

乔继杰,马振朝,王 玮,等. 河北低平原夏玉米高产田土壤酶与肥力特征[J]. 江苏农业科学,2016,44(12):484-487.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.12.143

河北低平原夏玉米高产田土壤酶与肥力特征

乔继杰,马振朝,王 玮,张丽娟,刘会玲,郝晓然,吉艳芝

(河北农业大学资源与环境科学学院,河北保定 071000)

摘要:通过采集河北低平原曲周、辛集、深州、景县、吴桥、固安6个县(市)玉米高产田的土壤样品,研究夏玉米高产田土壤酶活性的变化特征与土壤理化性质、玉米产量的相关性。结果表明,除过氧化氢酶与产量呈显著正相关,其他3种酶与产量均呈极显著正相关,相关性大小依次为脲酶>蔗糖酶>磷酸酶>过氧化氢酶,相关系数分别为0.791 3、0.571 8、0.313 6、0.265 0。在酶与土壤理化性状方面,脲酶与土壤容重呈极显著负相关性,相关系数为-0.727 5,与总孔隙度呈极显著正相关,相关系数为0.729 8,其他3种酶与土壤物理性状没有明显相关性。脲酶与有机质、速效钾呈显著正相关,相关系数分别为0.656、0.219。全氮与4种酶均有极显著关系,相关性大小依次为蔗糖酶>磷酸酶>脲酶>过氧化氢酶,相关系数分别为0.771、0.757、0.734、0.723。磷酸酶与速效磷、速效钾均呈极显著正相关,相关系数分别为0.585、0.365。蔗糖酶、磷酸酶与pH值呈极显著负相关,相关系数分别为-0.731、-0.234。在4种酶之间,脲酶与磷酸酶、过氧化氢酶均呈极显著正相关,相关系数分别为0.344 6、0.279 5。磷酸酶与蔗糖酶呈极显著正相关性,相关系数为0.582 4。其他酶之间没有相关性。表明土壤酶是高产种植模式下的重要指标。

关键词:夏玉米;高产田;土壤酶;土壤肥力;河北低平原

中图分类号: S513.06 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)12-0484-04

玉米是我国重要的粮食作物,2013年,全国夏玉米种植面积达3 618.340万 hm^2 ,总产量达21 848.90万t,2014年总产量为21 564.63万t。河北省地处华北平原的北部,2013年,夏玉米播种面积为310.877万 hm^2 ,总产量达到1 730.92万t,低平原农区种植夏玉米历史悠久,面积和产量均居河北省首位^[1]。土壤肥力高低是影响作物产量的一个重要因素^[2],土壤肥力对玉米产量的贡献率为47.3%^[3]。土壤酶作为土壤组分中最为活跃的有机组分之一,参与土壤中的各种生物转化过程,不仅能够反映生物活性的高低,表征土壤养分转化的快慢,还可以作为评价土壤肥力高低的一个重要生物指标^[4],并与土壤理化特性、肥力状况和农业措施有显著的相关性^[5]。目前,我国正在大力提倡稳定现有高产田、培肥中低产粮田,以现有高产田为研究对象,研究土壤酶活性与土壤理化性质的关系,对解决高产、稳产、保障粮食安全具有重

要意义。

土壤酶与土壤肥力、作物产量之间息息相关,武晓森等通过研究不同施肥处理下玉米产量及其与土壤酶活性的关系发现,在夏玉米拔节期和大喇叭口期土壤酶(脲酶、过氧化氢酶、纤维素酶)活性与玉米产量具有极显著的正相关,拔节期相关系数分别为0.824**、0.896**、0.760**;大喇叭口期相关系数分别为0.678**、0.749**、0.869**,得出这3种酶可作为土壤的生物肥力指标^[6]。王灿等通过对长期不同施肥模式下土壤酶活性与肥力因素的研究,表明作物产量与土壤脲酶有极显著的相关性,相关系数为0.845**,与速效磷呈极显著正相关,相关系数为0.884**,与其他土壤养分的相关性不明显^[7]。Vance等以美国俄勒冈州山间荒地和红杉林为研究对象,发现土壤酶活性能更好地反映土壤有机质的累积,从而反映出土壤酶是土壤肥力的重要指标^[8]。邱丽萍等在长期定位试验中也发现,脲酶与有机质呈极显著正相关,相关系数为0.990**,与全氮、全磷也呈极显著正相关,而蔗糖酶与土壤养分没有明显的相关性^[9]。王改玲等研究表明,土壤酶参与土壤生物化学过程,是土壤的重要组分,能表征土壤中物质、能量代谢旺盛程度^[10]。赵林森等在杨槐混交林上的研究表明,脲酶活性与土壤有机质含量呈显著正相关,与全氮、碱解氮、速效磷呈极显著正相关,过氧化氢酶活性与土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷含量都存在一定的相关性,但均未达

收稿日期:2015-10-20

基金项目:国家科技支撑计划粮食丰产科技工程河北省项目区(编号:2013BAD07B05、2012BAD04B06、2011BAD16B08)。

作者简介:乔继杰(1992—),女,河北怀安人,硕士研究生,主要从事土壤环境质量方面的研究。E-mail:qiaojijiel23@sina.cn。

通信作者:吉艳芝,副教授,硕士生导师,主要从事土壤环境质量方向研究。E-mail:jiyanzhi@hebau.edu.cn。

[32]张海军. 两株拟除虫菊酯类农药降解菌的分离鉴定及其降解特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.

[33]王 莉. 甲胺磷降解菌株的分离鉴定、降解特性及菌株MAP-1的应用研究[D]. 南京:南京农业大学,2010.

[34]刘瑞江,张业旺,闻崇伟,等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理,2010,27(9):52-55.

[35]陈 翔,梁卫玖. 建立Excel宏快速处理正交试验设计数据[J].

中国卫生检验杂志,2009,19(11):2696-2697.

[36]董如何,肖必华,方永水. 正交试验设计的理论分析方法及应用[J]. 安徽建筑工业学院学报:自然科学版,2004,12(6):103-106.

[37]Wu L, Peng C Y, Peng Y Z, et al. Effect of wastewater COD/N ratio on aerobic nitrifying sludge granulation and microbial population shift[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(2):234-241.

显著水平^[11]。张炎华等研究发现,土壤脲酶与土壤有机质、全氮、全磷等指标均呈显著或极显著相关关系;磷酸酶与磷转化密切相关,是指示土壤管理系统集中和土壤有机质含量的重要指标^[12]。刘楠等以河北省山前平原的现有高产田和常规农田为研究对象,研究秸秆还田条件下夏玉米生长季土壤酶活性及生物特性的变化特征,结果高产田土壤磷酸酶活性、微生物量磷与土壤有机磷、有效磷呈显著正相关^[13-14]。侯鹏等通过在国家玉米工程技术研究中心试验场进行夏玉米生长季农田土壤微生物与酶活性的研究,结果超高产田土壤酶活性与土壤速效养分动态变化呈负相关^[15]。王冬梅等研究认为,长期施用有机肥能提高土壤中过氧化氢酶、转化酶与脲酶的活性,而氮肥对这 3 种酶则具有抑制作用^[16]。

关于土壤酶的动态变化、土壤酶与产量和土壤理化性质的研究也有相关报道,但研究均针对某个试验地点展开,而有关大区域、多样点的研究工作开展较少。本研究以河北省低平原农区的曲周、辛集、深州、景县、吴桥、固安等 6 个县(市)的玉米高产田为对象,研究高产栽培模式下土壤酶的变化特征以及与玉米产量、土壤理化性质的关系,以期明确土壤酶作为评价土壤肥力变化的可行性,为玉米高产田培肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取粮丰工程河北项目区低平原农区的曲周、辛集、固安、深州、景县、吴桥 6 个县(市)高产攻关田为研究区。该区域年平均气温为 11.0 ~ 13.3 ℃,年降水量为 550 ~ 650 mm,≥0 ℃积温为 4 500 ~ 5 100 ℃。该区主要为冬小麦、夏玉米两熟种植制度,高产田和对照田的夏玉米产量分别为 9.09、7.43 t/hm²;研究区以施化肥为主,高产田平均施 N、P₂O₅、K₂O 的量分别为 255、105、135 kg/hm²;对照田平均施 N、P₂O₅、K₂O 量分别为 375、150、90 kg/hm²。

表 1 河北省低平原夏玉米高产田土壤物理与化学性质

县域	容重 (g/cm ³)	总孔隙度 (%)	田间持水量 (%)	pH 值	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	CEC (cmol/kg)
固安	1.10	58.57	37.39	7.81	18.6	1.29	40.53	211.12	7.51
深州	1.12	57.91	29.27	7.92	24.8	1.53	32.32	312.60	10.44
景县	1.32	50.11	28.85	8.04	19.5	0.64	31.05	253.52	10.81
吴桥	1.17	55.74	37.07	8.78	19.1	0.71	26.45	194.58	6.42
曲周	1.33	49.91	25.10	7.95	13.5	0.96	14.07	112.19	12.41
辛集	1.23	53.51	26.74	8.32	15.7	1.28	16.69	146.44	6.60
平均值	1.21	54.29	31.86	8.14	18.5	1.07	26.85	205.08	9.03
标准差	0.10	3.76	4.99	0.36	0.38	0.36	10.01	72.28	2.51
变异系数	0.08	0.07	0.16	0.04	0.21	0.33	0.37	0.35	0.28

2.2 土壤酶活性

从表 2 可以看出,高产田土壤中脲酶含量变化范围在 0.73 ~ 1.50 NH₄⁺ - N mg/g,平均为 1.14 NH₄⁺ - N mg/g,固安县、深州市、辛集市的脲酶含量较其他县高,由于脲酶是土壤中唯一水解尿素的一种酶,可以用来表征土壤中的氮素水平高低,因此这 3 个县(市)的全氮含量也较其他县高。过氧化氢酶的变化范围在 2.71 ~ 3.83 mL/g,平均值为 3.36 mL/g,其中深州市、固安县、辛集市分别以 3.83、3.77、

1.2 试验设计

在夏玉米种植前采集 0 ~ 30 cm 的土样,每块高产攻关田采集 3 个样点,每个样点取 3 点,混合为 1 个土样,共采集 90 个土壤样品,同时采集相应的农民传统田为对照。将土样带回实验室,土样风干处理后测定土壤的理化性质和土壤酶活性。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤理化性质的测定 pH 值采用酸度计法;有机质采用重铬酸钾容量法;速效钾采用乙酸铵浸提火焰光度法;全氮用硫酸过氧化氢消煮蒸馏法;速效磷采用钼锑抗比色法;阳离子交换量采用醋酸铵浸提法。

1.3.2 土壤酶的测定 脲酶采用比色法,利用酶促作用产物氨与苯酚钠和次氯酸钠反应显色,在分光光度计上于波长 578 nm 处比色,以 24 h 后每克土 NH₄⁺ - N 的毫克数表示其活性;过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法,用高锰酸钾滴定反应剩余的过氧化氢,以 20 min 后每克土消耗 0.02 mol/L 高锰酸钾毫升数表示其活性;磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法;蔗糖酶采用比色法。

1.4 数据分析

采用 Excel 和 SPSS 17.0 软件进行数据及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

从表 1 可以看出,高产田土壤容重平均为 1.21 g/cm³,比对照田 1.26 g/cm³ 低;高产田总孔隙度为 54.29%,比对照田 52.28% 高;土壤有机质为 18.50 g/kg,全氮为 1.07 g/kg,按照我国第二次土壤普查的养分含量标准,有机质、全氮均处于中等水平;速效磷、速效钾分别为 26.85、205.08 mg/kg,处于高水平 and 富水平;土壤阳离子交换量为 9.03 cmol/kg,保肥能力稍低。表明夏玉米高产田土壤疏松,通透性较好,但应适当增施有机肥,控施磷钾肥,提高土壤的保肥能力。

3.60 mL/g 含量最高,由于过氧化氢酶是一种还原酶,参与土壤的物质和能量转化,尤其是在有机质氧化和腐殖质形成过程中起着十分重要的作用,其活性可以表征土壤腐殖质化强度大小和有机质转化速度^[17],这 3 个县(市)的全氮含量也较其他县高。蔗糖酶含量为 8.79 ~ 28.89 mg/g,平均值为 18.23 mg/g,由于蔗糖酶对增加土壤中易溶性物质营养物质起着重要作用,其活性常被用来表征土壤的熟化程度和肥力水平,而通常测定有机质、土壤全氮、速效钾、速效磷项目指

标,基本上能反映土壤熟化的程度,其中深州市、景县、固安县蔗糖酶活性分别为 28.89、27.85、24.81 mg/g,含量较高,而这 3 个县(市)在这些指标方面基本上都略高于其他县。磷酸酶变化范围在 5.80~14.04 mg/g,平均值为 9.87 mg/g,磷酸酶活性直接影响土壤中有有机磷的分解转化,6 个县域中深州市、固安县、景县磷酸酶活性较高,分别是 14.04、10.14、10.10 mg/g,这 3 个县(市)速效磷含量也比较高。总体来说,土壤酶以结合态或游离态存在于土壤固相或液相中,参与土壤有机质的分解与合成及氮磷钾等一切物质循环^[12],因此土壤酶活性与土壤理化性状密切相关。

表 2 不同地区土壤酶活性比较

县域	脲酶 (NH ₄ ⁺ -N,mg/g)	过氧化氢酶 (mL/g)	蔗糖酶 (mg/g)	磷酸酶 (mg/g)
固安	1.50	3.77	24.81	10.14
深州	1.46	3.83	28.89	14.04
景县	0.73	3.24	27.85	10.10
吴桥	1.09	2.71	8.79	5.80
曲周	0.74	2.99	10.08	9.74
辛集	1.32	3.60	8.97	9.40
平均值	1.14	3.36	18.23	9.87
标准差	0.34	0.45	9.91	2.62
变异系数	0.30	0.13	0.54	0.27

2.3 土壤酶活性与夏玉米产量的关系

从表 3 可以看出,脲酶与玉米产量的线性方程为 $y = 3\,015.5x + 5\,458.7$ ($r = 0.791\,3^{**}$);蔗糖酶与玉米产量线性方程为 $y = 40.628x + 7\,516$ ($r = 0.571\,8^{**}$);过氧化氢酶与玉米产量线性方程为 $y = 444.06x + 6\,861.5$ ($r = 0.265\,0^{*}$);磷酸酶与玉米产量方程为 $y = 255.44x + 5\,858.2$ ($r = 0.313\,6^{**}$)。可以得出土壤酶与玉米产量相关性由大到小依次为脲酶>蔗糖酶>磷酸酶>过氧化氢酶,其中脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶与玉米产量呈极显著正相关性,而过氧化氢酶与玉米产量呈显著正相关,表明土壤酶活性与夏玉米产量关系十分密切,土壤酶活性可以表征夏玉米产量高低。

2.4 土壤酶活性与土壤理化性质的关系

2.4.1 土壤酶与物理性质的关系 从表 4 可以看出,土壤脲酶与土壤容重呈极显著负相关,相关系数为 $-0.725\,2^{**}$,即土壤容重越大,脲酶活性较低;土壤脲酶与总孔隙度呈极显著正相关,相关系数为 $0.729\,8^{**}$,即土壤孔隙度越大,脲酶活性

表 3 不同地区土壤酶活性与玉米产量的关系

土壤酶种类	线性方程	<i>r</i>
脲酶	$y = 3\,015.500x + 5\,458.7$	0.791 3 **
蔗糖酶	$y = 40.628x + 7\,516.0$	0.571 8 **
过氧化氢酶	$y = 444.060x + 6\,861.5$	0.265 0 *
磷酸酶	$y = 255.440x + 5\,858.2$	0.313 6 **

注: $n = 90, r_{0.05} = 0.205, r_{0.01} = 0.267$,表 4 至表 6 同。线性方程 x 代表酶活性, y 代表产量。

越高;与田间持水量没有相关性。其他 3 种酶与土壤容重、总孔隙度、田间持水量均没有相关性,表明土壤物理性质与脲酶关系更为密切。

表 4 土壤酶与土壤物理性质的相关系数

土壤酶种类	容重	总孔隙度	田间持水量
脲酶	$-0.725\,2^{**}$	$0.729\,8^{**}$	0.078 5
蔗糖酶	0.089 7	0.090 1	0.000 4
过氧化氢酶	0.154 8	0.162 8	0.036 8
磷酸酶	0.110 9	0.118 9	0.012 1

2.4.2 土壤酶与化学性质的关系 从表 5 可以看出,土壤脲酶与有机质、速效钾均呈显著正相关,相关系数分别为 0.656^{*} 、 0.219^{*} ;土壤脲酶与全氮呈极显著正相关,相关系数为 0.734^{**} ,这归因于脲酶是唯一可以水解尿素的酶,它可以表征氮素水平的高低,脲酶对全氮的影响是直接的,它对有机质、速效钾的影响可能表现为间接影响;与其他指标没有明显的相关性。蔗糖酶与全氮、速效钾、CEC 表现为极显著正相关,相关系数分别为 0.771^{**} 、 0.630^{**} 、 0.630^{**} ;与 pH 值呈极显著负相关,相关系数为 -0.731^{**} ,土壤酸碱性对蔗糖酶活性影响极为显著,随着土壤 pH 值的增大,蔗糖酶活性降低。蔗糖酶与这些指标的显著性归因于蔗糖酶可以反映土壤的熟化程度,这些指标均可以反映土壤的熟化程度和肥力高低水平。过氧化氢酶与全氮含量呈极显著正相关,相关系数为 0.723^{**} ,与其他指标无明显的相关性。磷酸酶与全氮、速效钾、速效磷、CEC 呈极显著正相关,相关系数分别为 0.757^{**} 、 0.585^{**} 、 0.365^{**} 、 0.385^{**} ;与 pH 值呈显著负相关,相关系数为 -0.234^{*} ,表明土壤 pH 值越高,磷酸酶活性越低,磷酸酶活性受土壤酸碱性影响,磷酸酶直接影响土壤中有有机磷的分解转化,因此磷酸酶与速效磷关系较为密切,它直接影响速效磷,对其他指标是间接影响。

表 5 土壤酶与化学指标间的相关性

土壤酶种类	相关系数					
	有机质	全氮	速效钾	速效磷	pH 值	CEC
脲酶	0.656 *	0.734 **	0.219 *	0.194	0.004	0.004
蔗糖酶	0.154	0.771 **	0.630 **	0.144	-0.731^{**}	0.630 **
过氧化氢酶	0.010	0.723 **	0.084	0.019	-0.084	0.058
磷酸酶	0.046	0.757 **	0.585 **	0.365 **	-0.234^{*}	0.385 **

2.5 土壤酶活性间的相关性

从表 6 可以看出,不同地区微生物酶含量中蔗糖酶、脲酶的变异系数较大,反映了不同地区微生物酶变化的差异性;脲酶与过氧化氢酶和磷酸酶均呈极显著正相关,相关系数分别为 $0.279\,5^{**}$ 、 $0.344\,6^{**}$ 。磷酸酶与蔗糖酶呈极显著正相关,相关系数为 $0.582\,4^{**}$ 。其他酶之间没有相关性。

3 讨论与结论

土壤酶与土壤肥力和作物产量之间息息相关,本研究 4 种土壤酶均与夏玉米产量呈显著正相关,脲酶、蔗糖酶、磷酸酶与产量呈极显著正相关,相关性大小依次为脲酶>蔗糖酶>磷酸酶>过氧化氢酶,相关系数为 $0.791\,3^{**} >$

表 6 土壤酶之间的相关性

土壤酶种类	相关系数			
	脲酶	蔗糖酶	过氧化氢酶	磷酸酶
脲酶	1.000 0			
蔗糖酶	0.150 4	1.000 0		
过氧化氢酶	0.279 5 **	0.006 1	1.000 0	
磷酸酶	0.344 6 **	0.582 4 **	0.015	1.000 0

0.571 8 ** > 0.313 6 ** > 0.265 0 **。本结果与武晓森等在不同施肥处理下夏玉米的产量与土壤酶活性的研究结论有相似之处:脲酶、过氧化氢酶、纤维素酶与玉米产量呈极显著正相关,拔节期相关系数分别为 0.824 **、0.896 **、0.760 **;大喇叭口期相关系数分别为 0.678 **、0.749 **、0.869 **^[6]。本研究土壤中脲酶与土壤容重呈极显著负相关,相关系数为 -0.725 2 **;与总孔隙度呈极显著正相关,相关系数为 0.729 8 **;与田间持水量没有相关性。其他 3 种酶与土壤容重、总孔隙度、田间持水量均没有相关性。王树起等在长期定位试验中研究了不同土地利用和施肥方式对土壤酶活性和相关肥力因子的影响,结果表明,土壤酶活性与土壤有效养分含量间呈显著或极显著的正相关^[18]。孙瑞莲等在长期定位试验中研究,结果表明,磷酸酶与土壤速效磷有极显著相关性,与速效钾含量有显著相关性;脲酶与土壤有机质及速效钾呈显著相关,过氧化氢酶与各土壤养分之间没有明显的相关性^[19]。本研究结果,土壤脲酶与有机质、全氮、速效钾均呈显著正相关,与其他指标没有明显的相关性,这是归因于众多微生物酶中脲酶是一种中性酶,可以分解有机质,促其分解生成 NH₃ 和 CO₂,脲酶是土壤中最活跃的水解酶类之一,与土壤供氮能力密切相关,能够表征土壤氮素的供应程度。本结果与赵林森等在杨槐混交林上的研究脲酶活性与有机质和全氮呈显著正相关结论^[11]相一致。蔗糖酶与全氮、速效钾、CEC 表现为显著正相关,与 pH 值呈现显著负相关。单奇华等认为,pH 值与过氧化氢酶呈极显著正相关^[20],本研究与其结论相反,说明仅通过线性相关分析把酶作为评价土壤肥力指标有值得商榷之处。过氧化氢酶与全氮含量呈显著正相关,与其他指标无明显的相关性,过氧化氢酶的活性在一定程度上可以表征土壤生物氧化过程和氧化还原能力的强弱。磷酸酶与速效磷、速效钾等呈极显著正相关,由于磷酸酶可以使土壤中的有机磷转化成可以供植物吸收的有机磷。在酶活性方面,磷酸酶与脲酶、蔗糖酶之间呈极显著正相关,脲酶与过氧化氢酶呈极显著正相关,本研究结果与司志国等研究徐州绿地表层土壤酶活性中蔗糖酶与磷酸酶之间呈显著正相关有相同之处^[21],表明土壤酶与土壤肥力之间具有不同程度的相关性,研究结果为夏玉米高产田的培肥提供了理论依据。

参考文献:

[1] 国家统计局. 2014 年中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2014.

- [2] 颜 雄,张杨珠,刘 晶. 土壤肥力质量评价的研究进展[J]. 湖南农业科学,2008(5):82-85.
- [3] 汤勇华,黄 耀. 中国大陆主要粮食作物地力贡献率及其影响因素的统计分析[J]. 农业环境科学学报,2008,27(4):1283-1289.
- [4] Marx M C,Wood M,Jarvis S C. A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001,33(12/13):1633-1640.
- [5] 高 明,周保同,魏朝富,等. 不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究[J]. 应用生态学报,2004,15(7):1177-1181.
- [6] 武晓森,周晓琳,曹凤明,等. 不同施肥处理对玉米产量及土壤酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2015(1):44-49.
- [7] 王 灿,王德健,孙瑞娟,等. 长期不同施肥下土壤酶活性与肥力因素的相关性[J]. 生态环境,2008,17(2):688-692.
- [8] Vance N C,Entry J A. Soil properties important to the restoration of a Shasta red fir barrens in the Siskiyou Mountains[J]. For Ecol Manag,2000,138:427-434.
- [9] 邱丽萍,刘 军,王义权,等. 土壤酶活性与土壤肥力关系的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(3):277-280.
- [10] 王改玲,李立科,郝明德,等. 长期施肥及不同施肥条件下秸秆覆盖、灌水对土壤酶和养分的影响[J]. 核农学报,2012,26(1):129-134,27.
- [11] 赵林森,王九龄. 杨槐混交林生长及土壤酶与肥力的相互关系[J]. 北京林业大学学报,1995,17(4):1-8.
- [12] 张炎华,吴 敏,何 鹏,等. 土壤酶活性与土壤肥力关系的研究进展[J]. 安徽农业科学,2007,35(34):11139-11142.
- [13] 刘 楠,张丽娟,刘文菊,等. 高产田夏玉米季土壤中酶及微生物特性的动态变化特征[J]. 河北农业大学学报,2010,33(5):6-12.
- [14] 刘 楠,张丽娟,刘文菊,等. 河北山前平原高产田冬小麦土壤微生物学特性的动态变化[J]. 水土保持学报,2010,24(3):155-159.
- [15] 侯 鹏,王永军,王空军,等. 超高产夏玉米田土壤微生物与土壤酶的动态变化[J]. 应用生态学报,2008,19(8):1741-1746.
- [16] 王冬梅,王春枝,韩晓日,等. 长期施肥对棕壤土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报,2006,37(2):263-267.
- [17] 刘登魁,曾宪军. 土壤有机质演变规律研究进展[J]. 湖南农业科学,2006(5):61-63.
- [18] 王树起,韩晓增,乔云发,等. 不同土地利用和施肥方式对土壤酶活性及相关肥力因子的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(6):1311-1316.
- [19] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(4):406-410.
- [20] 单奇华,余 建,俞元春,等. 城市林业土壤酶活性及对土壤肥力的指示作用[J]. 城市环境与城市生态,2007,20(4):4-6,9.
- [21] 司志国,俞小鹏,白玉杰,等. 徐州城市绿地表层土壤酶活性及其影响因素[J]. 中南林业科技大学学报,2013,33(2):73-76,80.