

不同施肥条件下甘肃夏玉米农田灌淤土 土壤氨挥发研究

杨晓云¹, 杨虎德^{1,2}

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 通过间歇密闭室抽气法对不同施肥方式下甘肃农田灌淤土土壤氨挥发, 以及不同施肥方式对玉米生长发育与氮素平衡的影响进行了研究。结果表明, 基肥与追肥氨挥发分别持续了 15 d 与 11 d, 基肥时期氨挥发累积量在 $2.970 \sim 4.123 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 占施肥量的 0.81% ~ 1.65%; 追肥时期累积量在 $6.240 \sim 8.347 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 占施肥量的 3.1% ~ 4.6%; 覆膜 + 尿素施肥条件下农田氨挥发损失较小, 氮肥利用率高, 千粒重比常规施肥高出 3.6% ~ 11.9%; 产量比常规施肥高出 24.98% ~ 36.73%; 降低氮盈余量 $40.46 \sim 68.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。综上所述, 覆膜施肥(尿素深施/表施灌水)能降低土壤氨挥发损失, 促进夏玉米生长发育及产量, 增加生产效益, 农业面源污染小。因此, 可以在甘肃灌淤土玉米种植区进行大面积推广使用。

关键词: 氨挥发; 灌淤土; 施肥方式; 夏玉米; 氮素平衡

中图分类号: S143.1 文献标志码: A

The ammonia volatilization of anthropogenic-alluvial soil in summer maize farmland under different fertilization methods in Gansu Province

YANG Xiao-yun¹, YANG Hu-de^{1,2}

(1. Academy of Resources and Environment of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Institute of Soil and Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: The effects of different fertilization methods on the ammonia volatilization of anthropogenic-alluvial soil and maize growth and nitrogen balance were studied by intermittent closed chamber pumping method. The results showed that the ammonia volatilization of basal fertilizer and topdressing fertilizer continued for 15 days and 11 days. The accumulation of ammonia volatiles during basal fertilizer period was between 2.970 and $4.123 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, accounting for 0.81% to 1.65% of the total amount of fertilizer, and the accumulation of ammonia volatiles during topdressing fertilizer period was between $6.240 \sim 8.347 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, accounting for 3.1% to 4.6% of the amount of fertilizer applied; The loss of ammonia volatilization was lower under the condition of film and urea fertilization, and the utilization rate of nitrogen fertilizer was higher than that of conventional fertilization. The mass of 1000 grains was higher than that of conventional fertilization 3.6% to 11.9%, and yield of maize was higher than that conventional fertilization 24.98% to 36.73%; reduce the nitrogen surplus of 40.46 to $68.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. In summary, the application of film mulching (urea deep application / surface irrigation) can reduce soil ammonia volatilization loss, promote the growth and development of summer maize and yield, increase production efficiency, decrease agricultural non-point source pollution. Therefore, film mulching will be large-scale used in anthropogenic-alluvial soil of the summer maize planting area in Gansu Province.

Keywords: ammonia volatilization; anthropogenic-alluvial soil; fertilization method; summer maize; nitrogen balance

氮素是植物生长发育不可或缺的重要营养元素^[1], 农田施用氮肥后可以显著提高作物产量, 从而促进粮食生产。但近十几年来, 由于化肥投入量的

增加和耕地土壤肥力的不断提高, 氮肥的增产效果逐渐降低。大量研究表明, 施入农田土壤的氮素, 其去向大致为三个方面: 第一, 作物吸收利用; 第二, 在

土壤中被固定残留;第三,由于各种途径被损失^[1-2]。氨挥发损失是一个重要的损失途径。据统计,全球施入到农田土壤中的氮肥,大约有 1%~47%通过氨挥发途径进入到大气中^[3]。灌淤土是甘肃省干旱半干旱地区重要的农业土壤,但由于土壤自身肥力低,盐渍化严重,漏水、漏肥等问题^[4],在灌淤土上种植的小麦、玉米等粮食作物产量较低。为了获得高产就必须加大养分投入,大量化学氮肥的输入虽然补充了土壤氮库,有利于培肥地力,但农田氨挥发损失也随之加大。不仅造成作物产量降低和氮肥利用率下降,而且大量的氨气进入大气给生态环境带来了许多潜在危害。

夏玉米是甘肃灌淤土农业区主要种植的作物,对该地区粮食安全与农民增收具有重要作用^[5],但夏玉米生长季节气温与土壤 pH 较高,氨挥发损失较为严重^[6-7],造成了氮肥投入成本大,收益少,且污染环境等问题。国内关于氨挥发的研究主要集中在南方水稻田不同施肥方式和施氮量对氨挥发的影响,以及平原地区粮食作物和蔬菜农田氨挥发损失、氨挥发机理等方面研究,而对甘肃灌淤土农业区夏玉米农田土壤氨挥发研究相对较少,且主要在室内进行模拟研究,多为研究方法或单一肥料运筹等相关研究,缺乏大田条件下不同施肥方式对土壤氨挥发规律的研究与评估。本试验研究了不同施肥条件对夏玉米农田灌淤土土壤氨挥发的影响,旨在探明施氮后氨挥发损失量及其动态变化,不同施肥方式对玉米生长发育及产量的影响,为确定该地区适宜施氮量及施肥方式,提高氮肥利用率,减少氮素损失,优化栽培技术措施,降低农业环境污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015 年在甘肃省兰州市安宁区农科院土壤肥料与节水农业研究所试验基地(36°5′N, 103°4′E)进行,该区属中温带大陆性气候,年平均气温 10℃,年平均降水量 360 mm,降水主要集中在 6~9 月,无霜期约 180 d 以上,海拔高度 1 550 m,监测点地块平整,连片集中。土壤属灌淤土肥力水平低,耕层土壤全氮 0.95 g·kg⁻¹,全磷 0.70 g·kg⁻¹,全钾 20.4 g·kg⁻¹,碱解氮 65.4 mg·kg⁻¹,有效磷 8.90 mg·kg⁻¹,速效钾 88 mg·kg⁻¹,有机质 11.22 g·kg⁻¹,硝态氮 103.36 mg·kg⁻¹,铵态氮 2.53 mg·kg⁻¹,pH 8.20。

1.2 试验方案

1.2.1 试验设计 试验设 8 个处理(表 1),3 次重

复,小区面积 4 m²,随机区组排列,施肥深度 20 cm。起垄种植,垄宽 60 cm,沟宽 30 cm,垄高 10 cm。平作覆膜种植,膜宽 80 cm,无覆膜间距 30 cm。

基肥与追肥按 1:1 比例(300 kg·hm⁻²)分别于 4 月 27 日撒施翻耕(20 cm 深)(基肥);7 月 11 日于行间撒施并立即大水灌溉(追肥),灌溉水量 1 050 m³·hm⁻²,即每个小区 0.4 m³ 水。其后不再进行灌溉,其它种植管理都按常规方法进行。

1.2.2 供试材料 (1) 尿素:兰州市兰化宏大公司生产,含氮量 46%;(2) 施可丰复合肥:山东史丹利化肥股份有限公司生产,N、P、K 含量均为 18%;(3) 尿酶抑制剂乙酰氧肟酸:苏州天可贸易有限公司生产,含量 > 99%;(4) 地膜:厚度 0.01 mm,兰州金土地塑料制品有限公司;(5) 玉米秸秆:10 cm 小段覆盖地表;(6) 麦草:机械粉碎后均匀撒在小区内然后翻埋;(7) 供试土壤:供试土壤为灌淤土;(8) 供试作物:品种选用先玉 335,敦煌种业先锋良种有限公司。

1.3 样品采集及测定

1.3.1 氨气捕获方法 采用间歇密闭室抽气法测定氨挥发量^[8];密闭室法测定原理是利用空气置换将土壤挥发出来的 NH₃ 随气流进入吸收瓶中,然后将吸收液带回室内测定(图 1)。测定时,用玻璃转子流量计测定真空泵流量,控制在 10~15 r·min⁻¹。施肥后当天开始测定,抽气时,将底座扣入土壤表面 3 cm 深,然后盖上罩子。每天 09:30—11:30 抽气 2 h,记录该时段温度。抽气结束以后,将密闭罩取下并将氨的吸收液拿回实验室,然后通过标准稀盐酸滴定来计算氨挥发损失量。从施肥后持续测定直到施肥处理与空白对照的氨挥发损失量无差异时为止(10~15 d)。在试验开始前和结束后对各小区土壤进行采集(0~20 cm 鲜土,取土位置随机),用于土壤含水量、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量测定。

1.3.2 玉米生长发育指标及产量的测定方法 玉米生长发育指标分别在玉米的苗期(5 月 28 日)、拔节期(6 月 11 日)、抽雄期(7 月 15 日)、灌浆期(7 月 28 日)、成熟期(9 月 29 日)进行田间各小区调查,在玉米成熟收获时对其生物量、产量、千粒重等进行测定。

玉米收获时从每个小区中随机选取 10 株完整的玉米植株带回实验室,然后将玉米秸秆和籽粒样品取样并处理,采用浓硫酸消煮法结合自动定氮仪测定玉米秸秆和籽粒的氮素含量,然后计算氮素利用率。

表 1 试验各处理施肥方式和养分投入量
Table 1 Test the handling of fertilizing and nutrient inputs

代号 Code	处理 Treatment	施肥量/(kg·667m ⁻²) Fertilizer amount	施肥量/(kg·hm ⁻²) Fertilizer amount	小区肥料施用量/(g·plot ⁻¹) Fertilizer amount in plot
A	对照 CK	0	0	平作 + 不施肥 Flat + no fertilizer
B	垄作覆膜 + 尿素 The plastic mulching + urea	20	300	半膜垄作 + 尿素 30 g The plastic mulching + urea 30 g
C	平作覆膜 + 尿素 Flat film mulching + urea	20	300	全膜平作 + 尿素 30 g Flat film mulching + Urea 30 g
D	平作 + 常规施肥 Flat + conventional fertilizing	20	300	平作 + 尿素 30 g Flat + urea 30 g
E	平作 + 施用施可丰 Flat + compound fertilizer	51	765	平作 + 施可丰复合肥 76.6 g Flat + compound fertilizer Shikefeng 76.6 g
F	平作 + 尿素 + 尿酶抑制剂 Flat + urea + urinary enzyme inhibitor	20	300	平作 + 尿素 30 g + 乙酰氧肟酸 0.15 g(100 g·667m ⁻²) Flat + urea 30 g + acetohydroxamic acid 0.15 g
G	平作 + 尿素 + 玉米秸秆 Flat + urea + maize stalk	20	300	平作 + 尿素 30 g + 玉米秸秆覆盖 1.2 kg(800 kg·667m ⁻²) Flat + urea 30 g + maize stalk mulching 1.2 kg
H	平作 + 尿素 + 粉碎麦草 Flat + urea + crushed wheat straw	20	300	平作 + 尿素 30 g + 粉碎麦草 0.75 kg(500 kg·667m ⁻²) Flat + urea 30 g + crushed wheat straw 0.75 kg

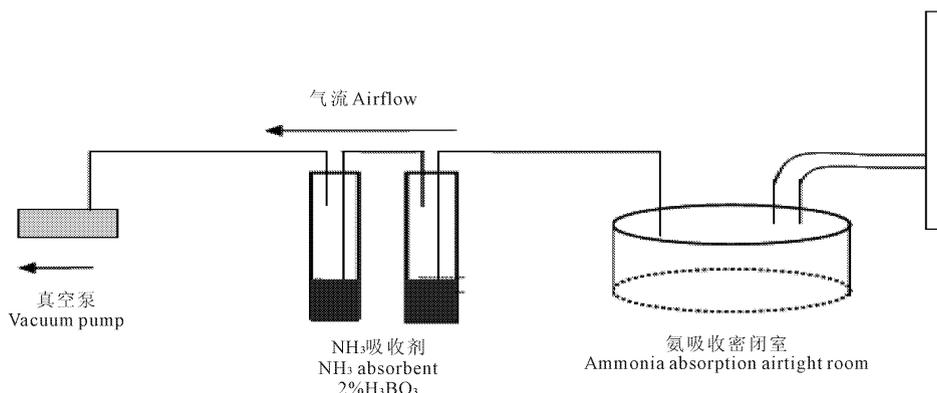


图 1 田间原位氨挥发密闭室空气交换法装置示意图

Fig.1 Field in-situ ammonia volatilization airtight room air exchange device

1.4 计算方法

通过单位面积和单位时间内的 NH₃ 挥发通量计算得出氨挥发速率,由此得出日氨挥发通量,计算公式为:

$$W_N = (V - V_0) \times C \times M \quad (1)$$

式中, W_N 指单位时间内硼酸所吸收氮的数量(g); V 为滴定消耗盐酸标液量(mL); V₀ 为空白滴定消耗盐酸标液量(mL); C 为盐酸标液浓度(0.01 mol·L⁻¹); M 指氮的摩尔质量(14 g·mol⁻¹)。

$$NH_3 - N = (W_N \times 24) / S \quad (2)$$

式中: W_N 指单位时间内硼酸所吸收氮的数量(g); S 为收集装置的横截面积(m²)。根据施肥后日氨挥发量用加权法计算得出整个周期内累积氨挥发量(kg·hm⁻²·d⁻¹)。

土壤氨挥发损失率(%) = (施肥处理区氨挥发累积损失量 - 对照处理区氨挥发累积损失量) / 土壤施氮量 × 100;

肥料利用率的计算方法:

土壤氮依存率(%) = 对照区吸氮量 / 施肥处理区吸氮量 × 100;

肥料农学利用率(g·g⁻¹) = (施肥处理区产量 - 对照区产量) / 施肥量;

肥料贡献率(%) = (施肥区产量 - 对照区产量) / 施肥区产量 × 100;

氮肥利用率(%) = (施肥处理区植株吸氮量 - 对照区植株吸氮量) / 施氮量 × 100;

根据土壤氮平衡可得出此公式:

氮素表观损失(kg·hm⁻²) = (施氮量 + 起始无机氮量 + 氮矿化量) - (植株吸收 + 土壤中无机氮)

量);

土壤氮素净矿化量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 对照区地上氮素累积量 + 对照区地下残留无机氮量 - 对照区起始无机态氮量;

氮盈余($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 氮素表观损失量 + 土壤残留无机氮含量。

1.5 数据分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件对数据进行多重比较和方差分析。

2 结果与分析

2.1 施基肥后不同施肥处理土壤氨挥发速率动态变化

从图 2 可以看出,施基肥后各处理氨挥发速率都成双峰趋势变化,但氨挥发速率大小各不相同。各处理在施基肥后氨挥发速率迅速上升,A、C、D 处理在第 2 天达到峰值;B、E、F、G、H 处理在第 3 天达到峰值,之后出现降低的趋势。随着时间的推移,各处理挥发速率在一定范围内上下波动。第 11 天时,各处理氨挥发速率出现第二个峰值,峰值较小,之后氨挥发速率逐渐降低,直到第 15 天后,各处理与对照无显著差异。就不同基肥处理与对照 A 相比,不同处理施肥后氨挥发速率均显著高于 A。B、C、D、F、G 处理的氨挥发速率明显高于 A、E、H 处理。氨挥发平均速率大小依次为 $D > G > C > F > H > B > E > A$ 。经过多重比较分析表明,施肥处理与对照之间差异显著;除了 B、F、H 不显著,D、G 不显著外,各施肥处理间差异显著(见表 2)。

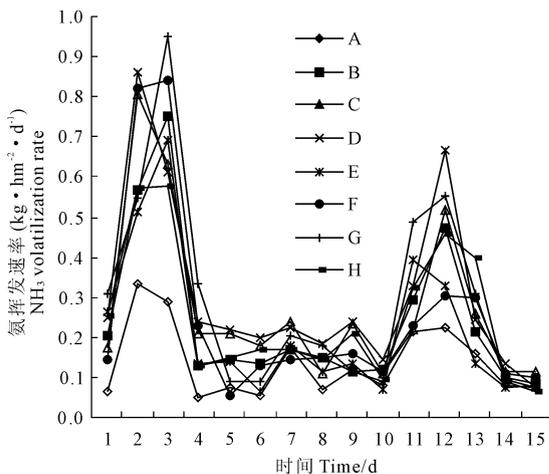


图 2 施基肥后土壤氨挥发速率的动态变化

Fig.2 Change of NH_3 volatilization after application of basal fertilizer at planting

2.2 追肥后不同施肥处理土壤氨挥发速率动态变化

从图 3 可以看出,施追肥后各处理氨挥发速率都成单峰趋势变化,但氨挥发速率也大小各不相同。各处理在施基肥后氨挥发速率迅速上升,除 A、G 处理施肥第 1 天达到峰值,其余处理都在第 2 天达到峰值,之后出现降低的趋势。随着时间的推移,各处理挥发速率在一定范围内波动并逐渐降低。第 11 天的时候,各处理与对照无显著差异。不同追肥处理与对照 A 相比,氨挥发速率均显著提高。氨挥发平均速率大小依次为 $F > H > E > D > G > C > B > A$ 。经过多重比较分析表明,施肥处理与空白之间差异显著;除了 B 与 C、D 与 G、E 与 H、E 与 F 处理之间不显著外,各施肥处理间的差异显著(见表 2)。

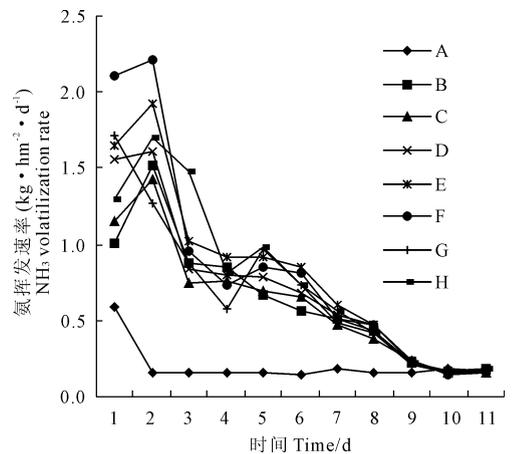


图 3 施追肥后土壤氨挥发速率的动态变化

Fig.3 Change of NH_3 volatilization after application of fertilizer at side-dressing

2.3 不同施肥处理对玉米农田土壤氨挥发累积量的影响

从基肥氨挥发累积量变化图(图 4)可以看出:各施肥处理氨挥发量主要集中在 1~4 d 和 10~14 d。从 B~H 处理氨挥发总量来看(表 2),D 处理的氨挥发量最高为 $4.123 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,E 的氨挥发量最少为 $2.970 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,A 对照氨挥发速率为 $1.850 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,B、C、F、G、H 氨挥发量分别为 3.243 、 3.732 、 3.419 、 3.938 、 $3.399 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,大小依次为 $D > G > C > F > H > B > E > A$ 。施肥处理氨挥发量减去对照氨挥发量则为氨挥发净损失量,氨挥发的净损失总量范围在 $1.120 \sim 2.273 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,占施肥量的 $0.81\% \sim 1.65\%$ 。分析表明(表 2),除 B、H、F 之间,D、G 之间氨挥发累积量差异不显著外,其余各处理间氨挥发累积量差异显著。

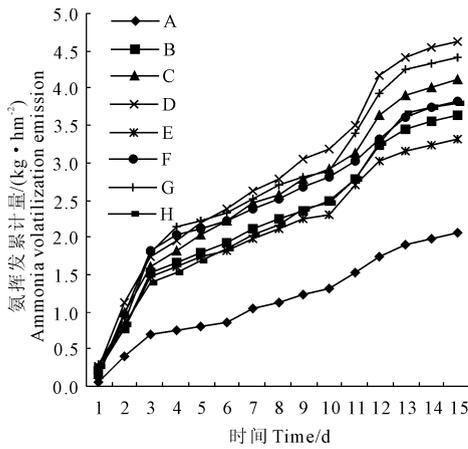


图 4 施基肥后土壤氨挥发累积量的动态变化
Fig.4 Change of NH₃ volatilization accumulated figure after application of fertilizer at planting

从施追肥后土壤氨挥发累积量变化图(图 5)可以看出:各施肥处理氨挥发量主要集中在前 7 d。从各追肥处理氨挥发总量来看(表 2),F 的氨挥发量最高,为 8.347 kg·hm⁻²,C 的最少,为 6.240 kg·hm⁻²,对照 A 氨挥发量为 2.017 kg·hm⁻²,B、D、E、G、H 氨挥发量分别为 6.337、7.104、8.081、6.888、7.791

kg·hm⁻²,大小依次为 F>E>H>D>G>B>C>A。氨挥发的净损失总量范围在 4.223~6.330 kg·hm⁻² 之间,占施肥量的 3.1%~4.6%。多重比较分析表明(表 2),除了 E、F、H 之间,D、G 之间,B、C 之间氨挥发累积量差异不显著外,其余处理间差异显著。

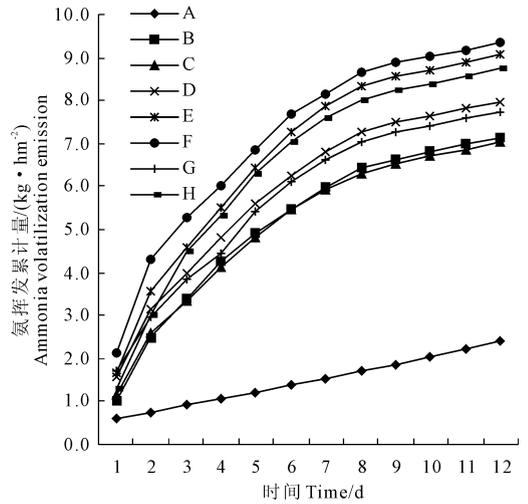


图 5 施追肥后土壤氨挥发累积量的动态变化
Fig.5 Change of NH₃ volatilization accumulated figure after application of fertilizer at side-dressing

表 2 土壤氨挥发损失率和通量

Table 2 Soil loss rate of ammonia volatilization and flux

处理 Treatment	氨挥发损失量/(kg·hm ⁻²) Accumulative loss amounts		氨挥发净损失率/% Loss rate		时段氨挥发通量/(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹) Time flux	
	基肥期 Base period	追肥期 Topdressing stage	基肥期 Base period	追肥期 Topdressing stage	基肥期 Base period	追肥期 Topdressing stage
A	1.850a	2.017a	0.00	0.00	0.137a	0.286a
B	3.243b	6.337b	1.01	3.13	0.243c	0.474b
C	3.732c	6.240b	1.36	3.06	0.275d	0.490d
D	4.123d	7.104c	1.65	3.69	0.308e	0.524e
E	2.970e	8.081de	0.81	4.39	0.221b	0.808b
F	3.419b	8.347e	1.14	4.59	0.255c	0.935c
G	3.938c	6.888c	1.51	3.53	0.295e	0.953de
H	3.399b	7.791d	1.12	4.18	0.254c	0.948c

注:不同处理间字母相同的表示无显著性差异(P>0.05)。下同。

Note: The same letters denote no significant difference (P>0.05) between the treatments. The same below.

2.4 不同施肥处理对玉米不同时期生长发育的影响

在玉米生长发育过程中,不同施肥处理对玉米的生长性状有很大影响,从表 5 可以看出,不同施肥处理的出苗率各不相同。出苗率最高为平作覆膜方式,垄作覆膜次之,出苗率在 95%~97.5%之间,其余处理出苗率较低在 92.5%~94.2%之间;在夏玉米的幼苗期和拔节期,不同施肥处理间玉米植株高度相差较小,两个时期玉米株高都在 35~37 cm 左右(表 3)。在拔节期以后玉米开始迅速生长,在玉

米抽雄期不同施肥处理的玉米株高大小为 C>B>F>D>H>G>E>A。玉米的叶长对玉米的生长具有重要作用,在玉米生长时期,不同施肥处理间叶长相差不大(表 4)。从拔节期到抽雄期,垄作覆膜和平作覆膜施肥处理叶长的增幅最大,幅度在 27.49~33.05 cm。在相同施氮量情况下,各施肥处理玉米的叶宽,在不同时期表现出的生长趋势与叶长、株高相似,垄作覆膜、平作覆膜施肥处理与常规施肥处理之间差异不明显。

在玉米成熟收获时,对玉米植株的各项指标进行了测量与统计(表 5)。在玉米植株高度方面,各施肥处理高度差距不明显,范围在 232 ~ 246 cm 之间;在植株叶片数方面,对照处理的植株叶片数较少为 11.5 个,其余施肥处理叶片数在 12.4 ~ 13.6 个之间,相差不大。不同施肥处理玉米的植株干重有一定的差异,其中植株干重最大的是玉米秸秆覆盖施肥处理,为 3.96 kg,麦草粉碎还田与尿酶抑制剂 + 尿素施肥处理植株干重较小,分别为 2.69、2.70 kg;其余施肥处理植株干重相差不大,在 3.03 ~ 3.49 kg。在玉米籽粒含水率方面,垄作覆膜与平作覆膜施肥处理明显低于其它施肥处理,为 0.156%、0.219%;而尿酶抑制剂 + 尿素与麦草粉碎还田施肥

处理含水率最高,为 0.386%、0.390%;其余施肥处理含水率在 0.309% ~ 0.350%。在玉米秸秆含水率方面,基本与玉米籽粒含水率变化相似,垄作覆膜与平作覆膜施肥处理含水率较低而尿酶抑制剂 + 尿素与麦草粉碎还田施肥处理含水率较高。

2.5 不同施肥处理对玉米成熟期籽粒、千粒重及产量的影响

不同施肥处理的玉米千粒重如表 6 所示,结果表明,在相同施氮量下,垄作覆膜与平作覆膜施肥处理的玉米千粒重显著大于常规施肥处理,平作覆膜施肥处理玉米籽粒千粒重最大,垄作覆膜处理次之,达到 278.33、300.68 g,常规施肥千粒重为 268.76 g;覆盖玉米秸秆和粉碎麦草玉米千粒重分别为

表 3 不同施肥处理玉米不同生长时期的株高/cm

Table 3 Different fertilizer treatments of summer maize plant height

生育时期 Growth period	不同施肥处理 Different fertilizer treatments							
	A	B	C	D	E	F	G	H
苗期 Seedling	35.20 ± 1.83	37.58 ± 2.11	36.50 ± 1.25	40.12 ± 2.59	35.55 ± 3.48	35.64 ± 2.44	37.16 ± 2.45	35.23 ± 3.04
拔节期 Jointing	42.36 ± 1.90	48.90 ± 1.12	50.20 ± 3.25	45.35 ± 4.20	44.63 ± 0.78	43.50 ± 1.12	44.86 ± 1.34	44.56 ± 2.35
抽雄期 Tasseling	79.85 ± 1.99	133.50 ± 1.75	158.05 ± 1.69	85.60 ± 4.32	79.95 ± 1.88	92.38 ± 2.57	81.10 ± 3.69	82.52 ± 3.84
灌浆期 Filling	203.30 ± 3.42	201.24 ± 2.37	204.85 ± 1.40	199.70 ± 7.14	205.00 ± 2.38	201.09 ± 3.79	207.71 ± 4.52	200.50 ± 3.47
成熟期 Mature	237.35 ± 2.86	232.30 ± 2.16	234.55 ± 1.20	241.64 ± 1.12	243.17 ± 2.20	240.07 ± 1.58	246.42 ± 4.40	235.59 ± 2.21

表 4 不同施肥处理玉米不同生长时期的叶长/cm

Table 4 Different fertilizer treatments of summer maize leaf length

生育时期 Growth period	不同施肥处理 Different fertilizer treatments							
	A	B	C	D	E	F	G	H
苗期 Seedling	33.05 ± 0.80	36.15 ± 1.96	35.47 ± 1.23	33.49 ± 0.89	34.65 ± 3.17	34.31 ± 2.46	34.24 ± 1.31	33.18 ± 1.11
拔节期 Jointing	49.25 ± 3.31	59.24 ± 3.25	60.47 ± 3.66	52.65 ± 5.12	50.33 ± 4.14	53.28 ± 3.70	55.65 ± 1.56	52.85 ± 2.46
抽雄期 Tasseling	78.54 ± 6.15	89.98 ± 4.00	91.62 ± 1.90	80.38 ± 2.58	80.47 ± 4.25	81.95 ± 2.08	82.50 ± 5.14	80.66 ± 2.46
灌浆期 Filling	100.15 ± 0.78	106.13 ± 0.99	108.09 ± 2.20	104.30 ± 2.69	100.40 ± 2.88	105.60 ± 1.77	110.10 ± 2.50	104.47 ± 3.65
成熟期 Mature	131.15 ± 2.22	130.21 ± 2.37	135.60 ± 2.22	130.21 ± 2.36	133.00 ± 3.06	131.00 ± 2.33	136.00 ± 2.20	130.45 ± 0.98

表 5 玉米抽雄期和成熟期各项指标

Table 5 Each processing maize the indicators data statistics

处理 Treatment	出苗率/% Seedling emergence	抽雄期叶片数/个 Plant leaf number at tasseling stage	成熟期叶片数/个 Plant leaf number at mature stage	成熟期干重/kg Plant dry weight at mature stage	成熟期籽粒含水率/% Maize moisture content at mature stage	成熟期秸秆含水率/% Straw moisture content at mature stage
A	94.2	10.8	11.5	2.91	0.309	0.663
B	95.0	13.6	12.6	3.11	0.219	0.512
C	97.5	14.4	13.6	3.49	0.156	0.536
D	93.3	11.0	12.0	3.03	0.321	0.690
E	93.3	10.6	12.4	2.70	0.386	0.740
F	93.3	11.7	13.1	3.96	0.350	0.548
G	93.3	10.0	13.0	3.21	0.340	0.700
H	92.5	10.5	13.5	2.69	0.390	0.742

286.37、276.44 g,比常规施肥千粒重高 18.61、7.68 g。施可丰控释肥与尿酶抑制剂+尿素施肥处理千粒重分别为 273.32、274.05 g。不同施肥处理间的玉米产量存在一定差异。与常规施肥相比,垄作覆膜与平作覆膜处理的玉米产量比常规施肥处理产量高。两种施肥处理产量达 15 082.5、16 500 kg·hm⁻²,比常规施肥处理增产 24.98%、36.73%;覆盖玉米秸秆处理略高于麦草粉碎还田,产量分别为 12 355、12 250 kg·hm⁻²,比常规施肥高 2.38%、1.51%;施可丰复合肥与尿酶抑制剂+尿素处理产量分别 12 230、12 175 kg·hm⁻²,比常规施肥高 0.45%、0.89%。经多重比较分析,垄作覆膜与平作覆膜处理的玉米产量与其它施肥处理玉米产量差异显著。

表6 不同施肥处理玉米成熟期千粒重、穗数和产量

Table 6 Different processing each district maize 1000-grain weight, spike number, output table

处理 Treatment	千粒重/g 1000-seed weight	穗数 Grains per spike	产量 /(kg·hm ⁻²) Yield	与常规相比 (产量)/% Compared with conventional
A	265.89h	36	11562.5a	-4.18
B	278.33c	38	15082.5b	24.98
C	300.68a	38	16500.0b	36.73
D	268.76g	38	12067.5a	0.00
E	273.32f	35	12175.0a	0.89
F	274.05e	35	12230.0a	0.45
G	286.37b	35	12355.0a	2.38
H	276.44d	33	12250.0a	1.51

2.6 不同施肥处理对玉米农田氮素利用率及氮素平衡的影响

不同施肥处理对玉米秸秆、籽粒含氮量和氮素利用效率有不同的影响(表7)。相同施氮量下以垄作覆膜与平作覆膜施肥处理吸氮量最大,分别为 240.125、266.345 kg·hm⁻²,比常规施肥处理高出 37.892~64.112 kg·hm⁻²;这两种施肥处理植株吸氮量比对照高 59.203~85.423 kg·hm⁻²;其余施肥处理植株吸氮量均高于常规施肥 4.462~32.544 kg·hm⁻²。在施氮量相同的情况下,玉米农田土壤氮素利用率大小依次为:B>C>G>F>E>H>D。垄作覆膜与平作覆膜施肥处理氮素利用率比常规施用尿素处理高 19.45%~21.82%;其余施肥处理氮素利用率比常规施肥高 2.95%~8.70%,但相互之间差异不大。

表7 不同施肥处理氮素利用率

Table 7 Nitrogen use efficiency of different treatments

处理 Treatment	植株含氮 /(kg·hm ⁻²) Plant N content	土壤氮素 依存率/% SNDR	肥料贡 献率/% CRF	氮素利 用率/% RNF	氮肥农 学效率/% AUE
A	180.922	—	—	—	—
B	240.125	0.753	21.450	51.12	5.87
C	266.345	0.679	30.950	48.75	8.23
D	202.233	0.895	7.721	29.30	0.84
E	208.213	0.869	9.888	33.66	1.02
F	234.777	0.771	19.513	35.89	1.11
G	232.617	0.778	18.730	38.00	1.32
H	206.695	0.875	9.338	32.25	1.15

氮收获指数是指氮素在植株籽粒中含量的多少,含量越高说明植株籽粒中氮素吸收量也越高。从表7可以得出,除了垄作覆膜与平作覆膜施肥处理比常规施用尿素处理的氮收获指数高以外,其余施肥处理较低且差别不大,其中平作覆膜施肥处理最高。在相同施氮量下,垄作覆膜与平作覆膜施肥处理农学效率为 5.87%、8.23%,高于常规施用尿素(0.84%)处理 5.03%~7.39%;玉米秸秆覆盖施肥处理与麦草粉碎还田施肥处理农学效率为 1.32%、1.15%;施可丰控释肥与尿酶抑制剂+尿素处理农学效率为 1.11%、1.02%。各施肥处理的肥料贡献率大小顺序为 C>B>F>G>E>H>D;垄作覆膜与平作覆膜施肥处理对玉米增产的贡献率最高为 21.45%~30.95%,高于常规施肥处理 13.73%~23.23%。相同的氮肥施用量下,土壤氮素依存率大小顺序为:D>H>E>G>F>B>C。其中与常规施用尿素处理相比,垄作覆膜与平作覆膜施肥处理的氮素依存率降低了 14.2%~21.6%。

2.7 不同施肥处理对玉米农田氮素平衡的影响

通过对玉米生长季内 0~20 cm 土层的氮素平衡计算,可以得出土壤的氮素平衡状况(表8)。经过对不同施肥处理条件下收获的玉米植株氮素平衡分析结果表明,在施氮量相同情况下,不同施肥处理和常规施用尿素处理之间氮肥输入相差很小,在 0.55~8.25 kg·hm⁻²;在氮素输出项中,垄作覆膜与平作覆膜施肥处理与常规施肥相比,能显著增加作物携出氮量达 18.73%~31.70%,而且能有效减少氮素表观损失 18.47%~21.66%;降低当季玉米氮素盈余量为 40.462~68.672 kg·hm⁻²。

表 8 不同施肥处理玉米整个生育期氮素平衡

Table 8 N balance during the growth season of maize

处理 Treatment	氮输入 N input/(kg·hm ⁻²)			氮输出 N output/(kg·hm ⁻²)			
	施氮量 N supply	起始无机氮量 Initial Nmin	矿化量 Netmineralization	玉米携出 Maize uptake	残留无机氮 Residual Nmin	表观损失 Apparent losses	氮盈余 N surplus
A	0	52.80	176.70	180.922	48.59	3.87	52.348
B	276	57.75	176.70	240.125	93.63	9.58	279.805
C	276	55.55	176.70	266.345	65.21	9.97	251.775
D	276	58.85	176.70	202.233	132.62	11.23	320.447
E	276	55.00	176.70	208.213	122.79	11.05	310.437
F	276	56.65	176.70	234.777	97.87	11.77	286.243
G	276	58.85	176.70	232.617	102.23	10.83	289.663
H	276	61.05	176.70	206.695	130.36	11.19	318.145

3 讨论

3.1 不同施肥期对玉米农田土壤氮挥发的影响

经过对玉米农田基肥期与追肥期土壤氮挥发的测定与分析得出两次氮挥发试验的氮挥发速率、氮挥发累积量变化规律与前人研究结果相一致^[9]。追肥期氮挥发损失量明显大于基肥期,主要原因是:基肥的施肥方式是将肥料与 0~20 cm 土壤混合,属于优化施肥方式^[10],符合当地习惯施肥方式。徐万里^[11]研究结果表明,氮肥施入土壤深度显著影响氮的挥发速率和挥发损失量,氮挥发强度会随施肥深度而降低。尿素深施后可以充分与土壤混合,被土壤吸附,活动范围减小,抑制氮挥发;而在追肥期,施肥方式是尿素撒施在农田地表后并立即灌水,这使土壤含水量升高并促进了氮挥发。Bouwmeester 等^[12]发现,尿素的氮挥发与土壤含水量有关,当土壤水分含量上升 10% 时,氮挥发量提高 8%。在土壤持水量比较高的情况下,加快了尿素固体颗粒的溶解,溶解的尿素与土壤充分接触,较快发生形态的转化;除此之外,有研究表明温度升高能增加液相中氨态氮在铵态氮和氨态氮总量中的比例,还能增加氨分配在气相中的比例,其中,氨气的扩散速率也会随着温度的上升而增加^[1];脲酶活性也会因为温度的升高而增强^[13-14];追施氮肥时玉米抽穗期,土壤温度较高,而基肥期为出苗期土壤温度较低,所以追肥期氮挥发损失大于基肥期。

3.2 不同施肥处理对玉米农田土壤氮挥发的影响

两次试验得出,不同施肥处理下氮挥发损失情况不同。其中垄作覆膜处理下氮挥发速率最小,显著低于常规施肥模式,平作覆膜处理下的氮挥发速率也低于常规施肥处理,但两者差异不显著;垄作覆膜下,一方面施肥后起垄可以将施肥土壤覆盖,间接

增加了施肥深度,使氨从土壤扩散至大气的阻力增加,氨挥发速率降低,另一方面覆膜也可以抑制氨挥发气体挥发的流动性,从而达到降低氨挥发的效果。平作覆膜下,地膜平铺覆盖了地表且留有 50 cm 的无覆膜带,增加了土壤氨挥发气体流动性,而且地膜平作施肥深度比垄作覆膜浅,故氨挥发比垄作模式强;上官宇先^[15]研究表明,垄作覆膜处理能够显著降低土壤氨挥发量和氮肥损失率,垄沟栽培模式下,氨挥发速率随铵态氮浓度增长缓慢;氮肥深施并在地表覆膜,氨从土壤中挥发到大气中必然受到土壤深度和薄膜的阻滞,改变了土壤氨挥发的途径,使土壤氨挥发降低。施入施可丰复合肥后,氨挥发速率明显高于常规施肥。由于施可丰复合肥含有 P、K 元素,且 N、P、K 含量均为 18%,为了保持各处理的含氮量一致,施可丰施用量是尿素施入量的 3 倍,所以土壤 P、K 含量升高。相关文献表明^[16],N、P 配施可以使氨挥发增强,P 含量与氨挥发呈正相关关系。施可丰复合肥中高含 P 量可以促进氨的挥发,挥发量高于常规施肥。尿素添加尿酶抑制剂施入土壤后,虽然尿酶抑制剂对尿素分解有抑制作用,但本试验将大颗粒尿素磨成粉与尿酶抑制剂混合,这样使尿素的分解速度加快,灌水后分解速度更快,土壤表层 NH₄⁺ 浓度增大,氨挥发比较强;覆盖玉米秸秆后氨挥发速率比常规施肥氨挥发速率高出很多,差值最大;玉米秸秆覆盖土壤后增加了土壤的温度,提高了土壤的含水量,微生物活性增强^[17],加快尿素分解,进一步促进氨的挥发。麦草粉碎和尿素一起施入土壤后,可以改变土壤表层的透气性,土壤中物理变化与化学反应强烈,而且增加微生物活性,并有一定增温效果,氨挥发略微增强^[18]。

3.3 不同施肥处理对玉米生长发育及产量的影响

不同施肥处理对玉米的生长发育有很大影响。

在玉米生长发育前期,各处理间的玉米植株生长情况差别不大。随着生育期的延长,垄作覆膜和平作覆膜施肥处理的玉米株高生长优势逐渐明显,对照处理的玉米植株生长比较慢。抽穗期是玉米植株生长旺盛时期,需要大量的养分,垄作覆膜和平作覆膜在玉米生长前期氮挥发量少,土壤养分含量高,玉米吸收养分多,而且土壤温度较高促进了玉米植株生长,长势优于其它施肥处理。这与卢艳艳等^[19]研究结果相一致。对照处理由于施肥量为零,土壤本身所固有的养分虽在玉米苗期养分需求少时可以满足玉米生长,但是在抽穗期,对照处理土壤养分含量较低,不能满足玉米拔节期养分的迫切需求而影响了玉米的株高。麦草秸秆粉碎还田后玉米长势比较缓慢,有研究表明,土壤添加粉碎的麦草后增加了玉米农田土壤表层水分的蒸发和农田耗水量,养分流失较大,不利于玉米植株的生长发育^[20]。Ma等^[21]研究表明,当玉米氮肥供应不足,会引起玉米叶片早衰,导致植株生长速率变慢,植株矮小,产量降低。

在玉米收获时期,垄作覆膜与平作覆膜处理的玉米千粒重显著大于普通尿素处理,其中平作覆膜施肥处理玉米千粒重最大,垄作覆膜处理次之;覆盖玉米秸秆与粉碎麦草还田处理之间玉米千粒重差别不大,但均高于常规施肥。玉米总产量方面,平作覆膜与垄作覆膜玉米总产量显著高于其它施肥处理,而混合尿酶抑制剂+尿素施肥处理玉米总产量较低,对照施肥处理最少。Liu等^[22]研究得出,覆盖地膜可以使玉米生长的时间变短,而玉米灌浆期的时间被延长,所以玉米灌浆期在整个生育期所占比例增加,玉米产量可以显著增加。与常规施肥相比,垄作覆膜与平作覆膜处理的玉米产量高,其余处理与之相比差异不大。可以说明,覆膜施肥能有效增加玉米千粒重及产量,增产率比较高,而其它处理对玉米增产效果影响不大。

3.4 不同施肥处理对玉米氮素利用率及氮素平衡的影响

本次试验中,在氮肥施用量相同情况下不同施肥处理土壤的氮素利用率大小为 $B > C > G > F > E > H > D$ 。施入土壤的氮肥,一方面经水下渗而淋失;另一方面通过氮挥发途径逸散在大气中,这是造成氮肥利用率下降的主要原因之一。除此之外,玉米对氮素吸收的多少也会影响氮肥利用率大小。覆膜施肥方式可显著减少土壤中氮素的挥发和淋失,土壤氮素充足,供氮时间长,作物能够更多的吸收利用,故氮素利用率较高;常规尿素施入土壤后,刚开始土壤养分比较高,但这一时期玉米植株比较小,对

养分的需求有限,所以土壤中被利用的养分少,而不能利用的养分则会通过各种途径损失。到玉米生长后期,满足不了玉米植株大量吸收氮肥的需要,所以氮肥的利用率较低。

合理施用氮肥一个重要依据就是通过土壤-作物体系氮素平衡来对其进行评估^[21],土壤-作物体系氮素平衡也可以反过来指导氮肥的合理施用。通过对玉米生长季内0~20 cm土层的氮素平衡计算,得出不同施肥处理之间的表观损失各不相同,其中垄作覆膜和平作覆膜处理比常规施肥处理、对照作物携出氮量分别高18.7%~31.7%、21.82%~32.72%;氮素表观损失比常规施肥处理降低18.47%~21.66%;而氮素盈余量比常规施肥处理低40.462~68.672 kg·hm⁻²。在没有施入氮肥的情况下,土壤中残留的氮素和表观损失的氮素均较低,当土壤施肥后,氮素的盈余量就会增加,氮盈余中,土壤无机氮残留占绝大部分,其经过各种途径而损失,并引起相应的环境问题^[5,23]。垄作覆膜与平作覆膜处理由于覆膜的作用,氮挥发较小,释放的氮素缓慢,持续满足玉米生长需求,因此玉米成熟收获后残留在土壤中的无机态氮含量显著低于常规施肥处理,对减少氮素损失效果明显。

4 结 论

本次试验在玉米生长期进行,基肥氮挥发一共持续了15 d,追肥氮挥发一共持续了11 d,基肥氮挥发累积量占施肥量的0.81%~1.65%;追肥时期氮挥发累积量占施肥量的3.1%~4.6%。与周静基肥追肥氮挥发研究结果一致^[24]。覆膜+尿素施肥氮挥发损失较小;有机物料还田+尿素、施用复合肥和添加尿酶抑制剂+尿素会增加氮挥发强度;而且覆膜+尿素施肥条件下,氮肥利用率高,千粒重和产量高于其它施肥处理。综上所述,垄作覆膜与平作覆膜+尿素深施(基肥)/表施灌水(追肥)的施肥方式可以有效降低土壤表观氮损失,促进玉米生长发育及产量,增加生产效益,而且覆膜施肥操作简单,地膜回收系统完善,农业面源污染小。

参 考 文 献:

- [1] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-Contributions to food production, impaction the environment and best management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecology Systems, 2002, 63(2-3):117-127.
- [2] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科技出版社,1992:213-249.
- [3] Tian G M, Cao J L, Cai Z C, et al. Ammonia volatilization from win-

- ter wheat field top dressed with urea[J]. *Pedosphere*, 1998, 8(4): 331-336.
- [4] 王 方, 李元寿, 王文丽, 等. 甘肃灌溉土壤障碍因素浅析[J]. *土壤*, 2004, 36(4): 452-456.
- [5] 郭庆法, 王庆成, 汪黎明. 中国玉米栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.
- [6] 陈 键, 宋春梅, 刘云慧. 黄淮海平原旱田氮素损失特征及其环境影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(2): 99-102.
- [7] 贺发云, 尹 斌, 金雪霞, 等. 南京两种菜地土壤氮挥发的研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42(2): 254-259.
- [8] 周 伟, 田玉华, 曹彦珍, 等. 两种氮挥发测定方法的比较研究[J]. *土壤学报*, 2011, 48(5): 1091-1095.
- [9] 王 珏, 巨晓棠, 张丽娟. 华北平原小麦季氮肥氮挥发损失及影响因素研究[J]. *河北农业大学学报*, 2009, 32(3): 6-11.
- [10] 邓美华, 尹 斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氮挥发损失的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(3): 263-269.
- [11] 徐万里, 刘 骅, 张云舒, 等. 新疆灰漠土区不同肥料比土壤氮挥发原位监测[J]. *生态学报*, 2009, 29(8): 4565-4571.
- [12] Bouwmeester R J B, Vlek P L G, Stumpe J M. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(2): 376-381.
- [13] Mulvaney R L, Bremner J M. Control of urea transformation in soils[J]. *Soil Biochemistry*, 1981, (5): 153-196.
- [14] Li H, Liang X Q, Chen Y X, et al. Ammonia volatilization from urea in rice fields with zero-drainage water management[J]. *Agriculture Water Management*, 2008, 95(8): 887-894.
- [15] 上官宇先, 师日鹏, 李 娜. 垄作覆膜条件下田间氮挥发及影响因素[J]. *环境科学*, 2012, 33(6): 1987-1993.
- [16] 凌 莉, 李世清, 李生秀. 石灰性土壤氮挥发损失的研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(6): 119-122.
- [17] 萨如拉, 高聚林, 于晓芳, 等. 玉米秸秆深翻还田对土壤有益微生物和土壤酶活性的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(7): 139-143.
- [18] 赵哈林, 刘任涛, 赵学勇, 等. 旱作农田改为水浇地对沙质土壤节肢动物群落的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(1): 9-14.
- [19] 卢艳艳, 宋付朋. 不同包膜控释尿素对农田土壤氮挥发的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 7133-7140.
- [20] Schwartz R C, Baumhardt R L, Evett S R. Effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season[J]. *Soil Tillage Research*, 2010, 110(2): 221-229.
- [21] Ma B L, Dwyer L M. Nitrogen uptake and use of two contrasting maize hybrids differing in leaf senescence[J]. *Plant and Soil*, 1998, 199(2): 283-291.
- [22] Liu Y, Yang S J, Li S Q, et al. Growth and development of maize *Zea mays* L. in response to different field water management practices: resource capture and use efficiency[J]. *Agriculture For Meteorol*, 2010, 150(4): 606-613.
- [23] 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 华北地区冬小麦夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. *土壤学报*, 2009, 46(4): 684-697.
- [24] 周 静, 崔 键, 王国强, 等. 春秋两季红壤旱地氮挥发对氮施用量气象因子的响应[J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 499-507.

(上接第 41 页)

- [10] Akhter J, Mahmood K, Malik K A, et al. Amelioration of a saline sodic soil through cultivation of a salt-tolerant grass *leptochloafusca* [J]. *Environmental Conservation*, 2003, 30(2): 168-174.
- [11] 李 茜, 孙兆军, 秦 萍. 宁夏盐碱地现状及改良措施综述[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(33): 10808-10813.
- [12] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 837-845.
- [13] 孙国荣, 阎秀峰, 李 晶. 星星草对碱化土壤物理性质的影响[J]. *草地学报*, 2002, 10(2): 118-123.
- [14] 罗廷彬, 任 威. 新疆盐渍化土地种植耐盐小麦效应分析[J]. *中国生态农业学报*, 2001, 9(4): 102-103.
- [15] Casler M D, Vogel, Taliaferro, et al. Latitudinal adaptation of switchgrass populations[J]. *Crop Science*, 2004, 44(1): 293-303.
- [16] Mclaughlin S B, Kszos L A. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2005, 28(6): 515-535.
- [17] 刘吉利, 朱万斌, 谢光辉, 等. 能源作物柳枝稷研究进展[J]. *草业学报*, 2009, 18(3): 232-240.
- [18] Lewandowski I, Scurlock J O, Lindvall E, et al. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 25(4): 335-361.
- [19] Jili Liu, Na WU. Biomass production of switchgrass in saline-alkali land[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, (1008-1009): 93-96.
- [20] 范希峰, 侯新村, 左海涛, 等. 边际土地类型及移栽方式对柳枝稷苗期生长的影响[J]. *草业科学*, 2010, 27(1): 97-102.
- [21] 杜 菲, 杨富裕, Casler M D, 等. 美国能源草柳枝稷的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(35): 20334-20339.
- [22] 郭全恩, 马 忠, 曹诗瑜, 等. 不同能源作物对土壤剖面盐分离离子迁移的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 0294-0298.
- [23] 范 海, 赵可夫. K⁺抑制盐生植物碱蓬生长机理的研究[J]. *山东师大学报(自然科学版)*, 1996, 11(4): 88-92.
- [24] 张体彬, 康跃虎, 胡 伟, 等. 基于主成分分析的宁夏银北地区龟裂碱土盐分特征研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(2): 39-46.
- [25] 宋 楠, 杨思存, 刘学录, 等. 不同种植年限盐碱荒地土壤盐分离子分布特征[J]. *土壤学报*, 2014, 51(3): 660-665.
- [26] Qadir M, Ghafoor A, Murtaza G. Use of saline - sodic waters through phytoremediation of calcareous saline-sodic soils[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 50(3): 197-210.
- [27] 范亚文, 孙国荣, 阎秀峰, 等. 种植星星草对盐碱草地土壤养分状况的改良作用[J]. *植物研究*, 2001, 4(21): 600-604.