

不同施氮量对华北平原作物产量及 土体硝态氮分布和累积的影响

茹淑华 张国印 孙世友 耿 暖 王 凌

(河北省农林科学院 农业资源环境研究所 河北 石家庄 050051)

摘要: 通过 8 年田间小区定位试验研究不同施氮量处理对土壤硝态氮分布、累积以及作物产量的影响。结果表明,在小麦-玉米轮作 8 个周期后 0~200 cm 土体中各土层的硝态氮含量变化规律为 N575 > N400 > N225 > N0,随着土壤深度的增加,在 0~80 cm 土层各施氮量处理土壤硝态氮均呈下降趋势,各处理在 60~80 cm 降到最低。各施氮量处理在 80~200 cm 土壤硝态氮随着土壤深度的增加均呈先升高后降低的趋势,同一土层不同施氮量处理间硝态氮的差异明显增大。经过 8 个小麦玉米轮作周期后, N575 处理 100~200 cm 土壤硝态氮累积量所占总累积量的比例提高 15.18%。通过对施氮量与土壤硝态氮累积量用数学模型模拟,发现二者符合线性关系,施氮量与土壤硝态氮累积量的回归方程为 $y = 1.34x + 75.58$ ($R^2 = 0.84^{**}$)。从冬小麦-夏玉米轮作周期考虑,全年的适宜施氮量为 400 kg/hm²。综合考虑施氮量对土壤硝态氮的残留量与作物产量的影响,提出华北平原区小麦-玉米轮作周期中总施氮量应控制在 225~400 kg/hm² 之间,基本上能控制土壤硝态氮向深层土壤的淋失,能明显降低土壤硝态氮向地下水淋失的风险。

关键词: 施氮量; 作物; 硝态氮; 分布; 累积

中图分类号: S143.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2012)06-0172-06

Effect of Different Nitrogen Application Rate on Soil Nitrate Nitrogen Distribution Accumulation and Crop Yields of Northern China Plain

RU Shu-hua, ZHANG Guo-yin, SUN Shi-you, GENG Nuan, WANG Ling

(Institute of Agro-resource and Environment, Hebei Academy of
Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: The 8 year-field experiment was carried out to study the effects of nitrogen application rate on soil nitrate nitrogen distribution, accumulation and crop yield. The results showed that the change rule of soil nitrate nitrogen content in 0~200 cm soil layer was N575 > N400 > N225 > N0 after 8 wheat-maize rotation cycle. With the increasing of soil depth, soil nitrate nitrogen content in 0~80 cm soil layer of each treatments decreased, in 60~80 cm reduced to minimum value. With soil depth increasing, the soil nitrate nitrogen in 80~200 cm firstly increased and then decreased, the differences among different treatments increased significantly. The difference reached a significant level for nitrate nitrogen of the same soil layer in 80~200 cm of different treatment. After 8 wheat-maize rotation cycle, the ratio of 100~200 cm soil nitrate nitrogen accumulation of N575 treatment in the total cumulative volume increased 15.18%. By volume of nitrogen and soil nitrate nitrogen accumulation with mathematical model simulation, found two in accordance with the linear relation, nitrogen and soil nitrate nitrogen accumulation amount of regression equation is $y = 1.34x + 75.58$ ($R^2 = 0.84^{**}$). From the winter wheat and summer maize rotation cycle, the optimum amount of nitrogen is 400 kg/hm². Considering the effect of nitrogen application rate on soil nitrate nitrogen residue and crop yield, total amount of nitrogen fertilizer application should be about 225~400 kg/hm² in wheat-maize rotation system at piedmont plain of Huabei. This could basically control soil nitrate nitrogen leaching

收稿日期: 2012-08-10

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD15B02); 国家科技支撑计划项目(2007BAD87B04); 农业部科技教育司资助(NYB2006-02)

作者简介: 茹淑华(1973-),女,河北平山人,副研究员,硕士,主要从事施肥与农业环境方面的研究。

通讯作者: 张国印(1962-),男,山西陵川人,研究员,硕士,主要从事施肥与农业环境方面的研究。

loss to deep soil and reduce groundwater pollution risk caused by soil nitrate nitrogen leaching.

Key words: Nitrogen application rate; Crop; Nitrate-N; Distribution; Accumulation

冬小麦-夏玉米复种轮作是华北平原粮食作物的主要种植制度,为实现高产,该区农田周年化氮平均用量已高达 545 kg/hm^2 ,远远超过目前全国氮肥平均用量 378 kg/hm^2 ^[1-2],也大大超出了华北地区目前平均产量水平下作物对氮素的需求量 311 kg/hm^2 ^[3]。该地域的氮肥利用率仅 $16\% \sim 22\%$ ^[4],低于 $30\% \sim 41\%$ 的全国平均水平^[5-6]。由于氮肥施用量大等原因,造成氮肥利用率低、作物产量下降、资源和能源浪费、生产成本偏高、严重污染生态环境等诸多问题,影响社会经济可持续发展和人类健康^[7-8]。氮肥进入土壤后除部分被植物吸收和土壤固定外,其余部分转化成土壤矿质氮^[9-10]。土壤剖面中矿质氮含量和分布是植物、施肥、土壤、降雨等环境条件影响下土壤中氮素转化和移动等过程的综合表现。硝态氮是旱地土壤矿质氮的主要部分,而硝态氮的淋失是农田生态系统中氮素损失的重要途径之一。长期过量施用氮肥,超出了作物的吸收能力和土壤的固持能力,则会造成资源浪费和环境污染,特别是土壤硝态氮的淋失,造成地下水污染,严重影响了生态环境^[11-13]。

本试验以华北平原中等肥力水平的地块为研究对象,研究了不同施氮量对作物产量及土壤硝态氮累积和分布的影响,旨在为华北平原冬小麦-夏玉米氮肥的合理施用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

冬小麦-夏玉米的田间试验于 2003 年开始在河北省农林科学院大河试验园区进行长期肥料定位试验。试验园区位于石家庄市鹿泉市大河村,该地区土壤属黏壤质洪冲积石灰性褐土。供试土壤 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层 pH 值 8.20,有机质含量 15.94 g/kg ,全氮含量 0.85 g/kg ,硝态氮 13.10 mg/kg ,速效磷 9.80 mg/kg ,速效钾 96.85 mg/kg 。试验设 4 个氮肥处理, N_0 、 N_{225} 、 N_{400} 、 N_{575} (施氮量分别为 0 、 225 、 400 、 575 kg/hm^2),每个处理设 4 次重复,随机区组排列。小区面积 44 m^2 。氮、磷和钾肥分别为尿素($\text{N } 46\%$)、过磷酸钙($\text{P}_2\text{O}_5 15.8\%$)和氯化钾($\text{K}_2\text{O } 58\%$)。小麦季氮肥施用量分别为 0 、 150 、 250 、 350 kg/hm^2 ,磷肥 $\text{P}_2\text{O}_5 225 \text{ kg/hm}^2$ 和钾肥 $\text{K}_2\text{O } 105 \text{ kg/hm}^2$ 。玉米季氮肥施用量分别为 0 、 75 、 150 、 225 kg/hm^2 ,钾肥施用量 $\text{K}_2\text{O } 52.5 \text{ kg/hm}^2$ 。小麦季氮肥分别于小

麦播前和拔节期分 2 次施用,底追各半,磷钾肥做底肥一次施用。玉米季氮肥在玉米小喇叭口期和大喇叭口期分 2 次施用,钾肥在玉米小喇叭口期一次施用。

1.2 样品采集与制备

本试验于 2003-2011 年间,分别在冬小麦和夏玉米收获时计产,采集土壤和植株样品。冬小麦计产:分小区单独收获,单打单收称重计算产量。夏玉米计产:每个小区单独收获称质量,计算产量。土壤样品每小区分 10 层采集($0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60$ 、 $60 \sim 80$ 、 $80 \sim 100$ 、 $100 \sim 120$ 、 $120 \sim 140$ 、 $140 \sim 160$ 、 $160 \sim 180$ 、 $180 \sim 200 \text{ cm}$)。采集的新鲜土壤样品带回实验室,采用 1 mol/L KCl 浸提,紫外分光光度计测定硝态氮含量。

1.3 数据处理与分析

土壤硝态氮累积(kg/hm^2) = \sum 土层厚度(cm) \times 土壤容重(g/cm^3) \times 土壤硝态氮含量(mg/kg) / 10。
数据均采用 Excel 和 SAS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 施氮量对小麦、玉米籽粒产量的影响

通过对 8 年定位试验中施氮量与小麦、玉米籽粒的总产量(数据为 8 年的平均产量)用数学模型模拟,发现二者符合二次曲线关系,施氮量与小麦、玉米籽粒总产量的回归方程为 $y = -0.0256x^2 + 22.743x + 10339$ ($R^2 = 0.993^{**}$),由此可见,投入 $\text{N } 1 \text{ kg/hm}^2$,冬小麦、夏玉米籽粒总产量大约提高 22 kg/hm^2 。当施氮量 $x = 444.20 \text{ kg/hm}^2$ 时,小麦、玉米籽粒总产量最高,为 15390.21 kg/hm^2 ,与实际最高产量差异不大。综合分析施氮量对小麦、玉米籽粒总产量的影响表明,适宜施氮量为 $\text{N } 400 \text{ kg/hm}^2$ 。因此,从冬小麦-夏玉米轮作周期考虑,全年的适宜施氮量为 400 kg/hm^2 。不同年份间小麦、玉米籽粒产量存在一定的波动。施氮处理小麦、玉米籽粒的产量显著高于对照处理,并且不施氮处理产量的波动性显著高于 3 个施氮处理。表明土壤肥力的改善有助于降低作物产量的波动性。不施氮处理下小麦籽粒产量年际间的变化系数为 28% ,玉米籽粒产量年际间的变化系数为 12% ,施氮处理小麦籽粒产量年际间的变化系数在 $17\% \sim 19\%$ 之间,玉米籽粒产量年际间的变化系数在 $5\% \sim 8\%$ 之间(图 1)。

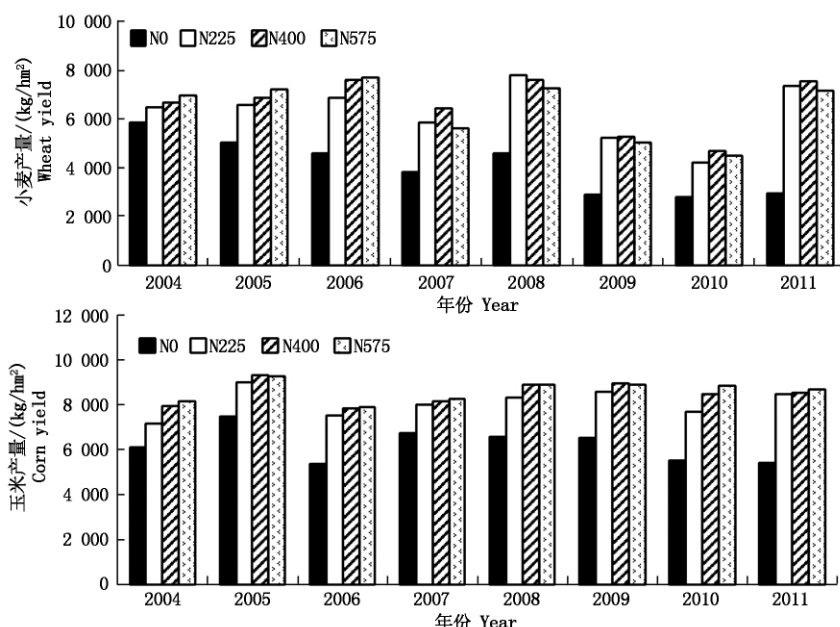


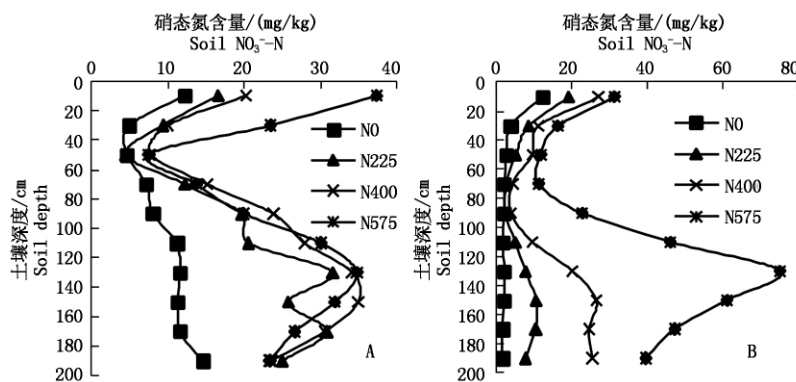
图1 氮肥施用量与小麦、玉米产量的关系

Fig. 1 The relationship of nitrogen fertilizer application rate and the yield of wheat and maize

2.2 不同氮肥施用量对土壤剖面硝态氮分布的影响

土壤剖面硝态氮含量的变化随施氮量和施氮时期不同而异。有研究表明^[14-15]施用氮肥提高了土壤硝态氮含量,氮肥用量越高,硝态氮含量越高,向深层淋洗的可能性也越大。施用氮肥造成硝态氮在深层土壤剖面累积^[16]。由图2可以看出,从第1个小麦玉米轮作周期后土壤硝态氮在0~200 cm剖面的分布来看,0~20 cm土层中硝态氮的含量均处于相对较高的水平,且随着施氮量的增加硝态氮含量明显增加。40~60 cm硝态氮含量均处于较低水平,且不同施氮量间没有明显差异。除不施氮肥的N0处理外,3个施氮处理60~200 cm各土层硝态氮的差异也不明显,而且硝态氮在120~140 cm土层均出现明显的累积峰,硝态氮含量均超过30 mg/kg。从小麦-玉米轮作8个周期后土壤硝态

氮在0~200 cm剖面的分布来看,在0~80 cm土层随着土壤深度的增加,各施氮量处理土壤硝态氮均呈下降趋势,各处理在60~80 cm处于最低值。在80~200 cm土层,随着土壤深度的增加,各施氮量处理土壤硝态氮均呈先升高后降低的趋势。随着土壤深度的增加,不同施氮量处理间同一土层硝态氮的含量差异明显增大。0~200 cm各土层的硝态氮含量变化规律为N575处理>N400处理>N225处理>N0处理。80~200 cm同一土层各施氮处理间硝态氮含量的差异达到显著水平。N575处理在120~140 cm出现明显的累积峰,此时,该层土壤硝态氮含量最高达到75.18 mg/kg。而N400处理在140~160 cm间也有累积现象,此时该土层硝态氮含量达到26.56 mg/kg。不施氮的N0处理0~20 cm土层中硝态氮的含量最小,为12.14 mg/kg;施氮量最高的N575处理土壤硝态氮含量也最大,为31.37



A. 小麦玉米轮作1个周期; B. 小麦玉米轮作8个周期。

A. 1 rotation cycle of wheat and maize; B. 8 rotation cycle of wheat and maize.

图2 氮肥用量对土壤硝态氮分布的影响

Fig. 2 Effect of different nitrogen application rate on soil nitrate nitrogen distribution

mg/kg, 施氮量较低及中等水平的 N225 和 N400 处理介于中间, 分别为 19.24 mg/kg 和 27.13 mg/kg。

图 3 为不同种植年份 0~200 cm 土壤硝态氮的分布特征(该结果采用 2004~2011 年间玉米收获后土壤硝态氮的数据)。从图 3 可以看出, 不施氮肥的 N0 处理, 随着种植年限的增加土壤剖面中的硝态氮含量明显降低。N225 处理, 随着种植年限的增加 0~60 cm 土层硝态氮变化规律不明显, 60 cm 以下土层硝态氮含量呈明显下降的趋势, 表明控制施氮量能明显降低深层土壤剖面的硝态氮残留。N400 处理, 2006 年和 2008 年变化规律基本上一致, 2010 年和 2011 年变化规律一致。与 2004 年相比, 随着种植年限的增加, 同一土层硝态氮含量或增高或降低或基本上不变, 这可能与本年度的降水量有一定关系。N575 处理, 随着种植年限的增加 60~

200 cm 土壤剖面中硝态氮残留量基本上处于明显增加的趋势, 表明增加施氮量会导致 0~200 cm 土壤剖面硝态氮残留量的明显增加, 这进一步表明, 增加施氮量会明显增加硝态氮向地下水淋失的风险。

从总体上看, 经过 8 个小麦玉米轮作周期后, 不施氮的处理由于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, 使得 0~200 cm 土壤中的硝态氮明显降低。施氮量越高, 土壤硝态氮向深层移动性越大。综合考虑本定位试验 0~200 cm 剖面土壤硝态氮的分布结果, 推荐河北山前平原区小麦-玉米轮作周期中总施氮量应控制在 225~400 kg/hm² 之间, 基本上能控制土壤硝态氮向深层土壤的淋失, 进而能明显降低土壤硝态氮向地下水淋失的风险。

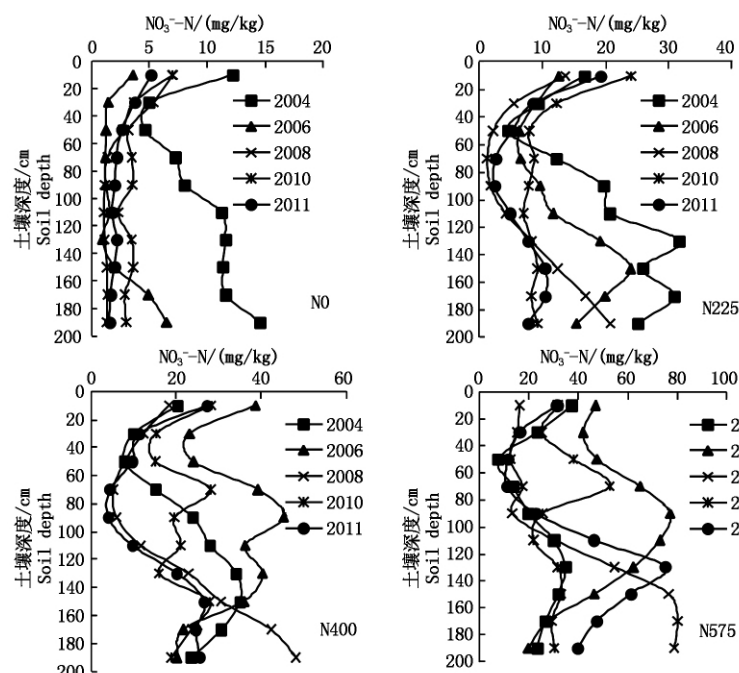


图 3 不同种植年份 0~200 cm 土壤硝态氮的分布特征

Fig. 3 Effect of different nitrogen application rate on soil nitrate nitrogen distribution

2.3 不同氮肥施用量对土壤剖面硝态氮累积的影响

从表 1 可以看出, 小麦-玉米轮作 1 个周期 (2004 年) 和轮作 8 个周期 (2011 年) 后不同施氮量处理间 0~100 cm、100~200 cm 土壤硝态氮累积量均存在一定的差异。随着施氮量的增加, 0~100, 100~200 cm 土壤硝态氮累积量均呈明显增加的趋势。小麦、玉米轮作一个周期 (2004 年) 时, 除不施氮的 N0 处理外, N225 处理的 0~100, 100~200 cm 土壤硝态氮累积量最低, 分别为 184.41, 396.72 kg/hm²。N575 处理硝态氮累积量最高, 分别为 301.54, 435.11 kg/hm²。N400 处理居中, 分别为 228.09, 448.13 kg/hm²。同样, 在小麦-玉米轮作 8 个周期 (2011

年) 后, N575 处理硝态氮累积量也最高, 0~100, 100~200 cm 土壤硝态氮累积量分别能达到 276.84, 798.23 kg/hm²。N225、N400 处理 0~100, 100~200 cm 土壤硝态氮累积量均比 2004 年有明显降低。从 8 年定位试验不同施氮处理下 0~200 cm 各土层硝态氮所占比例的结果来看, 同一施氮量处理 0~100, 100~200 cm 土壤硝态氮累积量占 0~200 cm 土壤硝态氮总累积量的比例也不同。在小麦玉米轮作 8 个周期后 N225 处理 0~100 cm 土壤硝态氮所占总累积量的比例升高, 100~200 cm 土壤硝态氮所占总累积量的比例明显降低。与 2004 年玉米收获期相比, N225 处理 100~200 cm 土壤硝态氮所占

总累积量的比例降低 16.16%。N400 处理 0~100, 100~200 cm 土壤硝态氮占 0~200 cm 土壤硝态氮总累积量的比例基本上保持不变。经过 8 个小麦-玉米轮作周期后,施氮量越高,100~200 cm 土壤硝态氮所占总累积量的比例也越高。2011 年玉米收获期 N575 处理 100~200 cm 土壤硝态氮累积量所占

总累积量的比例为 74.25%,与 2004 年玉米收获期相比,100~200 cm 土壤硝态氮累积量所占总累积量的比例提高 15.18%。由于作物对淋洗到 100 cm 以下的土壤硝态氮吸收利用率低,是导致肥料利用率降低的主要原因之一,并可能对地下水造成潜在污染。

表 1 不同施氮处理下 0~200 cm 各土层硝态氮累积量及所占比例

Tab. 1 Effect of different nitrogen application rate on soil nitrate accumulation and ratio of different soil layer in 0~200 cm

种植年份 Cultivate Year	土层深度 /cm Soil depth	N0		N225		N400		N575	
		累积量 /(kg/hm ²) Accumulation	比例/% Ratio	累积量 /(kg/hm ²) Accumulation	比例/% Ratio	累积量 /(kg/hm ²) Accumulation	比例/% Ratio	累积量 /(kg/hm ²) Accumulation	比例/% Ratio
2004	0~200	287.88	100.00	581.14	100.00	676.21	100.00	736.65	100.00
	0~100	109.26	37.95	184.41	31.73	228.09	33.73	301.54	40.93
	100~200	178.62	62.05	396.72	68.27	448.13	66.27	435.11	59.07
2011	0~200	93.57	100.00	235.24	100.00	481.61	100.00	1 075.07	100.00
	0~100	66.65	71.24	112.66	47.89	166.19	34.51	276.84	25.75
	100~200	26.92	28.76	122.57	52.11	315.42	65.49	798.23	74.25

通过对 8 年定位试验中施氮量与土壤硝态氮累积量用数学模型模拟,发现二者符合线性关系(图 4)。施氮量与土壤硝态氮累积量的回归方程为 $y = 1.34x + 75.58$ ($R^2 = 0.84^{**}$)。随着施氮量的增加,土壤硝态氮累积量呈线性增加的趋势。因此,应严格控制施氮量,尽量减少土壤硝态氮向深层的移动。

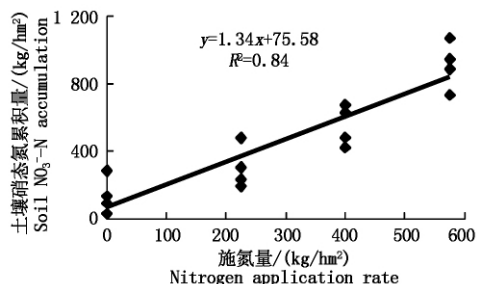


图 4 氮肥施用量与土壤硝态氮累积量的关系

Fig. 4 Effect of different nitrogen application rate on soil nitrate nitrogen accumulation

3 结论

华北太行山前平原是我国化肥施用量大的粮食高产产区之一,年施氮量高达 500 kg/hm²,当施入的大量氮肥不能完全被作物吸收时,多余的氮就以 NO₃⁻-N 的形式在降雨和灌溉时淋至土壤深层,对地下水形成一种威胁^[17]。本研究中,经过 8 个小麦-玉米轮作周期后,不施氮的处理由于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,使得 0~200 cm 土壤中的硝态氮明显降低。施氮量越高,土壤硝态氮向深层移动性越大。经过 8 个小麦-玉米轮作周期后,N225 处理 100~200 cm 土壤硝态氮所占 0~200 cm

土壤硝态氮总累积量的比例降低 16.16%。N400 处理 100~200 cm 土壤硝态氮累积量占总累积量的比例基本上保持不变。N575 处理 100~200 cm 土壤硝态氮累积量所占总累积量的比例提高 15.18%。分析本定位试验 0~200 cm 剖面土壤硝态氮的分布和累积结果,推荐河北山前平原区小麦-玉米轮作周期中总施氮量应控制在 225~400 kg/hm² 之间,基本上能控制土壤硝态氮向深层土壤的淋失,能明显降低土壤硝态氮向地下水淋失的风险。通过对 8 年定位试验中施氮量与土壤硝态氮累积量用数学模型模拟,发现二者符合线性关系。施氮量与土壤硝态氮累积量的回归方程为 $y = 1.34x + 75.58$ ($R^2 = 0.84^{**}$)。随着施氮量的增加,土壤硝态氮累积量呈线性增加的趋势。因此,应严格控制施氮量,尽量减少土壤硝态氮向深层的移动。

参考文献:

- [1] 陈新平,冀宏杰,张福锁.北京郊区过量施氮对蔬菜体内硝酸盐浓度的影响[M].李晓林,张福锁,米国华.平衡施肥与可持续优质蔬菜生产.北京:中国农业出版社,2000:270-277.
- [2] 张卫峰,季玥秀,马骥,等.中国化肥消费需求影响因素及走势分析 II 种植结构[J].资源科学,2008,30(1):31-36.
- [4] 赵荣芳,陈新平,张福锁.华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J].土壤学报,2009,46(4):684-697.
- [5] 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):5-8.
- [6] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江西科学

- 技术出版社, 1992: 213 – 249.
- [7] 巨晓棠, 张福锁. 氮肥利用的要义及其提高的技术措施[J]. 科技导报, 2003(4): 51 – 54.
- [8] 吴金水, 郭胜利, 党廷辉. 半干旱区农田土壤无机氮积累与迁移机理[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2041 – 2049.
- [9] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 张福锁. 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, 22(7): 1122 – 1128.
- [10] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京市农田硝态氮的分布与累积特征[J]. 中国农业科学, 2004, 37(5): 692 – 698.
- [11] 张长保, 王全九, 樊军, 等. 模拟降雨下初始含水量对砂黄土硝态氮迁移特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 894 – 899.
- [12] MacDonald A J, Powlson D S, Poulton P R, *et al.* Unused fertilizer nitrogen in arable soils: Its contribution to nitrate leaching[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1989, 46: 407 – 419.
- [13] Burkart M R, Kolpin D W, James D E. Assessing groundwater vulnerability to agrichemical contamination in the Midwest US[J]. Water Science and Technology, 1999, 39: 103 – 112.
- [14] Dana L D, Douglas L K, Dan B J, *et al.* Nitrogen management strategies to nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils[J]. Agronomy Journal, 2002, 94: 153 – 171.
- [15] 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 II 夏玉米[J]. 生态学报, 2002, 22(1): 48 – 53.
- [16] 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 冬小麦[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1782 – 1789.
- [17] 郭胜利, 吴金水, 郝明德, 等. 长期施肥对 NO_3^- -N 深层积累和土壤剖面中水分分布的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 75 – 78.
- [18] 张维理, 田哲旭, 张宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 80 – 87.