

华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空 氮的时空动态与残留

吴永成^{1,2}, 周顺利¹, 王志敏¹, 罗延庆¹

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100094; 2. 四川农业大学农学院, 雅安 625014)

摘要: 为了进一步明确华北地区冬小麦-夏玉米种植体系周年氮肥利用效率及其影响因素与机制, 在试验区夏玉米生育期年均降雨量 400mm 左右, 轻壤质底粘潮土中等土壤肥力条件下, 通过设计不同施氮量(0、90、180、270kgN/hm²)处理, 重点研究了夏玉米大田土壤硝态氮动态与残留积累情况。试验结果表明, 夏玉米根系生物量最大值出现在吐丝期, 最大根系分布深度约为 1.2m。根干重密度(g/m³)随土壤深度增加而明显降低。根群主要分布在表土层, 0~80cm 土体根重比例达 95% 以上, 1m 以下根重比例不足 1%。土壤硝态氮测定表明, 从播种前到收获期, 各施氮量处理(0、90、180、270kgN/hm²)2m 土体土壤硝态氮平均含量均表现出“N”型曲线变化趋势。在玉米收获期, 施氮处理(90~270kgN/hm²)2m 土体均有明显的硝态氮残留积累, 并且残留积累量随着施氮量增加而增大, 施氮处理下层土壤(120~200cm)硝态氮残留积累量比不施氮处理高出 50.4~95.4 kg NO₃-N/hm²。这说明, 在玉米生育期降水影响下氮肥发生了淋溶, 有部分氮肥已经向下移出玉米根区以外, 积累在下层土壤中。这些残留积累在下层土壤中的硝态氮对于玉米来说很难被吸收利用, 不仅降低了氮肥的利用率, 也成为污染地下水的潜在隐患。分析表明, 各施氮处理籽粒产量和植株吸氮量都显著大于不施氮处理, 但施氮处理之间比较, 籽粒产量和植株吸氮量并无显著差异。90kgN/hm²、180kgN/hm² 和 270kgN/hm² 施氮处理下, 氮肥表观利用率分别为 11.52%、13.37%、9.93%。根据本研究结果, 从小麦-玉米种植体系考虑, 玉米根区以下残留积累氮素的回收利用是提高周年氮肥利用率的一个重要方面, 值得进一步研究。

关键词: 玉米; 土壤硝态氮; 氮肥利用率

文章编号: 1000-0933(2005)07-1620-06 **中图分类号:** S154 **文献标识码:** A

Dynamics and residue of soil nitrate in summer maize field of North China

WU Yong-Cheng^{1,2}, ZHOU Shun-Li¹, WANG Zhi-Min¹, LUO Yan-Qing¹ (1. Agronomy and Biotechnology College of China Agricultural University Beijing 100094; 2. Agronomy College of Sichuan Agricultural University Ya'an 625014). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1620~1625.

Abstract: A field experiment was conducted at Wuqiao Experiment Station of China Agricultural University in 2003~2004. There is about 400mm of average annual rainfall in summer maize season at Wuqiao Experiment Station. The soil texture is in a salted light loam soil but which turns clammy at deeper layer (about 130~170cm). The site was divided into plots at 5×20 m² size, separated by 2m buffers which were also sown to maize. The experiment was carried out with 4 doses of nitrogen fertilizer (0, 90, 180, 270kgN/hm²) and three replications. Nitrogen fertilizer was divided as 2 split applications (40% at sowing + 60% at 9-leaf expanded, by side dressing). 103.5kg P₂O₅/hm², 162.7kg K₂O/hm² and 30kg ZnSO₄/hm² were applied at sowing. Roots samples were obtained from plots with nitrogen fertilizer 180kgN/hm² at 3 growth stages [9-leaf expanded, 12-leaf expanded and harvest] in 20cm increments to a depth of 140cm. Roots were washed and oven-dried for the determination of fresh weight and dry weight. Soil samples were obtained from all plots at 4 growth stages [sowing, 9-leaf expanded before

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(303002212); 国家 863 计划资助项目(2002AA6Z3023)

收稿日期: 2004-11-26; **修订日期:** 2005-05-26

作者简介: 吴永成(1973~), 男, 四川大邑县人, 博士生, 讲师, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: ycwu2002@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhimin206@263.net

Foundation item: the National Natural Science Foundation of China (No. 30300212) and by National 863 Program (No. 2002AA6Z3023)

Received date: 2004-11-26; **Accepted date:** 2005-05-26

Biography: WU Yong-Cheng, Ph.D. candidate, mainly engaged in crop physiology and ecology. E-mail: ycwu2002@163.com

fertilization, 12-leaf expanded and harvest] in 20cm increments to a depth of 200cm. . Mixing samples of multi-boring per plot were taken with a soil auger and the sample was frozen immediately. The determination steps of soil NO_3^- -N as follows: defrosted $\rightarrow$ mixed the sample fully and then sifted it with a 2mm-sieve $\rightarrow$ 20g of each sample were extracted with 0.1L of 1.0 mol/L NaCl on a horizontal shaker for 0.5 hour $\rightarrow$ filtered $\rightarrow$ NO_3^- -N were determined by $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}(\text{HSO}_3)_2$ colorimetry. At the same time soil water content was determined, too. Plant samples were taken four times (at 9-leaf expanded, 12-leaf expanded, silking and harvest stage). Total plant N was analyzed by the Kjeldahl digestion method. The main results were as follows. At silking stage, root biomass reached maximum value, and root depth was about 1.2m. With increasing soil depth, dry root density(g/m^3) significantly decreased. Most roots distributed in surface soil, with more than 95% of total root dry weight in 0~80cm soil layer. The trend of average soil nitrate-N concentration in 2m soil profile showed “N” shape for all nitrogen treatments during summer maize growth. Residual soil Nitrate-N in 2m soil profile increased with more nitrogen applied, and the treatments of nitrogen applied (N90,N180,N270) increased the residual soil nitrate-N content in the 120~200cm soil profile by 50.4~95.4kg NO_3^- -N/ hm^2 compared to non-nitrogen applied treatment (N0) at harvest stage. The grain yield and absorbed nitrogen of N0 treatment were much lower than nitrogen applied treatments(N90,N180,N270). There was no difference in grain yield and absorbed nitrogen amount among N90,N180 and N270 treatments. The apparent nitrogen fertilizer recovery efficiency was 11.52%,13.37%,9.93% respectively under three nitrogen treatments(N90,N180,N270). It was suggested that in summer maize season some nitrogen was leached to soil layers below the maize root zone, and could not be absorbed, which not only reduced nitrogen fertilizer use efficiency, but also might induce ground water pollution. It is necessary to further study the recovery and utilization of residual soil nitrates below maize root zone in wheat-maize production system.

Key words: maize; soil NO_3^- -N; nitrogen fertilizer use efficiency

在华北平原一年两熟地区,冬小麦-夏玉米轮作是主要的种植方式。该区年降水主要分布于夏季,夏玉米生育期内多年平均降水量在 400mm 以上,且降水集中,往往出现多次强降雨,造成水分径流和向深层渗漏,这必然影响到土壤养分的动态。目前夏玉米生产中,普遍存在氮肥施用量偏多现象,常规施氮量一般在 240kgN/ hm^2 以上,而氮肥利用率较低,氮肥损失严重^[1]。关于氮肥损失的途径,从国内外的研究看^[1~6],除了氨挥发和反硝化作用等途径外,硝态氮的淋溶可能是一条重要途径。硝态氮的淋溶损失不仅降低了氮肥的利用率,而且有可能成为污染地下水的潜在隐患。因此,进一步研究和明确玉米生育期土壤硝态氮在不可控降水因素和施用氮肥等影响下的时空动态变化规律及其残留积累,探索氮素损失机制和再利用途径,对于提高氮肥效率 and 保护环境均具有重要意义。为此,在大田条件下设计了夏玉米不同施氮量处理,对玉米生育期根系生长分布特点、土壤硝态氮的时空变化特征进行了考察,重点研究了根区以下深层土壤硝态氮残留动态。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况和试验处理

试验于 2003~2004 年在河北省吴桥县中国农业大学实验站进行。试验区属海河平原黑龙港流域中部,暖温带季风气候,海拔 14~22m,年降水量历年平均 562mm,主要分布在 6~8 月份。试验地土壤为冲积型盐化潮土,壤质底粘,地下水位 7~9m,2m 土体有效贮水 420 m^3 。耕作层土壤 pH 值 8.12,有机质含量 11.2g/kg,全氮 0.8g/kg,速效磷 18.2mg/kg,速效钾 76.8mg/kg,土壤肥力属于中等。2003 年玉米生育期内实际降水 381.3mm(图 1),接近试验区玉米生育期多年平均降水量,属平水年份。

夏玉米大田试验设 4 个氮肥处理: N0(0kgN/ hm^2)、N90(90kgN/ hm^2)、N180(180kgN/ hm^2)和 N270(270kgN/ hm^2)。氮肥作底肥和追肥分两次施入(侧施,分别各占总施肥量的 40%和 60%),追肥时间为 7 月 27 日。每处理均底施三料钙镁磷肥 225 kg/ hm^2 ,硫酸钾 225kg/ hm^2 和硫酸锌 30kg/ hm^2 。试验处理小区面积为 5m $\times$ 20m,3 次重复,处理区间间隔 2m。玉米供试品种为农大 108,6 月 13 日铁茬播种,70cm 等行距,株距 25cm,播后浇出苗水(60mm),10 月 2 日收获。

1.2 取样与测定方法

(1)植株测定 分别在玉米九叶展(26/7)、十二叶展(4/8)、

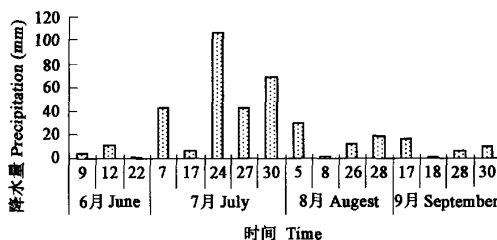


图 1 夏玉米生育期间降水量

Fig. 1 Precipitation during summer maize growth season

吐丝期(15/8)和收获期(2/10)进行,每小区取 5 株,3 次重复,按叶片、叶鞘、茎秆、穗轴、苞叶、籽粒分开后在烘箱中 60~80℃ 下烘干,粉碎样品用于测定全氮。全氮含量采用半微量凯氏定氮仪和自动酸滴定仪测定。成熟收获期按小区进行实际测产。

(2)根系测定 在 N180 处理区,分别于玉米九叶展、吐丝期和收获期时测定根系分布,取根土体积(50cm 长×50cm 宽×140cm 深,内含 2 株玉米),分层取土,20cm 为一层。土样放置于网袋内用水冲洗,挑出根系后先称量鲜根重,然后在烘箱中 60~80℃ 下烘干。

(3)土壤硝态氮测定 在各处理区于玉米播种前(10/6)、九叶展、十二叶展、吐丝期和收获期取土测定,用土钻分层取土,20cm 为一层,直到 200cm 深。每小区取 9 个点,每 3 个点混合作为一个土样,3 次重复。土壤样品带回实验室混匀后,取鲜土用 1mol/L 氯化钠溶液迅速浸提。浸提液硝态氮的测定采用酚二磺酸显色——分光光度计比色法^[7]。按段宗颜等^[8]方法计算土壤剖面硝态氮残留累积量,计算公式为 $A = D \times \gamma \times C \times 0.1$ 。式中 A 为硝态氮残留累积量(kg/hm²);D 为土层深度(cm); γ 为土壤容重(g/cm³);C 为土壤硝酸盐浓度(mg/kg);0.1 为换算系数。

(4)土壤容重测定 采取环刀分层取土方法(每 20cm 为 1 层,直到 200cm 深),测定 5 点计算平均值,从表层到 200cm 共 10 个层次的土壤容重(g/cm³)依次为 1.34、1.40、1.49、1.46、1.48、1.45、1.48、1.42、1.48、1.50。

2 结果与分析

2.1 夏玉米大田根系生长及其空间分布特点

大田不同生育时期玉米根系取样测定结果表明,根系生物量最大值出现在吐丝期,最大根系分布深度约为 1.2m。根干重密度(g/m³)随土壤深度增加而明显趋减(表 1)。根群主要分布在表土层,0~20cm 土层根干重比例约为 70%左右,0~80cm 土层根干重比例达 95%以上,1m 以下根重比例不足 1%(图 2)。

表 1 玉米不同生育时期的根干重密度(g/m³)

Table 1 Maize root dry weight density at different growth stage			
土层(cm) Soil layer	九叶展 No. 9 leaf expanded	吐丝期 Silking stage	收获期 Harvest stage
0~20	114.9	264.5	258.1
20~40	23.5	45.8	25.1
40~60	18.8	20.2	24.2
60~80	7.2	17.8	19.1
80~100	0.75	16.3	13.7
100~120	0	2.7	2.5

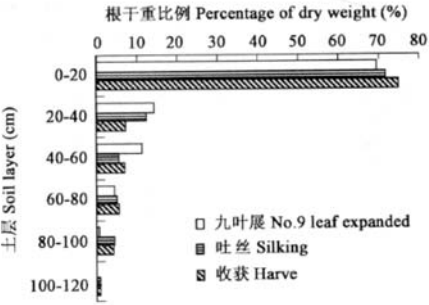


图 2 不同土壤层次根干重所占百分比

Fig. 2 percentage of root dry weight in different soil layer

2.2 不同施氮量条件下土壤硝态氮的时空变化特点和残留累积

(1)玉米生育期内土壤水分动态 夏玉米生育期内不同施氮量处理土壤水分含量(%)变化基本相似。播种后在灌水和降雨因素影响下(特别是 9 叶展前的一次强降雨 105.7mm),9 叶展和 12 叶展期 2m 土体各土层土壤水分都明显增多,土壤水分含量(%)达到 21.67%~27.47%,可能会导致土壤氮素的淋溶作用并影响其空间分布。吐丝期时土壤水分含量(%)才出现比较明显的下降,到收获期上层土壤水分含量(%)略有降低,中下层变化不大,但仍然高于播种前(图 3)。

(2)不施氮(N0)处理的土壤硝态氮动态变化 不施氮(N0)处理的土壤硝态氮动态反映了土壤供氮和作物吸氮之间的平衡关系。由图 4 可见,夏玉米播种前,2m 土体硝态氮分布表现出上层(0~60cm)较高,中层(60~120cm)低,下层(120~200cm)又升高的特点,说明播种前上层土壤储有一定的有效氮,下层也有部分残留氮的存在。到夏玉米九叶展期,0~20cm 表层和 140cm 以下深层硝态氮含量明显高于播种前,表明 9 叶展之前土壤供氮能力大于当时作物的吸氮能力。且由于九叶展前的一次强降雨,上层硝态氮有部分淋洗入渗到深层。到吐丝期,上层 0~80cm 土壤硝态氮迅速下降,下层硝态氮也有明显回落。下层土壤中的硝态氮的变化则可能是向中上层移动或是进一步下渗所致。到玉米生长后期,由于根系吸收能力的下降,0~80cm 土层土壤供氮能力大于吸氮能力,表现为土壤硝态氮在收获期小幅回升。

(3)施氮处理对土壤硝态氮时空变化的影响和硝态氮残留累积 从 2m 土体土壤硝态氮平均含量看,N0 处理和施氮处理(N90、N180 和 N270)均表现出共同的变化趋势,即从播种到 12 叶展期土壤硝态氮持续升高,从 12 叶展期到吐丝期迅速下降,吐丝期到收获期又趋增加,呈现出近似斜“N”变化规律(图 5a)。施氮处理(N90、N180 和 N270)显著增加了各时期测定的土壤硝态氮含量,施氮越多,增加幅度越大。特别是到玉米收获期,各施氮处理 2m 土体的土壤硝态氮含量不仅均显著高于 N0 处理,而且 N180 和 N270 两处理还明显高于播种之前(图 6),说明有部分肥料氮未被植株吸收而存留于土体中。施肥量越大,残留氮

也越多。

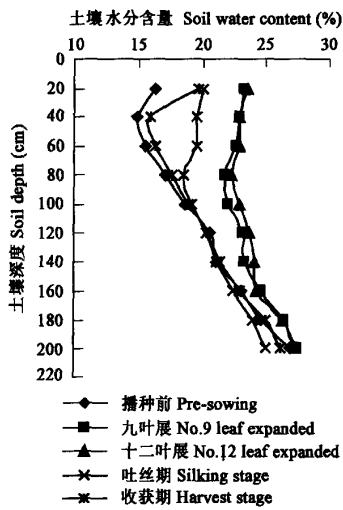


图 3 玉米生育期内土壤含水量(%)的动态变化

Fig. 3 dynamics of soil water content (%) of different layer in maize season

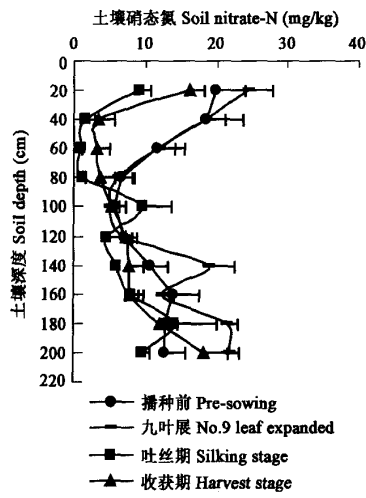


图 4 玉米 N0 处理的土壤硝态氮动态变化

Fig. 4 dynamic changes of soil nitrate nitrogen of N0 treatment in maize

根据上述玉米根系分布特点,将 2m 土体分为 0~120cm(根区层)和 120~200cm(根下层)。各层次土壤硝态氮平均含量的变化趋势与 2m 土体土壤硝态氮平均含量变化趋势基本相似,也均呈近似斜“N”变化特点(图 5b,c)。收获期两个层次土壤硝态氮平均含量,施氮处理(N90、N180 和 N270)均大于 N0 处理,且随着施氮量增加而增加。各施氮处理(N90、N180 和 N270)根区下层土壤硝态氮含量均高于播种之前。说明不论施氮量高低,玉米生育期内所施肥料氮均有部分淋溶损失到了根区以下,在根区和根区以下均有肥料氮(硝态氮形式)的残留。分析表明,施氮处理(N90、N180 和 N270)根区以下土体(120~200cm)土壤硝态氮累积残留量比 N0 处理高出 50.4~95.4kg NO₃-N/hm²。

2.3 不同施氮量条件下夏玉米产量和氮肥利用率

不同施氮量处理植株吸氮量、产量和氮肥效率见表 2。可见,在本实验条件下,与 N0 处理相比,施氮处理(N90、N180 和 N270)明显增加玉米植株吸氮量和籽粒产量。植株吸氮量在

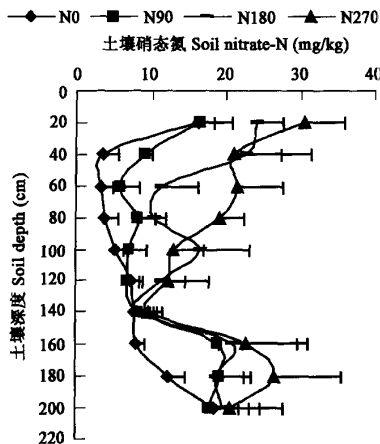


图 5 不同施氮量处理 2m 土体土壤硝态氮平均含量的时间变化

Fig. 5 temporal changes of average soil nitrate-N concentration in 2m soil body under different nitrogen fertilizer rates

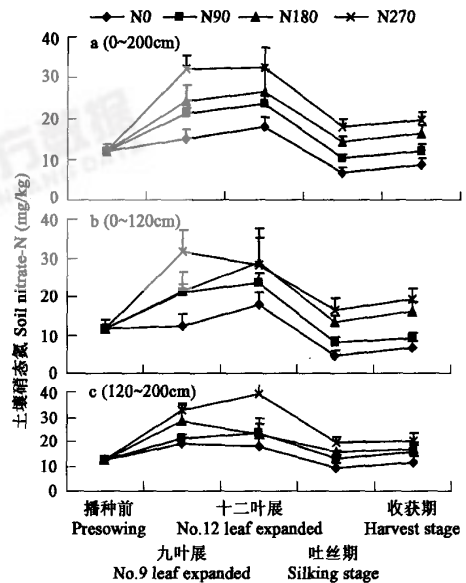


图 6 不同施氮量处理收获期土壤硝态氮的空间分布

Fig. 6 spatial distribution of soil nitrate-N under different nitrogen fertilizer rates at harvest stage

N180 和 N270 处理间无明显差异;籽粒产量在 N90、N180 和 N270 处理间差异也很小。氮肥当季利用率和氮肥农学效率则均随着施氮量增加而降低。

表 2 大田夏玉米籽粒产量、植株氮素积累和氮肥利用率(5%显著水平)

Table 2 Grain yield, nitrogen accumulation and nitrogen fertilizer recovery efficiency of field summer maize(5% significant level)				
处理 Treatments (kg N/hm ²)	吸氮量 Nitrogen accumulation(kg N/hm ²)	籽粒产量 Grain yield (kg/hm ²)	氮肥表观利用率* Apparent nitrogen fertilizer recovery efficiency(%)	农学效率** Agronomic efficiency(kg/kg N)
N270	179.60a	8469.0a	9.93	4.60
N180	176.84a	8463.0a	13.37	6.76
N90	163.14b	8227.5a	11.52	11.10
N0	152.78c	7224.0b		

* 氮肥表观利用率=[施氮区吸氮量-不施氮区吸氮量]/施氮量×100% Apparent recovery efficiency=[nutrient uptake by fertilized crop - nutrient uptake by unfertilized crop]/ quantity of fertilizer applied×100%; ** 农学效率(kg/kg N)=[施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量]/施氮量 Agronomic efficiency=[grain yield of fertilized crop in kg-grain yield of unfertilized crop in kg]/quantity of fertilizer applied in kg

3 讨论

华北地区农田生态系统中,土壤氮素损失的途径包括氮挥发、淋溶和反硝化^[1~3,9~12]。关于玉米生育期内土壤氮素(包括肥料氮)损失的主要途径,不同研究者的观点不一,有的认为主要是氮挥发^[13,14],有的认为主要是硝态氮淋失^[1,3]。应从作物氮素吸收、土壤供氮、氮肥施用量和雨水等因素来综合分析夏玉米土壤氮素动态、损失途径与机制。作物对土壤氮素的吸收层次以及不同生育阶段的吸收能力差异则与根系生长、分布有关。试验结果表明,在夏玉米生长前期,根系生物量相对较低,且根系主要集中在表土层,不仅植株吸收能力较弱,而且对土壤氮素的利用主要集中于表土层。吐丝前后根系生物量和根系分布深度达到最大(最大根深约 1.2m,与前人研究结果^[13]基本一致),但 0~80cm 土体中的根系可占到总根量的 95%以上,而 1m 土层以下的根系不足 1%,这表明了即使在夏玉米氮素吸收高峰阶段,土壤氮素的利用也主要集中在上层,玉米根区以下土壤氮素很难被玉米吸收利用。夏玉米根系分布特点决定了其对土壤氮素的利用以上层养分为主。在作物吸氮量中,一部分来自土壤氮素的供应,另一部分来自当季施用的氮肥。夏玉米生育期 0~120cm 和 0~200cm 土壤硝态氮动态呈“N”型变化特征,播后至 9 叶或 12 叶展之前的土壤硝态氮含量呈持续增加趋势(即使不施氮肥处理,9 叶展之前的土壤硝态氮含量也高于播种之前),说明 9 叶或 12 叶展之前土壤供氮能力大于此期植株吸氮能力。因此,在此期由于土壤有较高浓度的无机氮存在,施氮越多,土壤硝态氮累积或肥料氮残留越多。然而,在 12 叶展之前也正是雨水集中时期,在强降雨影响下土壤中积累的硝态氮将会随土壤多余水分下移而向下淋洗,许多学者曾报道,土壤硝态氮淋溶与降水量、施氮量存在密切关系^[3,5,15~17]。在本试验平水年份条件下,玉米收获期施氮处理(N90、N180 和 N270)根区层(0~120cm)和根区下层(120~200cm)均存在明显的硝态氮残留,残留量随施氮量增加而增加。显然,部分肥料氮已被淋洗到玉米根区以下。这部分淋洗到下层 的肥料氮很难被玉米再吸收利用。在河北省吴桥多年观察表明,夏玉米当季肥料氮的利用率通常只在 15%以下,本试验中,来自氮肥处理的肥料氮利用率为 9.93%~13.37%,大量肥料氮未被玉米吸收利用。据此,夏玉米根系分布浅、土壤供氮强和难以避免的氮素淋洗下渗是造成夏玉米氮肥利用率不高的重要原因,而淋溶到下层土壤的硝态氮能否被进一步利用是华北地区两熟农作体系氮肥利用率能否提高的关键问题。

因此,为了减少玉米季氮素损失并提高氮肥利用率,可以从两个方面进行考虑。一方面,从玉米当季考虑,应尽可能减少氮素的淋溶渗漏,如适当减少氮肥总用量,根据土壤供氮和作物吸氮动态关系,调整施肥结构。从本试验结果看,试验区条件下 9000kg/hm² 产量水平的施氮量可控制在 180kgN/hm² 以下。施肥结构应减少前期施肥量,增加后期施氮比例。建议在 12 叶展-吐丝期间追肥,以满足玉米吐丝前后吸氮高峰的氮素需求。另一方面,还从下茬小麦考虑,利用小麦来吸收利用夏玉米残留氮素。尽管残留于夏玉米根区以下的土壤硝态氮对玉米来说难以利用,但其农学有效性还决定于下茬小麦的利用能力。从周年小麦-玉米两熟种植体系看,提高小麦对深层土壤氮素的吸收能力是提高农田系统肥料氮利用率的重要途径,需要进一步研究。

References:

[1] Ju X T, Liu X J, Zou G Y, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system, *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, **35**(2):1493~1499.

[2] Wang C H, Liu X J, Ju X T, et al. In situ determination of ammonia volatilization from wheat-maize rotation system field in north china. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(3):359~365.

[3] Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. The spatio-temporal variations of soil NO₃⁻-N and apparent budget of soil nitrogen I. summer maize, *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(1): 48~53.

- [4] Huang M X, Zhang S, Zhang G L. Soil core lysimeter study of nitrate leaching from a winter wheat-summer maize rotation. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, **23**(1):11~16.
- [5] Li S Q and Li S X. Leaching loss of nitrate from semiarid area agroecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(2):240~242.
- [6] Roth G W and Fox R H. Soil nitrate accumulations following nitrogen-fertilized corn in Pennsylvania. *J. Environ Qual.*, 1990, **19**:243~248.
- [7] Bao S D, ed. *Analysis of soil agriculture chemistry*, Beijing: China Agriculture Press, 2000. 49~56.
- [8] Duan Z Y, Xiao Y B, Su F, *et al.* Optimizing N rate under high yield corn cultivation system. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2002, **4**(4):40~43.
- [9] Yuan X M, Yang X Y, Tong Y A, *et al.* Effect of N-fertilizer rate on soil nitrate nitrogen accumulation. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001, **19**(1):8~13, 39.
- [10] Liu G D, Wu W L. The dynamics of nitrate nitrogen leaching through soil in high-yield farmland ecosystem. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, **10**(4):71~74.
- [11] Yang L L, Hu C S. Effects of fertilization on nitrate leach in soil profile and accumulation in crops and yield response in north china. *Chin J Appl. Environ. Boil.*, 2003, **9**(5):501~505.
- [12] Zou G Y, Zhang F S, Ju X T, *et al.* Study on soil denitrification in winter wheat-summer maize rotation system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, **37**(10):1492~1496.
- [13] Kindu Mekonnen, Roland J Buresh and Bashir Jama. Root and inorganic nitrogen distributions in sesbania fallow, natural fallow and maize fields. *Plant and Soil*, 1997, **188**:319~327.
- [14] Francis D D, Schepers J S, and Vigil M F. Post-anthesis nitrogen loss from corn. *Agron. J.*, 1993, **85**:659~663.
- [15] Guenzi W D, Hutchinson G L, Beard W E. Nitric and nitrous oxide emission and soil nitrate distribution in a center pivot-irrigated cornfield. *Journal of Environmental Quality*, 1994, (23):483~487.
- [16] Bergstrom L, Brink N. Effects of differentiated applications of fertilizer N leaching losses and distribution of inorganic N in soil. *Plant and Soil*, 1986, **93**(3): 333~345.
- [17] Fan J, Hao M D. Nitrate accumulation in soil profile of dryland farmland. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, **22**(3):263~266.

参考文献:

- [1] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析. *中国农业科学*, 2002, **35**(2):1493~1499.
- [2] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 北方冬小麦/夏玉米轮作体系土壤氮挥发的原位测定. *生态学报*, 2002, **22**(3):359~365.
- [3] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究 I. 夏玉米. *生态学报*, 2002, **22**(1):48~53.
- [4] 黄满湘, 章申, 张国梁. 应用大型原状土柱渗漏计测定冬小麦-夏玉米轮作期硝态氮淋失. *环境科学学报*, 2003, **23**(1):11~16.
- [5] 李世清, 李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失. *应用生态学报*, 2000, **11**(2):240~242.
- [7] 鲍士旦(主编). *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000. 49~56.
- [8] 段宗颜, 肖焱波, 苏凡, 等. 玉米高产栽培的氮肥优化调控技术研究. *中国农业科技导报*, 2002, **4**(4):40~43.
- [9] 袁新民, 杨学云, 同延安, 等. 不同施氮量对土壤 NO_3^- -N 累积的影响. *干旱地区农业研究*, 2001, **19**(1):8~13, 39.
- [10] 刘光栋, 吴文良. 桓台县高产农田土壤硝态氮淋失动态研究. *中国生态农业学报*, 2002, **10**(4):71~74.
- [11] 杨莉琳, 胡春胜. 施肥对华北高产区土壤 NO_3^- -N 淋失与作物 NO_3^- -N 含量及产量的影响. *应用与环境生物学报*, 2003, **9**(5):501~505.
- [12] 邹国元, 张福锁, 巨晓棠, 等. 冬小麦/夏玉米轮作条件下氮素反硝化损失研究. *中国农业科学*, 2004, **37**(10):1492~1496.
- [17] 樊军, 郝明德. 旱地农田土壤剖面硝态氮累积的原因初探. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(3):263~266.