

长期施肥对设施菜田土壤酶活性及土壤理化性状的影响^{*}

马宁宁¹ 李天来^{1**} 武春成^{1,2} 张恩平¹

(¹ 沈阳农业大学园艺学院辽宁省设施园艺重点实验室, 沈阳 110161; ² 河北科技师范学院园艺园林系, 河北秦皇岛 066600)

摘 要 利用沈阳农业大学蔬菜长期定位施肥试验田,研究了长期施肥对设施菜田土壤酶活性及土壤理化性状的影响.结果表明:长期施用有机肥或有机肥与氮肥配合施用可明显提高土壤有机质和氮、磷、钾养分含量,改善土壤物理性状,增强土壤转化酶、脲酶和中性磷酸酶的活性;而长期单施氮肥造成土壤 pH 值和土壤酶活性降低.土壤酶活性与土壤养分因子的相关分析表明,转化酶活性与土壤有机质、全磷含量呈显著正相关;脲酶活性与土壤有机质、全磷和速效钾含量呈极显著正相关,与碱解氮和速效磷含量呈显著正相关;中性磷酸酶活性与土壤有机质、全磷和速效钾含量呈显著正相关;脱氢酶活性与土壤各养分因子均无明显相关性.

关键词 长期施肥 土壤酶活性 土壤理化性状

文章编号 1001-9332(2010)07-1766-06 **中图分类号** S625.5⁺4 **文献标识码** A

Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and soil physicochemical properties of facility vegetable field. MA Ning-ning¹, LI Tian-lai¹, WU Chun-cheng^{1,2}, ZHANG En-ping¹ (¹Liaoning Province Key Laboratory of Protected Horticulture, College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; ²Department of Horticulture and Landscape, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066600, Hebei, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(7): 1766-1771.

Abstract: An investigation was made on a long-term fertilization facility vegetable field at Shenyang Agricultural University to study the effects of long-term fertilization on the soil enzyme activities and soil physicochemical properties. Long term application of organic manure combined with or without nitrogen fertilizer increased the contents of soil organic matter, N, P, and K, and improved the soil physical properties and soil invertase, urease, and neutral phosphatase activities. However, long-term application of nitrogen fertilizer alone decreased soil pH and soil enzymes activities. Significant positive correlations were observed between soil invertase activity and soil organic matter and total P, between soil urease activity and soil organic matter, alkali-hydrolyzable N, total and available P, and available K, and between soil neutral phosphatase activity and soil organic matter, total P, and available K, but less correlation was found between soil dehydrogenase activity and soil nutrients.

Key words: long-term fertilization; soil enzyme activity; soil physicochemical property.

土壤酶是来自于微生物、动植物活体或残体的一类生物活性物质,它可以催化土壤中的生物化学反应,在土壤生态系统中起着关键作用^[1-2].土壤酶的活性与土壤类型^[3-4]、栽培制度^[5-6]和管理措施^[7-9]等密切相关,是土壤质量的重要指标,被广泛用于评价土壤营养物质的循环转化状况以及各种农

业措施和肥料施用的效果.近年来,关于长期定位施肥对土壤酶活性影响的研究报道较多^[10-13],但多数集中于大田土壤,有关长期定位施肥对菜田土壤酶活性影响的研究报道较少,特别是有关设施栽培条件下长期施肥对菜田土壤酶活性影响的研究报道更少.

氮肥作为一种最常用的化学肥料,可以提高作物产量、培肥土壤肥力,然而近年来设施蔬菜栽培中过量施用氮肥现象十分普遍.有研究表明,偏施氮肥

^{*} 国家科技支撑计划项目(2006BAD07B04)资助.

^{**} 通讯作者. E-mail: tianlaili@126.com

2009-10-12 收稿,2010-04-19 接受.

不仅造成土壤结构恶化、肥力下降,导致作物产量和品质下降,农业生产成本上升,而且还会严重威胁生态环境^[14]. 因此,如何科学合理地施用氮肥已成为农业生产的重要问题. 本文以设施蔬菜氮肥长期定位试验为平台,研究了不同施肥处理对土壤酶活性及土壤理化性状的影响,以期为建立合理的施肥制度、改善土壤生物化学环境以及实现土壤可持续利用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试土壤取自于 1988 年秋开始的沈阳农业大学蔬菜长期定位施肥试验田. 1988—1996 年为露地栽培试验,模拟施肥的 2 因素(有机肥与无机氮肥) 3 水平试验设计. 有机肥(马粪)的 3 个施用水平是: 0、37.5、75 t · hm⁻² · a⁻¹;无机氮肥(尿素)的 3 个施用水平是:300、600、900 kg · hm⁻² · a⁻¹,经 5 茬试验后又相应地将尿素施用量降低为 0、300、600 kg · hm⁻² · a⁻¹. 露地试验一年两茬,采用 8 种蔬菜轮作,栽培顺序为:大白菜、菜豆、萝卜、洋葱、黄瓜、马铃薯、叶用芥菜、甜椒. 1997 年至今为设施栽培试验,试验设计进行了调整,保留露地试验的高量有机肥(75 t · hm⁻² · a⁻¹)的 3 个无机氮肥处理和不施有机肥的 3 个无机氮肥处理,按照露地栽培试验的施肥标准折算得到各处理肥料施用量,共 6 个处理,分别为:1) 无肥对照(CK);2) 施尿素 300 kg · hm⁻²(N₁);3) 施尿素 600 kg · hm⁻²(N₂);4) 施马粪 75000 kg · hm⁻²(M);5) 施马粪 75000 kg · hm⁻²、尿素 300 kg · hm⁻²(MN₁);6) 施马粪 75000 kg · hm⁻²、尿素 600 kg · hm⁻²(MN₂). 采用随机区组设计,3 次重复,小区为长 1.5 m、宽 1 m、深 0.8 m 的无底水泥池,每年有机肥于定植前一次性施入,氮肥在生长季内分两次追肥. 设施内蔬菜为一年一茬的长季节栽培,1997—2006 年种植的蔬菜有茄子(2 茬)、番茄(5 茬)、黄瓜(1 茬)、甜椒(2 茬). 试验前土壤基本理化性质为:有机质 24.30 g · kg⁻¹,全氮 1.164 g · kg⁻¹,全磷 1.374 g · kg⁻¹,碱解氮 86.41 mg · kg⁻¹,有效磷 70.8 mg · kg⁻¹,速效钾 56.14 mg · kg⁻¹,土壤 pH 6.75^[15].

1.2 测定项目与方法

试验样品于 2006 年秋甜椒采收结束后采集,每个处理均用 5 点取样法采集 0~20 cm 的耕层土壤,剔除石砾和植物残茬等杂物,混合制样,样品风干后过 1 mm 筛备用.

土壤转化酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,结果以 24 h 后 1 g 土壤中葡萄糖的质量(mg)表示;土壤脲酶活性用苯酚-次氯酸钠比色法测定,结果以 24 h 后 1 g 土壤中 NH₄⁺-N 的质量(mg)表示;土壤磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定,结果以 24 h 后 1 g 土壤中释放出的酚的质量(mg)表示;土壤脱氢酶活性用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定,结果以每克土壤中三苯基甲臜(TPF)的体积(μl)表示^[16].

土壤理化性状采用常规分析法测定:有机质用重铬酸钾容量法;全氮用开氏法;全磷用钼蓝比色法;碱解氮用扩散吸收法;速效磷用 0.5 mol · L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-硫酸钼锑抗比色法;速效钾用 1 mol · L⁻¹ NH₄OAc 浸提-火焰光度计法^[17]. 土壤 pH 值用酸度计法测定;土壤容重和孔隙度用环刀法测定^[17].

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 软件对数据进行处理,采用 DPS 软件的新复极差法进行差异显著性分析.

2 结果与分析

2.1 长期施肥对设施菜田土壤酶活性的影响

由表 1 可知,长期施肥明显影响了设施菜田的土壤酶活性,不同处理土壤的转化酶、脲酶、中性磷酸酶和脱氢酶活性存在较大差异.

土壤脲酶与中性磷酸酶活性的变化趋势相同,均表现为 MN₂>MN₁>M>CK>N₁>N₂,M、MN₁、MN₂ 处理的脲酶和中性磷酸酶活性都极显著高于对照,其中 MN₂ 处理的活性最高,达到极显著水平,说明有机肥和氮肥配合施用可以显著提高土壤脲酶和中

表 1 长期施肥对土壤酶活性的影响
Tab.1 Effects of long-term fertilization on enzyme activities of soil

处理 Treat- ment	转化酶 Invertase (mg glucose · g ⁻¹ · d ⁻¹)	脲 酶 Urease (mg NH ₄ ⁺ -N · g ⁻¹ · d ⁻¹)	中性磷酸酶 Neutral phosphates (mg phenol · g ⁻¹ · d ⁻¹)	脱氢酶 Dehydrogenase (μl TPF · g ⁻¹ · d ⁻¹)
CK	3.86Bb	0.94Cd	1.16Dd	14.20Aa
N ₁	2.39BCc	0.83CDde	0.88Ee	8.73Bc
N ₂	1.47Cc	0.76De	0.86Ee	3.61Cd
M	3.83Bb	1.37Bc	1.42Cc	11.41Bb
MN ₁	6.64Aa	1.52Bb	2.06Bb	14.54Aa
MN ₂	6.07Aa	1.73Aa	3.42Aa	9.46Bc

同列不同大、小写字母分别表示差异显著(P<0.05)和极显著(P<0.01) Different capital and small letters in the same column meant significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

性磷酸酶的活性,有机肥提高土壤磷酸酶活性很可能是因为有有机肥中磷酸酶含量较高^[18].长期单独施用氮肥明显降低了土壤脲酶和中性磷酸酶的活性,除 N₁ 处理脲酶活性与对照无显著差异外,N₁ 处理中性磷酸酶及 N₂ 处理中性磷酸酶和脲酶活性都极显著低于对照,对照磷酸酶活性高于单施氮肥处理可能是由于土壤磷素的缺乏刺激了作物根系分泌较多的磷酸酶,从而促进有机磷的矿化以满足自身需要^[19],N₁ 与 N₂ 处理的脲酶和中性磷酸酶活性差异不显著.

土壤转化酶活性表现为有机肥和氮肥配施>对照>单施有机肥>单施氮肥. CK 与 M 处理转化酶活性差异不显著,但二者与有机肥和氮肥配施(MN₁、MN₂)及单施氮肥(N₁、N₂)处理间的差异均达到极显著水平. N₁、N₂ 处理的转化酶活性仅为 CK 的 62% 和 47%,而 MN₁、MN₂ 处理转化酶活性分别是对照的 1.7 和 1.6 倍,这一方面可能是由于有机肥的施用提高了土壤有机碳的含量,为转化酶提供了更多的酶促底物,另一方面可能是由于氮肥和有机肥的配施调节了土壤的 C/N,为微生物活动和酶活性的提高创造了良好的条件^[20],不同施氮量处理,即 N₁ 和 N₂、MN₁ 和 MN₂ 间转化酶活性无明显差异.

长期不均衡施肥降低了土壤脱氢酶活性,各施肥处理中,除 MN₁ 处理与 CK 无显著差异外,其他各处理脱氢酶活性均低于对照,且都达到了极显著水平.单施尿素处理(N₁、N₂)土壤脱氢酶活性均极显著低于相应的配施有机肥处理(MN₁、MN₂),这可能是由于酶促基质减少或微生物活性降所致^[12].

2.2 长期施肥对设施菜田土壤理化性状的影响

施用有机肥可以明显改善土壤的理化性状,提高土壤肥力.从表 2 可以看出,与 CK 相比,施用有机肥处理的土壤有机质增加了 63.4% ~ 97.1%,全氮增加了 50.6% ~ 119.8%,碱解氮增加了 91.2%

~ 107.4%,全磷增加了约 5 ~ 7 倍,速效磷增加了 120.2% ~ 138.9%,速效钾增加了 80.5% ~ 124.6%,容重减少了 17.5% ~ 23.8%,孔隙度增加了 7.9% ~ 14.3%,除了全磷含量低于试验前水平外,其余土壤养分含量均高于试验前水平.施用有机肥可以改善单施氮肥导致的土壤肥力的下降,在尿素施用量相同的条件下,与单施化肥的 N₁、N₂ 处理相比,配施有机肥的 MN₁、MN₂ 处理土壤有机质增加了 92.6% ~ 106.6%,全氮增加了 68.6% ~ 106.8%,碱解氮增加了 44% ~ 53%,全磷增加了约 2 ~ 9 倍,速效磷增加了 77% ~ 158.7%,速效钾增加了 57.1% ~ 123.3%,容重减少了 3.7% ~ 27.3%,孔隙度增加了 1.4% ~ 16.1%.长期单独施用尿素不能提高土壤有机质、全氮和全磷含量,N₁、N₂ 处理的有机质、全氮和全磷含量都低于试验前水平,但碱解氮、速效磷和速效钾含量都高于对照和试验前水平(除 N₁ 处理的速效磷外).

各施肥处理土壤 pH 值大小依次为:MN₁>M>试验前水平>CK>MN₂>N₁>N₂,MN₁ 处理的土壤 pH 值最高,为 7.02,接近中性;N₂ 处理的土壤 pH 值最低,仅为 6.02,无论单施化肥还是化肥配施有机肥,土壤 pH 值都随尿素施用量的增加而降低.可见,连续施用有机肥可以维持土壤 pH 值的稳定,长期单独或大量施用无机氮肥会使土壤 pH 值下降,造成土壤酸化,有机肥与适量无机氮肥配合施用也可以保持土壤 pH 值稳定,减缓土壤的酸化进程.

2.3 土壤酶与土壤理化性状的相关性

为了探讨长期施肥条件下菜田土壤酶活性与土壤理化性状之间的关系,将 4 种土壤酶与各土壤理化性状因子进行相关分析.结果(表 3)表明,4 种土壤酶与各土壤理化性状因子的相关情况基本一致,除与土壤容重呈负相关外,与其他理化性状因子均呈正相关.土壤脱氢酶活性与土壤 pH 值呈显著正相关,与土壤其他各养分因子的相关性不明显;中性

表 2 长期施肥对土壤理化性状的影响
Tab.2 Effects of long-term fertilization on physico-chemical properties of soil

处理 Treatment	有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	全氮 Total N (g · kg ⁻¹)	全磷 Total P (g · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali- hydrolyzable N (mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg · kg ⁻¹)	容重 Bulk density (g · cm ⁻³)	孔隙度 Porosity (%)	pH
CK	17.5	0.81	0.16	99.40	64.47	84.62	1.26	63	6.58
N ₁	17.5	1.05	0.39	124.25	59.53	97.22	1.32	62	6.23
N ₂	16.7	0.59	0.13	143.15	80.21	85.10	1.08	69	6.02
M	28.6	1.78	0.99	194.95	152.58	171.94	1.04	72	6.89
MN ₁	33.7	1.77	1.27	190.05	153.99	152.72	0.96	72	7.02
MN ₂	34.5	1.22	1.32	206.15	141.95	190.07	1.04	70	6.37

表 3 土壤酶活性与土壤理化性状之间的相关系数
Tab.3 Correlation coefficients between soil enzyme activities and physico-chemical properties of soil

	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	碱解氮 Alkali- hydrolyzable N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	容 重 Bulk density	孔隙度 Porosity	pH
转化酶 Invertase	0. 8919 *	0. 6638	0. 8601 *	0. 6330	0. 7414	0. 7395	-0. 5728	0. 4901	0. 6860
脲酶 Urease	0. 9837 **	0. 7249	0. 9661 **	0. 8715 *	0. 8971 *	0. 9514 **	-0. 7050	0. 6847	0. 5850
中性磷酸酶 Neutral phosphates	0. 8541 *	0. 3835	0. 8247 *	0. 7325	0. 6722	0. 8204 *	-0. 5494	0. 4855	0. 2338
脱氢酶 Dehydrogenase	0. 4124	0. 5853	0. 3961	0. 0679	0. 3351	0. 2804	-0. 0698	0. 0328	0. 8531 *

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

磷酸酶活性与土壤有机质、全磷、速效钾含量呈显著正相关;转化酶活性与土壤有机质和全磷含量呈显著正相关,与其他因子的相关性不明显;脲酶活性与土壤各养分含量都有较高的相关系数,与碱解氮和速效磷呈显著正相关,与有机质、全磷、速效钾的相关关系达到极显著水平.说明在本试验条件下,脲酶能够较全面地反映土壤的肥力变化,脱氢酶不能表征不同肥料对土壤肥力的影响.

3 讨 论

孙瑞莲等^[19]研究表明,N、P、K 与有机肥长期配合施用能明显提高土壤有机质和氮磷钾养分含量,增强土壤转化酶、磷酸酶和脲酶活性,这种施肥方式可以为作物稳产高产创造良好的土壤生物化学环境.程东娟等^[21]通过田间有机无机肥料长期定位培肥试验发现,有机无机肥料配施可明显增加土壤脲酶活性,其土壤脲酶活性明显高于单施有机肥和化肥.本研究结果与前人的报道基本一致,长期施用有机肥或有机肥与氮肥配合施用明显提高了土壤有机质和氮磷钾养分含量,改善了土壤物理性状,增强了土壤酶活性,有机肥处理土壤转化酶、脲酶和中性磷酸酶活性均显著或极显著高于对照和单施氮肥处理,且有机肥配施氮肥处理土壤酶活性高于单施有机肥处理,原因可能是:1)有机肥和化肥配施有利于改善土壤理化性质,调节土壤 C/N,促进作物和土壤微生物的生长,提高土壤酶活性;2)有机肥的施用可以为土壤酶提供更多、更丰富的酶促基质,发挥底物诱导作用;3)施用有机肥可以提高土壤腐殖质含量,而腐殖质能够通过离子交换、离子键或共价键等与土壤酶结合,固定土壤酶^[20,22-25].

氮素是作物生长所必需的营养元素,土壤中氮素的丰缺及供给状况直接影响作物的生长发育.进入土壤和累积在土壤中的含氮有机化合物经复杂的生物化学转化,最后转变为植物可以利用的形式,在其转化的每一阶段,均有专性的土壤酶类参与.因

此,不同土壤酶活性的差异也代表着不同土壤氮素的转化情况.左智天等^[26]通过对地处澜沧江上游的 6 种不同土地利用类型土壤氮含量与土壤酶活性变化进行分析认为,土壤氮含量越高,土壤酶活性越高.在氮素循环转化的过程中,氮素营养逐渐衰减,土壤酶活性也随之降低,土壤发生不同程度的退化.而在本试验中,单一施用氮肥处理土壤转化酶、脲酶、中性磷酸酶和脱氢酶活性均显著或极显著低于对照,土壤 pH 值也随着氮肥施入量的增加而相对降低,N₂ 处理 pH 值仅为 6.02,这可能是由于土壤长期偏施氮肥造成土壤 pH 值下降,土壤酸化不利于作物对养分的吸收,从而降低了土壤酶活性,导致土壤不同程度的退化,最终影响作物的生长^[27].郭天财等^[28]以前茬田管作底肥,在高产麦田中施入不同水平的氮肥研究施氮量对冬小麦根际土壤酶活性的影响,结果表明,在同一生育时期内,土壤脲酶活性随施氮水平的提高而上升.本试验中,在氮肥配施有机肥的条件下,土壤脲酶和中性磷酸酶活性随着氮肥施入量的增加而相对增加,且差异达极显著水平,这一方面可能是因为适量施入氮肥有利于协调土壤 C/N,改善土壤理化性质,从而有助于作物和土壤(微)生物的生长,使更多的酶伴随着旺盛的根系活动和土壤动物、微生物的生命活动而进入土壤;另一方面氮肥的施入补充了土壤中氮的消耗,促进了土壤微生物的繁殖,从而提高了土壤酶活性和土壤肥力.

王俊华等^[12]认为,土壤酶活性与土壤养分密切相关,可反映土壤养分(尤其是 C、N、P)转化的强弱,表征土壤肥力,适用于对施肥效果的评价.本试验对长期施肥条件下的土壤理化性状及土壤酶活性进行相关性分析,结果表明,土壤有机质含量与土壤转化酶、脲酶和中性磷酸酶活性存在显著正相关,这与前人的研究结果一致^[5,19].土壤脲酶活性与碱解氮和速效磷含量呈显著正相关,与有机质、全磷、速效钾含量的相关性达到极显著水平,可以反映肥料

的施用效果。

长期偏施无机氮肥导致土壤养分含量降低和土壤酶活性下降,加速了土壤酸化,增施有机肥可以显著防止或延缓这些问题的产生,有利于提高土壤肥力,但经过近 20 年的循环栽培后,土壤磷明显不足,土壤养分不平衡,可见,为了保持土壤养分在高肥力水平上的平衡,应适当控制无机氮肥的施用量,配施磷、钾肥。

参考文献

- [1] Zhou L-K (周礼恺), Zhang Z-M (张志明), Cao C-M (曹承绵). On the role of the totality of soil enzyme activities in the evaluation of the level of soil fertility. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1983, **20**(4): 413–417 (in Chinese)
- [2] Cao H (曹慧), Sun H (孙辉), Yang H (杨浩), et al. A review: Soil enzyme activity and its indication for soil quality. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2003, **9**(1): 105–109 (in Chinese)
- [3] Rao MA, Violante A, Gianfreda L. Interaction of acid phosphatase with clays, organic molecules and organo-mineral complexes: Kinetics and stability. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, **32**: 1007–1014
- [4] Kandeler E, Luxhøi J, Tschirko M, et al. Xylanase, invertase and protease at the soil-litter interface of a loamy sand. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, **31**: 1171–1179
- [5] Xu Q (徐强), Cheng Z-H (程智慧), Meng H-W (孟焕文), et al. Relationships between soil nutrients and rhizospheric soil microbial communities and enzyme activities in a maize-capsicum intercropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(12): 2747–2754 (in Chinese)
- [6] Wu F-Z (吴凤芝), Meng L-J (孟立君), Wang X-Z (王学征). Soil enzyme activities in vegetable rotation and continuous cropping system of under shed protection. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2006, **12**(4): 554–558 (in Chinese)
- [7] Wei Z-X (韦泽秀), Liang Y-L (梁银丽), Inouen I, et al. Effects of different water and fertilizer supply on cucumber soil nutrient content, enzyme activity, and microbial diversity. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(7): 1678–1684 (in Chinese)
- [8] Yan H (颜慧), Zhong W-H (钟文辉), Li Z-P (李忠佩), et al. Effects of long-term fertilization on phospholipid fatty acids and enzyme activities in paddy red soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(1): 71–75 (in Chinese)
- [9] Wang G-H (王光华), Jin J (金剑), Han X-Z (韩晓增), et al. Effects of different land management practices on black soil microbial biomass C and enzyme activities. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(6): 1275–1280 (in Chinese)
- [10] Wang C (王灿), Wang D-J (王德建), Sun R-J (孙瑞娟), et al. The relationship between soil enzyme activities and soil nutrients by long-term fertilizer experiments. *Ecology and Environment* (生态环境), 2008, **17**(2): 688–692 (in Chinese)
- [11] Liu E-K (刘恩科), Zhao B-Q (赵秉强), Li X-Y (李秀英), et al. Biological properties and enzymatic activity of arable soils affected by long-term different fertilization systems. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2008, **32**(1): 176–182 (in Chinese)
- [12] Wang J-H (王俊华), Yin R (尹睿), Zhang H-Y (张华勇), et al. Changes in soil enzyme activities, microbial biomass, and soil nutrition status in response to fertilization regimes in a long-term field experiment. *Ecology and Environment* (生态环境), 2007, **16**(1): 191–196 (in Chinese)
- [13] Gao R (高瑞), Lü J-L (吕家珑). Study on the enzyme activities and fertility change of soils by a long-term located utilization of different fertilizers. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2005, **13**(1): 143–145 (in Chinese)
- [14] Zhang S-L (张绍林), Zhu Z-L (朱兆良), Xu Y-H (徐银华), et al. Optimum nitrogen rate for rice-wheat system in Taihu Lake area. *Soils* (土壤), 1988, **42**(1): 5–9 (in Chinese)
- [15] Ge X-G (葛晓光), Zhang E-P (张恩平), Zhang X (张昕), et al. Studies on changes of field-vegetable ecosystem under long-term fixed fertilizer experiment. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2004, **31**(1): 34–38 (in Chinese)
- [16] Yao H-Y (姚槐应), Huang C-Y (黄昌勇). *Soil Microbial Ecology and Its Experiment Technology*. Beijing: Science Press, 2006 (in Chinese)
- [17] Yan C-S (严昶升). *Soil Fertility and Its Research Method*. Beijing: China Agriculture Press, 1988 (in Chinese)
- [18] Yang B-J (杨邦俊), Xiang S-Q (向世群). Effects of organic manures on phosphates activation and phosphorus transformation of purple paddy soil. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 1990, **21**(3): 108–110 (in Chinese)
- [19] Sun R-L (孙瑞莲), Zhao B-Q (赵秉强), Zhu L-S (朱鲁生), et al. Effects of long-term fertilization on

soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2003, **9**(4): 406–410 (in Chinese)

[20] Yuan L (袁 玲), Yang B-J (杨邦俊), Zheng L-J (郑兰君), *et al.* Effects of long-term fertilization on enzymatic activities and transformation of nitrogen and phosphorus in soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 1997, **3**(4): 300–306 (in Chinese)

[21] Cheng D-J (程东娟), Liu S-Q (刘树庆), Wang D-W (王殿武), *et al.* The effect of long-term experiment improving soil fertility on the dynamical changes of soil nutrient and soil enzyme activities. *Journal of Agricultural University of Hebei* (河北农业大学学报), 2003, **26**(3): 33–36 (in Chinese)

[22] Burket JZ, Dick RP. Microbial and soil parameters in relation to N mineralization in soils of diverse genesis under differing management systems. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **27**: 430–438

[23] Eivazi F, Bayan MR. Select soil enzyme activities in the historic sanborn field as affected by long-term cropping systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, **34**: 2259–2275

[24] Pascual JA, García C, Hernandez T. Lasting microbiological and biochemical effects of the addition of municipal solid waste to an arid soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, **30**: 1–6

[25] Boyd SA, Mortland MM. Manipulating the activity of immobilized enzymes with different organo-smectite complexes. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 1985, **41**: 1564–1566

[26] Zuo Z-T (左智天), Tian K (田 昆), Xiang S-M (向仕敏), *et al.* Soil nitrogen content and enzyme activity in different utilization types of land in the upper reaches of Lancang River. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2009, **16**(4): 280–285 (in Chinese)

[27] Ekenler M, Tabatabai MA. Effects of liming and tillage systems on microbial biomass and glycosidases in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, **39**: 51–61

[28] Guo T-C (郭天财), Song X (宋 晓), Ma D-Y (马冬云), *et al.* Effects of nitrogen application rate on soil enzyme activities in wheat rhizosphere. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(1): 110–114 (in Chinese)

作者简介 马宁宁,女,1982年生,博士研究生. 主要从事设施土壤连作障碍研究. E-mail: ma_ningning@hotmail.com

责任编辑 张凤丽
