

冬小麦—夏玉米轮作制度下腐植酸氮肥去向与平衡

庄振东, 李絮花, 张健, 曹亚茹, 王平

(土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要:为促进新型肥料的应用,减少环境污染,提高玉米、小麦产量,通过同位素示踪技术研究新型腐植酸氮肥对玉米和小麦产量、氮肥吸收利用、氮肥在土壤中分布、氮肥损失以及土壤氮素盈亏的影响。结果表明:脲基活化腐植酸氮肥和常规掺混腐植酸氮肥可显著增加玉米和小麦产量,提高氮肥利用率,增加氮肥残留量,减少氮肥损失,增加土壤氮素盈余,增加土壤氮素矿化,增加作物对土壤氮素的吸收,其中脲基活化腐植酸作用效果更加明显。脲基活化腐植酸氮肥和常规掺混腐植酸氮肥与普通尿素相比,玉米产量分别增加20.6%和9.8%,小麦产量分别增加50.5%和19.2%;玉米季氮肥利用率分别提高5.8%和3.4%,小麦季分别增加22.7%和8.6%;玉米季氮肥损失率分别减少18.3%和10.9%,小麦季分别减少20.2%和6.3%;玉米季氮肥残留率分别增加12.5%和7.5%,小麦季分别减少2.7%和2.2%。施用腐植酸氮肥能改善氮素在土壤中的分布,满足作物根系需肥特性。

关键词:腐植酸;产量;氮肥利用率;氮肥残留;氮肥损失

中图分类号:S344.1;S147.4

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2016)06-0201-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.034

The Fate and Balance of Humic Acid Fertilizer in Winter Wheat-Summer Corn Rotation System

ZHUANG Zhendong, LI Xuhua, ZHANG Jian, CAO Yaru, WANG Ping

(National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018)

Abstract: In order to promote application of the new type fertilizers, increase crop yield and reduce environmental pollution, the research explored effects of humic acid nitrogen fertilizer on corn and wheat yield, nitrogen absorption and utilization, and nitrogen distribution and loss in soil. The results showed that application of activated humic acid fertilizer and conventional mixed humic acid fertilizers could significantly promote corn and wheat yield, increase nitrogen utilization ratio, increase nitrogen residual content, reduce nitrogen loss amount, increase nitrogen surplus and net nitrogen mineralization, and promote soil nitrogen absorption. Activated humic acid fertilizer was better than conventional humic acid fertilizer. The results showed that compared with common urea, the activated humic acid fertilizer and conventional mixed humic acid fertilizers showed these effects: Corn yield were increased by 20.6% and 9.8%, respectively, and wheat yield were increased by 50.5% and 19.2%, respectively; In corn growing season, the nitrogen utilization rates were increased by 5.8% and 3.4%, respectively, while in wheat growing season, the nitrogen utilization rates were increased by 22.7% and 8.6%, respectively; In corn growing season, the nitrogen loss rates were reduced by 18.3% and 10.9%, respectively, while in wheat growing season, the nitrogen loss rates were reduced by 20.2% and 6.3%, respectively; In corn growing season, the soil nitrogen residual rates were increased by 12.5% and 7.5%, respectively, while in corn growing season, the soil nitrogen residual rates were reduced by 2.7% and 2.2%, respectively. Application of humic acid fertilizer can improve the distribution of nitrogen in the soil, which therefore can be better satisfy crop root fertilizer characteristics.

Keywords: humic acid; yield; nitrogen utilization rate; nitrogen residues; nitrogen loss

氮是作物生长的必需元素之一,施用氮肥能促进作物的生长发育,提高作物产量。中国当前主要施用

的氮肥为尿素^[1],中国氮肥发展趋势首先是对现有尿素进行改性,提高其利用率,减少氮肥损失。本文应

收稿日期:2016-05-14

资助项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0200402)

第一作者:庄振东(1988—),男,山东日照人,硕士研究生,主要从事植物营养机理与调控研究。E-mail:zhd198833@163.com

通信作者:李絮花(1964—),女,山东德州人,教授,博士生导师,主要从事植物营养调控和机理、施肥与环境质量研究。E-mail:lixh@sdau.edu.cn

用¹⁵N 示踪技术研究新型腐植酸氮肥对玉米、小麦产量、氮肥吸收利用和分配以及氮肥在土壤中分布、损失和土壤氮素盈亏的影响,为促进新型肥料的应用、减少环境污染、提高玉米、小麦产量提供理论依据。目前我国氮肥利用率约为 30%~35%,冬小麦氮肥利用率为 23%~45%,夏玉米季氮肥利用率为 24%~52%,北方地区小麦、玉米种植区域氮肥损失率在 20%~55%,高施肥区氮肥损失率在 50%左右^[2-5],在稻田中氮肥损失量可达到 50%甚至更多^[6-8]。2009 年中国氮肥产量占全球 34%,施用量占全球 33%,中国氮肥投入量还仍持续增加^[9]。我国氮肥施用量大且氮肥利用率偏低带来了严重的环境问题,因此对农田系统中氮肥的去向研究受到众多学者的广泛关注^[10-14]。

人们对腐植酸的研究时间已久,众多研究表明腐植酸能够提高肥料利用率,促进植物生长^[15-18]。当前腐植酸肥料主要有生化腐植酸肥料、腐植酸衍生物、黄腐酸肥料、腐植酸单质肥、腐植酸复合肥和腐植酸生物肥^[19]。近年来,腐植酸肥料在我国北方地区发展较快,但主要产品是在传统肥料的基础上掺入普通腐植酸。传统腐植酸活化度相对较低,对土壤培肥能力弱,因而当前任务是要提高腐植酸活化度,增强其土壤培肥能力。腐植酸对植物生长的影响一直受到关注,它能够促进作物生长,提高产量^[20],但关于腐植酸氮肥的综合去向研究相对较少。本研究应用¹⁵N 示踪技术揭示脲基活化腐植酸和传统掺混腐植酸对氮肥的吸收利用、分配以及氮肥在土壤中的分布规律,对促进新型腐植酸氮肥的应用、提高玉米、小麦的产量具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2014 年 6 月至 2015 年 6 月在山东农业大学资源与环境学院试验基地进行。该试验地属黄淮海平原区,气候特征为半湿润暖温带大陆性季风气候,全年降雨量主要集中在 6—10 月份,年平均降雨量 700 mm,年平均气温 11~15 ℃,种植制度为冬小麦—夏玉米轮作制度。供试土壤为棕壤,其基本理化性质见表 1。供试玉米品种为“郑丹 958”,小麦品种为“济麦 22 号”。

表 1 供试土壤基本理化性质

土层 深度/cm	全氮含量/ (g·kg ⁻¹)	有效磷含量/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾含量/ (mg·kg ⁻¹)	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	pH
0—20	0.69	25.96	250	15.77	6.88
20—40	0.47	23.07	210	12.34	
40—60	0.42	20.19	170	11.36	

¹⁵N 试验小区面积为 0.4²×3.14=0.5 m²,试验小区用 PVC 圆柱圈起,柱形桶高 0.6 m,直径 0.8

m。具体操作:将大田土壤挖出直径 0.8 m,高 0.6 m 的土柱,将圆柱圈套入土柱(防止扰动土层),再将土壤分层回填于外圈坑内,沉实。试验共设 4 个处理:CK1(不施氮肥)、CK2(普通尿素 N 225 kg/hm²)、HA1(脲基活化腐植酸氮肥 N 225 kg/hm²)、HA2(常规掺混腐植酸氮肥 N 225 kg/hm²),3 次重复随机区组排列,试验小区周边设有保护行。周年内氮肥投入总量为 N 450 kg/hm²。供试腐植酸氮肥由山东农大肥业有限公司提供(采用风化煤、尿素、腐植酸活化剂等研制),¹⁵N 标记氮肥占 20%,¹⁵N 丰富度为 10.21 atom%;供试氮肥为尿素(N 46%)、脲基活化腐植酸氮肥(腐植酸 15%,活化度 70%,N 29.7%)和常规掺混腐植酸氮肥(腐植酸 15%,N 29.7%);磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅ 46%),钾肥为硫酸钾(K₂O 50%)。氮磷钾肥施用量为当地的常规用量,玉米种植时间 6 月 17 日,收获时间 9 月 28 日,种植密度为 67 500 株/hm²,磷肥施用量为 P₂O₅ 90 kg/hm²,钾肥施用量为 K₂O 120 kg/hm²,氮、磷、钾均在 7 叶期一次施入。小麦种植时间 10 月 7 日,收获时间 6 月 12 日,播种量为 150 万株/hm²,磷肥施用量为 P₂O₅ 150 kg/hm²,钾肥施用量为 K₂O 150 kg/hm²,磷钾肥作基肥一次施入土壤,氮肥 1/3 作基肥施入土壤,2/3 作追肥施入土壤,追肥时间为 3 月 28 日。施肥方式采用磷钾肥沟施,氮肥溶于 3 L 水中均匀浇入土壤,表层覆土。试验在相同地块(紧邻¹⁵N 处理)另设平行小区 4.0 m×4.8 m(19.2 m²),2 次重复,施肥处理相同,不做¹⁵N 标记用以校验玉米、小麦产量。玉米、小麦均采用田间常规管理方法进行管理。

1.2 样品采集与处理

1.2.1 植株样品 玉米、小麦成熟后采集地上部植株样品,将营养器官与籽粒分拣,籽粒计产,营养器官烘干后称重,用球磨仪分别对玉米籽粒和营养器官进行研磨,备用。

1.2.2 土壤样品 在玉米、小麦种植前和收获后用土钻分别采集各小区 0—20,20—40,40—60 cm 土壤样品,每微区打 3 个钻孔,取土壤样品时同时测定土壤容重,采集土壤后立即密封带回实验室测定含水量及无机态氮含量,剩余土壤风干测定其他指标,土壤采集后用粗石英砂回填钻孔。

1.2.3 测定项目与方法 硝态氮、铵态氮含量采用 2 mol/L KCl 溶液浸提,流动注射分析仪测定;土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定;植株全氮含量采用 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮,半微量凯氏法测定;¹⁵N 丰富度采用稳定同位素质谱仪(Flash 2000H+DELTA V Advantage)测定;速效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 法测定;速效钾含量采用 NH₄OAc 浸提,火焰光度计法测定;土壤

有机质含量采用重铬酸钾容量—外加热法测定;土壤容重采用环刀法测定。

原子百分超(atom%) = 样品¹⁵N 丰富度(%) - 样品¹⁵N 丰富度(%)背景值

植物从肥料中吸收的氮素百分数(Ndff,%) = 植物¹⁵N 原子百分超/肥料¹⁵N 原子百分超 × 100

植物从土壤中吸收的氮素百分数(NDFS,%) = 100% - Ndff%

氮肥利用率% = \sum (植物各器官全氮量 × Ndff%) / 施氮量

土壤来自肥料的氮素百分数 Ndff% = 土壤样品¹⁵N 原子百分超/肥料¹⁵N 原子百分超 × 100

氮肥表观损失量(¹⁵N) = 施氮量 - ¹⁵N 测定的氮素残留量 - ¹⁵N 测定的植物吸氮量

土壤无机态氮盈亏量 = 土壤无机态氮残留总量 - 土壤起始无机态氮总量

土壤氮素矿化及其他氮素输入量 = 土壤无机态氮盈亏量 + 作物吸收的土壤氮素量 - 氮肥残留量(¹⁵N)

1.3 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2013 和 IBM

SPSS Statistics 22 分析处理。

2 结果与分析

2.1 腐植酸氮肥对产量和氮肥利用的影响

由表 2 可以看出,施用脲基活化腐植酸氮肥(HA1)和常规掺混腐植酸氮肥(HA2)的玉米、小麦产量显著高于普通尿素氮肥(CK2),表明施用腐植酸氮肥能显著提高玉米、小麦的产量,且脲基活化腐植酸氮肥的效果最好;与 CK2 相比,HA1 处理的玉米、小麦产量分别增加 20.6%和 50.5%,HA2 处理的玉米、小麦产量分别增加 9.8%和 19.2%。施用腐植酸氮肥明显增加了玉米、小麦地上部氮素积累量,与 CK2 相比,HA1 处理的小麦、玉米的地上部氮素积累量分别增加 68.9,25.8 kg/hm²,HA2 处理的分别增加 N 20.3,16.3 kg/hm²。同位素示踪技术测定的氮肥利用率明显低于差值法测定的氮肥利用率。¹⁵N 结果显示,施用腐植酸氮肥明显增加了玉米、小麦季氮肥利用率,与 CK2 相比,HA1 处理的小麦、玉米的氮肥利用率分别增加 22.7%和 5.8%,HA2 处理的分别增加 8.6%和 3.4%。对比玉米、小麦产量增幅可发现,腐植酸氮肥对小麦产量的提高效果更好。

表 2 不同施肥处理对作物产量、氮素积累量和氮肥利用率的影响

作物	处理	产量/ (kg · hm ⁻²)	氮素积累量/ (N kg · hm ⁻²)	氮肥利用率 NUE/%	
				差值法	¹⁵ N
玉米	CK1	7995.9 ± 385.2D	133.4 ± 8.0D	—	—
	CK2	10399.6 ± 358.0C	225.7 ± 3.7C	38.6 ± 1.5C	25.1 ± 0.4c
	HA1	12546.0 ± 829.8A	251.5 ± 3.4A	49.4 ± 1.4A	30.9 ± 1.2a
	HA2	11416.8 ± 221.8B	242.0 ± 1.40B	45.4 ± 0.6B	28.5 ± 1.5b
	CK1	3484.6 ± 123.7D	88.8 ± 0.8D	—	—
小麦	CK2	6605.9 ± 184.7C	170.9 ± 1.5C	36.5 ± 0.7C	30.0 ± 0.9C
	HA1	9944.0 ± 501.8A	239.8 ± 7.1A	67.1 ± 3.1A	52.7 ± 1.1A
	HA2	7873.9 ± 350.7B	191.2 ± 5.6B	45.5 ± 2.5B	38.6 ± 1.6B

注:表中不同大、小写字母分别表示差异达 1%和 5%显著水平。下同。

2.2 腐植酸氮肥对氮肥残留和分布的影响

¹⁵N 示踪技术测定的氮肥在土壤中的残留与分布见表 3。玉米季施用的氮肥有 36.8%~49.3%残留在土壤中,小麦季施用的氮肥有 43.8%~46.5%残留在土壤中。与 CK2 相比,玉米季 HA1 和 HA2 处理的土壤氮肥残留量分别提高了 12.5%和 7.5%,其中 HA1 与 CK2 差异达到显著水平;小麦季 HA1 和 HA2 处理的土壤氮肥残留量与 CK2 无明显差异。玉米季施用腐植酸氮肥后 0—60 cm 土壤氮素的残留量明显增加,施用 HA1 的土壤氮素残留量最多,其次为 HA2,以 CK2 处理的最低;残留在土壤中的氮肥主要分布在 0—20 cm 土层,占总残留量的 50.7%~56.2%,20—40 cm 土层占 18.0%~24.1%,40—60 cm 土层占 24.7%~25.8%。小麦季残留的氮肥亦主要分布在 0—20 cm 土层,占总残留量的 68.4%~71.6%;与 CK2 相比,施用脲基活化腐植酸氮肥后 0—20,20—40 cm 土壤氮肥的残留减少;施用腐植酸氮肥

40—60 cm 氮肥残留量明显增加,且 HA1 处理增加的最多。

与 CK2 相比,玉米季施用腐植酸氮肥增加了 20—40 cm 土壤氮肥残留比例,小麦季施用腐植酸氮肥增加了 0—20 cm 土壤氮肥残留比例,表明腐植酸氮肥可改善氮肥在土壤中的分布,满足玉米、小麦根系的需肥特性。

2.3 腐植酸氮肥对氮肥损失的影响

各施肥处理氮肥损失见表 4。施用腐植酸氮肥明显减少了氮肥损失,与 CK2 比较,玉米生长期和小麦生长期施用脲基活化腐植酸氮肥的氮肥损失量分别减少 41.1,45.0 kg/hm²,施用常规掺混腐植酸氮肥的氮肥损失量分别减少 24.7,14.3 kg/hm²;HA1 处理的氮肥损失率分别减少 18.3%和 20.2%,HA2 的分别减少 10.9%和 6.3%;玉米季氮肥损失明显高于小麦,同一施肥处理 CK2、HA1、HA2 玉米季氮肥损失率比小麦季分别高 14.6%,16.3%,10.0%。

表 3 氮肥在土壤中的残留与分布 (^{15}N)

作物	处理	残留率/%	氮肥残留量/($\text{N kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			占总残留量的比例/%		
			0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
玉米	CK2	36.8±1.3C	46.5±1.1C	14.9±1.3C	21.4±1.2Bc	56.2	18.0	25.8
	HA1	49.3±0.8A	56.2±0.2A	26.8±0.9A	27.9±1.8Aa	50.7	24.1	25.2
	HA2	44.3±0.8B	52.1±1.3B	23.0±0.8B	24.7±1.0Ab	52.2	23.0	24.7
小麦	CK2	46.5±2.4a	70.9±4.1a	17.7±2.1a	16.2±1.0b	68.4	17.9	15.3
	HA1	43.8±0.7a	64.6±0.3b	11.2±1.7b	22.7±1.6a	71.0	11.3	23.4
	HA2	44.3±1.5a	65.2±2.6a	12.7±1.4b	21.9±0.6a	71.6	13.1	22.2

表 4 不同施肥处理氮肥损失

处理	损失量/($\text{N kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		损失率/%	
	小麦	玉米	小麦	玉米
CK2	52.9±7.4A	85.8±2.2A	23.5±3.3A	38.1±1.0A
HA1	7.9±1.3C	44.7±4.4C	3.5±0.6C	19.8±2.0C
HA2	38.6±2.5B	61.1±2.4B	17.2±1.1B	27.2±1.1B

2.4 周年内氮肥去向与平衡

周年内,腐植酸氮肥对氮肥去向与土壤氮素平衡的影响见表 5 和表 6。与 CK2 相比,脲基活化腐植酸氮肥和常规掺混腐植酸氮肥的氮肥总残留量分别增加 22.0,11.9 kg/hm^2 ,作物吸收的总氮素量分别增加 64.2,27.1 kg/hm^2 ,氮肥损失量分别减少 86.1,38.9 kg/hm^2 ,氮肥残留率分别增加 4.9%和 2.8%,氮肥利用率分别增加 14.3%和 6.0%,氮肥损失率分别降低 19.1%和 8.6%。说明腐植酸氮肥能显著改善作物对氮肥的利用,减少氮肥损失,培肥土壤,其中脲基活化腐植酸氮肥效果更好。与 CK2 相比,脲基

表 5 不同施肥处理周年内氮肥总体去向

处理	肥料去向/($\text{N kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			肥料去向比例/%		
	氮肥残留量	作物吸收量	损失量	氮素残留	作物吸收	损失量
CK2	187.4±7.7c	123.8±1.5C	138.7±8.6A	41.7c	27.5 C	30.8A
HA1	209.4±0.5a	188.0±4.9A	52.6±5.2C	46.6a	41.8A	11.7C
HA2	199.3±2.7b	150.9±2.0B	99.8±4.4B	44.5 b	33.5B	22.2B

表 6 不同施肥处理周年内氮素平衡

处理	土壤氮素吸收量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	矿化氮/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	无机态氮盈亏/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	作物收获后土壤氮素含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
				0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
CK1	245.7±8.4d	226.0±8.4c	-19.7c	0.64c	0.49b	0.42c
CK2	272.8±2.9c	248.1±10.6b	172.8b	0.78a	0.51b	0.46b
HA1	303.3±3.9a	266.0±3.8a	181.9a	0.76ab	0.54a	0.49a
HA2	282.3±4.7b	251.7±5.4b	177.2b	0.73b	0.55a	0.46b

3 讨论

本试验采用 ^{15}N 示踪技术的研究结果表明,施用腐植酸氮肥能提高玉米、小麦产量,提高氮肥利用率,增加氮肥残留量,减少氮肥损失,且脲基活化腐植酸效果最好。许多研究表明,腐植酸能提高肥料利用率和作物产量^[15-17]。梁太波等^[16-17]研究认为,腐植酸能增加根系生物量,提高根系活力,从而增强根系对营养元素的吸收能力;Calvo 等^[20]在其相关综述中表明腐植酸能促进植物对氮素的吸收;Piccolo 等^[21]在其研究中指出腐植酸可改善土壤通气性,腐殖物质可以改善植物生理状态^[22],另外众多研究表明腐植酸能促进植

活化腐植酸氮肥和常规掺混腐植酸氮肥作物吸收的土壤氮素分别增加 30.5,9.5 kg/hm^2 ,说明腐植酸能促进作物对土壤氮素的吸收。

从玉米—小麦连作总的氮素平衡可以看出,土壤氮素输入中全年化学氮肥输入起主要作用(投入量为 $\text{N } 455 \text{ kg}/\text{hm}^2$),作物携出以土壤氮素为主,其次是化学氮肥。氮肥投入总量明显高于作物吸收的氮素总量,但残留的化学氮肥量不能补足作物吸收的土壤氮素量,但与施肥前相比,施用氮肥明显增加了土壤全氮含量。腐植酸氮肥与普通尿素相比,施用腐植酸氮肥 20—40 cm 土壤全氮含量明显增加,HA1 处理的 40—60 cm 土壤全氮含量亦明显增加。施用腐植酸氮肥能增加了土壤无机态氮的盈余,与 CK2 比较,HA1 处理明显增加了土壤无机态氮盈余。不同腐植酸氮肥处理的土壤氮素矿化量增加程度不同,其中 HA1 处理明显促进了土壤氮素矿化。

物根系生长发育^[18,23-26]。本文虽缺乏腐植酸氮肥对玉米、小麦根系生长和根系活力等指标影响的具体数据支撑,但腐植酸氮肥在提高玉米、小麦的产量、氮肥利用率和促进氮素吸收方面的作用是明确的。

本试验条件下,玉米季氮肥利用率为 25.1%~30.9%,小麦氮肥利用率为 30.0%~52.7%,同等施氮量下冬小麦的氮肥利用率高于玉米,这与其他学者研究结果一致^[2-3]。施用腐植酸氮肥处理的小麦产量增幅明显高于玉米,且脲基活化腐植酸效果更加明显,其原因可能为连续施用腐植酸氮肥所致。

^{15}N 示踪技术测定的氮肥利用率仅包括作物吸收

的示踪氮肥,没有包括因施肥交换出土壤原有氮素的部分。因此,示踪法测定的氮肥利用率一般低于差值法。本文采用示踪法测定的氮肥利用率比差值法测定的氮肥利用率低,这与众多研究结果一致^[27]。腐植酸大分子的基本结构是芳环和脂环,环上连有羧基、羟基、氨基、酰胺基、甲氧基等官能团,腐植酸的多种活性基团使其具有多种功能,如较强的亲水性、络合能力,以及较高的吸附能力^[20]。张树清等^[28]研究指出,腐植酸吸附量随着氮浓度的增加而增加,间接说明腐植酸具有较强的吸附能力。本研究表明,腐植酸氮肥明显增加了氮素在土壤0—60 cm土层的残留量,脲基活化腐植酸的作用更加明显。这可能是因为尿素施入土壤后水解为铵态氮再经硝化作用转变为硝态氮,腐植酸分子具有较多的羧基、羟基以及其他吸附能力的官能团,增加了对土壤铵态氮和硝态氮的吸附,从而减少了土壤氮素的损失,增加了土壤氮素残留量,有效降低氮肥向深层土壤的迁移,从而更好地满足作物根系的需肥特性。

腐植酸氮肥可以改善氮肥在土壤中的分布,玉米季明显增加了20—40 cm氮肥残留比例,小麦季明显增加0—20 cm氮肥残留比例,而玉米季根系主要分布在0—40 cm土层中^[29],小麦根系最大直径主要分布在0—10 cm土层中^[30],从而腐植酸氮肥更能满足玉米和小麦的需肥特性。

与CK2相比玉米季施用腐植酸氮肥处理的氮肥残留率明显增加,小麦季无差异,其原因可能为:一是小麦季氮肥利用率明显高于玉米季;二是玉米季降雨充沛,下渗严重,而腐植酸具有较好的络合作用从而减少氮肥损失,小麦季降雨较少,因而普通尿素处理的氮肥下渗较少。

从氮肥输入输出角度看,施用的氮肥能均衡土壤氮素,但¹⁵N示踪结果显示残留在土壤中的氮肥不能均衡作物吸收的土壤氮素,其原因可能是同位素测定的氮肥残留与土壤氮平衡关系忽略土壤氮素循环关系(损失的氮肥进入大气、水体等圈层,同时大气、水体中的氮素进入土壤),且本试验条件下施用的氮肥已增加了土壤全氮含量(具体土壤全氮含量开始增加的施氮量还需进一步研究),因而只考虑¹⁵N示踪技术测定的氮肥残留不能真实反应土壤氮素平衡关系。

对比施肥前后土壤氮素盈亏状况可发现施用腐植酸氮肥可增加土壤氮素盈余量和土壤氮素矿化量,其中脲基活化腐植酸作用更加明显,其原因可能是腐植酸氮肥能较好地调节土壤C/N比,提高土壤氮素矿化作用,本文虽然缺乏关于腐植酸氮肥能调节土壤C/N比、提高土壤氮素矿化作用的数据支撑,但可以说明脲基活化腐植酸氮肥可促进氮素矿化作用,增加土壤氮

素盈余。施用氮肥可改善土壤氮素盈亏状况,提高土壤无机态氮含量,这与众多研究结果一致^[31-32]。

4 结论

腐植酸氮肥能显著提高玉米、小麦产量,提高氮肥利用率,减少氮肥损失,增加土壤氮盈余。施用腐植酸氮肥小麦季产量增幅明显高于玉米季,氮肥利用率增幅亦明显高于玉米季,氮肥损失率明显低于玉米季。腐植酸氮肥可显著增加氮肥残留量,改善氮肥在土壤中的分布,更好地满足作物根系需肥特性,显著提高作物产量和氮肥利用率,促进作物对氮素的吸收利用。处理中,脲基活化腐植酸氮肥作用效果较普通腐植酸尿素效果更加明显。

参考文献:

- [1] 张卫峰,马林,黄高强,等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. 中国农业科学,2013,46(15):3161-3171.
- [2] 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.
- [3] 巨晓棠,潘家荣,刘学军,等. 高肥力土壤冬小麦生长季肥料氮的去向研究[J]. 核农学报,2002,16(6):397-402.
- [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] 吉艳芝,巨晓棠,刘新宇,等. 不同施氮量对冬小麦田氮去向和气态损失的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(3):113-118.
- [6] 尹娟,费良军,田军仓,等. 水稻田中氮肥损失研究进展[J]. 农业工程学报,2005,21(6):189-191.
- [7] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境,2000,9(1):1-16.
- [8] William R R, John B S, Gordon V J, et al. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application[J]. Agronomy Journal,2002,94(4):815-820.
- [9] 巨晓棠,谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
- [10] Ji X H, Zheng S X, Shi L H, et al. Systematic studies of nitrogen loss from paddy soils through leaching in the Dongting lake area of China[J]. Pedosphere,2011,21(6):753-762.
- [11] 李世娟,李建明. 氮肥损失研究进展[J]. 农业环境保护,2001,20(5):377-379.
- [12] 尹娟,勉韶平. 稻田中氮肥损失途径研究进展[J]. 农业科学研究,2005,26(5):76-79.
- [13] 董娴娴,刘新宇,任翠莲,等. 朝褐土冬小麦—夏玉米轮作体系氮肥后效及去向研究[J]. 中国农业科学,2012,45(11):2209-2216.
- [14] 刘德林,聂军,肖剑. ¹⁵N标记水稻控释氮肥对提高氮素利用效率的研究[J]. 激光生物学报,2002,11(2):87-92.

- [15] 梁太波,王振林,刘兰兰,等.腐植酸尿素对生姜产量及氮素吸收、同化和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(5):903-909.
- [16] 梁太波,王振林,刘娟,等.灌溉和旱作条件下腐植酸复合肥对小麦生理特性及产量的影响[J].中国农业生态学报,2009,17(5):900-904.
- [17] 王汝娟,王振林,梁太波,等.腐植酸钾对食用甘薯种钾吸收、利用和块根产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(3):520-526.
- [18] Canellas L P, Piccolo A, Dobbss L B, et al. Chemical composition and bioactivity properties of size-fractions separated from a vermicompost humic acid[J]. Chemosphere, 2009, 78(4):457-466.
- [19] 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.
- [20] Calvo P, Nelson L, Kloepper J W. Agricultural uses of plant biostimulants[J]. Plant and Soil, 2014, 383(1/2):3-41.
- [21] Piccolo A, Spiteller M. Electrospray ionization mass spectrometry of terrestrial humic substances and their size fractions[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2003, 377(6):1047-1059.
- [22] Varanini Z, Pinton R. Direct versus indirect effects of soil humic substances on plant growth and nutrition [C]. Pinton R, Varanini Z, Nannipieri P. The rhizosphere. Marcel Dekker, Basel, 2001:141-158.
- [23] Canellas L P, Dantas D J, Aguiar N O, et al. Probing the hormonal activity of fractionated molecular humic components in tomato auxin mutants[J]. Annals of Applied Biology, 2001, 159(2):202-211.
- [24] Canellas L P, Olivares F L, Okorokaova-Façanha A L, et al. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H^+ -ATPase activity in maize roots [J]. Plant Physiology, 2002, 130(4):1951-1957.
- [25] Canellas L P, Spaccini R, Piccolo A, et al. Relationships between chemical characteristics and root growth promotion of humic acids isolated from Brazilian Oxisols [J]. Soil Science, 2009, 174(11):611-620.
- [26] Jindo K, Martim S A, Navarro E C, et al. Root growth promotion by humic acids from composted and non-composted urban organic wastes [J]. Plant and Soil, 2012, 353(1/2):209-220.
- [27] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):778-783.
- [28] 张树清,刘秀梅,冯兆滨.腐植酸对氮、磷、钾的吸附和解吸特性研究[J].腐植酸,2007(2):15-21.
- [29] 管建慧,刘克礼,郭新宇.玉米根系构型的研究进展[J].玉米科学,2006,14(6):162-166.
- [30] 杨兆生,阎素红,王俊娟,等.不同类型小麦根系生长发育及分布规律的研究[J].麦类作物学报,2000,20(1):47-50.
- [31] 蔡红光,米国华,张秀芝,等.不同施肥方式对东北黑土春玉米连作体系土壤氮素平衡的影响[J].植物营养与肥料学,2012,18(1):89-97.
- [32] 杨宪龙,路永莉,同延安,等.长期施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作体系土壤氮素平衡的影响[J].植物营养与肥料学,2013,19(1):65-73.

(上接第 173 页)

参考文献:

- [1] 江忠善,李秀英.黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):40-45.
- [2] 西北黄河工程局.西北黄土区坡地固体径流和液体径流形成过程的初步研究[J].黄河建设,1957(12):16-29.
- [3] 蔡强国.坡长对坡耕地侵蚀产沙过程的影响[J].云南地理环境研究,1998(1)34-43.
- [4] 江中善,刘志,贾志伟.地形因素与坡地水土流失关系的研究[J].中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(黄土高原试验区土壤侵蚀和综合治理减沙效益研究专集),1990(2):1-8.
- [5] 江中善,李秀英.黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):40-45.
- [6] 杨子生.滇东北山区坡耕地土壤侵蚀的地形因子[J].山地学报,1999(增刊):17-19.
- [7] 杨艳生.论土壤侵蚀区域性地形因子值的求取[J].水土保持学报,1988(2):89-96.
- [8] 杨勤科,郭伟玲,张宏鸣,等.基于DEM的流域坡度坡长因子计算方法研究初报[J].水土保持通报,2010,30(2):203-206.
- [9] 蒋好忱,杨勤科.基于DEM的地形起伏度算法的比较研究[J].水土保持通报,2014,34(6):162-166.
- [10] 卜兆宏,孙金庄,周伏建,等.水土流失定量遥感方法及其应用的研究[J].土壤学报,1997(3):235-245.
- [11] 卜兆宏,孙金庄,董勤瑞,等.应用水土流失定量遥感方法监测山东全省山丘区的研究[J].土壤学报,1999(1):1-8.
- [12] 卜兆宏,唐万龙,杨林章,等.水土流失定量遥感方法新进展及其在太湖流域的应用[J].土壤学报,2003,40(1):1-9.
- [13] 卜兆宏,卜宇行,陈炳贵,等.用定量遥感方法监测 UN-DP 试区小流域水土流失研究[J].水科学进展,1999(1):32-37.
- [14] 卜兆宏,杨晓勇,王库,等.水土流失定量监测中的 DEM 精度评价新方法[J].土壤学报,2004,41(5):661-668.