

施肥处理对黄土丘陵区农田土壤酶活性和水溶性有机碳、氮的影响

丁少男¹, 薛 蓬², 刘国彬^{2*}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了评估长期施肥处理对黄土丘陵区川地农田土壤酶活性以及水溶性碳、氮的影响,以黄土高原安塞站川地农田定位试验样地为研究对象,分析了以土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶的酶活性和单位有机碳酶活性作为评价微生物活性新途径的可行性,以及土壤水溶性有机碳、总氮和水溶性碳氮比的变化特征。试验共设九个处理,分别为 N(氮肥)、P(磷肥)、M(有机肥,羊粪)、N+P、N+M、P+M、N+P+M,另加空白对照 CK(不施肥)和裸地 BL(无作物,不施肥)。试验结果表明,除了过氧化氢酶,其他三种土壤酶活性都是表层高于下层,而且有机肥参与的处理土壤酶活性要显著高于化肥处理。初步分析发现有机质含量越高,单位有机碳酶活性值越低。长期施用有机肥,可显著提高土壤中水溶性有机碳和水溶性氮的含量,WSOC/WSTN 对于不同施肥处理的响应要比 C/N 更为敏感。相关分析表明,水溶性有机碳、水溶性氮和有机质、全氮、碱解氮与脲酶、蔗糖酶、磷酸酶三种酶都达到极显著相关关系,与过氧化氢酶未达到显著相关。总体研究发现,施化肥并不能显著影响土壤酶活性,但有机肥能显著提高土壤酶活性及水溶性碳、氮含量,施肥方式的差异影响着土壤酶活性;单位有机碳酶活性的响应规律和传统酶活性的规律并不一致,其机理还需进一步研究。

关键词:黄土高原;施肥;酶活性;水溶性有机碳;单位有机碳酶活性

中图分类号:S153 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)11-2146-09 doi:10.11654/jaes.2015.11.016

Effects of Fertilization on Soil Enzyme Activities and Water-soluble Organic Carbon and Nitrogen Content in Farmland on Hilly Loess Plateau

DING Shao-nan¹, XUE Sha², LIU Guo-bin^{2*}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Changes of soil enzyme activities and water soluble organic matter content were examined under different fertilizer regimes in a long-term experiment located in an alluvial terrace farmland at the Ansai Field Research Station in the hilly Loess Plateau region. The fertilization treatments included chemical nitrogen(N), chemical phosphorus(P), manure(M), N+P, N+M, P+M, N+P+M, CK (control, no fertilization) and BL (bare land). Soil samples were collected from 0~20 cm and 20~40 cm depths. Soil urease, invertase, alkaline phosphatase and catalase activities, water soluble organic carbon(WSOC) and water soluble total nitrogen(WSTN) content were determined. Soil urease, invertase and alkaline phosphatase activities were higher in surface soils than in deeper soils and greater under long-term organic fertilization than under inorganic fertilization. Long-term application of organic manure increased the content of WSOC and WSTN. The ratio of WSOC:WSTN was more sensitive to different fertilizers than C:N ratio was. WSOC, WSTN, organic matter, total nitrogen and available nitrogen were significantly positively correlated with urease, invertase and alkaline phosphatase. Applying inorganic fertilizers did not influence soil enzyme activities significantly, while supplying organic manure significantly increased enzyme activities and WSOC and WSTN content. The responses of enzyme activities per unit carbon to different fertilization were not consistent with previous research results. Further research should be conducted to understand the mechanisms of responses of soil enzyme activities to fertilization.

Keywords: Loess Plateau; fertilization; enzyme activity; water soluble organic carbon; enzyme activities per unit carbon

收稿日期:2015-05-29

基金项目:国家自然科学基金(41371510,41471438)

作者简介:丁少男(1986—),男,陕西延安人,博士生,主要从事水土保持、土壤生态等方面的研究。E-mail:desen23@163.com

*通信作者:刘国彬 E-mail:gbliu@ms.iswc.ac.cn

土壤酶是土壤的重要组成部分^[1],主要来自微生物、植物和动物的活体或残体,参与包括土壤生物化学过程在内的自然界物质循环,是土壤生态系统中最活跃的组分之一^[2-4],在土壤肥力的形成过程中起重要作用。土壤酶活性作为表征土壤性质的生物活性指标,已被广泛应用于评价土壤营养物质的循环转化状况以及评价各种农业措施和肥料施用的效果^[5-6]。土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶等水解酶活性能够表征土壤碳、氮、磷等养分的循环状况,而过氧化氢酶则能分解土壤中产生的过氧化氢,以防对土壤产生毒害作用^[7]。传统土壤酶活性一般以每克土中反应的媒介物质量表示,国外有学者尝试用单位有机碳酶活性这一概念来解释酶活性^[8-9](即每克土壤有机碳中酶活性的大小),以土壤中活性有机质部分作为酶反应的基质或底物,从生物活性的角度分析土壤酶。本文也尝试引进这一概念,以不同施肥处理的农田土壤为研究对象,探讨其与土壤酶及有机碳的联系。

施肥可以改善土壤营养缺乏、酶活性低、土壤肥力下降等一系列问题,长期施肥会对土壤性质产生深远的影响^[10-12]。施肥能直接或间接地调控土壤有机质的输入,在不同程度上影响土壤有机碳的积累和矿化,从而引起土壤有机碳特别是水溶性有机碳等活性有机碳含量的变化。尽管关于施肥对土壤酶活性、水溶性有机物影响的研究报道较多,但结果却常因肥料种类、用量、气候条件和土壤类型的不同而不同^[13-15]。川地农田在黄土丘陵区农业生产中占有很大的比重,而关于土壤酶、水溶性有机物的研究在这一地区较少,尤其是长期施肥后土壤酶活性的变化等报道更是缺乏。因此,本试验以黄土丘陵区安塞野外试验站川地长期肥料试验样地的土壤为研究对象,分析了土壤酶活性和单位有机碳酶活性、水溶性有机物的变异特征,评价施肥方式对土壤性质的影响,以期为该区域农田系统土壤质量评价和建立合理施肥制度、提高土地生产力提供数据支持和科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验于 2011 年在中国科学院安塞水土保持综合试验站进行。该站位于黄土高原中部(109°19'E, 36°51'N),海拔 1068~1309 m,属暖温带半干旱气候,年均降雨量 535 mm,60%的降水集中在 7—9 月,且多暴雨,干燥度 1.48,年均温 8.8 °C,有效积温(>10 °C) 3114 °C,无霜期 160 d 左右。地貌类型为典型的梁峁

状丘陵沟壑区,沟壑密度 8.06 km·km⁻²;土壤类型处于黄绵土与沙黄土交错区,地带性土壤为黑垆土,绝大部分已流失,地表黄土母质广泛出露,主要为黄绵土,养分比较贫瘠,氮、磷缺乏,钾富足。受自然条件和人类活动共同影响,水土流失严重。因无灌溉条件,靠天然降水,属雨养农业地区,农作制一年一熟,以秋作物为主,且一般都是牲畜耕地。

1.2 试验设计

所选样地位于墩滩川地养分长期定位试验场,从 1997 年开始设置,旱地,轮作方式为玉米-玉米-大豆,2011 年种植玉米。样地面积 378 m²,每块小区 14 m²,共有 9 个处理,分别为 N(氮肥)、P(磷肥)、M(有机肥,羊粪)、N+P、N+M、P+M 及 N+P+M,另加空白对照 CK(不施肥)和裸地 BL(无作物,不施肥),随机区组排列,每个处理布设了 3 块样地重复。施肥量分别为 N:97.5 kg·hm⁻²;P:75 kg·hm⁻²;M:有机肥(羊粪)7500 kg·hm⁻²。施肥方法为将有机肥和磷肥做种肥一次施入,尿素做种肥施总量的 20%,余下的 80%在玉米大喇叭口期与抽雄期之间追施。

1.3 研究方法

作物收获后,于 2011 年 10 月 19 日,采用 S 型取样法采集 0~20 cm 和 20~40 cm 两层土样,装在布袋中立即送回实验室保存。剔除杂物后,土壤鲜样过 2 mm 筛后立即用于水溶性有机碳、氮分析测定,其他土样风干后磨碎过 1 mm 和 0.25 mm 筛用于分析常规理化性质及酶活性指标。

土壤理化性质(表 1)采用常规测定方法^[16]。有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定,全氮采用半微量开氏法测定,碱解氮采用碱解扩散法测定,全磷采用 HClO₄-H₂SO₄-钼锑抗法测定,速效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃-钼锑抗法测定,pH 值用 pH 测定仪(水土比 2.5:1)测定。

土壤酶活性的测定主要依据于关松荫^[17]的方法。脲酶活性用靛酚比色法测定,以 mg NH₃-N·g⁻¹ 土(37 °C,24 h)表示;蔗糖酶活性用 3-5-二硝基水杨酸比色法滴定法测定,以 mg 葡萄糖·g⁻¹ 土(37 °C,24 h)表示;磷酸酶活性用苯磷酸二钠法测定,以 mg 酚·g⁻¹ 土(37 °C,24 h)表示;过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定,以 mL 0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄·g⁻¹ 土(25 °C,20 min)表示。

水溶性有机碳、氮的提取及测定^[18]:称取 30 g 土样于大塑料瓶中,加 90 mL 蒸馏水(水土比 3:1),在振荡机上振荡 1 h 后静置、过滤,收集过滤液过 0.45 μm

表1 土壤常规理化性质
Table 1 Basic physicochemical properties of soils

处理	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 Available N/ mg·kg ⁻¹		有效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹		pH	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
BL	9.75 (0.01)d	6.71 (0.35)b	0.56 (0.07)b	0.44 (0.06)bcd	0.65 (0.03)c	0.57 (0.02)c	43.6 (0.94)b	24.6 (5.21)bc	8.01 (1.99)c	3.03 (0.24)b	8.57 (0.02)abc	8.68 (0.03)b
CK	10.66 (0.12)c	6.92 (0.46)b	0.60 (0.13)b	0.45 (0.05)abcd	0.64 (0.03)c	0.58 (0.01)bc	35.2 (5.67)c	21.8 (1.77)c	2.91 (0.95)d	1.38 (0.10)b	8.60 (0.01)a	8.74 (0.05)a
N	10.31 (0.39)cd	6.86 (0.05)b	0.59 (0.01)b	0.43 (0.04)d	0.64 (0.01)c	0.58 (0.01)bc	39.7 (8.59)bc	27.6 (1.26)ab	2.57 (0.70)d	1.35 (0.42)b	8.55 (0.02)bcd	8.74 (0.04)a
P	11.01 (0.44)c	6.56 (0.73)b	0.64 (0.04)b	0.44 (0.01)cd	0.82 (0.04)ab	0.60 (0.03)ab	36.1 (3.22)c	22.4 (3.16)c	22.01 (3.43)b	2.58 (1.65)b	8.46 (0.01)e	8.74 (0.02)a
NP	10.64 (0.33)cd	6.57 (0.21)b	0.62 (0.02)b	0.44 (0.03)cd	0.80 (0.05)bc	0.59 (0.02)b	37.2 (5.21)c	24.0 (5.17)bc	18.01 (2.56)b	2.83 (0.74)b	8.61 (0.03)a	8.72 (0.01)ab
M	14.54 (0.57)ab	7.73 (0.16)a	0.86 (0.06)a	0.49 (0.02)ab	0.68 (0.01)c	0.60 (0.02)ab	54.1 (7.06)a	29.5 (4.87)a	5.9 (0.79)cd	2.07 (0.15)b	8.53 (0.02)cd	8.73 (0.01)a
MN	15.21 (0.26)a	7.69 (0.48)a	0.83 (0.05)a	0.48 (0.01)abc	0.66 (0.02)c	0.60 (0.03)ab	55.8 (0.64)a	27.7 (5.01)ab	5.41 (0.87)cd	1.80 (0.20)b	8.52 (0.06)d	8.75 (0.01)a
MP	14.16 (1.32)ab	7.27 (0.78)ab	0.85 (0.02)a	0.48 (0.02)abcd	0.88 (0.10)a	0.60 (0.01)ab	55.7 (2.60)a	27.4 (2.03)ab	45.19 (2.32)a	6.68 (3.22)a	8.59 (0.02)ab	8.74 (0.02)a
MNP	13.80 (0.17)b	7.68 (0.40)a	0.83 (0.10)a	0.49 (0.03)a	0.83 (0.07)ab	0.61 (0.03)a	53.2 (3.73)a	30.3 (4.11)a	40.97 (6.24)a	6.47 (0.28)a	8.57 (0.03)abc	8.75 (0.01)a

注:括号内数值为标准差;同一列不同字母表示处理之间差异达到显著水平($P<0.05$)。

滤膜,最后分析过滤样。水溶性有机碳(WSOC)用TOC分析仪直接测定,水溶性氮(水溶性总氮,WSTN)采用氢氧化钠-过硫酸钾法提取、UV分光光度计测定。

1.4 数据处理

所有数据采用SPSS 13.0统计软件进行单因素方差分析、多重比较(LSD法)和相关性分析(Pearson法)。聚类分析以所有分析指标为变量,采用分层聚类得到最终结果。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤酶活性的影响

除了过氧化氢酶,不同施肥处理的表层酶活性明显高于下层酶活性(图1),但影响程度并不一致,如N处理碱性磷酸酶表层与CK相比并无显著性变化,下层则要显著高于CK。裸地BL与不施肥CK相比,脲酶和蔗糖酶并无显著性差异,碱性磷酸酶和过氧化氢酶则都显著低于CK。单独施N和P肥并未显著影响酶活性,而NP处理则可显著提高脲酶和蔗糖酶酶活性,对碱性磷酸酶和过氧化氢酶则无显著性影响。有机肥参与的处理能显著提高脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶的活性,除了M处理土壤过氧化氢酶活性显著低于CK外,其他有机肥参与的处理对过氧化氢酶无

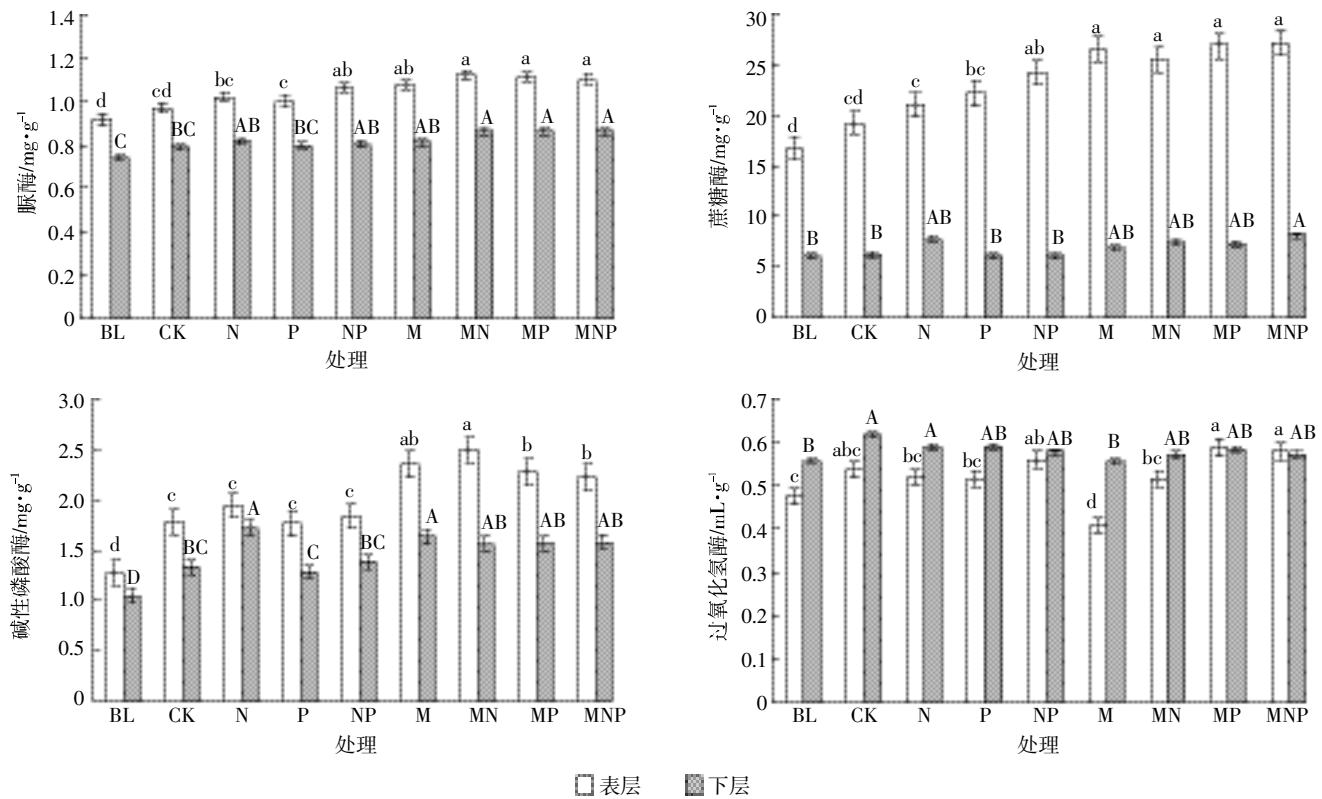
显著性影响。总体上,过氧化氢酶呈现与其他酶类不同的响应特征,有机肥对酶活性的提高优于化肥。

2.2 不同施肥处理对单位有机碳土壤酶活性的影响

单位有机碳酶活性是每克土壤有机碳中的酶活性大小,其对不同施肥处理的响应规律与传统酶活性并不一样(图2)。总体上,除了蔗糖酶,其他三种酶都是表层单位有机碳酶活性低于下层土壤,化肥处理下单位有机碳酶活性高于有机肥参与的处理。单位有机碳脲酶活性表层以单施N肥和NP肥配施处理最高,下层以单施P肥最高,有机肥参与的处理并无显著性差异;单位有机碳蔗糖酶活性表层只有NP处理显著高于CK,碱性磷酸酶活性表层只有N处理显著高于CK,二者下层都以N处理酶活性最高,显著高于其他处理,其他施肥处理之间无显著性差异。单位有机碳过氧化氢酶活性上下层规律基本一致,化肥之间的处理并无显著性差异,表层M和MN处理要显著低于其他施肥处理,下层则只有MP处理和其他化肥处理无差异。裸地与对照相比,只有单位有机碳碱性磷酸酶显著低于对照,其他酶并无显著性差异。

2.3 不同施肥处理对水溶性有机碳、氮的影响

水溶性有机碳含量除了在单施N肥处理和NP肥配施处理变化不显著外,其他处理均有所提高(图



不同字母表示不同施肥处理差异显著,小写字母和大写字母分别指示表层和下层($P < 0.05$),下同

图 1 不同施肥处理土壤酶活性

Figure 1 Enzyme activities under different fertilization treatments

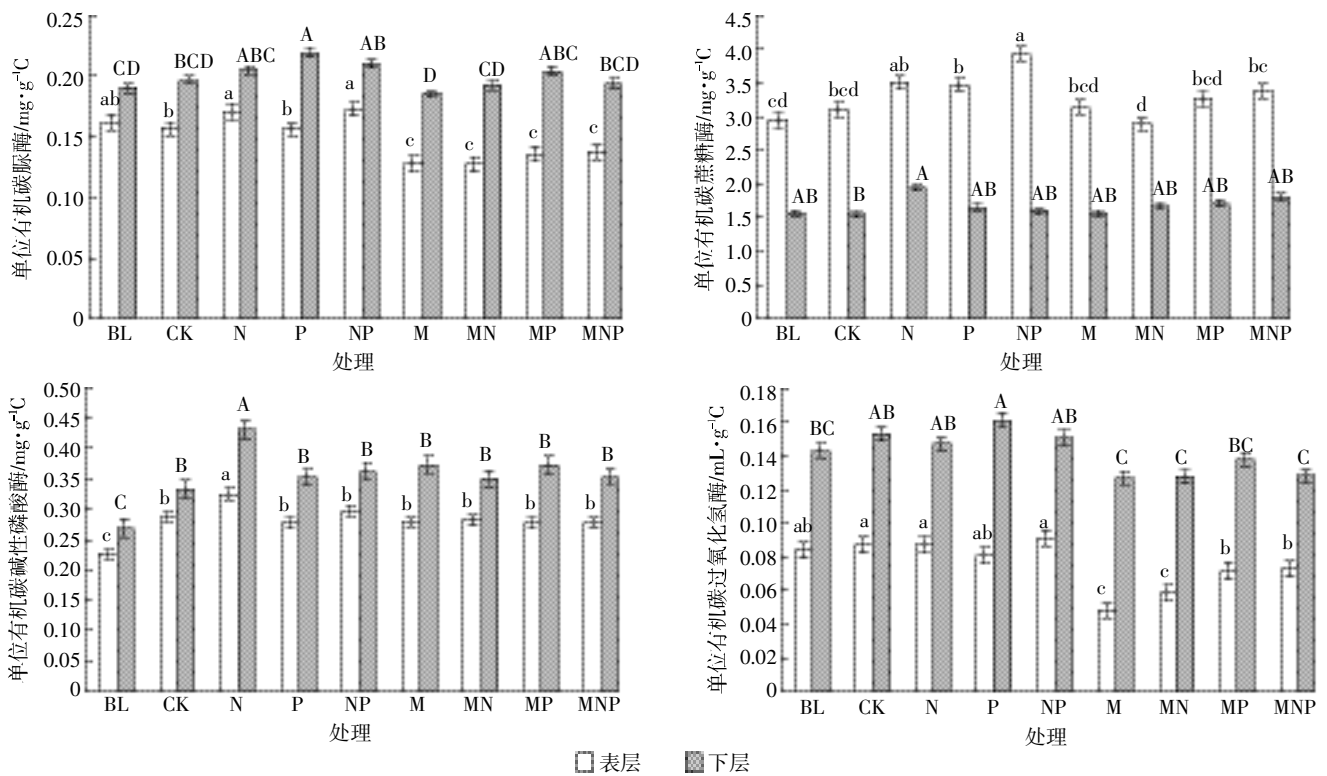


图 2 不同施肥处理下单位有机碳酶活性

Figure 2 Enzyme activities per unit carbon under different fertilization treatments

3)。其中表层土壤以 MN 处理的水溶性有机碳含量最高,达 $40.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;下层土壤中水溶性有机碳含量较表层明显降低,CK 处理依然是含量最低的处理,仅为 $25.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。无论是表层还是下层土壤,裸地 BL 水溶性有机碳含量都显著高于对照。

各处理表层水溶性氮含量显著高于下层含量,有机肥参与的处理上下两层显著高于化肥处理,都以 MNP 处理含量最高。与对照 CK 相比,表层土壤中化肥各处理并无显著性差异,下层除了单施 P 肥与 CK 无显著性差异外,其他各处理均显著高于 CK。

2.4 不同施肥处理对土壤 C/N、WSOC/WSTN 的影响

碳氮比(C/N)是表征土壤质量的重要指标,和土壤有机质输入以及土壤氮素的矿化、硝化等过程有关。从本文结果来看(图4),施肥差异并不能显著影响 C/N 比值,其均值表层为 10,变异系数为 3.4%;下层为 9,变异系数为 3.3%。相对于 C/N,不同处理的 WSOC/WSTN 变化更为明显(图4),其值变化幅度为

15.7~28.6,其中:表层均值为 18.6,下层为 24.7,变异系数分别为 15.5%和 11%。说明 WSOC/WSTN 更容易受到施肥措施的影响。

2.5 相关性分析

土壤酶活性与土壤理化性质之间有着密切的关系,土壤理化性质的好坏在很大程度上制约着土壤酶的活性,同时土壤酶活性又反过来影响着土壤理化性质的改变,使其朝良好的方向发展,因此分析它们之间的关系非常重要。相关分析结果表明,水溶性有机碳、水溶性氮和有机质、全氮、碱解氮与脲酶、蔗糖酶、磷酸酶三种酶都达到极显著相关关系,而与过氧化氢酶未达到显著相关(表2),说明这些指标都是影响土壤酶活性的重要因素。同时,这三种酶之间也彼此显著相关,与它们同属水解酶类有关。过氧化氢酶只与全磷和速效磷达到极显著相关关系,与 pH 为正相关关系。单位有机碳脲酶、单位有机碳过氧化氢酶与有机质、全氮、碱解氮、水溶性有机碳、水溶性氮则达到

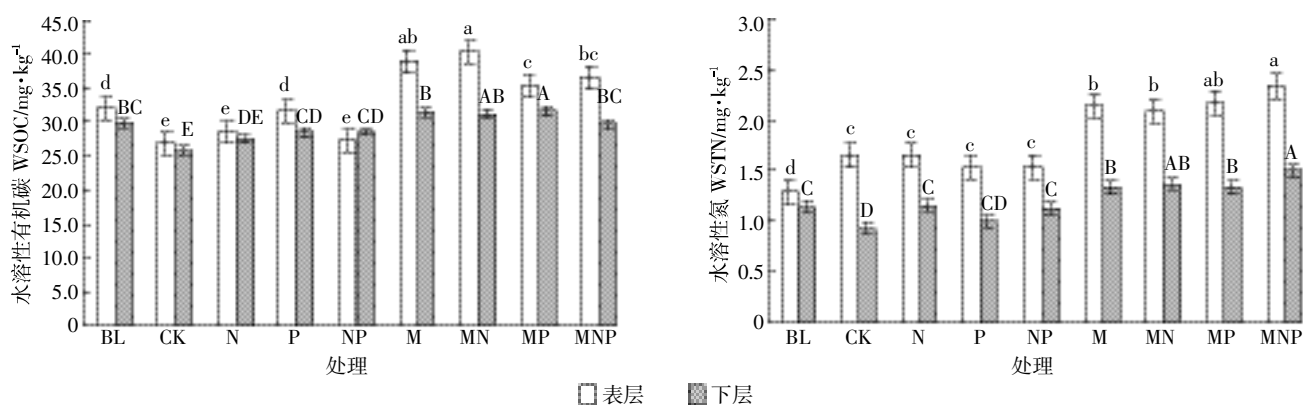


图3 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳、氮含量

Figure 3 Soil water-soluble organic carbon and nitrogen content under different fertilization treatments

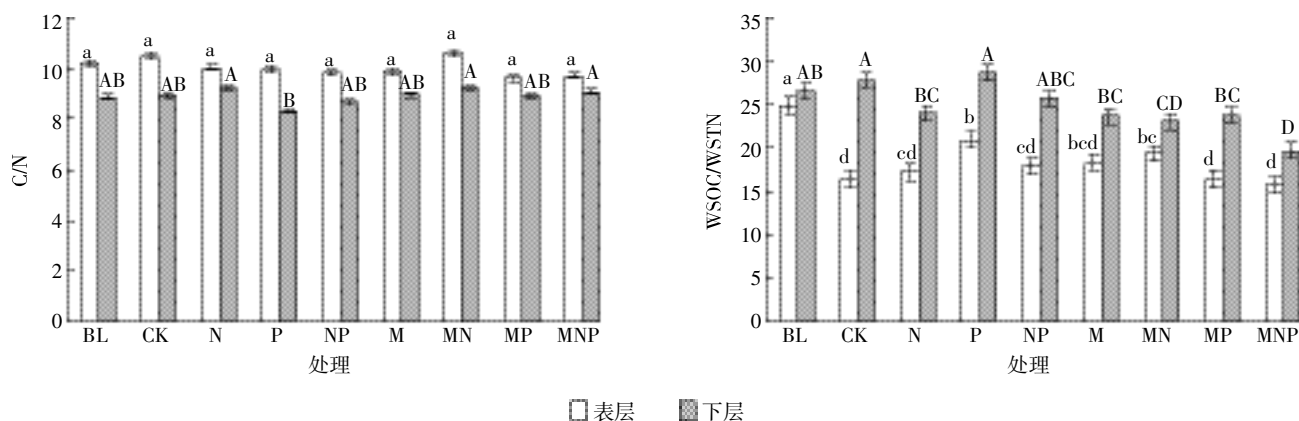


图4 不同施肥处理下土壤碳氮比、水溶性碳氮比

Figure 4 C/N and WSOC/WSTN under different fertilization treatments

表 2 土壤各指标相关性分析
Table 2 Correlation between different variables

	OM	TN	TP	AN	AP	pH	WSOC	WSTN	Ure	Inv	AL-p	Cat	Ure/C	Inv/C	AL-p/C
TN	0.88**														
TP	0.25	0.30													
AN	0.81**	0.84**	0.13												
AP	0.34	0.42*	0.88**	0.33											
pH	-0.18	-0.03	0.05	0.03	0.14										
WSOC	0.84**	0.78**	0.06	0.82**	0.21	-0.37									
WSTN	0.86**	0.80**	0.29	0.66**	0.46*	-0.06	0.69**								
Ure	0.77**	0.76**	0.41*	0.65**	0.44*	0.03	0.54**	0.73**							
Inv	0.68**	0.83**	0.47*	0.62**	0.47*	-0.02	0.55**	0.67**	0.78**						
AL-p	0.89**	0.82**	0.19	0.72**	0.24	-0.13	0.68**	0.81**	0.83**	0.77**					
Cat	-0.01	-0.08	0.50**	-0.16	0.54**	0.29	-0.25	0.18	0.16	0.01	0.03				
Ure/C	-0.91**	-0.75**	-0.13	-0.70**	-0.25	0.27	-0.82**	-0.75**	-0.44*	-0.47*	-0.72**	0.07			
Inv/C	-0.29	0.02	0.31	-0.16	0.18	0.18	-0.29	-0.16	0.16	0.49*	-0.03	0.02	0.50**		
AL-p/C	-0.01	0.08	-0.04	-0.04	-0.13	0.08	-0.19	0.11	0.35	0.36	0.45*	0.10	0.22	0.54**	
Cat/C	-0.81**	-0.77**	0.04	-0.76**	-0.02	0.31	-0.83**	-0.60**	-0.54**	-0.57**	-0.70**	0.58**	0.77**	0.23	0.06

注:OM-有机质,TN-全氮,TP-全磷,AN-碱解氮,AP-有效磷,WSOC-水溶性有机碳,WSTN-水溶性氮,Ure-脲酶,Inv-蔗糖酶,AL-p-碱性磷酸酶,Cat-过氧化氢酶,Ure/C-单位有机碳脲酶,Inv/C-单位有机碳蔗糖酶,AL-p/C-单位有机碳碱性磷酸酶,Cat/C-单位有机碳过氧化氢酶.**表示差异极显著,*表示差异显著(N=27)。

极显著负相关关系。

2.6 聚类分析

以各种酶活性及水溶性碳氮指标为变量作聚类分析^[19],结果表明施化肥处理和 CK、BL 同属一类,有机肥参与的处理为另一类(图 5)。施有机肥各处理之间差异较小,施化肥处理与 CK、BL 之间差异较小,聚

类分析结果清晰表明了施肥方式的差异性,与土壤实际情况相吻合。

3 讨论

3.1 水溶性有机碳、氮

水溶性有机物是土壤有机物转化和微生物代谢活动的中间产物,虽然含量很少,但却是微生物直接可以利用的碳源^[20]。施肥能直接或间接地调控土壤有机质的输入,在不同程度上影响土壤有机碳的积累和矿化,从而引起水溶性有机碳等活性有机碳含量的变化。在本研究中可以明显看出,施用有机肥后,水溶性有机碳、氮较 CK 显著增加,与其他学者的研究结论基本一致^[21-22]。表层水热条件和通气状况较好,微生物生长代谢旺盛、活跃,再加上作物的枯落物聚集在表层,碳源丰富,使之表层的水溶性有机碳、氮明显多于下层^[23]。一般认为,有机肥的施用直接增加了土壤有机碳源,在微生物分解作用下释放出更多的水溶性有机碳;至于单施化肥,本研究中的效果不是很明显,可能是因为化肥虽然促进了作物生长,但根系分泌物、凋落物和施用有机肥的直接输入碳源相比毕竟有限,所以水溶性有机碳增加不多。此外,本文中 WSOC/WSTN 要比 C/N 变异性高,说明土壤中水溶性有机物可以更为敏感地对土壤变化作出响应^[24],也更为有力

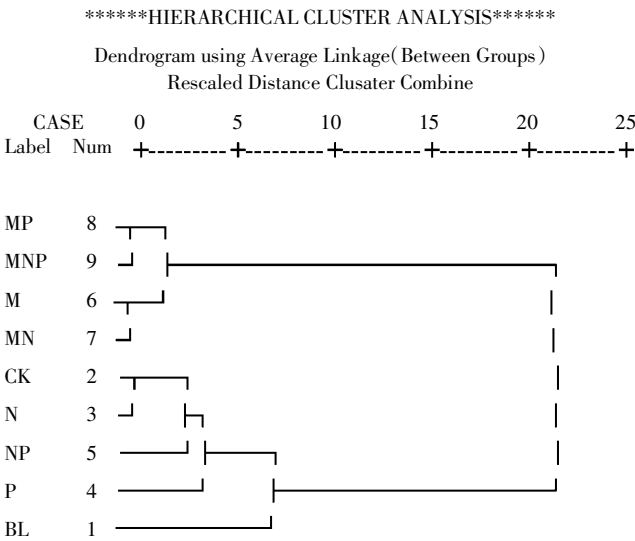


图 5 不同施肥处理聚类分析
Figure 5 Clustering dendrogram for different fertilization treatments

的验证了水溶性有机物作为评价土壤肥力指标的重要性。

3.2 土壤酶活性

土壤中各种生化过程和物质循环均是在土壤酶的参与下完成,土壤酶活性反映了土壤中进行各种生物化学过程的动力和强度,因此研究土壤酶活性对于土壤肥力的形成、提高以及土壤生态系统的物质循环过程都具有重要意义^[1]。在本研究中,单施化肥后脲酶和蔗糖酶较 CK 并无明显增加,过氧化氢酶也几乎无变化,但 N 处理下层土壤碱性磷酸酶活性显著高于其他处理,是因为黄土区土壤本来就缺磷,在缺磷土壤中施入氮肥会引起土壤 N/P 的改变,诱导土壤微生物和植物根系磷酸酶的生成。这和樊军等在旱地黑垆土中的研究基本一致^[5]。而有机肥参与的处理,除了过氧化氢酶外,其他土壤酶较 CK 都有显著变化。这个结果也说明,就土壤微生物活性而言,有机肥能显著改善其土壤环境,而化肥效果不很显著。这是因为有机肥本身含有大量的酶类,而且有机肥可以为产酶微生物提供丰富的营养源,促进了土壤的生化过程;另外随营养元素的施入,促进了作物生长,从而增加了根系分泌物,提高了土壤酶类活性。这个结果与袁玲等在紫色土、关松荫在潮土,以及王树起等在黑土上的研究结果基本一致^[25-27]。此外,表层土壤酶活性比下层土壤要高,是因为施肥后肥料主要停留在表层,表层有机质含量高,利于微生物生长,加之表层水热条件和通气状况良好,微生物代谢活跃,呼吸强度加大,从而使表层土壤的酶活性较高。过氧化氢酶呈现出与其他酶类不同的响应特征,是因为过氧化氢酶属氧化还原酶类,土壤环境是影响其分布的重要因素^[20]。本研究中,只有 M 处理过氧化氢酶显著低于 CK,其他处理对过氧化氢酶无显著性影响。这是因为只施有机肥后,土壤缺乏无机肥调节土壤中碳、氮比例,直接影响土壤氧化还原环境,进而影响到过氧化氢酶活性。

3.3 单位有机碳酶活性

从本研究结果来看,有机质含量越高,其单位有机碳酶活性越低。这是因为单位有机碳酶活性是一个相对值,施肥后土壤中有机质含量迅速增加,而相应的酶并不能及时变化调整,故导致其值较低^[28]。此外,土壤酶反应的底物不一样,也会造成单位有机碳酶活性的差异,它和有机质的组分、活性部分有关^[8-9]。除了蔗糖酶,其他三种酶都是表层单位有机碳酶活性低于下层。主要是因为蔗糖酶是表征碳素转化的重要酶类,当土壤中有机质含量大,蔗糖酶的活性也相对较

高(图 1),且表层蔗糖酶活性要比下层大很多,故单位有机碳蔗糖酶活性也是表层大于下层。施 P 肥后,下层土壤单位有机碳脲酶活性显著高于 CK;施 N 肥后,下层土壤单位有机碳磷酸酶活性显著高于其他处理。这个结果可能和土壤酶具有高度的专一性有关,具体原因还有待进一步研究。有研究认为单位有机碳酶活性可以反应土壤中微生物群落活性物质的多少,侧面印证土壤酶活性的高低可能不仅仅与土壤有机质含量多少有关,而主要是看活性有机质的比例^[29],这一推测还需更深入的研究来论证。单位有机碳酶活性和传统酶活性相比,其差异主要来自于不同酶对有机碳的活性部分需求不同,故其对不同施肥处理的响应规律也与传统酶不一样。

从本文研究结果来看,水溶性有机碳、氮和土壤酶活性有着显著的相关关系,说明其和土壤有机质、全氮一样影响着土壤酶活性。综上,结合前人的研究^[27,30],本文建议在施用肥料的过程中,化肥应该结合有机肥配施,这样可以更好地改善土壤条件,促进作物生长,增加产量,保持农田可持续生产发展。

4 结论

(1)除了过氧化氢酶,脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性都是表层高于下层;施化肥并不能显著影响土壤酶活性,但有机肥参与的处理土壤酶活性要显著高于化肥处理,施肥方式的差异影响着土壤酶活性。

(2)单位有机碳酶活性的响应规律和传统酶活性的规律并不一致,大致上为有机质含量越高,其单位有机碳酶活性越低,主要与有机质的活性物质构成有关,影响机理还需进一步研究。

(3)在黄土丘陵区川地农田中,长期施肥处理的表层土壤(0~20 cm)C/N 值在 10 左右,下层(20~40 cm)为 9,不同处理之间无显著差异,变异较小;而 WSOC/WSTN 则有显著变化,变化幅度在 15.7~28.6 之间,变幅较大,变异系数超过 10%。

(4)有机肥比化肥处理更能提高土壤中 WSOC、WSTN 含量,水溶性有机碳和总氮极显著地影响脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶的酶活性。

参考文献:

- [1] 曹 慧,孙 辉,杨 浩,等.土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J].应用与环境生物学报,2003,9(1):105-109.
CAO Hui, SUN Hui, YANG Hao, et al. A review: Soil enzyme activity and its indication for soil quality[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(1): 105-109.

- [2] Dick R P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality[J]. *SSSA Special Publication*, 1994, 35: 107.
- [3] Dick R P, Pankhurst C, Doube B M, et al. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health[J]. *Biological Indicators of Soil Health*, 1997: 121–156.
- [4] Yao X, Min H, Lü Z, et al. Influence of acetamiprid on soil enzymatic activities and respiration[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42(2): 120–126.
- [5] 樊军. 黄土高原旱地长期定位试验土壤酶活性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2001: 8–16.
FAN Jun. Study on soil enzyme activities of a long-term experiment in Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2001: 8–16
- [6] 和文祥, 谭向平, 王旭东, 等. 土壤总体酶活性指标的初步研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1232–1236.
HE Wen-xiang, TAN Xiang-ping, WANG Xu-dong, et al. Study on total enzyme activity index in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 1232–1236.
- [7] 樊军, 郝明德. 黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究 II. 土壤酶活性与土壤肥力[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 9–13.
FAN Jun, HAO Ming-de. Study on long-term experiment of crop rotation and fertilization in the Loess plateau II. Relationship between soil enzyme activities and soil fertility[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(1): 9–13.
- [8] Shi W, Dell E, Bowman D, et al. Soil enzyme activities and organic matter composition in a turf grass chrono sequence[J]. *Plant & Soil*, 2006, 288(1/2): 285–296.
- [9] Boerner R E J, Brinkman J A, Smith A. Seasonal variations in enzyme activity and organic carbon in soil of a burned and unburned hardwood forest[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(8): 1419–1426.
- [10] 郑勇, 高勇生, 张丽梅, 等. 长期施肥对旱地红壤微生物和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 316–321.
ZHENG Yong, GAO Yong-sheng, ZHANG Li-mei, et al. Effects of long-term fertilization on soil microorganisms and enzyme activities in an upland red soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 316–321.
- [11] 贾伟, 周怀平, 解文艳, 等. 长期有机无机肥配施对褐土微生物生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 700–705.
JIA Wei, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, et al. Effect of long-term inorganic fertilizer combined with organic manure on microbial biomass C, N and enzyme activity in cinnamon soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 700–705.
- [12] 王俊华, 尹睿, 张华勇, 等. 长期定位施肥对农田土壤酶活性及其相关因素的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 191–196.
WANG Jun-hua, YIN Rui, ZHANG Hua-yong, et al. Changes in soil enzyme activities, microbial biomass, and soil nutrition status in response to fertilization regimes in a long-term field experiment[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1): 191–196.
- [13] 江玉梅, 陈成龙, 徐志红, 等. 退化红壤区人工林土壤的可溶性有机物、微生物生物量和酶活性[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2273–2278.
JIANG Yu-mei, CHEN Cheng-long, XU Zhi-hong, et al. Soil soluble organic matter, microbial biomass, and enzyme activities in forest plantations in degraded red soil region of Jiangxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2273–2278.
- [14] 张继光, 秦江涛, 要文倩, 等. 长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响[J]. 土壤, 2010, 42(3): 364–371.
ZHANG Ji-guang, QIN Jiang-tao, YAO Wen-qian, et al. Effects of long-term fertilization on soil active organic carbon and soil enzyme activities in upland red soils[J]. *Soils*, 2010, 42(3): 364–371.
- [15] 韩晓日, 王玲莉, 杨劲峰, 等. 长期施肥对土壤颗粒有机碳和酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 266–269.
HAN Xiao-ri, WANG Ling-li, YANG Jin-feng, et al. Effect of long-term fertilizations on particulate organic carbon and enzyme activities in a brown earth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(2): 266–269.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
BAO Shi-dan. Soil agro-chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
GUAN Song-yin. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [18] 沈玉芳, 陶武辉, 李世清. 黄土高原水蚀风蚀交错区施肥对黑麦草农田土壤水溶性有机碳、氮的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1387–1393.
SHEN Yu-fang, TAO Wu-hui, LI Shi-qing. Effect of fertilization on dissolved organic carbon and nitrogen in the ryegrass farmland soil in wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(8): 1387–1393.
- [19] 陈留美, 桂林国, 吕家珑, 等. 应用主成分分析和聚类分析评价不同施肥处理条件下新垦淡灰钙土土壤肥力质量[J]. 土壤, 2008, 40(6): 971–975.
CHEN Liu-mei, GUI Lin-guo, LÜ Jia-long, et al. Evaluation on soil fertility quality of newly cultivated light sierozem under different fertilization with methods of principal component and cluster analyses[J]. *Soils*, 2008, 40(6): 971–975.
- [20] 李林海, 邱莉萍, 孟梦. 黄土高原沟壑区土壤酶活性对植被恢复的响应[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3355–3360.
LI Lin-hai, QIU Li-ping, MENG-meng. Responses of soil enzyme activities to re-vegetation in gully Loess Plateau of Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(12): 3355–3360.
- [21] 倪进治, 徐建民, 谢正苗, 等. 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳含量及其组成特征的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 724–730.
NI Jin-zhi, XU Jian-min, XIE Zheng-miao, et al. Contents of WSOC and characteristics of its composition under different fertilization systems[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 724–730.
- [22] Lundquist E J, Jackson L E, Scow K M. Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(7): 1031–1038.
- [23] 李森, 张世熔, 罗洪华, 等. 不同施肥处理土壤水溶性有机碳含量特征及动态变化[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(2): 314–319.
LI Sen, ZHANG Shi-rong, LUO Hong-hua, et al. Concentration char-

- acteristics and dynamic changes of water soluble organic carbon in soil under different fertilization treatments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(2): 314–319.
- [24] 张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 等. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮比的变化及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2012(7), 1214–1223.
- ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, NAN Ya-fang, et al. The changes and influencing factors of soil C:N ration in small watershed of hilly region of Loess Plateau [M]. *Journal of Natural Resources*, 2012(7), 1214–1223.
- [25] 袁玲, 杨邦俊, 郑兰君, 等. 长期施肥对土壤酶活性和氮磷养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(4): 300–306.
- YUAN Ling, YANG Bang-jun, ZHENG Lan-jun, et al. Effects of long-term fertilization on enzymatic activities and transformation of nitrogen and phosphorus in soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997, 3(4): 300–306.
- [26] 关松荫. 土壤酶活性影响因子的研究[J]. *土壤学报*, 1989, 26(1): 72–78.
- GUAN Song-yin. Study on influencing factors of soil enzyme activities [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26(1): 72–78.
- [27] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 长期施肥对东北黑土酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 551–556.
- WANG Shu-qi, HAN Xiao-zeng, QIAO Yun-fa, et al. Effects of long-term fertilization on enzyme activities in black soil of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 551–556.
- [28] Wang B, Xue S, Liu G, et al. Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area, Northwest China[J]. *Catena*, 2012, 92(3): 186–195.
- [29] Caldwell B A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review[J]. *Pedobiologia*, 2005, 49(6): 637–644.
- [30] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(17): 5502–5511.
- MA Xiao-xia, WANG Lian-lian, LI Qing-hui, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5502–5511.

欢迎订阅 2016 年《农业资源与环境学报》

《农业资源与环境学报》(原《农业环境与发展》)创刊于 1984 年,由农业部主管、农业部环境保护科研监测所与中国农业生态环境保护协会联合主办的国家级学术期刊,被评为中国科技核心期刊、天津市优秀期刊。本刊被美国乌利希期刊指南、化学文摘(CA)、国际农业与生物科学中心(CABI)、EBSCO、中国学术文摘数据库核心版(CSAD)等重要数据库收录。

作为与一级学科“农业资源与环境”对应的学报,《农业资源与环境学报》(Journal of Agricultural Resources and Environment)主要刊登土壤、水、养分及生物质等自然资源的高效利用及生态环境保护方面的研究论文。所设栏目:

- | | |
|---------|--------------|
| 一、战略与综述 | 六、产地环境与农产品安全 |
| 二、土地资源 | 七、生态农业 |
| 三、养分资源 | 八、生物多样性保护 |
| 四、水资源 | 九、乡村环境 |
| 五、生物质资源 | 十、检测分析方法 |

《农业资源与环境学报》为双月刊,大 16 开,96 页,逢单月 10 日出版,每册定价 30.00 元,全年 180.00 元。国际标准刊号:ISSN 2095-6819,国内统一刊号:CN 12-1437/S,国内外公开发行,各地邮电局(所)均可订阅,邮发代号:6-40,国外发行代号:BM3272。有漏订者可直接与编辑部联系订阅。

编辑部地址:天津市南开区复康路 31 号
邮政编码:300191
电话:022-23611149
传真:022-23674336
电子信箱:caed@vip.163.com
网址:www.aed.org.cn

银行:中国农业银行天津滨水西道支行
户名:农业部环境保护科研监测所
帐号:02-190101040001154
纳税人识别号:120104401229113