

施用氮肥对太行山前平原区作物产量和土壤硝态氮残留量的影响

茹淑华,耿 暖,张国印,王 凌,孙世友

(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:为解决氮肥施用过量引起地下水硝酸盐含量超标问题,通过连续 10 年的氮肥定位试验,研究太行山前平原区不同氮肥用量对小麦-玉米轮作体系中 0~200 cm 剖面土壤硝态氮残留量和作物产量的影响,结果表明,2004~2014 年间小麦、玉米平均产量与氮肥用量间呈显著的二次抛物线关系,施氮量为 246 kg/hm² 时小麦获最高产量 6 555 kg/hm²。施氮量为 159 kg/hm² 时玉米获最高产量 8 860 kg/hm²。氮肥用量与 0~100,100~200 cm 剖面土壤硝态氮残留量分别符合显著的线性相关。连续 10 年施用氮肥量最高的处理(小麦-玉米轮作周年施氮量为 575 kg/hm²) 0~100,100~200 cm 土壤硝态氮残留量分别达到 449.05,580.63 kg/hm²。小麦、玉米最高产量时(周年施氮量为 405 kg/hm²), 0~100,100~200 cm 剖面土壤硝态氮残留量分别为 320.79,408.43 kg/hm²。每个轮作周年减少氮肥用量 30%~44%,连续 10 年后 0~100,100~200 cm 剖面土壤硝态氮残留量分别降低 28.56%~42.34% 和 29.66%~44.64%。综合考虑作物产量和地下水硝酸盐污染风险,提出太行山前平原中等肥力水平的地块,小麦-玉米轮作周年氮肥用量应控制在 400 kg/hm² 以下。适宜的氮肥用量既可保证作物产量又能明显降低土壤硝态氮的残留。

关键词:太行山前平原区;施氮量;冬小麦;夏玉米;硝态氮;残留

中图分类号:S143.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2015)05-0161-06

doi:10.7668/hbxb.2015.05.027

Effect of Nitrogen Application Rate on Crop Yield and the Soil Nitrate Nitrogen Content in Taihang Piedmont Area

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

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

Abstract: To solve the problem of nitrate nitrogen content in groundwater exceeding standard caused by excessive fertilization. The field experiment was carried out to study the effects of nitrogen application rate on 0~200 cm soil nitrate nitrogen residual and yield of wheat and maize in Taihang piedmont area for 10 years. The results showed that the significant quadratic parabola correlation were found between average yield of wheat-corn and nitrogen fertilizer application rate. The amount of nitrogen fertilizer application should be 246 kg/ha to guarantee the highest yield of winter wheat for 6 555 kg/ha. The amount of nitrogen fertilizer application should be 159 kg/ha to guarantee the highest yield of summer maize for 8 860 kg/ha. A significant linear correlation were found between 0~100, 100~200 cm soil nitrate accumulation and nitrogen fertilizer. The treatment of N 575 kg/ha for wheat-corn rotation anniversary, 0~100, 100~200 cm soil nitrate residual reached 449.05 kg/ha and 580.63 kg/ha for 10 years of nitrogen fertilizer application. When the highest yield of wheat and corn (annual nitrogen rate was 405 kg/ha), 0~100, 100~200 cm soil nitrate accumulation was 320.79 kg/ha and 408.43 kg/ha, respectively. Nitrogen fertilizer application reduced 30%~44% for each wheat-corn rotation period, 0~100, 100~200 cm soil nitrate residual decreased by 28.56%~42.34% and 29.66%~44.64% after planting wheat and maize for 10 consecutive years. Considering the

收稿日期:2015-07-23

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAD15B02-2);农业部科技教育司资助项目(NYB2006-02);公益性行业(环保)课题(201309035-1)

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,主要从事农业环境研究。

nitrogen leaching risk and crop yield, it is advisable to suggest that the N application rate should be controlled within 400 kg/ha for wheat and corn in Taihang piedmont area. Appropriate nitrogen fertilizer amount can ensure crop yield and significantly reduce soil nitrate residual.

Key words: Taihang piedmont area; Nitrogen application; Winter wheat; Summer maize; Nitrate-N; Residual

华北太行山前平原是我国主要粮食产区。冬小麦-夏玉米轮作是该区主要的粮食种植体系,农民为追求高产过量施用化肥的现象普遍存在。据河北省农村统计年鉴,河北省氮肥施用量占化肥总量的48.7%左右^[1]。研究表明,大部分麦类作物氮肥利用率为28%~41%,平均35%左右^[2]。氮肥施用不当不仅导致氮素的大量损失,造成资源浪费,而且会对生态环境产生极大的不良影响^[3]。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^[4-5]。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。研究表明,旱地连续15年施用氮肥量为180 kg/hm²的处理,100~180 cm土层硝态氮的积累量达到601 kg/hm²^[6]。蒋会利等^[7]研究表明,当施氮量小于207 kg/hm²时,淋失现象比较缓和,当施氮量超过207 kg/hm²时,深层土壤中的硝态氮大幅度增加,发生淋失的可能性增大,可能污染地下水资源。当施氮量为105 kg/hm²时,小麦收获后0~100 cm土体内未发现硝态氮大量累积,随施氮量增加,0~100 cm土体内硝态氮含量显著增加;施氮量大于195 kg/hm²时,小麦生育期间硝态氮呈明显的下移趋势^[8]。近年来,集约化农区地下水硝酸盐含量严重超标,已对饮用水水质安全产生巨大威胁^[9-12]。研究表明,氮肥施用量,土体本身硝态氮含量高是造成硝态氮淋失的主要原因,进而引起地下水硝酸盐含量严重超标^[13]。

因此,本研究采用田间定位试验,研究华北太行山前平原区中等肥力水平下,不同氮肥施用量对冬小麦-夏玉米轮作体系中土壤硝态氮残留量以及作物产量的影响,旨在为华北太行山前平原区冬小麦-夏玉米种植体系中考地下水硝酸盐污染风险的氮肥合理施用提供理论依据以及技术支撑。

1 材料和方法

1.1 长期定位试验设计

小麦玉米轮作的田间定位试验于2003年开始,

在河北省农林科学院大河试验园区进行。土壤属粘壤质洪冲积石灰性褐土。供试土壤0~20 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个氮肥用量处理,N0、N1、N2、N3,每个处理设4次重复,随机区组排列,小区面积44 m²。小麦季氮肥施用量分别为0,150,250,350 kg/hm²,磷肥P₂O₅225 kg/hm²和钾肥K₂O 105 kg/hm²。玉米季氮肥施用量分别为0,75,150,225 kg/hm²,钾肥施用量K₂O 52.5 kg/hm²。小麦季氮肥的1/2作基肥于播前整地时施入,1/2在拔节期撒施后灌水,磷钾肥作基肥于播前施入。玉米季氮肥分别在玉米小喇叭口期和大喇叭口期撒施,钾肥在玉米小喇叭口期一次撒施。

1.2 样品采集与制备

本试验于2003-2014年,分别在冬小麦和夏玉米收获时计产。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重计算产量。土壤样品在夏玉米收获后采集,按20 cm一层分10层取0~200 cm土样,每个处理取多点分层进行混合。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浸提液中硝态氮含量。

1.3 数据处理与分析

土壤硝态氮积累(kg/hm²) = \sum 土层厚度(cm) × 土壤容重(g/cm³) × 土壤硝态氮含量(mg/kg)/10

2 结果与分析

2.1 施氮量对小麦、玉米籽粒产量的影响

农业生产中施用氮肥已成为主要的作物增产措施之一。氮肥施用量对小麦玉米产量的影响分析表明(图1),各施氮处理的小麦、玉米产量均明显地高于对照处理,施氮量为150,250,350 kg/hm²,小麦产量分别比对照增加64.27%,70.01%,60.09%,其中施氮量为250 kg/hm²的小麦产量最高,达6446.2 kg/hm²。施氮量为75,150,225 kg/hm²玉米产量分别比对照增加28.61%,30.60%,29.83%,其中施氮量为150 kg/hm²的玉米产量最高,达8617.82 kg/hm²。

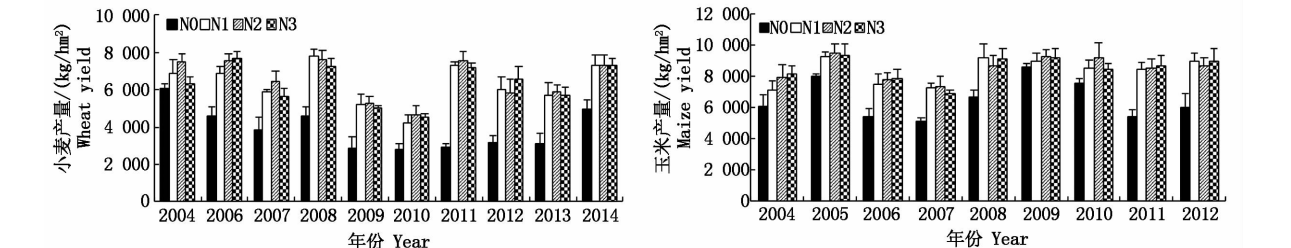


图 1 氮肥施用量对小麦和玉米产量的影响

Fig. 1 Effect of nitrogen fertilizer application rate on the yield of wheat and maize

通过对 10 年定位试验中施氮量与各年度小麦、玉米籽粒的产量用数学模型模拟,发现二者均分别符合二次曲线关系,且二者的相关性均达到显著或极显著水平(表 1,2)。可以推算出,小麦产量最高施氮量为 193~298 kg/hm²,小麦经济效益最佳施氮量为 170~281 kg/hm²。玉米产量最高的施氮量为 141~241 kg/hm²,玉米经济效益最佳施氮量为 133~223 kg/hm²。通过对施氮量与近 10 年小麦、玉米籽粒的平均产量用数学模型模拟,发现二者也均分别符合二次曲线关系,且二者的相关性均达到显著或极显著水平(表 1,2)。可以推算出,施氮量为 246 kg/hm² 时小麦获最高产量 6 555 kg/hm²,施氮量为 229 kg/hm² 时小麦获最佳经济效益,此时小麦的产量为 6542 kg/hm²。当施氮量为 159 kg/hm²

| 表 1 施氮量与小麦产量的关系 | | | | |
|--|-------------------------------------|--|--|---|
| Tab. 1 The relationship between nitrogen fertilizer application rate and wheat yield | | | | |
| 年份 Year | 拟合方程 Fitted equation | 相关系数 R ² Correlation coefficient | 产量最高施氮量 /(kg/hm ²) Nitrogen rate of the highest yield | 经济效益最佳施氮量 /(kg/hm ²) Nitrogen rate of the best economic efficiency |
| 2004 | $y = -0.0329x^2 + 12.705x + 6005.6$ | 0.5087 [*] | 193 | 170 |
| 2006 | $y = -0.0459x^2 + 27.336x + 3723$ | 0.9507 ^{**} | 298 | 281 |
| 2007 | $y = -0.0507x^2 + 23.676x + 3577.2$ | 0.8538 ^{**} | 233 | 218 |
| 2008 | $y = -0.0600x^2 + 28.131x + 4650.6$ | 0.8886 ^{**} | 234 | 222 |
| 2009 | $y = -0.0386x^2 + 18.692x + 3164.4$ | 0.8288 ^{**} | 242 | 222 |
| 2010 | $y = -0.0241x^2 + 13.447x + 2769.9$ | 0.8357 ^{**} | 279 | 247 |
| 2011 | $y = -0.0785x^2 + 39.079x + 2991.4$ | 0.9715 ^{**} | 249 | 239 |
| 2012 | $y = -0.0419x^2 + 22.538x + 3237$ | 0.8205 ^{**} | 269 | 251 |
| 2013 | $y = -0.0453x^2 + 22.978x + 3127.4$ | 0.8488 ^{**} | 254 | 237 |
| 2014 | $y = -0.0390x^2 + 19.903x + 5007.1$ | 0.8257 ^{**} | 255 | 236 |
| 多年平均 Multi-years average | $y = -0.0454x^2 + 22.319x + 3812.2$ | 0.9797 ^{**} | 246 | 229 |

注：* 差异显著；** 差异极显著。表 2 同。

Note: * indicated significant difference; ** indicated very significant difference. The same as Tab. 2.

| 表 2 施氮量与玉米产量的关系 | | | | |
|--|-------------------------------------|--|--|---|
| Tab. 2 The relationship between nitrogen fertilizer application rate and maize yield | | | | |
| 年份 Year | 拟合方程 Fitted equation | 相关系数 R ² Correlation coefficient | 产量最高施氮量 /(kg/hm ²) Nitrogen rate of the highest yield | 经济效益最佳施氮量 /(kg/hm ²) Nitrogen rate of the best economic efficiency |
| 2004 | $y = -0.0360x^2 + 17.383x + 6107.6$ | 0.9978 ^{**} | 241 | 223 |
| 2005 | $y = -0.0610x^2 + 19.149x + 8090.6$ | 0.6126 ^{**} | 157 | 157 |
| 2006 | $y = -0.0925x^2 + 31.101x + 5474.4$ | 0.7925 ^{**} | 168 | 161 |
| 2007 | $y = -0.1105x^2 + 32.084x + 5225.3$ | 0.8181 ^{**} | 145 | 139 |
| 2008 | $y = -0.0912x^2 + 29.669x + 6891.4$ | 0.5956 ^{**} | 163 | 155 |
| 2009 | $y = -0.0215x^2 + 7.712x + 8582.2$ | 0.8135 ^{**} | 179 | 148 |
| 2010 | $y = -0.0782x^2 + 22.099x + 7514.5$ | 0.5509 [*] | 141 | 133 |
| 2011 | $y = -0.1279x^2 + 41.926x + 5582.1$ | 0.839 ^{**} | 164 | 159 |
| 2012 | $y = -0.1179x^2 + 38.026x + 6186.9$ | 0.6954 ^{**} | 161 | 155 |
| 多年平均 Multi-years average | $y = -0.0862x^2 + 27.433x + 6677.6$ | 0.9247 ^{**} | 159 | 151 |

时玉米获最高产量 $8\,860\text{ kg/hm}^2$, 与实际最高产量差异不大。当施氮量为 151 kg/hm^2 时玉米获最佳经济效益, 此时玉米的产量为 $8\,846\text{ kg/hm}^2$ 。综合分析施氮量对小麦、玉米产量的影响表明, 小麦施氮量为 $229\sim 246\text{ kg/hm}^2$, 玉米施氮量为 $151\sim 159\text{ kg/hm}^2$, 周年施氮量为 $380\sim 405\text{ kg/hm}^2$ 。

2.2 不同氮肥施用量对土壤剖面硝态氮残留与分布的影响

由于冬小麦-夏玉米根系主要集中在 $0\sim 100\text{ cm}$ 的土层, 因此, 该土体中残留的硝态氮是可以被作物吸收利用的, $100\sim 200\text{ cm}$ 土体中的硝态氮难于被作物吸收, 作为潜在的淋失源残留于土壤中。由图 2 可以看出, 同一年份, 不同施氮量处理间 $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 土壤硝态氮残留量均存在明显的差异。同一施氮量处理, 不同年份间 $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 土壤硝态氮残留量也均存在明显的差异。同一年份, 随着施氮量的增加 $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 土壤硝态氮残留量均明显增加。不施氮的 N0 处理在试验开始时(小麦玉米轮作 1 个周期后) $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 土壤硝态氮残留量最高, 分别为 87.3 , 195.0 kg/hm^2 , 之后 $0\sim 100\text{ cm}$ 土壤硝态氮残留量一直处于较低水平, 基本上维持在 $25.7\sim 84.8\text{ kg/hm}^2$, $100\sim 200\text{ cm}$ 土壤硝态氮残留量随着轮作年限增加明显降低, 最低仅为 3.3 kg/hm^2 。N1 处理 $0\sim 100\text{ cm}$ 土壤硝态氮残留量维持在 $72.3\sim 195.8\text{ kg/hm}^2$, 随轮作年限呈上下波动, 变化幅度不大; $100\sim 200\text{ cm}$ 土壤硝态氮残留量为 $84.0\sim 342.2\text{ kg/hm}^2$, 随轮作年限呈明显降低的趋势。N2 处理 $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 土壤硝态氮残留量随着轮作年限增加总体上处于先增加后降低的趋势, 分别为 $146.5\sim 503.2$, $228.4\sim 631.8\text{ kg/hm}^2$ 。N3 处理 $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 土壤硝态氮残留量随着轮作年限增加总体上也呈先增加后降低的趋势, 分别维持在 $262.7\sim 919.0$, $352.8\sim 952.3\text{ kg/hm}^2$ 。从连续 10 年定位试验结果来看, 施氮量越高, $100\sim 200\text{ cm}$ 土壤硝态氮残留量

越大。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。

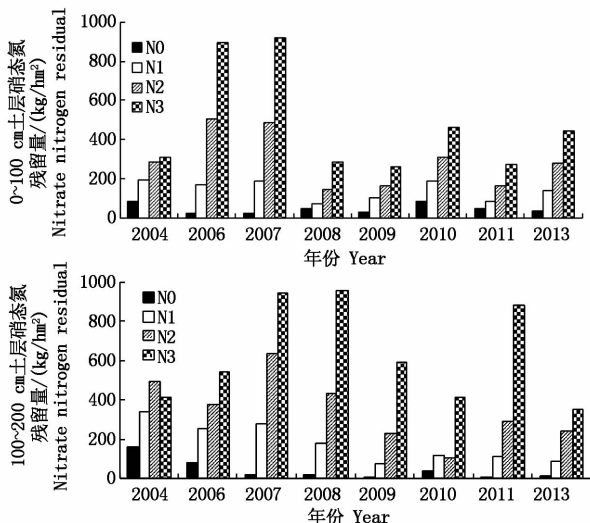


图 2 不同施氮量处理下 $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 剖面土壤硝态氮残留特征

Fig. 2 Effect of different nitrogen application rate on soil nitrate residual in soil profile

随着施氮量的增加, $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 剖面土壤硝态氮残留量均明显增加。对周年施氮量与玉米收获后 $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 剖面土壤硝态氮残留量(图 3 为 8 个轮作周期的数据)的关系进行模拟, 发现二者符合显著的线性相关。通过拟合方程可以推算出, 周年施氮量为 225 kg/hm^2 时, $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 剖面土壤硝态氮残留量分别为 184.98 , 226.08 kg/hm^2 。小麦、玉米最高产量的周年施氮量为 405 kg/hm^2 时, $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 剖面土壤硝态氮残留量分别为 320.79 , 408.43 kg/hm^2 。周年施氮量为 575 kg/hm^2 时, $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 剖面土壤硝态氮残留量分别为 449.05 , 580.63 kg/hm^2 , 可见, 如果每个轮作周年减少氮肥用量 $30\%\sim 44\%$, 连续 10 年后 $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 剖面土壤硝态氮残留量分别降低 $28.56\%\sim 42.34\%$, $29.66\%\sim 44.64\%$ 。

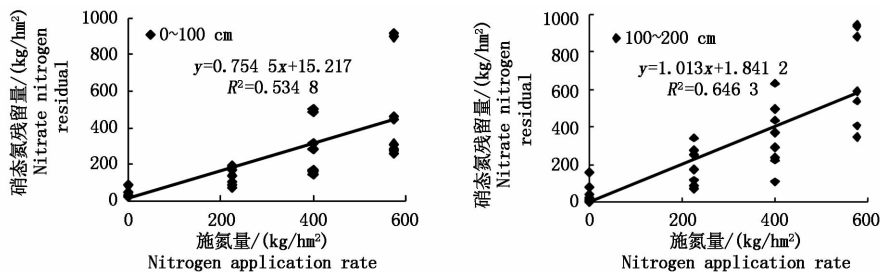


图 3 施氮量与 $0\sim 100$, $100\sim 200\text{ cm}$ 剖面土壤硝态氮残留量的关系

Fig. 3 Effect of nitrogen application rate on soil nitrate nitrogen residual in soil profile

图4为不同施氮量处理下0~200 cm剖面土壤硝态氮分布特征。本研究中,在每个小麦-玉米轮作周期,随着施氮量的增加,0~200 cm剖面中各土层硝态氮的含量均明显增加。随着轮作年限增加,N0处理0~200 cm剖面中各土层的硝态氮含量均明显降低,这表明不施氮的处理,随着作物生长不断从土壤中带走氮,土壤中的氮有明显的耗竭。随着轮作年限增加,N1处理0~200 cm各土层的硝态氮含量基本上呈下降趋势。从2008年后随轮作年限的增加土壤硝态氮的变幅减小。除0~20 cm土层中硝态氮维持在14.44~28.32 mg/kg外,其余各层土壤硝态氮均在10.00 mg/kg左右或更低。N2处理0~200 cm各土层的硝态氮含量随着轮作年限增加基本上呈下降趋势。与2004年相比,仅2006,2007年有明显的累积峰,出现在80~140 cm。从2009年以后年际间同一土层硝态氮含量的变异明显减小。除0~20 cm土层中硝态氮维持在21.88~37.65

mg/kg外,其余各层土壤硝态氮均在20.00 mg/kg左右或更低。与2004年相比,2006,2007,2008,2011年N3处理土壤硝态氮出现明显累积的现象。2006,2007年随土层深度增加土壤硝态氮含量呈先增加后降低的趋势,分别在80~100,100~120 cm出现明显累积峰,土壤硝态氮含量分别达到77.08,123.49 mg/kg。2008,2009,2011年随土层深度增加土壤硝态氮含量呈先降低后增加的趋势,分别在160~180,180~200,140~160 cm出现累积峰,土壤硝态氮含量分别达到80.02,64.42,76.53 mg/kg。此外,随着轮作年限增加,0~200 cm各土层的硝态氮含量基本上趋于稳定的水平。从本试验中小麦-玉米轮作10个周期的土壤硝态氮含量结果分析,在小麦季施氮量低于150 kg/hm²、玉米季施氮量低于75 kg/hm²的处理(周年施氮量225 kg/hm²)能控制土壤硝态氮的下移,明显降低土壤硝态氮向地下水淋失的风险。

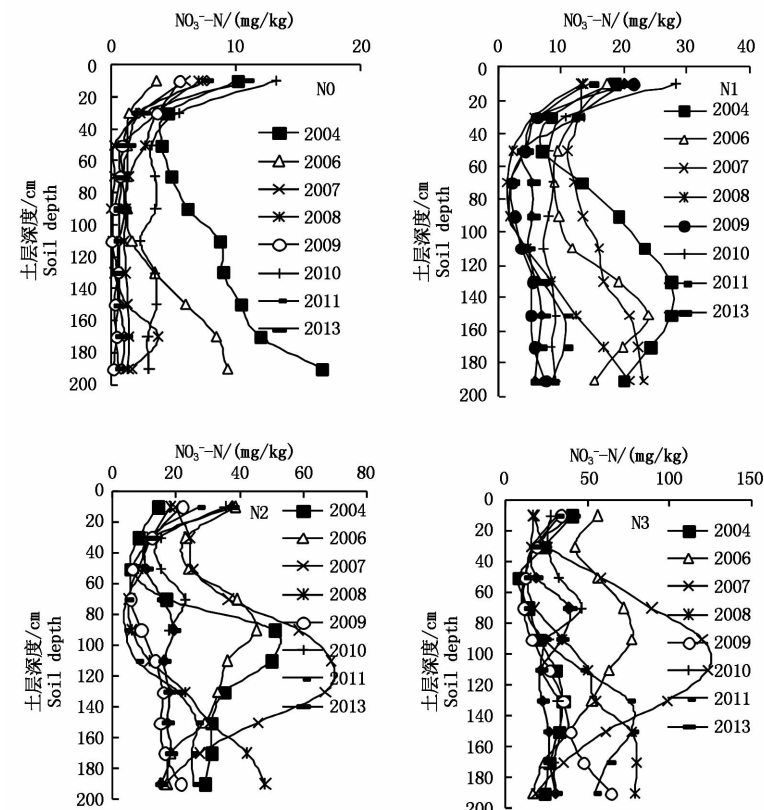


图4 不同施氮量处理下0~200 cm剖面土壤硝态氮分布特征

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

3 结论与讨论

氮素是影响植物生长发育和产量的重要因素之一,同时也是作物生长发育的过程中需要量最大的大量元素之一。氮肥施用对小麦、玉米产量提高发挥了重要作用,但施氮量过大带来产量降低和品质变差问题时有发生,而且对土壤硝态氮淋溶过量带

来的环境问题也不容忽视。本研究采用10年的小麦、玉米平均产量与氮肥用量间的数学关系,推测出小麦获最高产量6555 kg/hm²的施氮量为246 kg/hm²。玉米最高产量8860 kg/hm²的施氮量为159 kg/hm²。利用周年施氮量与玉米收获后0~100,100~200 cm剖面土壤硝态氮残留量间的数学关系,推测出周年施氮量为225 kg/hm²时,0~100,100~200 cm剖面

土壤硝态氮残留量分别为 184.98,226.08 kg/hm²;周年施氮量为 575 kg/hm² 时,0~100,100~200 cm 剖面土壤硝态氮残留量分别为 449.05,580.63 kg/hm²。该结果明显高于刘学军等^[14]提出的中国北方地区冬小麦/夏玉米轮作体系 0~90 cm 土壤中无机氮残留量不宜超过 100 kg/hm² 的限值。可见,如果每个轮作周年减少氮肥用量 30%~44%,连续 10 年后 0~100,100~200 cm 剖面土壤硝态氮残留量分别降低 28.56%~42.34% 和 29.66%~44.64%。综合考虑作物产量和地下水硝酸盐风险,提出太行山前平原中等肥力水平的地块,小麦-玉米轮作周年施氮量应控制在 400 kg/hm² 以下。

参考文献:

[1] 河北省人民政府办公厅. 河北省统计局[M]. 北京:中国统计出版社,2014.

[2] 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.

[3] 刘 瑞,戴相林,周建斌,等. 不同氮肥用量下冬小麦土壤剖面累积硝态氮及其与氮素表观盈亏的关系[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(6):1335-1341.

[4] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等. 北京市农田土壤硝态氮的分布与累积特征[J]. 中国农业科学,2004,37(5):692-698.

[5] 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.

[6] 樊 军,郝明德,党廷辉. 旱地长期定位施肥对土壤剖面硝态氮分布与累积的影响[J]. 土壤与环境,2000,9(1):23-26.

[7] 蒋会利,温晓霞,廖允成. 施氮量对冬小麦产量的影响及土壤硝态氮运转特性[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(1):237-241.

[8] 赵俊晔,于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响[J]. 生态学报,2006,26(3):815-822.

[9] 高旺盛,黄进勇,吴大付,等. 黄淮海平原典型集约农区地下水硝酸盐污染初探[J]. 生态农业研究,1999,7(4):43-45.

[10] 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[J]. 北京:中国农业出版社,2000:270-277.

[11] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.

[12] Zhang W L,Tian Z X,Zhang N,*et al.* Nitrate pollution of groundwater in northern China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment,1996,59(3):223-231.

[13] 李晓欣,胡春胜,张玉铭,等. 太行山前平原夏玉米生长季硝态氮的运移研究[J]. 华北农学报,2005,20(6):54-57.

[14] 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,2002,22(7):1122-1128.