doi：10.11838/sfsc.1673-6257.23723

硫酸铵增效措施对玉米产量及氮素吸收利用的影响

郝小红[1]，张　斌[2]，刘　越[3]，闫双堆[3*]

（1. 临汾市科技信息和情报研究所，山西　临汾　041000；2. 临汾市气象局，山西　临汾　041000；3. 山西农业大学资源环境学院，山西　晋中　030801）

摘　要：为探究工业副产硫酸铵高效资源化利用途径，设置利用不同增效剂和工业副产硫酸铵制备成的3种增效硫酸铵肥料处理（ASN，硝化抑制剂+硫酸铵；ASG，油脂包膜+硫酸铵；ASH，腐植酸+硫酸铵），分别以单施尿素（U）和单施硫酸铵（AS）为对照，通过大田试验研究了不同施肥措施下土壤氮素特性、玉米生长发育和氮肥利用率。结果表明：与U处理比，AS处理可使玉米产量增加22.63%，氮肥吸收利用率提高30.92%。3种增效硫酸铵肥料可以增强硫酸铵肥料的肥效，进一步促进玉米植株生长，ASN、ASG、ASH处理分别使玉米产量增加11.07%、25.26%、58.92%，氮肥吸收利用率分别提高6.17、18.27、27.57个百分点，氮肥农学效率分别提高5.10、9.57、20.16 kg/kg。可见，与普通尿素肥料相比，普通硫酸铵肥料促进玉米生长，增加玉米产量，提高氮肥利用率。3种增效硫酸铵肥料可以进一步提高硫酸铵肥料的增产增效作用。其中，腐植酸+硫酸铵的施用效果最好，这为工业副产硫酸铵在农业上应用提供了理论参考。

关键词：硫酸铵；增效措施；玉米；产量；氮肥利用

玉米是世界三大粮食作物之一，我国当今及以后对玉米的需求量还会持续增加。中国总耕地面积位列世界第四，但人均耕地面积不足世界水平的50%[1]，在人口增长、耕地面积不足等多重压力下，我国粮食安全问题仍然十分严峻[2]。实现玉米高产高效协调对我国农业可持续发展具有重要意义。施肥是获得农作物高产的主要途径，而氮肥是农业生产中主要的限制因子，30% ~ 50%的作物产量是通过增施氮肥来实现的[3]。但是，我国的肥料利用率远不及发达国家，仅为30% ~ 35%，过量施用氮肥不仅导致利用率降低，还使大量氮素流失，造成生态环境污染和经济损失。因此，如何实现肥料的高效利用和粮食增产是我国农业生产面临的重大问题。

添加一些外源增效剂是提高氮肥利用率、提高作物养分吸收的重要措施。崔磊等[4]研究表明，与单施氮肥处理相比，添加硝化抑制剂处理显著提高了玉米生物量和氮肥吸收利用率，其中添加硝化抑制剂双氰胺的处理显著提高玉米籽粒产量和氮肥吸收利用率，且3种硝化抑制剂两两结合的处理对土壤中铵态氮含量的提高效果要显著高于单独添加硝化抑制剂的处理。景旭东等[5]利用酱渣废弃物制得油包膜材料的研究表明，与普通施肥处理相比，包膜肥处理促进了玉米生长，使玉米干物质重增加了4.30%，且30 d后，土壤中有机质、全氮和碱解氮含量显著增加。庄振东等[6]研究表明，与普通尿素处理相比，添加腐植酸能显著提高玉米产量和氮肥利用率，其中氮肥利用率分别提高5.00%和3.40%，氮肥损失率分别减少18.30%和10.90%，同时腐植酸氮肥可以明显提高土壤硝态氮和铵态氮含量。可见，利用增效措施可能实现肥料的高效利用。

硫酸铵作为一种生理酸性肥料，可替代常规尿素为植物生长提供氮肥。但前人研究多集中在硫酸铵单施或硫酸铵与尿素配施等对作物生长发育的研究报道，对硫酸铵增效措施的报道较少。本文预期通过添加硝化抑制剂（3，4-二甲基吡唑磷酸盐）、腐植酸和油脂包膜来提升硫酸铵的肥效，从而增加玉米产量，提高作物氮肥利用率，增加农民的经济收入，对硫酸铵在农业生产中的应用提供理论指导。

收稿日期：2023-11-29；**录用日期：**2024-01-13

基金项目：山西省重点研发计划项目（201803D221003-2）。

作者简介：郝小红（1971-），副研究员，本科，主要从事作物信息化管理技术研究。E-mail：505297076@qq.com。

通讯作者：闫双堆，E-mail：ysdllj@126.com。

1　材料与方法

1.1　试验地区概况

试验于2020年5月3日—9月12日在山西省晋中市祁县试验大田进行，该区属于温带季风性气候，年平均气温在9.90℃左右，年均降水量为441.80 mm，主要集中在7—9月份，冬春易旱，供试土壤为石灰性褐土。供试土壤基本理化性质为pH 7.84、有机质12.89 g/kg、全氮1.57 g/kg、全磷0.96 g/kg、碱解氮57.49 mg/kg、有效磷3.03 mg/kg、速效钾139.08 mg/kg。

1.2　试验设计

选用“先玉335”玉米作为供试作物。试验采用完全随机区组设计，选取地力均匀的方形中心地带，共设5个处理：普通尿素（U）、普通硫酸铵（AS）、硝化抑制剂+硫酸铵肥料（ASN）、油脂包膜+硫酸铵（ASG）、腐植酸+硫酸铵（ASH）。试验小区长33 m、宽5 m、面积为165 m^2，4次重复，总计20个小区，总计占地3300 m^2，小区之间设置10 cm的隔离带，各处理的施氮（N）量均为220 kg/hm^2。试验施磷（P_2O_5）量为126 kg/hm^2，施钾（K_2O）量为84 kg/hm^2。70%肥料作基肥，30%作追肥，具体施肥量见表1。

表1　试验处理　（kg/hm^2）

处理代码	处理	增效途径	施肥量		
			N	P_2O_5	K_2O
U	普通尿素	—	220	126	84
AS	普通硫酸铵	—	220	126	84
ASN	增效硫酸铵1	硝化抑制剂	220	126	84
ASG	增效硫酸铵2	油脂包膜	220	126	84
ASH	增效硫酸铵3	腐植酸	220	126	84

1.3　样品采集

分别于苗期、抽穗期、成熟期进行样品采集，利用随机布点方法每小区采集长势均匀植株10 ~ 15株，分别用标尺、游标卡尺测定株高与茎粗，随机选择3株置于烘箱105℃杀青30 min后，60℃恒温烘干磨碎，制备成植物样品备用。成熟期在每小区随机选取5个1 m^2区域，记录区域内玉米穗数。将采集的玉米果实晾晒，至脱粒不损坏籽粒时，测量穗行数，随后进行脱粒，称重后磨碎备用。

分别于苗期、抽穗期、成熟期按蛇形取样法取耕层土样10个，混匀采用四分法将其中一部分用来测定土壤含水量、铵态氮和硝态氮，一部分风干过筛，备用。

1.4　测定指标及方法

植株全氮含量采用H_2SO_4–H_2O_2消煮、凯氏定氮法测定；土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定；土壤铵态氮、硝态氮采用连续流动分析仪测定。

肥料利用率计算公式如下：

氮收获指数（%）=籽粒中氮累积量/收获时植株氮素累积量 ×100

氮肥偏生产力（kg/kg）=籽粒产量/氮肥投入量

氮肥吸收利用率（%）=（施硫酸铵区吸氮量–施尿素区吸氮量）/施氮量

氮肥农学效率（kg/kg）=（施硫酸铵区玉米产量–尿素区玉米产量）/施氮量

氮素对籽粒贡献率（%）=（抽穗期植株氮素累积量–成熟期氮素累积量）/成熟期籽粒氮素累积量 ×100

1.5　数据处理

采用Excel 2020进行数据处理，Origin 2016进行绘图，采用SPSS 26.0进行显著性分析（P<0.05）。

2　结果与分析

2.1　增效硫酸铵对土壤氮素含量的影响

图1显示，各处理土壤全氮含量均随玉米生育期推进呈下降的趋势，与U处理相比，AS处理使苗期、抽穗期、成熟期土壤全氮含量分别增加8.01%、5.01%和21.09%；苗期与抽穗期，ASN、ASG、ASH处理全氮含量均高于AS处理，两个时期全氮含量平均增幅为8.64%和4.06%，其中苗期差异达到显著水平；成熟期，ASN、ASG处理全氮含量较AS处理有所增加，增幅分别为30.56%和22.42%，其中ASN处理达到显著水平，而ASH处理全氮含量较AS处理降幅3.46%。可见，施用硫酸铵可以一定程度上增加土壤氮素含量，且硫酸铵增效措施可使土壤中全氮含量进一步增加。

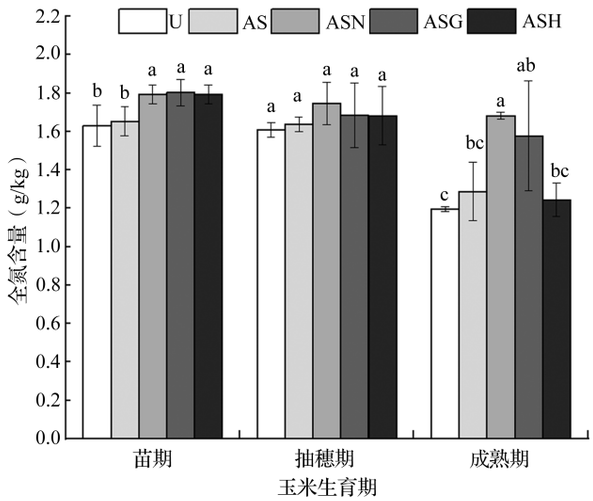

图 1　玉米不同时期土壤全氮含量

注：同一时期中不同字母表示处理间在统计学上有显著的差异（$P<0.05$），下同。

图 2a 显示，各处理土壤铵态氮含量均随生育期推进呈下降趋势。苗期，施加硫酸铵的各处理土壤中铵态氮含量均高于 U 处理。与 AS 处理相比，ASN、ASG、ASH 处理土壤中铵态氮含量增幅分别为 0.48%、3.00%、6.15%。抽穗期，AS 处理土壤中铵态氮含量较 U 处理增加 15.36%。与 AS 处理相比，ASN、ASG、ASH 处理土壤中铵态氮含量降幅分别为 4.26%、2.23%、15.93%。成熟期，AS 处理较 U 处理土壤中铵态氮含量增幅 17.95%。与 AS 处理相比，ASN 处理铵态氮含量增幅 5.71%，ASG、ASH 处理铵态氮含量则均显著降低，降幅分别为 16.92%、16.88%。

图 2b 显示，苗期，ASN、ASG、ASH 处理土壤中硝态氮含量比 AS 处理降幅为 21.41%、23.76%、19.60%。抽穗期，ASN、ASG、ASH 处理土壤中硝态氮含量比 AS 处理增幅为 28.50%、1.86%、6.33%。成熟期，ASN、ASG、ASH 处理土壤中硝态氮含量比 AS 处理降幅为 22.84%、7.15%、9.43%。由此可见，3 种稳定型硫酸铵肥料对延缓硝化作用具有时效性。

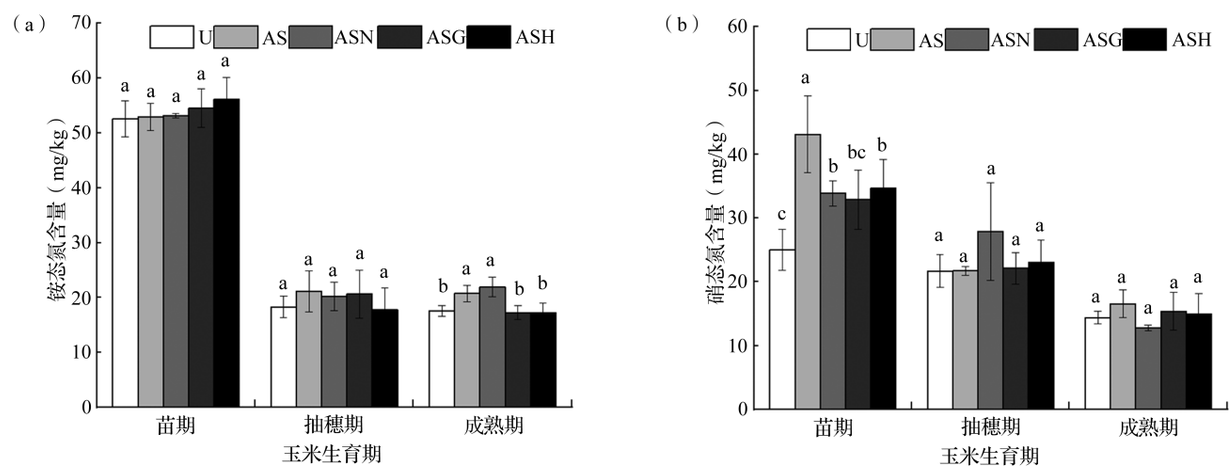

图 2　玉米不同时期土壤中铵态氮和硝态氮含量

2.2　增效硫酸铵肥料对玉米植株氮素累积量的影响

图 3 显示，各施肥处理地上部植株氮素累积量随生育期延长呈增加趋势，并在成熟期达到最大。与 U 处理相比，施加硫酸铵的各处理在苗期、抽穗期、成熟期植株氮素累积量均有所增加。与 AS 处理相比，ASN、ASG、ASH 处理均可提升成熟期玉米氮素累积量。

2.3　增效硫酸铵肥料对玉米农艺性状的影响

表 2 显示除抽穗期株高，玉米生长各时期，与 U 处理相对比，AS 处理的玉米株高、茎粗、单株干重均有所增加。苗期 ASN、ASG、ASH 处理相比于 AS 处理，株高与单株干重均有所下降。抽穗期，与 AS 处理相比，ASN、ASG、ASH 处理玉米株高与单株干重均有所降低，ASN、ASG 处理的玉米茎粗有所增加，仅 ASG 处理达到显著水平。成熟期，与 AS 处理相比，ASN、ASG、ASH 处理增加玉米株高，ASN、ASG 处理增加玉米茎粗，ASN、ASH 处理增加玉米单株干重。

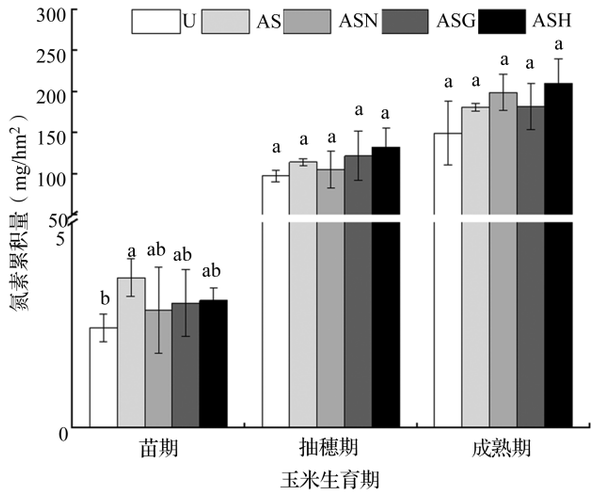

图 3　玉米不同时期地上部氮素累积量

表 2　增效硫酸铵对玉米不同生育时期农艺性状的影响

生育期	处理	株高（cm）	茎粗（cm）	单株干重（g）
苗期	U	35.31 ± 1.40c	0.75 ± 0.12a	1.04 ± 0.08c
	AS	40.83 ± 2.21a	0.84 ± 0.08a	1.53 ± 0.21a
	ASN	37.48 ± 1.97bc	0.84 ± 0.04a	1.21 ± 0.16bc
	ASG	38.74 ± 2.14ab	0.85 ± 0.03a	1.33 ± 0.23ab
	ASH	39.59 ± 1.80ab	0.85 ± 0.03a	1.35 ± 0.21ab
抽穗期	U	231.88 ± 16.59a	1.78 ± 0.06d	110.56 ± 15.24a
	AS	231.25 ± 6.53a	2.19 ± 0.03bc	115.39 ± 12.88a
	ASN	215.56 ± 3.26a	2.32 ± 0.23c	86.64 ± 13.05b
	ASG	220.50 ± 10.32a	2.50 ± 0.02a	100.04 ± 14.48ab
	ASH	222.31 ± 5.66a	2.07 ± 0.04c	96.45 ± 10.67ab
成熟期	U	265.50 ± 10.21b	1.99 ± 0.06d	332.10 ± 36.21b
	AS	280.81 ± 7.73a	2.27 ± 0.08bc	368.89 ± 27.05ab
	ASN	281.50 ± 8.55a	2.77 ± 0.29a	395.86 ± 20.35a
	ASG	285.88 ± 9.30a	2.51 ± 0.12a	360.62 ± 25.73ab
	ASH	281.19 ± 11.38a	2.14 ± 0.10cd	374.42 ± 34.82ab

注：同一列同一时期中不同字母表示处理间在统计学上有显著的差异（$P<0.05$），下同。

2.4　增效硫酸铵肥料对玉米产量及产量构成的影响

表 3 显示，与 U 处理相比，施加硫酸铵的各处理玉米产量均有所增加，AS 处理较 U 处理玉米产量增幅为 22.63%，差异达显著水平。与 AS 处理相比，ASN、ASG、ASH 处理玉米产量增幅分别为 11.07%、25.26%、58.92%。与 U 处理相比，AS 处理玉米百粒重、穗行数、穗数增幅分别为 5.59%、1.28%、15.56%；与 AS 处理相比，ASN、ASG、ASH 处理玉米百粒重均有所下降，ASN、ASG、ASH 处理玉米穗数增幅分别为 5.77%、30.77%、59.62%，其中 ASH 处理差异达到显著水平。可见，硫酸铵对比尿素可以一定程度上增加玉米产量，且 3 种增效硫酸铵肥料可进一步使玉米增产。

表 3　增效硫酸铵肥料对玉米产量及产量构成因素的影响

处理	产量（kg/hm^2）	百粒重（g）	穗行数（行）	穗数（×10^4/hm^2）
U	5646.80 ± 767.18d	35.86 ± 2.56a	15.03 ± 0.54a	5.63 ± 0.63c
AS	6924.76 ± 770.50c	37.86 ± 1.83a	15.23 ± 0.84a	6.50 ± 0.91bc
ASN	7691.20 ± 717.19bc	35.80 ± 1.18a	15.60 ± 0.65a	6.88 ± 1.03bc
ASG	8673.93 ± 473.37b	36.98 ± 3.41a	15.12 ± 1.02a	8.50 ± 2.42ab
ASH	11004.71 ± 806.20a	37.33 ± 2.60a	15.65 ± 0.84a	10.38 ± 1.03a

2.5　增效硫酸铵肥料对玉米氮肥利用率的影响

由表 4 可知，AS 处理的氮收获指数、氮肥偏生产力均高于 U 处理，分别增加了 3.04 个百分点、5.81 kg/kg。与 AS 处理相比，ASN 处理氮收获指数减少了 8.19 个百分点，ASG、ASH 处理氮收获指数分别增加 4.53、8.62 个百分点，除 ASH 处理，差异均未达到显著水平；ASN、ASG、ASH 处理氮肥偏生产力分别增加了 3.48、7.95、18.54 kg/kg，其中 ASG、ASH 处理差异达到显著水平。ASN、ASG、ASH 处理较 AS 处理使氮肥吸收利用率分别增加了 6.17、18.27、27.57 个百分点，其中仅 ASH 处理达到显著水平；施加硫酸铵各处理的氮肥农学效率与氮素对籽粒贡献率从大到小均为 ASH>ASG>ASN>AS，ASN、ASG、ASH 处理较 AS 处理的氮肥农学效率增幅为 121.83% ~ 481.37%，差异均达到显著水平，氮素对籽粒贡献率增幅为 60.04% ~ 420.75%，其中仅 ASH 处理差异达到显著水平，由此可见，与尿素处理相比，硫酸铵肥料可以提高氮肥利用率，且 3 种增效硫酸铵肥料较普通硫酸铵肥料可进一步增加氮肥利用率，减少氮素损失。

表 4　增效硫酸铵肥料对玉米氮肥利用率的影响

处理	氮收获指数（%）	氮肥偏生产力（kg/kg）	氮肥吸收利用率（%）	氮肥农学效率（kg/kg）	氮素对籽粒贡献率（%）
U	75.74 ± 8.43bc	25.67 ± 3.49d	—	—	—
AS	78.78 ± 5.83bc	31.48 ± 3.50c	30.92 ± 5.73b	4.19 ± 1.63d	7.57 ± 0.92b
ASN	70.59 ± 0.47c	34.96 ± 3.26bc	37.09 ± 4.78ab	9.29 ± 0.64c	12.11 ± 1.20b
ASG	83.31 ± 4.34ab	39.43 ± 2.15b	49.19 ± 5.13ab	13.76 ± 2.15b	18.77 ± 2.31b
ASH	87.40 ± 0.75a	50.02 ± 3.66a	58.49 ± 6.21a	24.35 ± 3.66a	39.41 ± 3.97a

3　讨论

玉米产量形成对于氮肥的需要具有一定的临界值，过量施氮不仅限制增产效果，还会造成氮素损失及氮肥利用率低，使生态环境受到威胁[7]，因此提高玉米产量与氮肥利用率、减少氮素损失意义重大。本研究表明，氮素施入土壤后，全氮、铵态氮和硝态氮含量均在苗期达到峰值，随后逐渐下降。在玉米苗期，施加尿素与普通硫酸铵肥料相比，土壤中全氮与铵态氮的含量差异不显著。苗期土壤中，施加尿素的处理硝态氮含量显著低于各硫酸铵处理。因为尿素是一种酰胺态氮，在脲酶的水解作用下先转化为铵态氮后才可以经过硝化作用形成硝态氮[8]。3 种增效硫酸铵肥料在抽穗期、成熟期土壤中全氮和硝态氮含量差异均不显著，而油脂包膜和添加腐植酸的肥料铵态氮含量显著低于添加硝化抑制剂的肥料，可能因为施加油脂包膜和添加腐植酸肥料的产量高于施加硝化抑制剂的肥料。

本研究发现，与施加尿素相比，施加硫酸铵肥料促进玉米生长，还增加玉米产量和氮肥利用率，可能原因是硫酸铵是一种生理酸性肥料，施入土壤会导致土壤 pH 降低，影响硝化反应过程中的酶活性，从而影响硝化速率[9]；硫酸铵中含有的硫酸根离子会改变渗透压，使细胞生活，抑制硝化作用[10]；且有研究发现，与尿素相比，铵诱导的根际酸化在侧根增值与发育中发挥了重要作用，导致更高的养分吸收和累积[11]。

硝化抑制剂是一种氮肥增效剂，通过延缓铵态氮到亚硝态氮的转化，抑制硝化过程[12]，从而促进作物的生长和产量的构成。本研究表明，添加硝

化抑制剂的硫酸铵肥料较普通硫酸铵肥料可以增加玉米产量和氮肥利用率，与金何玉等[13]的研究结果相似，分析原因，一方面可能是硝化抑制剂能够抑制硝化过程中的微生物和酶活性，延缓土壤中铵态氮向硝态氮的转化，使铵态氮在土壤中存留时间延长[14-15]；另一方面，与硝态氮相比，作物吸收铵态氮消耗的能量较少，尤其是铵态氮可以直接参与蛋白质代谢[16-17]。

腐植酸是一种富含多种活性官能团的天然有机高分子化合物，研究发现腐植酸具有促进作物生长、提高作物产量与肥料利用率的功能[18-19]。本研究表明，添加腐植酸的硫酸铵肥料可以促进玉米生长，提高玉米产量和氮肥利用率，其原因一方面可能是腐植酸可以提高土壤对铵态氮的吸附作用，提高铵态氮在土壤中的含量，减少氮素的淋溶损失，提高氮肥利用率[20]；一方面添加腐植酸可以提高土壤中微生物的活性与数量，腐植酸的施入丰富了土壤中微生物可利用的碳源，从而增加了土壤菌群数[21-22]；另一方面腐植酸对玉米植株产生类似生物刺激素的效果，刺激根系的生长发育，增加根系活力，进而增加玉米植株对养分的吸收利用率[23]。王冰清等[24]研究指出氮肥和腐植酸联用处理可显著提高孔雀草的生物量，能显著促进孔雀草根系生长发育，改善孔雀草的根系形态特征。

本研究表明，油脂包膜腐植酸肥料可以增加玉米的产量及氮肥利用率，其原因是油脂包膜是一种肥料缓控释途径，通过肥料颗粒表面的膜层阻隔肥料与土壤的直接接触，从而减缓肥料释放速率，减少氮素损失，提高氮肥利用率[25]。3 种增效硫酸铵肥料对玉米的增产增效效果一部分是通过增加肥料在土壤中的存留时间，减少氮素淋溶损失来实现，与本文淋溶试验结果一致，3 种增效肥料可以减少氮素的淋溶损失，有效增加铵态氮在土壤中的存留时间，从而为玉米生长提供更多可利用的氮肥。

4　结论

（1）与单施尿素相比，单施硫酸铵肥料可以增加土壤中的氮素含量，促进玉米植株生长，使玉米产量增加 22.63%，氮肥利用率提高 30.92%；

（2）3 种增效硫酸铵肥料均可以进一步增加硫酸铵的肥效，增加土壤氮素含量。3 种增效硫酸铵与普通硫酸铵肥料相比，玉米产量平均增幅分别为 31.75%，氮肥利用率平均增加 16.67%。其中腐植酸 + 硫酸铵的增产增效效果最佳。

参考文献：

[1] 刘丹，巩前文，杨文杰. 改革开放 40 年来中国耕地保护政策演变及优化路径[J]. 中国农村经济，2018（12）：37-51.

[2] 张利国. 我国区域粮食安全演变：1949—2008[J]. 经济地理，2011，31（5）：833-838.

[3] Yang L，Bai J S，Liu J，et al. Green manuring effect on changes of soil nitrogen fractions，maize growth，and nutrient uptake[J]. Agronomy，2018，8（11）：260-272.

[4] 崔磊，李东坡，武志杰，等. 高效稳定性硫酸铵氮肥在黑土中的施用效果[J]. 应用生态学报，2020，31（7）：2390-2398.

[5] 景旭东，刘源，林海琳，等. 共轭酱渣废油包膜肥对玉米生长的影响及膜层结构分析[J]. 江苏农业学报，2016，32（3）：563-569.

[6] 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.

[7] Erisman J W，Sutton M A，Galloway J，et al. How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. Nature Geoscience，2008，1（10）：636-639.

[8] 葛均筑，李淑娅，钟新月，等. 施氮量与地膜覆盖对长江中游春玉米产量性能及氮肥利用效率的影响[J]. 作物学报，2014，40（6）：1081-1092.

[9] Zilio M，Pigoli A，Rizzi B，et al. Using highly stabilized digestate and digestate-derived ammonium sulphate to replace synthetic fertilizers：the effects on soil，environment，and crop production[J]. Science of the Total Environment，2022，815：152919.

[10] 栗方亮，李忠佩，刘明，等. 硫酸铵施用量和温度对红壤稻田土硝化作用及微生物特性的影响[J]. 生态与农村环境学报，2012，28（4）：410-415.

[11] 佟德利，徐仁扣. 3 种氮肥对红壤硝化作用及酸化过程影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报，2012，18（4）：853-859.

[12] Ma Q，Tang H，Rengel Z，et al. Banding phosphorus and ammonium enhances nutrient uptake by maize via modifying root spatial distribution[J]. Crop & Pasture Science，2013，64（10）：965-975.

[13] 金何玉，张明超，陈光蕾，等. 硝化抑制剂对糯玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. 华北农学报，2020，35（5）：171-177.

[14] 李永强，王雅楣，杨越超，等. 几种硝化抑制剂和包硫尿素（SCU）对土壤 N 素形态和小麦产量的影响[J]. 农业资源与环境学报，2016，33（3）：230-237.

[15] 王亚男，闫双堆，刘越，等. 硫酸铵与 DMPP 配施对石灰性

褐土氮素转化及 N_2O、CO_2 排放的影响[J]. 水土保持学报，2021，35（3）：284–289，295.

[16] 张盼盼，李川，张美微，等. 氮肥减施下添加硝化抑制剂对夏玉米灌浆期叶片生理特性的影响[J]. 核农学报，2022，36（10）：2056–2062.

[17] 崔磊，李东坡，武志杰，等. 不同硝化抑制剂对红壤氮素硝化作用及玉米产量和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报，2021，32（11）：3953–3960.

[18] 于正国，袁亮，赵秉强，等. 腐植酸与尿素结合工艺对尿素在潮土中转化的影响[J]. 中国土壤与肥料，2022（1）：206–212.

[19] Zhang S Q，Yuan L，Li W，et al. Effects of urea enhanced with different weathered coal–derived humic acid components on maize yield and fate of fertilizer nitrogen[J]. Journal of Integrative Agriculture，2019，18（3）：656–666.

[20] 孙海燕，孙义卓，周娈，等. 化肥减量配施腐植酸生物肥对土壤生物学性质和玉米干物质量的影响[J]. 应用生态学报，2022，33（3）：677–684.

[21] 李军，袁亮，赵秉强，等. 腐植酸尿素对玉米生长及肥料氮利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2017，23（2）：524–530.

[22] 张水勤，袁亮，林治安，等. 腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报，2017，23（4）：1065–1076.

[23] 刘越，张乃于，曹梦瑶，等. 硫酸铵与腐植酸及改性腐植酸配施对氨挥发的影响[J]. 中国土壤与肥料，2022（5）：158–165.

[24] 王冰清，阳琴，李虹颖，等. 铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除[J]. 环境科学，2021，42（12）：6006–6013.

[25] 杜加银，茹美，田莉，等. 植物油脂包膜尿素的氮素释放及其对黑麦草养分吸收利用的影响[J]. 水土保持学报，2013，27（1）：102–106.

Effects of ammonium sulfate synergistic measures on yield，nitrogen uptake and utilization of maize

HAO Xiao-hong[1]，ZHANG Bin[2]，LIU Yue[3]，YAN Shuang-dui[3*]（1. Institute of Information Science and Technology of Linfen，Linfen Shanxi 041000；2. Meteorological Bureau of Linfen，Linfen Shanxi 041000；3. College of Resources and Environment，Shanxi Agricultural University，Jinzhong Shanxi 030801）

Abstract：In order to explore the efficient utilization measures of industrial by-product ammonium sulfate，the effects of three kinds of synergistic ammonium sulfate fertilizers（ASN，nitrification inhibitor + ammonium sulfate；ASG，lipid coating + ammonium sulfate；ASH，humic acid + ammonium sulfate）on the soil nitrogen characteristics，maize growth and development，nitrogen use efficiency were studied，with urea（U）and ammonium sulfate（AS）as the controls. The results showed that，compared with U，AS treatments increased maize yield by 22.63% and nitrogen absorption and utilization rate by 30.92%. Three kinds of enhanced ammonium sulfate fertilizers enhanced the fertilizer efficiency and further promoted maize growth. Maize yield increased by 11.07%，25.26% and 58.92% under ASN，ASG and ASH treatments，respectively，and the nitrogen absorption and utilization rate increased by 6.17，18.27 and 27.57 percentage points，respectively. Nitrogen fertilizer agronomic efficiency increased by 5.10，9.57 and 20.16 kg/kg，respectively. Compared with urea fertilizer，ammonium sulfate fertilizer promoted maize growth and yield and improved the utilization rate of nitrogen fertilizer. Three kinds of enhanced ammonium sulfate fertilizers could further improve maize production and fertilizer efficiency of ammonium sulfate. Among them，humic acid + ammonium sulfate showed perfect effects，which provided a theoretical reference for the application of industrial by-product ammonium sulfate in agriculture.

Key words：ammonium sulfate；efficiency enhancing measures；maize；yield；nitrogen fertilizer utilization