

控释氮肥减量施用对南方丘陵地区春玉米土壤 渗漏水氮素动态及其损失的影响

谢勇, 荣湘民, 何欣, 石敦杰, 唐丽, 刘强, 张玉平

(湖南农业大学资源环境学院, 农田污染控制与农业资源利用湖南省重点实验室,

植物营养湖南省普通高等学校重点实验室, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 长沙 410128)

摘要: 为提高我国南方丘陵地区旱地土壤作物种植的氮肥利用率, 减少资源浪费和降低环境污染风险, 通过采用田间小区定位试验进行土壤养分渗漏观测, 研究比较了不施肥处理(T1)、普通尿素处理(T2)以及不同施氮量的控释氮肥处理(T3~T6)的 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的流失浓度变化及其损失负荷特征。结果表明: 在 168~240 kg N/hm² 施氮水平变化内, 渗漏水在 3 888~3 948 L 之间, 即施肥量的增加或减少对渗漏体积的影响不显著 ($P>0.05$); 控释氮肥处理 T3 的 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均流失浓度分别是 32.66, 29.41, 0.26 mg/L, 比等氮量施用的 T2 处理分别降低了 24.99% ($P<0.01$), 25.56% ($P<0.01$) 和 25.71% ($P<0.05$); 同样 T3 在损失负荷方面 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 53.07, 47.14, 0.47 kg N/hm², 较 T2 分别降低了 24.10% ($P<0.01$), 25.62% ($P<0.01$) 和 18.97% ($P>0.05$)。当控释氮肥减氮 10%, 20%, 30% 时, 其 TN 损失浓度为 28.81, 26.50, 24.34 mg/L, 较 T3 分别降低了 11.79% ($P>0.05$), 18.86% ($P<0.05$), 25.47% ($P<0.05$); 损失负荷为 41.78, 36.62, 33.90 kg N/hm², 较 T3 分别降低了 21.27% ($P<0.01$), 31.00% ($P<0.01$), 36.12% ($P<0.01$)。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是渗漏水氮素损失的关键成分, 占 TN 损失负荷 88.83%~92.75%, DON 次之。控释氮肥在 192 kg N/hm² 的投入下能够有效的减少氮素渗漏损失, 降低环境污染风险, 并且还可以增产增效。

关键词: 控释氮肥; 施氮量; 渗漏; 氮素损失

中图分类号: S143.1⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0211-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2017.04.034

Effects of CRNF Application on Nitrogen Dynamics and Loss of Leachate Water in Spring Maize Soil in Hilly Area of South China

XIE Yong, RONG Xiangmin, HE Xin, SHI Dunjie, TANG Li, LIU Qiang, ZHANG Yuping

(Hunan Provincial Key Laboratory of Farmland Pollution Control and Agricultural Resources Use, Hunan

Provincial Key Laboratory of Nutrition in Common University, National Engineering Laboratory on Soil and Fertilizer
Resources Efficient Utilization, College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

Abstract: In order to improve the nitrogen use efficiency and reduce the resource waste and the risk of environmental pollution, a study on the leakage loss of controlled release nitrogen fertilizer (CRNF) application in hilly area of South China was conducted. The effects of CRNF (T3~T6) application on nitrogen dynamics and loss of TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in leachate water under different treatments in spring maize soil were explored. The results showed that the leakage water was 3 888~3 948 L when the nitrogen application rate was 168~240 kg N/hm², hence fertilizer application rate had no significant effect on the leakage volume ($P>0.05$). Average leaching loss concentration of TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ under T3 treatment were as follows 32.66 mg/L, 29.41 mg/L, and 0.26 mg/L. Compared with the application of common urea (T2), T3 treatment with the same amount of nitrogen application rate decreased by 24.99% ($P<0.01$), 25.56% ($P<0.01$) and 25.71% ($P<0.05$), respectively. Meanwhile, the loss load decreased by 24.10% ($P<0.01$), 25.62% ($P<0.01$) and 18.97% ($P>0.05$), respectively, and namely 53.07, 47.14 and 0.47 kg N/hm². When the nitrogen fertilizer application rate was reduced by 10%, 20%, 30%,

收稿日期: 2017-02-20

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC09B01); 省教育厅平台项目(15K056)

第一作者: 谢勇(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事农业面源污染研究。E-mail: 2497000692@qq.com

通信作者: 荣湘民(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事养分资源高效安全利用研究。E-mail: rongxm2005@126.com

the corresponding average TN loss concentration were 28.81, 26.50 and 24.34 mg/L, which decreased by 11.79% ($P>0.05$), 18.86% ($P<0.05$), 25.47% ($P<0.05$) compared to T3. Similarly, the loss load were 41.78, 36.62, and 33.90 kg N/hm², which decreased by 21.27% ($P<0.01$), 31.00% ($P<0.01$), 36.12% ($P<0.01$), respectively. NO₃⁻-N is the major component of leakage nitrogen loss, which accounted for 88.83%~92.75% of TN loss load, and DON was also not negligible. During the planting of spring maize in dry land, the CRNF application rate with 192 kg/hm² could effectively reduce the loss of nitrogen leaching and the risk of environmental pollution, and even increase yield and efficiency.

Keywords: CRNF; nitrogen application rate; leachate water; nitrogen loss

氮肥投入是农业生产追求高产的必然选择,但是过量投入的同时伴随着大量氮素养分损失的风险。已有研究显示,我国农田氮肥利用率仅有 20%~40%,大部分氮素以气相或液相形式损失进入大气或水体,造成了资源浪费和环境污染的后果^[1]。其中,氮素的渗漏损失是地下水污染问题的重要原因,某些地区的年平均施肥量超过了 600 kg N/hm²,约 30%~50%的氮素经过渗漏途径进入地下水,已经对社会经济发展和人体健康构成威胁^[2]。因此,寻求一种降低氮肥渗漏损失,提高肥料利用率,节约资源和防止氮污染的农业生产对策是我国生态农业发展亟待解决的问题。目前,前人从肥料品种、施肥量、施肥方法、降雨特征、土壤坡度等方面做了大量研究。如在肥料品种方面,玉米种植所需肥料以缓控释肥和硝态氮肥为主,较铵态氮肥或者酰胺态氮肥可以有效降低 71.60%~119.95%的氮素损失^[3],刘敏等^[4]认为,硫膜与树脂膜控释尿素相比,树脂膜控释尿素对 0—60 cm 土层的土壤硝态氮向下运移的控制优于硫膜控释尿素,有利于减少氮素潜在的淋洗、迁移损失;在施肥量调控方面,淮贺举等^[5]研究表明,春玉米施肥量为 100 kg/hm² 时的利用效率最高,达 25.8%,而且土壤氮素渗漏的硝态氮含量对环境的影响不构成威胁;商放泽等^[6]研究认为,142.5 kg/hm² 施氮量可有效减少 NO₃⁻-N 的渗漏损失,降低土壤 NH₄⁺-N 和 TN 的含量,对地下水构成的潜在污染风险最小;在降雨影响方面,袁京等^[7]研究发现,2012 年单次强降雨造成的养分淋溶损失可能达到了以往近 10 年的累积养分淋失量,其中铵态氮的淋溶也会急剧增加,丁燕等^[8]在陕西关中平原的 6 年渗漏池试验结果发现,降雨有可能导致渗漏的发生,因为小麦—玉米轮作农田渗漏事件基本集中在降雨量多的玉米季,降雨量少的小麦季基本不发生淋溶。目前,大量氮素渗漏损失研究主要集中在少雨的北方平原地区,而南方地区由于特殊地势和气候,主要研究集中在集约化种植的湖区地带(如洞庭湖、太湖等)旱地玉米施肥和环境效应探究。对于“零星式”种植区域的南方丘陵山区旱地玉米种植施肥控制和氮素损失

研究较少,而这种分散式“点源污染”对于某个流域的地下水污染的贡献状况有待深入探究,所以本研究选取南方丘陵典型地区进行田间试验,以普通尿素施肥为对照,探讨春玉米种植期间控释氮肥减量施用对土壤氮素渗漏损失动态变化及损失的影响,以期特殊地形的南方丘陵山区旱地种植业提供优化施肥、增产少污的生产方案,为节约农业资源和降低环境污染提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试玉米品种 掖单 13 号,由山东省莱州市明星种业公司提供。

1.1.2 供试肥料 普通尿素(N:46%),湖南省湘农农业生产资料集团有限公司生产;树脂包膜控释尿素(N:42%,养分释放期分为 3 种,即 1,2,3 个月),山东金正大生态工程股份有限公司生产;钙镁磷肥(P₂O₅:12%),湖北祥云化工股份有限公司生产;氯化钾(K₂O:60%),俄罗斯生产。

1.2 试验地基本情况

试验于 2014 年在湖南省浏阳市原种场(沿溪镇花园村,28°19'N,113°49'E)试验基地进行,该地区属亚热带季风性湿润气候,全年的降水集中在 6—9 月,年平均气温 17.3℃,年降水量为 1 552.3 mm。供试土壤为河潮土,其部分理化性质为:pH 5.75,有机质含量 14.57 g/kg,全氮含量 1.02 g/kg,碱解氮含量 49.30 mg/kg,全磷含量 0.47 g/kg,速效磷含量 11.80 mg/kg,全钾含量 14.51 g/kg,速效钾含量 157.10 mg/kg。试验观察期间(2014 年 3 月 25 日至 7 月 6 日)降雨总量 740 mm,最大单次降雨量 132 mm(7 月 6 日),发生渗漏事件 6 次。

1.3 试验设计

试验采用田间小区试验,小区面积为 5 m×4 m。各处理小区以水泥砂浆筑埂分隔而成,水泥埂高为 110 cm,筑埂后填土 80 cm,使田埂上表面距土面高 30 cm。渗漏收集系统和装置设计见图 1。收集渗漏水装置是一个塑料四棱锥体接收底盘,其四边形的规格为 40 cm×50 cm,棱锥高为 5 cm。顶点 h 处通

孔并接上内径为 8 mm 的通水软管,将渗漏水导入试验小区旁的收集池内。导水管需要控制一定斜度,保证渗漏水全部流入收集池。收集池是深为 1 m,内径为 35 cm 的圆柱体,顶面距土面 70 cm,渗漏水入口位置距顶面为 10 cm。收集池内壁以 PVC 管塑型,外围用水泥浇筑 5 cm 厚的护边,以免周边沟渠水等的渗入,顶部用带气压平衡管的盖子封住,以免雨水等的进入。另外,收集底盘的内面先用 1 mm 的不锈钢网丝布满,再往上面覆盖砾石直至四棱锥体底面(即 60 cm 土层平面),这样既能改善排水,又能防止细小土壤颗粒进入导水管。

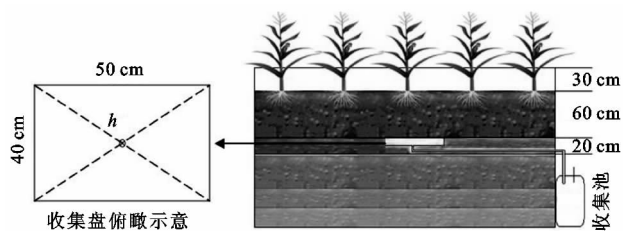


图1 渗漏水收集系统示意

渗漏水接收底盘的放置是随机的分布于各小区内部的某一位置,每次降水过后,观察接收底盘收集渗漏水的情况,测量其渗漏水体积,并采集样品进行分析。因此,接收底盘的观测结果仅代表小区内 0.2 m² 土壤 60 cm 耕层渗漏水情况,本试验小区或者更大空间的渗漏水情况只能借助其相关数据进行推算而得。

本试验共设 6 个处理:处理 1,不施氮肥(CK, T1);处理 2,常量施肥(普通尿素纯 N 量 240 kg/hm², T2);处理 3,常量控释尿素(树脂包膜尿素纯 N 量 240 kg/hm², T3);处理 4,控释尿素减氮 10%(树脂包膜尿素纯 N 量 216 kg/hm², T4);处理 5,控释尿素减氮 20%(树脂包膜尿素纯 N 量 192 kg/hm², T5);处理 6,控释尿素减氮 30%(树脂包膜尿素纯 N 量 168 kg/hm², T6)。所有处理的施磷量和施钾量均为 150 kg/hm²。为了保证控释尿素与普通尿素在施肥方式上达到一致,所有氮肥均分 3 次施于土壤,按施氮量的 40% 作基肥(控释尿素为 3 个月释放期类型),30% 作苗肥(控释尿素为 2 个月释放期类型),30% 作穗肥(大喇叭口期施,控释尿素为 1 个月释放期类型);磷肥全作基肥施用;钾肥施用量各小区按处理的 50% 作基肥,50% 作穗肥(大喇叭口期施)。每个处理设 3 次重复,共 18 个小区,随机区组排列,每区种植 112 株玉米,种植密度为 56 000 株/hm²。玉米施肥方式为撒施后覆土混匀,每次施肥后都浇水灌溉,其他栽培管理都按照常规方法进行。

玉米于 2014 年 3 月 25 日施基肥、播种(播种后的第 1~27 天记为基肥期),4 月 22 日施苗肥(播种后的第 28~74 天记为苗肥期),6 月 7 日施穗肥(播

种后的第 75~106 天记为穗肥期),7 月 9 日收获,全生育期为 106 天。

1.4 采样与测定

每次降雨产流后,通过渗漏收集池内水文尺度的变化,用体积法求得降雨产生的土壤渗漏水体积,用专用工具将收集池内水体搅拌均匀,取部分水样于 500 mL 塑料瓶内,加酸加氯仿且低温保存,带回实验室于 24 h 内进行水样指标分析。

分析方法以《水和废水监测分析方法》为准^[7],分析指标包括总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)和溶解态有机氮(DON)。渗漏水样经 0.45 μm 微孔滤膜抽滤后的滤液用于测定 TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量。其中,TN 的测定方法是碱性过硫酸钾氧化—紫外分光光度法,NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量采用连续流动分析仪 AA3 测定。DON 可通过差减法计算出来:

$$c(\text{DON}) = c(\text{TN}) - c(\text{NO}_3^- - \text{N}) - c(\text{NH}_4^+ - \text{N})$$

各时段渗漏水氮素损失量为各时段渗漏水体积乘以各时段相应氮的浓度,总氮负荷量为各时段各形态氮流失量之和。

$$\text{表观淋溶率}(\%) = \text{氮素渗漏水损失量} / \text{施氮量} \times 100$$

2 结果与分析

2.1 不同处理渗漏水体积变化情况

土壤渗漏是由于降雨冲刷地表土壤,使得土壤表面水分自土表垂直向下渗入土壤的运动过程。地表水进入土壤的数量由土壤水分入渗性能决定,对土壤深层水的储量和当季作物的供水数量的影响较大。土壤水分下渗量与降雨的关系非常密切。本试验在春玉米种植期间共监测了 6 次降雨和渗漏水情况(图 2),土壤水分的渗漏水有明显的季节性,即随着 5—7 月雨季的到来而明显增大。经过图 2 的绘制发现,降雨的多少与土壤渗漏水体积的关系没有一定的规律性,如 5 月 20 日的降雨量是 6 月 22 日和 7 月 6 日的 2 倍左右,但其渗漏水体积比较接近,这可能是渗漏水不仅与降水量有关,还有降水强度密切相关。每次渗漏事件发生后各处理的渗漏水体积大体差不多,只有 T1 处理在后 4 次的渗漏水体积相对减少一些,这可能是由于 5 月份开始各处理玉米生长进入繁盛时期,而 T1 处理由于肥料养分的缺乏致其长势很差,地表作物覆盖度差异影响了对雨水缓冲和径流阻滞的作用导致径流和渗漏差异。从玉米生长周期内渗漏水总量来看,T1~T6 处理的渗漏水总体积分别是 3 212, 3 929, 3 938, 3 888, 3 834, 3 949 L, T1 处理渗漏水总积最低,差异达极显著水平($P < 0.01$),其他处理间渗漏水总体积相差无几,差异不显著($P > 0.05$)。因此,

渗漏量的大小不仅受降水的影响,还受地表生物覆盖程度的影响,植被覆盖度越高,土壤渗透性、抗蚀性和抗冲性越强,从而增加了地表渗漏产生和养分损失。

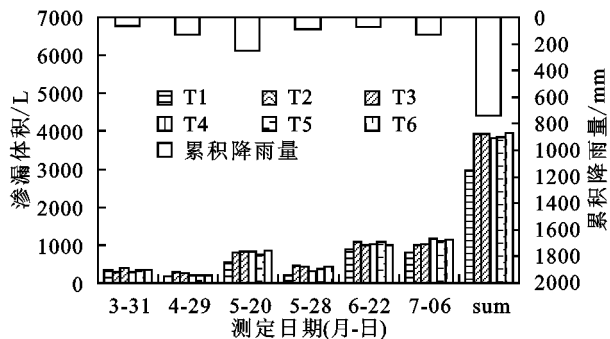


图2 春玉米种植期不同处理渗漏体积的变化

2.2 不同处理渗漏水中各种形态氮素损失动态变化

2.2.1 渗漏水中 TN 的流失浓度变化特征 由图 3 可知,不同施氮水平下,渗漏水氮素损失浓度变化存在差异。在 6 次渗漏事件中,各施肥处理(T2~T6) TN 损失浓度均呈现前期高后期低的趋势,即前 2 次 TN 损失浓度平稳居高,其均值分别达 68.91,53.90, 50.40,48.77,44.85 mg/L,与普通尿素 T2 处理比较,控释氮肥处理中 T3~T5 渗漏水 TN 损失浓度有所降低,但差异不显著($P>0.05$),T6 渗漏水 TN 损失浓度降低了 34.92%,差异达到显著水平($P<0.05$);控释氮肥处理间渗漏水 TN 损失浓度随着施氮量的减少而减少,但差异均不显著($P>0.05$)。后 4 次损失浓度平稳较低,其均值分别为 30.86,22.04, 18.02,15.37,14.08 mg/L,与普通尿素 T2 处理比较,控释氮肥处理 TN 损失浓度明显降低很多,差异达极显著水平($P<0.01$);控释氮肥处理间与 T3 比较,T4~T6 处理 TN 损失浓度随施氮量的减少而减少,T3 差异达显著水平($P<0.05$),T5 和 T6 均达到极显著差异水平($P<0.01$)。整个春玉米生长期,普通尿素 T2 处理 TN 含量变化幅度为 13.37~73.95 mg/L,控释氮肥 T3~T6 处理 TN 含量变化幅度分别为 10.39~57.85,10.19~58.51,8.50~59.09,7.05~52.18 mg/L,T1~T6 处理渗漏 TN 损失浓度平均值为 9.71,43.54,32.66,28.81,26.50, 24.34 mg/L,损失浓度排序为:T2>T3>T4>T5>T6>T1;与 T2 处理比较,T3~T6 分别降低了 24.99%,33.83%,17.04%,44.10%,差异均达极显著水平($P<0.01$);控释氮肥处理间,渗漏 TN 损失平均浓度随着施氮量的减少而下降,相比 T3 处理,T4~T6 分别降低了 11.79%($P>0.05$),18.86% ($P<0.05$),25.47%($P<0.01$)。综上可知,春玉米种植期间,前期渗漏氮素损失浓度较高,后期较低,这可能是因为前期基肥和苗肥施肥量大,作物生长缓慢,氮素养分需求量少,降水充足等因素导致氮素淋

溶下渗较多。普通尿素处理氮素渗漏损失浓度明显比同等施氮量的控释氮肥处理高,前期高出 27.85 个百分点,后期高出 40.02 个百分点,说明控释氮肥能够很好的降低旱地氮素渗漏损失。

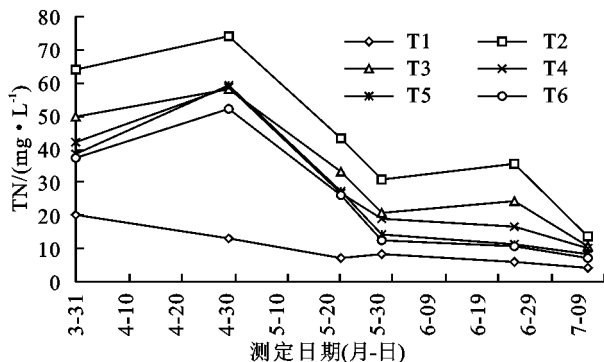


图3 春玉米种植期不同处理渗漏水 TN 含量的变化

因此,综合以上结果分析可知,同等施氮水平下,用控释氮肥代替普通尿素能够明显的减少氮素的渗漏损失。相比径流氮素损失的结果^[9]而言,渗漏氮素损失的减少受肥料品种选择的影响更敏感,而径流氮素损失的减少需要综合考虑肥料品种和控制施氮量的协调。

2.2.2 渗漏水中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的流失浓度变化特征 不同降雨时间下不同处理的渗漏水 NH_4^+-N 损失浓度变化见图 4。整个春玉米生育周期内,施肥处理渗漏水 NH_4^+-N 损失浓度最高出现在第 1 次渗漏水收集时(3 月 31 日),后面 5 次渗漏水 NH_4^+-N 浓度均保持在一个较低的稳定水平。第 1 次渗漏水 NH_4^+-N 含量高可能主要是因为基肥施用后,一方面肥料氮素大量释放 NH_4^+-N 于土壤中,而玉米种子还在发芽阶段,不需要土壤养分供应,于是增加了土壤溶液中的 NH_4^+-N 浓度,进而增加了渗漏水带走的 NH_4^+-N 养分;另一方面可能是由于基肥中大量钾素的施入,导致短时间内大量 K^+ 与土壤胶体吸附或者进行阳离子交换,减少了肥料养分 NH_4^+ 的吸附甚至解吸部分 NH_4^+ 到土壤溶液中,造成 NH_4^+-N 的渗漏损失增加。施肥处理 T2~T6 渗漏水 NH_4^+-N 含量变化的平均值分别为 0.35,0.26,0.26,0.24,0.22 mg/L,与 T2 比较,T3、T4 均降低了 25.71%,T5 降低了 31.43%,差异均达显著水平($P<0.05$),T6 降低了 37.14%,差异达极显著水平($P<0.01$);控释氮肥处理间均无显著差异($P>0.05$)。说明控释氮肥的施用能够有效减少 NH_4^+-N 的渗漏损失,相比常规施肥水平,控释氮肥减氮 30% 左右,效果更显著。

春玉米种植期间收集渗漏水中 NO_3^--N 的损失变化情况与 TN 的变化趋势基本一致(图 5)。施肥处理前期(基肥和苗肥施用之后)渗漏水中 NO_3^--N 的损失

浓度很高,T2~T6 分别高达 62.96,48.44,46.88,44.82,41.26 mg/L,后期 NO_3^- -N 的损失浓度较低,变化幅度较小,T2~T6 分别为 30.12,21.80,18.61,15.55,14.37 mg/L。由此可知,控制或减少硝态氮素损失的关键点在于前期调控,普通尿素 NO_3^- -N 前期损失浓度是后期的 2.09 倍,控释氮肥 NO_3^- -N 前期损失浓度是后期的 2.22~2.87 倍。

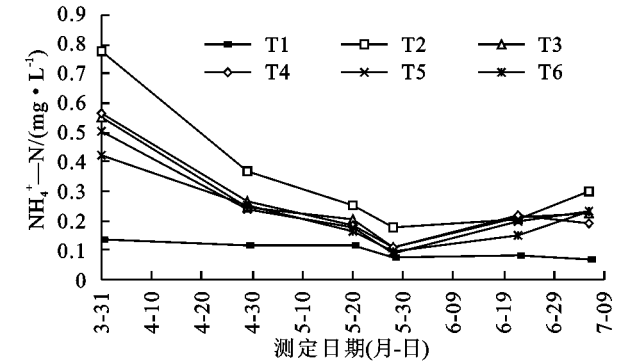


图 4 春玉米种植期不同处理渗漏水 NH_4^+ -N 含量的变化

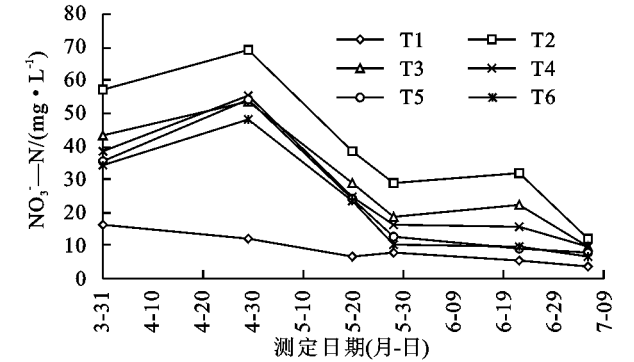


图 5 春玉米种植期不同处理地表径流 NO_3^- -N 含量的变化

T1~T6 处理的 NO_3^- -N 平均损失浓度分别为 6.51,39.51,29.41,26.69,23.92,22.05 mg/L,即 $\text{T2}>\text{T3}>\text{T4}>\text{T5}>\text{T6}>\text{T1}$ 。相比普通尿素 T2 处理,控释尿素 T3 处理 NO_3^- -N 平均损失浓度降低了 25.56% ($P<0.01$),表明等氮量施用情况下控释尿素施用能够减少 NO_3^- -N 的损失,差异极其显著,当控释尿素施氮量减少 10%~30%之后,对于减少 NO_3^- -N 损失的效果更是明显 ($P<0.01$)。控释尿素处理间, NO_3^- -N 的损失浓度随着施氮量的减少而减少,且 T4~T6 较 T3 分别降低了 9.25% ($P<0.05$),18.67% ($P<0.01$),25.03% ($P<0.01$)。可见,控制春玉米土壤渗漏水中 NO_3^- -N 的损失需要着重考虑肥料品种和施肥量的合理搭配,否则肥料投入的成本和损失都会增大。

2.3 不同处理渗漏水中各种形态氮素损失负荷特征

春玉米生长周期内的降雨后产生渗漏水导致养分下渗的监测资料(表 1)表明,田间试验常规管理下,常规普通尿素施肥情况下(240 kg N/hm²)氮素养分随着雨水和土壤水下渗迁移损失的负荷量为

69.92 kg N/hm²,占施氮量的 29.13%;等氮量施用的控释尿素 T3 处理的 TN 渗漏损失负荷量为 53.07 kg N/hm²,占施氮量的 22.11%。两种肥料的等氮量施用于春玉米生长过程中控释尿素处理 TN 渗漏损失负荷降低了 24.10%,差异极显著 ($P<0.01$)。控释氮肥处理间随着施氮量的减少,TN 损失也减少。与 T3 比较,T4~T6 的 TN 损失负荷量分别减少了 21.27%,30.10%,36.12%,差异均达极显著水平 ($P<0.01$)。分析表明,控释氮肥施用可明显减少旱地土壤氮素的渗漏损失,这可能是控释氮肥缓慢释放特性有效的控制了土壤肥料氮素的盈余,节制了大量氮素在土壤中的流动。控释氮肥减量 10%~20% 施用的处理,通过在施氮水平和氮素释放特性上的双重控制下,减少氮素损失的效应非常明显。减氮 20%~30% 的处理间,渗漏氮素损失有差异,但差异不明显 ($P>0.05$)。这可能是施氮量减少到一定程度,对渗漏氮素损失的影响不是主导因子了。根据表 1 的渗漏损失情况分析, NO_3^- -N 损失负荷为 $\text{T2}>\text{T3}>\text{T4}>\text{T5}>\text{T6}>\text{T1}$;T2 处理 NO_3^- -N 损失负荷比 T3 处理高出 25.62%,差异极显著 ($P<0.01$),T3 处理 NO_3^- -N 损失负荷比 T4~T6 处理分别高出 21.65% ($P<0.05$),47.22% ($P<0.01$),53.45% ($P<0.01$); NH_4^+ -N 损失极少,各施肥处理间损失比例仅占 TN 损失的 0.83%~1.15%,普通尿素处理 NH_4^+ -N 损失负荷稍微比控释氮肥 T3 处理高出 23.40%,但差异不显著 ($P>0.05$),比 T4~T6 处理分别高出 31.82%,41.46%,48.72%,差异均达极显著水平 ($P<0.01$);DON 损失负荷的数据显示,T2 处理比控释氮肥 T3 处理高出 70.70%,差异达显著水平 ($P<0.05$),控释氮肥处理间 DON 损失负荷有差异,但不显著 ($P>0.05$),而且随着施氮量的减少,DON 损失负荷变化没有一定的规律性,T2~T6 处理的 DON 损失负荷分别占渗漏 TN 损失量的 13.33%,10.29%,6.22%,11.41%,8.23%,表明控释氮肥带来 DON 渗漏损失作用很小,且明显低于普通尿素。相关研究也表明 DON 损失源于肥料种类与土壤环境等差异^[10]。

表 1 春玉米生长周期内渗漏水氮养分损失负荷

处理	TN/ (kg·hm ⁻²)	NO ₃ ⁻ -N/ (kg·hm ⁻²)	NH ₄ ⁺ -N/ (kg·hm ⁻²)	DON/ (kg·hm ⁻²)	表观淋 溶率/%
T1	12.83eE	9.25eD	0.15cB	1.30cB	—
T2	69.92aA	63.38aA	0.58aA	9.32aA	29.13
T3	53.07bB	47.14bB	0.47abA	5.46bAB	22.11
T4	41.78cC	38.75cBC	0.44bA	2.60bcB	19.34
T5	36.62dCD	32.02dC	0.41bA	4.18bcAB	19.07
T6	33.90dD	30.72dC	0.39bA	2.79bcB	20.18

注:表中数字后不同大、小写字母分别表示处理间差异极显著 ($P<0.01$)或显著 ($P<0.05$)。

综上所述,控制春玉米生长周期内土壤氮素渗漏损失的关键在于施肥品种和施肥量的选择。等量施用氮素的情况下,T2 和 T3 处理各项氮素形态损失负荷存在差异,且均达到显著($P<0.05$)或极显著水平($P<0.01$)(除了 NH_4^+-N)。通过控释氮肥减量施用试验发现,T5、T6 处理能够极显著控制氮素 TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 损失的负荷,但 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 DON 损失负荷减少未达显著水平($P>0.05$),说明控释氮肥减量施用主要是通过减少 TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的损失而减少肥料损失。尽管控释氮肥减量施用,但损失负荷占施氮比变化很小,在 12%~17% 以内,其中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 损失是绝对的最主要损失来源和控制关键,DON 次之。

综上所述,控释肥施氮量为 168~192 kg/hm^2 时,能够明显的降低土壤肥料氮素渗漏损失,从而降低水体污染的风险。此种施肥水平是否最优最合理,还需要从玉米稳产增产的角度再去综合评价。

2.4 控释尿素施氮量与土壤渗漏氮素损失变化关系

通过表 1 的试验结果分析得到,控释氮肥施用量与渗漏损失氮负荷呈正相关关系,施氮量减少,渗漏损失的氮素也减少。经过相关性作图分析发现,本试验中春玉米地施用控释氮肥后,TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的渗漏损失负荷(y)随施氮量(x)的增加而呈指数函数增加(图 6),即 $y=11.63e^{0.0061x}$ ($R^2=0.8333$) 和 $y=10.428e^{0.0061x}$ ($R^2=0.8623$),差异达极显著相关水平($P<0.01$)。结合表 1 经过数据分析发现,与 T2 处理比较,控释尿素处理 T3、T4、T5、T6 处理随着施氮量的变化而 TN 渗漏损失分别减少了 16.85、28.14、33.30、36.02 $\text{kg N}/\text{hm}^2$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 渗漏损失分别降低了 16.23、24.63、31.36、32.65 $\text{kg N}/\text{hm}^2$ 。通过 Pearson 相关性分析发现,施氮水平的变化量与 TN 渗漏损失减少量有极显著相关关系($r=0.8600^{**}$), $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 渗漏损失减少量有显著的相关关系($r=0.6614^*$)。在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的损失方面,本试验的结果表明,与施肥量的变化没有相关性($r=0.4864$),控释氮肥施肥量的增减后, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 损失负荷变化特别低。

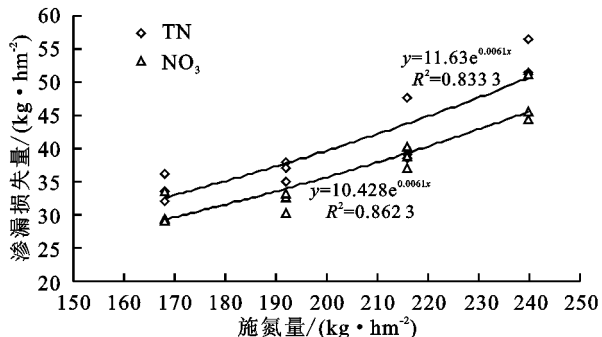


图 6 控释尿素施氮量变化对土壤渗漏氮素损失的影响

3 讨论

3.1 不同处理渗漏体积的差异

南方旱地春玉米种植期间,降雨前期较少,雨强也低,后期降雨量和降雨强度均增大,对于土壤水分的盈余和渗漏产生具有很大的促进作用。所以在本次试验期间伴随着 6 次 60 cm 土层有效渗漏,带走了大量土壤氮素养分。植被覆盖状况是本试验中 T1 处理与其他处理渗漏体积极显著差异的主导因素。T1 处理因为氮素养分的严重缺乏而导致玉米长势很差,地表覆盖度很低。春玉米生长前期,渗漏量的情况主要受降雨量和降雨强度的控制,而之后的生长期内地表生物覆盖度对径流产生影响作用凸显,使得覆盖度低的 T1 处理渗漏量显著低于施肥处理(T2~T6)。同样,施肥处理之间渗漏量的差异不明显也可能关键是源于覆盖度的影响。正如相关研究认为,地面植被能够提供一个天然缓冲降雨的屏障,在一定范围内,植被对降雨的缓冲能力会随着其覆盖度的增加而增加^[11-12],施肥处理(T2~T6)植被较为丰富,在一定程度上对雨水进行了有效的拦截和涵蓄,从而减少了地表径流,增加了土壤水分的下渗。

3.2 不同处理下不同形态的渗漏氮损失变化情况

春玉米土壤水分下渗的发生必然导致土壤养分的流失,本试验在相同施氮水平下发现普通尿素 T2 的 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 渗漏损失平均浓度比等氮量控释氮肥 T3 高出 33.31% ($P<0.01$) 和 34.34% ($P<0.01$),其损失负荷高出 31.75% ($P<0.01$) 和 38.91% ($P<0.01$)。可见控释氮肥的施用可有效减少大量氮素养分随土壤水分向 60 cm 以下的土壤深处下渗,这与前人的研究结果相似^[13-14]。控释氮肥处理间,TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 渗漏损失平均浓度和损失负荷随着施氮量的减少而减少。在减氮 10% 时与 T3 处理的 TN 损失浓度差异不显著($P>0.05$), $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 损失浓度达显著差异水平,而 TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 损失负荷分别达极显著 ($P<0.01$) 和显著水平 ($P<0.05$);在减氮 20% 和 30% 时与 T3 处理的 TN 损失浓度差异达显著 ($P<0.05$) 和极显著差异水平 ($P<0.01$), $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 损失浓度均达极显著差异水平 ($P<0.01$),其各自损失负荷也均达极显著差异水平 ($P<0.01$)。这说明氮素渗漏损失除了受施肥品种的影响,氮肥施用量也显著影响着春玉米土壤的氮素渗漏损失量和损失强度。刘占军等^[15]研究认为,春玉米种植期间减少 20% 的氮肥用量 ($152 \text{ kg N}/\text{hm}^2$) 不仅可以稳产,还能降低氮素环境风险,薛利红等^[16]在稻田地段的研究也得到了类似的结论。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 损失浓度和损失负荷都

特别的低,仅占 TN 的 0.80%~0.91%和 0.83%~1.15%,这与旱地土壤硝化作用强烈,被矿化产生的或者尿素水解产生的 NH_4^+-N 很快被转化为 NO_3^--N ,以及 NH_4^+-N 易被土壤胶体吸附有关。本试验结果表明,等氮量施肥的 T2 和 T3 处理 NH_4^+-N 损失负荷差异不显著($P>0.05$),减量施肥的控释肥处理 T3~T6 差异也不显著($P>0.05$),但减量 10%~30%的处理与 T2 处理差异显著($P<0.05$),故渗漏 NH_4^+-N 损失与施肥量和肥料品种的合理配置有关,只有在同时考虑二者的科学组合,才能显现出显著性差异的效果。

试验处理中不同形态氮素渗漏损失负荷是 $\text{NO}_3^--\text{N}>\text{DON}>\text{NH}_4^+-\text{N}$,T2~T6 处理 NO_3^--N 渗漏损失量占渗漏 TN 的 87%~93%,DON 的占比为 6%~14%之间, NH_4^+-N 的占比仅有 0.8%~1.2%左右。说明南方春玉米种植期间氮素渗漏损失以 NO_3^--N 损失为主导,DON 损失也是不容忽视的氮素渗漏损失组分,与王红霞等^[17]的室内土柱模拟淋溶试验的结论一致。特别是农田土壤氮素淋溶的 DON 在国内外的研究报道较为少见。高忠霞等^[19]的研究结果表明,在我国北方小麦—玉米轮作体系下 DON 淋溶量平均约占氮素淋溶量的 1/4,本研究中土壤 DON 淋溶量占氮素淋溶总量的比例偏低,这与供试土壤有机物含量、微生物群落等的差异有关。

本试验中,T2 的渗漏氮素损失表观淋溶率为 29.13%,比 T3 处理高出约 7 个百分点;控释氮肥处理 T3~T5 的表观淋溶率随着施氮量的减少而降低,但减氮 30%的 T6 处理表观淋溶率偏高,这可能是肥料氮素养分投入减少了,但土壤背景氮素养分损失部分增加了,使得土壤氮素淋洗量减少的量少于氮肥投入减少的量。易时来等^[18]研究了油菜生长季氮素在紫色土中的渗漏情况,高忠霞等^[19]研究了小麦—玉米轮作氮素养分在垆土中的渗漏情况,其结果均比本试验的表观淋溶率低,这可能与供试土壤类型、肥力特性、作物种类和降雨的不同有关。

3.3 减量施氮对春玉米氮素损失和产量经济效益的影响

本试验中表明施肥处理 T2~T6 的肥料渗漏损失量分别为 57.09,40.24,28.95,23.79,21.07 kg N/hm²。结合肥料氮素径流损失和气相损失的结果分析可知,春玉米种植期间肥料氮素损失的总量在 T2~T6 处理分别为 85.06,69.48,55.12,46.09,40.39 kg N/hm²,肥料损失比分别为 35.44%,28.95%,25.52%,24.01%,24.04%。同等施氮水平

的 T2 和 T3 处理相比较,T3 处理肥料氮素损失减少了 18.32%,控释尿素处理不同施氮水平的氮素损失情况是 T4~T6 处理较 T3 处理肥料氮素损失减少了 20.66%,33.66%,41.87%。因此,对于减少肥料氮素损失及其环境污染,控释尿素施用明显优于普通尿素的施用,并且氮素施用减量化效果更加凸显。这是因为一方面控释尿素缓释特性明显,氮素通过液相和气相损失的可能性较小^[9,20],另一方面通过减少氮素施用量控制土壤养分的适中,以免过多养分促进土壤硝化反硝化作用、氨挥发作用、径流下渗作用带来氮素损失。本研究不仅探讨了尿素施用品种在南方春玉米种植减少氮素损失的优势,还进一步研究了减氮施用情况下减少氮素损失的优势。仅仅从氮素损失方面发现,控释尿素减量 20%~30%时具有显著的环境效益,但是否在常年经济效益方面也具有显著的优势呢?本年度 T2~T6 处理春玉米施肥产量分别为 5 056.47,5 542.58,5 317.39,5 191.70,5 006.11 kg/hm²。与 T2 处理比较,T3 处理增产 9.61%,T4 处理增产 5.16%,T5 处理增产 2.67%,T6 处理减产 1.00%。随着施氮量的减少,玉米产量相对于普通尿素处理处于增产稳产状态,尽管 T6 处理出现略微的减产,但差异不显著($P>0.05$),并不能说明减氮 30%会对玉米生产造成相当的影响。通过计算投入产出的经济效益发现,2014 年普通尿素成本为 855.65 元/hm²(尿素单价为 1.64 元/kg),T3~T6 处理控释尿素成本分别为 2 326.96,2 094.26,1 861.57,1 628.87 元/hm²(控释尿素单价为 4.46 元/kg),那么 T3~T6 处理比 T2 处理的投入成本分别增加了 1 471.92,1 238.66,1 005.92,773.22 元/hm²,但玉米产值分别增加 1 327.08,712.31,369.16,-137.48 元/hm²(当季玉米单价为 2.73 元/kg)。相对于普通尿素而言,控释尿素的投入成本增量与玉米产值增量的差值分别是 144.84,526.35,636.76,910.70 元/hm²。此结果表明控释尿素减量或不减量的情况下,其投入成本都较高,绝对成本增值抵消并超越了其节本增产的经济效益,造成生产过程中施用控释尿素可能导致生产者不能盈利。因此,在产量经济效益方面,生产者独自承担昂贵的控释尿素施用成本进行春玉米的种植是无利可图的,他们更愿意选择投入成本低且能盈利的 T2 处理的施肥模式。但是,考虑到环境经济效益的话,T2 处理代价最大,必须选择控释尿素处理来降低环境污染风险,如此必须解决施肥成本的问题。如今比较普遍而且直接的解决办法就是政府补贴肥料的差价或者国家直接调控肥料的市场价格以降低控释尿素的成

本投入。结合成本调控讨论本试验结果发现,若以防治环境污染为主,以增产增效为辅的话,T5 处理的施肥模式最佳。

4 结 论

(1)渗漏体积的差异直接受降雨和作物地表覆盖情况的影响,间接受施肥量的影响。本试验中不施肥处理 T1 土壤渗漏水体积最少,差异达极显著水平($P < 0.01$);各施肥处理渗漏量没有显著差异($P > 0.05$),说明均能满足一定作物覆盖度的氮素需求。

(2)春玉米种植期间,T2~T6 处理渗漏 TN 损失浓度平均值为 43.54,32.66,28.81,26.50,24.34 mg/L,损失浓度排序为:T2>T3>T4>T5>T6。减少氮素渗漏损失的关键在于降低 NO_3^- -N 流失浓度,控释氮肥减氮量 20%~30%时能够显现其降低氮素流失的显著优势。

(3)普通尿素处理 T2 和控释氮肥处理 T3 氮素流失负荷分别为 69.92,53.07 kg/hm²,占施氮量的 29.13%,22.11%,其中 NO_3^- -N 和 DON 是土壤氮素渗漏损失的主要形式。控释肥氮素损失负荷随施氮量的减少而减少,本试验控释肥减氮量 0~30%后氮素损失负荷降低明显,与 T2 比较达极显著水平($P < 0.01$),与 T3 比较 T4~T6 均达极显著水平($P < 0.01$)。

(4)综合肥料氮素损失的环境效益和产量经济效益分析发现,若控释尿素的投入成本可控,那 T5 处理施肥模式既能防治氮素损失的环境污染和资源浪费,又能增产增效。

参考文献:

- [1] 李宗新,董树亭,王空军,等.不同肥料运筹对夏玉米田间土壤氮素淋溶与挥发影响的原位研究[J].植物营养与肥料学报,2007,(13)6:998-1005.
- [2] 杨荣,苏永中,王雪峰,等.绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评[J].生态学报,2012,32(4):1308-1317.
- [3] 罗付香,刘海涛,林超文,等.不同形态氮肥在坡耕地雨季土壤氮素流失动态特征[J].中国土壤与肥料,2015(3):12-20.
- [4] 刘敏,宋付朋,卢艳艳,等.硫膜和树脂膜控释尿素对土壤硝态氮含量及氮素平衡和氮素利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):541-548.
- [5] 淮贺举,张海林,蔡万涛,等.不同施氮水平对春玉米氮素利用及土壤硝态氮残留的影响[J].农业环境科学学

- 报,2009,28(12):2651-2656.
- [6] 商放泽,杨培岭,李云开,等.不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J].农业工程学报,2012,28(7):103-110.
- [7] 袁京,李国学,李荣花,等.小麦/玉米轮作体系中不同施肥方法下的养分淋溶排污系数测算[J].农业环境科学学报,2015,(34)4:738-744.
- [8] 丁燕,杨宪龙,同延安,等.小麦—玉米轮作体系农田氮素淋失特征及氮素表观平衡[J].环境科学学报,2015,35(6):1914-1921.
- [9] 谢勇,荣湘民,刘强,等.控释氮肥减量施用对春玉米土壤地表径流氮素动态及其损失的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):14-19,25.
- [10] 卢小慧,李奇龙,乔骁,等.农业系统溶解性有机态氮淋滤损失及影响因素研究进展[J].湖北农业科学,2016(13):3265-3268.
- [11] 徐泰平,朱波,汪涛,等.不同降雨侵蚀力条件下紫色土坡耕地的养分流失[J].水土保持研究,2006,13(6):139-144.
- [12] 林代杰,郑子成,张锡洲,等.玉米植株对降雨再分配过程的影响[J].中国农业科学,2011,44(12):2608-2615.
- [13] 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,(37)5:173-177.
- [14] 纪雄辉,郑圣先,聂军,等.稻田土壤上控释氮肥的氮素利用率与硝态氮的淋溶损失[J].土壤通报,2007,38(3):467-471.
- [15] 刘占军,谢佳贵,张宽,等.不同氮肥管理对吉林春玉米生长发育和养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):38-47.
- [16] 薛利红,俞映惊,杨林章.太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J].环境科学,2011,32(4):1133-1138.
- [17] 王红霞,周建斌,雷张玲,等.有机肥中不同形态氮及可溶性有机碳在土壤中淋溶特性研究[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1364-1370.
- [18] 易时来,石孝均.油菜生长季氮素在紫色土中的淋失[J].水土保持学报,2006,20(1):83-86.
- [19] 高忠霞,杨学云,周建斌,等.小麦—玉米轮作期间不同施肥处理氮素的淋溶形态及数量[J].农业环境科学学报,2010,29(8):1624-1632.
- [20] 谢勇,荣湘民,张玉平,等.控释氮肥减量施用对春玉米土壤 N_2O 排放和氨挥发的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(3):596-603.