

黄土高原南部不同减氮模式对春玉米产量及土壤硝态氮残留的影响

董强^{1,3}, 吴得峰², 党廷辉^{1,2*}, 郭胜利^{1,2}

(1 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:【目的】研究了不同减量施氮模式对黄土高原南部春玉米产量、土壤硝态氮残留的影响, 提出科学施肥模式, 旨在指导当地玉米施肥、保护环境安全。【方法】在黄土高原南部沟壑区农田连续进行了3年的田间试验, 供试作物为春玉米, 一年一熟, 采用半覆膜种植方式。试验设不施氮(CK); 传统施肥模式(Con, 施尿素 N 200 kg/hm²); 减氮模式 I (Mod I, 施尿素 N 160 kg/hm²); 减氮模式 II (Mod II, 施尿素 N 160 kg/hm² 和加一定量的硝化抑制剂双氰胺); 减氮模式 III (Mod III, 施脲甲醛 N 160 kg/hm²) 5种处理。调查了玉米产量、收获后土壤硝态氮残留和氮素利用率。【结果】三种减量施氮模式较传统施氮模式施氮量减少20%的情况下, 玉米产量连续三年无显著变化 ($P > 0.05$), 相差 0.1~0.5 t/hm²。与 Con 相比, Mod I、Mod II、Mod III 处理的氮肥农学效率及偏生产力分别增加了 20.2%~23.2% 和 21.9%~23.7%, 0—200 cm 土层 NO₃⁻-N 的残留量分别减少了 90.7、97.3、100.7 kg/hm², 其降幅依次为 44.7%、47.9%、49.6%。【结论】连续三年减少20%的施氮量不影响春玉米产量及吸氮量, 可提高氮肥的农学效率和偏生产力, 显著减少土壤剖面 NO₃⁻-N 残留量。在同一施氮量下, 添加硝化抑制剂或施用缓控释肥对硝态氮残留量减少作用不甚明显。

关键词: 春玉米; 减量施氮; 硝化抑制剂; 缓控释肥; 硝态氮

Effects of different nitrogen reduction modes on yield of spring maize and nitrate-N residue in soils of the southern Loess Plateau

DONG Qiang^{1,3}, WU De-feng², DANG Ting-hui^{1,2*}, GUO Sheng-li^{1,2}

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 University of China Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objectives】 Effects of different nitrogen reduction modes on yield of spring maize and soil NO₃⁻-N residue in the southern Loess Plateau were discussed, and scientific fertilization suggestions were put forward to instruct local maize fertilization and protect environment. 【Methods】 A field experiment was conducted in the south of the Loess Plateau for three years. Spring maize was planted with half plastic film mulching in one crop per annum. The experiment consisted of 5 N fertilization treatments, no N application (CK), applying urea N 200 kg/hm² (Con), applying urea N 160 kg/hm² (Mod I), applying N 160 kg/hm² of urea plus nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD)(Mod II), and applying slow-release fertilizer urea formaldehyde (SR) N 160 kg/hm² (Mod III). The yield of maize, the fertilizer N use efficiency and the soil NO₃⁻ residues were investigated. 【Results】 Compared with conventional N treatment, the grain yields and N uptakes of maize had no significant difference under the three N treatments, with the grain yield difference in range of 0.1–0.5 t/hm². Compared with the Con, the agronomic efficiencies of fertilizer nitrogen and N partial fertilizer productivities

收稿日期: 2016-12-30 接受日期: 2017-04-14

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFD0800105)资助。

作者简介: 董强(1992—), 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事土壤化学与环境的研究。E-mail: 1814370130@qq.com

* 通信作者 E-mail: dangth@ms.iswc.ac.cn

were increased by 20.2%–23.2% and 21.9%–23.7%, respectively. The accumulated amounts of nitrate nitrogen in 0–200 cm soil profile were decreased by 90.7, 97.3 and 100.7 kg/hm², respectively, with the decrease rates of 44.7%, 47.9% and 49.6% in turn. 【Conclusions】 Reducing 20% of conventional nitrogen input will not affect spring maize yield and N uptake significantly, but improve agronomic efficiency of fertilizer-nitrogen and N partial fertilizer productivity. Under the same nitrogen application rate, adding nitrification inhibitor or applying slow-release fertilizer do not show priorities over urea on nitrate-N residue reduction.

Key words: spring maize; nitrogen reduction; nitrification inhibitor; controlled release fertilizer; nitrate nitrogen

施用化肥是提高作物产量的重要手段之一。研究表明, 化肥对作物产量的贡献率在 35%~66%^[1], 据 FAO 的统计数据, 从 1978 年至 2008 年, 我国氮肥施用量平均每年增加 7.8×10^5 t^[2], 然而在农业生产中, 普遍存在着氮肥过量施用及利用率较低的问题。于飞等研究表明, 近十年来我国的氮肥利用率平均为 34.3%^[3], 巨晓棠等^[4]采用田间微区 ¹⁵N 示踪试验研究了肥料氮在冬小麦/夏玉米当季和后茬的去向表明, 氮肥利用率在 23.8%~51.1% 之间, 而残留率在 20.9%~48.4% 之间。闫湘等^[5]对全国 165 个田间试验统计得出, 中国主要粮食作物的氮肥当季利用率在 8.9%~78.0% 之间, 平均为 28.7%。土壤硝态氮 (NO₃⁻-N) 是植物利用氮素的主要形态, 长期大量施用氮肥, 会造成土壤硝态氮的大量累积, 且土体硝态氮的含量随施氮量的增加而增加^[6-8]。郭胜利等^[9]发现, 在坡地果园土壤上, 连续施肥超过 7 年就会发生深层 NO₃⁻-N 积累, 15 年后 100—200 cm 土层 NO₃⁻-N 的积累量达到 1400 kg/hm²。党廷辉等^[10]对黄土旱塬区农田氮素淋溶规律研究表明, 在高原沟壑区旱作农业中, 长期过量或不平衡使用氮肥, NO₃⁻-N 将在土壤剖面深层发生积累, 峰值在 120—140 cm 左右。硝态氮不易被土壤胶体所吸附, 累积在土壤中的氮素如不能被作物及时吸收利用, 在降水的作用下便会向下移动逐渐脱离根区, 淋洗至地下水导

致硝酸盐污染, 或径流至湖泊造成富营养化^[11-13]。因此, 提高氮肥利用率, 减少氮肥淋洗、径流损失, 探明影响硝态氮累积、淋洗、径流因素, 降低其对环境的危害, 是一个亟待解决的问题^[14]。

雨养农业区土壤 NO₃⁻-N 的深层积累是施肥、作物、降水、土壤特性等长期综合作用的结果, 是氮素去向的重要途径之一^[15]。本研究通过田间定位监测试验, 分析了不同减氮模式下春玉米产量及地上部生物吸氮量的差异, 探讨了不同减氮措施对土壤剖面硝态氮残留的影响, 为当地玉米种植提供理论与技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于黄土高原南部沟壑区的陕西省长武县境内中国科学院长武黄土高原农业生态试验站 (东经 107°40', 北纬 35°12', 海拔 1220 m), 属典型的雨养农业区, 为半干旱湿润性季风气候, 年均降水量为 560 mm, 其中最高年份为 954 mm, 最低年份为 296 mm, 7~9 月的降水量占年总量的 57%。年平均气温 9.2℃, 大于 10℃ 积温为 3029℃, 年日照时数 2230 h, 日照率为 51%, 年辐射总量为 484 KJ/cm², 无霜期 171 天, 无灌溉条件。试验期间降水量及平均气温见图 1。

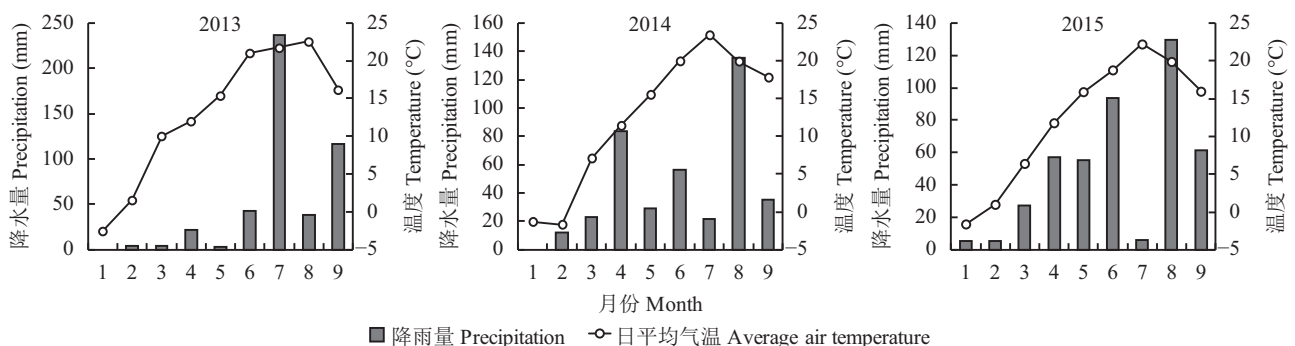


图 1 试验期间试验地降水量及日平均气温

Fig. 1 Precipitation and average air temperature in the experimental field during the trial period

土壤为黑垆土,母质为马兰黄土,土层深厚,土质疏松。试验地耕层 0—20 cm 土壤有机质含量 6.50 g/kg、全氮含量 0.80 g/kg、有效磷含量 5 mg/kg、pH 8.4、碱解氮含量 37 mg/kg、速效钾 129.3 mg/kg、碳酸钙含量 10.5%、容重为 1.3 g/cm³、田间持水量 21%~23.8%、凋萎含水量 9%~12%。

1.2 试验设计与管理

试验于 2013 年 4 月至 2015 年 9 月在试验地进行,供试作物为春玉米,品种为先玉 335,一年一熟。玉米采用半覆膜种植方式,地膜厚为 0.008 mm、宽 750 mm,株行距 30 cm × 60 cm,种植密度 57000 株/hm²。本试验共设 5 个处理:1) 不施氮对照 (CK); 2) 每年施普通尿素 N 200 kg/hm² (Con); 3) 减氮模式 I (Mod I, 每年施普通尿素 N 160 kg/hm²); 4) 减氮模式 II (Mod II, 每年施普通尿素 N 160 kg/hm²,同时添加硝化抑制剂双氰胺 10 kg/hm²); 5) 减氮模式 III (Mod III, 每年施缓控释肥脲甲醛 N 160 kg/hm²)。供试肥料有尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 12%)、缓控释肥脲甲醛 (SR)(N 26%)、双氰胺 (DCD)(N 10%)。采用完全随机区组设计,每个处理重复 3 次,共 15 个小区,小区长 17.5 m,宽 5.5 m,小区间距 0.5 m,区组间距 1 m,四周保护行宽 1 m。整个试验地长 92 m,宽 20 m。各处理均施 P₂O₅ 117 kg/hm², K₂O 37.5 kg/hm²。所有肥料在播种前一次性作为基肥均匀撒施土壤表面,然后翻入 0—20 cm 土壤中。玉米每年 4 月中下旬播种,9 月中下旬收获。作物生长期及时清除杂草,收获后土壤休闲。3 年试验期间,年平均降雨量为 523.3 mm,平均气温 11.1℃。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量测定 玉米收获期,每个小区选取 4 m × 4 m (16 m²) 大小 (约 90 株玉米),把地上部分、玉米穗棒分别称重,然后从中选取能代表该小区的 15 株作为代表样,带回实验室,经过前期处理和风干过程,分别称取其生物量、籽粒产量的鲜重和风干重,计算生物产量和籽粒产量。

1.3.2 土壤水分、硝态氮含量测定 春玉米收获后,用直径 3 cm 的土钻采集 0—200 cm 分层土样。在每小区选取膜上、膜间 2 点,每 20 cm 为一个土层,采至 200 cm。同一小区同一土层 2 点土样混合后,装入自封塑料袋中,冷藏备用。在采样过程中,同时取少量土壤放入铝盒,采用烘干称重法测定土壤含水量。在实验室里,将待测土样过 3 mm 筛后,称取 5.0 g 鲜土样,用 50 mL KCl (1 mol/L) 溶液浸提。振荡 1 h 后过滤,用流动分析仪测定 NO₃⁻-N 含量。

1.3.3 植物样品采集与测定 每个小区采集中部代表性植株 3 株,齐地面割下地上部分,转入档案袋中,然后分茎、叶、苞叶、穗轴、籽粒,分别称量后取一部分装入纸袋中在 105℃ 杀青 30 分钟,然后 75℃ 烘干至恒重,测定其干物质重后,粉碎过 60 目筛,用 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮,凯氏定氮仪测定植物全氮。

1.4 数据计算方法

氮肥利用率 = (施氮区地上部吸氮量 - 不施氮地上部吸氮量) / 施氮量 × 100%;

氮肥农学效率 (kg/kg) = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / 施氮量;

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 施氮区产量 / 施氮量;

土壤 NO₃⁻-N 残留量 (kg/hm²) = 土壤硝态氮含量 × 土层厚度 × 土壤容重 / 10。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013、Origin 及 SPSS 13.0 软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮模式对春玉米地上部生物量和产量的影响

施氮显著增加了春玉米地上部生物量和籽粒产量 (表 1)。与不施氮 (CK) 对比,传统施氮处理 (Con) 地上部生物量增加 170.2%,减量施氮处理 (Mod I、Mod II、Mod III) 增加 134.0%~141.5%;与 CK 相比,传统施氮 (Con) 增产 191.3%,减量施氮 (Mod I、Mod II、Mod III) 增产 184.8%~189.1%。经统计分析,与 Con 相比,Mod I、Mod II、Mod III 处理春玉米地上部分生物量和籽粒产量差异不显著。三种减氮模式间,在施氮量相同的情况下,添加硝化抑制剂或施用缓控释肥对春玉米产量和地上部产量无显著影响。

2.2 不同施氮模式下春玉米吸氮量以及氮肥利用率

施氮显著增加了玉米吸氮量 ($P < 0.05$)。与 CK 处理相比,Con、Mod I、Mod II、Mod III 处理的地上部分吸氮量均值分别增加了 2.4、1.9、1.8、1.7 倍 (三年数据平均)。与 Con 相比,Mod I、Mod II、Mod III 的地上部分吸氮量在统计学上差异不显著,说明在传统施肥的基础上减氮 20% 不会影响玉米的氮素吸收。施氮处理的氮肥利用率介于 70.0%~78.5% (三年数据平均),减量施氮模式 (Mod I、Mod II、Mod III) 比传统施氮处理 (Con) 并没有提高氮肥利用

表 1 不同处理春玉米地上部生物量和产量

Table 1 Aboveground biomass and yields of spring maize under different treatments

| 处理 Treatment | 生物量 Biomass (t/hm ²) | | | | 产量 Yield (t/hm ²) | | | |
|-----------------|----------------------------------|---------|---------|----------|-------------------------------|---------|---------|----------|
| | 2013 | 2014 | 2015 | 平均值 Mean | 2013 | 2014 | 2015 | 平均值 Mean |
| CK | 12.91 a | 7.10 a | 8.13 a | 9.38 | 7.31 a | 3.92 a | 2.63 a | 4.62 |
| Con | 22.00 b | 23.83 b | 30.42 b | 25.42 | 10.33 a | 12.23 b | 17.74 b | 13.43 |
| Mod I | 18.70 b | 22.42 b | 26.91 b | 22.68 | 10.52 a | 11.64 b | 17.73 b | 13.30 |
| Mod II | 20.00 b | 22.00 b | 25.43 b | 22.48 | 10.32 a | 11.92 b | 17.61 b | 13.28 |
| Mod III | 18.81 b | 20.82 b | 26.30 b | 21.98 | 10.13 a | 11.42 b | 17.74 b | 13.10 |

注 (Note): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among the treatments at the 5% level.

率 (表 2), 本文计算得到的氮肥利用率为三年的累积利用率, 由于不施氮肥处理连年种植, 肥力下降, 故三年氮肥的平均利用率较高。氮肥农学效率介于 44.0~54.2 kg/kg (三年数据平均), 与 Con 处理相比, Mod I、Mod II、Mod III 处理的氮肥农学效率升高 (表 2), 说明减少氮肥用量有助于提高氮肥的农学效率, 而在三个减量施氮处理中, Mod I、Mod II、Mod III 处理的氮肥农学效率无显著差异, 说明施用缓控释肥或在肥料中添加硝化抑制剂不会降低

氮肥的农学效率。氮肥的偏生产力表示每施用 1 kg 氮肥能生产的粮食产量, 其大小可表征提高氮肥利用率的潜力。由表 2 可知, Mod I、Mod II、Mod III 处理的氮肥偏生产力均显著高于 Con 处理, 可见减量施氮对提高氮肥的生产效率有显著的促进作用。

2.3 不同施氮模式下土壤剖面硝态氮分布与残留量

3 年试验数据表明, CK 处理的土壤剖面硝态氮含量在整个剖面上递减, 其余处理的土壤剖面硝态

表 2 不同施氮模式玉米吸氮量以及氮肥利用效率

Table 2 Nitrogen uptakes and nitrogen use efficiencies of maize under different nitrogen application modes

| 年份 Year | 处理 Treatment | 吸氮量 (kg/hm ²) N uptake | NUE (%) | NAE (kg/kg) | NFPF (kg/kg) |
|------------|-----------------|---------------------------------------|------------|----------------|-----------------|
| 2013 | CK | 102.3 a | | | |
| | Con | 221.0 b | 59.4 a | 15 | 51.5 |
| | Mod I | 197.0 b | 59.2 a | 20 | 65.6 |
| | Mod II | 170.0 b | 42.3 a | 18.8 | 64.4 |
| | Mod III | 180.8 b | 49.1 a | 17.5 | 63.1 |
| 2014 | CK | 66 a | | | |
| | Con | 223.8 b | 78.9 a | 41.5 | 61 |
| | Mod I | 176.8 b | 69.2 a | 48.1 | 72.5 |
| | Mod II | 190.0 b | 77.5 a | 50 | 74.4 |
| | Mod III | 174.9 b | 68.1 a | 46.9 | 71.2 |
| 2015 | CK | 25.4 a | | | |
| | Con | 220.3 b | 97.4 a | 75.5 | 88.5 |
| | Mod I | 181.8 b | 97.8 a | 94.4 | 110.6 |
| | Mod II | 174.4 b | 93.1 a | 93.8 | 110 |
| | Mod III | 173.7 b | 92.7 a | 94.4 | 110.6 |

注 (Note): NUE—氮肥利用率 Nitrogen fertilizer use efficiency; NAE—氮肥农学效率 Nitrogen fertilizer agronomy efficiency; NFPF—氮肥偏生产力 Nitrogen efficiency of partial productivity; 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among the treatments at the 5% level.

氮含量总体上呈现先增后减的趋势(图2)。与CK相比,其余处理的土壤硝态氮含量在0—200 cm 整个剖面层次上均明显提高(图2)。而Con处理的土壤剖面硝态氮含量明显高于各试验处理。Mod I 与 Mod II 处理的土壤剖面硝态氮含量在剖面上分布规律相似,均在60 cm 处出现峰值,但Mod I 处理的土壤硝态氮含量在整个土层上均表现为高于Mod II 处理(图2),这与Mod II 处理添加硝化抑制剂,减缓氮

肥转化为硝态氮有关。Mod III 处理的土壤剖面硝态氮含量表现为表层含量较高,深层含量普遍较低,Mod III 处理施用的是缓控释肥,氮素释放慢,迁移到土壤下层的硝态氮很少,大部分积聚在表层(图2)。

不同施氮模式对土壤0—200 cm 剖面硝态氮累积量有显著影响($P < 0.05$),由三年的土壤剖面硝态氮累积量(表3)可见,0—200 cm 土壤硝态氮累积量各处理表现为 $Con > Mod I > Mod II > Mod III >$

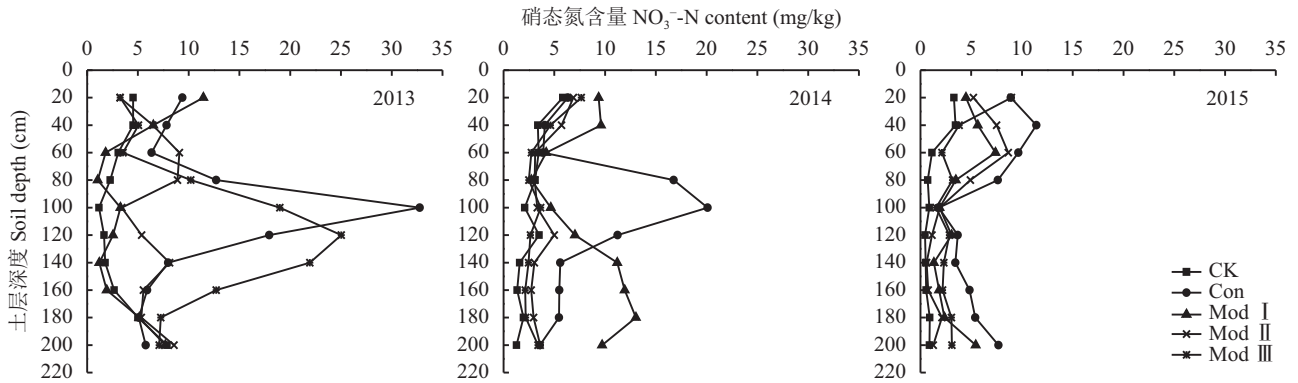


图2 不同施氮模式对土壤剖面硝态氮分布的影响

Fig. 2 Effect of different nitrogen application modes on distribution of NO_3^- -N in soil profile

表3 不同施氮模式下土壤不同层次硝态氮的累积量

Table 3 Effect of different nitrogen application modes on nitrate-nitrogen accumulation in soil profile

| 处理 Treatment | 土层 (cm) Soil layer | NO_3^- -N 累积量 NO_3^- -N accumulation (kg/hm^2) | | | | 占比 (%) Percentage |
|-----------------|-----------------------|--|---------|---------|----------|----------------------|
| | | 2013 | 2014 | 2015 | 平均值 Mean | |
| CK | 0—100 | 31.7 | 39.4 | 24.4 | 31.8 | 57.2 |
| | 100—200 | 39.3 | 23.5 | 8.5 | 23.8 | 42.8 |
| | 0—200 | 71.0 c | 62.9 c | 32.9 c | 55.6 | 100 |
| Con | 0—100 | 140.4 | 142.8 | 102.8 | 128.7 | 63.4 |
| | 100—200 | 88.7 | 69.4 | 64.8 | 74.3 | 36.6 |
| | 0—200 | 229.1 a | 212.2 a | 167.6 a | 203.0 | 100 |
| Mod I | 0—100 | 79.4 | 62.2 | 61.9 | 67.8 | 60.4 |
| | 100—200 | 62.2 | 34.0 | 37.2 | 44.5 | 39.6 |
| | 0—200 | 141.6 b | 96.2 b | 99.1 b | 112.3 | 100 |
| Mod II | 0—100 | 65.0 | 43.0 | 73.6 | 60.5 | 57.2 |
| | 100—200 | 69.4 | 51.0 | 15.2 | 45.2 | 42.8 |
| | 0—200 | 134.4 b | 94.0 b | 88.8 b | 105.7 | 100 |
| Mod III | 0—100 | 66.9 | 47.2 | 50.3 | 54.8 | 53.6 |
| | 100—200 | 75.3 | 32.5 | 34.7 | 47.5 | 46.4 |
| | 0—200 | 142.2 b | 79.7 b | 85.0 b | 102.3 | 100 |

注 (Note): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among the treatments at the 5% level.

CK, 与 Con 处理的硝态氮累积量相比, Mod I、Mod II、Mod III 处理均显著降低了土壤硝态氮的残留量, 但 Mod I、Mod II、Mod III 处理之间的硝态氮残留累积量无显著差异。3 年后, 四个施氮处理 0—100 cm 和 100—200 cm 土壤剖面 NO_3^- -N 残留量分别介于 54.8~128.7 kg/hm² 和 44.5~74.3 kg/hm², 减量施氮处理 (Mod I、Mod II、Mod III) 比传统施氮处理 (Con) 均减少了 0—100 cm 和 100—200 cm 土壤剖面 NO_3^- -N 残留量。0—100 cm 硝态氮累积量占 0—200 cm 硝态氮累积量的比例均大于 50%, 而春玉米 90% 以上的根系集中在 0—100 cm 土层, 因此这部分的氮素可以有效的被利用。在 100—200 cm 土层也有大量的硝态氮残留, 而这部分的氮素相对难以被春玉米利用, 进而提高了向下层淋失的风险。

3 讨论

氮肥的施用是根据区域作物、土壤和气候特点解决施用量、施用时期及不同时期的分配比例等问题, 核心在于施肥量的控制^[16]。研究表明, 提高作物氮肥效率的有效手段之一是降低施氮量^[17]。在考虑土壤自身供氮水平的基础上, 适当降低肥料的施用量不仅不会影响作物的产量, 而且可将氮素的表观损失降到一个较低的水平^[18]。孙云保等^[19]研究表明, 与常规速效氮肥相比, 连续 4 年 8 季作物在控释氮肥均减施 30% 的条件下, 作物产量无显著差异。郝小雨等^[20]研究表明, 同一施氮量下, 添加硝化抑制剂不影响玉米籽粒产量和吸氮量。这些研究结果与本研究一致。即与当地传统施肥处理相比, 在减量施氮 20% 的基础上, 不影响春玉米产量和吸氮量, 同时提高了氮肥的农学效率和偏生产力。

硝态氮是旱地农田无机氮存在的主要形态, 也是最易被作物吸收利用的氮素形态, 同时硝态氮也容易随水分运动下移出作物根层以下, 直至到地下水, 对地下水形成污染, 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥的主要损失途径是淋洗出 0—100 cm 土体, 在下层土壤中累积^[21]。李世清等^[22]研究认为, 试验区降水少时, NO_3^- -N 主要分布在 0—80 cm 土层, 降水多时, NO_3^- -N 进入下层土壤比例增加。这与本研究结果一致, 2013 年到 2015 年试验地降雨量为 515.4 mm、414 mm、520.2 mm, 相较于往年 (560 mm), 其降雨量偏少, 故大部分残留的硝态氮累积在 0—100 cm, 但这些残留的硝态氮经过暴雨或灌溉都会淋溶到土壤底层, 对地下水安全产生严重威胁。

硝化抑制剂通过选择性抑制土壤硝化微生物活

动, 可有效减缓土壤中 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 的转化, 因此添加硝化抑制剂是农业生产中常用的提高非硝态氮肥利用率、减少硝化作用负面效应的一种有效方式^[23]。在硝化作用的两个阶段中, 有些硝化抑制剂对氨氧化细菌产生毒性, 有些硝化抑制剂可抑制硝化杆菌属细菌的活动^[24]。双氰胺通过抑制氨氧化细菌 (*Nitrosomonas* sp.) 生长并使其细胞色素氧化酶活性钝化来延缓 NH_4^+ 向 NO_2^- 的转化, 即对硝化过程的第一反应阶段产生抑制效应, 进而达到硝化抑制效果^[25]。众多研究表明, 硝化抑制剂与尿素混施可显著抑制硝化作用, 减少土壤中硝态氮的含量, 同时增加了土壤中铵态氮的含量^[26-28]。而微生物对铵态氮的固持能力优于硝态氮, 从而增加氮素在土壤中的持留能力^[28]。本研究对春玉米的研究发现, 尿素与硝化抑制剂混施较传统施肥显著降低了土壤剖面的硝态氮残留量。李燕婷等^[29]研究指出缓控释肥在保证玉米产量不降低的前提下, 降低了土壤剖面尤其是深层土壤硝态氮积累的效应, 对减轻地下水硝态氮污染风险具有重要意义。此外, 控释氮肥减氮 30% 处理表层土壤硝态氮含量未显著下降, 但深层土壤硝态氮含量较常量速效氮肥处理减少了 44.2%~89.2%^[19]。本试验三年数据显示, 施用缓控释肥显著降低了土壤剖面硝态氮的累积量。这主要是由于脲甲醛缓释肥料是不同链长的甲基脲聚合物, 施入土壤后, 快速融化为胶体被土壤紧密吸附, 靠土壤微生物的分解释放氮。综上所述, 合理的减量施氮和选择施氮模式可以有效减少土壤剖面中硝态氮的累积量。

4 结论

1) 在黄土高原南部丘壑区, 在传统施氮的基础上减量施氮 20% 不影响春玉米产量及吸氮量, 并可提高氮肥的农学效率和偏生产力。

2) 施氮显著增加了土壤 NO_3^- -N 的含量。与 CK 相比, 传统施氮模式与三种减量施氮模式都显著增加了土壤剖面 NO_3^- -N 的含量。不同施氮模式土壤剖面硝态氮含量分布规律有差异, 表明施氮量、施肥模式及肥料种类对硝态氮的迁移有一定影响。

3) 减量施氮模式可以有效减少土壤剖面 NO_3^- -N 残留量。与传统施氮模式相比, 三种减量施氮处理显著降低了土壤剖面 NO_3^- -N 的残留量, 0—200 cm 土壤剖面的降幅分别为 44.7%、47.9%、49.6%。但在同一施氮量下, 肥料中添加硝化抑制剂或施用缓释氮肥对硝态氮积累的减少作用并不明显。

参 考 文 献:

- [1] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259–273.
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259–273.
- [2] FAO. FAO STAT[EB/OL]. <http://faostat.fao.org/site/575/DesktopDefault.aspx?ageID=575#ancor>.
- [3] 于飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1311–1324.
Yu F, Shi W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1311–1324.
- [4] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 张福锁. 北京郊区冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥去向研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 264–270.
Ju X T, Pan J R, Liu X J, Zhang F S. Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat summer maize rotation system in Beijing suburban[J]. Plant Nutrition Fertilizer Science, 2003, 9(3): 264–270.
- [5] 闫湘, 金继运, 何萍, 梁鸣早. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450–459.
Yan X, Jin J Y, He P, Liang M Z. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(2): 450–459.
- [6] 党廷辉, 戚龙海, 郭胜利, 郝明德. 旱地土壤硝态氮与氮素平衡、氮肥利用的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 573–577.
Dang T H, Qi L H, Guo S L, Hao M D. Relationship between soil nitrate, nitrogen balance and utilization in rainfed land[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(3): 573–577.
- [7] 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.
Fan J, Hao M D, Dang T H. Distribution and accumulation of NO_3^- -N in soil profile of long-term located fertilizer experiment[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 23–26.
- [8] 党廷辉, 郝明德, 郭胜利, 蔡贵信. 黄土高原南部春玉米地膜栽培的水肥效应与氮肥去向[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1901–1905.
Dang T H, Hao M D, Guo S L, Cai G X. Effect of plastic-film mulch on water and nitrogen use by spring maize and on fate of applied nitrogen in the southern Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1901–1905.
- [9] 郭胜利, 党廷辉, 郝明德. 黄土高原沟壑区不同施肥条件下土壤剖面中矿质氮的分布特征[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(1): 22–27, 37.
Guo S L, Dang T H, Hao M D. Mineral N distribution of soil profile in gully area of the loess plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2000, 18(1): 22–27, 37.
- [10] 党廷辉, 郭胜利, 樊军, 等. 长期施肥条件下黄土旱塬土壤 NO_3^- -N的淋溶分布规律[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1265–1268.
Dang T H, Guo S L, Fan J, *et al.* NO_3^- -N leaching and distribution in soil profile in dry highland of Loess Plateau under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(8): 1265–1268.
- [11] Cao L K, Chen G J, Lu Y T. Nitrogen leaching in vegetable fields in the suburbs of Shanghai[J]. Pedosphere, 2005, 15(5): 641–645.
- [12] Li X D, Masuda H, Koba K, Zeng H A. Nitrogen isotope study on nitrate-contaminated groundwater in the Sichuan Basin, China[J]. Water Air and Soil Pollution, 2007, 178: 145–156.
- [13] 钟茜, 巨晓棠, 张福锁. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 285–293.
Zhong Q, Ju X T, Zhang F S. Analysis of environmental endurance of winter wheat/summer maize rotation system to nitrogen in North China Plain[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(3): 285–293.
- [14] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 24–28.
Ju X T, Zhang F S. Nitrate accumulation and its implication to environment in north China[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(1): 24–28.
- [15] 郭胜利, 张文菊, 党廷辉, 等. 干旱半干旱地区农田土壤 NO_3^- -N深层积累及其影响因素[J]. 地球科学进展, 2003, (4): 584–591.
Guo S L, Zhang W J, Dang T H, *et al.* Accumulation of NO_3^- -N in deep layers of dry farmland and its affecting factors in arid and semi-arid areas[J]. Advance in Earth Sciences, 2003(4): 584–591.
- [16] 高肖贤, 张华芳, 马文奇, 魏静. 不同施氮量对夏玉米产量和氮素利用的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(1): 121–126, 131.
Gao X X, Zhang H F, Ma W Q, Wei J. Effects of nitrogen application rates on yield and nitrogen utilization of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2014, 22(1): 121–126, 131.
- [17] Hirel B, Le G J, Ney B, Gallais A. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(9): 2369–2387.
- [18] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同施氮量对夏玉米产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 土壤肥料, 2006, (2): 30–33.
Zhao Y, Tong Y A, Zhao H B. Effect of different N rates on yield of summer maize, fertilizer N recovery and N balance[J]. Soils and Fertilizers, 2006(2): 30–33.
- [19] 孙云保, 张民, 郑文魁, 等. 控释氮肥对小麦-玉米轮作产量和土壤养分状况的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 115–121.
Sun Y B, Zhang M, Zheng W K, *et al.* Effects of controlled release nitrogen fertilizer on yield and soil nutrient regime of wheat-corn rotation system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 115–121.
- [20] 郝小雨, 马星竹, 高中超, 等. 氮肥管理措施对黑土春玉米产量及氮素利用的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(4): 151–159.
Hao X Y, Ma X Z, Gao Z C, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer management on spring maize yield and nitrogen utilization in black soil[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(4): 151–159.
- [21] 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[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1493–1499.
Ju X T, Liu X J, Zou G Y, *et al.* Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(12): 1493–1499.
- [22] 李世清, 李东方, 李凤民, 等. 半干旱农田生态系统地膜覆盖的土壤生态效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 21–29.
Li S Q, Li D F, Li F M, *et al.* Soil ecological effects of plastic film

- mulching in semiarid agro-ecological system[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2003, 31(5): 21–29.
- [23] 张苗苗, 沈菊培, 贺纪正, 张丽梅. 硝化抑制剂的微生物抑制机理及其应用[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2077–2083.
Zhang M M, Shen J P, He J Z, Zhang L M. Microbial mechanisms of nitrification inhibitors and their application[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(11): 2077–2083.
- [24] 倪秀菊, 李玉中, 徐春英, 李巧珍. 土壤脲酶抑制剂和硝化抑制剂的 研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 145–149.
Ni X J, Li Y Z, Xu C Y, Li Q Z. Advance of research on urease inhibitor and nitrification inhibitor in soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(12): 145–149.
- [25] Serna M, Legaz F, Primo-Millo E. Improvement of the N fertilizer efficiency with dicyandiamide (DCD) in citrus trees[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1995, 43(1/3): 137–142.
- [26] 全智, 秦红灵, 李明德, 等. 氮肥优化减施对土壤-苜蓿系统氮磷平衡及产量效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 738–744.
Quan Z, Qin H L, Li M D, *et al.* Yield and nutrient balance of lettuce as influenced by reduced and optimized nitrogen application[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 738–744.
- [27] 刘建涛, 许靖, 孙志梅, 等. 氮素调控剂对不同类型土壤氮素转化的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2901–2906.
Liu J T, Xu J, Sun Z M, *et al.* Effects of different nitrogen regulators on nitrogen transformation in different soil types[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(10): 2901–2906.
- [28] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 于德清. 3,5-二甲基吡唑对尿素氮转化及 NO_3^- -N 淋溶的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 176–181.
Sun Z M, Wu Z J, Chen L J, Yu D Q. Effects of 3,5-dimethylpyrazole on soil urea-N transformation and NO_3^- -N leaching[J]. Environmental Science, 2007, 28(1): 176–181.
- [29] 李燕婷, 李秀英, 赵秉强, 等. 缓释复混肥料对玉米产量和土壤硝态氮淋失累积效应的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008, (5): 45–48.
Li Y T, Li X Y, Zhao B Q, *et al.* Effect of controlled-release compounded fertilizers on maize yields and leaching loss of nitrate in soil profile[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2008(5): 45–48.