

腐植酸尿素对玉米产量及肥料氮去向的影响

张水勤^{1,2}, 袁亮¹, 李伟¹, 林治安¹, 李燕婷¹, 胡树文², 赵秉强^{1*}, 李军¹

(1 农业部植物营养与肥料重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 10081;

2 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:【目的】研究腐植酸尿素对玉米干物质质量、籽粒产量及肥料氮去向的影响, 以期在传统尿素产品的提质增效及新型腐植酸尿素肥料的研制提供理论与实践依据。【方法】以玉米品种郑单 958 为供试作物, 以自制的腐植酸尿素为供试肥料, 运用 ¹⁵N 同位素示踪技术, 开展土柱栽培试验, 设置不施氮肥对照 (CK)、普通尿素 (U) 和腐植酸尿素 (HAU) 3 个处理, 所有肥料均作为基肥一次性施入土柱 0—30 cm 土层。玉米成熟后, 采集植株地上部样品进行考种, 同时, 分别测定玉米叶片、茎秆、苞叶、穗轴、籽粒的干物质质量、氮素含量和 ¹⁵N 丰度; 分别采集 0—15 cm、15—30 cm、30—50 cm、50—70 cm、70—90 cm 土层的土壤样品, 测定其氮素含量和 ¹⁵N 丰度。【结果】各处理玉米植株地上部及各器官 (苞叶除外) 干物质质量由低到高为 CK < U < HAU, 而玉米各器官的干物质质量占该植株地上部干物质总量的比例在不同处理下的差异均未达到显著性水平; 与 U 处理相比, HAU 处理玉米地上部干物质质量平均提高 13.8%, 籽粒产量提高 14.2%; 玉米籽粒产量构成的分析结果表明, 不同处理玉米穗粒数差异显著 ($P < 0.05$), 而百粒重却无显著差异。同时, HAU 处理玉米对氮素和肥料氮的吸收量分别比 U 处理高 0.989 g 和 0.072 g, 提高了氮肥利用率 4.8 个百分点; 各处理氮素和肥料氮在各器官的分配均表现为苞叶、穗轴 < 茎秆 < 叶片 < 籽粒, 籽粒总氮和肥料氮的吸收量分别占整个植株地上部总吸收量的 65.7%~74.2% 和 58.6%~60.5%; 从氮素来源分析, 各器官所吸收的肥料氮仅占该器官氮素总吸收量的 13.3%~30.9%。另外, 不同施氮处理对土壤中肥料氮的总残留量影响不显著, 但 HAU 处理肥料氮在施肥层 (0—15 cm) 的残留量显著高于 U 处理 ($P < 0.05$)。HAU 处理肥料氮的损失率为 34.9%, 低于 U 处理 5.1 个百分点。【结论】供试条件下, 施用腐植酸尿素能够增加玉米干物质质量和籽粒产量, 促进玉米对肥料氮的吸收, 减少肥料氮向下层土壤的淋溶, 有利于土壤残留氮的进一步吸收利用。

关键词: 腐植酸尿素; 玉米; 产量; ¹⁵N 标记技术; 肥料氮去向

Effects of humic acid urea on maize yield and the fate of fertilizer nitrogen

ZHANG Shui-qin^{1,2}, YUAN Liang¹, LI Wei¹, LIN Zhi-an¹, LI Yan-ting¹, HU Shu-wen², ZHAO Bing-qiang^{1*}, LI Jun¹

(1 Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: 【Objectives】In this study, effects of humic acid urea on maize dry biomass, grain yield, and the fate of fertilizer nitrogen were investigated. The result could provide a theoretical and practical basis for the production of humic acid fertilizer with better quality and higher efficiency. 【Methods】Zhengdan 958 was selected as the test maize cultivar, and the tested humic acid urea was synthesized in the laboratory. The experiment was carried out by using technique of the ¹⁵N-label and soil column culture. No nitrogen (CK), common urea (U) and humic acid urea (HAU) were included as treatments, and all fertilizer was applied into 0—30 cm soil layer as base fertilizer. After the harvest, the maize shoots were collected and divided into five parts: leaf, stem, bract, cob and grain. Then, the dry biomass, nitrogen contents and ¹⁵N abundance in all parts of maize shoots were

收稿日期: 2017-02-20 接受日期: 2017-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31601827); “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFD0200402); 中央级公益性科研院所专项资金资助项目 (IARRP-2014-5) 资助。

作者简介: 张水勤 (1988—), 女, 河南新密人, 博士研究生, 主要从事新型肥料研究。E-mail: shuiqin08@163.com

* 通信作者 E-mail: zhaobingqiang@caas.cn

determined, and ear traits were tested as well. The soil samples in different soil layers (0–15 cm, 15–30 cm, 30–50 cm, 50–70 cm, 70–90 cm) were collected after the harvest, and nitrogen contents and ^{15}N abundance were determined subsequently. 【Results】 The dry biomass of shoots and individual organs, except bract, showed an ascending order as $\text{CK} < \text{U} < \text{HAU}$, no significant difference existed in the allocation ratio of dry matter in aboveground organs among the treatments. The aboveground dry biomass in HAU was 13.8% higher than that in U, and grain yield in HAU was 14.2% higher than that in U. The HAU enhanced grains per ear significantly ($P < 0.05$), while increased the hundred kernels weight slightly. The uptake amounts of total N and fertilizer N in each column in HAU were 0.989 g and 0.072 g more than those in U, respectively. The fertilizer nitrogen use efficiency in HAU was enhanced by 4.80 percentage points compared with that in U. The allocation proportion of fertilizer N and total N in different organs showed an ascending order as: bract and cob < stem < leaf < grain, and grain possessed 65.7%–74.2% of total N and 58.6%–60.5% of fertilizer N in shoots. The fertilizer N amounts accounted for 13.3%–30.9% of total N in individual organs. There was no significant difference in the total residue of fertilizer N between HAU and U. The residual amount of fertilizer N in 0–30 cm soil layer in HAU was higher than that in U, while the residual N in 30–90 cm showed an opposite trend. The loss rate of fertilizer N in HAU was 34.9%, which was lower than that in U by 5.1 percentage points. 【Conclusions】 Under the experimental condition, the application of humic acid urea could improve the maize aboveground biomass and grain yield, and regulate the fate of fertilizer nitrogen by enhancing fertilizer N uptake and reducing its leaching to soil deeper than 15 cm.

Key words: humic acid urea; maize; yield; ^{15}N -label technique; fate of fertilizer nitrogen

腐植酸是动植物残体和微生物细胞等经过微生物分解和转化, 以及一系列地球化学过程形成和累积的一类成分复杂的天然有机高分子混合物^[1-4], 腐植酸能够提高植物新陈代谢和呼吸活性, 并改善叶绿体和线粒体功能, 从而增强植物呼吸和光合作用, 促进植物生长^[5-6]; 腐植酸具有丰富的羧基和酚羟基等酸性官能团结构, 能够与尿素的酰胺基结合形成有机络合盐类, 从而增强肥料的缓释性能^[7]。腐植酸还可以抑制土壤脲酶活性和调节土壤微生物的活性^[8-9], 改善土壤结构和稳定性、水气渗透能力和田间持水量等^[10-12]。因此, 施用腐植酸能够促进作物生长, 提高作物产量; 促进作物对氮的吸收, 提高氮肥利用率^[13-15]。我国农业生产中, 氮肥存在施用量大^[16]、利用率低^[17-18]、环境污染风险大^[19-20]等问题。鉴于此, 腐植酸对氮肥的提质增效作用愈发引起人们的关注。

前人已经在腐植酸尿素对作物生长、产量和氮素吸收等的影响方面开展了较多的研究^[1, 15, 21-22], 表明腐植酸尿素具有促进作物生长、提高作物产量和增加氮素吸收的作用, 但这些研究多停留在单一验证腐植酸对作物生长和氮肥利用所具有的增效作用方面, 而对其具体作用效果缺乏深层次的分析。因此, 本文运用 ^{15}N 同位素示踪技术开展土柱栽培试验, 研究并分析腐植酸尿素对玉米产量及肥料氮去

向的影响, 为传统尿素产品的提质增效及新型腐植酸尿素肥料的研制提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以夏玉米“郑单 958” (*Zea mays* L.) 为供试作物, 供试土壤采自中国农业科学院德州盐碱土改良实验站禹城试验基地连续三年未施用任何肥料的匀地试验场, 土壤类型为石灰性潮土, 质地为轻壤。分别采集 0—20 cm 的耕层土壤和 20—90 cm 的底层土壤, 风干, 过 1 cm 筛, 混匀, 备用, 其基本理化性质见表 1。

^{15}N 尿素丰度 10.24%, 购自上海化工研究院。

腐植酸的提取在本实验室进行^[1]: 以取自内蒙古霍林河的风化煤为原材料, 过 0.25 mm 筛, 用 1 mol/L 盐酸洗涤, 以去除其中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等杂质离子; 离心后, 将煤样以 1 : 10 固液比溶于 0.5 mol/L NaOH 溶液, 调节溶液 pH 至 13, 连续浸提 24 h; 离心后, 弃去沉淀; 用 6 mol/L HCl 将溶液 pH 调至 1.0, 放置 24 h, 离心后, 弃去上清液, 所得沉淀即为腐植酸; 经 HCl (0.1 mol/L) + HF (0.3 mol/L) 除去矿物质后, 用蒸馏水洗涤 3 遍, 以去除氯离子, 50℃ 条件下烘干得到腐植酸干样。制得的腐植酸样

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the experimental soil

土层深度 (cm) Soil depth	pH	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	碱解氮 (mg/kg) Available N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
0—20	8.49	11.29	0.78	53.68	17.79	131
20—90	8.54	10.70	0.69	58.15	8.80	115

品碳和氮元素含量分别为 57.55% 和 1.25%, 总酸性基、羧基和酚羟基含量分别为 6.30、4.00 和 1.30 mmol/g, E_4/E_6 值为 3.62。

供试肥料的制备: 将提取的腐植酸按 5‰ 的比例添加至熔融的尿素中, 充分混匀、冷却后粉碎, 过筛 (2.0 mm), 制得腐植酸尿素试验产品 HAU; 同时, 制备仅熔融但不添加腐植酸的尿素产品 U。所得肥料产品 HAU 和 U 的基本性质参考 HG/T 5045-2016 进行测定, 结果见表 2。

1.2 试验设计

试验于 2015 年 6 月 15 日~10 月 3 日在中国农业科学院德州盐碱土改良实验站禹城试验基地网室 (36° 50' N, 116° 34' E) 进行。采用土柱栽培法进行, 选用内径 25 cm、高 100 cm 的 PVC 管埋入土中, 上口高出地面 3 cm, 以防止降雨后产生的地表径流入, 下不封口, 与自然土壤直接接触, 模拟田间自然栽培状态。每个土柱装干土 50 kg, 30—90 cm 装取自田间 20—90 cm 的底层土壤, 分两次装入, 每次装入后灌水沉实; 0—30 cm 装取自田间 0—20 cm 的耕层土壤, 与肥料混匀后, 装入, 灌水。

试验共设 3 个处理: 不施氮肥对照 (CK); 施用不添加腐植酸的尿素即普通尿素处理 (U); 施用腐植酸尿素处理 (HAU)。每个处理重复 5 次。试验采用随机区组排列设计。所有肥料施用量均按 0—30 cm 土层的干土重计算, 在播种前一次性基施, 均匀混入 0—30 cm 土层。U 和 HAU 处理施氮量为 N 0.1 g/kg 干土, 即每个土柱氮素施用量为 1.5 g; 所有处理磷钾肥施用量按照充足供应原则, 分别施用 P_2O_5 0.2 g/kg 干土和 K_2O 0.2 g/kg 干土, 即每个土柱磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 施用量均为 3.0 g, 以磷酸二氢钾和

氯化钾的形式施用。

每个土柱玉米播种量为 4 粒, 三叶期间苗保留 1 株, 玉米生长期按常规栽培技术进行日常管理。玉米种植期间试验基地降雨量、温度、日照时间的变化及灌溉信息如图 1 所示。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 样品的采集 玉米收获后, 置于通风处自然风干, 并进行考种, 测定穗长、穗粗、穗行数、行粒数; 然后, 将玉米叶片、茎秆、苞叶、穗轴、籽粒分开, 于 65℃ 烘干并称重, 测定籽粒百粒重和玉米各部分的干物质量, 并分别粉碎, 过 0.149 mm 筛, 保存, 备用; 同时, 采集 0—15、15—30、30—50、50—70、70—90 cm 土层的土壤样品, 风干后, 充分混匀, 磨细, 过 0.149 mm 筛, 保存, 备用。

1.3.2 样品的分析 采集所得植物和土壤样品, 采用同位素质谱仪 (Elementar) 测定其含氮量、 ^{15}N 丰度和 $\delta^{15}N$ 。

1.4 数据处理

相关指标计算公式^[15, 23]:

植株总氮吸收量 = 植株氮含量 × 植株干物质量

施入氮肥 ^{15}N 原子百分超 = 肥料 ^{15}N 丰度 - 0.365%

植株肥料氮吸收量 = [(植株 ^{15}N 丰度 - 未施用 ^{15}N 尿素植株 ^{15}N 丰度)/施入氮肥 ^{15}N 原子百分超] × 植株氮含量 × 植株干物质量

土壤中肥料氮残留量 = [(土壤 ^{15}N 丰度 - 未施用 ^{15}N 尿素土壤 ^{15}N 丰度)/施入氮肥 ^{15}N 原子百分超] × 土壤氮含量 × 土壤质量

肥料氮损失量 = 肥料氮施用量 - 植株肥料氮吸收量 - 土壤中肥料氮残留量

表 2 供试肥料的基本性质

Table 2 Basic properties of the experimental fertilizer

肥料 Fertilizer	代码 Code	腐植酸含量 (%) Humic acid content	氮素含量 (%) N content	^{15}N 丰度 (%) ^{15}N abundance	缩二脲含量 (%) Biuret content
尿素 Urea	U	0.00	44.21	10.24	1.12
腐殖酸尿素 Humic acid urea	HAU	0.51	44.21	10.16	1.14

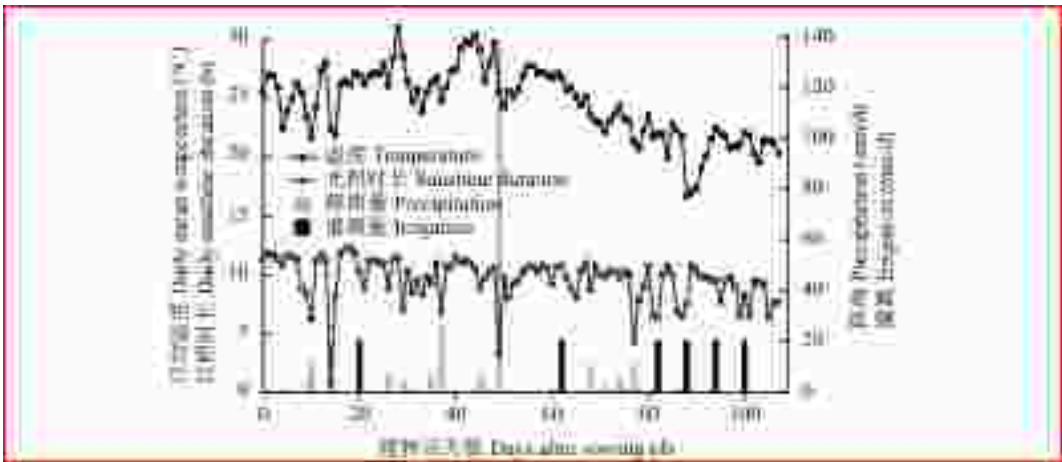


图 1 试验期间降雨量、灌溉量、日照时长和日均温度

Fig. 1 Precipitationirrigation, daily mean sunlight duration and daily mean temperature during maize growing season

肥料氮利用率 = 植株肥料氮吸收量/肥料氮施用量 × 100%

肥料氮残留率 = 土壤中肥料氮残留量/肥料氮施用量 × 100%

肥料氮损失率 = 肥料氮损失量/肥料氮施用量 × 100%

试验数据采用 SAS 8.0 软件进行统计分析，并用 Origin 9.0 作图。其中，玉米地上部各器官干物质产量及总氮吸收量、籽粒产量构成因素的结果运用单因素方差分析，LSD 多重比较处理间差异的显著性 ($P < 0.05$)；其他指标均采用成组法 t 检验分析差异的显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 玉米地上部干物质质量及籽粒产量构成因素

2.1.1 玉米地上部的干物质质量及其在不同器官中的分配 从表 3 可以看出，U 和 HAU 处理玉米植株地上部干物质质量比对照分别提高了 12.6% 和 28.1% ($P < 0.05$)；HAU 处理效果高于 U 处理；HAU 处理玉米茎秆和籽粒的干物质质量分别显著高于 U 处理 26.8%

和 14.2% ($P < 0.05$)，而两处理玉米叶片、苞叶和穗轴的干物质质量差异未达到显著性水平。

2.1.2 玉米籽粒产量构成因素 不同处理玉米产量构成因素的分析结果 (表 4) 表明，氮肥施用对百粒重无影响，而 U 和 HAU 施用条件下，玉米的穗粒数较 CK 处理分别提高了 4.9% 和 16.0%，且腐植酸尿素处理玉米的穗粒数显著高于对照 ($P < 0.05$)。

2.2 玉米地上部对氮素和肥料氮的吸收与分配

与 CK 相比，各施氮处理玉米植株地上部和不同器官的氮素吸收量均大幅增加 (图 2)。HAU 处理每柱玉米地上部的氮素总吸收量和肥料氮吸收量分别为 4.012 g 和 0.683 g，显著高于 U 处理 32.8% 和 11.5% ($P < 0.05$)。HAU 处理每柱玉米茎秆和籽粒总氮吸收量分别为 0.313 g 和 2.867 g，比 U 处理分别高 67.4% 和 32.7% ($P < 0.05$)；而玉米茎秆和籽粒的肥料氮吸收量 HAU 处理分别比 U 处理显著提高 34.1% 和 15.6% ($P < 0.05$)。玉米地上部吸收的总氮和肥料氮在各器官中的分配状况均表现出籽粒 > 叶片 > 茎秆 > 苞叶、穗轴。玉米籽粒总氮和肥料氮的吸收量分别占整个植株地上部总吸收量的 65.7%~74.2% 和

表 3 不同处理玉米地上部干物质质量及其分配 (g/column)

Table 3 Aboveground dry biomass and its allocation in maize organs under different treatments

处理 Treatment	叶片 Leaf	茎秆 Stem	苞叶 Bract	穗轴 Cob	籽粒 Grain	总计 Total
CK	51.0 ± 1.1 b	40.1 ± 2.3 b	12.5 ± 1.1 b	18.8 ± 0.6 b	166.0 ± 3.3 c	288.3 ± 5.4 c
U	58.0 ± 3.0 a	47.1 ± 3.4 b	20.0 ± 2.8 a	21.0 ± 1.7 a	178.6 ± 3.4 b	324.7 ± 11.5 b
HAU	60.8 ± 1.7 a	59.7 ± 3.9 a	19.6 ± 0.8 a	25.4 ± 0.9 a	203.9 ± 3.8 a	369.4 ± 7.5 a

注 (Note)：U—尿素 Urea；HAU—腐殖酸尿素 Humic acid urea。同一列数据后不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column mean significant differences among treatments ($P < 0.05$).

表 4 不同处理玉米籽粒产量构成
Table 4 Maize grain yield components under different treatments

处理 Treatment	百粒重 (g) 100-grain weight	穗粒数 Grains per ear
CK	30.2 ± 0.8 a	549 ± 17 b
U	31.3 ± 1.2 a	576 ± 25 ab
HAU	32.4 ± 0.8 a	637 ± 22 a

注 (Note): U—尿素 Urea; HAU—腐殖酸尿素 Humic acid urea. 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)
Values followed by different small letters in the same column mean significant differences among treatments ($P < 0.05$).

58.6%~60.5%, 为植株地上部氮素和肥料氮的主要吸收部位; 而不同施氮处理间, 同一器官总氮和肥料氮的分配比例差异不显著。U 和 HAU 处理玉米地上部肥料氮的吸收量分别为其总氮吸收量的 20.3% 和 17.1%, 差异达显著水平 ($P < 0.05$)。通过比较玉米各器官总氮和肥料氮的吸收量, 发现植株各器官所吸收的肥料氮占其总氮吸收量的 13.3%~30.9%, 且腐植酸尿素处理肥料氮所占比例低于普通尿素处理。叶片中肥料氮吸收量占其总氮吸收量的比例最高, U 和 HAU 处理下分别为 29.1% 和 26.8%; 而籽粒的肥料氮吸收量占其总氮吸收量的比例最低, 仅为 17.2% 和 14.5%。

2.3 肥料氮在土壤中的残留与分布

玉米收获后, 施氮处理各土层均能检测到肥料氮的残留 (表 5), 各土层肥料氮的残留量随其深度的增加而逐渐降低。U 和 HAU 处理 0—90 cm 土层残留的肥料氮分别为 0.290 g 和 0.293 g, 两者差异不显著。土壤中肥料氮总残留量的 64.8% 和 70.6% 均集中在 0—30 cm 土层。HAU 处理肥料氮在 0—15 cm

和 15—30 cm 土层中的残留量均高于 U 处理, 而在 30—50 cm 和 50—70 cm 土层中则表现出相反的趋势; 且两种施肥处理下, 肥料氮在 0—15 cm 和 50—70 cm 土层中的残留量差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 肥料氮在土壤-植物系统中的去向

植物吸收、土壤残留和损失是施入土壤中肥料氮的主要去向。本研究中, 当季玉米植株地上部和土壤总回收的肥料氮超过 60% (表 6)。其中, HAU 处理每柱玉米地上部对肥料氮的吸收量比 U 处理高 0.072 g, 氮肥利用率相应增加了 4.8 个百分点。HAU 处理每柱肥料氮的损失量和损失率分别为 0.524 g 和 34.9%, 比 U 处理分别降低了 0.075 g 和 5.1 个百分点。两施氮处理下, 肥料氮在 0—90 cm 土层中总残留量差异不显著。

3 讨论

3.1 腐植酸尿素对玉米产量的影响

本研究中, 腐植酸尿素处理玉米地上部及其各器官的干物质量显著高于普通尿素处理 ($P < 0.05$) (表 3), 这与庄振东等^[21]、李兆君等^[22]的结果一致。然而, 两个处理玉米植株地上部各器官干物质量占该植株地上部干物质总量的比例均未达到显著性差异, 说明腐植酸尿素施用对玉米地上部干物质分配影响不大, 这与胡昊等^[24]的研究结果一致, 其认为施肥主要影响玉米某些器官干重和元素绝对量, 而不改变相对量。因此, 腐植酸尿素对玉米干物质量的影响主要是通过促进玉米整体的生长而非影响干物质在某个器官中的分配比例来实现的。

穗粒数和粒重是单株玉米籽粒产量构成的决定性因素^[25], 穗粒数比粒重更容易受到氮素供应和水分等环境因素的影响^[26-28]。本研究中, 不同处理间玉米

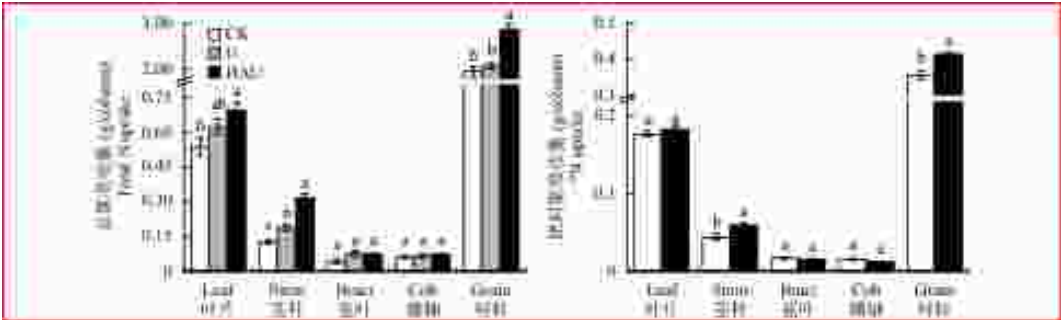


图 2 不同处理玉米地上部总氮吸收量及肥料氮吸收量

Fig. 2 Total N and fertilizer N uptake of maize shoots under different treatments

[注 (Note): U—尿素 Urea; HAU—腐殖酸尿素 Humic acid urea. 柱上不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$)
Different small letters above the bars indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).]

表 5 不同处理各土层肥料氮残留量

Table 5 Residual amounts of fertilizer N in different soil layers under different treatments

处理 Treatment	肥料氮残留量 Residual fertilizer N amount (g/column)					总计 Total
	0—15 cm	15—30 cm	30—50 cm	50—70 cm	70—90 cm	
U	0.106 b	0.082 a	0.075 a	0.020 a	0.007 a	0.290 a
HAU	0.120 a	0.087 a	0.068 a	0.011 b	0.008 a	0.293 a

注 (Note) : U—尿素 Urea; HAU—腐殖酸尿素 Humic acid urea. 同列数据后不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

表 6 不同处理肥料氮的去向

Table 6 Fate of fertilizer N under different treatments

处理 Treatment	玉米吸收 Maize uptake		土壤残留 Soil residue		损失 Loss	
	吸收量 (N g/column)	利用率 (%)	残留量 (N g/column)	残留率 (%)	损失量 (N g/column)	损失率 (%)
	Uptake	Use efficiency	Residue	Residue rate	Loss	Lost rate
U	0.611 ± 0.012 b	40.7	0.290 ± 0.004 a	19.3	0.599 ± 0.001 a	40.0
HAU	0.683 ± 0.056 a	45.5	0.293 ± 0.003 a	19.5	0.524 ± 0.006 b	34.9

注 (Note) : U—尿素 Urea; HAU—腐殖酸尿素 Humic acid urea. 同列数据后不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

的百粒重差异不显著, 穗粒数则以 $CK < U < HAU$; 施用腐植酸尿素与对照相比, 显著提高了玉米的穗粒数 ($P < 0.05$) (表 4)。表明腐植酸尿素对玉米籽粒产量的提高主要是通过增加穗粒数而实现的。这可能是由于腐植酸所具有的羧基和酚羟基等酸性官能基团能够与尿素的酰胺基发生作用, 形成腐植酸—脲络合物^[7], 该物质能够延缓尿素的释放时间^[29], 保证玉米生长过程中氮素的持续供应, 从而优化了玉米生长环境, 促进了玉米的生长和穗粒数的增加, 提高了玉米籽粒产量。

3.2 腐植酸尿素对氮素去向的影响

作物吸收、土壤残留和损失是氮肥进入土壤—作物系统后的三个基本去向。¹⁵N 示踪研究表明, 普通尿素氮的利用率、残留率和损失率分别为 40.7%、19.3% 和 40.0%; 而腐植酸尿素氮对应的数值分别为 45.5%、19.5% 和 34.9%。可见, 腐植酸尿素施用显著地促进了玉米对肥料氮的吸收, 降低了肥料氮的损失, 而对其在土壤中的总残留量影响不显著。与庄振东等^[21]的研究结果相比, 本试验中肥料氮的利用率偏高, 这可能与气候条件、品种和施肥量等密切相关^[30]。

本研究中, HAU 处理玉米地上部肥料氮吸收量及利用率均显著高于普通尿素 U 处理 (表 6) ($P < 0.05$), 究其原因, 可能是由于腐植酸与尿素结合后所形成的化学键具有较高的化学稳定性和热稳定

性, 减缓了肥料中氮素的释放, 延长了氮肥肥效, 氮素供应更加符合玉米生长及需氮规律, 从而使肥料氮利用率得以提高^[31]。土壤氮素是植物吸收氮素的主要来源, 即使在施用大量化肥的情况下, 作物吸收的氮素仍约有 50% 来自土壤, 甚至超过 70%^[17]。石德杨^[32]的研究结果表明, 土壤氮对夏玉米的贡献率为 69.2%~75.4%; 而潘晓丽等^[33]则指出, 夏玉米吸收肥料氮与土壤氮的比例接近 1 : 1, 且随着土壤肥力水平提高玉米吸收肥料氮比例下降。玉米生长过程中, 不考虑降水及灌溉所带入的氮素, 植株吸收的氮素来源有两种: 土壤的氮素和施入肥料的氮素。通过对本试验中玉米吸收的氮素来源进行分析, 发现 U 和 HAU 处理玉米吸收肥料氮分别占其总吸氮量的 20.3% 和 17.1%, 而吸收的土壤氮则占总吸氮量的 80% 左右, 表明对土壤氮的吸收比例高于其他研究结果, 这可能与本试验中氮素用量和土壤基础地力较低 (0—20 cm 土壤全氮含量为 0.78 g/kg) 有关^[30, 34]; 此外, HAU 处理的土壤氮吸收比例高于 U 处理, 说明腐植酸尿素处理玉米对土壤氮的吸收量增加, 这可能与腐植酸尿素刺激了土壤有机氮的释放相关^[15]。

土壤中残留的肥料氮是对以上刺激作用的一种补偿^[30]。本研究中残留的肥料氮主要集中在施肥层 (0—30 cm), 下层残留量逐渐减少, 但是, 70—90 cm 土层中依旧有肥料氮的残留。由此推断, 在 90 cm 以下土层可能会有肥料氮的残留, 肥料氮的实际

残留量可能会略高于测定值。通过比较两种氮肥处理肥料氮残留的差异发现, 尽管其残留总量差异不显著, 但不同土层的残留量却存在差异, 主要体现在 HAU 处理 0—30 cm 各土层残留肥料氮高于 U 处理, 而 30—70 cm 的各土层则低于 U 处理, 说明腐植酸尿素施用降低了土壤氮素的淋溶, 这与刘方春等^[35]的研究结果相似, 认为腐植酸缓效肥料在一定程度上可抑制硝态氮的淋溶。因此, 腐植酸尿素施用具有更好的环境效应。此外, 肥料氮在 0—30 cm 土层残留多, 向下淋溶少, 能够更好地满足植物根系需肥特性, 从而更有利于作物生长, 这也在一定程度上解释了腐植酸尿素施用促进玉米生长和提高玉米产量的原因。

4 结论

普通尿素中添加一定比例的腐植酸可显著促进玉米地上部各器官生长及干物质量, 但不影响其在各器官中的分配比例。腐植酸尿素主要通过增加玉米穗粒数, 籽粒产量提高 14.17%。腐植酸尿素可增强玉米对肥料氮的吸收, 使肥料氮利用率比普通尿素增加了 4.80 个百分点, 肥料氮损失率降低 5.1 个百分点; 添加腐植酸与否, 对 0—90 cm 层次土壤中肥料氮总残留量无显著影响, 但腐植酸尿素残留的肥料氮更多保持在 0—15 cm 土层, 有利于后茬作物利用。

参 考 文 献:

- [1] 郑平. 煤炭腐植酸的生产和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.
Zheng P. The production and application of coal humic acid [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1991.
- [2] Hayes M H B, Wilson W R. Humic substances, peats and sludges: health and environmental aspects [M]. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 1997.
- [3] Chefetz B, Tarchitzky J, Deshmukh A P, *et al.* Structural characterization of soil organic matter and humic acids in particle-size fractions of an agricultural soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(1): 129–141.
- [4] Iimura Y, Fujimoto M, Tamura K, *et al.* Black humic acid dynamics during natural reforestation of Japanese pampas grass (*Miscanthus sinensis*)[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57(3): 60–67.
- [5] Orlov D S, Sadovnikova L K. Soil organic matter and protective functions of humic substances in the biosphere[A]. Use of humic substances to remediate polluted environments: from the ory to practice[M]. Springer Netherlands, 2005: 37–52.
- [6] Trevisan S, Francioso O, Quaggiotti S, *et al.* Humic substances biological activity at the plant-soil interface[J]. Plant Signaling and Behavior, 2010, 5(6): 635–643.
- [7] 梁宗存, 武丽萍, 成绍鑫. 煤中腐植酸与尿素作用机理及其反应产物的组成结构研究[J]. 腐植酸, 1996, (3): 8–10.
- [8] Liang Z C, Wu L P, Cheng S X. Study on the action mechanism of humic acids derived from coal and urea and the composition and structure of reaction products[J]. Humic Acid, 1996, (3): 8–10.
- [8] 刘增兵, 赵秉强, 林治安. 腐植酸尿素氮挥发特性及影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 208–213.
- [9] Liu Z B, Zhao B Q, Lin Z A. Ammonia volatilization characteristics and related affecting factors of humic acid urea[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 208–213.
- [9] Dong L, Córdova-Kreylos A L, Yang J, *et al.* Humic acids buffer the effects of urea on soil ammonia oxidizers and potential nitrification[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(8): 1612–1621.
- [10] Piccolo A. Humic substances in terrestrial ecosystems [M]. Amsterdam: Elsevier, 1996.
- [11] Schnitzer M. A lifetime perspective on the chemistry of soil organic matter[J]. Advances in Agronomy, 1999, 68(8): 1–58.
- [12] Khattak R A, Muhammad D. Increasing crop production through humic acid in salt affected soils in Kohat division (NWFP) [A]. First Technical Progress Report[C]. Islamabad: Pakistan Agricultural Research, 2005: 93.
- [13] 程亮, 张保林, 王杰, 等. 腐植酸肥料的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (5): 1–6.
- [13] Cheng L, Zhang B L, Wang J, *et al.* Research progress of humic-acid containing fertilizer[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2011, (5): 1–6.
- [14] 赵秉强. 发展尿素增值技术, 促进尿素产品技术升级[J]. 磷肥与复肥, 2013, 28(2): 6–7.
- [14] Zhao B Q. Developing value-added urea technology to promote technology upgrade of urea[J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2013, 28(2): 6–7.
- [15] 袁亮, 赵秉强, 林治安, 等. 增值尿素对小麦产量, 氮肥利用率及肥料氮在土壤剖面中分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 620–628.
- [15] Yuan L, Zhao B Q, Lin Z A, *et al.* Effects of value-added urea on wheat yield and N use efficiency and the distribution of residual N in soil profiles[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(3): 620–628.
- [16] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [16] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook in 2014 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2014.
- [17] 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: 1–26.
- [17] Zhu Z L, Wen Q X. Soil nitrogen in China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 1–26.
- [18] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924.
- [18] Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiency of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924.
- [19] 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南

- 昌: 江西科学技术出版社, 1998.
- Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. Fertilizer issues in sustainable development of agriculture in China [M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1998.
- [20] 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.
- [21] 庄振东, 李絮花. 腐植酸氮肥对玉米产量、氮肥利用及氮肥损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1232–1239.
- Zhuang Z D, Li X H. Effects of humic acid nitrogen fertilization on corn yield, nitrogen utilization and nitrogen loss[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(5): 1232–1239.
- [22] 李兆君, 马国瑞, 王申贵, 等. 腐殖酸长效尿素在土壤中转化及其对玉米增产的效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4): 121–123.
- Li Z J, Ma G R, Wang S G, *et al.* Transformation of long-lasting UHA in soil and its effect on maize yield[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2005, 13(4): 121–123.
- [23] 赵伟, 梁斌, 杨学云, 等. 长期不同施肥对小麦-玉米轮作体系土壤残留肥料氮去向的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(8): 1628–1634.
- Zhao W, Liang B, Yang X Y, *et al.* Effects of long-term different fertilizations on the fate of residual fertilizer N in a wheat-maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(8): 1628–1634.
- [24] 胡昊, 白由路, 杨俐苹, 等. 玉米不同器官元素分布对施肥的响应[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 912–917.
- Hu H, Bai Y L, Yang L P, *et al.* Response of element distribution in various organs of maize to fertilizer application[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(3): 912–917.
- [25] Echarte L, Luque S, Andrade F H, *et al.* Response of maize kernel number to plant density in Argentinean hybrids released between 1965 and 1993[J]. *Field Crops Research*, 2000, 68(1): 1–8.
- [26] Uhart S A, Andrade F H. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set[J]. *Crop Science*, 1995, 35(5): 1376–1383.
- [27] Otegui M E, Andrade F H, Suero E E. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking[J]. *Field Crops Research*, 1995, 40(2): 87–94.
- [28] Bolaños J, Edmeades G O. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize[J]. *Field Crops Research*, 1996, 48(1): 65–80.
- [29] 刘增兵, 赵秉强, 林治安. 熔融造粒腐植酸尿素的缓释性能研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1444–1449.
- Liu Z B, Zhao B Q, Lin Z A. Study on slow release property of melting granulating humic acid urea[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1444–1449.
- [30] 左红娟, 白由路, 卢艳丽, 等. 基于高丰度 ^{15}N 华北平原冬小麦肥料氮的去向研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(15): 3093–3099.
- Zuo H J, Bai Y L, Lu Y L, *et al.* Fate of fertilizer nitrogen applied to winter wheat in North China based on high abundance of ^{15}N [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(15): 3093–3099.
- [31] 梁宗存, 成绍鑫. 煤中腐植酸与尿素相互作用机理的研究[J]. 燃料化学学报, 1999, 27(2): 176–181.
- Liang Z C, Cheng S X. Study on mechanism of interaction between coal humic acid and urea[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 1999, 27(2): 176–181.
- [32] 石德杨. 高产夏玉米密植效应与耐密机理研究及其氮素调控[D]. 山东泰安: 山东农业大学博士论文, 2016.
- Shi D Y. Research on dense planting effects and density tolerance mechanisms in high yield summer maize and N-fertilizer regulation [D]. Tai'an, Shandong: PhD Dissertation, Shandong Agricultural University, 2016.
- [33] 潘晓丽, 林治安, 袁亮, 等. 不同土壤肥力水平下玉米氮素吸收和利用的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (1): 8–13.
- Pan X L, Lin Z A, Yuan L, *et al.* Nitrogen uptake and use of summer maize under different soil fertility levels[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2013, (1): 8–13.
- [34] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 等. 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, *et al.* Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat/summer maize rotation system in Beijing suburban[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3): 264–270.
- [35] 刘方春, 邢尚军, 段春华, 等. 腐殖酸缓效肥料的 NO_3^- -N田间淋溶及土壤残留[J]. 环境科学, 2010, 31(7): 1619–1624.
- Liu F C, Xing S J, Duan C H, *et al.* Nitrate nitrogen leaching and residue of humic acid fertilizer in field soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2010, 31(7): 1619–1624.