

施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响

王西娜,王朝辉*,李生秀

(西北农林科技大学资源环境学院 陕西杨凌 712100)

摘要 在黄土高原南部旱地有大量氮素残留背景的田块上,研究了不同氮肥用量对夏玉米生长及对土壤水分、硝态氮、铵态氮累积及其剖面分布的影响。结果表明,适量施氮可以提高作物产量,过量施氮没有表现出增产效果,其氮肥利用率只有 3.9%,残留率则高达 87.2%。施氮 240 kg hm⁻² 时,0~200cm 土层土壤水分达到 593mm,且可以下渗到 200cm 土层;不施氮和施氮 120kg hm⁻² 小区土壤的蓄水量分别为 561 和 553mm,可下渗到 180cm。对矿质态氮而言,施氮量可以显著影响土壤中硝态氮的累积和分布,但对铵态氮的影响较小。施氮 0,120,240 kg hm⁻² 时,收获期土壤硝态氮累积量分别为 78,148,290kg hm⁻²,硝态氮的下移前沿分别到达 60,60,140cm。可见,适量施氮会促进作物对土壤水氮的利用,提高作物生物量和产量,过量施氮导致硝态氮在土壤中大量累积,提高硝态氮随水分淋溶危险,但硝态氮向下层土壤的移动显著滞后于水分。

关键词 旱地土壤;氮肥;夏玉米;硝态氮;铵态氮

文章编号:1000-0933(2007)01-0197-08 中图分类号:Q142,Q958.1,S314 文献标识码:A

The effect of nitrogen fertilizer rate on summer maize yield and soil water-nitrogen dynamics

Wang Xina, Wang Zhaohui*, Li Shengxiu

College of Resources and Environmental Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (1) 0197~0204.

Abstract: A field experiment was carried out to study the effect of nitrogen (N) fertilizer rate (0, 120 kg N hm⁻², and 240 kg N hm⁻²) on summer maize (*Zea mays* L. var. Shaandan 911) and soil water-nitrogen dynamics. The dryland study was conducted in the southern part of the Loess Plateau during the warm and rainy summer of 2004 on a soil with high amounts of residual mineral N. The results showed that appropriate N application rates increased crop biomass and grain yield. Over application of N fertilizer did not increase crop biomass or yield. In the over-fertilized plots, N use efficiency was only 3.9% and N residual efficiency was as high as 87.2%. Water distribution in the soil profile was significantly influenced by the N rate. The 240 kg N hm⁻² treatment contained 593 mm of water at harvest and the water had moved to a depth of 200 cm. In comparison, the 0 kg N hm⁻² treatment contained 561 mm of water and the 120 kg N hm⁻² contained 553 mm of water. In both treatments, water had moved to a depth of 180 cm. Nitrogen rates significantly affected the accumulation and distribution of nitrate N in the soil profile, but had no significant effect on the amount or distribution of ammonium in the soil profile. At harvest, total nitrate N in the 0—200cm depth was 78 kg hm⁻² in the 0 kg N hm⁻²

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(40201028);国家自然科学基金面上资助项目(40671107,30370843);国家自然科学基金重点资助项目(30230230);国家农业部“948”重大研究资助项目(Q2003-Z53)

收稿日期:2005-12-02;修订日期:2006-05-14

作者简介:王西娜(1978~),女,陕西华阴人,博士,主要从事氮素营养与生态效应研究。E-mail:wangxinatjc@yahoo.com.cn

*通讯作者 Corresponding author. E-mail:w-zhaohui@263.net

Foundation item:The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40201028, 40671107, 30370843) and its key project of China (No. 30230230); "948" Research Program of Ministry of Agriculture, China (No. 2003-Z53)

Received date 2005-12-02; **Accepted date** 2006-05-14

Biography:Wang Xina, Ph. D., mainly engaged in nitrogen nutrition and its ecological effects. E-mail:wangxinatjc@yahoo.com.cn

treatment compared to 148 kg hm^{-2} in the 120 kg hm^{-2} and 290 kg hm^{-2} in the 240 kg hm^{-2} . Nitrate N had moved down to a depth of 60 cm in the 0 and 120 kg hm^{-2} treatments and 140 cm in the 240 kg hm^{-2} treatment due to percolation during the summer rainfall. The results suggest that appropriate N application rates could promote the utilization of soil water and mineral N by summer maize and increase its biomass and grain yield. In contrast, over application of N results in the accumulation of a large amount of nitrate N in the soil profile and increases the risk of nitrate N leaching to the subsoil. In addition, it was observed that nitrate N leaching is significantly slower than the downward movement of soil water.

Key Words : dryland soil ; nitrogen fertilizer ; summer maize ; nitrate N ; ammonium N

施用氮肥是补给土壤氮素和维持土地生产力的主要措施,是土壤矿质态氮的主要来源。长期不施化肥,土壤自然肥力将不断耗竭,土质恶化,最终导致土壤侵蚀和退化;如果立即停止施用化肥,全世界农作物将会减产 40% ~ 50%^[1]。但是长期过量的施用氮肥又会造成土壤氮素的大量盈余,降低氮肥的增产效率并给环境带来重大压力。硝态氮(NO_3^- -N)是旱地作物吸收的主要氮素形态。旱地土壤,不论施入酰胺态氮肥尿素,还是铵态氮肥碳酸氢铵,最终都将转化成硝态氮^[2]。大量研究发现,土壤中硝态氮的累积量随化学氮肥用量的增加而增加,过量施氮引起土壤中硝态氮的大量累积^[3-5]。¹⁵N 试验表明,肥料氮的土壤残留率可达 10% ~ 35%^[6]。铵态氮(NH_4^+ -N)在旱地土壤中的累积量很小,其浓度不随施氮量和生育时期而发生显著的变化,所以,铵态氮水平不能反映土壤的有效氮肥力高低^[7]。硝态氮由于带负电荷而成为氮素淋溶的主要形式,硝态氮向土壤深层和地下水中的淋溶不但导致了土壤肥力的下降,而且污染了地下饮用水,对人体健康带来严重威胁。同时,土壤残留硝态氮还是径流损失和反硝化损失的重要来源。可见,调控土壤中的硝态氮含量是降低氮素损失和提高氮肥利用率的关键,这就要深入了解硝态氮在土壤中的运移和变化规律。

在目前高氮投入的作物种植体系中,土壤往往会有大量的矿质态氮残留。黄土高原南部旱地年均降雨量 550 ~ 600 mm,其中 60% 以上集中在 7 ~ 9 月份。在这种高强度降水的夏季,分析残留矿质态氮和水分在土壤中的变化及运移规律意义重大。本研究分析了不同氮肥用量、种植夏玉米的情况下,土壤水分、硝态氮和铵态氮随生育期的动态变化及在土壤剖面的分布,旨在探索土壤矿质态氮在夏季随水分下淋和上移的规律,为制定合理的施氮措施,提高氮肥利用率,减少氮肥对环境的污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于陕西杨凌西北农林科技大学水利灌溉试验站。处于渭河三级阶地,年平均气温 13°C ,年均降雨量 550 ~ 600 mm,降雨主要集中在 7 ~ 9 月份,属半湿润易旱地区。夏玉米试验于 2004 年 6 月 9 日 ~ 2004 年 10 月 7 日进行。作物生长季节的降水总量为 282 mm,分布情况如图 1。另外,在夏玉米苗期(2003 年 6 月 28 日)因天气干旱,补充灌水 82 mm(图 1)。供试土壤耕层(0 ~ 20 cm)基本理化性状为:容重为 1.31 g cm^{-3} , pH 8.25,有机质含量 9.63 g kg^{-1} ,全氮 1.07 g kg^{-1} ,速效钾 182.4 mg kg^{-1} ,速效磷 12.2 mg kg^{-1} 。

1.2 试验设计与管理

试验设 0, 120, 240 kg hm^{-2} 3 个氮水平,3 次重复,每个小区面积为 $3 \text{ m} \times 6 \text{ m} = 18 \text{ m}^2$ 。夏玉米品种为陕单 911,在小麦收获后直接播种。播种时沿小区短边成行,行距 50 cm,株距 30 cm。每小区播 12 行,每行 10 株。采用点播方式,每穴播 4 粒种子。待植株长至 15 cm 左右时定苗,每穴 1 株。氮肥用尿素,于拔节期(2004 年 7 月 10 日)在玉米行间距植株 10 cm 处开沟施入。定期除草除虫。

1.3 样品采集与测定

土壤样品采集分 5 个时期进行,分别为播种前(2004 年 5 月 29 日)、拔节期(2004 年 7 月 24 日)、抽雄期(2004 年 8 月 22 日)、灌浆期(2004 年 9 月 17 日)和收获期(2004 年 10 月 9 日)。在每小区采集 2 点,播种前与收获期采至 300 cm,其余时期采到 200 cm。0 ~ 40 cm 按 10 cm 为 1 个土层,40 ~ 300 cm 按 20 cm 为 1 个土层,

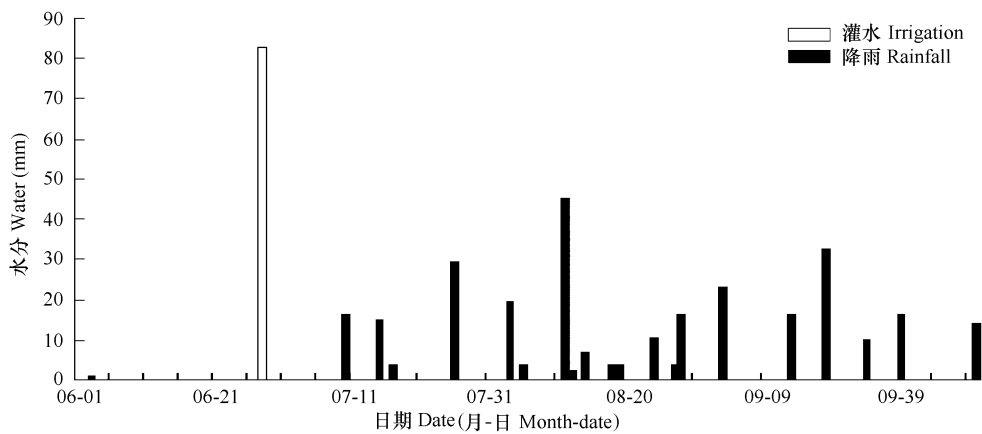


图 1 2004 年夏玉米生长季节的降雨量和灌水量

Fig. 1 The rainfall and irrigation during summer maize growing season in 2004

用土钻取土 , 分别装入编好号的塑料袋中。样品带回实验室后测定土壤水分 , 方法是称 10g 左右鲜土放入铝盒中 , 在 110℃ 的干燥箱中烘 24h , 称干重 , 用差减法计算水分含量。土壤中的 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 用 1mol L^{-1} 的 KCl 溶液浸提 , 称 5g 新鲜土放入振荡瓶中 , 加 50ml KCl 溶液 , 振荡 1h , 过滤 , 然后用连续流动分析仪测定滤液中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量。

玉米植株样品的采集在每次采集土壤样品的前一天进行。每个小区随机并均匀的选取 5 株玉米 , 齐地面割下地上部分 , 装入密封袋中 , 立即带回实验室 , 称总鲜重 , 然后分茎、叶、穗皮、穗轴、籽粒 (拔节期不分) 分别称量鲜重 , 再分别剪碎、取一部分装入信封在 105℃ 杀青 30min , 之后控温在 60 ~ 70℃ 烘至恒重 , 称量干重 , 计算水分含量。用粉碎机将各器官分别粉碎。称取 0.2500g 左右粉碎后样品 , 用 H_2SO_4 - H_2O_2 法消煮 , 用全自动凯氏定氮仪 (2300 Kjeltac Analyzer Unit) 测定消煮液中的全氮。

1.4 有关计算方法^[8]

吸氮量 (kg hm^{-2}) = 茎叶 (或籽粒) 含氮量 (%) $\times$ 茎叶 (或籽粒) 干物质产量 (kg hm^{-2})

收后土壤矿质氮 ($\text{Nmin } \text{kg hm}^{-2}$) = 收获后 0 - 200cm 土层硝态氮累积量 (kg hm^{-2}) + 铵态氮累积量 (kg hm^{-2})

氮肥利用率 (%) = (施氮区作物吸氮量 - 对照区作物吸氮量) / 施氮量 $\times 100$

氮素残留率 (%) = (收获后施氮区 0 ~ 200cm 土层残留 Nmin - 对照区 0 ~ 200cm 土层残留 Nmin) / 施氮量 $\times 100$

2 结果分析

2.1 氮肥用量对作物产量、氮素吸收与残留的影响

氮肥用量是影响作物产量和吸氮量的主要因素 , 而作物的生长状况反过来又决定氮肥在土壤中的残留。从表 1 发现 , 与不施氮肥相比 , 施氮 120 kg hm^{-2} 显著增加了作物的产量和吸氮量 , 其中茎叶生物量和籽粒产量分别增加了 708 kg hm^{-2} 和 778 kg hm^{-2} , 吸氮量分别增加了 12 kg hm^{-2} 和 15 kg hm^{-2} , 而施氮 240 kg hm^{-2} 时 , 茎叶生物量、籽粒产量及吸氮量均无显著变化。施氮 120 kg hm^{-2} 的氮肥利用率亦比 240 kg hm^{-2} 处理高 18.5%。就土壤残留矿质态氮而言 , 随施氮量的增加 , 土壤残留量迅速增加 , 施氮 120 kg hm^{-2} 的氮素残留率为 51.1% , 而施氮 240 kg hm^{-2} 时达到了 87.2%。说明适量施氮有利于作物生长 , 过量施氮无显著增产效果 , 反而使大量肥料氮残留于土壤中。

2.2 不同生育期土壤的蓄水量变化

0 ~ 200cm 土层的蓄水量随生育期后延而逐渐增加 (图 2)。不施氮处理的蓄水量从播种时的 404mm 一直增加到收获期的 561mm , 施氮 120 kg hm^{-2} 时 , 增加到 553mm , 施氮 240 kg hm^{-2} 时 , 增加到 593mm。从不同施氮水平来看 , 施氮 240 kg hm^{-2} 小区土壤的蓄水量始终高于不施氮小区和施氮 120 kg hm^{-2} 的小区 , 后两者之间

无明显差异。施氮量高时,土壤中积蓄了更多的水分。

表 1 不同氮水平的作物产量、氮素吸收量与残留量

Table 1 Crop biomass and N uptake and residual N in soil at different N rates							
施氮量 N rates (kg hm ⁻²)	生物量		吸氮量		收后土壤矿质氮 Soil mineral N at harvest (kg hm ⁻²)	氮肥利用率 N fertilizer use efficiency (%)	氮素残留率 N residue efficiency (%)
	Biomass (kg hm ⁻²)		N uptake (kg hm ⁻²)				
	茎叶	籽粒	茎叶	籽粒			
	Haulm	Grain	Haulm	Grain			
0	7781 b	6907 a	72 b	90 b	97 b		
120	8488 a	7695 a	83 a	105 a	158 b	22.4 a	51.1 b
240	7992 b	6795 a	80 ab	92 ab	306 a	3.9 b	87.2 a

数据后的相同字母表示氮水平间的方差分析结果差异不显著 ($P > 0.05$) Values followed by same letters show no significant difference ($P > 0.05$) between N rates according to Duncan 's Multiple Range Test

2.3 不同生育期土壤水分的剖面分布动态

随生长期后延,土壤中水分的入渗深度均在增加(图 3),但增加情况因施肥量而异。播种至拔节期,不施氮和施氮 120kg hm⁻²小区的土壤水分增加仅发生在 0 ~ 100cm 土层,而施氮 240kg hm⁻²的小区 0 ~ 200cm 土壤剖面的水分均增加。拔节到抽雄期,不施氮小区的土壤水分增加延伸到了 140cm 深的土层;施氮 120kg hm⁻²时,达到 180cm,施氮 240kg hm⁻²时,土壤剖面的水分增加已到达 200cm 以下的土层。此后到灌浆期,不施氮小区的土壤水分亦下渗到了 180cm,施氮 120 kg hm⁻²的小区,土壤水分没有明显变化,施氮 240kg hm⁻²的小区,80 ~ 160cm 土层的水分继续增加。到收获期,不施氮和施氮 120kg hm⁻²小区的土壤水分增加仍没有超过 180cm 深的土层,施氮 240kg hm⁻²的小区,200cm 以上土层的水分均比播种时明显增加。可见,夏玉米生长季节不施氮肥和施氮量较低的情况下,土壤水分只下渗到 180cm,而施氮量较高时,土壤水分有向更深层次移动的趋势。

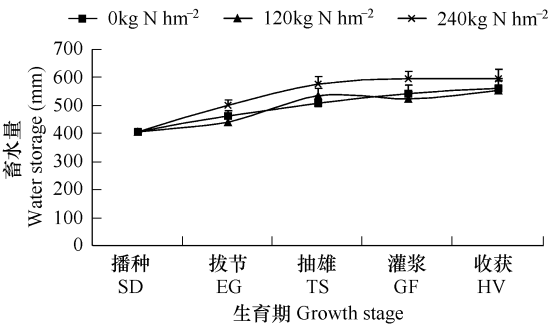


图 2 不同生育期 0 ~ 200cm 土层的蓄水量 (mm)

Fig. 2 Water storage in 0 – 200 cm soil layer at different growth stages of summer maize (mm)
SD : seeding , EG : Elongation , TS : Tasseling , GF : Grain-filling , HV : Harvesting , the same below

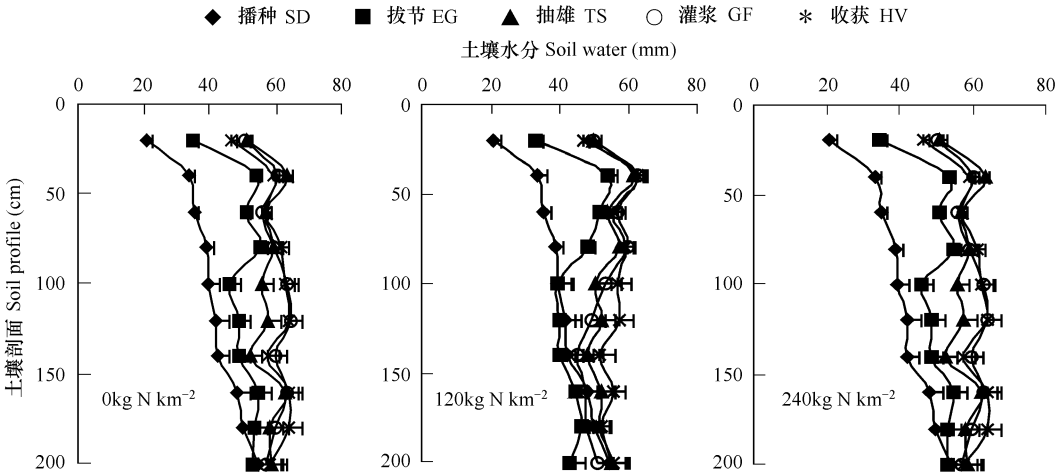


图 3 不同生育期水分在土壤剖面的分布 (mm)

Fig. 3 The distribution of water in soil profile at different growth stages of summer maize (mm)

2.4 不同生育期土壤的硝态氮和铵态氮累积量变化

对不同生育期 0 ~ 200cm 土层硝态氮累积量 (图 4A)观测表明 :从播种到拔节期 ,不施氮小区土壤的硝态氮累积量无明显变化 ,而施氮 120 和 240 kg hm⁻²的小区则由 120 kg hm⁻²分别上升到了 195 和 229 kg hm⁻²。拔节到抽雄期 ,施氮小区的硝态氮数量变化不明显 ,不施氮小区的硝态氮却开始迅速减少。抽雄到灌浆期 ,不施氮小区土壤的硝态氮继续减少 ,施氮小区的硝态氮亦开始明显减少 ,均在灌浆期达最低值 ,分别为 29 ,96 , 138 kg hm⁻²。这主要是由于此期为玉米生长高峰期 ,对土壤养分吸收量大且速度快所致。灌浆到收获期 ,由于作物养分吸收逐渐减弱 ,土壤硝态氮累积量又迅速上升。施氮 0 ,120 ,240 kg hm⁻²时 ,收获期土壤硝态氮分别为 78 ,148 ,290kg hm⁻² ,与灌浆期相比 ,增加 50 ,53 ,152 kg hm⁻²。前两者增幅相近 ,说明施氮 120 kg hm⁻² 时与不施氮相似 ,后期土壤的硝态氮增加主要来自土壤有机氮矿化 ,施氮 240 kg hm⁻²时 ,增幅远大于不施氮处理 ,说明此时土壤硝态氮的增加主要来自前期施入的肥料氮被土壤微生物或粘土矿物固定部分的重新矿化或再释放。从不同施氮水平的硝态氮累积量来看 ,施氮小区土壤的硝态氮累积量始终高于不施氮小区 ,且以施氮 240 kg hm⁻²时最高。与播前相比 ,不施氮肥时 ,收获期土壤硝态氮减少 42 kg hm⁻² ,施氮 120 和 240 kg hm⁻²时 ,分别增加 28 和 170 kg hm⁻²。说明过量施氮会增加土壤的硝态氮残留 ,对环境造成潜在威胁。

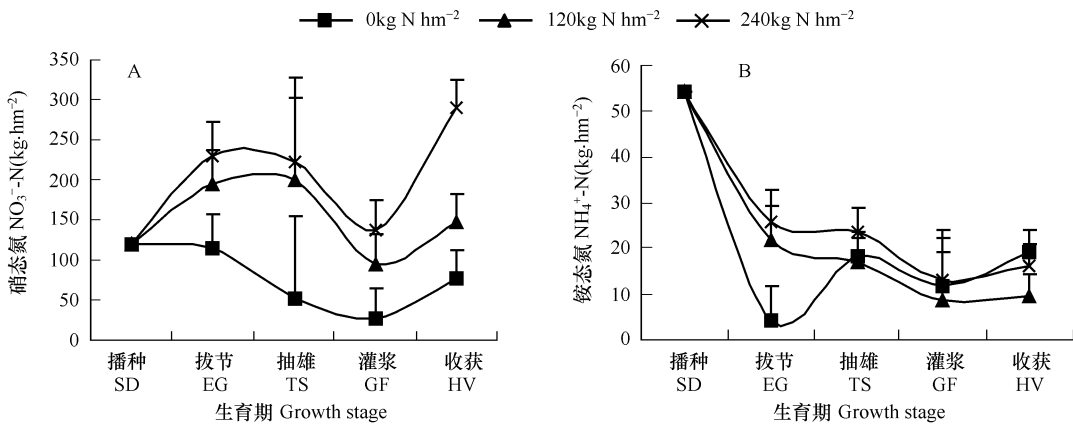


图 4 不同生育期 0 ~ 200cm 土层的硝态氮和铵态氮累积量 (kg hm⁻²)

Fig. 4 The accumulation of nitrate N and ammonium N in 0 – 200 cm soil at different growth stages of summer maize (kg hm⁻²)

与硝态氮不同 ,从播种到拔节 ,无论施氮与否 ,土壤的铵态氮累积量均在下降 (图 4B) ,且以不施氮时下降幅度最大。进入拔节期后 ,施氮小区土壤的铵态氮与硝态氮情况一致 ,累积量亦无明显变化 ;不施氮小区的铵态氮却出现增加趋势 ,到抽雄期与施氮小区在数量上已无明显差异。此后到灌浆期 ,不施氮和施氮 120kg hm⁻²和 240 kg hm⁻²小区的土壤铵态氮亦均减少 ,同样在灌浆期达到最低值。灌浆到收获期 ,土壤的铵态氮累积量虽呈现出上升趋势 ,但与硝态氮相比 ,上升幅度很小 ,比灌浆期增加 1 ~ 8 kg hm⁻²。除拔节期外 ,不同施氮水平 0 ~ 200cm 土层的铵态氮累积量差异不明显。与播前 (54kg hm⁻²)相比 ,收获时土壤的铵态氮累积量明显降低 ,不施氮和施氮 120kg hm⁻²和 240 kg hm⁻²时 ,分别减少 35 ,45kg hm⁻²和 38 kg hm⁻²。这种减少主要是由于夏季高温多雨的气候条件加强了土壤氮素的硝化作用 ,以及作物对土壤氮素的吸收利用。

2.5 不同生育期硝态氮在土壤剖面的分布动态

夏季 ,硝态氮在土壤剖面的分布随作物生长期变化 ,又因施氮量而异 (图 5) 。播种前 ,硝态氮主要累积在 0 ~ 60cm 的土层 ,60cm 以下土层的硝态氮极少 ,介于 2.5 ~ 3.3 kg hm⁻²。随拔节肥施入 ,施氮 120kg hm⁻²和 240 kg hm⁻²小区的耕层 (0 ~ 20cm)土壤硝态氮急剧增加 ,分别从播种前的 53 kg hm⁻²上升到 103kg hm⁻²和 132 kg hm⁻² ;不施氮处理 0 ~ 20cm 土层的硝态氮明显减少。拔节到抽雄期 ,不施氮小区 0 ~ 60cm 土层的硝态氮由于作物吸收急剧下降 ,施氮 120kg hm⁻²和 240 kg hm⁻²小区的硝态氮变化不明显。抽雄到灌浆期 ,不施肥小区 0 ~ 60cm 土层的硝态氮进一步减少 ,施氮小区土壤的硝态氮因作物吸收增加亦大量减少 ,特别是 0 ~

20cm 的土层。此后 ,因作物吸收减弱使得土壤硝态氮数量增加的同时 ,在降雨的作用下 ,施氮 240kg hm⁻² 小区土壤的硝态氮沿剖面由 60cm 土层下移到了 140cm 深处 ,但不施氮和施氮 120 kg hm⁻² 小区的硝态氮却无明显的下移趋势。可见 ,夏季过量施氮增加了硝态氮在土壤中的累积 ,且这些硝态氮可因降雨作用而向下层土壤移动。

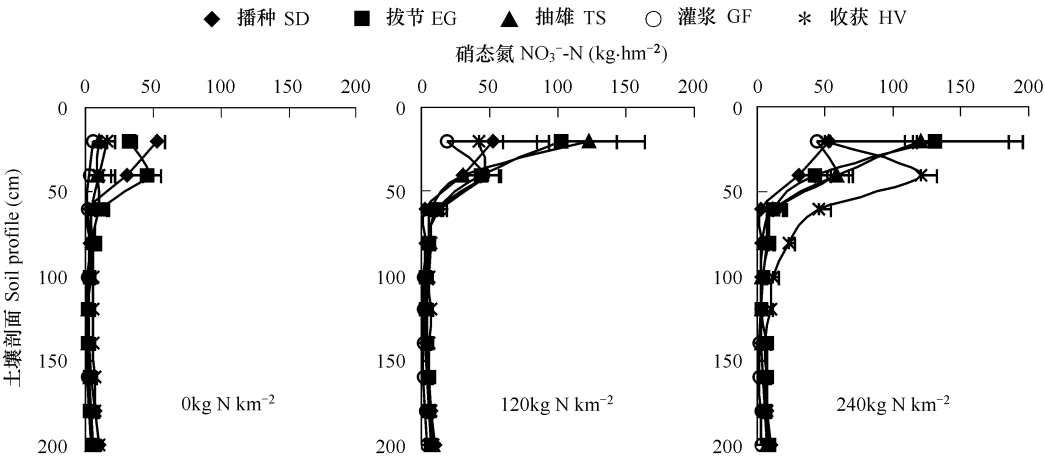


图 5 夏玉米不同生育期硝态氮在土壤剖面的分布

Fig. 5 The distribution of nitrate N in soil profile at different growth stages of summer maize

2.6 不同生育期铵态氮在土壤剖面的分布动态

与硝态氮一致 ,播种前铵态氮亦主要分布在 0 ~ 60cm 土层 (图 6)。拔节期 ,不施氮小区土壤剖面的铵态氮数量比播种前明显降低 ,施氮小区因氮肥施用使得 0 ~ 40cm 土层的铵态氮随施氮量的增加而显著增加。拔节期后 ,铵态氮在土壤剖面的分布又趋于均匀 ,各施氮水平之间无显著差异。可见氮肥投入对旱地土壤铵态氮影响的时间比较短暂 ,只是在施肥后的短期内表现出增加土壤铵态氮的效果 ,且主要发生在 0 ~ 40cm 的上层土壤。不同时期 ,土壤剖面不同土层的铵态氮均小于 5 kg hm⁻² ,各施氮水平间亦无显著差异。这可能是由于夏季土壤硝化能力较强 ,肥料氮或土壤有机氮释放的铵态氮会很快经硝化作用形成硝态氮^[9]。

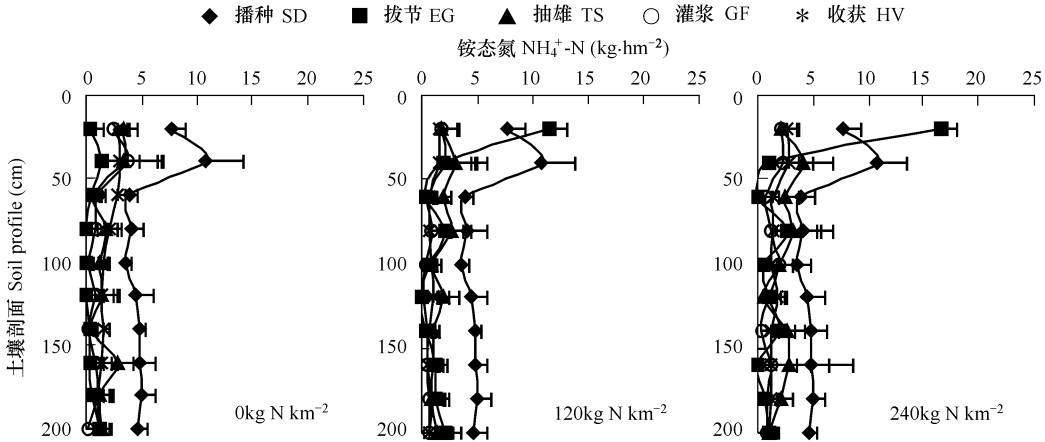


图 6 不同生育期铵态氮在土壤剖面的分布

Fig. 6 The distribution of ammonium N in soil profile at different growth stages of summer maize

3 讨论

研究表明 ,夏季适量施氮可以促进作物生长 ,提高其对氮素的吸收利用能力 ,过量施氮不仅没有明显的增产效果 ,反而使大量肥料氮素残留在土壤中。施氮 240 kg hm⁻² 时 ,氮肥利用率仅 3.9% ,肥料氮残留率则却

高达 87.2% (表 1)。这主要与播前土壤中有大量的氮素残留有关^[10]。本试验中,玉米播前 0~200cm 土层土壤的矿质态氮总量达到了 174 kg hm⁻²,几乎与夏玉米收获期植株的吸氮量一样高(表 1)。可见,不考虑土壤的残留矿质氮情况和供氮能力,盲目过量施用氮肥是造成氮肥利用率不高、土壤矿质氮大量盈余和累积的主要原因。

从土壤的水分状况来看,施氮 240 kg hm⁻²小区 0~200cm 土层的蓄水量显著高于不施氮和施氮 120 kg hm⁻²的小区;不施氮和施氮 120 kg hm⁻²时,土壤水分可以下渗到 180cm,而施氮 240kg hm⁻²时,则能下渗到 200cm 土层。施氮量高时,土壤蓄水量增加主要是由于高施氮量时夏玉米的生物量及产量出现降低趋势,从而使植物对土壤水分的消耗减少所致。高施氮量引起的水分入渗深度增加可能与作物根系在土壤剖面的分布有关。氮肥施用直接影响作物根系的生长、分布^[11]。施肥量较高时,作物根系主要分布在上层土壤^[12],以吸收上层土壤水分为主;不施肥或施肥量低时,作物根系向下层土壤扩展,增加对下层土壤水分的吸收^[13]。原因在于,供氮多时,地上部分形成的碳水化合物大量与氮素结合,形成的蛋白质增加,从而促使地上部生长,影响碳水化合物向根部转移,从而使根系发育不良^[14]。

土壤中硝态氮累积量随氮肥用量的增加而增加。巨晓棠在华北地区的研究^[15]表明,冬小麦/夏玉米轮作体系中,没有被作物吸收利用的氮素主要以硝态氮残留在 0~200cm 土层。如果不被作物及时吸收,遇到灌水和降雨,这些硝态氮将通过重力流和扩散作用逐渐向深层移动,脱离根区。研究表明,在黄土高原南部旱地降水量(含灌水)为 364mm 的夏季,土壤中硝态氮累积量因生育期和施氮量而异。施氮 0,120,240 kg hm⁻²时,收获期 0~200cm 土层土壤硝态氮累积量分别为 78,148,290kg hm⁻²。在降雨作用下,施氮 240kg hm⁻²小区土壤的硝态氮沿剖面由 60cm 土层下移到了 140cm 深处,而不施氮和施氮 120 kg hm⁻²小区的硝态氮却无明显的下移趋势。铵态氮在土壤中持续存在的时间与尿素施用量有关。旱地土壤中,硝化作用一般在 7 天内完成,之后土壤铵态氮浓度不随施氮量和生育时期而发生显著的变化,累积量通常也很小^[7]。因此,不同施氮水平间,土壤铵态氮仅在拔节期追肥后较短的时间内有显著差异。

水分在土壤剖面的向下运动是硝态氮淋溶必不可少的条件,土壤水分的入渗和再分布是引起硝态氮入渗和再分布的动因^[16],加之硝态氮又难以被土壤胶体吸附。因此,水分所到之处应亦是硝态氮能至之地,两者的运动应该一致。但试验表明,和水分在土壤剖面的下渗相比,硝态氮的淋溶有明显的滞后现象。比较收获时 0~200cm 土壤剖面的水分和硝态氮分布(图 3,图 5)可以发现,在当年夏玉米生长季节降水(含灌水)364mm 的情况下,不施氮和施氮 120kg hm⁻²小区土壤水分可下渗到 180cm,而硝态氮只下移到了 60 cm 深处,两者下移深度相差 120cm;施氮 240kg hm⁻²时,土壤水分可下渗至 200cm 深的土层,而硝态氮只下渗到了 140cm 深处,两者下移深度相差 60cm。这可能和水分、硝态氮在土壤中移动的复杂性有关。有研究发现,在团聚化较好的土壤上,水分优先流入大孔隙,而使硝态氮则被滞留在小空隙中^[17],只有饱和流才能引起硝态氮的淋溶^[18~20]。土壤的水分入渗和硝态氮淋溶取决于许多因素,包括土壤性质,灌水或降水量,氮肥施用的数量、时间和种类等^[21]。

References :

[1] Zhang N F, Li J K. Application chemical fertilizers with science, enhancing the benefit of production-increase, reducing agricultural cost. In : Chen J S ed. Building high-yield, quality and effect agriculture. Beijing : Chinese Agricultural Press, 1994. 418—429.

[2] Li S Q, Li S X. Leaching loss of nitrate from semiarid area agroecosystem. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11 (2) : 240—242.

[3] Fan B Q, Hu C F, Ping J L. Effect of irrigation and fertilization on nitrate leaching in loamy fluvo-aquic soil. Plant Nutrition and Fertilizer Science 1998, 4 (1) : 16—21.

[4] Yuan X M, Tong Y A, Yang X Y, et al. Effect of phosphate application on soil nitrate nitrogen accumulation. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6 (4) : 397—403.

[5] Liu M C, Zeng C L, Wang X R, et al. Effects of Nitrogen Fertilizer in Winter Wheat on Its Utilization Rate and Dynamic Distribution of NO₃⁻-N in Soil Layers. Research of Agricultural Modernization, 2000, 21 (5) : 309—312.

[6] Kumar K, Goh K M. Recovery of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to winter wheat and perennial ryegrass crops and residual ¹⁵N recovery by

succeeding wheat crops under different crop residue management practices. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* ,2002 ,62 :123 — 130.

[7] Ju X T ,Liu X J ,Zhang F S. Accumulation and movement of NO_3^- -N in soil profile in winter wheat-summer maize rotation system. *Acta Pedologica Sinica* ,2003 ,40 (4) :538 — 546.

[8] 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. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* ,2004 ,10 (3) :286 — 291.

[9] Zhang S L ,Yang X Y ,Lv D Q ,*et al.* Nitrification and dynamics in profiles of differently managed soil types. *Acta Pedologica Sinica* ,2000 ,37 (3) :372 — 378.

[10] Li S Q ,Li S X. Estimation of nitrogen fertilizer use efficiency in dryland agroecosystem. *Scientia Agricultura Sinica* ,2000 ,33 (1) :76 — 81.

[11] Wang Q X ,Wang P ,Yang XY ,*et al.* Effects of nitrogen application time on root distribution and its activity in maize (*Zea mays* L.). *Scientia Agricultura Sinica* ,2003 ,36 (12) :1469 — 1475.

[12] Robert P ,Durieux R P ,Kamprath E J ,Jackson W A ,Moll R H. Root distribution of corn :the effect of nitrogen fertilization. *Agronomy Journal* ,1994 ,86 :958 — 962.

[13] Marschner H ed. Li C J trans. *Mineral Nutrients of High Plant*. Beijing :Chinese Agricultural University ,2001. 355 — 356.

[14] Li S X. Ways and strategies for increasing fertilizer nitrogen efficiency in dryland soil. *Acta Pedologica Sinica* ,2002 ,36 (suppl.) :56 — 76.

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

[16] Yuan F M ,Chen Z M ,Yao Z H. Soil nitrogen leaching (summarized). In :Chen Z M ed. *Nitrogen yield and environment* ,Beijing :Chinese Agricultural Science and Technology Press ,1996. 191 — 208.

[17] Oikeh S O ,Carsky R J ,Kling J G ,*et al.* Differential N uptake by maize cultivars and soil nitrate dynamics under N fertilization in West Africa. *Agriculture ,Ecosystem and Environment* ,79 (2000) :187 — 197.

[18] Zhang G L ,Zhang S. The research headway of nitrogen leaching in farmland. *Soil* ,1998 ,6 :291 — 297.

[19] Rimski-Korsakov H ,Rubio G ,Lavado R S. Potential nitrate losses under different agricultural practices in the pampas region ,Argentina. *Agricultural Water Management* ,2004 ,65 :83 — 94.

[20] Hack-ten Broeke M J D. Irrigation management for optimizing crop production and nitrate leaching on grassland. *Agricultural Water Management* ,2001 ,49 :97 — 114.

[21] Moreno F ,Cayuela J A ,Fermández-Boy J E ,*et al.* Water balance and nitrate leaching in an irrigation Maize crop in SW Spain. *Agricultural Water Management* ,1996 ,32 :71 — 83.

参考文献：

[1] 张乃凤 ,李家康. 科学施用化肥 ,提高增产效益 ,降低农业成本. 见 陈俊生主编. *建设高产优质高效农业*. 北京 :中国农业出版社 ,1994. 418 ~ 429.

[2] 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.

[3] 范丙全 ,胡春芳 ,平建立. 灌溉施肥对壤质潮土硝态氮淋溶的影响. *植物营养与肥料学报* ,1998 ,4 (1) :16 ~ 21.

[4] 袁新民 ,同延安 ,杨学云 ,等. 施用磷肥对土壤 NO_3^- -N 累积的影响. *植物营养与肥料学报* 2000 ,6 (4) 397 ~ 403.

[5] 刘敏超 ,曾长立 ,王兴仁 ,等. 氮肥施用对冬小麦氮肥利用率及土壤剖面硝态氮含量动态分布的影响. *农业现代化研究* 2000 ,21 (5) 309 ~ 312.

[7] 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. *土壤学报* 2003 ,40 (4) 538 ~ 546.

[8] 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. *植物营养与肥料学报* ,2004 ,10 (3) :286 ~ 291.

[9] 张树兰 ,杨学云 ,吕殿青 ,等. 几种土壤剖面的硝化作用及其动力学特征. *土壤学报* 2000 ,37 (3) 372 ~ 378.

[10] 李世清 ,李生秀. 旱地农田生态系统氮肥利用率的评价. *中国农业科学* ,2000 ,33 (1) :76 ~ 81.

[11] 王启现 ,王璞 ,杨相勇 ,等. 不同施肥时期对玉米根系分布及其活性的影响. *中国农业科学* 2003 ,36 (1) :1469 ~ 1475.

[13] Marschner H 著. 李春俭译. *高级植物的矿质营养*. 北京 :中国农业大学出版社 2001 355 ~ 356.

[14] 李生秀. 提高旱地土壤氮肥利用率的途径和对策. *土壤学报* ,2002 ,36 (增刊) 56 ~ 76.

[15] 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 (12) :1493 ~ 1499.

[16] 袁锋明 ,陈子明 ,姚造华. 土壤中的氮素淋洗. 见 陈子明主编. *氮素产量环境* ,北京 :中国农业科技出版社 ,1996 :191 ~ 208.

[18] 张国梁 ,章申. 农田氮素淋失研究进展. *土壤* ,1998 ,6 :291 ~ 297.