植物营养与肥料学报 2006,12(5):622－627
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响

赵 营，同延安*，赵护兵
（西北农林科技大学资源环境学院，陕西杨凌 712100）

摘要：通过田间小区试验，研究了高肥力土壤上施 N 125、250、375 kg/hm² 对夏玉米生物量、子粒产量、N、P、K 养分累积动态、及氮肥表观利用率、养分转运的影响。结果表明，不同施氮量只影响夏玉米不同生育时期养分的阶段累积量，而对累积趋势基本无影响。植株生物量及 N、P、K 养分累积量随生育期的延长而增加，且它们的累积趋势相似，都呈"S"型曲线。各处理的子粒产量在 7000～7700 kg/hm² 之间，只有 N250 处理增产达显著水平；氮肥表观利用率在 10%～18%之间，随施氮量的增加略有降低。施氮可提高子粒中的氮素累积量，而对磷的累积量影响不大。随着施氮量的增加，氮素的转运量、转运效率及其在子粒中的比例都降低，磷的转运与氮表现出类似的趋势。综合考虑产量、氮肥利用率、养分转运及环境污染等因素，该地区夏玉米的推荐施氮量应控制在 125 kg/hm² 以内。

关键词：夏玉米；产量；氮肥利用率；养分累积；养分转运
中图分类号：S513.062　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X (2006)05-0622-06

Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize

ZHAO Ying, TONG Yan-an*, ZHAO Hu-bing
(*College of Resour and Envir. Sci., Northwest Sci-Tech Univ. of Agric. and For., Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: Rational N fertilization could improve the yield and quality of crop production, but over-application may cause groundwater and atmosphere pollution. Based on the characteristics of N, P, K uptake, accumulation and transformation, applying fertilizer at appropriate time and dose can increase crop yield and nitrogen use efficiency. A summer maize field experiment was carried out in high fertility soil of Guanzhong of Shaanxi province in 2004 to investigate effects of N fertilization on biomass, yield, accumulation dynamic of N, P and K, N use efficiency and nutrient transformation. The experiment design was the randomized complete block with four replications. The area of each plot was 33.6 m² (6m × 5.6m). Four nitrogen fertilization levels were employed including 0, 125, 250 and 375 kg/ha, one third of nitrogen fertilizer and total P (P 45 kg/ha) and K (K 216 kg/ha) was used as basal fertilizer, and two third of nitrogen fertilizer used as topdressing fertilizer at ear premordia stage. The results showed that N application rates affected the nutrient accumulate at different growth stages, but no influence on the tendency of nutrients accumulation in plant. Biomass and N, P and K accumulate increased with the prolongation of growth stages, and the accumulation tendencies were very similar, and could be described by "S" curve. The grain yield of different treatments was ranged from 7000 to 7700 kg/ha. The yield of treatment N250 was significant higher than other treatments, among which no significant difference on yield was observed. Fertilizer N recovery ranged from 10% to 18%, which decreased slightly with increasing of N rates. N application could increase N accumulation in grain, but the effect on P in grain was neglected. N transfer amounts, transfer efficiency and its proportion in grain decreased with increasing of N application rates, P transformation showed the similar

收稿日期：2005-07-21　　**修改稿收到日期**：2005-11-11
基金项目：国家自然科学基金项目(30370822)；农业部"948"养分资源综合管理技术项目资助。
作者简介：赵营(1979—)，男，河南项城人，硕士研究生，主要从事植物营养与施肥研究。* 通讯作者

tendency at different N fertilization. Comprehensive the yield, fertilizer N recovery, nutrients transformation and environment pollution, the recommendation of fertilizer N rate for summer maize was less than 125 kg/ha in the experimental area.

Key words: summer maize; yield; fertilizer N recovery; nutrients accumulation; nutrients transformation

夏玉米是陕西省关中地区主要粮食作物之一。64%的农户在夏玉米当季施氮量为 270 kg/hm^2 左右[1]，且施肥方式多为“一炮轰”，造成肥料利用率很低，效益下降，并对环境造成污染[2-3]。合理施用氮肥是目前植物营养界研究的热点，氮肥的施用时期和数量对作物产量及氮肥利用率有显著的影响[4-6]，了解作物对养分的吸收利用规律对合理施肥是非常必要的。N、P、K 养分是作物生长发育的三大养分资源，其吸收、同化与转运直接影响着作物的生长发育状况，从而影响作物的产量。了解作物对这三大养分的吸收和累积规律，有助于采取有效的施肥措施，调控作物的生长发育，提高作物产量。有研究表明，随着玉米产量的提高，N、P、K 吸收量增加[7-8]；适宜的 NPK 配比及施肥技术可促进玉米植株生育前期总生物量的累积以及生育后期干物质从营养体向子粒转运，从而获得较高的产量[9-11]。在陕西关中地区，对夏玉米全生育期养分吸收、累积及转运规律的研究，尤其是在高肥力土壤上的研究并不多。为此，通过田间试验研究不同供氮水平下夏玉米生物量与 N、P、K 养分累积动态、养分转运、产量及氮肥利用率的变化，以期为该地区夏玉米氮肥的合理施用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验设在陕西省扶风县揉谷乡新集村的高肥力田块。该地处于暖温带半湿润气候区，年降雨量为 550～650 mm，降水多集中在 7、8、9 三个月份。供试土壤为塿土，0—20 cm 土壤有机质平均含量为 12.7 g/kg，全 N、速效 P、速效 K 分别为 0.52 g/kg、24.4 mg/kg、146.9 mg/kg。

试验设 4 个施氮水平，即 N 0、125、250、375 kg/hm^2，分别用 N0、N125、N250 和 N375 表示。N250 处理的施肥量是根据玉米目标产量 9000 kg/hm^2 所需 N、P、K 养分而确定的，N125 和 N375 处理的施氮量分别是 N250 的 50%和 150%，磷、钾肥用量均为 P 45 kg/hm^2、K 216 kg/hm^2。氮、磷、钾肥品种分别为 46%尿素、12%普通过磷酸钙和 60%氯化钾。各处理 1/3 的氮肥和全部的磷、钾肥在玉米七叶展期施用，2/3 的氮肥在大喇叭口期追施。每个小区面积 6 m×5.6 m=33.6 m^2，重复 4 次，随机区组排列。

供试玉米品种为农大 108，种植密度 4.8×10^4 株/hm^2。2004 年 6 月 7 日播种，9 月 28 日收获。在夏玉米播种后，为确保出苗率，每小区灌水 75 mm 一次，其它管理同当地大田。当季作物生长期间，降水总量为 252 mm，约占全年降水量的 40%。

1.2　测定项目与方法

分别在夏玉米播种后的第 20d（苗期，3 叶展期）、45d（拔节期）、58d（大喇叭口期）、85d（灌浆期）和 114d（收获）采集地上植物样，其中 3 叶展期（尚未间苗）采 20 株混合样全部烘干称重，第 45、58、85d 按每小区采样 2 株，再取混合样烘干以计算其干重（灌浆期秸秆和子粒样品分别处理），以每小区的玉米株数折算生物量。收获时，称量各小区的玉米果穗和秸秆总鲜重，然后从中选取 10 个玉米果穗和 10 株植株作为分析样，烘干以计算其干重。烘干样粉碎后，用浓 H_2SO_4—H_2O_2 消解，然后以 Tector 5020 流动注射分析仪测 N、钼锑抗比色法测 P、火焰分光光度法测 K。数据采用 EXCEL 和 SAS 软件进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　对夏玉米生物量及 N、P、K 养分累积动态的影响

一般来说，作物生长过程中，由于植株干物质的累积速率大于养分吸收速率，养分在植株体内的含量呈下降趋势[12]。养分的累积量是养分含量与植株干生物量的乘积，尽管作物生长过程中养分含量有所下降，但养分累积量总体是呈增加趋势，收获时也可能有所下降[13-14]。

不同供氮水平下夏玉米生物量累积与 N、P、K 养分吸收累积状况如图 1 所示。图 1 看出，夏玉米生物量累积动态曲线（图 1A）与 N（图 1B）、P（图 1C）、K（图 1D）养分累积动态曲线基本一致，呈“S”型曲线，这符合生物量累积的一般规律。不同施氮量只是改变作物不同生育阶段的养分累积量，总趋势基本一致。从播种到播后第 20d，作物生长缓慢，养分累积量也较少；第 20～45d，作物生长加快，养分

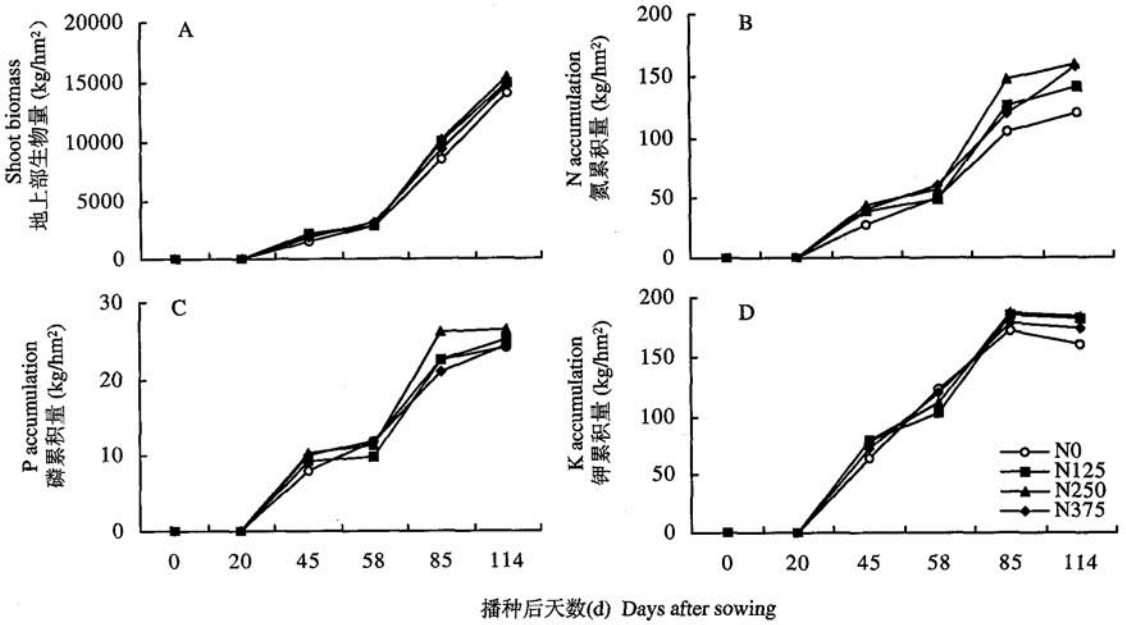

图1 不同供氮水平对夏玉米生物量(A)及氮(B)、磷(C)、钾(D)养分累积的影响

Fig.1 Effect of different N rates on shoot dry matter and N, P, K accumulation in summer maize

累积也迅速增加；而在生育后期(播后第85d以后)，作物体内的养分主要是进行转运分配，养分的吸收累积量趋于平缓。方差分析结果显示，氮的吸收累积量只在灌浆和收获期有显著差异，而磷和钾的累积量在各生育期都无显著差异。

本试验条件下，N、P、K养分的吸收高峰并不同步，钾的吸收累积比氮和磷都快，在第85d达最大，收获时累积量则有所降低。养分累积量的顺序是K > N > P。从图1B、C、D还可以看出，N、P、K养分的累积主要集中在两个阶段，一个阶段是从苗期到拔节期(第20～45d)，另一个是从大喇叭口期到灌浆期(第58～85d)；其养分累积量之和占总累积量的60%～90%。表明这两个阶段是施肥的关键，对玉米产量的最终形成至关重要。

2.2 对夏玉米产量和氮肥表观利用率的影响

表1看出，不同氮肥处理夏玉米子粒产量在7000～7700 kg/hm² 之间，N125、N250、N375处理的增产量分别为260、606、116 kg/hm²，分别比N0增产4%、9%和2%；除N250处理的增产达显著水平外，其它各施氮处理间差异不显著；玉米秸秆产量也表现出类似的趋势。N375处理的施氮量分别是N125和N250的3倍和1.5倍，而子粒产量则分别减少了144和490 kg/hm²。说明施氮量过高时不仅不能增产，反而使子粒产量降低。氮肥同样可以促进夏玉米地上部对氮素的吸收累积。不同施氮处理的氮肥表观利用率为10%～18%，随施氮量的增加而降低，说明80%以上的氮肥未被当季作物吸收利用。

表1 不同施氮水平夏玉米产量与氮肥利用率

Table 1 Summer maize yield and apparent N recovery with different N rates

处理 Treatments	子粒产量 Grain yield (kg/hm²)	秸秆产量 Straw yield (kg/hm²)	总吸氮量 Total N uptake (kg/hm²)	氮肥利用率 Apparent N recovery (%)
N0	7073 ± 292 b	6904 ± 437 b	118.2 ± 12.4 c	—
N125	7333 ± 259 ab	7212 ± 237 ab	140.6 ± 11.4 b	18
N250	7679 ± 242 a	7852 ± 241 a	158.5 ± 12.3 a	16
N375	7189 ± 498 ab	7536 ± 842 ab	156.6 ± 10.5 ab	10

注(Note)：同一列数据不同字母代表差异达5%显著水平，下同。Different letters in the same line mean significant at 5% level, same as follows.

N250 处理的施氮量是 N125 处理的 2 倍，而子粒产量只提高了 5%，未达显著水平，表明施氮量大于 125 kg/hm² 时，多施用的氮并没有起到真正的增产作用。

2.3 对氮、磷养分向子粒转运的影响

玉米子粒形成过程，也是子粒中氮和磷大量累积的过程。而子粒中的养分一方面来源于根系吸收养分的直接供应，另一方面是营养器官中的养分转移。养分的转运量可用灌浆前和收获时营养体中养分吸收量（累积量）之差来表示；而转运效率是转运量占总量的百分比[15]。

不同施氮量对子粒氮累积量、氮转运量及转运效率的影响（表 2）表明，施氮可以提高氮素在子粒中的累积量，当施氮 250 kg/hm² 时，达显著水平。不同氮素供应水平下秸秆向子粒的转运量也有一定的差异（未达 5% 显著水平）。N125 处理的转运量最大，N375 处理的转运量最小。

各处理的氮转运效率在 30%～50% 之间，随施氮量的增加而降低。子粒中 37.2%～57.3% 的氮是来源于营养器官的转运，转运比例随施氮量增加而降低。总之，随着施氮量的增加，氮素的转运量、转运效率及在子粒中的比例都降低，说明施用过量的氮不利于氮素向子粒转运，这可以解释 N375 处理子粒产量低的原因。

表 2　不同施氮量对氮转运量、转运效率的影响

Table 2　Effect of different N rates on N transfer amounts and transfer efficiency

处理 Treatments	子粒氮累积量 N accumulation in grain (kg/hm²)	秸秆氮转运量 N transfer from straw (kg/hm²)	转运效率 Transfer efficiency (%)	占子粒氮的比例 Ratio of N in grain (%)
N0	76.5 ± 9.5 b	40.3 ± 18.8 a	49.1	52.6
N125	84.0 ± 4.6 ab	48.1 ± 25.4 a	45.9	57.3
N250	89.6 ± 3.9 a	38.9 ± 18.0 a	36.1	43.4
N375	86.4 ± 6.3 ab	32.1 ± 32.3 a	31.4	37.2

不同施氮量对子粒磷累积量、磷转运量及转运效率的影响（表 3）看出，各处理间子粒磷累积量及磷转运量均无显著差异。过量的施氮也不利于磷的转运，如 N250 和 N375 处理的转运量相对于 N125 分别降低了 3.1、3.8 kg/hm²。N375 处理子粒中的磷累积量只有 18.6 kg/hm²，比 N0 处理的还低，施氮量过高抑制了磷在子粒中的累积，从而影响产量形成，进一步解释了该处理玉米子粒产量低的原因。磷转运量比氮少得多，但转运效率比氮高出 20%～30%。磷的转运量、转运效率及在子粒中的比例与氮表现出类似的趋势，随着施氮量的增加而降低，这说明氮和磷在养分转运上表现出一定的交互作用。

表 3　不同施氮量对磷转运量、转运效率的影响

Table 3　Effect of different N rates on P transfer amounts and transfer efficiency

处理 Treatments	子粒磷累积量 P accumulation in grain (kg/hm²)	秸秆磷转运量 P transfer from straw (kg/hm²)	转运效率 Transfer efficiency (%)	占子粒磷的比例 Ratio of P in grain (%)
N0	19.0 ± 1.2 a	10.3 ± 1.9 a	67.3	54.2
N125	19.9 ± 1.7 a	11.0 ± 6.1 a	67.5	55.3
N250	20.3 ± 0.9 a	7.9 ± 2.3 a	56.8	38.9
N375	18.6 ± 2.8 a	7.2 ± 3.7 a	55.4	38.7

3 讨论

作物生物量的累积与养分累积有着密切的关系，养分累积是生物量累积的基础，也是作物产量形成的基础。不同氮素供应水平只改变夏玉米养分的阶段累积量，而对养分累积动态趋势影响不大。生物量累积曲线与 N、P、K 养分累积曲线基本一致，都呈“S”型，这与宋海星等[13, 15]的研究结果一致。N、P、K 养分在播种后第 20d 至第 45d 和第 58 d 至第 85d 两个阶段的累积量之和占总累积量的 60%～

90%，也是施肥的关键期，合理分配这两个阶段的氮肥用量对产量形成至关重要。本试验条件下，养分累积量大小顺序是 K > N > P。而张颖、佟屏亚等[7, 16]研究认为，氮累积量大于钾，这可能与该地区玉米对钾的奢侈吸收有关。随施氮量的增加，产量并不是随之同步增加。施氮量为 250 kg/hm^2 时，夏玉米子粒和秸秆增产达显著水平，但施氮处理间的产量无显著差异。过量增施氮肥（125 kg/hm^2 以上）的增产效果并不明显，甚至可能会降低产量。氮肥表观利用率在 10%～18%之间，随施氮量的增加而降低。许多研究已证明了这个结论[17-18]。氮肥利用率结果表明，80%以上的氮肥未被当季作物吸收利用，其中大部分以硝态氮形式残留在土壤剖面中。土壤剖面 NO_3^--N 含量随氮肥施用量的增加而增加[17, 19]，残留的 NO_3^--N 极易通过淋洗出根层或硝化—反硝化作用损失掉，造成对环境的污染[1-2]。由于本试验是在高肥力地块上进行的，氮肥利用率最高只有 18%，这也反映了目前高产地区氮肥利用率低的一个普遍趋势。

施氮可以促进夏玉米子粒对氮素的累积，而对子粒中磷累积量无显著影响。氮和磷的转运表现出类似的趋势，即随着施氮量的增加，其转运量、转运效率及在子粒中的比例都降低。施用过量的氮肥，不利于氮、磷向子粒转运，致使子粒产量降低。这可能与氮磷的交互作用有关，合理的氮磷钾配比有利于作物对养分的吸收和生物量的累积，从而利于最终产量的形成[8-9]。综合考虑产量、氮肥利用率、养分转运及环境污染等因素，该试验产量水平下夏玉米的推荐施氮量应控制在 125 kg/hm^2 以内。

参考文献：

[1] 同延安，Ove Emteryd，张树兰，梁东丽．陕西省氮肥过量施用现状评价[J]．中国农业科学，2004，37(8)：1239-1244.
Tong Y A, Ove Emteryd, Zhang S L, Liang D L. Evolution of over-application of nitrogen fertilizer Shaanxi province, China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(8): 1239-1244.

[2] 吕殿青，同延安，孙本华，Ove Emteryd．氮肥施用对环境污染影响的研究[J]．植物营养与肥料学报，1998，4(1)：8-150.
Lu D Q, Tong Y A, Sun B H, Ove Emteryd. Study on effect of N fertilizer use on environment pollution [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(1): 8-150.

[3] 袁新民，同延安，杨学云，等．有机肥对土壤 NO_3^--N 累积的影响[J]．土壤与环境，2000，9(3)：197-200.
Yuan X M, Tong Y A, Yang X Y *et al*. Effect of organic manure on soil nitrate N accumulation [J]. Soil and Envir. Sci., 2000, 9(3): 197-200.

[4] 刘荣根，吴梅菊，周敏．氮肥的不同施用量和次数对小麦生长及产量的影响[J]．土壤肥料，1999，(2)：1-4.
Liu R G, Wu M J, Zhou M. Effect of different amounts of fertilizer N and its distribution on the growth and yield of wheat [J]. Soils and Fertilizers, 1999(2): 1-4.

[5] Raun W R, Johnson G V, Westerman R L. Fertilizer nitrogen recovery in long-term continuous winter wheat [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1999, 63(4): 645-650.

[6] 曹承富，孔令聪，汪建来，等．施氮量对强筋和中筋小麦产量和品质及养分吸收的影响 [J]．植物营养与肥料学报，2005，11(1)：46-50.
Cao C F, Kong L C, Wang J L *et al*. Effects of nitrogen on yield, quality and nutritive absorption of middle and strong gluten wheat [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(1): 46-50.

[7] 张颖．不同产量类型春玉米养分吸收特点及其分配规律的研究[J]．玉米科学，1997，5(3)：70-72.
Zhang Y. Study on the characteristics of nutrients absorption and its distribution patterns of different types of spring maize [J]. J. of Maize Sci., 1997, 5(3): 70-72.

[8] 郭景伦，张智猛，李伯航．不同高产夏玉米品种养分吸收特性的研究[J]．玉米科学，1997，5(4)：50-52，59.
Guo J L, Zhang Z M, Li B H. Study on the characteristics of nutrient absorption of high-yielding summer maize [J]. J. of Maize Sci., 1997, 5(4): 50-52, 59.

[9] 何萍，金继运，林葆，等．不同氮磷钾用量下春玉米生物产量及其组分动态与养分吸收模式研究[J]．植物营养与肥料学报，1998，4(2)：123-130.
He P, Jin J X, Lin B *et al*. Dynamics of biomass and its components and models of nutrients absorption by spring maize under different nitrogen, phosphorous and potassium application rates[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(2):123-130.

[10] 金继运，何萍．氮钾互作对春玉米生物产量及其组分动态的影响[J]．玉米科学，1999，7(4)：57-60，72.
Jin J Y, He P. Dynamics of biomass and its components of spring maize as affected by nitrogen and potassium interaction[J]. J. of Maize Sci., 1999, 7(4): 57-60, 72.

[11] 黄绍文，孙桂芳，金继运，等．氮、磷和钾营养对优质玉米子粒产量和营养品质的影响 [J]．植物营养与肥料学报，2004，10(3)：225-230.
Huang S W, Sun G F, Jin J Y *et al*. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium application on grain yield and qualities of high-oil and high-starch corn [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 225-230.

[12] 董钻，谢甫绨．大豆氮磷钾吸收动态及模式的研究[J]．作物学报，1996，22(1)：89-95.
Dong Z, Xie F T. Studies on dynamics and models of N, P, K absorption in soybeans[J]. Acta Agronomica Sinica, 1996, 22(1): 89-95.

[13] 褚贵新，吕新，刘建国，等．冬小麦套作玉米作物氮磷吸收分配规律和施肥运筹[J]．新疆农业科学，2000(5)：199-202.
Zhu G X, Lu X, Liu J G *et al*. N, P absorption and distribution patterns and fertilization management under the intercropping of winter

wheat and maize [J]. Sci. of Xinjiang Agric., 2000, 5: 199-202.

[14] 王贵平，张胜，王圣瑞，等. 地膜覆盖对春玉米氮磷钾吸收累积和化肥利用率的影响[J]. 内蒙古农业大学学报，2000，21(5)：157-161.

Wang G P, Zhang S, Wang S R *et al*. Effect of film covered on N, P, K absorption and accumulation of spring maize and fertilizer utilization [J]. J. of Inner Mongolia Agric. Univ. 2000, 21(5): 157-161.

[15] 宋海星，李生秀. 玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化[J]. 中国农业科学，2003，36(1)：71-76.

Song H X, Li S. Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and N supply conditions [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(1): 71-76.

[16] 佟屏亚，凌碧莹. 夏玉米氮、磷、钾累积和分配态势的研究[J]. 玉米科学，1994，2(2)：65-69.

Tong P Y, Ling B Y. Studies on the accumulation and distribution tendencies of N, P, K of summer maize [J]. J. of Maize Sci., 1994, 2(2): 65-69.

[17] 刘敏超，曾长立，王兴仁，张福锁. 氮肥施用量对冬小麦氮肥利用率及土壤剖面 NO_3^--N 动态分布的影响[J]. 农业现代化研究，2000，21(5)：309-312.

Liu M C, Zeng C L, Wang X R, Zhang F S. Effects of nitrogen fertilizer in winter wheat on its utilization rate and dynamic distribution of NO_3^--N in soil layers [J]. Research of Agricultural Modernization, 2000, 21(5): 309-312.

[18] 巨晓棠，刘学军，邹国元，等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中的氮素损失途径分析[J]. 中国农业科学. 2002，35(12)：1493-1499.

Ju X T, Liu X J, Zou G Y *et al*. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(12): 1493-1499.

[19] 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.