植物营养与肥料学报 2011,17(5):1197-1204
Plant Nutrition and Fertilizer Science

长期不同施肥棕壤玉米地酶活性的时空变化

兰 宇,韩晓日*,杨劲峰,王 月,房大伟,李 娜
(沈阳农业大学土地与环境学院,农业部东北土壤与环境重点开放实验室,辽宁沈阳 110866)

摘要:为揭示长期不同施肥对棕壤玉米地酶活性时空变化的影响,利用31年长期肥料定位试验研究了玉米生育期内3种主要土壤酶活性的时空变化及其与土壤理化性质的关系。结果表明,棕壤上各种酶活性随玉米生育期推进而有规律地变化。土壤脲酶、转化酶活性高峰出现在玉米拔节期,酸性磷酸酶活性高峰出现在玉米大喇叭口期;玉米收获后,土壤转化酶、脲酶均高于播前或与播前相当,而酸性磷酸酶活性则低于播前。在同样化肥水平上增施有机肥能增加脲酶、转化酶活性,而降低酸性磷酸酶活性;3种酶活性的空间分布均遵循随土层深度加深而不断减小的规律,长期培肥对深层土壤酶活性亦有影响。相关分析结果显示,土壤脲酶与转化酶呈极显著正相关(r = 0.636**);脲酶、转化酶与土壤有机碳、pH、含水量、碱解氮、速效磷基本呈极显著正相关;酸性磷酸酶与各因子无显著相关关系。土壤酶与土壤肥力因素关系密切,可作为衡量土壤肥力的敏感指标。

关键词:棕壤;长期施肥;土壤酶活性;时空变化
中图分类号:S154.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2011)05-1197-08

Temporal and spatial dynamics of enzyme activities under long-term fertilization in a maize growing brown soil

LAN Yu, HAN Xiao-ri*, YANG Jin-feng, WANG Yue, FANG Da-wei, LI Na
(*College of Land and Environment Science, Shenyang Agricultural University/*
Key Open Laboratory of Soil and Environment in Northeast of Agriculture Department of PRC, Shenyang110866, China)

Abstract: A long-term fertilizer location experiment (31 years) was carried out to study the temporal and spatial dynamics of enzyme activities under long-term fertilization in a maize growing brown soil. Results showed that enzyme activities changed regularly with the growing of maize. The highest urease and invertase activities were observed at jointing stage, while the highest acid phosphatase activity at the huge bellbottom period. Urease and invertase activities were higher after harvest than before sowing, however acid phosphatase activity was lower after harvest. With same application rate of chemical fertilizer, application of organic fertilizer could increase urease and invertase activities, but decrease acid phosphatase activity. All of the three enzyme activities decreased with the depth soil profile. Long-term fertilization could also affect the enzyme activities at deeper layer of soil. Correlation analysis results indicated that there was a very significant positive correlation between urease and invertase (r = 0.636**). A significant correlation was also observed between urease, invertase and soil organic carbon, pH, water content, Alkali-hydro nitrogen, available phosphorus. No significant correlation was found between acid phosphatase activity and these soil fertility factors. Soil enzyme activities closely related with soil fertility status, and could be chosen as sensitive indexes on soil fertility.

Key words: brown soil; long term fertilization; enzyme activity; temporal and spatial dynamics

---

收稿日期:2011-03-03　　**接受日期**:2011-05-18
基金项目:国家科技支撑计划"旱地固碳增汇及氧化亚氮减排技术研究与示范课题"(2008BAD95B01);中国科学院创新项目"我国农田土壤固碳和温室气体减排研究"(KZCX2-YW-Q1-07)资助。
作者简介:兰宇(1983—),男,山西省大同市人,博士研究生,主要从事植物营养与施肥研究。E-mail:lanyu312228@163.com
* 通讯作者 E-mail:hanxiaori@163.com

土壤酶是影响土壤生产力和作物产量的主要因子,参与了土壤的发生和发育,加速腐殖质的合成与分解,以及有效肥力形成等诸多过程。关于土壤酶已有大量研究,季立声[1],王兆荣等[2]认为,施用有机肥不仅增加了各种酶的数量,同时提高了酶的活性;Ross 等[3], Speir[4], Ladd 等[5]研究发现,土壤酶之间有一定的内在关系;刘建新[6]认为,土壤脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性与有机质和大多数土壤养分呈显著线性相关,可以作为敏感的土壤生物学指标;王娟[7]等研究得出,有机肥在增加土壤转化酶、脲酶、碱性磷酸酶活性方面可以同样发挥无机肥的作用。

关于土壤酶及其与土壤肥力之间的关系,国内外学者已进行了较多的研究[8-11],但一般仅局限于短期培养或对长期试验中某一特定时间或空间的研究。本研究以31年棕壤长期定位试验为背景,探讨长期不同施肥棕壤玉米地的酶活性之时空变化及其与土壤肥力的关系,为弄清长期施肥条件下棕壤酶活性的变化特征提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

沈阳农业大学棕壤肥料长期定位试验站始建于1979年,地处北纬40°48′,东经123°33′,属温带湿润-半湿润季风气候。年降水量为574～684 mm,平均气温7.0～8.1℃,无霜期为147～164 d。作物轮作方式为玉米—玉米—大豆。试验地为发育于黄土母质的典型耕作棕壤,试验前土壤基本理化性状为:有机质含量15.90 g/kg、全氮0.80 g/kg、全磷0.38 g/kg、全钾20.1 g/kg、碱解氮105.5 mg/kg、速效磷6.5 mg/kg、速效钾97.9 mg/kg、pH 6.5(水土比2.5∶1)。

试验采用裂区设计,分为3个区组,共18个施肥处理,小区面积为160 m^2。本研究选取其中的6个处理,即:不施肥(CK),单施氮肥(N_1),氮、磷肥配施(N_1P),单施高量有机肥(M_2),高量有机肥配施氮肥(M_2N_1),高量有机肥配施氮、磷肥(M_2N_1P)。试验用有机肥为猪厩肥(有机质含量119.6 g/kg、N 5.6 g/kg、P_2O_5 8.3 g/kg、K_2O 为10.9 g/kg)年施肥量为13.5 t/hm^2(低量)、27 t/hm^2(高量)。种植玉米年份的化肥施用量为N 120、P_2O_5 60、K_2O 30～60 kg/hm^2;种植大豆年份的施肥量为N 30、P_2O_5 90、K_2O 60～90 kg/hm^2。氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。从1992年开始种植大豆的年份不施有机肥。

本试验于2009年进行,前茬作物为大豆。玉米播种期为4月28日,收获期为9月26日。肥料混匀并一次性均匀撒施于地表后立刻翻耕覆土,无追肥,无灌溉。

1.2 样品采集与分析方法

2009年分别在施肥前、玉米拔节期、大喇叭口期、灌浆期、收获期选取5个具代表性的样点,采集0—20 cm耕层土壤混合均匀;于收获后15 d采集0—20、20—40、40—60 cm土样。每个处理样品采集3份作为重复。样品经风干、研磨、过1 mm筛,进行酶活性测定。

土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法[NH_3-N mg/(g·24 h), 37℃];转化酶活性采用硫代硫酸钠滴定法[0.1 mol/L $Na_2S_2O_3$ mL/(g·24 h), 37℃];土壤磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法[Phenol mg/(g·24 h), 37℃]测定[12]。土壤有机碳、pH、氮、磷等养分用常规方法测定[13]。

数据统计分析用SPSS18.0,LSD法多重比较,Origin Pro 8.0作图。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对玉米不同生长期土壤酶活性的影响

2.1.1 长期施肥对土壤脲酶活性的影响 土壤脲酶是一种作用极为专一的酶,其活性可表示土壤的氮素变化状况。玉米生育时期脲酶活性的变化(表1)看出,各处理酶活性均在拔节期达到最大值,之后逐渐降低。收获后CK、N_1处理酶活性略低于播前水平,分别低1.3%、22.6%;N_1P处理比播前增加33.5%;M_2、M_2N_1、M_2N_1P处理比播前大幅增加,增幅分别达到108.1%、92.5%、134.4%。说明增施有机肥能显著提高土壤脲酶活性。不同时期不施有机肥各处理中,脲酶活性表现为$N_1 < N_1P < CK$。其中,N_1处理脲酶活性均最低,与对照比降低了6.9%～37.7%,说明长期单施氮肥造成土壤肥力结构不均衡,在一定程度上会抑制土壤脲酶活性;氮磷配施处理,脲酶活性得到恢复,与CK处理水平相当,说明磷肥能改善和促进脲酶活性,补偿氮肥对其的削弱;化肥配施有机肥处理,脲酶活性显著升高,M_2、M_2N_1、M_2N_1P处理总的酶活性分别比CK处理提高164.8%、165.0%、165.8%,说明合理施肥对提高脲酶活性有显著影响。整个玉米生育时期脲酶活性大小为$M_2N_1P > M_2N_1 > M_2 > CK > N_1P > N_1$。

表 1　不同施肥处理对土壤脲酶活性的影响[NH_3 -N mg/(g · 24 h), 37℃]

Table 1　Effect of different fertilization treatments on urease activities

施肥处理 Treatments	播前 Before sowing	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Bell-mouthed period	灌浆期 Filling period	收获后 Harvesting
CK	0.870 cBC	1.080 cA	0.898 dB	0.718 cD	0.858 eC
N_1	0.691 dC	0.751 dB	0.836 eA	0.520 dD	0.535 fD
N_1P	0.718 dD	1.031 cA	0.808 eC	0.712 cD	0.958 dB
M_2	1.325 aE	2.940 bA	2.428 bC	2.267 aD	2.756 bB
M_2N_1	1.336 aD	3.121 aA	2.512 aB	2.183 bC	2.571 cB
M_2N_1P	1.262 bE	3.083 aA	2.310 cC	2.144 bD	2.958 aB

注(Note): 数值后大、小写字母分别表示同一处理不同时期,同一时期不同处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different capital and small letters mean significance difference of the same period and the same treatment, respectively at the 5% level.

2.1.2 长期施肥对土壤转化酶活性的影响　土壤转化酶能促进蔗糖水解生成葡萄糖和果糖,对增加土壤中易溶性物质起着重要作用[14]。它不仅能够表征土壤生物学活性强度,也可以作为评价土壤熟化程度和土壤肥力的一个指标。一般情况下,土壤肥力越高,转化酶活性越强。

表 2 表明,各处理转化酶活性在拔节期和灌浆期较高,拔节期比施肥前高约 59%～110%; 大喇叭口期与收获期转化酶活性较低,但仍高于施肥前,说明施肥及种植作物有助于转化酶活性的提高。不同生育时期 N_1 处理转化酶活性较 CK 处理低,差异达显著水平; 其他各处理转化酶活性均高于 CK,以 M_2N_1P 处理最高。生育期内转化酶活性总量为 $M_2N_1P > M_2N_1 > M_2 > N_1P > CK > N_1$。$M_2$、$M_2N_1$、$M_2N_1P$ 处理酶活性总量分别比 CK 处理提高 20.2%、20.5%、28.4%,说明化肥与有机肥长期配合施用能增强土壤转化酶的活性。在其他施肥条件一致的情况下,氮、磷配施处理土壤转化酶活性均高于单施氮肥处理,说明增施磷肥也有助于转化酶活性的增强。

表 2　不同施肥处理对土壤转化酶活性的影响 [0.1 mol/L $Na_2S_2O_3$ mL/(g · 24 h), 37℃]

Table 2　Effect of different fertilization treatments on invertase activities

施肥处理 Treatments	播前 Before sowing	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Bell-mouthed period	灌浆期 Filling period	收获后 Harvesting
CK	2.61 bD	4.14 dA	3.49 cB	4.22 cA	3.16 dC
N_1	1.86 cE	3.45 eB	2.97 dC	4.04 cA	2.72 eD
N_1P	2.63 bC	4.18 dB	4.04 bB	4.84 bA	3.99 cB
M_2	2.55 bE	4.65 cB	4.37 aC	5.64 aA	3.97 cD
M_2N_1	2.50 bD	5.26 bA	4.41 aC	4.83 bB	4.25 bC
M_2N_1P	2.99 aC	5.43 aA	4.31 aB	5.52 aA	4.38 aB

注(Note): 数值后不同大、小写字母分别表示同一处理不同时期,同一时期不同处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different capital and small letters mean significance difference of the same period and the same treatment, respectively at the 5% level.

2.1.3 长期施肥对土壤酸性磷酸酶活性的影响　土壤磷酸酶活性直接影响到有机磷库的利用,即磷酸酶活性是衡量土壤肥力,尤其是土壤有效磷水平的一个重要参考指标,其活性高低直接影响着土壤中有机磷的分解转化及其生物有效性。

由表 3 可知,不同施肥处理酸性磷酸酶在玉米拔节期、大喇叭口期及灌浆期活性均较高,之后大幅降低。收获后土壤酸性磷酸酶活性比播前下降了 12%～38%。整个生育期内各处理酸性磷酸酶活性总量表现为 $M_2 < M_2N_1P < M_2N_1 < N_1P < CK < N_1$。在同样化肥水平的基础上增施有机肥,会一定程度地抑制酸性磷酸酶的活性。在不施有机肥的处理中,N_1P 处理酸性酶活性最低; 在有机无机肥配施处理中,M_2N_1P 在多数时候酶活性高于 M_2

处理且达到显著差异水平但低于 M_2N_1 处理，说明有机无机均衡配施更有利于提高酸性磷酸酶活性。从玉米整个生育期看，棕壤酸性磷酸酶活性在玉米生育前期（播种至拔节期）有一个明显的提高（16%～58%）；大喇叭口期至灌浆期土壤酸性磷酸酶活性较高，收获后各处理酶活性水平相当，且比播前降低约12%～38%，其原因有待进一步探讨。

表3 不同施肥处理对土壤酸性磷酸酶活性的影响［Phenol mg/(g·24 h)，37℃］

Table 3 Effect of different fertilization treatments on acid phosphatase activities

施肥处理 Treatments	播前 Before sowing	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Bell-mouthed period	灌浆期 Filling period	收获后 Harvesting
CK	1.232 bD	1.456 cC	1.874 aA	1.645 cB	0.844 abE
N_1	1.407 aD	1.632 aC	1.821 aA	1.722 bB	0.878 aE
N_1P	0.981 dD	1.550 bC	1.742 bB	1.852 aA	0.860 aE
M_2	0.967 dD	1.414 cB	1.598 cA	1.442 eB	0.805 bE
M_2N_1	1.172 bC	1.501 bcB	1.719 bA	1.465 deB	0.860 aD
M_2N_1P	1.082 cC	1.538 bB	1.595 cA	1.514 dB	0.862 aD

注（Note）：数值后不同大、小写字母分别表示同一处理不同时期，同一时期不同处理间差异达5%显著水平 Values followed by different capital and small letters mean significance difference of the same period and the same treatment, respectively at the 5% level.

2.2 长期施肥对土壤酶活性剖面变化的影响

由于受到土壤理化性质以及植物根系分布的影响，土壤酶活性在土壤剖面的不同深度间表现出一定的规律性。本试验中由于40—60 cm土层土壤酶活性非常小，因此只对0—40 cm土层的酶活性状况进行分析。图1看出，不同施肥处理土壤脲酶、转化酶和酸性磷酸酶活性均表现出随土层深度增加而逐渐降低的趋势，并以0—20 cm的土层活性最高，20—40 cm次之，这与多数研究结果相一致。脲酶、转化酶和酸性磷酸酶在0—20 cm土层酶活性占0—40 cm总酶活性的比例分别为60.1%、56.1%和59.5%。LSD显著性检验（$P<0.05$）表明，有机无机配施处理土壤脲酶、转化酶活性显著高于单施化肥处理，而酸性磷酸酶活性的规律不明显，其中以单施有机肥处理的活性最低，此规律在不同土层间基本一致。

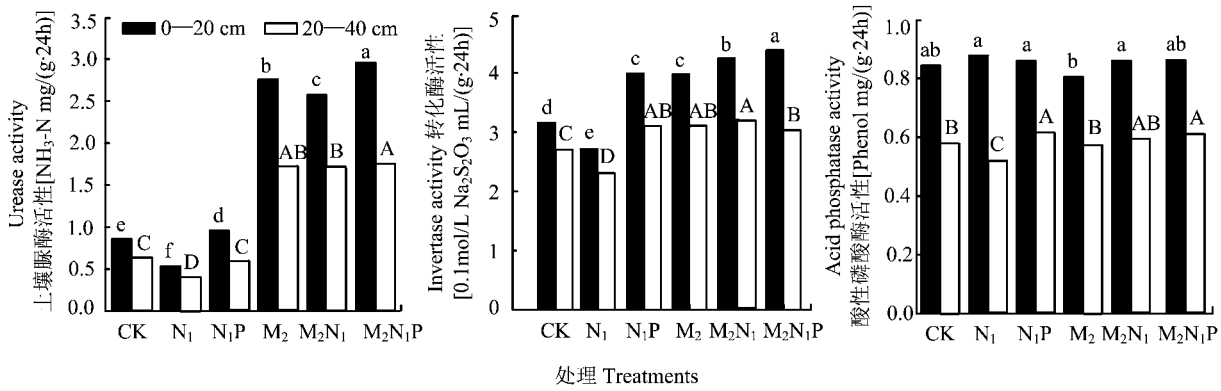

图1 不同处理土壤酶活性的剖面变化

Fig.1 Change of soil enzymes activities in different soil layer

［（注（Note）：柱上不同小、大写字母分别表示0—20 cm、20—40 cm土层处理间差异达5%显著性水平 Different small and capital letters above the bars mean significance difference at 5% level, in the 0–20 cm and 20–40 cm soil layers, respectively.］

2.3 长期施肥对土壤肥力因子的影响

土壤酶活性对于土壤中有机物质转化、释放植物能利用的碳、氮和磷等养分有直接作用[15]。各种酶活性受制于土壤物理、化学等性状，因此分析土壤各种肥力因子对于探讨土壤酶活性的变化规律有重要的意义[16]。

图2表明，在玉米生育时期内，与对照相比，长期施肥尤其是长期施用有机肥，土壤碱解氮、速

效磷和有机碳均有显著增加。土壤碱解氮,速效磷在玉米拔节期呈现最大值,之后逐渐降低至玉米灌浆期过后趋于平稳。拔节期到大喇叭口期,碱解氮下降幅度较小。抽穗期到灌浆期是玉米营养的最大效率期,此时玉米需要从土壤中吸收大量的氮素营养供给营养生长和幼穗分化,土壤中碱解氮未得到及时补充,因此下降幅度很大; 灌浆期到收获期土壤中碱解氮含量基本稳定在施肥前水平。各处理土壤速效磷含量在拔节期有一较高值,拔节期至灌浆期玉米生长旺盛,从土壤中大量吸收磷素营养,土壤速效磷含量大幅下降; 灌浆期至收获后土壤速效磷下降幅度变缓慢。收获后与播前相比,施用有机肥处理土壤速效磷含量均提高,施用化肥各处理土壤速效磷含量均降低。土壤有机碳在全生育期基本保持在一个较稳定的水平,规律依然是有机无机配施各处理显著高于单施化肥处理。图 2 还可以看出,整个生育期耕层土壤含水量始终处于一个波动趋势,忽高忽低; 而不同施肥处理耕层土壤含水量变化规律基本一致。因此,本试验条件下,田间表层土壤含水量的动态变化受施肥影响不大。在土壤 pH 方面,有机无机配施处理有利于防止土壤酸化,单施化肥处理土壤 pH 表现为 CK > N_1P > N_1,说明长期单施化肥会造成土壤酸化。

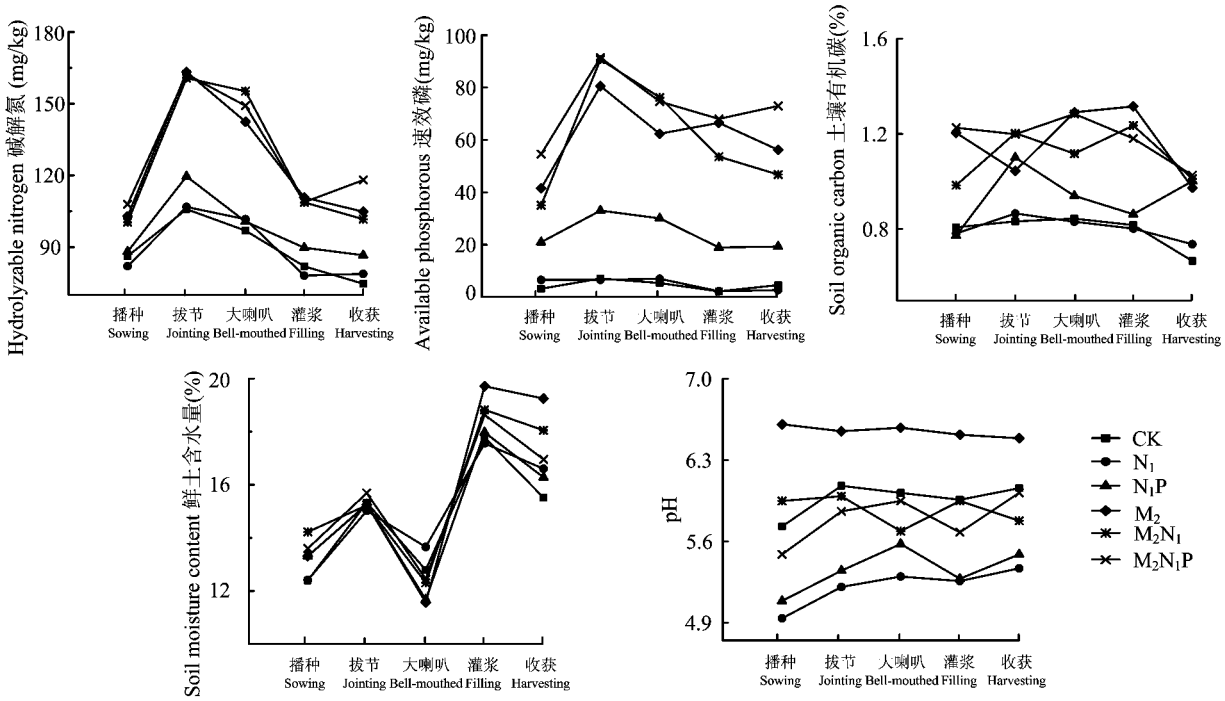

图 2　玉米生育期内土壤肥力因子变化

Fig. 2　Changes of soil fertility index during the growth period of maize

3　讨论与结论

在时间尺度上,玉米生长到拔节期,种子中养分耗尽,根系生长旺盛,养分需求增大,脲酶活性迅速增强以分解残余尿素为玉米提供氮素营养; 大喇叭口期是玉米生长较旺盛的时期,吸收养分也较多。本试验看出,长期施用有机肥的脲酶活性明显高于不施有机肥处理。有机肥中包含大量可供酶活动的底物,有利于激发酶活性及各类养分的有效化。有研究表明,有机肥可以增加土壤的透气性提高地温,有利于脲酶活性的提高[17-18]。随着肥料尿素的分解被利用,土壤脲酶活性由播种期至灌浆期逐渐降低,灌浆期过后由于土壤温度升高,玉米归还土壤的有机物质增加以及能产生脲酶的微生物数量增加致使土壤脲酶活性又出现回升。收获后施用有机肥处理脲酶活性显著高于播前水平,增加近 1 倍,说明有机肥对提高脲酶活性有极大作用,有机碳和脲酶的相关系数 $r = 0.702^{**}$ (表 4)。李东坡等[19]研究表明,脲酶活性高低顺序为高量有机肥 > 低量有机肥 > 化肥 > 不施肥;张小磊[20]等研究认为,氮肥与有机肥合理配施可以消除单施氮肥对脲酶的抑制作用,本试验结果与之一致。王光华[21]等指出,施用有机肥可以维持土壤转化酶在玉米生育期间保持较

高的酶活性水平,单施化肥处理对土壤转化酶具有

表4 土壤酶活性与土壤肥力因子的相关关系

Table 4 The relationship between soil enzyme activity and soil fertility

项目 Items	有机碳 Organic carbon	pH	含水量 Water content	碱解氮 Alk.-hydro. N	速效磷 Avail. P	转化酶 Invertase	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	脲酶 Urease
有机碳 Organic carbon	1.000							
pH	0.482**	1.000						
含水量 Water content	0.056	0.133	1.000					
碱解氮 Alk.-hydro. N	0.698**	0.412*	-0.189	1.000				
速效磷 Avail. P	0.839**	0.491**	0.099	0.856**	1.000			
转化酶 Invertase	0.568**	0.349	0.52**	0.559**	0.634**	1.000		
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	-0.346	-0.167	-0.210	0.272	-0.240	0.339	1.000	
脲酶 Urease	0.702**	0.598**	0.215	0.804**	0.928**	0.636**	-0.107	1.000

注(Note): *—$P<0.05$; **—$P<0.01$.

一定的抑制作用。本研究结果显示,与CK相比,单施氮肥抑制了转化酶活性,氮、磷配施后这种抑制效果消失。各处理转化酶活性在拔节期和灌浆期高于大喇叭口期与收获期,这与王聪翔等[22]的研究结果相同。化肥与有机肥长期配合施用能增强土壤转化酶的活性。焦晓光[23]等认为,单施有机肥可提高转化酶活性,而单施化肥对酶活性无显著影响,这与本研究结果基本相符合。土壤磷酸酶是催化含磷有机酯和酐水解的一类酶的总称。在低pH的土壤中,氮肥的施用能显著提高酸性磷酸酶活性[24],本研究结果与之相符($N_1>CK$、$M_2N_1>M_2$)。有研究表明,土壤中无机磷增加是磷酸酶活性减弱的一个原因[25]。Juma和Tabatabai[26]指出,磷肥施入土壤中,对酸性磷酸酶的抑制率为21%~42%。本研究看出,在不施有机肥处理中施磷处理酸性磷酸酶活性低于不施磷处理;在有机无机肥配施处理中此规律不明显,可能与有机肥的加入有关,具体机理还有待进一步研究。宋日[27]等人认为,土壤磷酸酶活性在作物生育旺盛时期(播种后60 d左右)出现高峰,与本试验结果一致。

从土壤剖面层次看,随着土壤深度加深,各处理土壤脲酶、转化酶、酸性磷酸酶活性逐渐减小。不同施肥措施对深层土壤转化酶、脲酶活性亦有显著影响,即有机无机配施处理显著高于不施有机肥处理。施肥能够使较深土层土壤质量性状得到改善,对于干旱半干旱地区农业有着更为重要的现实意义。

土壤理化性状与土壤酶活性的相关分析(表4)表明,土壤有机碳含量同转化酶、脲酶分别达到极显著相关关系($r=0.568^{**}$、0.702^{**});pH与脲酶活性呈极显著相关关系($r=0.598^{**}$)。土壤含水量在一定程度上制约着酶活性,土壤转化酶与土壤含水量达到极显著相关关系($r=0.52^{**}$)。土壤碱解氮同转化酶、脲酶分别达到极显著相关关系($r=0.559^{**}$、0.804^{**})。土壤速效磷含量同转化酶、脲酶分别达到极显著相关关系($r=0.634^{**}$、0.928^{**}),与酸性磷酸酶呈负相关关系。磷酸酶为适应性酶,在土壤有效磷含量低时磷酸酶活性增强,这与杨朝辉等[14]的研究结果一致。土壤酶活性之间的相关分析结果表明,土壤酶之间有一定的内在关系,土壤脲酶与转化酶相关关系达极显著水平($r=0.636^{**}$)。酶之间负相关关系即此消彼长的关系可能是由于当其中一种酶与其专一底物结合后,释放一种或多种信息物质抑制另一种酶的活性,同时释放的信息物质对底物结合的酶起正反馈作用;酶之间的正相关关系可能是因为几种酶存在某一相同底物,当其中任一种酶与底物结合后,释放一种或多种信息物质激活另外酶的活性[28],其机理还有待进一步研究。

总之,本研究表明,棕壤上各种酶随玉米生育期推进而有规律的变化,土壤脲酶、转化酶活性高峰出现在玉米拔节期,酸性磷酸酶活性高峰出现在玉米大喇叭口期;玉米收获后,土壤转化酶、脲酶均高于播前或与播前相当,而酸性磷酸酶活性则低于播前;在同样施化肥水平上增施有机肥能增加脲酶、转化酶活性,而降低酸性磷酸酶活性;3种酶活性的空间分布规律均遵循随土层深度加深而不断减小的规

律,长期培肥对深层土壤酶活性亦有影响; 相关分析结果显示,土壤脲酶同转化酶呈极显著正相关($r=0.636^{**}$); 脲酶、转化酶同土壤有机碳、pH、含水量、碱解氮、速效磷基本呈极显著正相关; 酸性磷酸酶同各因子无显著关系,土壤酶与土壤肥力因素关系密切,可作为衡量土壤肥力的敏感指标。

参 考 文 献:

[1] 季立声. 秸秆直接还田的土壤生物学效应[J]. 山东农业大学学报,1992,68(2): 25-29.
Ji L S. Soil biological effects of straw return [J]. J. Shandong Agric. Univ., 1992, 68(2): 25-29.

[2] 王兆荣. 有机物料的腐解及土壤有机质的调控[J]. 东北农学院学报,1991,26(4): 154-156.
Wang Z R. Decomposition of organic matter and regulation of soil organic matter [J]. J. Northeast Agric. Univ., 1991, 26(4): 154-156.

[3] Ross D J, Mcneilly B A. The classification and mapping of enzymes typic in soils of New Zealand [J]. NZ. J. Sci., 1975, 18(3): 361-375.

[4] Speir T W. Soil enzymes and fertilizer in soils [J]. NZ. J. Sci., 1977, 20(3): 159-166.

[5] Ladd J N, Butler J H A. Biochem [M]. Washington DC. USA: Department of Scientific and Agricultural Research. Soil Biol, 1986, 16-30.

[6] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 523-525.
Liu J X. Correlative research on the activity of enzyme and soil nutrient in the different types of farmland [J]. Chin. J. Soil Sci., 2004, 35(4): 523-525.

[7] 王娟,刘淑英,王平,吴银明. 不同施肥处理对西北半干旱区土壤酶活性的影响及其动态变化[J]. 土壤通报,2008,39(2): 299-303.
Wang J, Liu S Y, Wang P, Wu Y M. Effect of different fertilization on the dynamical changes of soil enzyme activities [J]. Chin. J. Soil Sci., 2008, 39(2): 299-303.

[8] Jin K, Sleutel S, Buchan D *et al*. Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau [J]. Soil Till. Res., 2009, 104: 115-120.

[9] Li J, Zhao B Q, Li X Y *et al*. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on microbial biomass, soil enzyme activities and soil fertility [J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 7(3): 336-343.

[10] Trasar-Cepeda C, Leiros M C, Seoane S, Gil-Stotres F. Limitations of soil enzymes as indicators of soil pollution [J]. Soil Biol. Biochem., 2000, 32: 1867-1875.

[11] 姜小凤,王淑英,丁宁平,等. 施肥方式对旱地土壤酶活性和养分含 量的影响[J]. 核农学报,2010,24(1): 136-141.
Jiang X F, Wang S Y, Ding N P *et al*. Effect of different fertilization on soil enzyme activity and nutrients [J]. Acta Agric. Nucl. Sin., 2010, 24(1): 136-141.

[12] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 农业出版社,1988. 243-279.
Yan C S. Research of soil fertility [M]. Beijing: Agriculture Press, 1988. 243-279.

[13] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1994. 10.
Nanjing Agriculture University. Analysis of soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: Agriculture Press, 1994. 10.

[14] 杨朝辉,韩晓日,刘岱松,等. 包膜复合肥料对盆栽大豆土壤酶活性的影响[J]. 安徽农业科学,2007,35(18): 5493-5495.
Yang Z H, Han X R, Liu D S *et al*. Effect of the coated compound fertilizer on enzyme activity in soil of potted soybean [J]. J. Anhui Agric. Sci., 2007, 35(18): 5493-5495.

[15] 梁晶,胡永红,方海兰,等. 上海植物园典型植物群落的土壤肥力特性探讨[J]. 上海交通大学学报(农业科学版),2010, 28(2): 178-183.
Liang J, Hu Y H, Fang H L *et al*. Discuss on soil fertility in the typical plant communities in Shanghai Botanical Garden [J]. J. Shanghai Jiaotong Univ. (Agric. Sci.), 2010, 28(2): 178-183.

[16] 丁菡,胡海波,王人潮. 半干旱区土壤酶活性与其理化及微生物的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2007,31(2): 13-18.
Ding H, Hu H B, Wang R C. The relationships between soil enzyme activity and soil physical-chemical properties or microbial biomass in semi-arid area [J]. J. Nanjing For. Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2007, 31(2): 13-18.

[17] 陈玉华,张岁岐,田海燕,陈炜. 地膜覆盖及施用有机肥对地温及冬小麦水分利用的影响[J]. 水土保持通报,2010,30(3): 59-63.
Chen Y H, Zhang S Q, Tian H Y, Chen W. Effects of plastic mulch and manure on soil temperature and water consumption of winter wheat [J]. Bull. Soil Water Conserv., 2010, 30(3): 59-63.

[18] 沈锦春. 有机肥料在杂交油菜制种作用的浅析[J]. 现代园艺,2008, (9): 18-20.
Shen J C. Study on the effect of organic matter on seed production of hybrid rape [J]. Modern Hortic., 2008, (9): 18-20.

[19] 李东坡,武志杰,陈利军,等. 长期培肥黑土脲酶活性动态变化及其影响因素[J]. 应用生态学报,2003,14(12): 2208-2212.
Li D P, Wu Z J, Chen L J *et al*. Dynamics of urease activity in a long-term fertilized black soil and its affecting factors [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(12): 208-2212.

[20] 张小磊,安春华,马建华,符燕. 长期施肥对城市边缘区不同作物 土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报,2007,38(4): 667-670.
Zhang X L, An C H, Ma J H, Fu Y. Effects of long-term application of fertilizers on enzyme activities in urban fringe soils with different crops [J]. Chin. J. Soil Sci., 2007, 38(4): 667-670.

[21] 王光华,齐晓宁,金剑,等. 施肥对黑土农田土壤全碳、微生物量碳及土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报,2007,38(4):661-665.
Wang G H, Qi X N, Jin J *et al*. Effect of fertilization on total soil C, microbial biomass C and soil enzyme activities in farmland balck soil [J]. Chin. J. Soil Sci., 2007, 38(4): 661-665.

[22] 王聪翔,闻杰,孙文涛,等. 不同保护性耕作方式土壤酶动态变化的研究初报[J]. 辽宁农业科学,2005,(6):16-18.
Wang C X, Wen J, Sun W T *et al*. Primary report of dynamics of soil enzyme activities under different conservation tillage [J]. Liaoning Agric. Sci., 2005, (6): 16-18.

[23] 焦晓光,隋跃宇,魏丹,等. 长期施肥对农田黑土酶活性及土壤肥力的影响[J]. 农业系统科学与综合研究,2010,26(4):443-447.
Jiao X G, Sui Y Y, Wei D *et al*. Effect of long-term fertilization on enzyme activities and soil fertility for the black soil in the farmland [J]. System Sci. Comprehen. Studies Agric., 2010, 26(4): 443-447.

[24] 沈菊培,陈利军. 土壤磷酸酶活性对施肥-种植-耕作制度的响应[J]. 土壤通报,2005,36(4):622-627.
Shen J P, Chen L J. Response of soil phosphatase activities to fertilization, planting and tillage systems [J]. Chin. J. Soil Sci., 2005, 36(4): 622-627.

[25] 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.
Sun R L, Zhao B Q, Zhu L S *et al*. Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2003, 9(4): 406-410.

[26] Juma N G, Tabatabai M A. Effects of trace elements on phosphatase activity in soils [J]. Soil Sci. Soi. Am. J., 1977, 41: 343-346.

[27] 宋日,吴春胜,牟金明,等. 玉米根茬留田对土壤微生物量碳和酶活性动态变化特征的影响[J]. 应用生态学报,2002,12(3):303-306.
Song R, Wu C S, Mou J M *et al*. Effects of maize stubble remaining in field on dynamics of soil microbial biomass C and soil enzyme activities [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2002, 12(3): 303-306.

[28] 熊明彪,雷孝章,田应兵,等. 长期施肥对紫色土酶活的影响[J]. 四川大学学报,2003,35(4):60-63.
Xiong M B, Lei X Z, Tian Y B *et al*. Effects of long-term application of fertilizer on purple soil enzymatic activities [J]. J. Sichuan Univ., 2003, 35(4): 60-63.