

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.033

干旱区降解地膜覆盖农田硝态氮迁移与利用特征研究

李仙岳¹ 冷旭¹ 张景俊¹ 胡小东¹ 樊小芹²

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古河套灌区乌兰布和灌域管理局工程科, 磴口 015200)

摘要: 为解决塑料地膜覆盖及撒施氮肥中农膜残留严重和氮肥利用率低的问题,明确干旱区降解地膜覆盖与不同施氮量条件下农田氮肥的利用特征,在内蒙古河套灌区乌兰布和农场连续2年进行了不同地膜覆盖及不同施氮量试验。设置了降解地膜覆盖农田不施氮(BM0, 0 kg/hm²),基肥施氮量均为56 kg/hm²下低氮(BM1, 160 kg/hm²)、中氮(BM2, 220 kg/hm²)和高氮(BM3, 280 kg/hm²)4个施氮水平,同时设置了塑料地膜覆盖高氮(PM3)和无膜覆盖高氮(NM3)2个对照,共6个处理,研究了不同地膜覆盖及不同施氮量对氮素在土壤中的分布、累积、渗漏及利用效率的影响。结果表明:0~50 cm土层,与塑料地膜覆盖相比,在第3降解阶段(降解膜出现20~50 cm裂缝)和第4降解阶段(降解膜均匀碎裂),降解地膜覆盖处理2年平均硝态氮含量分别降低了9.49%和28.84%;与无膜处理相比,降解地膜覆盖2年平均硝态氮含量分别提高了20.46%和25.74%(*P* < 0.05)。整个生育期降解地膜覆盖下玉米氮含量仅比塑料地膜覆盖2年平均降低了2.26%,氮淋失量2年平均降低了3.36%,但玉米氮含量分别比无膜处理提高了8.90%和11.38%,氮淋失量分别提高了22.01%和26.25%。降解地膜与塑料地膜覆盖下产量无显著差异,PM3与BM3处理2年平均产量比无膜覆盖处理分别提高了13.67%和18.38%(*P* < 0.05)。随着施氮量增加,土壤中硝态氮含量、玉米氮含量、淋失量和产量增大,BM3处理比BM2和BM1处理在0~30 cm土层2年硝态氮含量增加了49.45%和135.78%,玉米氮含量分别增加了0.78%和24.54%,氮淋失量2年平均分别增加了84.08%和255.37%(*P* < 0.05),2年平均产量分别增加了0.16%和35.37%(*P* < 0.05)。追肥施氮量为220 kg/hm²的BM2处理的氮肥综合效率最高,每施用1 kg氮肥可以出产27.99 kg玉米,为该地区降解地膜覆盖下较优的施肥模式。

关键词: 干旱区;可降解地膜;氮肥调控;产量;氮肥利用;硝态氮

中图分类号: S158.5; S626.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0294-10

OSID:



Movement and Utilization of Nitrate Nitrogen under Biodegradable Film Mulching in Arid Area

LI Xianyue¹ LENG Xu¹ ZHANG Jingjun¹ HU Xiaodong¹ FAN Xiaoqin²

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

2. Engineering Department, Wulanbuhe Irrigation Administration Bureau, Inner Mongolia Hetao Irrigation District, Dengkou 015200, China)

Abstract: The plastic film mulching and nitrogen fertilizer application are important agricultural patterns in arid area, which lead to serious residual plastic film in soil and low nitrogen use efficiency. The biodegradable film mulching and optimal nitrogen application can solve these problems. Different film mulching and different nitrogen application levels treatments were set, and experiment was carried out in both years in the farm of Wulanbuhe, Hetao Irrigation District. Four kinds of nitrogen levels under biodegradable film mulching was applied, including no nitrogen (BM0 for 0 kg/hm²), low nitrogen (BM1 for 160 kg/hm²), medium nitrogen (BM2 for 220 kg/hm²) and high nitrogen (BM3 for 280 kg/hm²). The base fertilizer nitrogen rate of low nitrogen, medium nitrogen and high nitrogen all were 56 kg/hm², and high nitrogen with plastic film mulching (PM3) and high nitrogen with no mulching (NM3) treatment as controls were used, so there was six treatments in all. The effects of different film mulching and different

收稿日期: 2019-10-27 修回日期: 2019-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51969024, 51669020, 51469022)和内蒙古自治区科技重大专项(zdxx2018059)

作者简介: 李仙岳(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事干旱节水灌溉理论与技术研究, E-mail: lixianyue80@126.com

nitrogen application rates on the distribution, accumulation, leaking and utilization efficiency of nitrogen in soil were studied. The results showed that the average nitrate content for biodegradable film mulching in the 0 ~ 50 cm soil layer was decreased by 9.49% and 28.84%, respectively, in the third and fourth degradation stages compared with plastic film mulching, but it was increased by 20.46% and 25.74% for biodegradable film mulching compared with no film mulching ($P < 0.05$). The corn nitrogen content for biodegradable film mulching was only 2.26% lower than that of plastic film mulching and 3.36% lower for nitrogen leaching during the whole corn growth stage. However, the corn nitrogen content was increased by 8.90% and 11.38% for biodegradable and plastic film mulching than that of no film mulching, respectively, and 22.01% and 26.25% increased for nitrogen leaching. There was no significant difference in yield between biodegradable film mulching and plastic film mulching, which was 13.67% and 18.38% higher than that of no film mulching, respectively ($P < 0.05$). The soil nitrate content, corn nitrogen content, nitrogen leaching and yield were all increased with the increase of nitrogen application amounts, and the nitrate content in 0 ~ 30 cm soil layer was increased by 49.45% and 135.78% for BM3 compared with those of BM2 and BM1, and increased by 0.78% and 24.54% for nitrogen content in corn, 84.08% and 255.37% increase for nitrogen leaching ($P < 0.05$), and 0.16% and 35.37% increase for corn yield ($P < 0.05$). The BM2 treatment (topdressing with 220 kg/hm²) had the highest combined efficiency of nitrogen, and the application of 1 kg nitrogen fertilizer can produce 27.99 kg corn, which was the best fertilization pattern in this area under biodegradable film mulching.

Key words: arid area; biodegradable film; nitrogen fertilizer regulation; yield; nitrogen fertilizer utilization; nitrate nitrogen

0 引言

氮素是作物生长必需的营养元素,是作物体内蛋白质、酶以及核酸等构成的主要成分,因此氮素与水资源均是影响农业生产的重要因素。目前我国氮肥使用量达到 2 400 万 t,居世界第一,同时每年在以 0.30% 的速度增长^[1]。由于不合理的施肥模式,我国氮肥平均有效利用率仅为 35%^[2]左右,大量氮素以硝态氮、铵态氮的形式随灌溉水进入土壤和地下水,导致浅层地下水污染、湖泊富营养化及面源污染^[3]。在干旱寒冷地区,覆膜是主要的农业耕作措施,对增温、保墒等均具有重要意义^[4],如内蒙古河套灌区目前覆膜面积已达 52 万 hm²,覆膜率超过 90%^[5]。目前农用地膜主要采用聚乙烯材料,在自然条件下难以降解,多年连续使用会导致大量“白色污染”,从而影响农业生产。降解地膜可根据作物生长的特性,通过工艺配比调控降解诱导期,在保温、保墒的同时,经光、土壤微生物等降解为 CO₂ 和 H₂O,对生态和绿色农业具有重要意义^[6-7]。

诸多学者已经对降解地膜覆盖条件下保温、保水以及产量的影响效应做了大量研究^[8-10],结果表明,降解地膜在破损前覆膜效应与塑料地膜相近,而在作物生长后期,特别是降解地膜破损较大时,会导致土壤蒸发增加,从而降低保水效应与保肥能力,但均明显高于无膜处理^[11];塑料地膜和降解膜覆盖均会提高肥料利用效率和作物产量^[12]。在水分充足的条件下,降解地膜覆盖时作物各器官的养分吸收、产量及其构成因素、氮肥偏生产力与塑料地膜覆盖

处理无显著差异,但在播种后 240 d,土壤硝态氮累积量比塑料地膜覆盖处理减少了 34.10%^[13-14]。随着施氮量增加,土壤中的硝态氮含量也会明显增大。如与不施氮处理相比,当施氮量提高至 100 kg/hm²时,在 0~90 cm 土层硝态氮含量增加至 44.3 kg/hm²;当施氮量提高至 255、330 kg/hm²时,该层硝态氮的含量增加至 105.0、157.0 kg/hm²^[15]。另外,随着氮肥施用量的增加,土壤中氮淋溶量也会随之增大^[16]。如当玉米施氮量在 100 kg/hm²时,90~210 cm 土层硝态氮含量为 117.2 kg/hm²;当施氮量提高至 255、330 kg/hm²时,该土层硝态氮含量分别增至 249.7、345.3 kg/hm²^[15]。可见,随着施氮量的增加,导致土壤剖面硝态氮富集及硝态氮向深层淋溶^[17]。因此,揭示降解地膜覆盖下氮素在土壤中迁移与利用特征对于提高降解地膜覆盖农田的氮肥利用率、制定合理灌水施肥制度、减少氮肥的面源污染等具有重要意义。

目前,相关研究主要关注降解地膜覆盖下对土壤水分、温度、作物生长的影响,而对于干旱区降解地膜覆盖下不同施氮量对氮素的迁移,包括渗漏、吸收过程以及土壤氮素利用特征等尚缺乏系统的研究。因此,本文主要研究北方干旱地区降解地膜覆盖与氮肥调控下氮素在土壤中的累积、渗漏及对作物氮含量、产量、氮肥利用率的影响,并与塑料地膜覆盖及无膜覆盖进行比较分析,提出干旱区降解地膜覆盖下的最优施氮模式,以期为降解地膜的推广及氮肥高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

2016—2017 年在内蒙古河套灌区乌兰布和农场(北纬 40°31'48",东经 106°56'30",海拔 1 059 m)进行试验。该地区光照充足,属温带大陆性季风气候,冬季寒冷漫长,春秋短暂,夏季炎热,降雨量少,日照充足,热量丰富,昼夜温差大,积温高,无霜期短。日照时数 3 300 h 以上,无霜期 136 ~ 205 d,年均气温 7.6℃,年均降雨量 144.5 mm,而年均蒸发量高达 2 397.6 mm;作物生长期(5—9 月)积温为 3 100℃,昼夜温差 14.5℃。试验区地下水埋深大于 6 m,土质均匀,为粉砂壤土,0 ~ 100 cm 土层田间持水率为 36.89%,平均容重为 1.49 g/cm³,平均 pH 值为 8.1,平均电导率为 305.2 μS/cm。耕层土壤总氮、有机质质量比分别为 0.78、12.5 g/kg,速效氮、速效钾、速效磷质量比分别为 58.32、126.9、11.22 mg/kg。

1.2 试验设计

玉米采用一膜两行种植方式,种植密度 5.5 株/m²。在 2016、2017 年 5 月 1 日播种,于当年 9 月 20 日收获,生育期 143 d。塑料地膜选用磴口县大众塑料厂生产的聚乙烯塑料地膜,无降解特性;生物降解地膜选用山东天状环保有限公司生产的氧化-生物双降解地膜,主要为纤维素、淀粉等天然材料,诱导期为 40 d 左右,诱导期过后地膜开始降解。两种地膜宽均为 80 cm,膜厚均为 0.008 mm。供试作物为当地主推种植的玉米(先锋 32D22)。由于当地施肥量较大,基肥和追肥施氮量分别为 56、280 kg/hm²,本

文将其定为试验的高氮水平;肖继兵等^[18]利用回归方程得出总施氮量为 274 kg/hm²时产量达到最高值,故本试验在保持基肥施氮量不变条件下,追肥施氮量比高氮处理降低 20% 定为中氮水平(220 kg/hm²),降低 40% 定为低氮水平(160 kg/hm²)。试验共设置降解地膜覆盖农田不施氮(BM0,0 kg/hm²)、低氮(BM1,216 kg/hm²)、中氮(BM2,276 kg/hm²)和高氮(BM3,336 kg/hm²)4 个施氮水平,同时在不同地膜覆盖的差异分析方面,为了降低复杂性,在塑料地膜覆盖和无膜覆盖下只设置高氮处理,包括塑料地膜覆盖高氮(PM3)和无膜覆盖高氮(NM3),共 6 个处理,每个处理重复 3 次,共 18 个小区,随机排列分布,小区长 15 m、宽 4 m。每个处理的基肥施用量相同,选用复合肥料(N 质量分数为 28%,P₂O₅质量分数为 18%,K₂O 质量分数大于等于 5%)200 kg/hm²,氮含量均为 56 kg/hm²,追肥采用尿素(N 质量分数为 46%),在拔节期和抽雄期分两次施入,不同处理施用量如表 1 所示。每个处理灌溉一致,灌溉定额为 525 mm(图 1),其他除草、打药等农耕措施遵循当地传统做法。

表 1 2016、2017 年试验处理
Tab. 1 Experimental treatments in 2016 and 2017

处理	基肥施氮量/ (kg·hm ⁻²)	追肥施氮量/ (kg·hm ⁻²)	总施氮量/ (kg·hm ⁻²)	灌水量/ mm
BM0	0	0	0	525
BM1	56	160	216	525
BM2	56	220	276	525
BM3	56	280	336	525
PM3	56	280	336	525
NM3	56	280	336	525

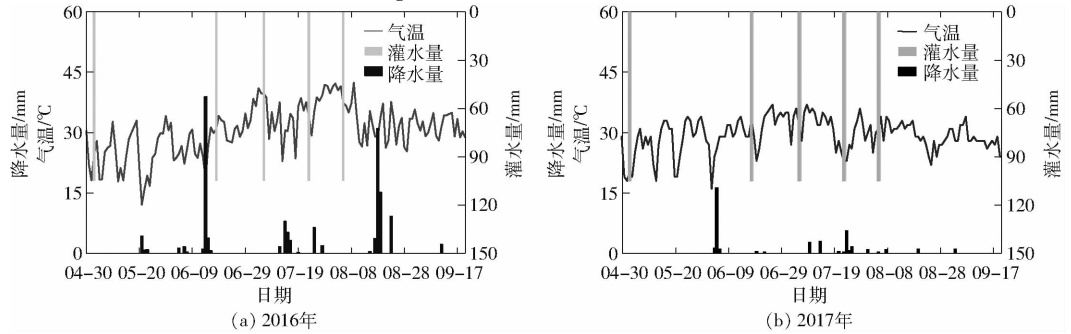


图 1 作物生育期气温、降水量和灌水量

Fig. 1 Temperature, precipitation and irrigation during crop growth periods

1.3 测定指标与方法

1.3.1 主要观测指标

气象资料:设置自动气象站(HOBO-U30 型),每小时自动记录降水量、太阳辐射、空气温湿度、风速等。

土壤含水率与硝态氮含量:在两行作物中间(覆膜)位置 0 ~ 10 cm、10 ~ 30 cm、30 ~ 50 cm、50 ~

70 cm、70 ~ 100 cm 取土样,每隔 7 ~ 10 d 测一次,且灌溉前后、降雨后加测。采集的土样一部分采用干燥法测含水率,另一部分土样自然风干、碾碎、混匀、过 1 mm 筛后,称取 5 g 土样,用 50 mL 氯化钾溶液(2 mol/L)浸提振荡 1 h 后过滤,采用紫外分光光度计法测定土壤硝态氮含量。

硝态氮渗漏量:采用自制田间淋溶水观察井测

定^[19],观察井由直径 11 cm、管长 210 cm 的 PVC 管制作,其中底部 40 cm 预留用于收集淋溶水样,顶部 30 cm 高于地表,在土层下 90 ~ 140 cm 管壁均匀打孔,用尼龙筛网包裹渗流区,用于收集 100 cm 深度以下的渗漏液。在灌水或降雨后 3 ~ 5 d 内采集这一时段的淋溶水样,每次采集后将管内残留水样清空,采用双波长比色法测定淋溶水样中硝态氮渗漏量。

作物氮含量:在收获时各小区随机取样玉米 5 株,将植株各器官分离装袋,在干燥箱 105℃ 杀青 0.5 h, 80℃ 干燥至质量恒定,粉碎过筛,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-蒸馏法测定作物氮含量^[20]。

产量:各处理成熟后收获,每个处理随机连续选取 10 株作物,自然风干脱粒后考种,测量每株玉米的穗粒数、穗行数、行粒数、百粒质量等指标,并折算为每公顷产量。

地膜破损率:每个小区随机设置 3 个固定的地膜破损观测区,定期将相机固定在设定的地膜观测区正上方 40 cm 处,在区域边界放置直尺作为参考物,每次拍摄 3 幅图像,再将图像导入 AutoCAD 2008 (Autodesk, Inc) 处理,并计算破损率^[4]。地膜降解分级指标参照杨惠娣等^[21]方法,使用 0 ~ 4 降解阶段代表地膜降解程度,0 降解阶段为诱导期;第 1 降解阶段:诱导期结束,地膜出现 1 ~ 2 cm 微小裂口;第 2 降解阶段:出现 2 ~ 20 cm 裂缝;第 3 降解阶段:出现 20 ~ 50 cm 裂缝,数量增多;第 4 降解阶段:均匀碎裂,无大块地膜存在。塑料地膜全生育期几乎不发生降解,而降解地膜在 6 月中旬开始出现裂缝、破损,在 7—9 月中旬,破损率分别达到 25.65%、47.99%、69.20%。

1.3.2 氮肥生产效率计算

氮肥利用率计算公式为

$$P_U = (U_N - U_0) / F_N \times 100\% \tag{1}$$

氮肥生理利用率计算公式为

$$P_S = (Y_N - Y_0) / (U_N - U_0) \tag{2}$$

氮肥农学利用率计算公式为

$$P_N = (Y_N - Y_0) / F_N \tag{3}$$

式中 U_N ——施氮区作物含氮量,kg/hm²
 U_0 ——未施氮区作物含氮量,kg/hm²
 F_N ——施氮区纯氮投入量,kg/hm²
 Y_N ——施氮区作物产量,kg/hm²
 Y_0 ——未施氮区作物产量,kg/hm²

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理, SPSS 22.0 软件进行统计分析,Origin 9.0 软件进行

绘图。

2 结果与分析

2.1 不同覆膜与施氮量处理对土壤剖面硝态氮含量的影响

总体上,施肥后土壤中的氮含量明显升高,在 0 ~ 50 cm 土层所受影响较大,变化趋势一致(图 2)。特别是 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 30 cm 耕作层,在拔节期和抽雄期土壤硝态氮含量出现 2 次波峰,随后土壤中硝态氮含量逐渐下降;而 50 ~ 100 cm 土层硝态氮含量呈逐渐增大趋势。在播种后约 40 d,降解地膜进入第 1 降解阶段,破损程度较小,对于相同施氮处理的降解地膜(BM3)和塑料地膜(PM3)处理不同土层的土壤硝态氮运移规律基本一致(图 2,表 2),均明显高于无膜(NM3)处理($P < 0.05$),BM3 和 PM3 处理在 0 ~ 50 cm 土层 2 年平均硝态氮含量分别比 NM3 处理提高了 46.87% 和 49.68%,在 50 ~ 100 cm 分别提高了 19.39% 和 19.02%。在播种后 60 d,降解地膜进入第 2 降解阶段,出现明显裂纹,从而导致硝态氮含量略低于 PM3 处理,BM3 处理在 0 ~ 50 cm 土层,2 年硝态氮平均含量比 PM3 处理降低了 4.64%,但比 NM3 处理提高了 41.87% ($P < 0.05$),而在 50 ~ 100 cm,BM3 与 PM3 处理无明显差异,但均显著高于 NM3 处理。播种后 86 d,降解地膜进入第 3 降解阶段,降解地膜已裂解成大块碎片,BM3 处理在 0 ~ 50 cm 土层硝态氮含量显著低于 PM3 处理($P < 0.05$),2 年硝态氮平均含量降低了 9.49%,50 ~ 100 cm 土层则仅降低了 4.86%,但比 NM3 处理在 0 ~ 50 cm 和 50 ~ 100 cm 分别提高了 20.46% 和 14.65%。播种后 116 d 至作物收获,降解地膜进入第 4 降解阶段,此时降解地膜已无大块地膜存在,各处理差异达显著水平($P < 0.05$),BM3 处理在 0 ~ 50 cm 土层的 2 年硝态氮平均含量比 PM3 处理降低了 28.84%,同时在 50 ~ 100 cm 土层也降低了 7.47%,但这两个土层分别比 NM3 处理提高了 25.74% 和 13.97%。可见,在作物生长前期,降解地膜覆盖在 0 ~ 50 cm 土层硝态氮含量与塑料地膜覆盖相近,在作物生长后期随着降解程度增大,硝态氮含量显著降低($P < 0.05$),与塑料地膜相比平均下降了 12.11%;而 50 ~ 100 cm 则仅在作物生长末期显著降低,与塑料地膜覆盖相比平均下降 5.33%,并且全生育期降解地膜和塑料地膜在不同土层硝态氮含量均明显大于无膜处理,平均提高了 16.94% 和 24.66%。

降解地膜覆盖下不同施氮量处理对土壤中硝态氮的影响与传统不同施氮量下的规律基本一致,施

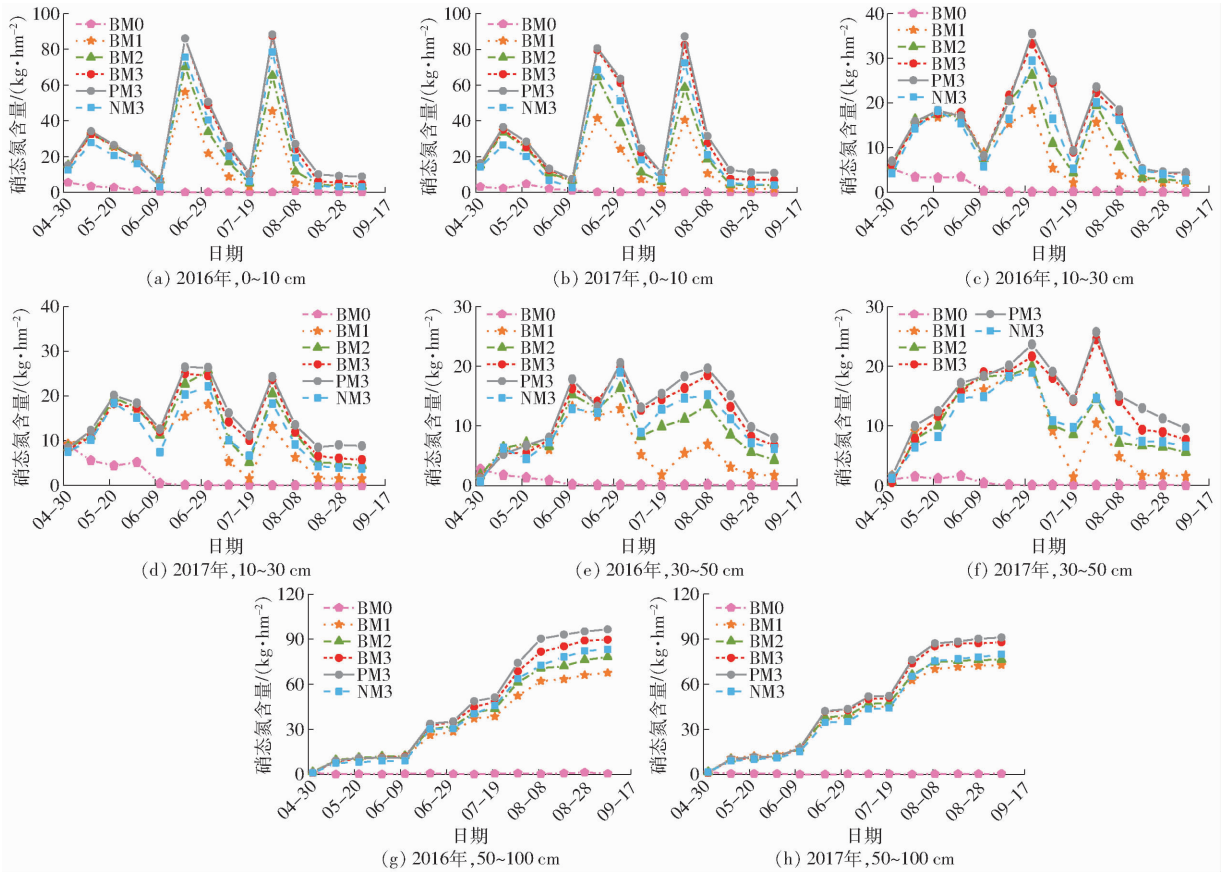


图2 0~100 cm 土层硝态氮含量
Fig.2 Nitrate content in 0~100 cm soil layers

表2 不同覆膜类型覆盖下的土壤硝态氮含量

Tab.2 Changes of nitrate nitrogen content in different soil layers under different film mulching		kg/hm ²							
土层深度/ cm	处理	2016 年				2017 年			
		第1 阶段	第2 阶段	第3 阶段	第4 阶段	第1 阶段	第2 阶段	第3 阶段	第4 阶段
		(6月10— 30日)	(7月1— 25日)	(7月26日— 8月25日)	(8月26日— 9月20日)	(6月10— 30日)	(7月1— 25日)	(7月26日— 8月25日)	(8月26日— 9月20日)
0~50	BM3	30.44 ^a	33.55 ^a	59.70 ^b	15.60 ^b	38.44 ^a	34.69 ^a	53.58 ^b	20.32 ^b
	PM3	31.69 ^a	35.30 ^a	65.10 ^a	21.20 ^a	38.51 ^a	36.26 ^a	60.06 ^a	29.28 ^a
	NM3	21.87 ^b	24.27 ^b	50.61 ^c	12.19 ^c	25.03 ^b	23.83 ^b	39.48 ^c	14.46 ^c
50~100	BM3	12.01 ^a	48.26 ^a	83.58 ^b	89.57 ^b	16.99 ^a	50.88 ^a	85.25 ^a	87.88 ^b
	PM3	11.37 ^a	51.21 ^a	90.21 ^a	96.55 ^a	17.54 ^a	52.33 ^a	87.24 ^a	91.08 ^a
	NM3	9.01 ^b	45.81 ^b	72.69 ^c	83.23 ^c	15.28 ^b	44.11 ^b	75.44 ^b	79.82 ^c

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

肥量越高,土壤中硝态氮含量越大(图2)。其中高肥(BM3)、中肥(BM2)和低肥(BM1)处理基肥施用量一样,故在追肥前土壤中的硝态氮含量无显著差异,但明显高于不施肥处理(BM0),追肥后不同土层硝态氮含量产生差异且随施氮量增加土壤硝态氮含量增加,在追肥后5~15 d,不同施氮处理各土层硝态氮含量差异最大($P<0.05$),第1次追肥后,在0~30 cm 土层,BM3 处理2年硝态氮含量比BM2和BM1处理分别提高了19.35%和65.14%,30~100 cm 分别提高了8.29%和16.20%;第2次追肥后,在0~30 cm 分别提高了31.84%和88.19%,在30~

100 cm 提高了19.77%和40.24%。追肥后整个生长阶段0~30 cm 土层,BM3 处理2年硝态氮含量平均比BM2和BM1分别提高了49.45%和135.78%,而30~100 cm 分别提高了16.63%和33.56% ($P<0.05$),且追肥后施肥氮量与土壤中硝态氮含量的关系为: $y=2.2261x+6.9871$, $R^2=0.744$ (0~30 cm); $y=0.782x+19.358$, $R^2=0.9784$ (30~100 cm)。

2.2 不同覆膜与施氮量处理对玉米氮含量的影响
由于地膜覆盖提高了土壤水分含量,从而提高土壤耕层氮的有效性,有利于作物氮的被动吸收,所以在相同的施氮量条件下 PM3 和 BM3 处理的作物

氮含量显著高于 NM3 处理 ($P < 0.05$), 2016 年氮含量分别增加了 13.51% 和 10.00%, 2017 年分别增加了 9.22% 和 7.79% (图 3, 图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同)。同时可以看出, 总体上 PM3 处理玉米 2 年平均氮含量高于 BM3 处理, 2016 年和 2017 年分别提高了 3.19% 和 1.33%, 这主要是由于在作物生长前期生物可降解地膜覆膜与塑料地膜覆盖保水、保肥效果相近, 作物生长中期有一定的差异, 但不显著, 只有在作物生长后期随着降解地膜破损加大, 导致降解地膜覆盖下土壤中水分和氮含量减少, 从而整个生育期 BM3 处理玉米氮含量略低于 PM3 处理, 2 年平均降低了 2.26%, 但均显著高于无膜覆膜处理 ($P < 0.05$), 2 年分别提高

了 8.90% 和 11.38%。对于不同施氮量处理, 由于施氮量增加导致土壤中氮含量增加, 从而作物氮含量也随着增加, BM3 处理 (追肥施氮量 280 kg/hm^2) 比 BM2 处理 (追肥施氮量 220 kg/hm^2) 和 BM1 处理 (追肥施氮量 160 kg/hm^2) 氮吸收量依次提高了 0.78% 和 24.54% ($P < 0.05$), 可以看出氮的吸收量并不与追肥氮量成线性关系, 这可能是由于作物吸氮除了被动吸收外还有主动吸收, 且作物对氮的吸收存在一定的阈值, 如本研究中, 当追肥施氮量大于 220 kg/hm^2 后, 继续增加施氮量, 多余的氮素易于流失, 作物氮含量增加非常有限。但是与不施氮处理相比, 施氮后, 作物氮含量显著增加, 不施氮处理土壤中的氮含量极低, 显著限制了作物对氮的被动吸收。

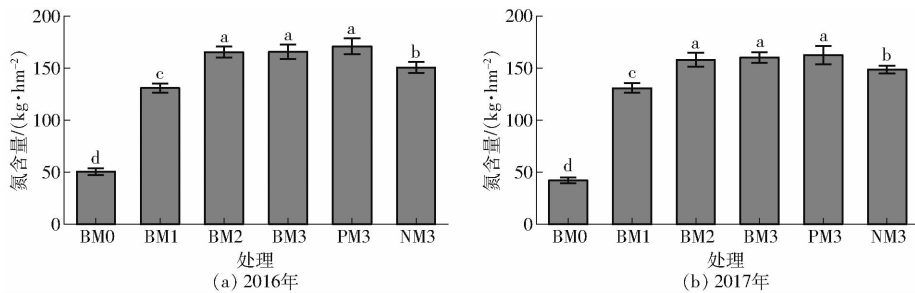


图 3 不同处理对玉米氮含量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on nitrogen content

2.3 不同覆膜与施氮量处理对土壤剖面氮淋失的影响

氮淋失量主要与土壤中氮的含量及土壤水入渗量相关, 不同地膜覆盖导致了土壤中氮含量及土壤水分的差异, 从而不同处理氮的淋失也存在一定的差异。每次施肥、灌水后, 氮淋失量显著提高, 降解地膜处理 (BM3) 随降解程度增大, 与塑料地膜处理 (PM3) 氮淋失量差异逐渐增大, 但并不显著, 均大于无膜处理 (NM3) (图 4)。降雨同样会引起氮素淋失, 地膜覆盖后雨水入渗量会明显减少, BM3 处理由于降解地膜在作物生长后期破损明显高于 PM3 处理, 故雨水入渗量高于 PM3 处理, 从而氮淋失量提高。2016 年作物生育后期降雨导致 PM3 处理氮淋失量比 BM3 和 NM3 处理分别平均减少了 16.07% 和 53.07% ($P < 0.05$), 2017 年由于生育后期无降雨, 故该时段无氮淋失量。各时期不同氮肥处理, 氮淋失量差异也不同, 随着生育时期的推进, 降解地膜破损加大, 差异逐渐变大。对于相同施氮量处理下的 PM3、BM3 和 NM3, 2 年平均全生育期的氮淋失量分别为 94.31、91.14、74.7 kg/hm^2 , BM3 处理氮淋失量比 PM3 处理平均低了 3.36%, 但与 NM3 处理相比, 2 年氮淋失量分别提高了 22.01% 和 26.25% ($P < 0.05$)。对于不同施氮量处理, 土壤中氮含量有较大差异, 在相同的灌水量条件下氮淋

失量差异也较大 ($P < 0.05$), BM3 处理比 BM2 和 BM1 处理追肥施氮量分别增加了 27.27% 和 75.00%, 2016 年氮淋失量分别增加了 76.85% 和 194.99%, 2017 年分别增加了 91.31% 和 315.74% (2 年平均分别增加了 84.08% 和 255.37%), 呈线性关系 ($y = 0.9875x - 11.608, R^2 = 0.99$), 另外由于 BM0 处理不施氮, 土壤中氮含量极低所以氮淋失量非常低, 2016 年和 2017 年淋失量分别仅为 5.51、5.02 kg/hm^2 。

2.4 不同覆膜与施氮量处理对作物产量及氮肥利用效率的影响

由于在作物生长后期降解地膜破损率高于塑料地膜, 从而土壤中氮含量及玉米氮含量较低, 但两者产量并无显著差异, 2016 年和 2017 年塑料地膜处理 (PM3) 比降解地膜处理 (BM3) 产量分别仅高 4.85% 和 3.41%, 但是无膜处理 (NM3) 的产量显著降低 ($P < 0.05$), PM3 与 BM3 处理 2 年平均产量比 NM3 处理分别提高了 13.67% 和 18.38% (表 3, 未施氮区作物氮含量、产量均采用 BM0 处理数据)。随追肥施氮量增加作物产量也增加, 但当施氮量达到某一数值后继续增加氮肥, 产量的增加量相对较小, 甚至出现降低现象, 2016 年和 2017 年 BM3 处理 (追肥施氮量 280 kg/hm^2) 产量几乎与 BM2 处理 (追肥施氮量 220 kg/hm^2) 一样, BM3 处理比 BM2

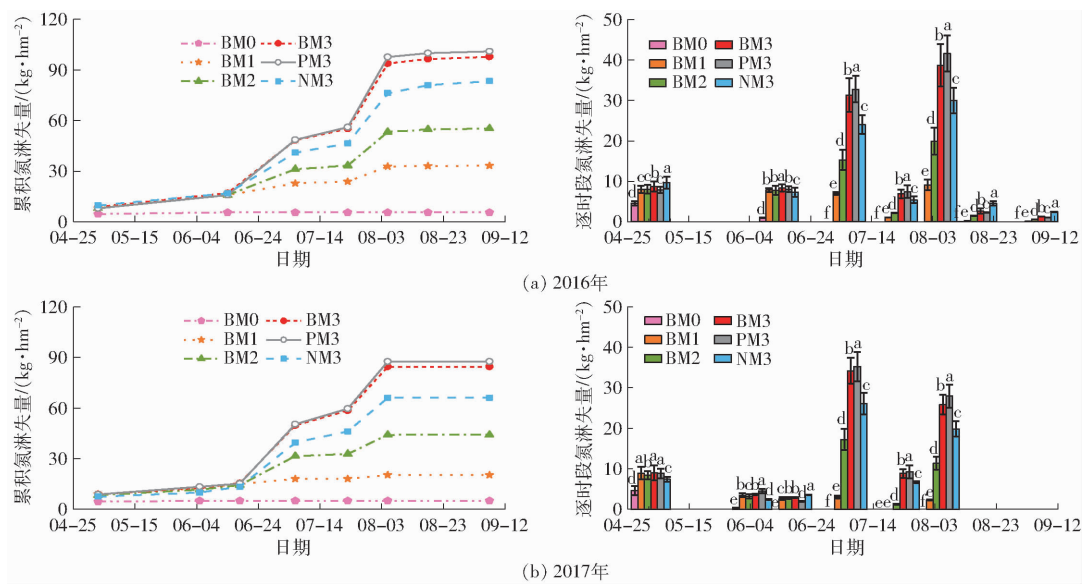


图4 不同处理下各生育期的氮淋失量

Fig.4 Nitrogen leaching during crop growth stages for different treatments

表3 不同处理下作物产量及相应氮肥利用效率
Tab.3 Crop yield and nitrogen fertilizer production efficiency under different treatments

年份	处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	氮肥利用 率/%	氮肥生理 利用率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥农学 利用率/ (kg·kg ⁻¹)
2016	BM0	4 001.38 ^d			
	BM1	8 432.12 ^c	43.17 ^a	47.52 ^c	20.51 ^d
	BM2	11 534.23 ^a	41.59 ^b	65.62 ^a	27.29 ^a
	BM3	11 513.09 ^a	34.23 ^c	65.31 ^a	22.36 ^c
	PM3	12 071.44 ^a	35.80 ^c	67.09 ^a	24.02 ^b
	NM3	10 220.58 ^b	29.75 ^d	62.22 ^b	18.51 ^e
2017	BM0	3 203.79 ^d			
	BM1	8 331.54 ^c	44.74 ^a	53.07 ^c	23.74 ^c
	BM2	11 122.49 ^a	41.94 ^b	68.41 ^a	28.69 ^a
	BM3	11 180.36 ^a	35.13 ^c	67.57 ^a	23.74 ^c
	PM3	11 561.24 ^a	35.77 ^c	69.54 ^a	24.87 ^b
	NM3	9 743.51 ^b	31.69 ^d	61.42 ^b	19.46 ^d

和 BM1 处理(追肥施氮量 160 kg/hm²)2 年平均产量分别提高了 0.16% 和 35.37%,比 BM0 处理(不施肥)平均产量提高了 214.96% ($P < 0.05$),可见对于干旱区降解地膜处理下追肥氮施量为 220 kg/hm² 时,效益较高,增加追肥施氮量对于产量增加无明显作用,而该地区如不施氮则产量会显著下降。

由于塑料地膜与降解地膜覆盖下的产量无显著差异,氮肥利用效率差异也并不明显(表 3),BM3 处理 2 年平均氮肥利用率、氮肥生理利用率、氮肥农学利用率仅比 PM3 处理分别低了 3.09%、2.74% 和 5.71%,但比 NM3 处理提高了 12.90%、7.48% 和 13.67% ($P < 0.05$)。降解地膜覆盖农田施氮水平从低氮(BM1)到高氮(BM3),2 年氮肥利用率平均分别降低了 4.97% 和 16.96% ($P < 0.05$)。氮肥生

理利用率与氮肥农学利用率均为中氮处理(BM2)最高,2 年平均比高氮处理(BM3)分别高 0.87% 和 26.51%,比低氮处理(BM1)高 33.24% 和 26.51% ($P < 0.05$)。从保证高产及氮肥高效利用效果来看,BM2 处理氮肥综合效率最高,2 年平均产量为 11 328.36 kg/hm²,氮肥利用率为 41.77%,氮肥生理利用率为 67.01 kg/kg,氮肥农学利用率为 27.99 kg/kg,即每施用 1 kg 氮肥可以出产 27.99 kg 玉米,故对于干旱区降解地膜覆盖农田追肥施氮量 220 kg/hm² 的 BM2 处理为该地区较优的施肥模式。

3 讨论

3.1 不同覆膜与施氮量处理对土壤硝态氮迁移变化的影响

对于干旱缺水地区,覆膜能明显减少土壤蒸发,提高土壤水分^[22],显著降低氮素挥发量^[23],增加土壤有机质的矿化速率和降低活性有机氮库,从而覆膜会使土壤耕层中氮含量增加^[24-25]。降解地膜在地膜破损诱导期内,尽管地膜的力学性能下降但未破损,覆盖效果与塑料地膜相近,所以土壤中氮含量也与塑料地膜覆盖相近,但是在地膜降解破损期,特别是作物生长后期由于破损明显高于塑料地膜,土壤中的细菌、真菌数量以及土壤活性下降,导致氮矿化量和氮矿化速率下降,且反硝化作用产生的 N₂ 从降解地膜破碎处挥发,作物固氮能力降低,硝化反应减弱,从而导致土壤内氮含量相对较低。谷晓博等^[13] 研究显示,油菜播种 60 d 后,塑料地膜与降解地膜覆盖下土壤中氮含量显著大于无膜处理,且降解地膜随降解程度加大,与无膜处理差异减小,该结果与本研究相近。本研究显示在相同施氮量条件下

0 ~ 50 cm 土层塑料地膜、降解地膜和无膜处理土壤中氮含量依次为 25.24、17.96、13.33 kg/hm², 50 ~ 100 cm 土层依次为 93.32、89.23、81.53 kg/hm²。另外硝态氮为负离子,不能被黏土矿物质或有机质吸附,只存在于土壤或沉积物的液相中,易随土壤中的渗流水自由迁移,当入渗量越大则氮迁移量也越大,淋失量就会越多,同时氮迁移量还与氮浓度有关,氮浓度越高,则迁移相同水分中的氮量就越多^[26-28],本研究中塑料地膜覆盖、降解地膜覆盖和无膜覆盖处理由于土壤中的氮含量依次降低,所以淋失量同样呈下降趋势。且随着施氮量的增加,土层硝态氮含量和氮淋失量均显著提高。

3.2 不同覆膜与施氮量处理对作物生长发育和氮肥利用效率的影响

由于覆膜后土壤中氮含量增加,从而土壤中氮含量、无机氮含量与土壤溶质势增大,作物同化作用增强,则作物氮含量提高,解文艳等^[29]研究表明,塑料地膜覆盖比无膜覆盖作物氮吸收量增大了 11.86%,本研究显示,与塑料地膜覆盖处理相比,降解地膜覆盖和无膜处理玉米氮含量分别降低了 2.22% 和 8.18%。作物产量受较多因素影响,通常吸水量多、氮含量多则参与光合作用以及同化的营养物质越多,氮素转运量和转运效率越高,进而产量会越高,所以本研究中塑料地膜覆盖和降解地膜覆盖下产量比无膜处理分别提高了 18.11%、12.65%。申丽霞等^[22]研究显示,降解地膜处理下产量比无膜处理增加了 35.1%。对于降解地膜覆盖下不同施氮量条件下氮的迁移、吸收、淋失等过程与塑料地膜覆盖下及无膜处理的规律一致,施氮量增加,产量提高,如姜涛^[30]研究表明,随着施氮量增加,增产 83.3% ~ 140.5%,氮含量增加了 8.7% ~ 63.8%,但并不是施氮量越高越好,当施氮量达到某一个数值后,作物吸收氮的增加速率变得非常缓慢,氮素转运率下降,甚至溶质势过高反而导致吸水量下降,导致叶片早衰及光合能力下降,不利于产量的提高^[31],所以施氮量与产量是一个二次抛物线关系。李仙岳等^[14]研究显示,玉米产量随施氮量的变化曲线为开口向下的抛物线,随施氮量的增加增产效果减缓^[32],符合报酬递减效应,存在最大值点。且在同一灌溉水平下,氮肥利用率与施氮量呈负相关^[33],所以从这个角度分析,氮的利用效率并不是施氮量越高越好,通常施氮量较少时,作物吸氮不足,从而生长受限,当施氮量适量时则促进作物生

长,产量和氮肥利用效率均较高,如果过量施氮,由于作物氮含量与产量不增加,从而氮肥利用效率会下降。杨荣等^[34]研究显示,最优施氮量为 225 kg/hm²,施氮量继续增加,产量和氮肥利用率均会下降。本研究显示,当基肥施氮量为 56 kg/hm²时,追肥施氮量为 220 kg/hm²时,产量最高,综合氮肥利用效率也最高。两者之间差异可能是由于土质、气候条件和田间管理措施不同导致。

4 结论

(1)在第 1、2 降解阶段,生物降解地膜(BM3)覆盖处理土壤硝态氮含量与塑料地膜(PM3)覆盖处理在 0 ~ 50 cm 土层无显著差异,而在第 3、4 降解阶段则分别降低了 9.49% 和 28.84%,比无膜覆盖处理分别提高了 20.46% 和 25.74%;而在 50 ~ 100 cm 土层,仅在第 4 阶段显著降低($P < 0.05$)。BM3 和 PM3 处理在整个生育期硝态氮含量均显著高于无膜(NM3)覆盖($P < 0.05$),平均提高了 16.94% 和 24.66%,且随着施氮量增加,土壤中硝态氮含量显著增大,追肥施氮量为 280 kg/hm²(BM3)比追肥施氮量 220 kg/hm²(BM2)和 160 kg/hm²(BM1)在 0 ~ 30 cm 土层氮含量分别增加了 49.45% 和 135.78%,在 30 ~ 100 cm 土层分别增加了 16.63% 和 33.56%。

(2)整个生育期 BM3 处理玉米氮含量和氮淋失量略低于 PM3 处理,2 年平均分别降低了 2.26% 和 3.36%,但均显著高于无膜覆膜处理($P < 0.05$),2 年分别提高了 8.90%、11.38% 和 22.01%、26.25%。随着追肥施氮量的增加,玉米氮含量也呈增加趋势,BM3 处理比 BM2 和 BM1 处理 2 年分别提高了 0.78% 和 24.54% ($P < 0.05$);同时氮淋失量接近线性增加($P < 0.05$),2 年平均分别提高了 84.08% 和 255.37%。

(3)PM3 处理与 BM3 处理产量无显著差异,2 年平均产量分别比 NM3 处理提高了 13.67% 和 18.38% ($P < 0.05$);BM3 处理的氮肥利用率、氮肥生理利用率、氮肥农学利用率比 PM3 处理分别降低了 3.09%、2.74% 和 5.71%,但比 NM3 处理提高了 12.90%、7.48% 和 13.67% ($P < 0.05$)。BM3 处理比 BM2 和 BM1 处理 2 年平均产量分别提高了 0.16% 和 35.37%。追肥施氮量为 220 kg/hm²的 BM2 处理的氮肥综合效率最高,每施用 1 kg 氮肥可以出产 27.99 kg 玉米,为该地区较优的施肥模式。

参 考 文 献

[1] 杨慧,刘立晶,刘忠军,等.我国农田化肥施用现状分析及建议[J].农机化研究,2014,36(9):260-264.

- YANG Hui, LIU Lijing, LIU Zhongjun, et al. Analysis and suggestions of agricultural fertilizer application in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(9): 260–264. (in Chinese)
- [2] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259–273.
- ZHU Zhaoliang, JIN Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259–273. (in Chinese)
- [3] FRANCISCO A. Crop responses to nitrogen overfertilization: a review[J]. Scientia Horticulture, 2016, 205: 79–83.
- [4] 李仙岳, 郭宇, 丁宗江, 等. 不同地膜覆盖对不同尺度地温与玉米产量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 247–256.
- LI Xianyue, GUO Yu, DING Zongjiang, et al. Influence of different film mulchings on soil temperature at different time scales and maize yield[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 247–256. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180929&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.029. (in Chinese)
- [5] 王志超, 李仙岳, 史海滨, 等. 覆膜年限及灌水方法对河套灌区农膜残留的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 159–165.
- WANG Zhichao, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Effects of mulching years and irrigation methods on residual plastic film in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 159–165. (in Chinese)
- [6] LIU C A, JIN S L, ZHOU L M, et al. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters[J]. European Journal of Agronomy, 2009, 31(4): 241–249.
- [7] LI C, MOORE-KUCERA J, LEE J, et al. Effects of biodegradable mulch on soil quality[J]. Applied Soil Ecology, 2014, 79(1): 59–69.
- [8] CHEN X L, WU P T, ZHAO X N, et al. Effect of different mulches on harvested rainfall use efficiency for corn (*Zea mays* L.) in semi-arid regions of Northwest China[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2013, 27(3): 272–285.
- [9] SHEN L X, ZHANG Y M, LAN Y C, et al. Effects of degradable films with different degradation cycles on soil temperature, moisture and maize yield[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2019, 12(3): 36–44.
- [10] WU Y, HUANG F, ZHANG C, et al. Effects of different mulching patterns on soil moisture, temperature, and maize yield in a semi-arid region of the Loess Plateau, China[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2016, 30(4): 490–504.
- [11] 康虎, 敖李龙, 秦丽珍, 等. 生物质可降解地膜的田间降解过程及其对玉米生长的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(6): 54–58.
- KANG Hu, AO Lilong, QIN Lizhen, et al. Effects of biodegradable mulch film by reusing biomass residue on degradation in field and corn growth[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(6): 54–58. (in Chinese)
- [12] 周昌明, 李援农, 谷晓博, 等. 降解膜覆盖种植方式对夏玉米土壤养分和氮素利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 134–143.
- ZHOU Changming, LI Yuannong, GU Xiaobo, et al. Effects of biodegradable film mulching planting patterns on soil nutrient and nitrogen use efficiency of summer maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 134–143. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160218&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.018. (in Chinese)
- [13] 谷晓博, 李援农, 杜娅丹. 生物降解地膜促进冬油菜养分吸收减少土壤硝态氮累积[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 90–97.
- GU Xiaobo, LI Yuannong, DU Yadan. Biodegradable film enhancing nutrient uptake of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) and reducing soil nitrate accumulation[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 90–97. (in Chinese)
- [14] 李仙岳, 丁宗江, 闫建文, 等. 沙区降解地膜覆盖下滴灌农田水氮交互效应与模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 261–270.
- LI Xianyue, DING Zongjiang, YAN Jianwen, et al. Interaction effect and model of water and nitrogen under degradable film mulching in drip irrigated sandy farmland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 261–270. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180731&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.031. (in Chinese)
- [15] LIU Hui, WANG Zhaohui, YU Rong, et al. Optimal nitrogen input for higher efficiency and lower environmental impacts of winter wheat production in China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 224: 1–11.
- [16] 翁玲云, 杨晓卡, 吕敏娟, 等. 长期不同施氮量下冬小麦-夏玉米复种系统土壤硝态氮累积和淋洗特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2551–2558.
- WENG Lingyun, YANG Xiaoqia, LÜ Minjuan, et al. Characteristics of soil nitrate accumulation and leaching under different long-term nitrogen application rates in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(8): 2551–2558. (in Chinese)
- [17] 刘宏斌, 李志宏, 张维理, 等. 露地栽培条件下大白菜氮肥利用率与硝态氮淋溶损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 286–291.
- LIU Hongbin, LI Zhihong, ZHANG Weili, et al. Study on N use efficiency of Chinese cabbage and nitrate leaching under open field cultivation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 286–291. (in Chinese)
- [18] 肖继兵, 孙占祥, 蒋春光, 等. 密度和施氮量对垄膜沟播春玉米干物质积累和产量的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(1): 98–106.

- XIAO Jibing, SUN Zhanxiang, JIANG Chunguang, et al. Effects of planting density and nitrogen fertilizer rate on accumulated quantity of dry matter and yield of spring maize in ridge film mulching and furrow seeding[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(1): 98–106. (in Chinese)
- [19] 邵东国, 过龙根, 王修贵, 等. 水肥资源高效利用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 56–58.
- [20] 湖南农学院. 作物栽培学实验指导[M]. 北京: 农业出版社, 1988: 243–246.
- [21] 杨惠娣, 唐赛珍. 降解塑料试验评价方法探讨[J]. *塑料*, 1996, 25(2): 16–23.
YANG Huidi, TANG Saizhen. Evaluating method for testing of degradable plastics[J]. *Plastics*, 1996, 25(2): 16–23. (in Chinese)
- [22] 申丽霞, 王璞, 张丽丽. 可降解地膜对土壤、温度水分及玉米生长发育的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(6): 25–30.
SHEN Lixia, WANG Pu, ZHANG Lili. Effects of degradable film on soil temperature, moisture and growth of maize[J]. *Transactions of the CASE*, 2011, 27(6): 25–30. (in Chinese)
- [23] 刘建桢, 王泽林, 岳善超, 等. 地膜覆盖和施氮量对旱作春玉米农田净温室效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(4): 1197–1204.
LIU Jianwei, WANG Zelin, YUE Shanchao, et al. Effects of plastic film mulching and nitrogen application rate on net global warming potential in semiarid rain-fed maize cropland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(4): 1197–1204. (in Chinese)
- [24] 银敏华, 李援农, 李昊, 等. 覆盖模式对农田土壤环境与冬小麦生长的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 127–135, 227.
YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Effects of mulching patterns on farmland soil environment and winter wheat growth [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 127–135, 227. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160418&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.018. (in Chinese)
- [25] 申丽霞, 兰印超, 李若帆. 不同地膜覆盖对玉米生长和产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(33): 79–82.
SHEN Lixia, LAN Yinchao, LI Ruofan. Effects of different film mulching on growth and yield of maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(33): 79–82. (in Chinese)
- [26] 章明清, 陈防, 林琼, 等. 施肥对菜园土壤养分淋溶流失浓度的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 291–299.
ZHANG Mingqing, CHEN Fang, LIN Qiong, et al. Effect of fertilization on the concentration of soil nutrient leaching loss in vegetable garden[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 291–299. (in Chinese)
- [27] HOU X Q, WANG X J, LI R, et al. Effects of different manure application rates on soil properties, nutrient use, and crop yield during dryland maize farming[J]. *Soil Research*, 2012, 50(6): 507–514.
- [28] 申丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(11): 200–205.
CHUAN Limin, ZHAO Tongke, AN Zhizhuang, et al. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(11): 200–205. (in Chinese)
- [29] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 旱地春玉米地表覆盖对土壤硝态氮残留的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 158–164.
XIE Wenyan, ZHOU Huaiping, YANG Zhenxing, et al. Effects of soil surface mulching on residual nitrate nitrogen in soil of spring maize field in dryland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 158–164. (in Chinese)
- [30] 姜涛. 氮肥运筹对夏玉米产量、品质及植株养分含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 559–565.
JIANG Tao. Effects of nitrogen application regime on yield, quality and plant nutrient contents of summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3): 559–565. (in Chinese)
- [31] OSAKI M, SHINANO T, TADANO T. Redistribution of carbon and nitrogen compounds from the shoot to the harvesting organs during maturation in field crops[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 1991, 37(1): 117–128.
- [32] LI Y, LIU H, HUANG G. The effect of nitrogen rates on yields and nitrogen use efficiencies during four years of wheat–maize rotation cropping seasons[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108(5): 2076–2088.
- [33] 王晓菁, 李中方, 臧贺藏, 等. 不同施氮模式对夏玉米生长、产量和氮素利用效率的影响[J]. *河南农业科学*, 2015, 44(10): 68–72.
WANG Xiaojing, LI Zhongfang, ZANG Hezang, et al. Effects of different nitrogen application patterns on growth, yield and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Journal of Henan Agricultural Science*, 2015, 44(10): 68–72. (in Chinese)
- [34] 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): 1459–1469.
YANG Rong, SU Yongzhong. Effects of 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 Ecology Sinica*, 2009, 29(3): 1459–1469. (in Chinese)