植物营养与肥料学报 2014,20(6):1368-1377
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0606

# 春玉米土壤矿质氮累积及酶活性对施氮的响应

隽英华[1,2], 孙文涛[1*], 韩晓日[2], 邢月华[1], 王立春[3*], 谢佳贵[3]
(1 辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 辽宁沈阳 110161; 2 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁沈阳 110866; 3 农业部东北植物营养与农业环境重点实验室, 吉林长春 130033)

**摘要:【目的】**东北地区春玉米生产中过量施用氮肥的现象普遍存在,导致氮肥利用效率下降,氮素污染严重。有关施氮对东北春玉米土壤矿质氮累积特性影响的研究鲜有报道。本文利用春玉米土壤矿质氮累积量及氮代谢关键酶活性对施氮的响应行为,探寻春玉米的合理施氮量。**【方法】**采用田间试验和室内分析相结合的方法研究春玉米土壤矿质氮累积量及氮代谢关键酶活性对施氮的响应行为。设计6个施氮水平(N 0、60、120、180、240和300 kg/hm$^2$)。自播种开始,每隔15 d分层采集0—120 cm土样一次,共取样10次,进行相关指标的测定与计算。收获时,选择代表性的春玉米进行考种测产。**【结果】**春玉米产量随施氮量增加显著增加,当施氮量高于N 240 kg/hm$^2$时,产量有减少的趋势。土壤中累积的矿质氮以硝态氮为主,其变化行为受施氮量和生育时期的双重制约。土壤硝态氮累积量随施氮量的增加和生育时期的推进均显著增加。受氮肥追施的影响,拔节~大喇叭口期和抽雄期0—60 cm土层铵态氮累积量与苗期和成熟期相比显著增加;从苗期到抽雄期,0—60 cm土层的硝态氮累积量显著增加,而60 cm以下土层无规律性变化。除成熟期外,其他3个生育时期土壤硝态氮累积量均随施氮量的增加显著增加,而随着土层的加深呈降低趋势。与施氮量低的处理(无硝态氮累积峰)相比,N240和N300处理的硝态氮累积峰从拔节期的20—60 cm迁移到抽雄期的80—100 cm,说明过量施氮增加了硝态氮淋溶损失的风险,对环境形成一定的威胁。土壤脲酶和硝酸还原酶活性均随着施氮量的增加先增加后降低,均随着生育时期的推进呈波浪式变化,峰值出现在拔节期~抽雄期,这与土壤中铵态氮和硝态氮累积量的变化趋势相一致。**【结论】**综合考虑春玉米产量性状、矿质氮累积量、氮代谢关键酶活性和经济效益,初步认为,在本试验条件下,春玉米的适宜施氮量在179~209 kg/hm$^2$之间,且在生产上应用该施氮量可以实现氮肥用量降低、产量增加、氮肥效率提高及生态环境保护的协调一致。

**关键词:** 春玉米; 施氮; 矿质氮累积; 酶活性; 时空行为
**中图分类号:** S513.062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)06-1368-10

# Response of soil mineral nitrogen accumulation and enzyme activities to nitrogen application in spring maize

JUAN Ying-hua[1,2], SUN Wen-tao[1*], HAN Xiao-ri[2], XING Yue-hua[1], WANG Li-chun[3*], XIE Jia-gui[3]
(*1 Institute of Plant nutrition and Environmental Resource, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China; 2 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 3 Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northeast Region, Ministry of Agriculture, Changchun 130033, China*)

**Abstract:【Objectives】**Nitrogen fertilization (N) is ubiquitously over-applied in the spring maize production in Northeast China, inducing decreased N use efficiency and serious environmental N pollution. Little information about the effects of N fertilization on soil mineral N ($N_{min}$) accumulation characteristics has been reported in this area. The behaviors of soil $N_{min}$ accumulation characteristics and the activities of some key enzymes regulating N metabolism are affected by N fertilization. A reasonable N rate is needed for spring maize production.**【Methods】**Through a two-year field experiment and laboratory analysis, the behaviors of soil $N_{min}$ accumulation and the

**收稿日期:** 2013-11-25 **接受日期:** 2014-02-17
**基金项目:** 国家科技支撑计划项目(2011BAD16B12, 2012BAD04B03, 2013BAD07B03, 2013BAD05B07)资助。
**作者简介:** 隽英华(1979—),男,山东莒南人,博士,副研究员,主要从事作物营养与土壤氮转化的生物化学调控研究。
Tel: 024-31028698, E-mail: juanyong_001@sohu.com
*通信作者 Tel: 024-31029915, E-mail: wentaosw@163.com; Tel: 0431-87063168, E-mail: wlc1960@163.com

activities of key enzymes regulating N metabolism were studied under different N fertilizer rates. Based on the survey of fertilization levels in test area, six levels of N application rates (N0, 60, 120, 180, 240 and 300 kg/ha) were designed. Soil samples were collected in 0-120 cm layer every 15 days since sowing stage, with a total of 10 samplings, and maize yield were investigated at maturity. 【**Results**】The yields of spring maize increased significantly with increasing of N application rate, once the rate exceed N 240 kg/ha, the yields begin to decline. The dynamics of soil $NO_3^-$-N is influenced by both the N rates and growing stages. Because of topdressing of N fertilizer, the $NH_4^+$-N accumulation in 60 cm soil layer at the jointing to the big trumpet and tasseling stage is significantly higher than at seeding and maturity stage. The $NO_3^-$-N accumulation in 0-60 cm soil layer increases significantly from seeding to tasseling stage, and fluctuates below 60 cm soil layer. Except for maturity, $NO_3^-$-N accumulation is significantly increased with the increased N application rate, and decreased with increasing of soil depth. There is no accumulation peak appeared through the soil layer under lower N application rate, they move from 20-60 cm at jointing stage to 80-100 cm soil layer at tasseling stage under N 240 and N 300 treatments, indicating the high $NO_3^-$-N leaching risks caused by excessive N fertilization. Both the activities of soil urease and nitrate reductase are increased with the increase of N application rate, and the highest level are at the jointing to tasseling stage, synchronized with the accumulation trend of soil ammonium N and nitrate N. 【**Conclusions**】Considering comprehensively, the reasonable N application rate should be in the range of N 179-209 kg/ha under the experimental conditions. With this rate, the grain yield increase, N use efficiency and environmental safety can be synchronized realized.

**Key words:** spring maize; nitrogen application; mineral nitrogen accumulation; enzyme activities; temporal and spatial variation

氮肥是作物优质高产高效的必需营养元素,同时也是土壤中含量较低而作物从土壤中吸收数量最多的营养元素,因此施用氮肥对提高作物产量十分重要[1]。近年来,人们为追求高产过量施用氮肥,导致氮肥利用效率下降,由此引起的氮素污染对生态系统和人类健康的危害也日趋严重[2]。2003 年 Nature 杂志发表了题为"Fertilized to death"的警告性文章[3],指出如果不重视过量施用氮肥带来的环境威胁,将造成灾难性的后果。因此,如何有效地控制农田氮素带来的环境污染已是农业生产中迫切需要解决的问题。

春玉米是我国东北地区最重要的粮食作物之一,在国家粮食安全中占有举足轻重的地位[4]。增加水肥特别是氮肥投入是该地区 30 年来春玉米产量不断提高的重要措施[5]。为获得高产,生产中过量施用氮肥的现象普遍存在。调查表明,春玉米的氮肥施用量约为 240 ~ 280 kg/hm$^2$,高的已超过 300 kg/hm$^2$,远远超过当前产量水平的需求量和专家推荐量[6],氮肥利用率仅为 19% ~ 28%[7],远低于 30% ~ 51% 的全国平均水平[8]。目前,有关氮肥施用对玉米氮素利用和环境效应影响的研究多集中在华北夏玉米上[9-10],东北春玉米生长发育的温度、水热等环境条件不同于夏玉米,而施氮对东北春玉米土壤矿质氮累积特性影响的研究鲜有报道。土壤酶是由微生物和动植物活体或残体分解分泌于土壤中的一种生物催化剂,它作用于土壤的物质转化和能量流动,并参与土壤中各种生物化学过程[11-12]。土壤酶活性不仅能反映土壤生物活性的高低,而且能表征土壤养分转化能力的强弱,是评价土壤肥力的重要指标之一[13]。因此,了解施氮对土壤酶活性的影响具有重要意义。鉴于此,开展了不同施氮量对春玉米产量、土壤矿质氮累积量及氮代谢关键酶活性的影响研究,以期为既保证较高的经济效益、同时又兼顾环境友好地指导该地区春玉米科学施氮提供理论依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验地概况

试验于 2010 ~ 2011 年在辽宁省昌图县老城镇进行(N 42°46′33″, E 123°57′39″),该区属于中温带亚湿润季风大陆性气候,年均温度 7.00℃,年均降水量 500 ~ 600 mm,无霜期 148 d 左右,年均日照总数为 2700 h,≥ 10℃有效积温 3200℃。供试土壤类型为中等肥力棕壤。0—20 cm 耕层土壤的基础理化性质为:有机质含量 18.5 g/kg、全氮 1.23 g/kg、全磷 1.08 g/kg、全钾 13.8 g/kg、碱解氮 114

mg/kg、有效磷 18.2 mg/kg、速效钾 156 mg/kg、pH6.10。试验前 0—120 cm 土层矿质氮累积量如表 1 所示。

表 1 试验前 0—120 cm 土层矿质氮（$N_{min}$）累积量（kg/hm²）

Table 1 $N_{min}$ accumulation at 0–120 cm soil layer before the testing

| 项目 Item | 土层深度 Soil depth (cm) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0—20 | 20—40 | 40—60 | 60—80 | 80—100 | 100—120 |
| 硝态氮 $NO_3^-$-N | 37.45 | 29.00 | 23.76 | 15.64 | 11.07 | 7.45 |
| 铵态氮 $NH_4^+$-N | 9.64 | 6.54 | 4.89 | 3.45 | 3.48 | 2.59 |

### 1.2 试验设计

田间试验共设置 6 个施氮水平：N 0、60、120、180、240 和 300 kg/hm²，分别用 N0、N60、N120、N180、N240 和 N300 表示，3 次重复，随机区组排列。各处理均施磷酸二铵（以 $P_2O_5$ 计）97.5 kg/hm²（N0 处理用过磷酸钙代替），氯化钾（以 $K_2O$ 计）105.0 kg/hm²，且全部以基肥形式施入；氮肥为尿素，其中 20% 作基肥，40% 作拔节期追肥（6 月 28 日），40% 作大喇叭口期追肥（7 月 31 日）。试验小区面积为 30 m²（5.6 m × 5.4 m）。供试玉米品种为郑单 958，种植密度为 $6.2 \times 10^4$ plant/hm²。4 月 23 日播种，9 月 23 日收获。2011 年与 2010 年试验方案一致，试验区在同一田块，但位于不同位置。

### 1.3 测定项目与方法

土壤样品自播种开始，每隔 15 d 取样一次，于 5 月 8 日（出苗）、5 月 23 日（苗期）、6 月 7 日（苗期～拔节期）、6 月 22 日（拔节期）、7 月 7 日（拔节～大喇叭口期）、7 月 22 日（大喇叭口期）、8 月 6 日（抽雄期）、8 月 21 日（灌浆期）、9 月 5 日（蜡熟期）、9 月 20 日（成熟期）取样，共取样 10 次。每次取样时，取每个小区 0—120 cm 土层样，每 20 cm 为一层。每小区随机采取 3 点，同层次的土壤混合为 1 个土样，装入自封袋中，带回实验室将新鲜土样混匀过 2 mm 筛，经四分法取部分样，用于测定土壤矿质氮含量，其中 0—20 cm 表层土壤还用于土壤酶活性的测定。土壤矿质氮含量采用 KCl 溶液浸提后用连续流动分析仪（AA3，德国布朗卢比公司）测定[14]；土壤脲酶活性采用尿素残留量法测定[15]；土壤硝酸还原酶活性采用 $KNO_3$ 作底物淹水培养后用 KCI 浸提比色法测定[16]。

收获时每个小区选取 2 行玉米（约 6.7 m²）测定生物产量，然后选取整齐一致具有代表性的 5 穗玉米和 3 株秸秆带回实验室，考种测产。

### 1.4 数据处理

土壤剖面中各土层矿质氮（硝态氮或铵态氮）累积量（$N_{min}$，N kg/hm²）按下式计算[17]：

$$N_{min} = d \times P_b \times C \times 0.1$$

式中：$d$ 为土层厚度（20 cm）；$P_b$ 为土壤容重（g/cm³）；$C$ 为土壤中硝态氮或铵态氮含量（N mg/kg）；0.1 为换算系数。剖面矿质氮累积量为硝态氮和铵态氮累积量之和。经测定 0—20 cm 土壤容重为 1.15 g/cm³，20—40 cm 土层容重为 1.23 g/cm³，下层土层容重为 1.38 g/cm³。

试验数据采用两年试验的平均值，利用软件 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 11.5 进行数据处理及统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮水平对春玉米产量及经济效益的影响

施氮明显改善春玉米产量性状，提高籽粒产量和经济效益（表 2）。穗长和籽粒产量均随着施氮量增加先增加后降低，而百粒重无规律性，当施氮量为 N 240 kg/hm² 时籽粒产量达到最大，之后继续增加施氮量并不能显著提高籽粒产量。分析表明，施氮处理与不施氮处理之间百粒重和籽粒产量差异显著，而穗长差异不显著；施氮处理之间穗长差异不显著，而百粒重和籽粒产量差异显著。通过建立春玉米籽粒产量（$Y$，kg/hm²）与施氮量（$X$，kg/hm²）之间的肥料效应函数：$Y = -0.0453X^2 + 18.95X + 8866$（$R^2 = 0.7636^{**}$），得出当施氮量为 N 179 kg/hm² 时获得最佳产量 10806 kg/hm²（按尿素态氮 5.20 yuan/kg；玉米籽粒 1.90 yuan/kg 计），当施氮量为 N 209 kg/hm² 时获得最高产量 10847 kg/hm²，这与实际最高产量（11064 kg/hm²）差别不大。随

着施氮量的增加,经济效益显著增加,当施氮量为 N 240 kg/hm$^2$ 时达到最大。产投比随着施氮量的增加呈降低趋势,以 N0 处理最高 (11.14)。综合分析施氮量对产量性状及经济效益的影响表明,合理施氮量应在 N 179 ~ 209 kg/hm$^2$ 之间。

**表 2　不同施氮水平下春玉米产量性状及经济效益**

**Table 2　Yield characteristics and economic benefits for spring maize under different N application rates**

| 处理 Treatment | 穗长 Tassel length (cm) | 百粒重 100-seed weight (g) | 籽粒产量 Grain yield (kg/hm$^2$) | 施肥效益 Fertilization benefit (yuan/hm$^2$) | | | 产投比 Output-input ratio |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 产值 Production | 成本 Cost | 利润 Profit | |
| N0 | 14.80 aA | 29.70 aA | 9058 aA | 14493 | 1194 | 13299 aA | 11.14 |
| N60 | 14.87 aA | 33.57 bcB | 9763 bB | 15620 | 1423 | 14197 bA | 9.98 |
| N120 | 15.64 aA | 32.41 bcAB | 9913 bB | 15861 | 1655 | 14207 bA | 8.58 |
| N180 | 15.87 aA | 31.69 abAB | 11064 cC | 17702 | 1887 | 15816 cB | 8.38 |
| N240 | 15.51 aA | 34.57 cB | 11356 cC | 18170 | 2118 | 16052 cB | 7.58 |
| N300 | 15.51 aA | 32.71 bcAB | 10121 bB | 16193 | 2350 | 13843 abA | 5.89 |

注(Note):玉米价格 1.6 yuan/kg,尿素 1.8 yuan/kg,磷酸二铵 2.6 yuan /kg,氯化钾 4.5 yuan /kg,过磷酸钙 0.75 yuan/kg. The price of maize grain, urea, diammonium hydrogen, potassium chloride and calcium superphosphate are 1.6, 1.8, 2.6, 4.5 and 0.75 yuan per kilogram, respectively. 同一列数据后的不同小写字母和大写字母分别表示处理间差异达 5% 显著水平和 1% 显著水平(邓肯检验) Values followed by different small and capital letters in the same column are significantly different at the 5% and 1% probability levels (Duncan's multiple range test).

## 2.2　施氮水平对土壤矿质氮累积量的影响

氮肥施入土壤后,除被作物吸收利用及以各种途径损失外,大部分以矿质氮的形态残留于土壤剖面[18]。除基施和追施氮肥后的生育时期(5 月 8 日、7 月 7 日、8 月 6 日) 0—120 cm 土层铵态氮累积量较高外,其余生育时期铵态氮累积量均明显低于硝态氮累积量,且这种现象越到生育后期越明显(图 1a、b)。随着施氮量的增加,0—120 cm 土层硝态氮累积量显著增加,当施氮量超过 240 kg/hm$^2$ 时变化不大(图 1b)。与 N180 相比,N240 和 N300 处理 0—120 cm 土层硝态氮累积量在整个生育期均有大幅度提高,增幅在 18.2% ~ 56.2% 之间,这是由于过量施氮在土壤中的大量残留引起的。较 N240 相比,N300 处理土壤硝态氮累积量在 8 月 6 日有一个更大幅度的增加,达到了 286.34 kg/hm$^2$。随着生育期的推进,0—120 cm 土层硝态氮累积量呈增加趋势。

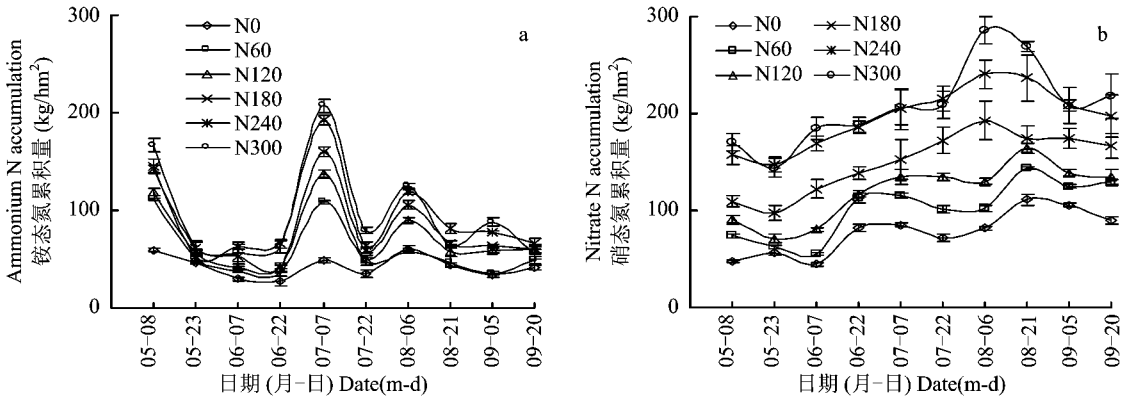


**图 1　0—120 cm 土层矿质氮累积量的动态变化**

**Fig. 1　Dynamics of $N_{min}$ accumulation in 0–120 cm soil layer**

为了更好地分析土壤累积矿质氮的分布行为，选取了春玉米四个主要生育时期来进一步研究。随着施氮量增加，拔节～大喇叭口期和抽雄期土壤铵态氮累积量均显著增加，且0—60 cm增加幅度大于60—120 cm；随着土层的加深，拔节～大喇叭口期和抽雄期土壤铵态氮累积量均显著降低，苗期和成熟期无规律性变化（图2）。由于追施氮肥（6月28日），拔节～大喇叭口期各土层铵态氮累积量较苗期明显增加，以0—60 cm土层增加最为明显。虽然在大喇叭口期追施氮肥（7月31日），抽雄期各土层铵态氮累积量较拔节～大喇叭口期仍显著降低，这是因为，一方面抽雄期为春玉米生长发育最为旺盛的时期，对养分的需求量较大；另一方面此时期的高温多雨加快了铵态氮的硝化作用和向下淋溶。

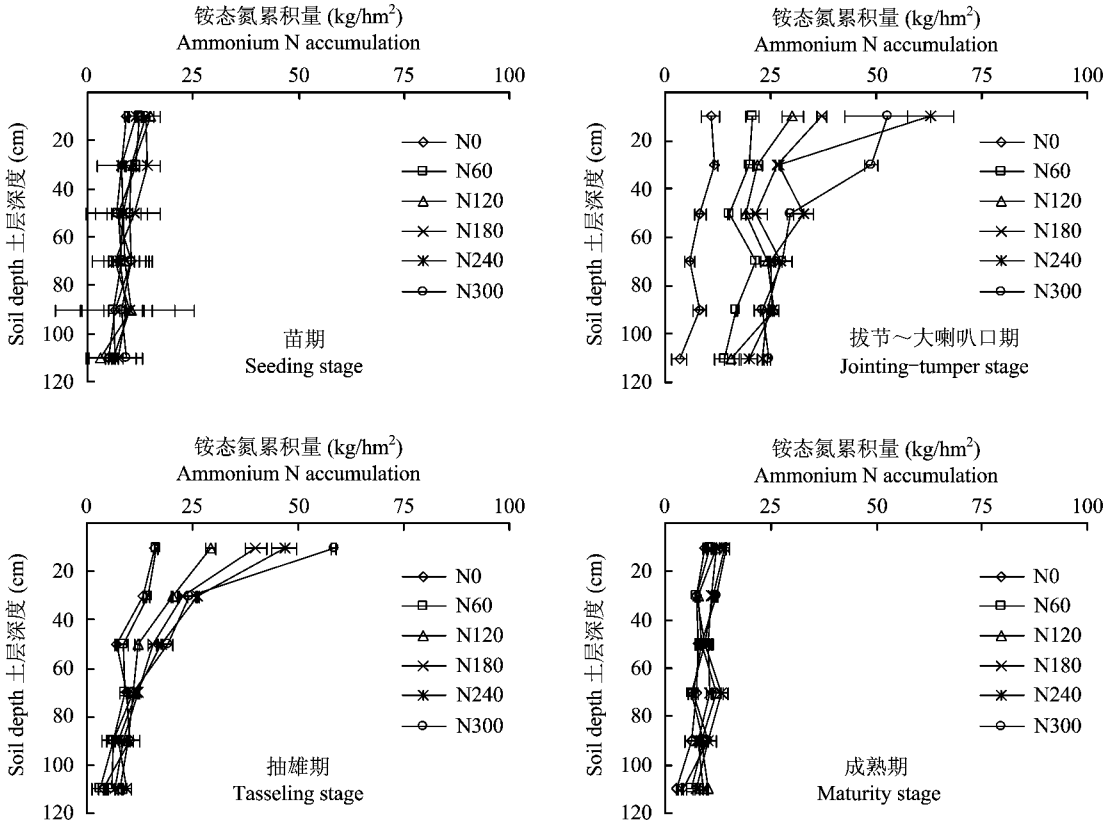


**图2 春玉米主要生育期土壤铵态氮累积量的动态行为**

**Fig. 2 Dynamics of ammonium N accumulation at the major growing stages for spring maize**

施氮明显影响土壤硝态氮累积量的动态变化，其大小和分布行为因生育时期和土层深度而异（图3）。除成熟期外，苗期、拔节～大喇叭口期和抽雄期土壤硝态氮累积量均随施氮量的增加显著增加，而随土层的加深整体上呈降低趋势。当施氮量≤N 120 kg/hm² 和 ≥N 240 kg/hm² 时，除N120处理0—20 cm土层显著增加外，苗期其他土层硝态氮累积量均无显著变化。与苗期相比，拔节～大喇叭口期0—60 cm土层硝态氮累积量显著增加，N240和N300处理分别在20—40 cm和40—60 cm处有一个明显的累积峰。由于土壤中残留的硝态氮和大喇叭口期追施氮肥，抽雄期0—40 cm土层硝态氮累积量较拔节～大喇叭口期显著增加，且增加幅度随着施氮量的增加而增大。N240和N300处理的累积峰也逐渐下移到80—100 cm处，说明过量施用的氮肥以硝态氮形式由表层进入深层，增加了向深层土壤淋溶的风险。与抽雄期相比，成熟期0—40 cm土层硝态氮累积量显著降低，而N240和N300处理60—80 cm土层明显增加。与苗期相比，成熟期60—120 cm土层硝态氮累积量显著增加，以N240和N300处理增幅最大，表明高量施氮（N ≥ 240 kg/hm²）加重了土壤硝态氮的累积，且会因降雨等因素导致部分硝态氮往下层土壤淋洗，加剧了对地下水污染的风险。

### 2.3 施氮水平对土壤酶活性的影响

土壤脲酶活性动态变化受生育时期和施氮水平

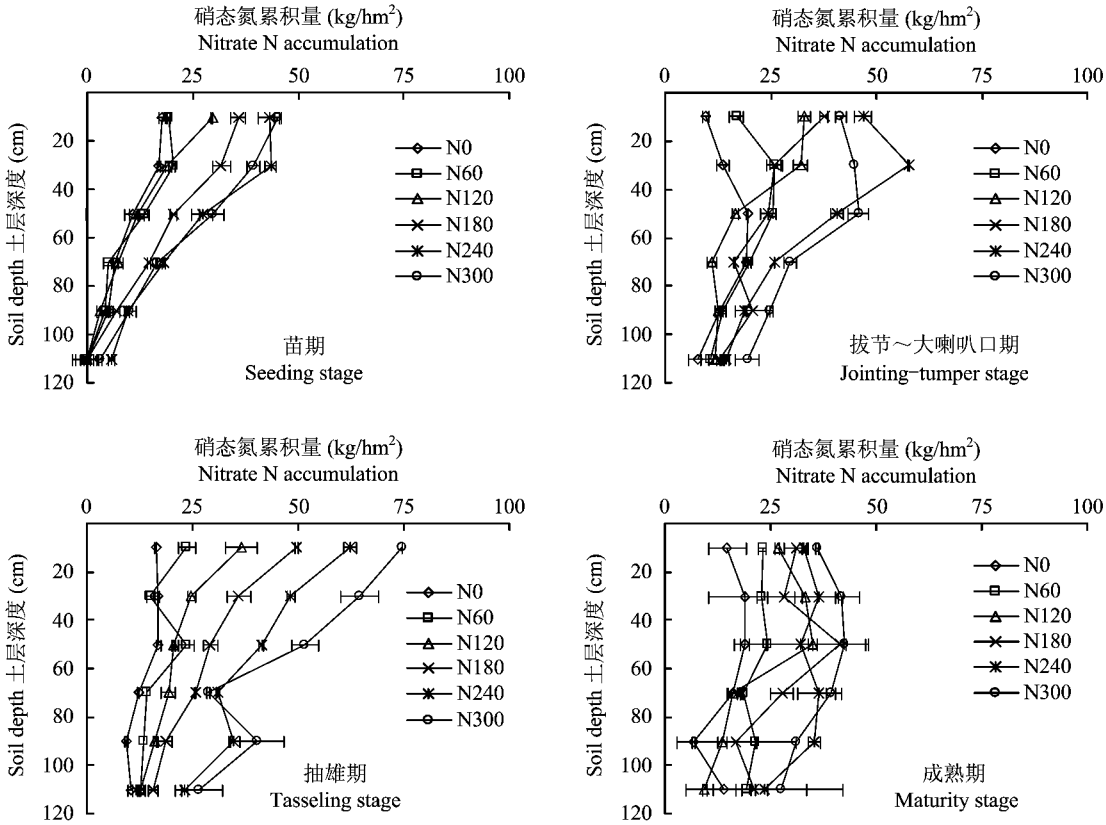


**图 3　春玉米主要生育期土壤硝态氮累积量的动态行为**

**Fig. 3　Dynamics of nitrate N accumulation at the major growing stages for spring maize**

的双重制约(图 4)。随着生育期推进,土壤脲酶活性整体上呈“双峰”曲线变化。除 N0 和 N60 处理外,其他施氮处理土壤脲酶活性均在 7 月 7 日和 8 月 6 日有两个较大的峰值。随着施氮量增加,土壤脲酶活性整体上呈增加趋势,当施氮量超过 N 180 kg/hm² 时,脲酶活性无显著变化。说明适量施氮(≤ 180 kg/hm²)能够提供脲酶合适的作用底物,加快脲酶 - 尿素活化络合物的形成及分解[19]。

与不施氮(N0)相比,施氮明显提高了土壤硝酸还原酶活性(图 5)。其原因一方面是施氮为硝酸还原酶提供了充足的催化底物,另一方面施氮促进了植物根系分泌物和根系脱落物进入土壤,增加了其碳源,同时也加速了植物根系的活动,使根系周围土壤的通气状况、水分条件以及 pH 与根外土壤产生了差异,提高了土壤的硝化能力[20]。随着施氮量增加,土壤硝酸还原酶活性先增加后减小,当施氮量为 N 180 kg/hm² 时达到最大。说明向土壤中添加适量氮肥能够激活硝酸还原酶,这与张玉兰等[21]的研究结论相一致。随着生育期推进,土壤硝酸还原酶活性先增加后降低,峰值出现在 7 月 7 日左右,说明此时期内土壤的硝化作用强烈,这也与前面土壤脲酶活性的变化规律相吻合。

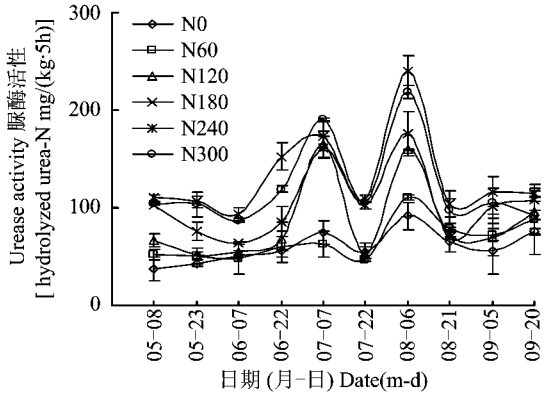


**图 4　不同施氮水平下土壤脲酶活性的动态变化**

**Fig. 4　Dynamics of soil urease activity under different N application rates**

## 3　讨论与结论

氮素是作物需求量最大的营养元素,氮肥运筹是决定作物产量的关键因素之一[22]。本研究表明,施氮可提高春玉米籽粒产量,以 N180 处理最显著。说明在本试验条件下,施氮量 N 180 kg/hm² 对春玉

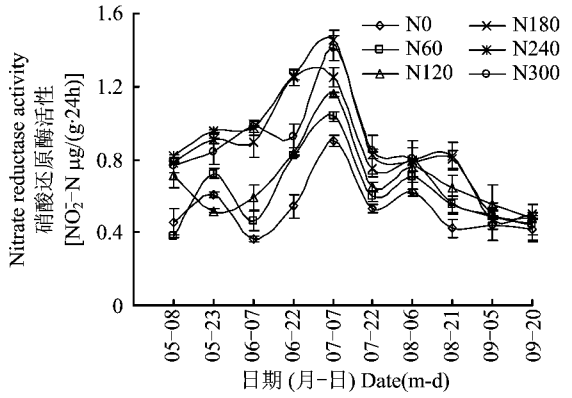


**图5 不同施氮水平下土壤硝酸还原酶活性的动态变化**

**Fig. 5 Dynamics of soil nitrate reductase activity under different N application rates**

米的增产效果最佳,过量施用反而对增产不利。孙占祥等[5]在辽宁草甸土上研究表明,春玉米的合理施氮量应控制在 N 200 kg/hm$^2$ 左右;王爽等[23]在黑龙江黑土上的研究认为,春玉米的推荐施氮量应控制在 N 165 kg/hm$^2$ 以内,超过这个施氮量无显著增产效果。通过建立的肥料效益函数求得本试验条件下春玉米的适宜施氮量在 N 179 ~209 kg/hm$^2$ 之间。由于本试验仅为两年的试验结果,对土壤高残留量氮条件下(播前矿质氮残留量 154 kg/hm$^2$)(表1)氮肥的合理施用量尚需进一步验证。

土壤硝态氮含量是决定氮素淋溶损失的重要因素,过量施氮能显著增加土壤硝态氮含量,引起硝态氮在土壤中的大量累积,增加氮素淋溶损失的潜在风险[5]。许多研究指出,农田土壤长期过量施用氮肥会造成土壤中硝态氮大量累积,且累积量随着施氮量增加显著增加[24-25]。本研究表明,土壤剖面硝态氮累积量的变化行为受施氮量和生育时期的双重制约,而铵态氮累积量仅受氮肥运筹的影响。在整个生育期内,0—120 cm 土层硝态氮累积量均随着施氮量增加和生育期推进显著增加。可见,控制氮肥用量是减少硝态氮在土壤中累积的主要措施。巨晓棠等[26]在华北平原小麦-夏玉米轮作体系进行的研究也充分说明了这一点。

累积硝态氮在土壤剖面中的分布行为与施氮量和生育时期密切相关。本研究表明,在施氮量为 N 180 kg/hm$^2$ 时,0—20 cm 土层硝态氮累积量略有盈余,20—40 cm 土层硝态氮累积量得到快速补充,60—120 cm 土层硝态氮累积量维持平衡水平。在这一施氮水平下玉米产量与最高产量也无显著差异,因而被认为是该地区较为环保和经济的施氮量。纵观比较四个生育时期土壤硝态氮累积量的变化行为发现,苗期0—40 cm 土层硝态氮累积量随着施氮量增加快速增加,40 cm 以下土层增加较缓,说明此时期植株根系浅,植株对氮肥的利用主要集中在耕层土壤。随着作物生长发育,0—100 cm 土层硝态氮累积量运移明显活跃。在春玉米生长最为旺盛的拔节期~抽雄期,N180 处理在各土层中均无硝态氮累积峰出现,而 N240 和 N300 处理则出现了硝态氮累积峰,且其位置从拔节~大喇叭口期的 20—60 cm 下移到抽雄期的 80—100 cm,说明过量施氮导致土壤中硝态氮向下运移,增加了对地下水和环境的污染风险。

但也有学者表明,氮肥用量增加并未影响累积硝态氮在土壤剖面不同层次中的分布特性[27]。党延辉等[28]在渭北平原的长期试验表明,累积硝态氮在土壤剖面中的分布与肥料类型有关;在同一施氮水平下,单施无机氮肥硝态氮的累积峰在 120—200 cm,无机氮磷配施硝态氮的累积峰降低至 80—140 cm,无机氮肥与有机肥配施的累积深度仅为 60—120 cm。可见,影响累积硝态氮在土壤剖面中不同层次分布的因素较多,除氮肥用量和生育时期外,土壤剖面结构、降水及灌水量、肥料类型等因素的作用也值得关注,这也可能是不同研究者所得研究结果差异的原因[29]。

肥料可通过改变土壤水热状况、土壤质地、微生物活性以及根际微环境而影响土壤酶活性[30-31]。Vepslinen 等[32]认为化学肥料可通过改善土壤物理性状和微生物区系来影响酶活性。Ajwa 等[33]认为长期施用氮肥可显著增加磷酸酶活性,而对脲酶活性具有抑制作用。李东坡等[34]研究表明,脲酶活性的高低顺序表现为高量有机肥 > 低量有机肥 > 化肥 > 不施肥。由于受到土壤类型、植被、气候和地形等综合因素的影响,不同区域土壤酶活性对施肥的响应不尽相同[35]。本研究表明,随着施氮量增加,脲酶和硝酸还原酶活性均先增加后降低,以 N180 处理最大,说明适量施氮对酶活性的提高最为有利,过量施氮并不能取得较为理想的激活效果,这也印证了夏雪等[36]的研究结果。从时间尺度上看,本研究中土壤硝态氮累积量、脲酶活性及硝酸还原酶活性均在春玉米生长中后期处于较高水平,这是由于此时期外源氮素的添加(6 月 28 日和 7 月 31 日追施尿素)提供了脲酶更多的活性底物,脲酶活性增强以分解尿素为玉米提供氮素营养,这不仅直接影响着进入土壤中尿素的分解与转化,还可通过

产生大量的硝化作用底物 $NH_4^+$ 而激活硝化作用,而硝化作用产物 $NO_3^-$ 不易被土壤胶体吸附而易遭淋失,造成氮素损失。随着肥料养分的分解被利用,脲酶和硝酸还原酶活性逐渐降低。此外,施氮对土壤微生物种类和数量也会产生影响,今后应进一步研究不同施氮水平下土壤微生物种类、数量及其与土壤酶活性的相互关系,以更全面地反映土壤质量和生产力。

另外,从中国人多地少、粮食生产压力大的现实国情出发,只能追求在保持较高产量水平下的合理施氮量,而不应该一味追求低的环境风险而降低产量。此外,过分的强调较低的氮肥投入,还将导致土壤无法满足作物正常生长的氮素需求而影响作物产量的稳定性[37]。因而在本试验条件下,综合考虑玉米产量和氮肥的环境效应,春玉米的适宜施氮量为 N 179 ~ 209 kg/hm$^2$。

## 参 考 文 献:


[1] 高祥照, 马文奇, 杜森. 我国施肥中存在问题的分析[J]. 土壤通报, 2001, 32(6): 255-261.
Gao X Z, Ma W Q, Du S. Current status and problems of fertilization in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(6): 255-261.

[2] 韩宝文, 王激清, 李春杰. 氮肥用量和耕作方式对春玉米产量、氮肥利用率及经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (2): 28-33.
Han B W, Wang J Q, Li C J. Impacts of nitrogen application rates and tillage modes on yield, nitrogen use efficiency of spring maize and economic benefit[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011, (2): 28-33.

[3] Nohrstedt N. Fertilized to death[J]. Nature, 2003, 425: 894-895.

[4] 徐志刚, 习银生, 张世煌. 2008/2009 年度国家玉米临时收储政策实施状况分析[J]. 农业经济问题, 2010, (3): 16-23.
Xu Z G, Xi Y S, Zhang S H. Analysis on the implementation, mechanisms and effects of 2008/2009 national corn provisional reserve policy[J]. Issues in Agricultural Economy, 2010, (3): 16-23.

[5] 孙占祥, 邹晓锦, 张鑫, 安景文. 施氮量对玉米产量和氮肥利用效率及土壤硝态氮累积的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(5): 119-123.
Sun Z X, Zou X J, Zhang X, An J W Effects of maize yield and N application on N utilization and content of soil nitrate[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(5): 119-123.

[6] 杨镇, 才卓, 景希强, 等. 东北玉米[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
Yang Z, Cai Z, Jing X Q *et al* Maize of northeast China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.

[7] 隽英华, 汪仁, 孙文涛, 邢月华. 春玉米产量、氮素利用及矿质氮平衡对施氮的响应[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 544-551.
Juan Y H, Wang R, Sun W T, Xing Y H. Response of spring maize to nitrogen application in grain yield, nitrogen utilization and mineral nitrogen balance[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3): 544-551.

[8] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
Zhu Z L, Wen Q X. Soil nitrogen in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992.

[9] 赵士诚, 裴雪霞, 何萍, 等. 氮肥减量后移对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 492-497.
Zhao S C, Pei X X, He P *et al.* Effects of reducing and postponing nitrogen application on soil N supply, plant N uptake and utilization of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 492-497.

[10] 石德杨, 张海艳, 董树亭. 土壤高残留氮条件下施氮对夏玉米氮素平衡、利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 37-44.
Shi D Y, Zhang H Y, Dong S T. Effects of nitrogen application on nitrogen balance and use efficiency and yield of summer maize in soil with high residual nitrogen[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(1): 37-44.

[11] Garcia-Ruiz R, Ochoa V, Hinojosa M B *et al.* Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, (40): 2137-2145.

[12] 董艳, 董坤, 郑毅, 等. 种植年限和种植模式对设施土壤微生物区系和酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 527-532.
Dong Y, Dong K, Zhen Y *et al.* Soil microbial community and enzyme activities in green house with different cultivation years and planting system[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(3): 527-532.

[13] Jimenez M D L P, Hprra A M, Pruzzo L *et al.* Soil quality. A new index based on microbiological and biochemical parameters[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, (35): 302-306.

[14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Lu Y K. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science Technology Press, 2000.

[15] Tabatabai M A. Soil enzymes [A]. Weaver R W, Angle J R, Bottomley P S. Methods of soil analysis. Part 2: microbiological and biochemical properties [M]. Madison WI: Soil Science Society of America, 1994. 775-833.

[16] Kandeler E, Eder G, Sobotik M. Microbial biomass, N mineralization and the activities of various enzymes in relation to nitrate leaching and root distribution in a slurry- amended grassland[J]. Biology and Fertility of Soils, 1994, 18(1): 7-12.

[17] 吕丽华, 陶洪斌, 王璞, 等. 施氮量对夏玉米碳、氮代谢和

氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 630-637.
Lü L H, Tao H B, Wang P *et al*. The effect of nitrogen application rate on carbon and nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(4): 630-637.

[18] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 622-627.
Zhao Y, Tong Y A, Zhao H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(5): 622-627.

[19] 和文祥, 朱铭莪. 陕西土壤脲酶活性与土壤肥力关系分[J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 392-398.
He W X, Zhu M E. Relationship between urease activity and fertility of soils in Shanxi Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(4): 392-398.

[20] Bakken L R. Denitrification under different cultivated plants: effect of soil moisture tension, nitrate concentration, and photosynthetic activity[J]. Biology and Fertility of Soils, 1988, 6(4): 271-278.

[21] 张玉兰, 陈振华, 马星竹, 陈利军. 潮棕壤稻田不同氮磷肥配施对土壤酶活性及生产力的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 518-523.
Zhang Y L, Chen Z H, Ma X Z, Chen L J. Response of soil enzymes to different amount N and P fertilizers in rice ecosystems of meadow brown soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(3): 518-523.

[22] Tanaka A, Yamaguchi J, Miura S. Comparison of fertilizer nitrogen efficiency among field crops[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1984, 30(2): 199-208.

[23] 王爽, 孙磊, 陈雪丽, 等. 不同施氮水平对玉米产量、氮素利用效率及土壤无机氮含量的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(3): 387-391.
Wang S, Sun L, Chen X L *et al*. Effects of different nitrogen fertilization levels on maize yield, nitrogen utilization and inorganic nitrogen content in soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(3): 387-391.

[24] 刘宏斌, 李志宏, 张维理, 林葆. 露地栽培条件下大白菜氮肥利用率与硝态氮淋溶损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 286-291.
Liu H B, Li Z H, Zhang W L, Lin B. Study on N use efficiency of Chinese cabbage and nitrate leaching under open field cultivation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 286-291.

[25] 蒋会利, 温晓霞, 廖允成. 施氮量对冬小麦产量的影响及土壤硝态氮运转特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 237-241.
Jiang H L, Wen X X, Liao Y C. Effects of nitrogen application on winter wheat yield and translation of soil $NO_3^-$-N[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 237-241.

[26] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作中 $NO_3^-$-N 在土壤剖面的累积及移动[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 538-546.
Ju S T, Liu X J, Zhang F S. Accumulation and movement of $NO_3^-$-N in soil profile in winter wheat-summer maize rotation system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(4): 538-546.

[27] 张树兰, 同延安, 梁东丽, 等. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 270-277.
Zhang S L, Tong Y A, Liang D L *et al*. Nitrate-N movement in the soil profile as influenced by rate and timing of nitrogen application[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 270-277.

[28] 党廷辉, 郭胜利, 樊军, 郝明德. 长期施肥条件下黄土旱塬土壤 $NO_3^-$-N 的淋溶分布规律[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1265-1268.
Dang T H, Guo S L, Fan J, Hao M D. $NO_3^-$-N leaching and distribution in soil profile in dry highland of Loess Plateau under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(8): 1265-1268.

[29] 王春阳, 周建斌, 郑险峰, 李生秀. 不同栽培模式对小麦-玉米轮作体系土壤硝态氮残留的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 991-997.
Wang C Y, Zhou J B, Zheng X F, Li S X. Effects of different cultivation methods on soil residual nitrate under winter wheat-summer maize cropping system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(6): 991-997.

[30] 李娟, 赵秉强, 李秀英, Bing S H. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 144-152.
Li J, Zhao B Q, Li X Y, Bing S H. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 144-152.

[31] 李会娜, 刘万学, 戴莲, 等. 紫茎泽兰入侵对土壤微生物、酶活性及肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 3964-3971.
Li H N, Liu W X, Dai L *et al*. Invasive impacts of *Ageratina adenophora* (Asteraceae) on the changes of microbial community structure, enzyme activity and fertility in soil ecosystem[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(11): 3964-3971.

[32] Vepslinen M, Kukkonen S, Vestberg M. Application of soil enzyme activity test kit in a field experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33: 1665-1672.

[33] Ajwa H A, Dell C J, Rice C W. Changes in enzyme activities and microbial biomass of tall grass prairie soil as related to burning and nitrogen fertilization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31: 769-777.

[34] 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]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(12): 2208-2212.

[35] 徐国伟, 段骅, 王志琴, 等. 麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 926-933.
Xu G H, Duan Y, Wang Z Q *et al*. Effect of wheat-residue application on physical and chemical characters and enzymatic activities in soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(3): 926-933.

[36] 夏雪, 谷洁, 高华, 等. 施氮水平对土壤水解酶活性和作物产量的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(5): 756-765.
Xia X, Gu J, Gao H *et al*. Effect of nitrogen application rates on soil hydrolase activities and crop yield[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(5): 756-765.

[37] 杨荣, 苏永中. 水氮配合对绿洲沙地农田玉米产量、土壤硝态氮和氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1459-1469.
Yang R, Su Y Z. Effects of nitrogen fertilization and irrigation rate on grain yield, nitrate accumulation and nitrogen balance on sandy farmland in the marginal oasis in the middle of Heihe River basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1459-1469.