

不同施肥模式对春玉米产量、水分利用效率及硝态氮残留的影响

郑利芳^{1,3}, 吴三鼎^{1,3}, 党廷辉^{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: 通过2年田间试验,研究了减量施氮和减氮配施不同比例控释肥对黄土旱塬春玉米产量、水分利用效率及土壤硝态氮残留量的影响,旨在为黄土高原旱作农业区提供合理的施肥管理模式。试验于2017年4月至2018年9月在黄土旱塬雨养农业区进行,供试作物为春玉米,采用半覆膜种植方式,一年一熟制。试验共设置CK(不施氮肥)、N1C1(控释尿素65%+普通尿素35%, N 200 kg/hm²)、N1C2(控释尿素50%+普通尿素50%, N 200 kg/hm²)、N1C3(控释尿素35%+普通尿素65%, N 200 kg/hm²)、N1(减氮模式,普通尿素, N 200 kg/hm²)、N2(传统施氮模式,普通尿素, N 250 kg/hm²)6个处理,测定土壤含水量、收获期土壤剖面(0—300 cm)中的硝态氮含量及春玉米产量。结果表明:与N2处理相比,减氮处理(N1)并没有减少作物产量,反而显著增加作物产量($p < 0.05$),2017年、2018年分别增加9.6%和6.9%,土壤水分利用效率分别提高13.3%和10.2%($p < 0.05$)。同等施氮量(200 kg/hm²)下,与全尿素N1处理相比,2017年配施不同比例控释肥的各处理降低了春玉米的产量和水分利用效率;2018年N1C2处理较N1处理显著增加春玉米的产量和水分利用效率($p < 0.05$),分别增加7.7%和11.6%。此外,试验2年后减氮模式N1和减氮配施一定比例的控释肥处理显著减少土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮的残留量($p < 0.05$),与N2处理相比,N1处理减少了61.2%;同等施氮量(200 kg/hm²)下,与N1处理相比,N1C2处理降低了50.8%。

关键词: 黄土旱塬; 减量施氮; 控释肥; 水分利用效率; 硝态氮; 春玉米

中图分类号:S143.1;S513 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2019)04-0221-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.031

Effects of Different Fertilization Modes on Spring Maize Yield, Water Use Efficiency and Nitrate Nitrogen Residue

ZHENG Lifang^{1,3}, WU Sanding^{1,3}, DANG Tinghui^{1,2}

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

Abstract: A two-years experiment was designed to examine effects of different nitrogen (N) reduction and controlled-release urea application ratio on spring maize yield, water use efficiency and nitrate-N residue, so as to provide a reasonable fertilization management model for the dryland farming systems on the Loess Plateau. The experiment was performed from April 2017 to September 2018 in the rain-fed agricultural area of the Loess Plateau. Spring maize was planted with half plastic film mulching in one crop per annum. The experiment included six treatments, CK (no nitrogen fertilization treatment), N1C1 (the treatment of 65% controlled-release urea and 35% urea, N 200 kg/hm²), N1C2 (the treatment of 50% controlled-release urea and 50% urea, N 200 kg/hm²), N1C3 (the treatment of 35% controlled-release urea and 65% urea, N 200 kg/hm²), N1 (reduce nitrogen fertilization mode, urea, N 200 kg/hm²), N2 (conventional nitrogen fertilization mode, urea, N 250 kg/hm²). The soil moisture content, the yield of spring maize and nitrate nitrogen content in soil profile (0—300 cm) at harvest period were measured. The results of two years experiment showed that compared with the N2 treatment, N1 treatment did not reduced the crop yield, but significantly increased the crop yield ($p < 0.05$), which increased by 9.6% and 6.9% respectively and significantly increased the water use efficiency ($p < 0.05$), by 13.3% and 10.2% respectively in 2017 and 2018. Under the same nitrogen application rate (200 kg/hm²), compared with N1, the treatment of applying

收稿日期:2019-03-08

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800105)

第一作者:郑利芳(1993—),女,硕士研究生,主要从事土壤化学与环境研究。E-mail:1121322832@qq.com

通信作者:党廷辉(1964—),男,研究员,主要从事土壤化学与环境研究。E-mail:dangth@ms.iswc.ac.cn

a certain proportion of controlled-release fertilizer reduced the yield of spring maize and the water use efficiency in 2017; the treatment of N1C2 significantly increased the yield of spring maize and the water use efficiency ($p < 0.05$) by 7.7% and 11.6%, respectively in 2018. In addition, after two years of experiment, the reducing nitrogen application and applying a certain proportion of controlled-release fertilizer could significantly reduce the amount of residual nitrate nitrogen in soil profile (0—300 cm) ($p < 0.05$), the N1 treatment reduced by 61.2% compared with the N2 treatment. Under the same nitrogen application rate (200 kg/hm²), the N1C2 treatment reduced by 50.8% compared with the N1 treatment.

Keywords: the semiarid Loess Plateau; reduce nitrogen fertilization; controlled-release fertilizer; water use efficiency; nitrate nitrogen; spring maize

氮素是植物生长的必需营养元素之一,氮肥的施用在一定程度上能显著提高作物产量^[1],陕西省的氮肥用量已从 1990 年的 48.6 万 t 增加到 2012 年的 98.3 万 t,其用量总体呈逐年上升的趋势^[2],但是施用的过量氮肥并不能完全被植物吸收利用。有研究^[3]表明,我国当前的氮肥利用率非常低,平均只有 35%;党廷辉等^[4]在黄土旱塬上的研究发现,小麦当季的氮肥利用率仅为 36.6%~38.4%。大量不能被植物吸收利用的氮则会以硝态氮的形式进入水体和土壤或以气态的形式进入大气,从而造成水体的富营养化、土壤板结和酸化、温室效应以及地下水的硝酸盐污染等问题^[5-6]。因此,为减轻过量施用氮肥对环境产生的负面影响,必须要优化氮肥的投入。

控释肥指采用聚合物包膜,可定量控制肥料养分释放的数量和释放周期,使养分的释放与作物不同生长时期的需肥量相吻合的包膜尿素^[7]。近年来,大量的研究^[8-9]发现,控释肥能够提高氮肥的利用率,增加作物产量,其中赵斌等^[10]研究发现,控释肥会显著增加作物的千粒重,从而增加夏玉米的产量;赵思远等^[11]研究表明,与传统施肥处理相比,缓/控释肥料处理能够使作物的吸氮量与产量分别增加 4.5%~10.6%及 2.6%~5.2%,并且能够有效地延缓耕层土壤中的硝态氮向深层土壤迁移;同样,Zheng 等^[12]研究也发现,与普通尿素相比,施用控释肥能使玉米产量增加 6.8%~9.8%,氮肥利用率提高 13.2%~14.3%,同时,混施控释肥还可以增加土壤 0—40 cm 土层的硝态氮含量,减少土壤硝态氮向深层土壤的淋溶。

黄土高原是我国北方主要的旱作农业区,农田面积达 14.58 万 km²,其中 70%属于雨养农业区,土壤总氮含量仅为 0.042%~0.077%^[13],水资源短缺和土壤贫瘠是该地区农业发展的重要限制性因素^[14]。春玉米是黄土高原农业区重要的粮食作物之一,播种面积达 190 万 hm²^[15]。施肥是保证作物产量的重要措施之一,而该地区常采用“一炮轰”施肥方式,易造成作物生长后期氮素供应不足。因此,该地区为了提高作物产量,常过量施用氮肥,结果会增加环境污染

的风险。目前大量的研究^[16]主要集中在控释肥对作物产量和提高氮肥利用率上,而对水分利用效率和土壤硝态氮残留影响的研究较少,且控释肥因其价格偏高,常用于水果花卉等经济价值较高的作物上,在农田还未大量推广使用。因此,本研究基于 2 年的田间观察,以探究减量施氮和减氮配施不同比例的控释肥对春玉米产量、水分利用效率及硝态氮残留的影响,以期为黄土高原旱作农业区春玉米的生产发展提供合理的施肥管理建议。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于陕西省长武县境内(107°40'E,35°12'N),海拔 1 200 m,1985—2016 年多年平均降水量 560 mm,最低年份降水量 296 mm,最高年份降水量 954 mm,降雨主要集中在夏季,7—9 月的降水量占全年降水量的 57%。年平均气温 9.2 °C,≥10 °C 积温 3 029 °C,年日照时间 2 230 h,日照率为 51%,年辐射总量为 484 kJ/cm²,无霜期 171 d,无灌溉条件,属于典型的雨养农业区,试验地土壤为黏壤质黑垆土。2017 年布置试验时耕层土壤有机碳含量 6.50 g/kg,全氮含量 0.80 g/kg,速效磷含量 5.0 mg/kg,速效钾 129.3 mg/kg,碳酸钙含量 10.5%,碱解氮含量 37 mg/kg,pH 8.4,土壤容重 1.35 g/cm³,土壤田间持水量为 21.0%~23.8%,凋萎含水量为 9%~12%。本试验期间春玉米生育期的降雨量分别为 368 mm(2017 年)和 480 mm(2018 年),数据来源于长武县气象局网站。

1.2 试验设计

试验于 2017 年 4 月至 2018 年 9 月进行,2017 年春玉米的播种日期为 4 月 26 日,收获日期为 9 月 24 日,2018 年的播种日期为 4 月 26 日,收获日期为 9 月 28 日,供试作物为春玉米,品种为“先玉 335”。春玉米采用半覆膜种植方式,供试地膜为 0.008 mm×750 mm 地膜,株行距 30 cm×60 cm,密度为 60 000 株/hm²。试验共设置:(1)CK(不施氮肥);(2)N1C1(控释尿素 65%+普通尿素 35%,N 200 kg/hm²);(3)N1C2(控释尿素 50%+

普通尿素 50%, N 200 kg/hm²); (4) N1C3(控释尿素 35%+普通尿素 65%, N 200 kg/hm²); (5) N1(减氮模式, 普通尿素, N 200 kg/hm²); (6) N2(传统施氮模式, 普通尿素, N 250 kg/hm²) 6 个处理, 每个处理重复 3 次, 随机区组排列。供试的氮肥为普通尿素(含氮 46.4%) 和树脂包膜控释尿素(含氮 45%), 磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%), 钾肥为硫酸钾(含 K₂O 51%), 各处理除氮肥施用量不同外, 均施磷肥 120 kg/hm², 钾肥 38 kg/hm²。每个小区面积 27.5 m² (5 m×5.5 m), 小区间距 0.5 m, 四周设置保护行 1 m。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤水分及硝态氮含量的测定 春玉米播种前和收获后在每个小区随机选取 3 点, 用直径 3 cm 的土钻分层采集 0—300 cm 的土壤样品, 0—100 cm 范围内每层 10 cm, 100 cm 以下每层 20 cm, 将各层 3 点的土样混合后装入塑封袋中用冰盒运回实验室, 冷藏备用。在实验室内, 将待测土样剔除杂质、石块以及肉眼可见的根系过 2 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, 采用流动分析仪测定土壤硝态氮含量; 采用烘干称重法测定土壤质量含水量。

1.3.2 春玉米产量的测定 春玉米收获期, 每个小区选取 16 m² (约 90 株玉米) 的样方进行取样, 分别对地上部和玉米棒称重, 然后从中选取具有代表性的 15 株玉米带回实验室, 脱粒后风干, 称取百粒重计算籽粒产量。

1.4 计算公式

(1) 土壤储水量的计算公式为:

$$W = h \times a \times \theta \times 10 / 100$$

式中: W 为土壤储水量(mm); h 为土层深度(cm); a 为土壤容重(g/cm³); θ 为土壤质量含水量(%)。

(2) 旱塬作物耗水量的计算公式为:

$$ET = P + \Delta W$$

式中: ET 为作物生育期耗水量(mm); P 为作物生育期降雨量(mm); ΔW 为作物播种期土壤储水量与收获期土壤储水量的差(mm)。

(3) 作物水分利用效率(WUE)的计算公式为:

$$WUE = Y / ET$$

式中: WUE 为作物水分利用效率(kg/(hm²·mm)); Y 为作物产量(kg/hm²); ET 为作物生育期耗水量(mm)。

(4) 土壤硝态氮残留量的计算公式为:

$$A = h \times a \times d \times 10 / 100$$

式中: A 为土壤硝态氮残留量(kg/hm²); h 为土层深度(cm); a 为土壤容重(g/cm³); d 为土壤硝态氮含量(mg/kg)。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010、Origin 9.0 及 SPSS 25.0 等软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对春玉米产量及性状的影响

由表 1 中 2 年的试验数据可以看出, 各施氮处理的春玉米籽粒产量均显著高于对照(CK) ($p < 0.05$); N1 处理的春玉米籽粒产量显著高于 N2 处理 ($p < 0.05$), 2017 年、2018 年分别增产 9.6% 和 6.9%, 说明施氮能明显增加春玉米籽粒产量, 并且在一定程度上减量施氮不会造成作物减产, 反而保障作物的高产。同等施氮量(200 kg/hm²) 下, 2017 年春玉米籽粒产量以 N1 处理最高 14 396.6 kg/hm², 配施不同比例控释肥处理的春玉米籽粒产量均显著低于 N1 处理 ($p < 0.05$), 分别降低 18.0% (N1C1), 14.8% (N1C2) 和 28.2% (N1C3), 其中 N1C2 处理降低的最少; 2018 年的春玉米籽粒产量以 N1C2 处理最高, 为 15 777.2 kg/hm², 分别较 N1、N1C1 和 N1C3 处理增产 7.7%, 10.0% 和 15.3%, 其中 N1C1 和 N1C3 处理的春玉米籽粒产量低于 N1, 分别降低 2.1% 和 6.6%。2018 年各处理的春玉米籽粒产量均高于 2017 年。从产量的构成因素来看, 与对照(CK) 相比, 各施肥处理明显增加了春玉米的每穗粒数 ($p < 0.05$), 且 N1 处理的每穗粒数较 N2 处理略有增加; 同等施氮量(200 kg/hm²) 下, 每穗粒数和百粒重均以 N1 和 N1C2 处理较高, 说明每穗粒数和百粒重的增加是产量增加的重要因素。

表 1 不同施肥模式对春玉米产量及性状的影响

| 处理 | 粒数 | 百粒重/g | 籽粒产量/(kg·hm ⁻²) | | |
|------|----------|---------|-----------------------------|-----------|---------|
| | | | 2017 年 | 2018 年 | 均值 |
| CK | 361.23d | 24.17c | 2845.9d | 3885.0d | 3365.5 |
| N1C1 | 650.02bc | 31.11b | 11804.3bc | 14339.7bc | 13072.0 |
| N1C2 | 691.98a | 32.87ab | 12272.5bc | 15777.2a | 14024.9 |
| N1C3 | 668.06b | 31.02b | 10341.9c | 13689.0c | 12015.5 |
| N1 | 668.74b | 32.25b | 14396.6a | 14654.3b | 14525.5 |
| N2 | 640.04c | 33.62a | 13137.0b | 13708.3c | 13422.7 |

注: 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。

2.2 不同施肥模式对土壤剖面含水量动态变化的影响

由图 1 可知, 2017 年春玉米播种前, 0—200 cm 土层范围内土壤含水量均保持在 19.4%~22.6% 范围内, 2017 年收获后除对照(CK) 外, 90—160 cm 土层范围内各施氮处理的土壤含水量下降比较明显, 以 N1C1 处理下降幅度最大, 下降 45.9%; 2018 年播种前由于降雨少使得 0—20 cm 土层范围内各处理的土壤含水量普遍较低保持在 17.2%~21.4%, 范围内 20—160 cm 土层范围内各施氮处理的土壤含水量差异不大, 保持在 19.2%~22.6% 范围内; 2018 年春玉米收获后土壤 0—200 cm 土层范围内的土壤含水量

与播前有明显区别,收获前 74.6 mm 的降雨量使得土壤 0—20 cm 土层范围内的含水量普遍较高保持在 22.1%~23.2% 范围内,除对照(CK)外,各施氮处理 80—160 cm 土层范围内的土壤含水量下降比较明

显,且以 N1C1 处理下降幅度最大,降幅 28.8%,N1C1、N1C3 和 N2 处理的土壤含水量低于 N1C2 和 N1 处理,160 cm 以下各施氮处理的土壤含水量差异不大,保持在 17.4%~18.5% 范围内。

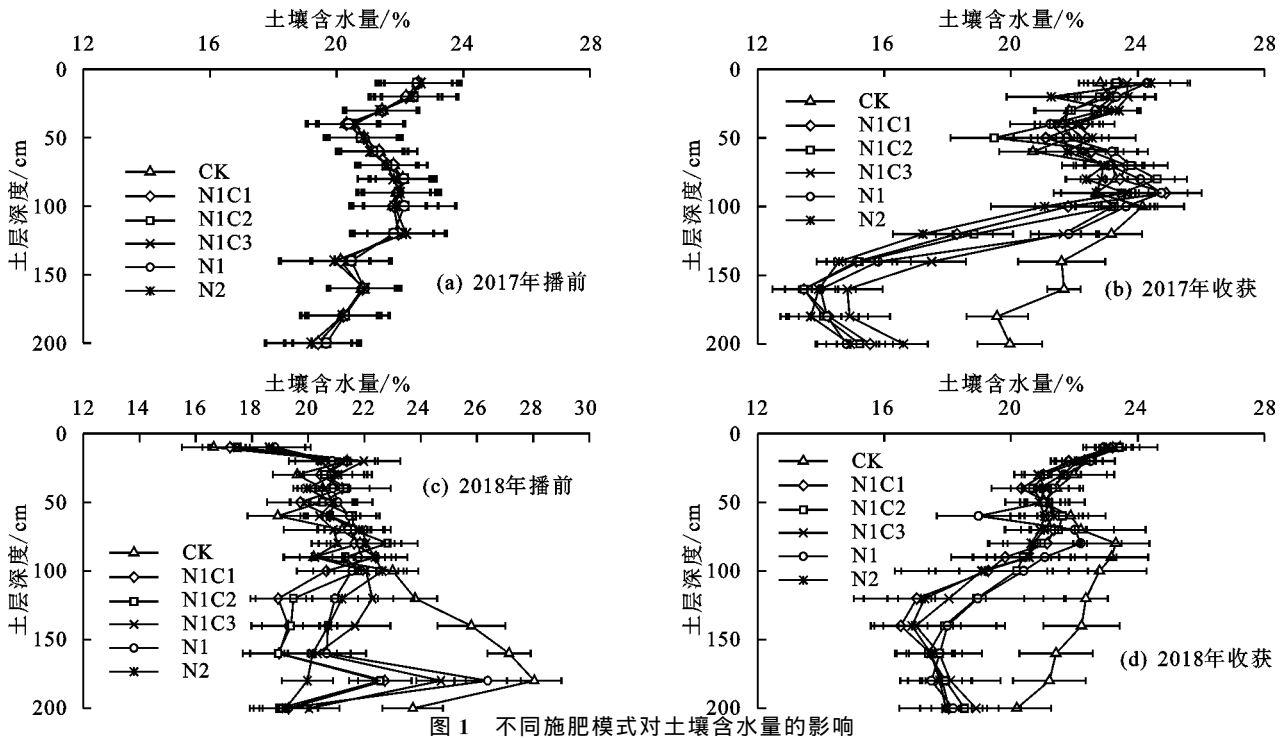


图 1 不同施肥模式对土壤含水量的影响

2.3 不同施肥模式对土壤耗水量及水分利用效率的影响

从表 2 可以看出,不同施氮处理对土壤 0—200 cm 土层范围内的耗水量会产生不同影响,其中 N1 处理的土壤耗水量较 N2 略有下降。同等施氮量 ($200 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 下,2017 年土壤耗水量以 N1C3 处理最低为 384.93 mm,较 N1、N1C1 和 N1C2 分别降低 6.2%,7.9% 和 2.2%;2018 年的土壤耗水量以 N1C2 处理最低为 483.07 mm,较 N1、N1C1 和 N1C3 分别降低 3.5%,5.1% 和 6.2%。不同施氮处理对土壤水分利用效率也有不同的影响,本试验结果表明,施氮会显著提高土壤的水分利用效率 ($p < 0.05$)。2 年试验数据中,N1 处理的水分利用效率均显著高于 N2 处理 ($p < 0.05$),2017 年、2018 年分别提高 13.3% 和 10.2%。同等施氮量 ($200 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 下,2017 年以 N1 处理的土壤水分利用效率最高 35.08%,较 N1C1、N1C2 和 N1C3 处理,分别增加 24.2%,12.5% 和 30.6%,其中配施不同比例控释肥处理间以 N1C2 处理最高 31.17%,较 N1C1 和 N1C3 分别增加 10.4% 和 16.0%;2018 年以 N1C2 处理的水分利用效率最高 32.66%,较 N1C1、N1C3 和 N1 处理分别提高 15.9%,22.8% 和 11.6%,说明减氮模式和减氮配施一定比例的控释肥处理均能够降低土壤的耗水量,提高土壤的水分利用效率。

表 2 不同施肥模式对土壤耗水量及水分利用率的影响

| 处理 | 土壤耗水量/ mm | | | 土壤水分利用率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$) | | |
|------|--------------|---------|--------|---|---------|-------|
| | 2017 年 | 2018 年 | 均值 | 2017 年 | 2018 年 | 均值 |
| CK | 345.26c | 510.26a | 427.76 | 8.24d | 7.61d | 7.93 |
| N1C1 | 418.03ab | 509.12a | 463.58 | 28.24c | 28.17bc | 28.21 |
| N1C2 | 393.75b | 483.07b | 438.41 | 31.17b | 32.66a | 31.92 |
| N1C3 | 384.93b | 514.85a | 449.89 | 26.87c | 26.59c | 26.73 |
| N1 | 410.40ab | 500.78a | 455.59 | 35.08a | 29.26b | 32.17 |
| N2 | 424.52a | 516.27a | 470.40 | 30.95bc | 26.55c | 28.75 |

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。

2.4 不同施肥模式对土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮含量的影响

试验 2 年后的数据显示,不同施氮处理下土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮含量的分布存在差异(图 2),与对照(CK)相比,施氮明显增加土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮的含量,其大小依次为 $\text{N2} > \text{N1} > \text{N1C1} > \text{N1C2} > \text{N1C3} > \text{CK}$,以 N2 处理最高,分别在 70 cm ($8.2 \text{ mg}/\text{kg}$),140 cm ($4.7 \text{ mg}/\text{kg}$) 和 240 cm ($8.7 \text{ mg}/\text{kg}$) 出现峰值,平均为 $4.4 \text{ mg}/\text{kg}$;减量施氮的各处理其土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮含量平均为:N1 ($1.9 \text{ mg}/\text{kg}$)、N1C1 ($1.6 \text{ mg}/\text{kg}$)、N1C2 ($1.0 \text{ mg}/\text{kg}$)、N1C3 ($0.6 \text{ mg}/\text{kg}$) 均低于 N2 处理,说明与 N2 处理相比,减量施氮可以降低土壤剖面中硝态氮的含量。同等施氮量 ($200 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 下,配施一定比

例的控释肥处理,会影响春玉米收获期土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮的含量并使其呈现出不同的分布规律,0—100 cm 范围内 N1 处理的土壤硝态氮含量呈波动下降趋势,波动幅度为 3.7~1.2 mg/kg,而配施一定比例的控释肥 N1C2 和 N1C3 处理的土壤硝态氮含量随土层深度的增加逐渐下降;100 cm 土层以下土壤剖面中硝态氮含量趋于稳定,配施一定比例的控释肥 N1C3 和 N1C2 处理其土壤剖面中硝态氮的含量要低于 N1 处理,说明配施一定比例的控释肥能够减少土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮的含量。

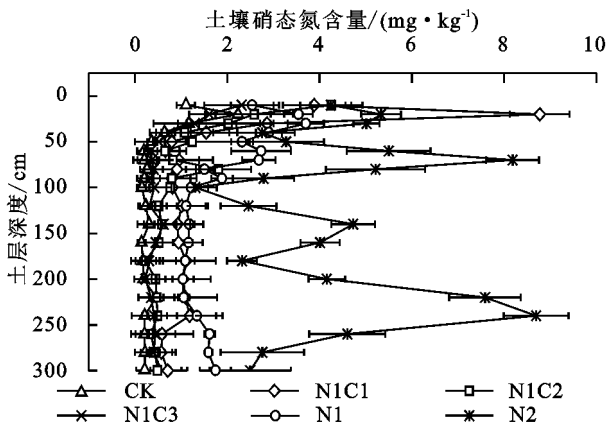


图2 2018年春玉米收获后土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮分布
2.5 不同施肥模式对土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮残留量的影响

从表3可以看出,与对照处理相比,各施氮处理增加土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮的残留量,其中以 N2 处理最高,其残留量为 177.2 kg/hm²,高于减量施氮的各处理,说明减量施氮可以降低收获期土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮的残留量。

表3 不同施肥模式对2018年春玉米收获后土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮残留量的影响

| 处理 | 单位:kg/hm ² | | |
|------|-----------------------|----------|------------|
| | 0—300 cm | 0—100 cm | 100—300 cm |
| CK | 15.1d | 8.8c | 6.3c |
| N1C1 | 54.4b | 29.7b | 24.7bc |
| N1C2 | 33.8c | 21.6bc | 12.2c |
| N1C3 | 22.4cd | 11.3c | 11.1c |
| N1 | 68.7b | 33.8b | 34.9b |
| N2 | 177.2a | 58.9a | 118.3a |

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平。

同等施氮量(200 kg/hm²)下,0—300 cm 土层范围内土壤硝态氮残留量的大小依次为 N1(68.7 kg/hm²)>N1C1(54.4 kg/hm²)>N1C2(33.8 kg/hm²)>N1C3(22.4 kg/hm²),N1C1、N1C2、N1C3 处理其 0—300 cm 土层范围内土壤硝态氮的残留量较 N1 处理分别降低20.8%,50.8%和67.4%,说明配施一定比例的控释肥能够降低土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮的残留量;100—

300 cm 土层范围内土壤硝态氮的残留量以 N1 处理较高为 34.9 kg/hm²,N1C1、N1C2 和 N1C3 处理较其分别降低 29.2%,65.0%和 68.2%,说明配施不同比例的控释肥能减少土壤硝态氮向深层土壤的淋溶。

3 讨论

施氮量与作物产量密切相关,在一定程度上施氮是保持作物高产的重要措施,但是过量施氮易造成环境污染。2年试验数据均表明,施氮能明显增加春玉米籽粒产量且在传统施氮的基础上减量施氮不会造成作物的减产,其中 N1 处理较 N2 处理显著增加春玉米籽粒产量($p < 0.05$),2017年、2018年分别增加9.6%和6.9%。董强等^[17]的研究也得到了类似的结论,但李恩尧等^[18]研究发现,当氮磷减少30%时玉米表现为减产,这可能与当地的施肥水平和土壤本底养分有关。同等施氮量(200 kg/hm²)下,2017年春玉米籽粒产量以 N1 处理最高 14 396.6 kg/hm²,配施不同比例控释肥处理的春玉米籽粒产量均低于 N1 处理,分别降低 18.0%(N1C1)、14.8%(N1C2)和 28.2%(N1C3);2018年以 N1C2 处理的春玉米籽粒产量最高,为 15 777.2 kg/hm²,较 N1、N1C1 和 N1C3 处理分别增产 7.7%,10.0%和 15.3%。此外,2017年各处理的春玉米籽粒产量均低于 2018年,这主要与试验期间玉米生育期内不同的降雨量有关。李伟等^[19]研究也得到了类似的结论,当控释尿素与普通尿素的掺混比例为50%时,增产效果最好;但是姬景红等^[20]研究发现,施氮量为 175 kg/hm²时配施60%的控释肥增产效果最好;也有在偏沙型和偏黏型土壤中的研究^[21]发现,配施30%的控释肥最适宜,其原因可能与不同研究区的气候、土壤质地、施肥水平、土壤本底养分和控释肥种类有关。

提高水分利用效率是干旱地区农业发展追求的目标之一。2年的试验结果显示,N1处理的水分利用效率均显著高于 N2 处理($p < 0.05$),2017年、2018年分别提高13.3%和10.2%。同等施氮量(200 kg/hm²)下,2017年以 N1 处理的土壤水分利用效率最高为 35.08%,较 N1C1、N1C2 和 N1C3 处理,分别增加 24.2%,12.5%和 30.6%,配施不同比例控释肥处理间以 N1C2 处理最高为 31.17%,较 N1C1 和 N1C3 处理分别增加 10.4%和 16.0%;2018年以 N1C2 处理的水分利用效率最高为 32.66%,较 N1C1、N1C3 和 N1 处理分别提高 15.9%,22.8%和 11.6%,邵国庆等^[22]和吴得峰等^[23]的研究也发现,施用缓控肥能提高水分利用效率,但是也有研究^[24]发现,普通尿素的水分利用效率高于控释尿素,这可能与作物品种和

控释肥类型的不同有关。

在北方旱作模式下,施入的普通尿素会很快水解成 NH_4^+ , 1~2 周就会在氨氧化微生物的作用下完全被氧化为 NO_3^- —N^[25]。由于 NO_3^- 是一种负离子不易被土壤胶体吸附,当土壤中硝态氮的含量大于植物生长所需要的量时,过量的硝态氮则会在降雨集中季节随水方向下淋溶^[26]。本试验研究发现,同等施氮量(200 kg/hm²)下,配施一定比例控释肥的 N1C1 和 N1C2 处理,其土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮的残留量低于 N1 处理,分别降低 20.8% 和 50.8%,这与谷佳林等^[27]、茹淑华等^[21]的研究结果一致。

从测定结果(图 3)看,与全尿素处理相比,配施一定比例控释肥的各处理其土壤耕层的硝态氮含量在春玉米的整个生育期内保持相对稳定,说明试验用的控释尿素,其氮素释放缓慢且相对稳定,会影响春玉米生长关键期的养分需求和作物生长,进而影响土壤的水分利用效率,延缓土壤硝态氮的快速淋溶,从而起到阻控硝态氮向深层土壤淋溶的风险。

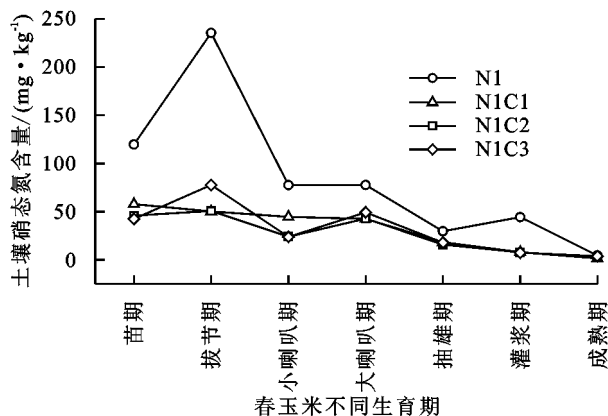


图 3 2018 年春玉米不同生育期土壤耕层(0—20 cm)硝态氮的含量

4 结论

(1)与传统施氮处理(N2)相比,减量施氮处理(N1)并没有造成作物的减产反而显著增加作物产量($p < 0.05$),2017 年、2018 年分别增加 9.6% 和 6.9%;同等施氮量(200 kg/hm²)下,2017 年与全尿素 N1 处理相比,配施不同比例控释肥的各处理降低了春玉米产量;2018 年配施 50% 控释肥的 N1C2 处理显著增加了春玉米产量($p < 0.05$),较 N1 处理增产 7.7%。

(2)2 年的试验结果显示,N1 处理的水分利用效率均显著高于 N2 处理($p < 0.05$),2017 年、2018 年分别提高 13.3% 和 10.2%;同等施氮量(200 kg/hm²)下,2017 年水分利用效率以 N1 处理最高为 35.08%,2018 年以 N1C2 处理的水分利用效率最高为 32.66%,且显著高于 N1 处理($p < 0.05$),较其提高 11.6%。

(3)与 N2 处理相比,N1 处理明显降低了土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮的残留量($p < 0.05$),降低幅度达 61.2%;同等施氮量(200 kg/hm²)下,配施一定比例控释肥的 N1C3 和 N1C2 处理其土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮的残留量显著低于 N1 处理($p < 0.05$),分别降低 67.4% 和 50.8%,同时,配施一定比例的控释肥处理可以增加 0—100 cm 土层中硝态氮的残留量,减少土壤硝态氮向深层土壤的淋溶。

因此,减量施氮处理(N1)和减氮配施 50% 的控释肥处理(N1C2),既可以保障春玉米的高产,还可以提高土壤的水分利用效率、减少收获期土壤剖面(0—300 cm)中硝态氮的残留量,可推荐作为黄土高原旱作农业区春玉米的合理施肥管理模式。

参考文献:

- [1] David T, Christian B, Jason H, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(50): 20260-20264.
- [2] 王小英. 陕西省养分资源利用时空变化特征研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [3] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
- [4] 党廷辉, 蔡贵信, 郭胜利, 等. 用¹⁵N 标记肥料研究旱地冬小麦氮肥利用率与去向[J]. 核农学报, 2003, 17(4): 280-285.
- [5] 颜晓元, 夏龙龙, 逸超普. 面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 177-183.
- [6] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [7] 樊小林, 刘芳, 廖照源, 等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 463-473.
- [8] Geng J B, Chen J Q, Sun Y B, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency and yield of wheat and corn[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(4): 1666.
- [9] Wang S Q, Zhao X, Xing G X, et al. Improving grain yield and reducing N loss using polymer-coated urea in southeast China[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(3): 1103-1115.
- [10] 赵斌, 董树亭, 王空军, 等. 控释肥对夏玉米产量及田间氮挥发和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2678-2684.
- [11] 赵思远, 王松禄, 郑西来, 等. 缓/控释肥料对冬小麦产量、氮素利用及土壤硝态氮分布的影响[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(10): 78-82.
- [12] Zheng W K, Liu Z G, Zhang M, et al. Improving crop

- yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. *Field Crops Research*, 2017, 205:106-115.
- [13] 吴得峰,姜继韶,孙棋棋,等.减量施氮对雨养区春玉米产量和环境效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(6):1202-1209.
- [14] 郭胜利,党廷辉,郝明德.施肥对半干旱地区小麦产量、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积和水分平衡的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(4):754-760.
- [15] 李军,王立祥,邵明安,等.黄土高原地区玉米生产潜力模拟研究[J]. *作物学报*, 2002, 28(4):555-560.
- [16] Lu Y L, Kang T T, GAO J B, et al. Reducing nitrogen fertilization of intensive kiwifruit orchards decreases nitrate accumulation in soil without compromising crop production[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(6):1421-1431.
- [17] 董强,吴得峰,党廷辉,等.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[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4):856-863.
- [18] 李恩尧,邱亚群,彭佩钦,等.洞庭湖红壤坡地减氮控磷对玉米产量和径流氮磷的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4):32-35.
- [19] 李伟,李絮花,李海燕,等.控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(4):699-706.
- [20] 姬景红,李玉影,刘双全,等.控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(2):153-160.
- [21] 茹淑华,张国印,耿暖,等.不同施肥措施对夏玉米产量和土壤硝态氮淋失的影响[J]. *河北农业科学*, 2012, 16(2):46-50.
- [22] 邵国庆,李增嘉,宁堂原,等.灌溉和尿素类型对玉米水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3):58-63.
- [23] 吴得峰,崔全红,王军尚.黄土旱塬施氮模式对春玉米产量和水肥利用效率的影响[J]. *西部大开发(土地开发工程研究)*, 2017, 2(11):47-54.
- [24] 易镇邪,王璞,刘明,等.不同类型氮肥与施氮量下夏玉米水、氮利用及土壤氮素表观盈亏[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(1):63-67.
- [25] 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.
- [26] Guo Y J, Li B W, Di H J, et al. Effects of dicyandiamide (DCD) on nitrate leaching, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide in a greenhouse vegetable production system in northern China[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58(5):647-658.
- [27] 谷佳林,边秀举,刘梦星,等.不同缓控释氮肥对高羊茅草坪生长及硝态氮土壤残留与淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(5):173-177.
- [12] 张万宝,李聪敏,曹峰.黄河水滴灌工程泥沙处理效果评估[J]. *农业工程*, 2015, 5(4):107-109.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:科学技术出版社,1978:474-490.
- [14] 黄建维.粘性泥沙在静水中沉降特性的试验研究[J]. *泥沙研究*, 1981(2):30-41.
- [15] 陈洪松,邵明安. NaCl对细颗粒泥沙静水絮凝沉降动力学模式的影响[J]. *水利学报*, 2002, 33(8):63-67.
- [16] 陈洪松,邵明安,李占斌. NaCl对细颗粒泥沙静水絮凝沉降影响初探[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1):131-134.
- [17] 蒋国俊,姚炎明,唐子文.长江口细颗粒泥沙絮凝沉降影响因素分析[J]. *海洋学报*, 2002, 24(4):51-57.
- [18] 金鹰,王义刚,李宇.长江口粘性细颗粒泥沙絮凝试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(3):61-63.
- [19] 关许为,陈英祖.长江口泥沙絮凝静水沉降动力学模式的试验研究[J]. *海洋工程*, 1995(1):46-50.
- [20] 王党伟,吉祖稳,邓安军,等.絮凝对三峡水库泥沙沉降的影响[J]. *水利学报*, 2016, 47(11):1389-1396.
- [21] 徐志刚.长江口细颗粒泥沙的絮凝特性试验[J]. *海洋学研究*, 1984(3):49-54.
- [22] 杨扬,庞重光,金鹰,等.长江口北槽粘性细颗粒泥沙特性的试验研究[J]. *海洋科学*, 2010, 34(1):12-24.
- [23] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983.
- [24] 柴朝晖,李昊洁,王茜,等.粘性泥沙絮凝研究进展[J]. *长江科学院院报*, 2016(2):1-9.

(上接第146页)