

潮棕壤免耕农田土壤酶活性的动态变化*

刘秀梅^{1,2} 李琪^{1,2} 梁文举^{1,*} 姜勇¹ 闻大中¹

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ²中国科学院研究生院, 北京 100039)

【摘要】 研究了潮棕壤免耕和常规耕作农田土壤蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性在玉米不同生育时期和不同土层深度的动态变化。结果表明,免耕可显著提高表层(0~10 cm)土壤酶活性,其蔗糖酶活性在玉米拔节期、大喇叭口期和成熟期显著高于常规耕作,脲酶活性在拔节期和孕穗期显著高于常规耕作,酸性磷酸酶活性在孕穗期和成熟期显著高于常规耕作($P < 0.05$);在10~20 cm土层,免耕土壤蔗糖酶活性在苗期、拔节期和大喇叭口期与常规耕作差异显著,脲酶活性除孕穗期外均显著高于常规耕作($P < 0.05$);在20~30 cm土层,免耕土壤蔗糖酶活性在玉米各生育期均显著低于常规耕作,土壤脲酶活性在苗期、酸性磷酸酶活性在成熟期与常规耕作差异显著($P < 0.05$)。随土层深度的增加,免耕农田土壤酶活性总体呈下降趋势;常规耕作农田土壤蔗糖酶和酸性磷酸酶活性总体呈上升趋势,而脲酶活性呈下降趋势。

关键词 土壤 玉米 免耕 蔗糖酶 脲酶 酸性磷酸酶

文章编号 1001-9332(2006)12-2347-05 中图分类号 S154.2 文献标识码 A

Dynamics of aquatic brown soil enzyme activities under no-tillage. LIU Xiumei^{1,2}, LI Qi^{1,2}, LIANG Wenju¹, JIANG Yong¹, WEN Dazhong¹ (¹*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; ²*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2006, 17(12): 2347 ~ 2351.

This paper studied the effects of no-tillage on the dynamics of invertase, urease and acid phosphatase activities in an aquatic brown soil during maize growing season. The results showed that in 0~10 cm soil layer, the invertase activity at jointing, trumpet-shaped and ripening stages, urease activity at jointing and booting stages, and acid phosphatase activity at booting and ripening stages were significantly higher under no-tillage (NT) than under conventional tillage (CT). In 10~20 cm soil layer, the invertase activity at seedling, jointing and trumpet-shaped stages was significantly different between NT and CT, and the urease activity during whole growing season except at booting stage was significantly higher under NT than under CT. In 20~30 cm soil layer, the invertase activity during maize growing season was significantly lower under NT than under CT, and urease activity at seedling stage and acid phosphate activity at ripening stage were significantly different between these two treatments. Under NT, there was a decreasing trend of soil enzyme activities with increasing soil depth; while under CT, soil invertase and acid phosphatase activities increased, but urease activity decreased with increasing soil depth.

Key words Soil, Maize, No-tillage, Invertase, Urease, Acid phosphatase.

1 引言

土壤酶主要来源于植物根系分泌物和土壤微生物的增殖及其死亡残体的胞溶^[23],土壤酶在生态系统有机质的分解及养分循环过程中起着重要的作用,其活性反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向,并能够对各种农业管理措施如施肥、残茬覆盖、杀虫剂、耕作方式等作出快速响应^[16]。因此,土壤酶活性可以作为土壤对农业管理措施响应的敏感性指标,对土壤质量状况具有指示作用^[9]。

不同耕作措施对土壤质量产生的影响可通过土壤酶活性的变化得到反映。Caravaca等^[5]研究指出,对于土壤质量的变化,土壤酶比土壤有机质的变化更为敏感,能够在短期内发生变化,而土壤有机质的

变化要缓慢得多。与常规耕作相比,免耕可以提高土壤表层有机质含量、微生物和土壤酶活性^[15]。并且,土壤酶活性与土壤有机质、微生物量、土壤呼吸和碳截留量等指标显著相关^[2,3,17]。许多研究指出,免耕可以提高表层土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、芳基硫酸酯酶和 β -葡萄糖苷酶等土壤酶活性^[12,16],但对深层土壤酶活性的研究结果却差异很大,这可能与作物种类、土壤类型和气候条件的差异有关^[21]。此外,作物不同生育时期、不同土层深度土壤酶活性存在一定的差异^[10]。Aon等^[2]研究发现,在大豆(*Glycine max*)生育旺盛期,土壤脲酶、磷酸酶和脱氢酶活性显著增高。Alvear等^[1]研究指出,常规耕作土壤生物

* 国家自然科学基金资助项目(30570337)。

** 通讯联系人, E-mail: liangwj@iae.ac.cn

2005-12-28 收稿, 2006-10-10 接受。

活性在各土层深度间差异不显著,而免耕土壤生物活性随土层深度分层现象显著.这可能是由于其对土壤的扰动程度不同所致.

土壤酶作为评价土壤质量的敏感性生物指标,在国外的研究较多,而在我国北方特定的气候、地理条件下,系统地研究耕作方式对农田土壤酶活性的影响报道较少.本文以下辽河平原地区潮棕壤为研究对象,开展免耕与常规耕作在玉米(*Zea mays*)不同生育时期和不同土层深度对参与土壤碳、氮和磷循环转化的蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性的动态变化研究,为评价耕作方式对土壤质量的影响提供科学依据.

2 材料与方

2.1 研究地点

本试验在中国科学院沈阳生态实验站进行.该站位于沈阳市南郊苏家屯区十里河镇十里河村(41°31'N,123°22'E),处于下辽河平原东部,属于暖温带半湿润大陆性气候,平均海拔31 m,年平均温度7~8℃,年降雨量700 mm,无霜期为147~164 d,土壤类型为潮棕壤.

试验地为玉米连作地(15年),自2003年4月开始进行免耕试验^[13].免耕处理玉米留茬、秸秆覆盖,秸秆覆盖量为22 890 kg·hm⁻²;常规耕作处理4月20日翻地.2005年4月28日播种玉米,玉米品种为富友1号,播量40 kg·hm⁻².播种时施加底肥,施用量为:尿素300 kg·hm⁻²,磷酸氢二铵150 kg·hm⁻²,氯化钾75 kg·hm⁻².5月6日施用乙草胺与莠去津混合除草剂,施用量为9 kg·hm⁻²(配比为1:1),封闭除草.

2.2 试验设计

试验设常规耕作(CT)和免耕(NT)两个处理,4次重复.小区面积102 m²,玉米行距57 cm,株距40 cm.各采样时期为:苗期(5月31日)、拔节期(6月25日)、大喇叭口期(7月31日)、孕穗期(8月19日)和成熟期(9月24日).用土钻(直径2.5 cm)取土,3点混合,土层深度为0~30 cm,分3层取样,分别为:0~10 cm,10~20 cm和20~30 cm.将采集好的土样去除石块和草根,混合均匀,过2 mm筛后,装入聚乙烯袋,保存在4℃冰箱备测.

表1 土壤样品基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of test soils (±SD)

处理 Treatment	总有机碳 TOC (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (mg·kg ⁻¹)	电导率 EC (μs·cm ⁻¹)	pH
CT	0~10 cm	13.3±0.28	1.08±0.07	83.30±12.80	102.73±15.34	5.35±0.05
	10~20 cm	12.3±0.25	0.94±0.09	64.71±9.12	84.96±17.54	5.89±0.37
	20~30 cm	10.7±0.21	0.85±0.05	56.12±14.41	98.6±19.48	6.06±0.65
NT	0~10 cm	14.3±0.22	1.12±0.18	152.64±21.53	105.13±10.72	6.02±0.79
	10~20 cm	12.5±0.16	0.90±0.07	97.94±17.37	108.18±5.18	5.89±0.70
	20~30 cm	13.2±0.22	0.76±0.05	58.80±7.24	85.17±10.55	6.50±0.30

CT:常规耕作 Conventional tillage;NT:免耕 No-tillage. 下同 The same below.

2.3 土壤性质测定与统计分析

采用常规方法测定土壤基础理化指标^[11],测定结果如表1.土壤蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸法^[8],脲酶采用尿素残留量法^[14],酸性磷酸单酯酶采用对硝基苯磷酸二钠法^[14]测定.土壤酶测定全部采用新鲜土壤,测定结果折算成干土重.

数据采用SPSS 12.0统计分析软件中t检验比较差异显著性.

3 结果与分析

3.1 耕作方式对土壤蔗糖酶活性的影响

在0~10 cm土层,常规和免耕土壤蔗糖酶活性随作物生育时期的变化趋势总体一致,差别仅在于免耕蔗糖酶活性在拔节期最高,而常规耕作蔗糖酶活性在大喇叭口期最高.在拔节期、大喇叭口期和成熟期,免耕土壤蔗糖酶活性显著高于常规耕作($P < 0.05$),分别比常规耕作提高了110.79%、25.54%和37.83%.在10~20 cm和20~30 cm土层,免耕土壤蔗糖酶活性随玉米生育时期的变化与表层基本相同;而常规耕作蔗糖酶活性除苗期外,其它生育时期也与表层基本相同.在10~20 cm土层,拔节期免耕蔗糖酶活性显著高于常规耕作($P < 0.05$),而苗期和大喇叭口期显著低于常规耕作($P < 0.05$),其它时期二者差异不显著;在20~30 cm土层,各个玉米生育时期常规耕作土壤蔗糖酶活性均显著高于免耕($P < 0.05$).可见,免耕对蔗糖酶活性的促进作用主要表现在土壤表层.常规耕作蔗糖酶活性随土层加深而升高,在玉米各个生育时期,蔗糖酶活性均在20~30 cm土层最高,在0~10 cm土层最低;而免耕蔗糖酶活性随土层加深而降低,除了拔节期在10~20 cm土层蔗糖酶活性最高外,其它生育期蔗糖酶活性均在0~10 cm土层最高,在20~30 cm土层最低(图1),说明耕作方式影响土壤蔗糖酶活性的空间分布.

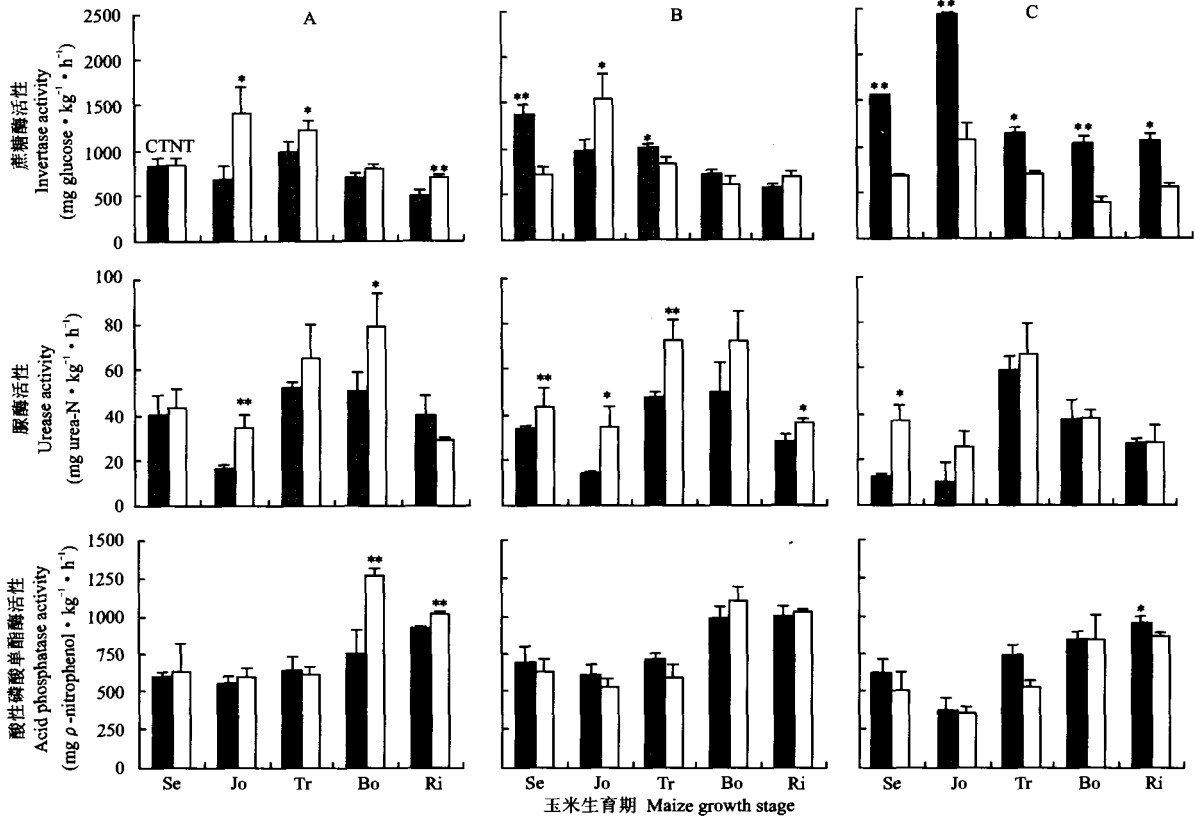


图1 免耕和常规耕作条件下不同深度土壤蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性动态变化

Fig.1 Dynamics of soil invertase, urease and acid phosphatase activities under no-tillage and conventional tillage at different depths.

CT: 常规耕作 Conventional tillage, NT: 免耕 No-tillage, Se: 苗期 Seedling stage, Jo: 拔节期 Jointing stage, Tr: 大喇叭口期 Trumpet-shaped stage, Bo: 孕穗期 Booting stage, Ri: 成熟期 Ripening stage; A: 0~10 cm, B: 10~20 cm, C: 20~30 cm. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 下同 The same below.

3.2 耕作方式对土壤脲酶活性的影响

在0~10 cm 土层,常规耕作和免耕土壤脲酶活性随作物生育时期的变化趋势基本一致.在拔节期和孕穗期,免耕土壤脲酶活性显著高于常规耕作 ($P < 0.05$),分别比常规耕作提高了113.40%和56.51%.在10~20 cm 和20~30 cm 土层,常规耕作和免耕土壤脲酶活性随玉米生育时期的变化与表层0~10 cm 基本相同.在10~20 cm 土层,免耕脲酶活性除孕穗期外,在各个生育时期均显著高于常规耕作 ($P < 0.05$),脲酶活性提高了29.0%~50.4%;在20~30 cm 土层,免耕脲酶活性在苗期显著高于常规耕作 ($P < 0.05$),其它生育期二者无显著差异.在玉米各生育时期,常规耕作和免耕脲酶活性总体上随土层加深而降低,但脲酶活性在0~10 cm 和10~20 cm 土层无显著差异.在大喇叭口期,常规耕作脲酶活性在20~30 cm 土层最高,免耕脲酶活性在10~20 cm 土层最高,但与其它土层差异不显著(图1).

3.3 耕作方式对土壤酸性磷酸酶活性的影响

在0~10 cm 土层,从苗期到大喇叭口期,常规

耕作和免耕土壤酸性磷酸酶活性变化趋势平缓,到了孕穗期和成熟期,酸性磷酸酶活性显著升高.在孕穗期和成熟期,免耕土壤酸性磷酸酶活性极显著高于常规耕作 ($P < 0.01$),分别提高了69.31%和10.42%.在10~20 cm 和20~30 cm 土层,酸性磷酸酶活性随玉米生育时期的变化趋势基本与0~10 cm 土层相同.在10~20 cm 土层,各生育时期常规耕作与免耕处理土壤酸性磷酸酶活性无显著差异;在20~30 cm 土层,成熟期免耕土壤酸性磷酸酶活性显著低于常规耕作 ($P < 0.05$),其它生育期处理间无显著差异.在玉米各个生育时期,免耕处理土壤酸性磷酸酶活性随土层加深而降低,0~10 cm 土层酸性磷酸酶活性最高,20~30 cm 土层最低;而常规耕作土壤酸性磷酸酶活性总体随土层加深而增加,在10~20 cm 和20~30 cm 土层酶活性较高,在0~10 cm 土层酶活性较低,但拔节期例外(图1).

4 讨 论

4.1 耕作方式对不同生育时期土壤酶活性的影响

土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶在土壤碳、氮、磷循环

中起重要作用^[23,24]. 蔗糖酶能催化蔗糖水解生成葡萄糖和果糖,为植物和微生物生长提供碳源;脲酶参与土壤氮素的分解转化,催化尿素水解生成 NH_3 和 CO_2 ,为植物和微生物生长提供氮源;磷酸酶能够催化土壤有机磷化合物的分解反应,其活性高低直接影响土壤有机磷的分解转化及其生物有效性^[25].

土壤蔗糖酶和脲酶活性随玉米生育时期的动态变化趋势与前人研究结果基本一致^[19]. 在拔节期,常规耕作土壤蔗糖酶和脲酶活性均出现下降趋势. 这可能是由于在拔节期植物生长旺盛,对土壤养分吸收迅速,减少了微生物可直接利用的碳源和能源,从而抑制了土壤微生物的生长和繁殖,造成土壤酶活性降低. 张成娥等^[22]研究发现,在玉米拔节期,土壤微生物量碳和氮含量也显著降低. 而拔节期免耕土壤蔗糖酶、脲酶活性均显著高于常规耕作,可能是因为免耕土壤中含有丰富的有机质,同时满足了植物和微生物对养分的需求,从而促进了微生物的繁殖^[6]. 在大喇叭口期或孕穗期土壤酶活性上升并达到最大值,到成熟期酶活性略有下降,其原因可能是随着玉米生育期的递进,植物根系代谢旺盛,根系分泌物增多,微生物和酶代谢活动增强,在大喇叭口期和孕穗期活性达到最大值;到了成熟期后,根系对养分吸收速度减慢,根系分泌物减少,土壤酶活性也随之下降^[19]. 免耕土壤蔗糖酶和脲酶活性分别在玉米旺盛生育期(大喇叭口期、孕穗期和成熟期)显著高于常规耕作,可能与免耕土壤表层的秸秆覆盖有关. 随着作物生育期的递进,地表温度升高、湿度增大,土壤微生物对地表秸秆的分解速度加快,从而提高了土壤酶活性^[20].

常规耕作土壤酸性磷酸酶活性从苗期到大喇叭口期变化趋势平缓,到孕穗期活性升高,成熟期活性最高. García-Gil 等^[7]研究表明,当土壤中无机磷含量较高时,土壤磷酸酶活性受到抑制,而低磷条件下磷酸酶活性可被诱导. 随着玉米生育期的递进,土壤中无机磷逐渐被消耗,土壤磷酸酶活性被激活,因此,孕穗期和成熟期磷酸酶活性显著高于其它时期. 免耕土壤酸性磷酸酶随玉米生育期的变化与常规耕作大致相同,但在孕穗期和成熟期显著高于常规耕作,可能也与地表有机质的快速分解有关.

4.2 耕作方式对不同土层深度土壤酶活性的影响

在10~20 cm和20~30 cm土层,土壤酶活性随作物生育时期的变化与0~10 cm土层基本相同. 在10~20 cm土层,免耕土壤脲酶活性除孕穗期外,均显著高于常规耕作,可能与土壤中无机氮含量较

少有关. Roldán 等^[18]研究指出,由于免耕对土壤扰动较少,有机氮的矿化速率较慢,因此,免耕土壤硝态氮含量显著低于常规耕作. 这可能是免耕土壤脲酶活性比常规耕作显著增高的原因.

在10~20 cm土层,免耕土壤蔗糖酶活性在苗期、拔节期和大喇叭口期与常规耕作差异显著,但在拔节期显著高于常规耕作,酸性磷酸酶活性在各处理间无显著差异;在20~30 cm土层,免耕土壤蔗糖酶活性在各玉米生育期都显著低于常规耕作,脲酶活性仅在苗期显著高于常规耕作,酸性磷酸酶活性在成熟期显著低于常规耕作. 可见,免耕对土壤酶活性的促进作用主要表现在土壤表层. 这与 Roldán 等^[17]的研究结果一致. 他们的研究指出,免耕措施有利于提高表层土壤脲酶和酸性磷酸酶活性,但对深层土壤酶活性的影响不显著. 这可能是因为与免耕相比,常规耕作土壤有机质在各个土层的分布更为均匀,而免耕土壤有机质主要集中在土壤表层^[7]. 另外,植物根系对土壤酶的活性也有一定的影响. Holland 等^[11]研究指出,土壤中分布的微生物群落和植物根密度在表层土壤免耕高于常规耕作,而在土壤深层常规耕作高于免耕.

随土层加深,免耕土壤蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性呈下降趋势. 这主要是因为耕作方式引起的土壤有机质的分层分布对土壤微生物的生长和繁殖产生影响,进而影响到土壤酶的活性^[4]. 常规耕作土壤蔗糖酶和酸性磷酸酶活性随土层加深,总体呈上升趋势,土壤脲酶活性呈下降趋势(除大喇叭口期). 土壤蔗糖酶和酸性磷酸酶活性随土层的分布特点,可能与植物根系的分布有关^[11]. 土壤脲酶活性随土层加深而降低,可能与土壤中功能菌群的活性不断增强有关. Aon 等^[3]研究发现,由于土壤硝化细菌和反硝化细菌活性的不断增强,使土壤脲酶活性在作物整个生育时期和随土层加深呈下降趋势.

综上所述,与常规耕作相比,免耕可显著地提高表层(0~10 cm)土壤蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性;在10~20 cm土层,免耕农田土壤脲酶活性在玉米大多数取样时期显著高于常规耕作;在20~30 cm土层,免耕土壤蔗糖酶活性在玉米各生育时期均显著低于常规耕作. 随土层深度加深,免耕农田土壤酶活性总体呈下降趋势,常规耕作农田土壤蔗糖酶和酸性磷酸酶活性总体呈上升趋势,而脲酶活性呈下降趋势.

参考文献

- 1 Alvear M, Rosas A, Rouanet JL, et al. 2005. Effects of three soil

- tillage systems on some biological activities in an Ultisol from southern Chile. *Soil Till Res*, **82**: 195 ~ 202
- 2 Aon MA, Cabello MN, Sarena DE, *et al.* 2001. I. Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in an agricultural soil. *Appl Soil Ecol*, **18**: 239 ~ 254
 - 3 Aon MA, Colaneri AC. 2001. II. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil. *Appl Soil Ecol*, **18**: 255 ~ 270
 - 4 Balota EL, Filho AC, Andrade DS, *et al.* 2004. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. *Soil Till Res*, **77**: 137 ~ 145
 - 5 Caravaca F, Masciandaro G, Ceccanti B. 2002. Land use in relation to soil chemical and biochemical properties in a semiarid Mediterranean environment. *Soil Till Res*, **68**: 23 ~ 30
 - 6 Ekenler M, Tabatabai MA. 2003. Tillage and residue management effects on β -glucosaminidase. *Soil Biol Biochem*, **35**: 871 ~ 874
 - 7 García-Gil JC, Plaza C, Soler-Rovira P, *et al.* 2000. Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. *Soil Biol Biochem*, **32**: 1907 ~ 1913
 - 8 Guan S-Y (关松荫). 1986. *Soil Enzyme and Research Methods*. Beijing: Agriculture Press. 274 ~ 276 (in Chinese)
 - 9 Hang YM, Zhou GY, Wu N, *et al.* 2004. Soil enzyme activity changes in different-aged spruce forests of the Eastern Qinghai-Tibetan plateau. *Pedosphere*, **14**: 305 ~ 312
 - 10 Hernández-Hernández RM, López-Hernández D. 2002. Microbial biomass, mineral nitrogen and carbon content in savanna soil aggregates under conventional and no-tillage. *Soil Biol Biochem*, **34**: 1563 ~ 1570
 - 11 Holland JN. 1995. Effects of above-ground herbivory on soil microbial biomass in conventional and no-tillage agroecosystems. *Appl Soil Ecol*, **2**: 275 ~ 279
 - 12 Jiang Y (姜勇), Liang W-J (梁文举), Wen D-Z (闻大中). 2004. Effect of no-tillage on soil biological properties in farmlands: A review. *Chin J Soil Sci (土壤通报)*, **35**(3): 347 ~ 351 (in Chinese)
 - 13 Liu F-M (刘方明), Liang W-J (梁文举), Weng D-Z (闻大中). 2005. Effects of tillage method and herbicide on cornfield weed community. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **16**(10): 1879 ~ 1882 (in Chinese)
 - 14 Lu R-K (鲁如坤). 2000. *Analytical Methods for Soil Agro-Chemistry*. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press. 249 ~ 255 (in Chinese)
 - 15 Lynne CB, Peter DS, Mike JL, *et al.* 2003. Soil microbial properties under permanent grass, conventional tillage and no-till management in South Dakota. *Soil Till Res*, **71**: 15 ~ 23
 - 16 Riffaldi R, Saviozzi A, Levi-Minzi R, *et al.* 2002. Biochemical properties of a Mediterranean soil as affected by long-term crop management systems. *Soil Till Res*, **67**: 109 ~ 114
 - 17 Roldán A, Salinas-García JR, Alguacil MM, *et al.* 2005. Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field. *Appl Soil Ecol*, **30**: 11 ~ 20
 - 18 Roldán A, Salinas-García JR, Alguacil MM, *et al.* 2005. Soil enzyme activities suggest advantages of conservation tillage practices in sorghum cultivation under subtropical conditions. *Geoderma*, **129**: 178 ~ 185
 - 19 Shen H (沈宏), Cao Z-H (曹志洪), Xu B-S (徐本生). 1999. Dynamics of soil microbial biomass and soil enzyme activity and their relationships during maize growth. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **10**(4): 471 ~ 474 (in Chinese)
 - 20 Song R (宋日), Wu C-H (吴春胜), Mou J-M (牟金明), *et al.* 2001. Dynamic changes of soil microbial biomass carbon and soil enzyme activities during growth of corn. *J Jilin Agric Univ (吉林农业大学学报)*, **23**(2): 13 ~ 16 (in Chinese)
 - 21 Wang FE, Chen YX, Tian GM, *et al.* 2004. Microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in the soil profiles of different vegetation covers established for soil rehabilitation in a red soil region of southeastern China. *Nutr Cycl Agroecosyst*, **68**: 181 ~ 189
 - 22 Zhang C-E (张成娥), Liang Y-L (梁银丽). 2001. Effect of different amounts of nitrogen and phosphorus fertilizers applied on soil microbial biomass during corn growth periods. *Chin J Eco-Agric (中国生态农业学报)*, **9**(2): 72 ~ 74 (in Chinese)
 - 23 Zhang L-L (张丽莉), Zhang Y-L (张玉兰), Chen L-J (陈利军), *et al.* 2004. Response of saccharidase activities to free-air carbon dioxide enrichment (FACE) under rice-wheat rotation. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **15**(6): 1019 ~ 1024 (in Chinese)
 - 24 Zhang Y-L (张玉兰), Zhang L-L (张丽莉), Chen L-J (陈利军), *et al.* 2004. Response of soil hydrolase and oxidoreductase activities of free-air carbon dioxide enrichment (FACE) under rice-wheat rotation. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **15**(6): 1014 ~ 1018 (in Chinese)
 - 25 Zhou L-K (周礼恺). 1988. *Soil Enzymology*. Beijing: Science Press. (in Chinese)

作者简介 刘秀梅,女,1978年生,博士研究生.主要从事农业生态学研究. E-mail: liuxiumei1978@163.com

责任编辑 张凤丽
