

施肥制度对川中丘陵区玉米不同生育期 土壤反硝化酶活性的影响

王苏平¹, 辉建春¹, 林立金², 朱雪梅¹, 朱波³

(1. 四川农业大学 资源环境学院, 成都 611130; 2. 雅安水土保持生态环境监测分站,

四川 雅安 625000; 3. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要:通过对川中典型紫色土区玉米坡耕地进行不施肥(CK)、单施氮肥(N)、单施有机肥(OM)、NPK肥配施(NPK)、有机肥+NPK肥配施(OMNPK)和秸秆+NPK肥配施(RSDNPK)6种施肥处理,测定了玉米拔节期、灌浆期和成熟期土壤硝酸还原酶(NR)、亚硝酸还原酶(NiR)和羟胺还原酶(HyR)活性。结果表明,在玉米拔节期、灌浆期和成熟期,N、OM、NPK、OMNPK和RSDNPK处理均提高了土壤NR、NiR和HyR活性,且RSDNPK和OMNPK处理的效果最好。这表明,秸秆+NPK肥配施和有机肥+NPK肥配施能有效提高紫色土区坡耕玉米地土壤NR、NiR和HyR活性,能有效提高作物对氮元素的利用率。

关键词:施肥制度; 硝酸还原酶; 亚硝酸还原酶; 羟胺还原酶; 玉米

中图分类号:S154.2;S141.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0274-04

Effects of Fertilizer System on Soil Denitrification Enzyme Activity at Different Growth Stages of Maize in Hilly Regions of Middle Sichuan

WANG Su-ping¹, HUI Jian-chun¹, LIN Li-jin², ZHU Xue-mei¹, ZHU Bo³

(1. College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130,

China; 2. Ya'an Soil and Water Conservation Monitoring Substation, Ya'an, Sichuan 625000, China;

3. Institute of Mountain Hazards and Environment, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The six kinds of fertilizer system are as follows: N (N), organic manure (OM), mixture of N, P and K (NPK), organic manure combined with N, P and K (OMNPK), and straw combined with N, P and K (RSDNPK). The fertilizer of each treatment was applied in the soil at different growth stages of maize. The experiment plots are located at the slope land of typical purple soil area in Middle Sichuan. The activities of soil nitrate reductase, nitrite reductase and hydroxylamine reductase at the jointing stage, the filling stage and the maturity stage of maize were determined. The results showed that the activities of nitrate reductase, nitrite reductase, and hydroxylamine reductase increased in the treatments of N, OM, NPK, OMNPK and RSDNPK, and the best treatments for enzymatic activity were RSDNPK and OMNPK. It suggested that RSDNPK and OMNPK could have better advantages to improve the activities of nitrate reductase, nitrite reductase and hydroxylamine reductase at the slope land of purple soil area in Middle Sichuan, and enhance the assimilation rate of N by crops.

Key words: fertilization system; nitrate reductase; nitrite reductase; hydroxylamine reductase; maize

氮作为作物体内叶绿素、蛋白质和酶的重要组成部分,素有“生命元素”的美誉^[1]。氮以氨或铵盐的形式进入土壤,经微生物矿化形成无机态氮(NO_3^- -N等)^[2]。 NO_3^- 作为旱地作物的主要氮源,经高活性硝酸还原酶(NR; Nitrate Reductase)催化形成亚硝态

氮(NO_2^-),后经高活性的亚硝酸还原酶(NiR; Nitrite Reductase)催化形成羟胺(NH_2OH),再经高活性的羟胺还原酶(HyR; Hydroxylamine Reductase)进一步催化还原成 NH_4^+ ,被作物吸收利用(同化反硝化作用),能提高氮元素的利用率。但经硝酸还原

收稿日期:2011-10-14

修回日期:2011-11-14

资助项目:国家科技支撑计划项目(2008BAD98B05)

作者简介:王苏平(1989—),女,四川自贡人,本科生,主要从事水土保持研究。E-mail:lian1989hoho@sina.com

通信作者:朱雪梅(1963—),女,四川仁寿人,教授,主要从事水土保持研究。E-mail:zhubroad@163.com

酶催化形成的 NO_2^- 被高活性的亚硝酸还原酶还原为 NH_2OH 后,若羟胺还原酶的活性处于低水平,则会生成分子态氮(N_2O , N_2 和 NH_3)及其氧化物(异化反硝化作用),造成氮元素的浪费^[3-5]。由此可知,农业生产活动中参与土壤反硝化作用的硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和羟胺还原酶活性的高低是影响土壤中氮素的存在形式、氮素的利用率及温室气体(N_2O , NH_3 等)排放的重要影响因子^[6-9]。已有研究发现,土壤硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和羟胺还原酶的活性表现出明显的季节变化规律,并会受到土壤水分、土壤温度、 CO_2 浓度及施肥(不同化学肥料)的影响^[4,7,9]。还有学者研究发现,不同施肥制度对提高土壤脲酶、过氧化氢酶、转化酶和磷酸酶的活性,增加作物产量的效果差异明显^[10-11]。此外,有机肥的施入可显著提高土壤反硝化酶(硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和羟胺还原酶)的活性,且有机肥与化肥配施的效果最佳^[8]。但此类研究主要针对的是西北黄土区,而针对川中丘陵区紫色土坡耕地土壤反硝化酶(硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和羟胺还原酶)活性影响的文章尚未见报道。

本文通过对川中丘陵区紫色土坡耕地进行不同施肥制度处理,研究玉米不同生育期土壤硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和羟胺还原酶的活性,探索合理的施肥制度,提高氮元素的利用率,以期对川中丘陵区紫色土坡耕地的农业生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所盐亭站,地理位置为 $105^{\circ}12'—105^{\circ}42'\text{E}$,

$30^{\circ}53'—31^{\circ}30'\text{N}$,该地区地貌以丘陵和低山为主,是一个典型的山丘地区^[12]。该地区土壤以紫色土和水稻土为主,是川中丘陵地区紫色土主要的分布地区之一,耕地平均坡度为 7° 。

1.2 试验设计

对川中丘陵区紫色土坡耕地进行不施肥(CK)、单施氮肥(N)、有机肥(OM)、NPK 肥配施(NPK)、有机肥+NPK 肥配施(OMNPK)和秸秆+NPK 肥配施(RSDNPK)处理,见表 1。

各施肥制度全氮维持在同一水平。猪粪:含氮(0.6%,鲜重);秸秆(小麦):含氮(0.5%,干重)。本试验设定 18 个小区(1 m^2 /个),依试验场呈南北排列布置,分设 A、B、C 和保护行(四排),共 18 m^2 (长 6 m,宽 3 m),坡度均为 7° ,各处理采用完全随机设计进行布设,每个处理设 3 个重复。试验小区布置见图 1。

1.3 试验材料及种植密度

供试玉米品种为中单 808,由中科院山地所盐亭站提供。种植行距为 50 cm,窝距为 40 cm,种植密度为 51 00 株/ hm^2 。A、B 和 C 区种植 $8\times 15=120$ 株。玉米种植时间为 2010 年 6 月 10 日,播种方式采用穴播,管理模式为当地常规田间管理。玉米地施肥以穴施底肥方式一次性施用,后期不再追肥。

表 1 供试土壤施肥处理

土样	处理	化肥/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)			农家肥/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	秸秆/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)
		N	P_2O_5	K_2O		
1	CK	—	—	—	—	—
2	N	150	—	—	—	—
3	NPK	150	90	36	—	—
4	OM	—	—	—	25	—
5	OMNPK	90	54	21.5	10	—
6	RSDNPK	112.5	54	21.5	—	7.5

保护行								
A	护行	OM1	OMNPK1	CK3	NPK1	N2	RSDNPK2	保护行
B		N1	CK1	RSDNPK1	NPK3	OM2	OMNPK3	
C		RSDNPK3	N3	OMNPK2	CK2	NPK2	OM3	
保护行								

图 1 试验小区布置图

1.4 样品采集与前处理

分别于玉米拔节期(2010 年 7 月 9 日)、灌浆期(2010 年 8 月 15 日)和成熟期(2010 年 9 月 18 日)对 0—10 cm 的土壤进行采集。采集时,每个小区用不锈钢土钻采集一个多点混合样,用四分法取 1 kg 土样装入已消毒过的聚乙烯袋中带回实验室,放入冰箱(4°C)冷冻保存。

1.5 测定方法

土壤硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和羟氨还原酶活

性按照关松荫的方法进行测定^[13]。

1.6 数据处理

用 SPSS 17.0 进行多重比较,用 Excel 2003 作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥制度对玉米不同生育期土壤硝酸还原酶活性的影响

土壤硝酸还原酶是催化 NO_3^- 转化为 NO_2^- 的专性酶,其活性的高低直接影响土壤硝态氮和亚硝态氮

的含量^[9]。由图 2 可知,在玉米拔节期和成熟期,N、OM、NPK、OMNPK 和 RSDNPK 处理均提高了土壤硝酸还原酶活性。分析得出 RSDNPK 和 OMNPK 处理的效果最好,在拔节期较对照分别提高了 1 198.9%,914.8%,成熟期较对照分别提高了 540.3%,508.4%,但 NPK 配施处理较对照的差异不明显。在玉米灌浆期,N、OM、NPK、OMNPK 和 RSDNPK 处理均提高了土壤硝酸还原酶活性。分析得出 RSDNPK 和 OMNPK 处理的效果最好,较对照分别提高了 1 139.4%,989.7%,但单施 N 和 NPK 配施较对照差异不明显。由此说明,RSDNPK 和 OMNPK 处理有效的提高了玉米各生育期土壤硝酸还原酶的活性。该作用效果一方面得益于秸秆和有机肥的施入能有效提高土壤有机质含量^[14],而有机物可以提高土壤反硝化酶的活性^[8]。与此同时,OMNPK 和 RSDNPK 施用的秸秆和有机肥能降低土壤 C/N^[15],傅利剑等研究表明当碳氮比较低时, NO_3^- 相对增加^[16],从而增强了硝酸还原酶活性。另一方面有机质和秸秆的加入能有效增加土壤微生物的数量,改变了微生物区系,提高了土壤中反硝化细菌的活性^[17],进而提高了土壤硝酸还原酶的活性。和文祥等^[8]人针对黄土区不同培肥方式对土壤反硝化酶活性的影响进行了研究,发现有机肥与无机肥配施可有效提高土壤硝酸还原酶活性,这与本试验针对紫色土区的研究结果是一致的。此外,在玉米灌浆期,CK、N、OM、NPK、OMNPK 和 RSDNPK 处理下土壤硝酸还原酶的活性较拔节期和成熟期都要低。主要因为灌浆期玉米对养分需求量较大,大量吸收土壤中无机离子(NO_3^- , NH_4^+), NH_4^+ 含量减少导致土壤硝化作用产生的 NO_3^- ^[18] 含量减少,致使土壤中 NO_3^- 总积累量降低(硝酸还原酶反应底物含量降低)。

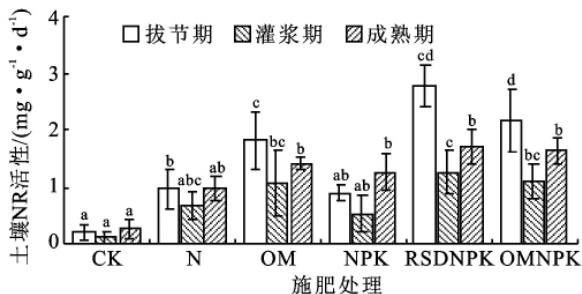


图 2 不同施肥制度下玉米不同生育期土壤硝酸还原酶活性

2.2 不同施肥制度对玉米不同生育期土壤亚硝酸还原酶活性的影响

土壤亚硝酸还原酶的作用是催化 NO_2^- 还原成羟胺(NH_2OH),为羟胺还原酶将 NH_2OH 催化还原为农作物可吸收氮素(NH_4^+)的反应提供充足的反应底

物^[8]。由图 3 可知,在玉米拔节期,N、OM、NPK、OMNPK 和 RSDNPK 处理均提高了土壤亚硝酸还原酶的活性。分析得出 RSDNPK 和 OMNPK 处理的效果最好,较对照分别提高了 600.8%,600.3%,但单施 N 处理较对照差异不明显。在玉米灌浆期和成熟期,N、OM、NPK、OMNPK 和 RSDNPK 处理均提高了土壤亚硝酸还原酶的活性。分析得出 RSDNPK 和 OMNPK 处理的效果最好,在灌浆期较对照分别提高了 507.2%,512.5%,在成熟期较对照分别提高了 443.8%,382.5%。RSDNPK 和 OMNPK 处理能有效提高土壤亚硝酸还原酶的活性:一方面归因于 RSDNPK 和 OMNPK 处理下土壤硝酸还原酶活性处于高活性水平,生成了充足的 NO_2^- ,有利于土壤亚硝酸还原酶催化 NO_2^- 生成 NH_2OH 反应的进行;另一方面归因于 RSDNPK 和 OMNPK 处理中含有丰富的有机物,为某些特殊微生物的繁殖(如:反硝化微生物)创造了良好条件,异养微生物可还原态的氮化物转变为 NO_2^- ^[19](土壤亚硝酸还原酶底物增加)进而有利于提高土壤亚硝酸还原酶的活性。此外,在玉米不同生育期,CK、N、OM、NPK、OMNPK 和 RSDNPK 处理下土壤亚硝酸还原酶活性规律为:拔节期>灌浆期>成熟期,一方面原因是随着玉米生长对无机肥(有效 N、速效 P、速效 K)的吸收,降低了土壤肥力,进而降低了土壤亚硝酸还原酶活性。另一方面紫色土区土壤有机质含量低,有机质矿化作用强,矿化率高,使土壤有机质难于积累^[20],致使有机质对土壤亚硝酸还原酶吸附固定容量逐渐减小,且有机质被微生物分解利用导致土壤肥力下降,进而酶活性变低。证明紫色土区,肥力较高的土壤,酶(亚硝酸还原酶)活性也较高。和文祥^[8]等人针对黄土区不同施肥方式对土壤反硝化酶活性的影响进行了研究,也得出相同结论。

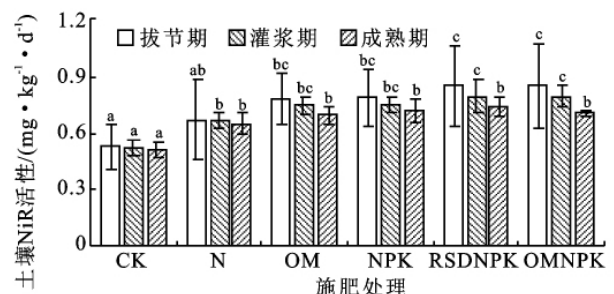


图 3 不同施肥制度下玉米不同生育期土壤亚硝酸还原酶活性

2.3 不同施肥制度对玉米不同生育期土壤羟胺还原酶活性的影响

羟胺(NH_2OH)在土壤中的存在时间短,致使其在土壤中的存在量极少^[5]。当土壤羟胺还原酶的活

性高时,其酶促反应是催化 NH_2OH 转化为能被作物吸收利用的 NH_4^+ 。维持该酶的活性处于高活性水平,可以提高作物对氮元素的利用率,减少 N_2O 或 NH_3 的排放^[5]。由图4可知,在玉米拔节期和成熟期,N、OM、NPK、OMNPK和RSDNPK处理均提高了土壤羟胺还原酶的活性。分析得出RSDNPK和OMNPK处理的效果最好,在拔节期分别较对照提高了408.3%,449.1%。在成熟期较对照分别提高了257.2%,253.8%。在灌浆期,N、OM、NPK、OMNPK和RSDNPK处理均提高了土壤羟胺还原酶的活性。分析得出RSDNPK和OMNPK处理效果最好,较对照分别提高了48.6%、33.5%,但单施N肥较对照差异不明显。RSDNPK和OMNPK有效的提高了土壤羟胺还原酶的活性,一方面RSDNPK和OMNPK处理维持土壤硝酸还原酶和土壤亚硝酸还原酶的处于高活性水平,有充足的反应底物(NH_2OH)产生,以供土壤羟胺还原酶进行酶促反应生成 NH_4^+ 。与此同时,RSDNPK和OMNPK有机质含量丰富,提高了土壤微生物活性,特别是反硝化细菌的活性,同时有机质对土壤羟胺还原酶的吸附固定作用是提高土壤羟胺还原酶活性的又一重要因素。RSDNPK和OMNPK有机质含量丰富能有效改良土壤结构,调节土壤通气性^[20],有利于 NH_4^+ 结合氧气生成 NO_3^- (减少了酶促反应生成物),增加酶活性,同时为硝酸还原酶提供底物,符合本实验结果规律。CK、N、OM、NPK、OMNPK和RSDNPK处理下土壤羟胺还原酶活性在拔节期表现绝对优势,原因是紫色土区土壤有机质含量低,有机质矿化作用强,矿化率高,使土壤有机质难于积累^[20],土壤中有机碳除作电子供体外,还作为异养微生物生长代谢过程的碳源营养物而被消耗^[16],而土壤有机质含量与土壤酶活性存在显著相关性^[10],使得土壤羟胺还原酶在拔节期高于灌浆期和成熟期。

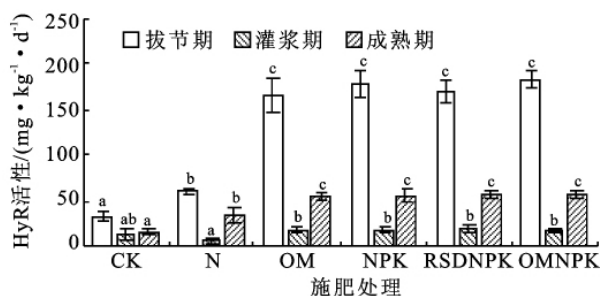


图4 不同施肥制度下玉米不同生育期土壤羟胺还原酶活性
此外,土壤酶活性和土壤细菌活性还受无机肥(有效N、速效P、K)含量的影响较大,拔节期土壤养分高于灌浆期和成熟期,利于土壤羟胺还原酶的催化

作用的进行。解媛媛等^[17]对黄土区不同配比化肥+秸秆对玉米不同生育期土壤酶活性的影响规律研究结果为:自抽雄期后土壤脲酶活性逐渐升高,至灌浆期后土壤脲酶活性持续上升,成熟期呈现最大值,这和本试验结果有较大差异,说明不同施肥对玉米不同时期不同土壤酶活性影响差异较大。

3 结论

在玉米拔节期、灌浆期和成熟期,N、OM、NPK、OMNPK和RSDNPK处理均提高了土壤硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和羟胺还原酶的活性,且RSDNPK和OMNPK处理的效果最好。表明,秸秆+NPK肥配施和有机肥+NPK肥配施能有效提高紫色土区玉米坡耕地硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和羟胺还原酶活性,有利于土壤 NO_3^- -N 转化为 NH_4^+ -N 反应的进行,益于作物对氮元素的吸收,且RSDNPK和OMNPK处理对增加土壤中 NH_4^+ 含量效果最好。

参考文献:

- [1] 姚军,唐春霞,何丙辉.紫色土坡耕地不同施肥水平下氮随径流流失特征研究[J].水土保持研究,2010,17(2):54-57.
- [2] 任理,马军花.考虑土壤中硝态氮转化作用的传递函数模型[J].水利学报,2001(5):38-44.
- [3] 刘淑云,董树亭,赵秉强,等.长期施肥对夏玉米叶片氮代谢关键酶活性的影响[J].作物学报,2007,33(2):278-283.
- [4] 史奕,黄国宏.土壤中反硝化酶活性变化与 N_2O 排放的关系[J].应用生态学报,1999,10(3):329-331.
- [5] 陈利军,武志杰.与氮转化有关的土壤酶活性对抑制剂施用的响应[J].应用生态学报,2002,13(9):1099-1103.
- [6] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur[J]. Biogeochemistry,1991,13(2):87-115.
- [7] Zheng J Q, Han S J, Ren F R, et al. Effects of long-term elevated CO_2 on N_2 -fixing, denitrifying and nitrifying enzyme activities in forest soils under Pinussylvestris in Changbai Mountain[J]. Journal of Forestry Research,2008,19(4):283-287.
- [8] 和文祥,魏燕燕,蔡少华.土壤反硝化酶活性测定方法及影响因素研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(1):121-124.
- [9] 白红英,韩建刚.不同土层土壤理化生性状与反硝化酶活性 N_2O 排放通量的相关性研究[J].农业环境保护,2002,21(3):193-196.
- [10] 林诚,王飞,李清华,等.不同施肥制度对黄泥田土壤酶活性及养分的影响[J].中国土壤与肥料,2009(6):24-27.

(下转第283页)

理在复水条件下, qP 变化趋势一致, 基本恢复至对照。这是由于 G_s 增加了叶内部二氧化碳的量, 提高了叶片内碳同化的效率, 从而使光合电子传递活性增强。本研究证明了拔节期和孕穗期光合特性变化存在差异, 但全生育期干旱及复水过程中玉米光合特性和叶水势具体变化过程以及各参数之间的内在联系还有待于更深入的研究。

参考文献:

- [1] 山仑. 植物水分利用效率和半干旱地区农业用水[J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(1): 61-66.
- [2] 罗宏海, 张亚黎, 张旺锋, 等. 新疆滴灌棉花花铃期干旱复水对叶片光合特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(1): 171-174.
- [3] 李文晓, 张岁岐, 山仑. 水分胁迫对紫花苜蓿根系吸水与光合特性的影响[J]. 草地学报, 2007, 15(3): 206-211.
- [4] 韩希英, 宋凤斌. 干旱胁迫对玉米根系生长及根际养分的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 170-172.
- [5] Bai L P, Sui F G, Sun C H, et al. Effects of soil water stress on morphological development and yield of maize [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7): 1556-1560.
- [6] Reynolds J F, Kemp P R, Ogle K, et al. Modifying the 'pulse-reserve' paradigm for deserts of North America: precipitation pulse, soil water, and plant responses[J]. Oecologia, 2004, 141(2): 194-210.
- [7] 苏佩, 山仑. 多变低水环境下高粱、玉米籽粒产量及水分利用效率变化的生理基础研究[M]//植物生理学与跨世纪农业研究. 北京: 科学出版社, 1999: 199-202.
- [8] 张林春, 郝扬, 张仁和, 等. 干旱及复水对不同抗旱性玉米光合特性的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(5): 76-80.
- [9] 赵天宏, 沈秀瑛, 杨德光, 等. 水分胁迫及复水对玉米叶片叶绿素含量和光合作用的影响[J]. 杂粮作物, 2003, 23(1): 33-35.
- [10] 王磊, 胡楠, 张彤, 等. 干旱和复水对大豆叶片光合及叶绿素荧光的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3631-3635.
- [11] Lakso A N. Seasonal changes in stomata responses to leaf water potential in apple[J]. Am. Soc. Hort. Sci., 1979, 10(4): 58-60.
- [12] 徐国山, 邓丽娟, 李雪丽, 等. 土壤干旱胁迫及复水对紫叶矮樱光合特性的影响[J]. 河北林果研究, 2010, 25(2): 116-120.
- [13] 杨晓青, 张岁岐, 梁宗锁, 等. 水分胁迫对不同抗旱类型冬小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(5): 812-816.
- [14] 宋莉英, 孙兰兰, 舒展, 等. 干旱和复水对入侵植物三裂叶蟛蜞菊叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3713-3720.
- [15] Du Z C, Deng X P, Zhao C X. Anti-oxidation capacities of different wheat genotypes under water stress [J]. Acta Botanica Borealo-Occident Sinica, 2005, 2(8): 1672-1676.
- [16] 黄占斌, 山仑. 水分利用效率及其生理生态机理研究进展[J]. 生态农业研究, 1998, 16(4): 19-23.
- [17] 范雯雯, 王志强, 林同保, 等. 不同土壤肥力下旱后复水对冬小麦光合特性及水分利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(2): 362-365.
- [18] Boyer J S. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials[J]. Plant Physiology, 1970, 46(2): 233-235.

(上接第 277 页)

- [11] 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.
- [12] 王慧萍. 川中丘陵地区农田土壤有机碳氮储量及动态变化[D]. 成都: 四川师范大学, 2008.
- [13] 关荫松. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 320-338.
- [14] 于树, 汪景宽, 王鑫, 等. 不同施肥处理的土壤肥力指标及微生物碳、氮在玉米生育期内的动态变化[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 137-140.
- [15] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期不同施肥制度下几种土壤微生物学特征变化[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 891-899.
- [16] 傅利剑, 郭丹钊, 史春龙, 等. 碳源及碳氮比对异养反硝化微生物异养反硝化作用的影响[J]. 农村生态环境, 2005, 21(2): 42-45.
- [17] 解媛媛, 谷洁, 高华, 等. 微生物菌剂酶制剂化肥不同配比对秸秆还田后土壤酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 233-238.
- [18] 许中坚, 刘广深, 俞佳栋. 氮循环的人为干扰与土壤酸化[J]. 地质地球化学, 2002, 30(2): 75-78.
- [19] 方云霞, 莫江明, Per Gundersen, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1523-1531.
- [20] 黄巧云. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 282-283.