhizosphere soil ($\bar{F} = 0.39$) > wheat non-rhizosphere soil ($\bar{F} = 0.38$) > maize rhizosphere soil ($\bar{F} = 0.37$) > rapeseed non-rhizosphere soil (\bar{F}

收稿日期: 2014-05-08

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2011AA10A104); 国家公益性行业(农业)科研专项(200903002-04); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-13)

作者简介: 杨刚(1988—), 男, 甘肃会宁人, 硕士研究生, 研究方向为油菜遗传育种。E-mail: yangang1018@163.com。

通信作者: 孙万仓(1957—), 男, 甘肃会宁人, 教授, 博士, 主要从事油菜育种及十字花科种质资源研究。E-mail: 18293121851@163.com。

$= 0.29) > \text{fallow CK} (\bar{F} = 0.15)$. It was concluded that it was feasible to evaluate the soil fertility by using subordinate function method with multiple indexes.

Keywords: winter rape; after crop; soil of rhizosphere and non-rhizosphere; soil fertility

自孙万仓等^[1]提出冬油菜向北方旱寒区北移的可行性后,近年冬油菜北移工作已取得了显著成就,育成了多个适宜北方旱寒区不同生态条件的“陇油”系列超强抗寒白菜型冬油菜品种。冬油菜的成功北移,扩大了我国北方的种植面积,产生了巨大的生态效益和经济效益。冬油菜秋季播种,在冬春季根部有效地固定了土壤,并在地表形成较厚的植被层,有效地减少了沙尘来源,显著改善了生态环境^[2];同时冬油菜产量和含油率均高于春油菜和胡麻,冬油菜在 4 月到 5 月份收获后还可种植其它作物,将北方一年一熟制变为一年两熟或两年三熟,经济效益可观。

土壤肥力与土壤的酶和理化性状密切相关^[3-5],作物根际是作物根系生长发育、营养成分吸收和新陈代谢的场所^[6-7],根际土壤酶的种类和活性对土壤养分的有效化产生较大影响,从而影响作物的吸收和利用。国内外有关土壤酶活性和养分的研究较多^[8-10,25],但对冬油菜茬口效应方面的研究鲜有报道。主要原因是冬油菜在北方旱寒区的种植还没引起许多研究者的重视,对冬油菜研究的人员较少。由于不同作物根际和非根际中不同种类土壤酶的活性和理化性状不同^[11],因此本研究选择了脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和土壤磷酸酶 4 种土壤酶及土壤理化性状作为研究对象,研究和比较了冬油菜后茬几种不同作物根际和非根际的肥力状况,旨在为北方冬油菜推广应用提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2012 年 4 月份在秦王川冬油菜育种试验田(36°27′~36°43′N, 103°31′~103°43′E, 海拔 1 850~2 300 m)和甘肃农业大学土壤分析实验室进行。试验地地势平坦,肥力均匀中等,前茬为冬油菜,灌溉方便。试验设置 5 个处理,后茬分别为小麦、胡麻、玉米、油菜和休闲对照。试验采用随机区组设计,每个处理重复 3 次,共 15 个小区,小区面积为 3 m×3 m。小麦品种为甘肃省农科院粮作所选育的陇春 23 号;胡麻品种为天亚 9 号,由甘肃农业职业技术学院选育而成;玉米和油菜品种为甘肃农业大

学选育的富农 1 号和陇油 9 号。播种时施用基肥:N(尿素,含氮量约为 46.4%)130 kg·hm⁻², P₂O₅(磷酸二铵,总氮 16%,有效磷 44%)110 kg·hm⁻², K₂O(氯化钾,含 K₂O 60%)80 kg·hm⁻²;生育期间进行人工除草,每隔 15 d 左右灌水一次。

1.2 研究方法

1.2.1 土样的采集 待四种作物生长 90 d 左右开始取样。根际土壤取植株直根系与须根系间土壤,非根际土壤取株行间深 0~20 cm 土壤。每个小区采样 200 g,装于自封袋,带回实验室以待分析。

1.2.2 土样贮藏 将采集来的土样风干,用土壤粉碎机粉碎,再将风干的土样通过 1~2 mm 筛,并保存在密闭的容器里和置于阴凉的地方。

1.2.3 土壤酶活性分析方法 土壤酶测定方法根据关松荫等^[12]编著的《土壤酶及其研究方法》进行,脲酶用苯酚钠-次氯酸钠比色法、过氧化氢酶用高锰酸钾滴定法、磷酸酶用磷酸苯二钠比色法、蔗糖酶用 3,5-二硝基水杨酸比色法。

1.2.4 土壤理化性质的测定 土壤 pH 值采用酸度计测定;土壤有机质采用硫酸-重铬酸钾硝化滴定法;土壤全氮采用凯氏定氮法;速效氮含量采用碱解蒸馏法;全磷采用高氯酸-硫酸酸溶-钼锑抗比色法,有效磷含量采用碳酸氢钠法,有效钾含量采用火焰光度计测定。上述所有指标均参照鲍士旦^[13]编著的《土壤农化分析》进行。

1.2.5 肥力综合评价 肥力综合评价采用各项指标的平均隶属函数度进行评价^[14-15],因各指标含量不可能为零,所以它们的作物效应曲线为 S 型,采用 S 型隶属度函数,并把曲线型函数转化为相应的折线型函数,以利于计算。相应的隶属度函数折线如图 1 所示,折点 x_2 和 x_1 分别为各指标最大值和最小值。由于各指标介于 x_1 和 x_2 ,所以隶属度值在 0.1~1.0 之间。隶属度计算方法如下:

$$F(x) = (x - x_1)/(x_2 - x_1) \times 0.9 + 0.1$$

$$\text{平均隶属度 } \bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F(x_i)$$

1.2.6 试验数据处理 利用 Excel 2010 整理数据,Spss19.0 进行方差和相关性分析,多重比较采用 S-N-K 法,Orange8.0 软件进行作图。

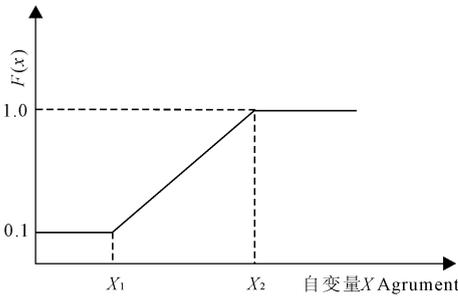


图1 S型隶属度函数曲线

Fig.1 Curve of subjection function for S type

2 结果与分析

2.1 冬油菜不同后茬作物根际与非根际土壤酶活性比较

2.1.1 根际与非根际土壤脲酶活性比较 脲酶存在于大多数细菌、真菌和高等植物中,是一种专性酶,能专一地水解尿素,促其水解生成氨和 CO₂,其中氨是植物氮素营养的直接来源^[17]。在微生物产生的脲酶作用下,分解植物可利用的物质,从而提高了土壤肥力。因此,脲酶活性可用来表征土壤中有有机态氮的转化状况和土壤氮素的供应程度。从图2看出,各茬口土壤脲酶活性均高于对照,达到显著水平,胡麻根际和非根际脲酶活性最高,较对照高出588.8%和320.5%,小麦茬口次之,与对照相比高出377.6%和320.5%,而油菜和玉米茬口较对比分别高247.1%、227.9%和232.7%、209.0%;就同一茬口而言,根际土壤脲酶活性高于非根际,主要是由于根际土壤离植物根系近或根系附近土壤微生物多,分泌的脲酶多,其中胡麻根际脲酶活性显著高于非根际,其余差异不明显。

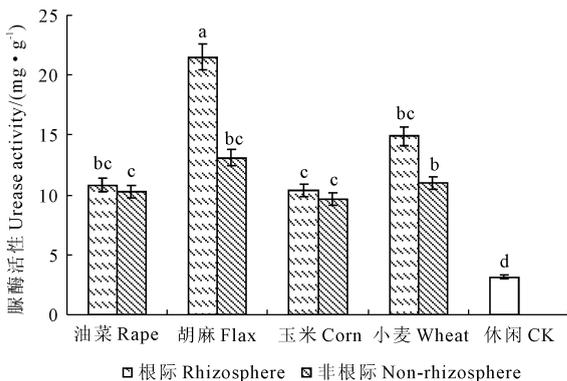


图2 不同后茬作物根际与非根际土壤脲酶活性比较

Fig.2 Comparisons of urease activities of different crops after harvest between rhizosphere and non-rhizosphere soils

注:多重比较采用S-N-K法,图中不同小写字母表示在0.05水平上有差异($P < 0.05$),下同。

Note: Lowercase letters indicated significant differences according to S-N-K multi-comparison analysis ($P = 0.05$) and hereinafter.

2.1.2 根际与非根际土壤过氧化氢酶活性比较 过氧化氢主要来源于细菌、真菌以及植物根系的分泌物,它是由生物呼吸过程和有机物的生物化学氧化反应产生的,这些过氧化氢对生物和土壤均具有毒害作用。与此同时,在生物体和土壤中又存在过氧化氢酶,它能促进过氧化氢分解为水和氧的反应,从而解除过氧化氢的毒害作用。所以测定过氧化氢酶活性可以反映土壤中有有机氧化过程。过氧化氢酶是参与土壤中物质和能量转化的一种重要的氧化还原酶,具有分解土壤中对植物有害的过氧化氢物的作用,在一定程度上反映了土壤生物化学过程的强度^[16]。从图3可以看到,各茬口作物根际与非根际过氧化氢酶活性比对照都高,但只有油菜和胡麻的根际与非根际以及玉米的根际达到显著水平,其它与对照无差异。胡麻、油菜、玉米根际过氧化氢酶活性分别比对照高出41.0%、29.9%和25.0%,非根际过氧化氢酶活性胡麻最高,比对照高出37.5%,油菜高21.5%,玉米和小麦与对照无显著差异;由于根际土壤离根系近、微生物数量多等众多因素,使得根际过氧化氢酶活性高于非根际,差异不显著,其中小麦高出65.3%,油菜为6.9%,胡麻和玉米分别高2.6%和12.3%。

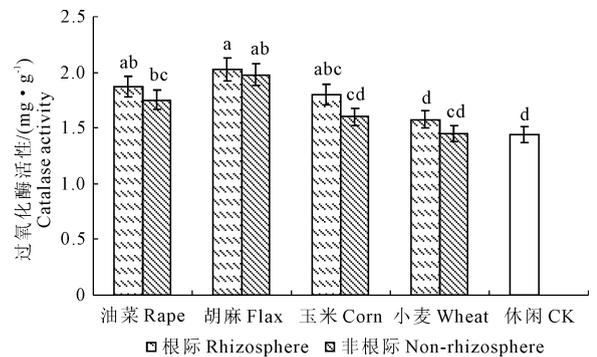


图3 不同后茬作物根际与非根际土壤过氧化氢酶活性比较

Fig.3 Comparisons of catalase activities of different crops after harvest between rhizosphere and non-rhizosphere soils

2.1.3 根际与非根际土壤蔗糖酶活性比较 蔗糖酶是较为重要的一种酶,它所催化分解的基质-蔗糖是植物体中最丰富的可溶性糖类,而生成的产物D-葡萄糖又是植物和微生物的重要养料来源^[17]。图4为各处理蔗糖酶活性对比,从图看到各处理的根际土壤蔗糖酶活性比对照高出许多,达到显著或极显著水平,可能是由于冬油菜在轮作中残体遗留在土壤,分解释放大量的蔗糖酶,其中,小麦根际蔗糖酶活性最高,较对照高出135.4%,油菜次之,比对照高出54.0%,胡麻和玉米分别为43.3%和12.0%;小麦、油菜和胡麻各处理的非根际土壤蔗糖

酶活性较对照高 39.3 、 30.3 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 21.8 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ，玉米相差不大；根际与非根际之间差异显著，小麦、油菜、胡麻和玉米根际比非根际依次高出 69.0% 、 18.2% 、 17.6% 和 10.5% 。

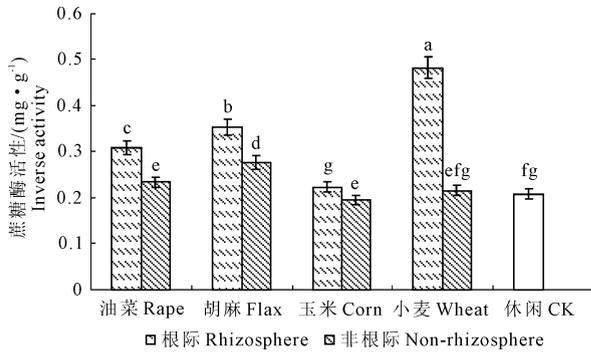


图 4 不同后茬作物根际与非根际土壤蔗糖酶活性比较

Fig. 4 Comparisons of inverse activities of different crops after harvest between rhizosphere and non-rhizosphere soils

2.1.4 根际与非根际土壤磷酸酶活性比较 土壤中的磷,大部分是以有机磷化合物形式存在的,磷酸酶能促使有机磷化合物的水解。土壤的磷酸酶活性,在很大程度上取决于土壤的腐殖质含量、有效磷含量、分解有机磷化合物的微生物数量和植物种类^[18]。秦王川土地多为盐碱地,酸性或中性磷酸酶含量微小,不方便测定,所以只测定了碱性磷酸酶,从图 5

看到,小麦根际土壤碱性磷酸酶活性远远高于其它处理水平,较对照高出 128.6% ,达到显著水平,胡麻、油菜和玉米分别较对照高出 66.7% 、 47.6% 和 4.6% ;非根际之间差异不大,胡麻、油菜和小麦分别比对照高出 33.3% 、 9.5% 、 4.7% ;小麦根际较非根际高 118.2% ,油菜高 34.8% ,胡麻为 25.0% ,玉米高出 9.1% 。

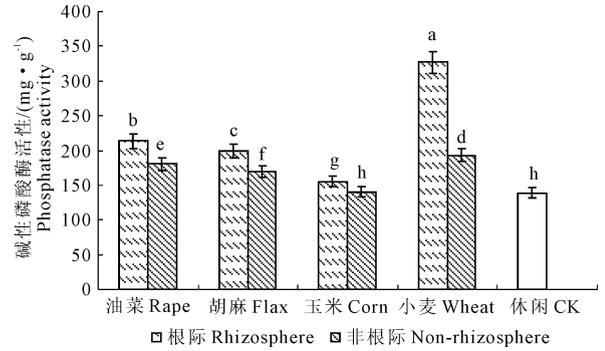


图 5 不同后茬作物根际与非根际土壤碱性磷酸酶活性比较

Fig. 5 Comparisons of phosphatase activities of different crops after harvest between rhizosphere and non-rhizosphere soils

2.2 冬油菜不同后茬作物根际与非根际土壤理化性状对比

冬油菜不同后茬作物根际与非根际土壤理化性状见表 1。

表 1 冬油菜不同后茬作物根际与非根际土壤理化性状含量

Table 1 Comparisons of physicochemical indexes on different crops after harvest between rhizosphere and non-rhizosphere soils

处理 Treatment	pH	有机质 OM $\text{/(g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)}$	全氮 Total N $\text{/(g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)}$	速效氮 Available N $\text{/(mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)}$	全磷 Total P $\text{/(g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)}$	速效磷 Available P $\text{/(mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)}$	速效钾 Available K $\text{/(mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)}$
油菜根际 Rhizosphere of rapa	6.96b	$17.06 \pm 0.09b$	$0.31 \pm 0.01c$	$24.77 \pm 0.31c$	$0.49 \pm 0.01a$	$18.16 \pm 0.18c$	$165.47 \pm 1.56b$
油菜非根际 Non-rhizosphere of rapa	7.02b	$15.05 \pm 0.08d$	$0.29 \pm 0.02c$	$22.77 \pm 0.23d$	$0.33 \pm 0.01d$	$13.59 \pm 0.18g$	$153.33 \pm 1.96c$
胡麻根际 Rhizosphere of flax	8.05a	$17.74 \pm 0.34b$	$0.33 \pm 0.01b$	$26.49 \pm 0.26b$	$0.41 \pm 0.01b$	$24.65 \pm 0.25a$	$139.40 \pm 1.28e$
胡麻非根际 Non-rhizosphere of flax	8.11a	$16.16 \pm 0.10c$	$0.30 \pm 0.01c$	$19.45 \pm 0.47f$	$0.34 \pm 0.02cd$	$15.49 \pm 0.30f$	$126.27 \pm 1.27h$
玉米根际 Rhizosphere of corn	8.32a	$18.52 \pm 0.46a$	$0.34 \pm 0.01b$	$35.04 \pm 0.07a$	$0.37 \pm 0.01bc$	$16.39 \pm 0.30e$	$135.50 \pm 1.04f$
玉米非根际 Non-rhizosphere of corn	8.23a	$15.84 \pm 0.21c$	$0.33 \pm 0.01b$	$24.50 \pm 0.27c$	$0.36 \pm 0.04bcd$	$15.55 \pm 0.23f$	$131.10 \pm 1.25g$
小麦根际 Rhizosphere of wheat	8.25a	$17.41 \pm 0.50b$	$0.38 \pm 0.01a$	$26.27 \pm 0.29b$	$0.38 \pm 0.02bc$	$21.50 \pm 0.39b$	$198.63 \pm 1.41a$
小麦非根际 Non-rhizosphere of wheat	8.14a	$15.80 \pm 0.50c$	$0.34 \pm 0.00b$	$20.45 \pm 0.51e$	$0.38 \pm 0.00bc$	$16.43 \pm 0.46e$	$148.00 \pm 2.10d$
休闲对照 Fallow CK	8.25a	$13.45 \pm 0.38e$	$0.31 \pm 0.01c$	$19.35 \pm 0.72f$	$0.32 \pm 0.01d$	$17.18 \pm 0.61d$	$135.20 \pm 1.38f$

注:表中数值后同列不同小写字母表示在 0.05 水平上有差异 ($P < 0.05$)。

Note: the data followed with different letters in the column indicated significant difference at the 0.05 level ($P < 0.05$).

从表 1 中可以看出,四种茬口土壤养分各指标基本上都优于休闲对照,其中油菜根际与非根际土壤 pH 为 6.96 和 7.02,呈中性,与对照差异显著,其它茬口作物土壤 pH 均大于 8.0,呈弱碱性,与对照无显著差异。各后茬作物的有机质含量均显著高于

对照,其中玉米根际为最高 (18.52 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),较对照 (13.45 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 高出 37.7% ,并且各茬口根际显著高于非根际。就全氮而言,油菜根际与非根际土壤和胡麻非根际与对照无显著差异,小麦和玉米根际和非根际土壤较对照达到显著水平,较对照高出

22.6%、9.7%和9.7%、6.4%。各处理速效氮含量差异显著,胡麻非根际与对照无显著差异外,其它处理均显著高于对照。油菜根际土壤全磷含量高达 $0.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于对照;各茬口根际显著高于对照,非根际与对照无显著性差异。油菜、胡麻和小麦根际土壤速效磷含量显著高于对照外,其它处理低于对照。北方土壤一般钾含量比较充足,通过试验测定,小麦根际土壤含量最高,为 $198.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,胡麻非根际最低,为 $126.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,玉米根际和非根际土壤速效钾含量也比较低,说明玉米对钾的需求量较大。

2.3 根际与非根际土壤酶活性和土壤养分的相关性分析

土壤酶活性和理化性状是影响土壤养分的主要因素,两者之间存在着一定的相关性,但由于根际和非根际土壤与作物根系距离不同,微生物数量和环境不同,我们分别就根际和非根际土壤酶活性与理化性状之间做了相关性分析。从表2可以看出,根际脲酶与速效氮在0.05水平上呈显著正相关($r_{0.05} = 0.603$),与速效磷在0.01水平上呈显著正相关($r_{0.01} = 0.782$),而非根际脲酶与速效氮在0.05水平上呈显著负相关($r_{0.05} = -0.618$);根际过氧化氢酶与全氮和速效钾在0.05水平上呈显著负相关($r_{0.05} = -0.650, -0.607$),非根际过氧化氢酶只与全氮在0.05水平负相关($r_{0.05} = -0.610$);根际碱性磷酸酶与全氮在0.05水平显著正相关($r_{0.05} = 0.697$),与速效钾在0.01水平显著正相关($r_{0.01} = 0.897$),非根际碱性磷酸酶与速效氮在0.01水平显著负相关($r_{0.01} = 0.854$),与速效钾在0.01水平显著正相关($r_{0.01} = 0.866$);根际蔗糖酶与全氮和速效磷在0.05

水平呈正相关($r_{0.05} = 0.625, 0.688$),与速效氮和速效钾在0.01水平呈显著正相关($r_{0.01} = 0.775, 0.718$),非根际蔗糖酶与土壤各理化性状相关性不大。

2.4 根际与非根际土壤肥力综合评价

通过各指标的平均隶属度可将试验中的土壤分为3级(表3)。0.60~1.0为肥沃,定为I级;0.30~0.59为中等,定为II级;0.10~0.15为贫瘠,定为III级。从表3中看出各作物根际与非根际肥力状况依次为:小麦根际($\bar{F} = 0.72$) > 胡麻根际($\bar{F} = 0.61$) > 油菜根际($\bar{F} = 0.56$) > 玉米非根际($\bar{F} = 0.44$) > 胡麻非根际($\bar{F} = 0.39$) > 小麦非根际($\bar{F} = 0.38$) > 玉米根际($\bar{F} = 0.37$) > 油菜非根际($\bar{F} = 0.29$) > 休闲CK($\bar{F} = 0.15$)。可见小麦和胡麻根际肥力较高,而玉米根际较小。

3 讨论与结论

3.1 不同作物根际与非根际土壤酶活性的差异

根际土壤酶研究一直是近年来土壤酶学研究的重点。许多植物会不断自我改善根际的营养状况,产生特定的土壤酶^[19]。根系的纤细顶端在其整个生命过程中不断地往土壤中分泌出相对分子量低的糖类、酶、氨基酸和有机酸,死后则将其酶器富集在土壤里^[20],所以根际土壤是植物与土壤直接进行物质交换的最为活跃的场所。李文革等^[21]研究认为,脲酶、磷酸酶、转化酶从本质上反映了土壤中氮、碳、磷、钾的转化强度,因而研究植物根际土壤酶活性对于探索植物和土壤的相互作用过程和机理具有极其重要的作用。本研究表明,胡麻根际土壤脲酶和过氧化氢酶活性最高,能够高效水解尿素和过氧

表2 不同后茬作物根际与非根际土壤酶活性和土壤理化性状的相关性分析

Table 2 The correlations of enzyme activities and physicochemical indexes of rhizosphere and non-rhizosphere soils

处理 Treatment	土壤酶 Enzyme	pH	有机质 OM	全氮 Total N	速效氮 Available N	全磷 Total P	速效磷 Available P	速效钾 Available K
根际 Rhizosphere	土壤脲酶 Urease	0.126	-0.081	-0.127	0.603*	0.018	0.782**	-0.56
	过氧化氢酶 Catalase	-0.480	0.549	-0.650*	0.125	0.474	0.389	-0.607*
	碱性磷酸酶 Phosphatase	0.142	-0.175	0.697*	0.567	-0.055	0.414	0.897**
	蔗糖酶 Invertase	0.132	-0.129	0.625*	0.775**	0.007	0.688*	0.718**
非根际 Non-rhizosphere	土壤脲酶 Urease	0.353	0.110	0.301	-0.618*	0.367	0.360	0.187
	过氧化氢酶 Catalase	-0.058	0.214	-0.610*	0.014	-0.516	-0.161	-0.357
	碱性磷酸酶 Phosphatase	-0.293	-0.549	-0.219	-0.854**	-0.081	-0.277	0.866**
	蔗糖酶 Invertase	-0.097	0.030	-0.557	-0.410	-0.485	-0.225	-0.144

注: * 表示在0.05水平(双侧)上达到了显著, ** 表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

Note: * indicated that it had significant difference at the 0.05 level(double side), ** indicated that it had significant difference at the 0.01 level(double side).

表 3 根际与非根际土壤各指标隶属度及肥力分级
Table 3 Evaluations of rhizosphere and non-rhizosphere soil fertilities

处理 Treatment	指标隶属度 SF of all indexes										平均隶属度 Average of SF	土壤肥力 Soil fertility	位次 Precedence
	脲酶 Urease	过氧化氢酶 Catalase	碱性磷酸酶 Phosphatase	蔗糖酶 Invertase	有机质 OM	全氮 Total N	速效氮 Available N	全磷 Total P	速效磷 Available P	速效钾 Available K			
小麦根际 Wheat	0.68	0.31	1.00	1.00	0.52	1.00	0.50	0.41	0.74	1.00	0.72	I	1
胡麻根际 Flax	1.00	1.00	0.39	0.59	0.58	0.51	0.51	0.56	1.00	0.00	0.61	I	2
油菜根际 Rape	0.48	0.76	0.46	0.46	0.74	0.26	0.41	1.00	0.47	0.59	0.56	II	3
玉米非根际 Corn	0.42	0.35	0.11	0.10	1.00	0.65	1.00	0.37	0.33	0.07	0.44	II	4
胡麻非根际 Flax	0.59	0.92	0.25	0.35	0.86	0.17	0.11	0.18	0.25	0.18	0.39	II	5
小麦非根际 Wheat	0.49	0.12	0.36	0.16	0.80	0.66	0.16	0.43	0.33	0.30	0.38	II	6
玉米根际 Corn	0.46	0.65	0.18	0.19	0.53	0.56	0.40	0.32	0.26	0.13	0.37	II	7
油菜非根际 Rape	0.45	0.58	0.30	0.22	0.38	0.10	0.30	0.12	0.10	0.37	0.29	II	8
休闲对照 Fallow CK	0.10	0.10	0.10	0.14	0.10	0.26	0.10	0.10	0.39	0.12	0.15	III	9

化氢,提高氮素水平和减少过氧化氢的毒害;小麦根际土壤蔗糖酶和碱性磷酸酶活性最高,与其它处理均达到极显著水平,蔗糖酶可以促进植物体蔗糖的分解,而分解物又能很好地被植物吸收,蔗糖酶^[22]活性高,对作物轮作和秸秆还田等具有重要意义,磷酸酶能水解土壤中的有机磷化物,为植物提供生长所需的磷。

国内外有关非根际土壤酶学的报道相对根际土壤酶学较少,有研究表明,非根际土壤酶的种类和活性与植物的根系分泌物、植物残体和凋落物种类的数量、质量、凋落时间等因素密切相关^[23]。一方面,植物残体和凋落物的腐解体释放出的酶进入土壤中,提高土壤酶活性;另一方面,由于凋落物生物区系的变化,尤其是微生物的数量升高,土壤酶活性也会升高。从本研究中看到,各后茬作物非根际土壤的四种酶活性之间相差不大,胡麻非根际土壤酶各指标最高。

当前诸多报道指出,根际土壤的土壤酶活性比非根际土壤高。本研究中,四种不同后茬作物根际土壤的四种酶活性均高于非根际,与前人研究相吻合。

3.2 冬油菜不同后茬作物根际与非根际土壤理化性状的差异

从以上分析可以看到,各茬口作物对土壤 pH 值影响不大,只有油菜茬口根际土壤 pH 值接近中性,起到了改善土壤盐碱性的作用;而氮磷钾和有机质含量基本都高于对照,达到显著水平;而各茬口之间,小麦的全氮和速效钾含量最高,玉米的速效氮含量最高,油菜的全磷含量最高,胡麻的速效磷和有机质含量最高,与其它处理相比,达到显著水平。

3.3 土壤酶与土壤养分的相关性

土壤酶活性与土壤肥力养分的关系一直争论不休,基本上存在两种观点,一种观点认为,酶活性作为土壤养分评价参数是可行的^[24-25],另一观点对土壤酶活性能否作为土壤养分指标持有争议和怀疑。本试验的研究结果表明,土壤各酶活性与土壤养分表现出了良好的相关性,其中碱性磷酸酶和蔗糖酶与 pH 值呈显著负相关,脲酶活性与速效氮含量呈显著正相关,过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性与速效磷含量呈显著正相关,蔗糖酶与有机质呈显著正相关。从而表明,土壤酶、土壤养分之间存在着密切的联系,它们之间相互依存,相互影响,对土壤生态系统的稳定和维持,以及土壤生产力的可持续性上起着决定性的作用。

3.4 用隶属函数法评价土壤肥力的可行性

土壤肥力综合评价方法很多,主要有因子分析法、聚类分析法、判别分析法、主分量分析法(主成分分析法、主因素分析法)、因子加权综合法等^[26]。隶属函数分析提供了在多指标测定的基础上对材料进行综合评价的方法,在评价土壤肥力中简单易行。根据本研究,可将试验中的土壤分为 3 级。各作物根际与非根际肥力状况依次为:小麦根际($\bar{F} = 0.72$) > 胡麻根际($\bar{F} = 0.61$) > 油菜根际($\bar{F} = 0.56$) > 玉米非根际($\bar{F} = 0.44$) > 胡麻非根际($\bar{F} = 0.39$) > 小麦非根际($\bar{F} = 0.38$) > 玉米根际($\bar{F} = 0.37$) > 油菜非根际($\bar{F} = 0.29$) > 休闲对照($\bar{F} = 0.15$)。从而表明小麦和胡麻在与冬油菜轮作中根际肥力较其它作物高。

本研究表明,冬油菜不同后茬作物土壤酶活性显著提高,养分状况良好,土壤得到明显改善。究其原因,一方面,油菜根系发达可使根系残渣分布于土

壤深层,起到近似土壤深耕的作用;另一方面,由于每年都栽培不同的作物,微生物也呈现异质状态,就容易促进土壤养分的有效化;而且还应充分考虑到,由于实施轮作,使土壤各层次具有良好的物理性能,有利于根系生长深入土层,增强根系的活化能力,从而使土壤各层的养分有效地为作物所吸收。

参考文献:

- [1] 孙万仓,马卫国,雷建民,等.冬油菜在西北旱寒区的适应性和北移的可行性研究[J].中国农业科学,2007,40(12):2716-2726.
- [2] 孙万仓.北方旱寒区冬油菜栽培技术[M].北京:中国农业出版社,2013.
- [3] Aon M A, Colaneri A C. II. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(3):255-270.
- [4] Oliver D P, Bramley R G V, Riches D, et al. Review: soil physical and chemical properties as indicators of soil quality in Australian viticulture[J]. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2013, 19(2):129-139.
- [5] Page A L. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties [M]. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1982.
- [6] Eshel A, Beeckman T. Plant roots: the hidden half [M]. Florida: CRC Press, 2013.
- [7] Singh P, Rai R K, Suman A, et al. Ratooning induced rhizospheric changes impede nutrient acquisition and growth in sugarcane ratoon crop during grand growth stage in sub-tropics[J]. *Sugar Tech*, 2013, 15(1):52-64.
- [8] Dick R P. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment [M]. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1994:107-124.
- [9] Waring B G, Weintraub S A, Sinsabaugh R. Relationships among climate, soil nutrients, and enzyme stoichiometry in low-latitude ecosystems: A pan-tropical analysis [C]//98th ESA Annual Meeting, 2013.
- [10] 程红玉,肖占文,秦嘉海,等.连作对玉米制种田土壤养分和土壤酶活性的影响[J].土壤,2013,45(4):623-627.
- [11] 庞欣,张福锁,王敬国,等.根际土壤微生物量氮周转率的研究[J].核农学报,2001,15(2):106-110.
- [12] 关松荫,张德生,张志明.土壤酶及其研究方法[M].北京:中国农业出版社,1986.
- [13] 鲍士旦.土壤化学分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [14] 沈德福,史学正,吕成文,等.江苏沿江地区土壤肥力空间分布及其区域对比研究[J].长江流域资源与环境,2005,14(3):316-321.
- [15] 余贵连,何鹏,韦家少,等.海南省暗红湿润铁铝胶园土壤肥力综合评价及其变化初探[J].中国农学通报,2008,24(10):338-343.
- [16] 方 昉.不同年龄雷公藤根际微生物与土壤酶活性的研究[D].福州:福建农林大学,2009.
- [17] 赵 辉.烤烟生长期不同土壤类型对根际和非根际土壤生物活性的影响研究[D].郑州:河南农业大学,2010.
- [18] 周来良.干旱对根际土壤酶,氮磷钾及根部有机酸的影响[D].重庆:西南大学,2009.
- [19] Radersma S, Grierson P F. Phosphorus mobilization in agroforestry: organic anions, phosphatase activity and phosphorus fractions in the rhizosphere[J]. *Plant and Soil*, 2004, 259(1-2):209-219.
- [20] 杜伟文,欧阳中万.土壤酶研究进展[J].湖南林业科技,2006,32(5):76-79.
- [21] 李文革,刘志坚,谭周进,等.土壤酶功能的研究进展[J].湖南农业科学,2006,(6):34-36.
- [22] Hooper D U, Bignell D E, Brown V K, et al. Interactions between aboveground and belowground biodiversity in terrestrial ecosystems: patterns, mechanisms, and feedbacks [J]. *Bioscience*, 2000, 50(12):1049-1061.
- [23] DU T, BI Y, ZHANG J, et al. Effects of cracks on the rhizospheric environment of *Populus Cathayana* [J]. *Science & Technology Review*, 2013, 31(2):45-49.
- [24] 李双霖.应用聚类-主组元分析检验土壤酶活性作为土壤肥力指标的可行性[J].土壤通报,1990,21(6):272-274.
- [25] 武 琳,黄欠如,叶 川,等.香根草篱对红壤坡耕地坡面土壤酶活性的影响[J].土壤,2013,45(4):673-677.
- [26] 骆东奇,白 洁,谢德体.论土壤肥力评价指标和方法[J].土壤与环境,2002,11(2):202-205.