植物营养与肥料学报 2015,21(2): 541 -548 doi: 10.11674/zwyf.2015.0231
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

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

刘 敏, 宋付朋*, 卢艳艳
(土肥资源高效利用国家工程实验室, 国家缓控释肥工程技术研究中心,
山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

摘要:【目的】控释尿素已被证明对于提高氮素利用率、减少氮素损失和增产有积极意义,且不同包膜的控释尿素由于包膜材料的不同,对于氮素的释放和供应强度有所不同。本文在黄淮海区域采用玉米田间试验,探讨硫膜和树脂膜控释尿素在氮素供应和减少氮素损失等方面的效应,以期为黄淮海区域夏玉米在高温多雨的种植条件下两种控释尿素的选择和应用提供依据。**【方法】**以硫膜和树脂膜控释尿素为研究对象,采用田间试验研究 0—100 cm 土壤剖面中的硝态氮含量,玉米整个生育期的土壤氮素平衡和玉米产量以及氮素利用率。**【结果】**与相同施氮量的普通尿素相比,硫膜和树脂膜控释尿素均具有"前控后保"的特性,使玉米苗期 0—100 cm 土层的土壤硝态氮含量降低了 11.7%～56.7% 和 28.8%～68.2%,玉米灌浆期和收获期 0—40 cm 土层的硝态氮含量分别提高了 16.3%～46.7%、0.5%～60.7%;两种控释尿素均能有效降低玉米整个生育期土壤残留的无机氮量、氮素表观损失量和盈余量,降幅分别为 12.0%～18.4%、13.2%～66.4% 和 15.6%～30.9%,使玉米产量提高 14.6%～37.5%,氮素利用率提高 12.3～20.8 个百分点。在 N 210 kg/hm^2、N 300 kg/hm^2 两种施氮量条件下,与相同施氮量的硫膜控释尿素相比,树脂膜控释尿素处理的玉米苗期 0—60 cm 土层的硝态氮含量降低了 26.4%～39.1%,灌浆期 0—40 cm 土层和收获期 0—20 cm 土层的硝态氮含量分别提高了 10%～21.8% 和 9.6%～16.4%,土壤残留无机氮量、氮素表观损失量和盈余量分别降低了 2.3%～6.0%、44.6%～61.3% 和 17.0%～17.7%,玉米产量提高了 6.8%～8.3%,氮素利用率提高了 7.1～8.4 个百分点,说明树脂膜控释尿素的效果优于硫膜控释尿素。树脂膜控释尿素和硫膜控释尿素在施氮量 N 300 kg/hm^2 时均比 N 210 kg/hm^2 条件下玉米整个生育期不同土层的硝态氮含量提高了 1.2%～90.9% 和 2.0%～56.7%,玉米整个生育期土壤残留无机氮量、氮素表观损失量和盈余量分别提高了 42.1%～47.6%、66.2%～137.9%、52.5%～53.8%,玉米产量和氮素利用率分别提高了 20.8% 和 22.5%、6.5 和 5.2 个百分点,施氮量 N 300 kg/hm^2 优于 N 210 kg/hm^2。**【结论】**树脂膜控释尿素在减少夏玉米农田土壤剖面硝态氮残留、维持土壤氮素平衡和提高氮素利用率等方面的效果优于硫膜控释尿素和普通尿素。综合考虑保证土壤氮素供应、减少氮素损失、提高玉米产量及氮素利用率等因素,在黄淮海区域高温多雨气候条件下种植夏玉米,以施氮量 N 300 kg/hm^2 的树脂膜控释尿素或者硫膜和树脂膜控释尿素二者配合施用效果最佳。

关键词: 硫膜控释尿素; 树脂膜控释尿素; 土壤硝态氮; 氮素平衡; 氮素利用率
中图分类号: S143.1$^+$5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)02-0541-08

Effects of sulfur-and polymer-coated controlled release urea fertilizers on spatial-temporal variations of soil NO_3^--N and nitrogen balance and nitrogen use efficiency

LIU Min, SONG Fu-peng*, LU Yan-yan
(*National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources/ National Engineering & Technology Research Center for Slow and Controlled Release Fertilizers /College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China*)

收稿日期: 2014-03-03 **接受日期:** 2014-06-07
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAD11B01, 2011BAD11B02);国家"948"重点项目(2011-G30)资助。
作者简介: 刘敏(1988—),女,山东肥城人,硕士研究生,主要从事土壤生态环境方面的研究。E-mail: m3509001@163.com
* 通信作者 E-mail: fpsong@126.com

Abstract:【**Objectives**】Controlled release urea has been proven to have positive significance to increase nitrogen use efficiency, reduce nitrogen loss and increase production. Different controlled release urea coated with different materials has different N release rate and N supply intensity. A field experiment was conducted in a maize farmland in Huang-Huai-Hai area to study the effects of sulfur-and polymer-coated controlled release urea on regulation N supply intensity and reducing nitrogen loss. This study is aimed to provide guidance on sulfur-and polymer-coated controlled release urea application in Huang-Huai-Hai maize zone under the condition of high temperature and rainy.【**Methods**】The field experiment was conducted to study the effects of sulfur-and polymer-coated controlled release urea on the 0-100 cm spatial-temporal variations of soil NO_3^--N, nitrogen balance and nitrogen fertilizer use efficiency.【**Results**】Compared with common urea of the same N application rate, the sulfur - and polymer-coated controlled release urea has the characteristics of controlled N - supply in the beginning and sufficient N - supply in later days. The sulfur- and polymer-coated controlled release urea reduces soil NO_3^--N content of 0-100 cm soil layer by 11.7%-56.7% and 28.8%-68.2% respectively during maize seedling stage, increases soil NO_3^--N content of 0-40 cm depth at maize filling and harvesting stages by 16.3%-46.7%, 0.5%-60.7%, respectively. The sulfur- and polymer-coated controlled release urea reduces the soil residual nitrogen content by 12.0%-18.4%, nitrogen apparent loss by 13.2%-66.4% and the nitrogen surplus by 15.6%-30.9% in the whole maize growth stage, respectively. The maize yield and the utilization rate of nitrogen were increased by 14.6%-37.5% and 12.3-20.8 percentage points, respectively. Compared with sulfur-coated controlled release urea of the same N application rate 210 kg/ha or 300 kg/ha, polymer-coated controlled release urea reduces the soil NO_3^--N content of 0-60 cm depth by 26.4%-39.1% during maize seedling period, brings up the soil NO_3^--N content of 0-40 cm at maize filling stage by 10%-21.8% and that of 0-20 cm at maize harvesting stage by 9.6%-16.4%, respectively. Polymer-coated controlled release urea reduces the soil residual nitrogen content by 2.3%-6.0%, nitrogen apparent loss by 44.6%-61.3% and nitrogen surplus by 17.0%-17.7% than those of sulfur-coated controlled release urea with the same N application rate, respectively. Polymer-coated controlled release urea improves the maize yield and the utilization rate of nitrogen by 6.8% -8.3% and 7.1-8.4 percentage points more than those of sulfur-coated controlled release urea with the same N application rate, respectively. Over all, polymer-coated controlled release urea is better than sulfur-coated controlled release urea in reducing the soil residual nitrogen content, and maintaining the soil nitrogen balance and improving nitrogen fertilizer use efficiency. The N application rate 300 kg/ha of the polymer-coated controlled release urea or the sulfur-coated controlled release urea increases the soil NO_3^--N content of 0-100 cm depth during maize growing stages by 1.2%-90.9%, 2.0%-56.7% respectively and increases the soil residual nitrogen content, nitrogen apparent loss and nitrogen surplus by 42.1%-47.6%, 66.2%-137.9% and 52.5%-53.8% respectively. The 300 kg/ha application rate also improves the maize yield and the utilization rate of nitrogen by 20.8% and 22.5%, 6.5 and 5.2 percentage points more than that of the N application rate of 210 kg/ha respectively. The effects of the N application rate 300 kg/ha of the polymer- or the sulfur-coated controlled release urea are better than those of the N application rate 210 kg/ha.【**Conclusions**】Polymer-coated controlled release urea in reducing soil profile nitrate nitrogen residual, maintaining soil nitrogen balance and improving the utilization rate of nitrogen in summer maize farmland is better than sulfur-coated controlled release urea and common urea. In the context of sufficient N supply, reduced nitrogen loss, improved maize yield and nitrogen utilization efficiency, the application of the polymer-coated controlled release urea or combining with sulfur-coated controlled release urea at N application rate of 300 kg/ha is the best recommended nitrogen fertilization management practice for Huang-Huai-Hai summer maize zone which is under the condition of high temperature and rainy climate.

Key words: sulfur-coated controlled release urea; polymer-coated controlled release urea; soil NO_3^--N; nitrogen balance; nitrogen fertilizer use efficiency

据联合国粮农组织估计,在发展中国家的粮食增产中,化肥的作用占到55%以上[1]。为了追求高产,我国北方玉米产区大量施用氮肥,过量投入的氮素不仅造成氮素利用率降低,而且使农田生态系统中有大量的氮素盈余,这些盈余的氮素部分以气体形式挥发损失,或以硝态氮的形式通过淋洗、径流等途径污染农业生态环境[2-6]。因此如何科学有效地施用氮肥,提高肥料利用率,减少对农业生态环境的污染已成为现代农业科学研究的重大课题,而控释尿素的开发应用这一问题的解决开辟了新的途径[7-8]。

近年来,关于控释尿素的研究多集中在控释尿素对玉米、小麦、水稻等作物的产量和氮肥利用率及对耕层土壤养分状况的影响等方面[9-12],而关于硫膜和树脂膜两种不同包膜控释尿素在防止农田土壤硝态氮的迁移淋失和氮素平衡方面的报道较少。为解决在高温多雨的气候条件下夏玉米种植中硫膜和树脂膜控释尿素的选择和应用问题,本文通过田间试验研究硫膜和树脂膜控释尿素在降低玉米农田土壤剖面硝态氮迁移累积的效应及其对土壤—作物体系氮素平衡的影响规律,以期为不同包膜控释尿素在玉米种植上的选择与应用以及大面积推广提供科学依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

田间试验于2012年6月在山东农业大学黄淮海区域(山东)玉米技术创新中心试验基地进行,该区属温带大陆性半湿润季风气候,雨热同季,年均降水量803.7 mm,降雨相对集中在7～9月,年均气温13.2℃,7月气温最高,无霜期195 d,气温可满足农作物一年两熟或通过间套种一年三熟的需要。

1.2　试验材料

供试土壤为潮褐土(土壤系统分类为斑纹简育干润淋溶土),耕层土壤有机质含量8.26 g/kg、全氮0.36 g/kg、硝态氮8.8 mg/kg、铵态氮2.4 mg/kg、有效磷26 mg/kg、速效钾71 mg/kg、pH值8.51(水土比=2.5∶1),电导率181.7 μS/cm,容重1.13 g/cm^3。

供试氮肥为普通尿素(含N 46%),硫膜控释尿素(含N 35%),树脂膜控释尿素(含N 43%),其中硫膜和树脂膜控释尿素的释放时间均为3个月,均由山东金正大生态工程股份有限公司生产提供;普通尿素由泰安市肥城阿斯德化工厂提供。磷肥为粉末状过磷酸钙(含P_2O_5 14%)(湖北祥云生产),钾肥为俄罗斯生产的红色大颗粒氯化钾(含K_2O 60%)。

供试玉米品种为郑单958。

1.3　试验设计

本试验设1)不施氮对照(CK);2)低量普通尿素(LCU);3)高量普通尿素(HCU);4)低量硫膜控释尿素(LSU);5)高量硫膜控释尿素(HSU);6)低量树脂膜控释尿素(LPU);7)高量树脂膜控释尿素(HPU),共7个施氮肥处理,每个处理4次重复,共28个小区,小区面积22.5 m^2,随机区组排列。低量和高量氮肥分别为施N 210 kg/hm^{2}和300 kg/hm^2;各处理施磷量和施钾量相同,均为P_2O_5 105 kg/hm^2、K_2O 210 kg/hm^2。氮、磷、钾肥均在玉米播种前(2012年6月12日)作基肥撒施,然后旋耕,使其与耕层土壤充分混合,施肥当天按照常规播量播种夏玉米,田间管理按照常规方式进行,10月3日收获并测产。

1.4　测定项目和方法

分别于玉米苗期(施肥后14 d)、灌浆期(施肥后65 d)、收获期(施肥后90 d)在小区内按每20 cm一层分5层取0—100 cm土样,每小区随机取3个点,相同层次的土壤混合为一个样,置于冰柜中冷冻保存。鲜土样解冻后混匀称取6 g土样3份,用50 mL 0.01 mol/L $CaCl_2$溶液浸提,振荡30 min后过滤,用德国产AA3型流动分析仪测定土壤硝态氮、铵态氮含量,同时测定土壤含水量。

玉米收获后采集植株样品,每小区取3株。样品取回后在105℃杀青30min,温度降至70℃烘干称重。粉碎后采用凯氏定氮法测定植株全氮含量。

1.5　计算方法

土壤NO_3^--N积累量(kg/hm^2)=土层厚度(cm)×土壤容重(g/cm^3)×土壤NO_3^--N含量(mg/kg)/10

土壤氮素净矿化量=不施氮肥区玉米地上部氮素累积量+不施氮肥区土壤矿质氮量-不施氮肥区起始矿质氮量[13]。

氮输入包括施入氮肥、土壤起始无机氮和土壤氮素净矿化量;氮输出包括作物吸收、残留无机氮和表观损失,根据氮素输入输出的平衡模型计算氮的表观损失。

氮表观损失量=氮输入量-作物吸收量-土壤残留无机氮量;

氮肥表观损失率(%)=氮表观损失量/施氮量

×100；

氮盈余量(kg/hm²) = 土壤残留无机氮含量 + 氮表观损失量[14]。

氮肥农学效率(籽粒 kg/kg N) = (施氮区作物产量 - 不施氮区作物产量)/施氮量；

氮肥利用率(%) = (施氮处理作物吸氮量 - 不施氮处理作物吸氮量)/施氮量×100[15]。

试验数据均采用 SAS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同控释尿素对玉米不同生育期土壤剖面硝态氮含量的影响

在玉米苗期、灌浆期、收获期，硫膜和树脂膜控释尿素处理 0—100 cm 各土层的土壤硝态氮含量均随着施氮量的升高而升高，但影响幅度不同(图 1)。

在玉米苗期，硫膜和树脂膜控释尿素处理的土壤硝态氮含量在 0—100 cm 剖面内均表现为随着深度的增加先降低而后升高的趋势(图 1-A)。在低量和高量施氮量水平下，硫膜和树脂膜控释尿素处理 0—100 cm 各层土壤硝态氮含量分别比普通尿素处理降低了 11.7%～56.7%、28.8%～68.2%。在低、高两种施氮量水平下，0—60 cm 土层中的土壤硝态氮含量均表现为树脂膜控释尿素处理低于硫膜控释尿素处理，分别降低了 28.0%～39.1%，26.4%～34.1%；60—100 cm 土层硫膜控释尿素处理的土壤硝态氮含量与树脂膜控释尿素处理无显著差异。树脂膜控释尿素和硫膜控释尿素在施氮量为 N 300 kg/hm² 条件下，0—100 cm 土层的土壤硝态氮含量均高于施氮量 N 210 kg/hm²，分别提高了 1.2%～25.3% 和 2.0%～29.2%。这说明在两种施氮量水平下，硫膜和树脂膜控释尿素比普通尿素均降低了玉米苗期 0—100 cm 各土层的硝态氮含量，主要是因为硫膜和树脂膜控释尿素的氮素释放率比普通尿素缓慢。与硫膜控释尿素相比，树脂膜控释尿素降低了 0—60 cm 土层土壤的硝态氮含量，其原因是硫膜控释尿素的氮素养分的释放具有破裂释放的特点，其氮素养分初期释放率比树脂膜控释尿素高，因而其 0—60 cm 土层土壤的硝态氮含量比树膜控释尿素高。

在玉米灌浆期，硫膜和树脂膜控释尿素处理在 0—100 cm 各土层的硝态氮含量均较苗期高，其中树脂膜控释尿素处理在 0—40 cm 土层硝态氮含量与苗期相比升高幅度最大，达 4.2～8.0 mg/kg(图 1-B)。

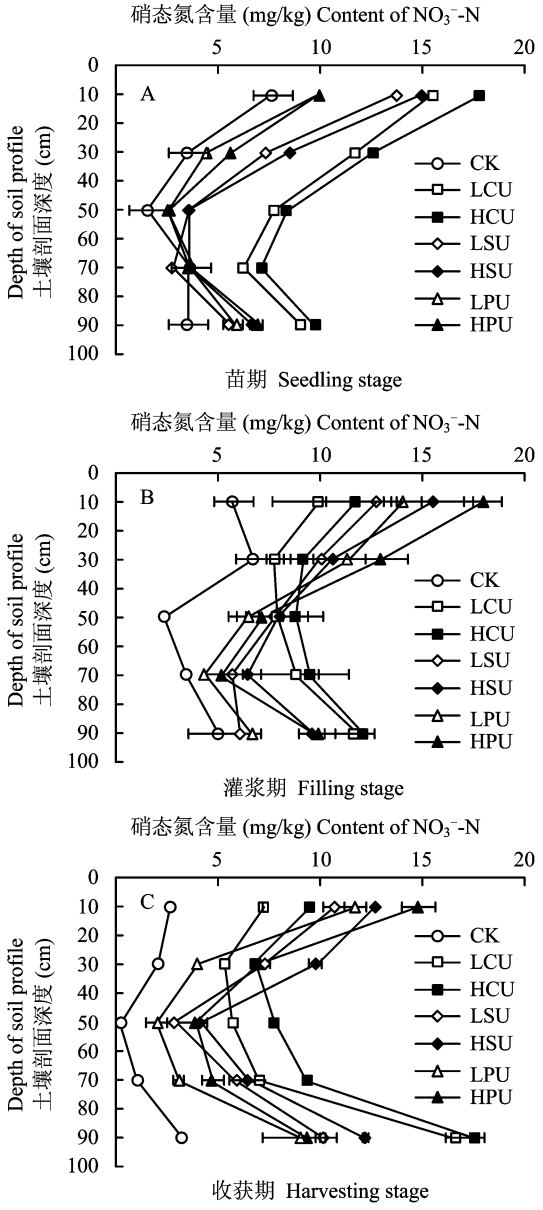

图 1 不同处理硝态氮含量的时空变化

Fig. 1 Spatial-temporal variations of soil NO_3^--N content of different treatments

[注(Note)：CK—不施氮肥 No nitrogen fertilizer；LCU—低量普通尿素 Low amount common urea；HCU—高量普通尿素 High amount common urea；LSU—低量硫膜控释尿素 Low amount sulfur-coated controlled release urea；HSU—高量硫膜控释尿素 High amount sulfur-coated controlled release urea；LPU—低量树脂膜控释尿素 Low amount polymer-coated controlled release urea；HPU—高量树脂膜控释尿素 High amount polymer-coated controlled release urea.]

在两种施氮量水平下，硫膜和树脂膜控释尿素处理在 0—40 cm 土层的土壤硝态氮含量分别比普通尿素相同土层升高了 16.3%～32.6% 和 41.7%～53.4%；在 40—100 cm 土层则比普通尿素处理分别降低了 1.3%～48.0% 和 16.3%～50.8%。在

低、高两种施氮量水平下,树脂膜控释尿素处理在0—40 cm 土层的硝态氮含量比硫膜控释尿素处理分别提高了 10.0%～12.9% 和 15.7%～21.8%;在40—80 cm 土层则比硫膜控释尿素处理分别降低了17.4%～23.4% 和 9.9%～21.5%;在 80—100 cm 土层硝态氮含量硫膜控释尿素与树脂膜控释尿素处理之间均无显著差异。树脂膜控释尿素和硫膜控释尿素在施氮量为 N 300 kg/hm^2 条件下 0—100 cm 土层的硝态氮含量均比施氮量 N 210 kg/hm^2 提高,分别提高了 9.8%～48.6% 和 2.1%～56.7%。说明在两种施氮量条件下,硫膜和树脂膜控释尿素均能提高玉米灌浆期 0—40 cm 土层的硝态氮含量,降低 40—100 cm 土层的硝态氮含量;硫膜与树脂膜控释尿素相比,树脂膜控释尿素处理 0—40 cm 土层的硝态氮提高,而 40—80 cm 土层的硝态氮含量则降低。这主要是因为两种控释尿素的氮素释放比普通尿素持续的时间长,在玉米需肥高峰期还能保持较高的氮素释放率,其中树脂膜控释尿素的氮素释放高峰比硫膜控释尿素延后,在施氮量 N 300 kg/hm^2 比 N 210 kg/hm^2 更符合玉米的需肥规律。

图 1-C 显示,在玉米收获期,硫膜和树脂膜控释尿素处理的土壤硝态氮含量在 0—100 cm 剖面内均随着深度的增加表现为先降低后升高的趋势,在40—60 cm 土层达到最低。在低、高两种施氮量水平下,与普通尿素处理的相同土层相比,除低量树脂膜控释尿素处理在 20—40 cm 土层的硝态氮含量低于普通尿素处理外,其他硫膜和树脂膜控释尿素处理在 0—40 cm 土层均较普通尿素升高 34.0%～46.7% 和 0.5%～60.7%;在 40—100 cm 土层硫膜和树脂膜控释尿素处理均降低 15.3%～50.3% 和 45.9%～64.9%。在低、高两种施氮量水平下,树脂膜控释尿素处理 0—20 cm 土层的硝态氮含量比硫膜控释尿素处理提高了 9.6% 和 16.4%;在 20—100 cm 土层则比硫膜控释尿素处理降低了 10.9%～47. 9% 和 6.9%～29.7%。树脂膜控释尿素和硫膜控释尿素在施氮量为 N 300 kg/hm^2 条件下 0—100 cm 土层的硝态氮含量均比施氮量 N 210 kg/hm^2 时高,分别提高了 3.6%～90.9% 和 9.1%～44.8%。这说明在两种施氮量条件下,硫膜和树脂膜控释尿素提高了收获期 0—40 cm 土层的硝态氮含量,降低了 40 cm 以下土层的硝态氮含量;硫膜控释尿素与树脂膜控释尿素相比,树脂膜控释尿素在施氮量为 N 300 kg/hm^2 时能够更多地提高 0—20 cm 土层的硝态氮含量,降低 20 cm 以下土层的硝态氮含量。

综上所述,与普通尿素相比,硫膜和树脂膜控释尿素降低了玉米苗期 0—100 cm 各土层的硝态氮含量 11.7%～56.7%、28.8%～68.2%;提高了玉米灌浆期和收获期 0—40 cm 土层的硝态氮含量 16.3%～46.7%、0.5%～60.7%;并降低了 40 cm 以下土层的硝态氮的累积量。施氮量 N 300 kg/hm^2 比 210 kg/hm^2 更能保证玉米生育盛期对耕层土壤氮素的需求。两种控释尿素相比,树脂膜控释尿素对减少苗期 0—60 cm 土层土壤硝态氮含量,提高灌浆期和收获期 0—20 cm 土层硝态氮供应的效果优于硫膜控释尿素,更加符合玉米整个生育期的需肥规律,可减少土壤硝态氮向下层土壤和地下水迁移。

2.2　不同控释尿素对玉米生育期土壤氮素平衡的影响

运用氮素平衡原理计算了玉米全生育期内 0—100 cm 整个土壤剖面的土壤氮素平衡,不同控释尿素对土壤氮素平衡的影响不同。从表 1 可以看出,在各项氮素输入指标中,各施氮处理的氮素总输入以肥料氮为主,占 65.2%～70.0%;相同施氮量条件下,硫膜和树脂膜控释尿素处理氮素的总输入中起始无机氮量的差异不显著;硫膜和树脂膜控释尿素处理的氮素总输入量均随施氮量的增加而显著增加。

在两种施氮量水平下,硫膜和树脂膜控释尿素处理的作物携出氮量比普通尿素分别提高了 15.5%～18.2% 和 24.3%～30.6%;其中树脂膜控释尿素的作物携出氮量比硫膜控释尿素提高了 7.6%～10.4%,但二者的差异达不到显著水平。

在施氮量为 N 300 kg/hm^2 水平下,硫膜和树脂膜控释尿素的土壤残留无机氮量、表观损失量和氮盈余量与普通尿素相比分别降低了 12.0%～17.3%、26.9%～59.5%、16.8%～30.9%;其中树脂膜控释尿素与硫膜控释尿素相比,其土壤残留无机氮量、表观损失量和氮盈余量分别降低了 6.0%、44.6% 和 17.0%,除土壤残留无机氮量差异不显著外,表观损失量和氮盈余量的差异显著。在施氮量为 N 210 kg/hm^2 水平下,硫膜和树脂膜控释尿素的土壤残留无机氮量、表观损失量和氮盈余量与普通尿素相比分别降低了 16.5%～18.4%、13.2%～66.4%、15.6%～30.6%;树脂膜控释尿素与硫膜控释尿素相比,其土壤残留无机氮量、表观损失量和氮盈余量分别降低了 2.3%、61.3% 和 17.7%,除了土壤残留无机氮量二者的差异不显著外,表观损失量和氮盈余量的差异显著。硫膜控释尿素和树脂膜控

释尿素在施氮量为300 kg/hm² 时土壤残留无机氮量、表观损失量和氮素盈余量均比施氮量210 kg/hm² 分别提高了42.1%～47.6%、66.2%～137.9%、52.5%～53.8%。

表1 玉米整个生育期的土壤氮素平衡(kg/hm²)

Table 1 N balance of soil during the whole maize growth stage

处理 Treatments	氮输入 N input			氮输出 N output			氮盈余 N surplus
	施氮量 N supply	起始无机氮 Initial Nmin	净矿化量 Net Nmin	作物携出 Crop uptake	残留无机氮 Residual Nmin	表观损失 Apparent loses	
CK	0	67.3	52.5	71.2 d	48.6 f	0.0	48.6
LCU	210	56.4	52.5	170.0 c	111.1 c	37.8	148.9
HCU	300	84.2	52.5	206.5 b	155.7 a	74.5	230.2
LSU	210	59.5	52.5	196.4 c	92.8 d	32.8	125.6
HSU	300	83.1	52.5	244.1 a	137.0 b	54.5	191.5
LPU	210	52.3	52.5	211.4 b	90.7 d	12.7	103.4
HPU	300	76.1	52.5	269.6 a	128.9 b	30.2	159.0

注(Note): CK—不施氮肥 No nitrogen fertilizer; LCU—低量普通尿素 Low amount common urea; HCU—高量普通尿素 High amount common urea; LSU—低量硫膜控释尿素 Low amount sulfur-coated controlled release urea; HSU—高量硫膜控释尿素 High amount sulfur-coated controlled release urea; LPU—低量树脂膜控释尿素 Low amount polymer-coated controlled release urea; HPU—高量树脂膜控释尿素 High amount polymer-coated controlled release urea. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

这表明硫膜和树脂膜控释尿素在供应作物氮素、减少土壤残留无机氮量、氮表观损失量和氮盈余量方面的效果优于普通尿素,其中树脂膜控释尿素在减少氮的表观损失和氮盈余方面的效果优于硫膜控释尿素,而在土壤残留无机氮方面二者差异不显著。

2.3 不同控释尿素对玉米产量及氮素利用率影响

在本试验条件下,硫膜和树脂膜控释尿素处理的玉米产量、氮肥农学效率和氮素利用率均随着施氮量的增加而升高(表2)。施氮处理的玉米产量均高于缺氮对照。在施氮量为N 210和300 kg/hm² 水平下,玉米产量的高低顺序均表现为树脂膜控释尿素>硫膜控释尿素>普通尿素;与相同施氮水平的普通尿素处理相比,硫膜控释尿素和树脂膜控释尿素处理的产量增幅分别达14.6%～28.7%、24.1%～37.5%;在相同施氮量水平下,树脂膜控释尿素处理的玉米产量比硫膜控释尿素处理提高了6.8%～8.3%。树脂膜控释尿素和硫膜控释尿素在施氮量N 300 kg/hm² 时比N 210 kg/hm² 的玉米产量分别提高了20.8%和22.5%。

在两种施氮量水平下,硫膜和树脂膜控释尿素处理的氮肥农学效率均显著高于普通尿素,增幅分别达58.5%～92.3%和96.3%～120.5%,其中树

表2 玉米产量和控释尿素对肥料的氮素利用效率

Table 2 Effects of controlled-release Urea on nitrogen using efficiency and yield

处理 Treat.	产量 Yield (kg/hm²)	氮肥农学效率 AE (kg/kg)	氮素利用率 NUE (%)
CK	5154.8 e		
LCU	6883.4 cde	8.2	23.1
HCU	7504.5 cd	7.8	28.2
LSU	7888.9 bc	13.0	35.4
HSU	9661.2 ab	15.0	40.6
LPU	8540.6 abc	16.1	42.5
HPU	10318.5 a	17.2	49.0

注(Note): CK—不施氮肥 No nitrogen fertilizer; LCU—低量普通尿素 Low amount common urea; HCU—高量普通尿素 High amount common urea; LSU—低量硫膜控释尿素 Low amount sulfur-coated controlled release urea; HSU—高量硫膜控释尿素 High amount sulfur-coated controlled release urea; LPU—低量树脂膜控释尿素 Low amount polymer-coated controlled release urea; HPU—高量树脂膜控释尿素 High amount polymer-coated controlled release urea. AE—N agricultural efficiency; NUE—Nitrogen use efficiency. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

脂膜控释尿素比硫膜控释尿素处理高 14.7%～23.8%。在相同施氮量水平下,氮素利用率的大小依次为树脂膜控释尿素 > 硫膜控释尿素 > 普通尿素;硫膜和树脂膜控释尿素处理的氮素利用率比普通尿素分别提高了 12.3～12.4 个百分点、19.4～20.8 个百分点;而树脂膜控释尿素比硫膜控释尿素处理高了 7.1～8.4 个百分点。树脂膜控释尿素和硫膜控释尿素在施氮量 N 300 kg/hm^2 时比 N 210 kg/hm^2 的氮肥农学效率和氮素利用率分别提高了 6.8% 和 15.4%,6.5 个百分点和 5.2 个百分点。

这说明硫膜和树脂膜控释尿素均能明显提高玉米产量、氮肥农学效率和氮素利用率,树脂膜控释尿素在提高氮肥农学效率和氮素利用率方面的效果优于硫膜控释尿素。施氮 N 300 kg/hm^2 比 N 210 kg/hm^2 更有利于提高玉米产量和氮素利用率。

3　讨论与结论

大量研究认为土壤残留硝态氮极易通过淋溶或硝化—反硝化途径损失出土壤—作物生态系统,对环境产生威胁[16-17]。本试验条件下,与普通尿素相比,硫膜和树脂膜控释尿素均能降低玉米苗期 0—100 cm 各土层的硝态氮含量,提高玉米灌浆期和收获期 0—40 cm 的土壤硝态氮供应量并降低了 40 cm 以下土层的硝态氮的累积量,这与卢艳艳等[18]的研究结果相一致。这是由于普通尿素的氮素释放快,在玉米生育前期即大量释放,到玉米需肥高峰期易造成土壤氮素供应不足,而两种包膜控释尿素的氮素供应在时间和空间上与作物养分吸收规律更加接近,从而减少了前期硝态氮的累积淋失,增加了玉米需肥高峰期的硝态氮含量。本试验还研究表明,硫膜与树脂膜控释尿素相比,树脂膜控释尿素能减少苗期 0—60 cm 土层土壤的硝态氮供应,提高灌浆期和收获期 0—20 cm 土层土壤硝态氮含量。这是由于树脂膜控释尿素的氮素养分释放规律与玉米养分吸收规律更加吻合,对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。两种控释尿素施氮量 N 300 kg/hm^2 比 N 210 kg/hm^2 更有利于提高耕层土壤硝态氮含量,降低耕层以下土层的硝态氮累积损失,保证玉米生育盛期的速效氮素供应,且树脂膜控释尿素优于硫膜控释尿素。

土壤-作物体系的氮素平衡是评价氮肥合理施用与否的关键,也是氮肥优化管理技术的重要手段。本试验条件下,硫膜和树脂膜控释尿素能显著减少土壤残留无机氮量并降低氮素的表观损失 13.2%～66.4%,且降低当季作物氮素盈余量 23.3～71.2 kg/hm^2。在两种施氮量水平下,树脂膜控释尿素其表观损失量和氮素盈余量分别比硫膜控释尿素降低 44.6%～61.43% 和 17.0%～17.7%。硫膜和树脂膜控释尿素由于包膜的作用,氮素释放受控且释放规律符合玉米生长对氮养分的需求,特别是树脂膜控释尿素在提高作物吸氮量、减少表观损失和氮盈余方面的效果优于硫膜控释尿素。

硫膜和树脂膜控释尿素能使耕层土壤硝态氮含量在玉米生育期维持较高水平,满足玉米生长期内对氮素的需求,因此能显著提高玉米产量和氮素利用效率。在本试验条件下硫膜和树脂膜控释尿素的玉米产量、氮素利用率分别提高了 14.6%～37.5%、12.3～20.8 个百分点,这与马富亮等[19]在小麦上的研究结果相类似。这是由于控释尿素具有特定的养分释放特征,在控释时期内持续不断地释放养分,并延迟氮素释放高峰,其养分释放模式与作物需肥规律同步,使氮素发挥最大的肥效或利用率,而树脂膜控释尿素的氮素释放持续时间更长,在提高作物产量和氮素利用率方面优于普通尿素和硫膜控释尿素,且施氮量 N 300 kg/hm^2 优于 N 210 kg/hm^2。

因此,综合考虑保证氮素供应、减少氮素损失、提高玉米产量及氮素利用率等方面,在黄淮海区域高温多雨的气候条件下,夏玉米种植中,施氮量为 N 300 kg/hm^2 的树脂膜控释尿素或者硫膜和树脂膜控释尿素二者配合施用是最佳施氮方式。

参 考 文 献:

[1] 张民, 史衍玺, 杨守祥, 等. 控释和缓释肥的研究现状与进展[J]. 化肥工业, 2001, 28(5): 27-30.
Zhang M, Shi Y X, Yang S X *et al*. Status quo of study of controlled-release and slow-release fertilizers and progress made in this respect[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2001, 28(5): 27-30.

[2] Ju X T, Kou C L, Christie P *et al*. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain [J]. Environmental Pollution, 2007, 145: 497-506.

[3] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作中 NO_3^--N 在土壤剖面的累积及移动[J]. 土壤学报, 2003,40 (4): 538-546.
Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Accumulation and movement of NO_3^--N in soil profile in winter wheat-summer maize rotation system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40 (4): 538-546.

[4] Zhao R F, Chen X P, Zhang F S *et al*. Fertilization and nitrogen balance in a wheat/maize rotation system in north China[J]. Agronomy Journal, 2006, 98: 938-945.

[5] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P *et al*. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil Nmin test field [J]. Filed Crops Research, 2008, 105(1/2): 48-55.

[6] 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Ⅱ. 夏玉米[J]. 生态学报, 2002, 22(1): 49-53.
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. The spatio-temporal variation of soil NO_3^--N and apparent budget of soil nitrogen Ⅱ. summer maize [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(1): 49-53.

[7] 卫丽, 马超, 黄晓书, 等. 控释肥对土壤全氮含量及夏玉米产量品质的影响[J]. 水土保持学报, 2009,23, (4): 176-179.
Wei L, Ma C, Huang X S *et al*. Effects of controlled-release nitrogen fertilizer on total N of soil and yield and quality of summer maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23, (4): 176-179.

[8] 郑圣先, 聂军, 熊金英, 等. 控释肥料提高氮素利用率的作用及对水稻效应的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2001,7(1): 11-16.
Zheng S X, Nie J, Xiong J Y *et al*. Study on role of controlled release fertilizer in increasing the efficiency of nitrogen utilization and rice yield[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7 (1): 11-16.

[9] 王宜伦, 李潮海, 王瑾, 谭金芳. 缓/控释肥在玉米生产中的应用与展望[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 254-257.
Wang Y L, Li C H, Wang J, Tan J F. Application and prospect of slow/controlled release fertilizers in maize production[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(24): 254-257.

[10] 李方敏, 樊小林, 陈文东. 控释肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005,11(4): 494-500.
Li F M, Fan X L, Chen W D. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005,11(4): 494-500.

[11] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010,16(6): 1358-1365.
Li L, Hong J P, Wang H T *et al*. Effects of nitrogen application and irrigation on soil nitrate accumulation, nitrogen balance and use efficiency in summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(6): 1358-1365.

[12] 谢春生, 唐拴虎, 徐培智, 等. 一次性施用控释肥对水稻植株生长及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (2): 177-182.
Xie C S, Tang S H, Xu P Z *et al*. Effects of single basal application of controlled-release fertilizers on growth and yield of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(2): 177-182.

[13] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361-1368.
Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(11): 1361 - 1368.

[14] 崔振岭, 陈新平, 张福锁, 等. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系土壤硝态氮的适宜含量[J]. 应用生态学报, 2007,18 (10): 2227-2232.
Cui Z L, Chen X P, Zhang F S *et al*. Appropriate soil nitrate N content for a winter wheat/summer maize rotation system in North China plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18 (10): 2227-2232.

[15] 杨荣, 苏永中. 水氮配合对绿洲沙地农田玉米产量、土壤硝态氮和氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1459 -1467.
Yang R, Su Y Z. Effects of nitrogen fertilization and irrigation rate on grain yield, nitrate accumulation and nitrogen balance on sandy farmland in the marginal oasis in the middle of Heihe River basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1459-1467.

[16] 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.

[17] Mosier A R, Zhu Z L. Changes in patterns of fertilizer nitrogen use in Asia and its consequences for N_2O emissions from agricultural systems[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 57: 107-117.

[18] 卢艳艳, 宋付朋, 赵杰, 高杨. 控释尿素对土壤氨挥发和无机氮含量及玉米氮素利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 79-82.
Lu Y Y, Song F P, Zhao J, Gao Y. Effects of controlled-release urea on ammonia volatilization and inorganic nitrogen of soil and nitrogen use efficiency in maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 79-82.

[19] 马富亮, 宋付朋, 高杨, 邹朋. 硫膜和树脂膜控释尿素对小麦产量、品质及氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2012,23(1): 67-72.
Ma F L, Song F P, Gao Y, Zou P. Effects of sulfur- and polymer-coated controlled release urea fertilizers on wheat yield and quality and fertilizer nitrogen use efficiency[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 67-72.