

不同施氮水平对春玉米氮素利用及土壤硝态氮残留的影响

淮贺举, 张海林, 蔡万涛, 陈 阜

(中国农业大学农学与生物技术学院/农业部农作制度重点开放实验室, 北京 100193)

摘 要:过量施用氮肥造成的环境问题日益严重,氮肥合理使用成为了人们研究的热点。通过研究不同施氮水平对春玉米氮素利用及土壤硝态氮残留的影响,为氮肥的合理利用提供依据。通过在北京市通州区农业技术推广站进行田间小区试验,研究了不同施氮量(0、50、100、200和300 kg·hm⁻²)对春玉米产量及氮素利用效率、氮平衡和土壤硝态氮累积量的影响。结果表明:(1)春玉米在施氮量为200 kg·hm⁻²时达到最高产量,为9 006.4 kg·hm⁻²,不同氮肥水平的氮肥利用率在19.7%~25.8%之间,在100 kg·hm⁻²时的利用效率最高,达到25.8%。(2)作物吸氮量随输入量的增加而增加,氮盈余主要以土壤残留为主,表观损失在氮盈余中的比例虽小,但随施氮量的增加而增加的趋势更加明显。(3)硝态氮在180 cm土层中的累积量随氮素输入量的增加而显著增加,在300 kg·hm⁻²时达到最高值,为195 kg·hm⁻²,在施氮水平为100 kg·hm⁻²时作物生长的需要就基本上能够得到满足,而在高施氮水平下(200和300 kg·hm⁻²)时土壤中的硝态氮出现富集现象,对环境形成一定的威胁。

关键词:春玉米;氮素利用效率;硝态氮;氮平衡

中图分类号:S147.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2651-06

Effect of Different Nitrogen Rates on Nitrogen Utilization and Residual Soil Nitrate of Spring Maize

HUAI He-ju, ZHANG Hai-lin, CAI Wan-tao, CHEN Fu

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, Beijing 100193, China)

Abstract: The environmental problem caused by excessive use of nitrogen fertilizer is becoming a very important issue and rational use of nitrogen fertilizer has become the focus of concern increasingly. In order to provide evidence for reasonable use of nitrogen fertilizer, this paper analyzed the effects of nitrogen level on spring maize nitrogen utilization and soil nitrate nitrogen residual. With 5 level of nitrogen rates (0, 50, 100, 200 and 300 kg·hm⁻²), this experiment were conducted at Tongzhou District, Beijing. The effects on spring maize production, nitrogen use efficiency, nitrogen balance and nitrate-nitrogen accumulation in soil were discussed in this paper. The results show as following: (1) the highest spring maize yield reached to 9 006.4 kg·hm⁻²; the nitrogen use efficiency ranged from 19.7% to 25.8% under different rates of nitrogen fertilization, which reached the highest 100 kg·hm⁻² when 100 kg·hm⁻² was applied; (2) the nitrogen uptake by spring maize increased with the nitrogen fertilizer increasing and surplus nitrogen in soil profile dominated the residual N. Despite apparent nitrogen loss was a small part of nitrogen surplus, the apparent nitrogen loss significantly increased with the nitrogen fertilizer increasing; (3) The residual N_{min} accumulated increased significantly with the nitrogen fertilizer increasing in 180 cm soil profile, which reached to the highest value 195 kg·hm⁻² at the rate of 300 kg·hm⁻² level. The nitrogen at the rate of 100 kg·hm⁻² could satisfy the spring maize demand. The environment would be threatened when the nitrate was cumulated in the soil at the rate of 200 and 300 kg·hm⁻².

Keywords: spring maize; N utilization efficiency; soil nitrate; N balance

收稿日期:2009-08-18

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划(2006BAD17B09)

作者简介:淮贺举(1983—),男,河北人,硕士研究生。E-mail:huaiheju@163.com

通讯作者:陈 阜 E-mail:chenfu@cau.edu.cn

我国农业化肥的投入总量不断加大^[1],单位耕地面积施肥量已为世界平均用量的 2.86 倍,美国的 2.36 倍^[2-4]。而化肥的利用率只有 32%左右,与发达国家的 50%~60%还相差很远,这不仅造成资源、财力上的巨大浪费,也给环境和农产品安全带来负面影响。在北京地区调查表明,100 块夏玉米田的平均施氮量为 256 kg·hm⁻²^[5],远远超过了高产条件下作物的吸氮量,氮肥利用率仅为 16%~22%^[6],低于 30%~41%的全国平均水平^[7]。近年来关于硝酸盐淋失带来的地下水污染倍受关注。北京地区由于氮肥施用过量 and 施用不合理,在蔬菜、玉米等作物生育期有明显的氮素淋溶损失^[8-9],夏玉米生长季节硝酸盐淋洗量可高达 450~615 kg·hm⁻²^[10]。Roth and Fox^[11]发现,种植玉米后即使采用经济施氮量,在夏季仍有 41~138 kg N·hm⁻² 被淋洗到 1.2 m 土层。为了系统研究不同施氮水平春玉米的氮肥效应、氮平衡以及对环境的影响,在北京地区进行了氮素肥料试验,旨在对氮肥的合理利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2008 年 5 月 13 日到 9 月 16 日在北京市通州区农业技术推广站(39°57'28"N,116°40'43"E,海拔 18.8 m)进行。试验地土壤以壤土和砂壤土为主。土壤的基本性状见表 1。通州区属大陆性季风气候,整个春玉米生育期降雨量分布见图 1,试验地地下水埋深约为 14 m。

1.2 试验设计

本试验共设 5 个水平的氮素处理,分别为:0(N0)、50(N50)、100(N100)、200(N200)和 300(N300) kg·hm⁻² 纯氮,氮肥种类为尿素,磷肥和钾肥的施肥量按照当地施肥水平使用,磷肥为重过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。小区面积 5 m×8 m,重复 3 次,随机区组排列。

春玉米在 2008 年 5 月 13 日播种,品种为郑单 958,种植密度为 70 cm×30 cm,约 4.8 万株。播种前每个小区撒入 50 kg 一特有机肥(N+P₂O₅+K₂O)≥4%,然

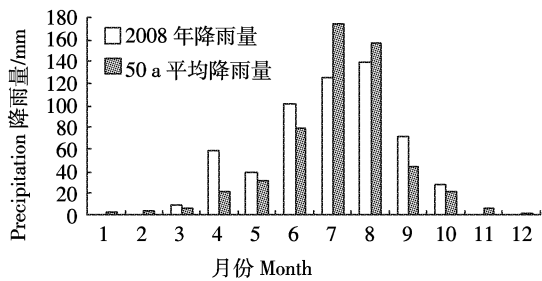


图 1 2008 年降雨分布

Figure 1 Precipitation distribution during the year of 2008 at the study site

后于 6 月 12 日采用开沟的方式将氮肥一次性施入,之后灌水,灌水量为 65 mm,其他时间没有任何灌水,9 月 16 日收获。

1.3 样品采集及分析

田间试验小区分为取样区和收获区,土壤和植株样品均在取样区中采集,收获区专用于收获计产。在作物播种前和收获后,采用三点取样法,用土钻取 0~180 cm 深度土样,层次为 0~30 cm、30~60 cm、60~90 cm、90~120 cm、120~150 cm、150~180 cm。样品带回实验室经四分后,一部分用烘干法测定土壤含水量;一部分经浸提、振荡、过滤后将滤液保存于 4℃ 冰箱,采用三道通流动分析仪对 NO₃-N 和 NH₄-N 进行测定^[12];植物取样后烘干至恒重,测定植株生物量并用半微量开氏法测定植株全氮含量^[13]。

1.4 数据处理

本试验没有考虑降水输入的氮素,作物生长期间土壤矿化氮根据不施氮处理作物吸氮量与试验前后土壤矿质氮累积量(N_{min})的净变化估计,不考虑氮肥激发效应,假定施氮处理土壤氮矿化量与不施氮处理相同。有关氮肥利用率和氮平衡的计算方法^[14-15]如下:

生育期土壤氮素净矿化量=不施氮处理作物吸氮量+不施氮处理土壤残留 N_{min}-不施氮处理土壤起始 N_{min} (1)

生育期土壤氮素表观损失=生育期施氮量+土壤起始 N_{min}+土壤氮素净矿化量-作物携出量-收获后土壤残留 N_{min} (2)

表 1 试验地土壤基本性状

Table 1 Basic properties of tested soil

土层深度/cm	全氮/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	有机质/%	土壤容重/ g·cm ⁻³	pH
0~30	0.91	36.84	115.34	63	1.713	1.37	7.8
30~60	0.65	30.58	90	40	0.94	1.31	7.7

氮肥利用效率(NUR)=(施氮处理吸氮量-不施氮处理吸氮量)/施氮量 $\times 100\%$ (3)

氮肥生理利用率(NPE)=(施氮处理产量-不施氮处理产量)/吸氮量 (4)

氮肥农学利用率(NAE)=(施氮处理产量-不施氮处理产量)/施氮量 (5)

土壤剖面中各土层矿质氮或硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)累积量(N_{mm} , $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$)按下式计算:

$$N_{\text{mm}}=d\times p_b\times C \quad (6)$$

式中: d 为土层厚度,30 cm; p_b 为土壤容重; C 为土壤中硝态氮含量, $\text{mg N}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。剖面矿质氮或硝态氮累积量为各个层次的矿质氮硝态氮累积量之和。

数据采用 DPS、EXCEL 软件分析。

2 结果与分析

2.1 春玉米收获后土壤硝态氮的累积状况

春玉米收获后,土壤剖面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量分布在种植和施肥条件下,各个处理都较播前发生了明显的变化,土壤硝态氮在 180 cm 土层范围内的累积量随着施氮量的增大而增大(见图 2a)。不同处理的硝态氮在土壤层次中的分布特征大体相同,即表层 30 cm 和土壤深层(150 cm 以下)的硝态氮含量比较高。与播前相比,春玉米收获以后,不施肥处理各层次的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量有所降低,总量下降明显;N100 处理在 0~90 cm 土层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量增加,而在不同的土层层次中, $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量变化的幅度不大,而 N200 和 N300 处理的整个土壤剖面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在土壤的不同层次的累积都明显高于播前,并且在 90 cm 内的富集现象明显。

氮肥用量与收获后土壤剖面硝态氮累积量呈正相关关系,可以用线性模型来描述(图 2b)。模型决定系数 R^2 值达到 0.94,为极显著水平。不施氮处理与播前累积分布相比,各个层次的硝态氮含量都有了一定的降低,说明在不施氮条件下,土壤矿化作用提供的硝态氮不能满足作物的生长需要,仍需要从土壤中吸收一定的硝态氮。N50 和 N100 处理的土壤硝态氮含量都比不施氮处理有了一定的增大,但是没有造成硝态氮的富集现象,而 N200 和 N300 处理的整个土壤剖面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在土壤的不同层次的累积都明显高于播前,并且在 0~90 cm 土层内的富集现象明显,说明在春玉米生育期内,100 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施氮量和土壤内部的矿化量基本上满足了作物生长对氮素的需要,且不会对环境造成威胁;N200 和 N300 处理土壤中的硝态

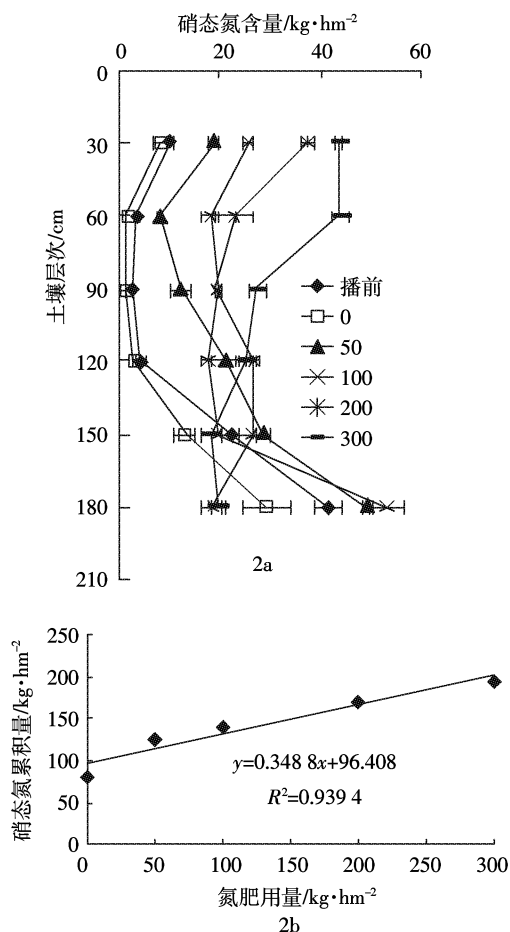


图 2 不同处理土壤剖面硝态氮的分布与累积情况
Figure 2 Distribution and accumulation of $\text{NO}_3\text{-N}$ in soil profile at different N treatments

氮盈余现象严重,向下层淋洗的趋势明显,属于施肥过量,对环境具有一定的威胁。

2.2 不同施氮水平下的氮素平衡

通过对整个春玉米生长季的氮平衡进行分析,可以看出,在氮的输入项中,施肥区域土壤肥力均一,播前的土壤硝态氮累积量和土壤在整个生育期的矿化量相同,氮的总输入量随施氮量的增加而增加。在氮素的输出项中,作物携出量随输入量的增加而增加,肥料处理的效果明显。

土壤残留 N_{mm} 随氮素总输入量的增加而显著增加,只有在不施氮的条件下土壤硝态氮残留低于播种之前的 110 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,并且在最高施肥处理 N300 时达到最高值,为 195 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而不同处理的表观损失也随着施肥量的增加而增加,氮素表观损失的数量很低。但当施氮量增至 200 或 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,表观损失增加量比土壤残留增加更加迅速,即相应地表观损失

在氮盈余中的比例则随施氮量的增加而显著提高。从整个肥料水平的氮盈余来看,土壤残留 N_{min} 是氮盈余的主要部分,另外从表中可以看出播前的氮素残留与春玉米整个生育期矿化量之和已经超过作物携出量,这表明,土壤本身的供氮量很高,少量或者不进行氮素投入可以既满足作物对氮素的需求,又可以减少土壤中硝态氮的累积量,从而减少对环境的影响。

2.3 不同施氮水平对作物产量及氮素利用的影响

从表 3 可以看出,在不同氮肥水平处理中,作物吸氮量随着施氮量的增加而增多,从 N_0 的 $172.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 到 N_{300} 的 $221.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而作物的产量也随着施氮量的增加而增加,并在 N_{200} 处最高,达到 $9\,006.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而继续增加氮素的投入量时,作物的产量却略有下降到 $8\,997.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,为最高产量的 99.89%;而在施肥量为 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时产量已经达到 $8\,633.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,是最高产量的 95.86%。氮素的利用效率在 19.7%到 25.8%之间,在 N_{100} 时达到最高,而氮肥农学利用率则随施氮量的增加而减小,从 $11.2\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $5.8\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。氮肥生理利用率则随施氮量的增加而增加,从 2.9 增加到 $6.5\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

作物吸氮量(y)与氮施入量(x)的回归方程为 $y=0.168\,9x+175.69(R^2=0.943\,1)$,即施氮量每增加 1 kg 作物吸氮量仅增加 $0.168\,9\text{ kg}$ 。春玉米对氮肥的利用程度不高,氮肥利用效率的普遍不高可能是因为春玉米的整个生育期都是在降雨比较丰富的季节,难以避免氮素淋洗下渗。

3 讨论

3.1 春玉米收获后的土壤硝态氮累积分布

氮肥的不合理施用造成土壤内硝态氮大量累积,这些硝态氮在强降雨和过量灌水条件下向下淋溶,从而污染地下水。因此硝态氮在土壤剖面中的含量及其空间分布特征是表征硝态氮淋失风险的重要指标。

从本试验春玉米收获后的硝态氮累积分布情况可以看出,土壤硝态氮主要累积在 30 cm 和 150 cm 以下,表层高主要是由于当季作物施肥的结果,而 150 cm 以下可能就是很多季作物施肥后,硝态氮下移的结果。如果一直这样保持下去,长期的淋洗损失肯定会对地下水产生影响。而从土壤总的累积量来看,它符合一般性规律^[16-19]:施氮量越大,土壤硝态氮在 180 cm 土层范围内的累积量也越大。但是也有研

表 2 春玉米整个生育期氮素平衡 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
Table 2 N balance during the growth season of spring maize ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	N_0	N_{50}	N_{100}	N_{200}	N_{300}
A)氮输入 Nitrogen input					
施氮量 Nitrogen fertilizer rate	0	50	100	200	300
播前 N_{min} , N_{min} before sowing	110	110	110	110	110
矿化 Net mineralizatio	143	143	143	143	143
总输入 Total input	253	303	353	453	553
B)氮输出 Nitrogen output					
作物携出 Crop uptake	172c	182bc	198b	215ab	221a
土壤残留 N_{min} , residual N_{min}	81d	124c	140c	169b	195a
表观损失 Apparent losse	0	-4	16	69	137
氮盈余 Nitrogen surplu	81	121	155	238	323

注:同一列内同一品种不同字母表示差异达 5%显著水平($n=3$),下同。

表 3 不同施氮水平下春玉米的产量和氮效率
Table 3 N efficiency and the yield of spring maize at different N application rates

处理 Treatment	吸氮量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	氮肥利用效率 NUR/%	氮肥农学利用率 NAE/ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$	氮肥生理利用率 NPE/ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
N_0	172.0c	7 557.1c	—	—	—
N_{50}	182.2bc	8 116.1b	20.5	11.2	2.9
N_{100}	197.8b	8 633.7a	25.8	10.8	5.2
N_{200}	214.9ab	9 006.4a	21.9	7.2	6.4
N_{300}	221.3a	8 997.1a	19.7	5.8	6.5

究提出了不一样的观点^[20-22],他们认为施氮量与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 残留量的关系是一种呈现先平滑后突然上升的过程。从这点规律来看,我们在实际生产中应该确保施肥量保持在这个平滑的阶段,使土壤中残留的硝态氮累积量在土壤的承受范围之内,这样就不会大量造成对环境的影响。

3.2 春玉米产量与肥料利用效率

氮肥的使用有利于产量的提高,而近年来的研究结果表明,施用氮肥的增产效果明显降低。巨晓棠等^[14]认为,从长远看即使在肥力较高的土壤上氮肥的施用对于冬小麦和夏玉米的高产稳产也是必不可少的,但过量施用氮肥也没有任何意义。从本试验的产量结果可以看出,在供试土壤肥力水平条件下,春玉米季施氮 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时作物的产量已经达到较高水平,而当施氮量继续增加时,作物的产量虽仍维持较高水平,但是没有进一步的提高。而氮肥利用效率在 $19.7\%\sim 25.8\%$ 之间,普遍的低于朱兆良等报道的全国平均氮素利用率($30\%\sim 51\%$)^[7],化肥的利用程度不高在一定程度上造成了较大的浪费。

参考不同施肥水平对春玉米产量、利用效率及氮盈余对环境的影响,我们认为在肥力比较高的土壤中,当施氮水平为 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时就可以兼顾经济和环境效益。

4 结论

(1)作物的产量在低于施肥量为 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时随着施氮量的增加而增加,并在 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处时最高,达到 $9\,006.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;作物吸氮量随着施氮量的增加而增多,作物吸氮量(y)与施入总氮量(x)的回归方程为 $y=0.168\,9x+185.69(R^2=0.943\,4)$;不同氮肥水平的氮肥利用率在 $19.7\%\sim 25.8\%$ 之间,在 $\text{N}100$ 时的利用效率最高,为 25.8% 。

(2)土壤氮盈余主要以土壤残留 N_{min} 为主,且土壤残留 N_{min} 随氮素总输入量的增加而显著增加,且在 $\text{N}300$ 时达到最高值,为 $195\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而表观损失在氮盈余中的比例虽小,但趋势也是随施氮量的增加而显著提高,并且速度更快。

(3)氮肥用量与收获后土壤剖面硝态氮累积量呈正相关关系,施氮量越大,土壤硝态氮在 180 cm 土层范围内的累积量也越大。施氮水平为 $\text{N}100$ 时就基本上满足了作物生长的需要,而在高施氮水平($\text{N}200$ 、 $\text{N}300$)时土壤中的硝态氮出现富集现象,具有向下淋洗的趋势。

参考文献:

- [1] Tilman D J. Forecasting agriculturally driven global environmental change [J]. *Science*, 2001, 292 (13): 281-284.
- [2] 许秀成. 我所了解的世界化肥现状[J]. 磷复肥与硫酸信息, 2002(2): 1-5.
XU Xiu-cheng. Views on the status quo of the world fertilizer [J]. *Information of Compound Fertilizer and Sulfuric acid*, 2002(2): 1-5.
- [3] 李家康, 林葆, 梁国庆, 等. 对我国化肥使用前景的剖析[J]. 磷肥与复肥, 2001, 16(2): 1-5.
LI Jia -kang, LIN Bao, LIANG Guo -qing, et al. Aanalysis of the prospects for fertilizer use in our country[J]. *Phosphate Fertilizer and Compound Fertilizer*, 2001, 16(2): 1-5.
- [4] 宗震东. 2001 年我国化肥生产和市场运行情况[J]. 磷复肥与硫酸信息, 2002(5): 1-3.
ZONG Zhen-dong. Fertilizer production and market operation in China in 2001[J]. *Information of Compound Fertilizer and Sulfuric Acid*, 2002 (5): 1-3.
- [5] 赵久然, 郭强, 郭景伦, 等. 北京郊区粮田化肥投入和产量现状的调查分析[J]. 北京农业科学, 1997, 15(2): 36-38.
ZHAO Jiu -ran, GUO Qiang, GUO Jing -lun, et al. Investigation and analysis of yield status with chemical fertilizer input in crop land in Beijing[J]. *Beijing Agriculture Sciences*, 1997, 15(2): 36-38.
- [6] 李新慧. 京郊粮田土壤氮素损失机制与提高氮肥利用率[J]. 北京土壤学会简讯, 1999(2): 5.
LI Xin-hui. Mechanism of nitrogen losses and ways to increase nitrogen fertilizer recovery rate in crop land in Beijing[J]. *New Sletter of Beijing Soil Association*, 1999(2): 5.
- [7] 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: 213-249.
ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Soil nitrogen in China[M]. Nanjing: Jiang-su Science and Technology Press, 1992: 213-249.
- [8] 陈新平, 张福锁, 谢建昌, 等. 北京郊区蔬菜氮肥研究问题与对策[C]// 园艺蔬菜的土壤肥力与氮肥合理施用. 河海大学出版社, 1997: 122-129.
CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo, XIE Jian-chang, et al. Pilot research on questions of nitrogen fertilization in vegetable and the countermeasure in Beijing suburb[C]// Soil fertility and optimum fertilization in vegetable garden. Beijing: Hehai University Press, 1997: 122-129.
- [9] 陈子明, 袁锋明, 姚造华, 等. 北京潮土 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在土体中的移动特点及其淋失动态[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 71-79.
CHEN Zi-ming, YUAN Feng-ming, YAO Zao-hua, et al. The movement and leaching loss of $\text{NO}_3\text{-N}$ in profile of Chao soil in Beijing [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 1995, 1(2): 71-79.
- [10] 孙昭荣, 刘秀奇, 杨守春. 北京降雨和土壤下渗水中的氮素研究[J]. 土壤肥料, 1993, 2: 55-61.
SUN Zhao-rong, LIU Xiu-qi, YANG Shou-chun. The influences of different nitrogen fertilizer rate on downward water in soil[J]. *Soil Fertilize*, 1993, 2: 55-61.
- [11] Roth G W, R H Fox. Soil nitrate accumulations following nitrogen fertilized maize in Pennsylvania[J]. *Environ Qual*, 1990, 19: 243-248.

- [12] Paramasivam S, Akalva. Fate of nitrate and bromide in an unsaturated zone of a sandy soil under citrus production [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31: 671–681.
- [13] 鲍士旦. 土壤和农业化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [14] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361–1368.
JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZHANG Fu-suo. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1361–1368.
- [15] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2002, 33(7): 1122–1128.
LIU Xue-jun, ZHAO Zi-juan, JU Xiao-tang, et al. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 33(7): 1122–1128.
- [16] 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): 270–276.
ZHANG Shu-lan, TONG Yan-an, LIANG Dong-li, 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): 270–276.
- [17] 杨学云, 张树兰, 袁新民, 等. 长期施肥对壤土硝态氮分布、累积和移动的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 134–138.
YANG Xue-yun, ZHANG Shu-lan, YUAN Xin-min, et al. A long-term experiment on effect of organic manure and chemical fertilizer on distribution, accumulation and movement of $\text{NO}_3\text{-N}$ in soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(2): 134–138.
- [18] 李世清, 王瑞军, 李紫燕, 等. 半干旱半湿润农田生态系统不可忽视的土壤氮库—土壤剖面中累积的硝态氮[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 1–13.
LI Shi-qing, WANG Rui-jun, LI Zi-yan, et al. Soil nitrogen pool not to be ignored residual $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulated in soil profile in semiarid and semi humid agroecological system[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(4): 1–13.
- [19] 杜春先, 聂俊华, 王介勇. 不同施肥和灌溉水平条件下土壤硝态氮的垂直分布[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 278–281.
DU Chun-xian, NIE Jun-hua, WANG Jie-yong. The vertical distribution of nitrate nitrogen in the soil under different fertilizer and irrigation conditions[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(2): 278–281.
- [20] Liang B C, Mackenzie A F. Changes of soil nitrate-nitrogen and denitrification as affected by nitrogen fertilizer on two Quebec soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23: 521–525.
- [21] Porter L K, Follett R F, Halvorson A P. Fertilizer nitrogen recovery in a till wheat sorghum fallow wheat sequence [J]. *Agronomy Journal*, 1996, 88: 750–757.
- [22] Ran W R, James C V. Soil-plant buffering inorganic nitrogen in continuous wheat[J]. *Agronomy Journal*, 1995, 87: 8422–8427.