

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

周昌明 李援农 谷晓博 银敏华 赵 玺

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 采用生物可降解地膜覆盖, 设置平地全覆盖 (M1)、垄沟半覆盖 (M2)、连垄全覆盖 (M3) 与传统平地种植 (CK) 4 种植方式, 通过 2013—2014 年 2 年夏玉米大田试验, 分析降解膜覆盖下不同种植方式对土壤养分变化、土壤硝态氮分布以及作物对养分吸收利用率的影响。结果表明, 与 CK 相比, 3 种覆盖种植方式均提高了表层 0 ~ 50 cm 土壤养分, 其中土壤速效磷、速效钾、碱解氮含量增加显著, 土壤有机质含量呈下降趋势; 不同处理下土壤 0 ~ 200 cm 平均硝态氮含量均在播种后 20 ~ 60 d 明显减少, 且在不同时期硝态氮含量峰值随着播种后天数的增加逐渐向下运移; M1、M2 和 M3 处理的植株体内氮素累积量与 CK 相比均有不同程度增加, 在播种后 20 ~ 40 d 累积量最多。3 种覆盖处理 2 年氮肥偏生产力与氮素利用效率均显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$), 其中, M3 氮素利用效率最高, 比 M1、M2 处理分别提高了 49.30%、33.10%。综合而言, 覆盖降解膜有利于改善作物生长的水肥环境, 促进作物对氮素的有效吸收, 其中连垄全降解膜覆盖种植方式 (M3) 在保护土壤环境、提高耕作层土壤养分以及促进作物对养分的吸收利用效率等方面效果最佳。

关键词: 夏玉米; 生物降解膜; 土壤硝态氮; 氮素利用效率

中图分类号: S513; S158.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0133-10

Effects of Biodegradable Film Mulching Planting Patterns on Soil Nutrient and Nitrogen Use Efficiency of Summer Maize

Zhou Changming Li Yuannong Gu Xiaobo Yin Minhua Zhao Xi

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to reveal the effects of biodegradable film mulching cultivation on soil nutrient and nitrogen use efficiency, a two-year field experiment was carried out in 2013 and 2014 to determine and calculate nitrate nitrogen and other nutrient contents in soil, nitrogen contents and yields of summer maize, partial factor productivity (PFP) and nitrogen agronomic efficiency (AE). Four treatments, including flat planting without mulching (CK), flat planting with biodegradable film mulching (M1), ridge-furrow planting with biodegradable film mulching over ridge only (M2) and ridge-furrow planting with biodegradable film mulching over ridges (M3), with three replicates were conducted. The results showed that nutrient content in 0 ~ 50 cm soil layer was increased under all mulching treatments compared with that under CK, especially available N, P and K contents were significantly increased. The reduction range of average nitrate nitrogen content in 0 ~ 200 cm soil layer reached the maximum at 20 ~ 60 d after sowing, and nitrate nitrogen peak value in different soil depths presented gradually downward migration trend with increment of the days after sowing. Summer maize nitrogen accumulation under M1, M2 and M3 were higher than that under CK, and achieved the greatest amount during 20 ~ 40 d after sowing. The PFP and AE under the three mulching treatments were significantly higher than that under CK ($P <$

收稿日期: 2015-05-16 修回日期: 2015-06-29

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2011AA100504)

作者简介: 周昌明 (1986—), 男, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhouchangminglove1@163.com

通信作者: 李援农 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术及 3S 技术应用研究, E-mail: liyuannong@163.com

0.05)。The nitrogen use efficiency under M3 was greater than that under M1 and M2 and it was increased by 49.30% and 33.10% , respectively. Overall, it could be concluded that the treatment of ridge-furrow planting with biodegradable film mulching (M3) reached the best effect on promoting nutrient uptake and improving yield of summer maize in drought area.

Key words: summer maize; biodegradable film; soil nitrate; nitrogen use efficiency

引言

地膜覆盖栽培技术自 1979 年在我国试验应用并推广以来,已成为重要的农业增产措施^[1-2]。然而,随着地膜使用量和覆盖面积的逐渐增大,地膜残留对土壤、作物、微生物、家畜以及环境等造成了巨大影响^[3-5]。地膜污染已成为继化肥污染、农药污染后第 3 个污染严重的问题,解决地膜残留污染问题刻不容缓^[6]。近年来,各种环保地膜先后问世,生物降解膜是国内外研究较多的一种环保地膜,其中以淀粉为主要原材料,能在自然条件下被微生物利用而引起降解,不仅能有效起到普通地膜的覆盖效果,而且还能自然降解,减少后期对残膜回收的人力物力,保护作物生长的土壤资源^[7]。有关研究发现^[8-10],生物降解膜代替普通地膜覆盖除了能减少地膜污染外,还能有效保水保墒、改善土壤物理性状、促进作物的生长发育,并显著提高作物的产量和水分利用效率。

用生物降解膜代替普通地膜投入农业覆盖种植技术中已成为我国未来发展的必然趋势,目前对于生物降解膜的研究大多集中在与其他材料地膜的效果对比、对作物生长发育以及对土壤水分、温度等指标的影响方面,得出了利用降解膜覆盖具有增产、促进作物提高水分利用效率等结论^[11-12],对于土壤养分如何变化以及作物对养分的吸收利用效果如何等问题还研究较少^[13-14]。然而,只有充分了解和掌握覆盖种植下的养分运移和分布情况,才能更好地分析干旱地区更合理的施肥、灌水方式,从而实现解决地膜残留和肥料污染的目标,促进我国农业的可持续发展。虽然前人做了很多普通地膜覆盖对土壤养分和作物养分吸收的研究^[15-16],但降解膜覆盖与普

通地膜存在着本质的区别,不可直接认定两者之间的覆盖效果相同,降解膜覆盖除了能够改变土壤的水、热、气等环境外,其后期的降解过程还避免了由于长时间覆盖带来的土壤板结、营养物质降低、产量降低等负面影响^[17]。因此,研究降解膜覆盖下土壤养分的变化以及作物对养分的吸收能够更加全面地获得降解膜覆盖对土壤、作物的影响,对于旱区降解膜覆盖技术的认识和推广具有重要的意义。

本文采用生物可降解地膜,设置平地全覆盖(M1)、垄沟半覆盖(M2)、连垄全覆盖(M3)与传统平地种植(CK)4 种植方式,通过 2013—2014 年 2 年夏玉米大田试验,分析降解膜覆盖下 3 种不同种植方式对土壤养分变化、土壤硝态氮分布以及作物对养分吸收的影响。旨在为旱区选择合理的生物降解膜覆盖种植方式来蓄水保墒、减少地膜污染、促进农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2013 年和 2014 年 6—11 月在西北农林科技大学旱区农业工程教育部重点实验室的灌溉试验站进行。该站地处 34°17'38"N、108°04'08"E,海拔高度 521 m,年平均气温 13℃,多年平均蒸发量 1 510 mm,年平均降水量 632 mm,属大陆性暖温带季风气候。表层土壤田间持水率为 24%(质量含水率),土壤容重为 1.32 g/cm³,0~50 cm 土壤基础养分见表 1。

1.2 供试材料

试验所用生物降解膜由陕西杨陵瑞丰环保科技有限公司生产,膜宽 100 cm,膜厚 0.008 mm,降解膜主要由 30% 淀粉、50% PCL(聚己内酯)及其他助剂

表 1 试验地 0~50 cm 土层土壤有机质和基础养分(质量比)

Tab.1 Soil nutrient and organic matter of experiment sites in 0~50 cm soil layer

土层深度/ cm	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	全氮含量/ (g·kg ⁻¹)	全磷含量/ (g·kg ⁻¹)	全钾含量/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮含量/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷含量/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾含量/ (mg·kg ⁻¹)
0~10	6.95±0.69	0.92±0.07	0.62±0.02	10.23±0.72	23.51±2.01	17.32±1.58	163.21±5.02
10~20	8.26±0.70	0.85±0.06	0.54±0.02	10.01±0.64	20.53±1.88	15.23±1.32	158.02±4.26
20~30	8.50±0.55	0.81±0.06	0.53±0.01	9.87±0.60	18.34±1.60	11.00±0.98	150.24±4.01
30~40	10.36±0.81	0.87±0.07	0.44±0.02	10.00±0.66	16.01±0.86	11.23±1.02	145.87±3.12
40~50	8.25±0.63	0.76±0.04	0.41±0.01	8.67±0.43	13.22±0.61	9.01±0.80	132.02±1.02

组成。2 季夏玉米供试品种均为“漯单 9 号”，由河南金国种业有限公司生产，该品种根系发达，为中早熟品种。试验所用钾肥为农业用硫酸钾， K_2O 质量分数大于等于 51.0%；供试磷肥为过磷酸钙，有效 P_2O_5 质量分数大于等于 16.0%；供试氮肥为尿素，总氮质量分数大于等于 46.4%。

1.3 试验设计

试验采用生物降解膜，设计平地无覆盖种植 (CK)、平地全覆盖 (M1)、垄沟半覆盖 (M2)、连垄全

覆盖 (M3) 4 种覆盖种植方式 (图 1)，3 次重复，随机区组排列。小区面积 20 m^2 ($4\text{ m} \times 5\text{ m}$)，所有小区南北走向。试验田各处理均以氮肥 150 kg/hm^2 、磷肥 60 kg/hm^2 、钾肥 80 kg/hm^2 为基肥，于 2013 年 6 月 16 日和 2014 年 6 月 18 日按照行距 60 cm、株距 28 cm 进行覆膜种植。出苗后及时放苗和定株，生育期中耕除草 1 次，未进行追肥、灌溉和施药等措施。夏玉米生育期 6—11 月降水量 2013 年为 325.6 mm，2014 年为 388.4 mm，近 5 a 均值为 453.17 mm。

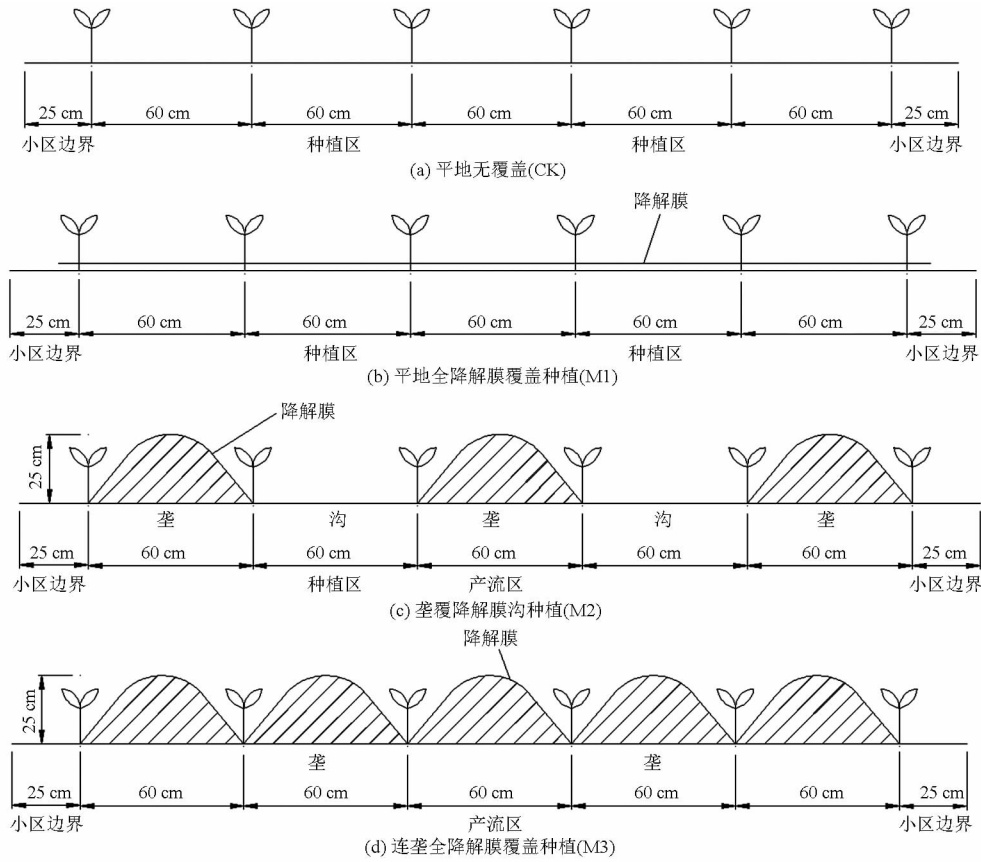


图 1 大田试验设计
Fig. 1 Field experiment plot design

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤硝态氮测定

于夏玉米播种前 (2013 年 6 月 16 日、2014 年 6 月 18 日)、收获后 (2013 年 10 月 7 日、2014 年 10 月 10 日) 以及播种后 20、40、60、80、100 d 分别测量 0~200 cm 土层土壤硝态氮含量，取土方式采用土钻法取土，所有取土位置均为每小区中间、同一行中相邻两株玉米中间区域，每个小区随机取样 3 次。鲜样取回后捏碎，自然风干后过 2 mm 筛，并称取 5 g 土样，用 50 mL 的氯化钾溶液 (2 mol/L) 浸提振荡 0.5 h 后过滤，用连续流动分析仪 (Auto Analyzer-III) 测定硝态氮含量^[18]。

1.4.2 植株含氮量测定

在播种后 20、40、60、80、100 d 分别采集植株样

品，分为叶、茎及果穗 3 部分，每个处理选 3 株，称完鲜质量后放入干燥箱在 105℃ 下杀青 0.5 h，75℃ 恒温干燥至质量恒定，用电子天平称量干物质量。所有植物样品均干燥后粉碎，并过 0.5 mm 筛，在阴凉干燥处密闭保存，测量时，植物样品用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮，并用流动分析仪测定各部分全氮含量并折算植株含氮量^[15]。

1.4.3 产量测定

成熟期每个小区收获内侧 4 行测产，根据质量均值法取有代表性的样穗 12 穗进行自然风干、脱粒、称量，得到籽粒产量^[10]。

1.4.4 氮肥偏生产力和氮肥农学利用率计算

氮肥偏生产力 (Partial factor productivity) 计算公式为^[19]

$$P_{FP}=\frac{Y_x}{F_N}$$

(1)

式中 P_{FP} ——氮肥偏生产力,kg/kg
 Y_x ——施氮区的作物产量,kg/hm²
 F_N ——氮肥的施入量,kg/hm²

氮肥农学利用率 (Agronomic efficiency) 计算公式为^[20]

$$A_E=\frac{Y_x-Y_0}{F_N}$$

(2)

式中 A_E ——氮肥农学利用率,kg/kg
 Y_0 ——未施氮肥区的作物产量,kg/hm²

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据整理;采用 SPSS 19 进行试验数据统计分析,方差分析使用最小显著差异 LSD (Least-significant difference) 法进行;采用软件 Origin 8.0 和 Excel 2010 作图。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖处理对土壤养分的影响

在我国干旱半干旱地区,土壤水分不足会直接抑制作物对肥料的吸收和利用,进行合理的覆盖种

植不仅能改善土壤水分环境,而且有利于促进作物对肥料的吸收和利用^[21]。土壤中有有机质和 N、P、K 含量是保证作物正常生长发育最主要的养分指标。表 2 为不同处理对土壤耕作层 0 ~ 50 cm 土壤养分和有机质平均含量的影响。由表 2 分析知,在玉米收获后,可降解膜覆盖的 M1、M2 和 M3 处理下 0 ~ 50 cm 土壤养分含量均高于 CK 对照处理,其中碱解氮、速效磷和速效钾含量与 CK 对照差异显著 ($P < 0.05$),且 M1、M2、M3 处理之间差异不显著。处理 M3 与 CK 对照差异最大,2013 年 M3 处理土壤碱解氮、速效磷和速效钾分别较 CK 增加 5.76%、4.69% 和 18.91%,2014 年分别增加 7.09%、6.28%、18.54%。3 种覆盖处理的土壤有机质含量均低于 CK 处理,其中 M3 处理的土壤有机质含量与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)。2 季夏玉米试验中,不同覆盖处理对土壤的全氮、全磷、全钾含量的影响不一致,其中 2013 年 M1、M2、M3 与 CK 对照无显著差异。综合表 2,说明在可降解膜覆盖条件下,不同种植方式对土壤耕作层土壤养分和有机质含量有一定的改善,其中 M3 覆盖处理与 CK 差异显著,能较好地促进耕作层土壤养分的积累。

表 2 不同处理耕层 (0 ~ 50 cm) 土壤养分和有机质平均含量 (质量比)
Tab.2 Average content of nutrient and organic matter of different treatments in topsoil (0 ~ 50 cm)

年份	处理序号	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	全氮含量/ (g·kg ⁻¹)	全磷含量/ (g·kg ⁻¹)	全钾含量/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮含量/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷含量/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾含量/ (mg·kg ⁻¹)
2013	CK	11.73 ^a	0.68 ^a	0.47 ^a	10.30 ^a	15.03 ^b	10.30 ^b	118.67 ^b
	M1	11.07 ^{ab}	0.69 ^a	0.50 ^a	10.51 ^a	16.57 ^a	11.50 ^a	133.00 ^a
	M2	10.97 ^{ab}	0.71 ^a	0.51 ^a	10.54 ^a	17.00 ^a	11.77 ^a	137.00 ^a
	M3	10.60 ^b	0.71 ^a	0.51 ^a	10.55 ^a	17.00 ^a	11.83 ^a	137.33 ^a
2014	CK	12.52 ^a	0.67 ^a	0.48 ^b	10.54 ^b	17.29 ^b	10.78 ^b	125.59 ^b
	M1	11.81 ^{ab}	0.69 ^a	0.53 ^a	11.01 ^a	18.61 ^{ab}	12.00 ^a	140.00 ^a
	M2	11.74 ^{ab}	0.70 ^a	0.53 ^a	11.26 ^a	19.25 ^a	12.29 ^a	146.00 ^a
	M3	11.30 ^b	0.72 ^a	0.54 ^a	11.40 ^a	19.23 ^a	12.52 ^a	145.17 ^a

2.2 不同处理对土壤硝态氮变化的影响

2.2.1 土壤硝态氮含量随玉米生育期的变化特性

氮素是作物生长需求量最多、对作物增产贡献最大的营养元素,土壤中氮素绝大多数为有机的结合形态,无机形态的氮一般占全氮含量的 1% ~ 5%,但这部分氮对作物来说是可直接吸收利用的矿质态氮,可反映土壤短期的供氮能力^[22]。图 2 为 0 ~ 200 cm 土层土壤平均硝态氮含量随播种后天数的变化情况,由于 2 季夏玉米试验均未有追肥处理,不同处理下土层 0 ~ 200 cm 硝态氮含量均表现为随着播种后天数的增加逐渐减小的变化趋势,其中在播种后 20 ~ 60 d 土壤 0 ~ 200 cm 平均硝态氮含量下降速率较快,在 60 ~ 120 d 硝态氮含量下降速率趋

于平缓,原因在于在 20 ~ 60 d 这一阶段玉米株高、叶面积、根系、地上部生物量呈显著增长,对水分、养分的需求量大^[10]。在不同处理中,2 季夏玉米覆盖处理的土壤硝态氮含量均高于 CK 对照处理,其中,覆盖 M3 处理的土壤硝态氮含量均显著高于其他 2 种覆盖处理,可能原因是硝态氮在土壤中的运移与土壤含水率密切相关,水和土壤中的有机物分解生成铵盐,被氧化后变为硝酸盐,而垄沟全覆盖集雨种植方式能有效蓄积雨水,促进了有机质的分解、转化,从而改善了农田的水分环境,增加了土壤中硝态氮的含量,因此进行合理的集水覆盖种植不仅有助于增加土壤水分,还能有效改善作物生长的土壤养分环境。

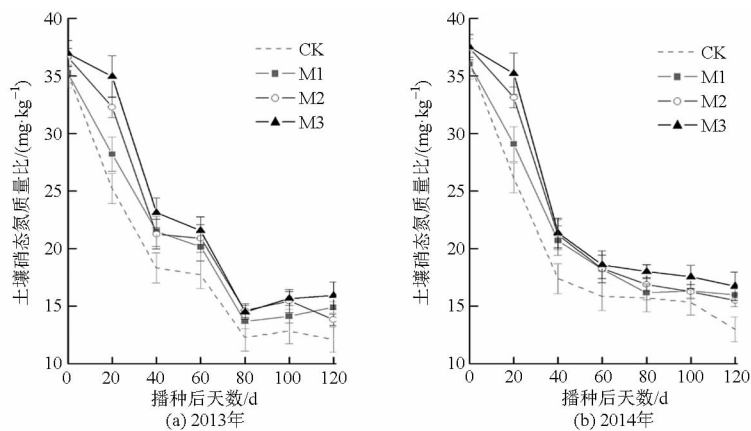


图 2 不同降解膜覆盖处理下 0 ~ 200 cm 土壤硝态氮变化

Fig. 2 Changes of soil nitrate at 0 ~ 200 cm soil layer under different biodegradable film treatments

2.2.2 土壤硝态氮含量随土层深度的变化特性

为进一步了解土壤硝态氮的变化情况,对覆盖前、中、后期土壤硝态氮含量随土层深度的变化情况进行深层分析。图 3 分别为 2013 年和 2014 年不同覆盖处理作物生长前期(播种后 20 d)、中期(播种后 60 d)和后期(播种后 100 d)土壤 0 ~ 200 cm 硝态氮含量随土层深度的变化。从图 3 可以看出,在不同的时期,土壤硝态氮含量随着土层深度呈现出不同的变化,但 4 种处理在同一时期变化趋势大体相似。在播种后 20 d,玉米处于生长初期,土壤氮肥也处于土壤表层,没有表现出淋洗下移现象,土层 0 ~ 40 cm 土壤硝态氮含量显著高于土层 40 ~ 200 cm 硝态氮含量,其中降解膜覆盖处理的 0 ~ 40 cm 硝态氮含量均高于 CK 处理,但无显著差异,说明覆盖初期对土壤表层硝态氮含量影响不大。

在播种后 60 d,由于玉米正处于快速生长发育的阶段,土壤表层硝态氮含量也不同程度的降低,与播种后 20 d 相比,各个处理的硝态氮含量峰值明显向下迁移,从前期的 20 cm 左右土层下移到 80 cm 土层左右,最大质量比也从之前的 70 ~ 110 mg/kg 降低到 20 ~ 40 mg/kg,从而证实了播种后 20 ~ 60 d 这段时期是玉米生长对养分大量需求的阶段。硝态氮含量的下降不仅与作物对土壤养分的吸收利用有关,而且与该时期雨水淋洗有一定的关系,是两方面因素综合作用的结果。土层 100 ~ 200 cm 土壤硝态氮含量无显著变化,说明在播种后 60 d 左右,覆盖仅对土层 0 ~ 100 cm 土壤硝态氮含量的影响显著。

在播种后 100 d,夏玉米处于成熟期,除硝态氮平均含量减少外,另一个显著变化是峰值继续向下延伸,各个处理的土壤硝态氮含量均与土层入渗情况一致,峰值从中期的 80 cm 左右下移到 120 cm 左右,说明随着播种后天数的增加,硝态氮含量也呈现不同深度的淋洗,其中,4 种处理中覆盖 M3 处理硝

态氮入渗较深,这与该处理所产生的集雨效果有关,2 季夏玉米播种后 100 d 的结果显示,覆盖 M3 处理的硝态氮含量迁移峰值在 200 cm 土层以内,也就是还处在根系范围内,不会存在污染现象。综合图 3 而言,与 CK 对照相比,覆盖处理会导致土壤硝态氮向下淋洗程度加深,表现为集雨效果越好的覆盖种植方式对硝态氮淋洗程度越深。

2.3 不同处理对玉米干物质质量和氮素累积的影响

2.3.1 玉米地上部干物质质量

以 2014 年为例,图 4 为不同覆盖处理对玉米地上部干物质质量累积的影响。由图 4 分析知,随着播种后天数的增加,干物质质量呈现逐渐增加的趋势,在播种后 40 d,玉米地上部干物质质量主要以茎叶为主,各个处理的干物质质量均在 50 g/株以下,随着夏玉米的生长发育,处理 CK、M1、M2 和 M3 的玉米地上部干物质质量均在播种后 100 d 达到最大值,茎、叶干物质质量均表现为先增加后减少的过程,果穗干物质质量一直处于增加状态,这与夏玉米后期营养物质向果穗积累以及茎叶逐渐衰老有一定的关系,总干物质质量分别为 160.96、172.37、207.39、240.23 g/株,其中 M1、M2 和 M3 覆盖处理的玉米地上部干物质质量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$),分别比 CK 高 7.09%、28.85%、49.25%。这说明覆盖降解膜能够有效增加作物干物质的累积,其中在 3 种降解膜覆盖种植中,M3 覆盖处理干物质累积增加量最为显著 ($P < 0.05$)。

2.3.2 氮素累积量

氮素吸收与转运直接影响着作物的生长发育状况,从而影响作物的产量。以 2014 年为例,不同处理对玉米地上部氮的累积见表 3。由表 3 分析知,随着播种后不同天数作物的快速生长和发育,不同处理下玉米地上部氮素累积呈增加趋势,在播种后 100 d 玉米氮素累积量达到观测时期的最大值,3 种

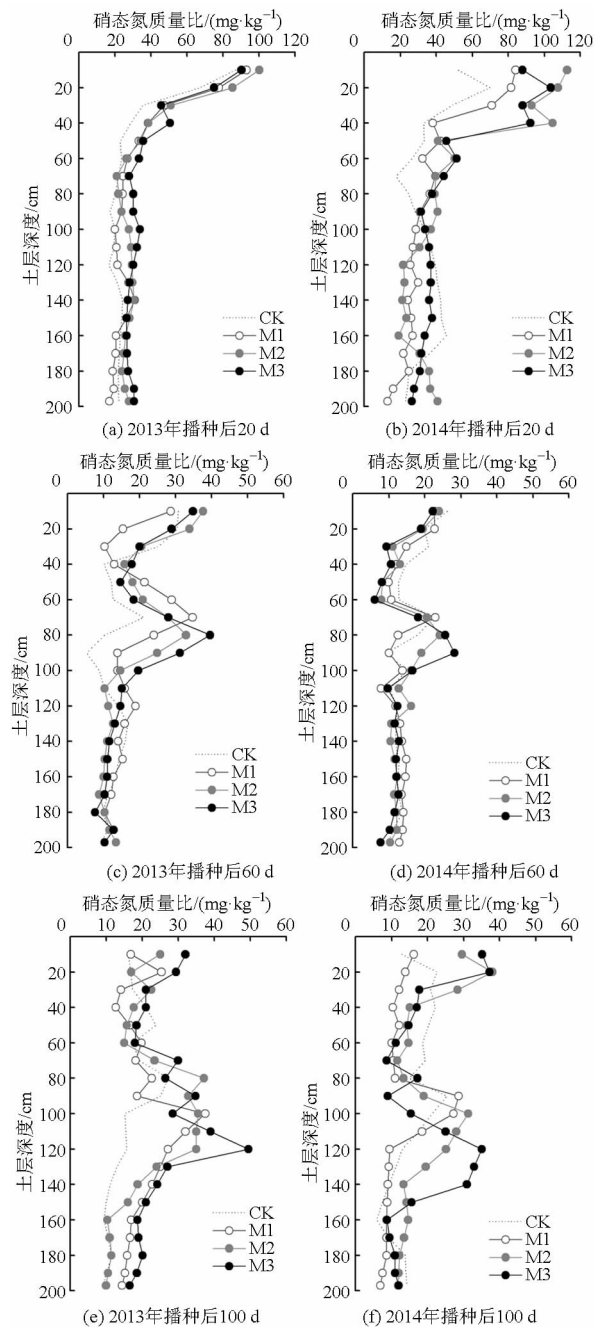


图 3 土壤硝态氮随土层深度的变化

Fig. 3 Changes of soil nitrate with depth under different treatments

覆盖处理氮素累积量均高于 CK 处理,其中覆盖 M3 处理的玉米地上部氮素累积量最多,说明降解膜覆盖下集水种植方式提高了土壤水分,促进了作物生长发育,也直接促进了作物营养物质的积累。处理 M3 种植方式不仅覆盖面积大,而且与垄沟相结合有助于水分累积,能更好地促进作物生长和营养物质的累积。

对不同时期地上部氮素累积量的研究发现(表 3),CK、M1、M2 和 M3 处理均在播种后 20 ~ 40 d 氮素累积量最多,分别达到 45.8、52.38、55.17、58.36 kg/hm²,日均累积量分别达到 2.29、

2.62、2.76、2.92 kg/hm²,均高于其他生育期日均累积量,进一步说明该时期是玉米营养生长最为旺盛的时期,也是营养物质吸收速率最快、对氮素需求量最多的时期,同时说明在该时期进行追肥处理为较为适合的时期,能够较好地发挥氮肥的效果,提高氮肥的利用效率,促进作物对氮素的累积。

2.4 氮素利用效率

提高养分利用效率降低氮肥的使用量一直是我国农业关注的主要问题,表 4 为降解膜覆盖下不同种植方式对玉米产量和氮素利用效率的影响。由表 4 可知,2 年夏玉米的产量、氮素吸收量、氮素利用效率和氮肥偏生产力均表现为覆盖处理大于 CK 对照,且与 CK 对照差异达到显著水平($P < 0.05$),其中 M1、M2 和 M3 处理 2 年平均吸氮量分别比 CK 对照提高了 8.67%、10.19%、12.86%。在 3 种降解膜覆盖处理中,覆盖 M3 处理的 2 年产量、氮素吸收量、氮素利用效率最高,M2、M1 处理仅次于 M3 处理。

肥料偏生产力是反映土壤肥力与肥料效率的综合指标,表现为产量与施肥量的比值关系,适宜的氮肥偏生产力一般在 40 ~ 80 kg/kg 之间,大于 60 kg/kg 表明氮素管理较好^[23],从表 4 可知,在相同施肥量和施肥条件下,3 种覆盖处理的氮肥偏生产力均高于 CK 处理,且差异显著,其中 M3 覆盖处理 2 年肥料偏生产力均在 60 kg/kg 以上,说明覆盖处理能显著提高氮肥的偏生产力,覆盖 M3 种植方式在提高氮素利用方面效果最好,2 年平均比 M1、M2 提高 49.30%、33.10%。2014 年各个处理氮肥偏生产力均高于 2013 年,这可能与该年的降水量等气候条件有关。综合可知,降解膜垄沟覆盖比平地覆盖有利于获得更高的玉米产量和氮素利用效率,M3 覆盖种植方式能更好地促进作物对氮素的吸收,提高作物的肥料利用效率。

2.5 作物吸氮量与产量和氮素利用效率的相关性

通过对以上各个指标的分析发现,降解膜覆盖处理对土壤硝态氮、作物氮素吸收利用效率等指标均有一定的积极作用,不同处理影响均存在一定的差异,本文进一步对氮素吸收量与产量、干物质质量做了相关性研究,通过图 5 发现,吸氮量与产量、干物质质量之间均具有较好的一元线性关系,决定系数分别为 0.91($P < 0.01$)、0.85($P < 0.05$)。这说明可以通过对干物质质量的观测间接地反映出该区域玉米对土壤氮素的吸收情况,也说明作物吸氮量与作物干物质累积量相辅相成,只有提高了作物吸氮量,满足了作物生长发育对氮素的需求,才能更好地促进作物产量的增加。

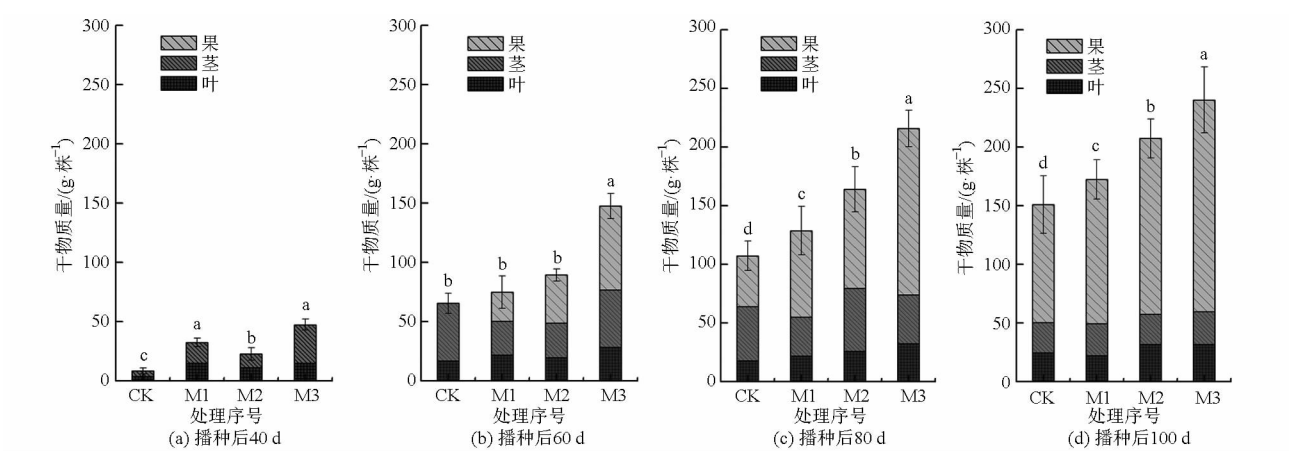


图4 2014年不同处理对玉米地上部干物质量的影响

Fig.4 Effects of different treatments on dry matter of maize in 2014

表3 2年不同处理对地上部氮素累积量的影响

Tab.3 Effects of different treatments on nitrogen accumulation of maize in 2013 and 2014		kg/hm ²							
项目	处理 序号	2013 年(播种后天数)				2014 年(播种后天数)			
		20 ~ 40 d	40 ~ 60 d	60 ~ 80 d	80 ~ 100 d	20 ~ 40 d	40 ~ 60 d	60 ~ 80 d	80 ~ 100 d
时期氮累积量	CK	44.32 ^b	38.33 ^b	35.33 ^{ab}	30.01 ^c	45.80 ^b	38.10 ^b	37.34 ^a	27.46 ^b
	M1	49.26 ^{ab}	38.31 ^b	35.01 ^{ab}	30.89 ^c	52.38 ^{ab}	46.46 ^a	32.56 ^b	30.30 ^{ab}
	M2	50.78 ^{ab}	39.15 ^a	34.21 ^b	32.26 ^b	55.17 ^{ab}	39.74 ^b	35.63 ^{ab}	33.66 ^a
	M3	53.50 ^a	39.20 ^a	36.50 ^a	34.05 ^a	58.36 ^a	40.50 ^b	35.34 ^{ab}	34.60 ^a
日均氮累积量	CK	2.22 ^b	1.92 ^b	1.77 ^{ab}	1.50 ^c	2.29 ^b	1.91 ^b	1.87 ^a	1.37 ^b
	M1	2.46 ^{ab}	1.92 ^b	1.75 ^{ab}	1.54 ^c	2.62 ^{ab}	2.32 ^a	1.63 ^b	1.52 ^{ab}
	M2	2.54 ^{ab}	1.96 ^a	1.71 ^b	1.61 ^b	2.76 ^{ab}	1.99 ^b	1.78 ^{ab}	1.68 ^a
	M3	2.68 ^a	1.96 ^a	1.83 ^a	1.70 ^a	2.92 ^a	2.03 ^b	1.77 ^{ab}	1.73 ^a

表4 不同处理对玉米产量和氮素利用效率的影响

Tab.4 Effects of different treatments on yield and nitrogen use efficiency of maize					
年份	处理 序号	产量/ (kg·hm ⁻²)	吸氮量/ (kg·hm ⁻²)	氮素利用 效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥 偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)
2013	CK	7 102.0 ^c	147.6 ^b	13.99 ^c	39.46 ^b
	M1	8 080.2 ^b	160.3 ^a	20.51 ^b	53.87 ^{ab}
	M2	8 232.5 ^b	162.3 ^a	21.53 ^b	54.88 ^{ab}
	M3	9 556.2 ^a	165.6 ^a	30.35 ^a	63.71 ^a
2014	CK	7 331.3 ^d	148.7 ^b	14.82 ^c	48.88 ^b
	M1	8 372.8 ^c	161.7 ^a	21.76 ^b	55.82 ^{ab}
	M2	9 035.1 ^b	164.2 ^a	26.17 ^b	60.23 ^a
	M3	10 025.6 ^a	168.8 ^a	32.78 ^a	66.84 ^a

注：2013、2014 年未施氮肥区 Y₀ 分别为 5 003.1、5 109.3 kg/hm²。

同时,对作物吸氮量与作物氮素利用效率、氮肥偏生产力之间的相关关系做了分析(图5),发现作物吸氮量与氮素利用效率和氮肥偏生产力也具有较好的相关关系,决定系数分别为 0.92($P < 0.01$)、0.88($P < 0.05$),进一步说明作物氮素对作物生长发育以及肥料利用效率的重要性,说明采用合理的覆盖种植方式不仅对于土壤环境有着较好的保护和改善,而且能促进作物对氮素的吸收利用,提高肥料

的利用效率,从而达到环境和产量双重保障的效果。综合说明,作物生长与土壤养分、水分息息相关,是一个整体部分,所有指标之间的关系都是微妙的,只有更好地了解、掌握作物与土壤的各种宏观与微观的联系,才能更好地处理作物生长过程中的各种不利因素。

3 讨论

3.1 不同处理对土壤养分变化的影响

不同覆盖处理对土壤水、气、热条件的影响不同,对土壤养分的分布、变化也产生不同的影响。周丽娜等^[24]通过测定覆膜方式对土壤养分的影响表明,垄沟全覆膜和垄沟半覆膜能够提高土壤氮、磷、钾速效养分含量,较好地维持土地生产力;李凤民等^[25]对小麦进行不同覆盖历时研究发现,全程覆膜处理有机质含量下降 21.2%,覆膜 60 d 处理下降 17.2%,覆膜 30 d 和未覆膜处理下降相对较小。本试验研究发现,降解膜覆盖效果与前人普通地膜覆盖效果相似,M1、M2 和 M3 覆盖种植均提高了土壤养分,土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量 2 季夏玉米种植过程中分别平均较 CK 增加了 6.43%、5.49% 和 18.73%(表 2),土壤有机质含量表现出下降的

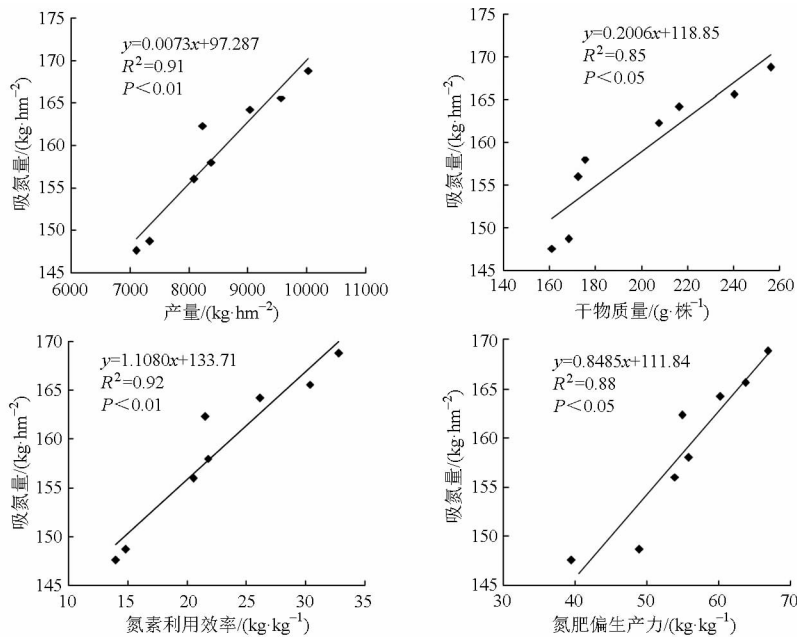


图5 吸氮量与产量、干物质量、氮素利用效率、氮肥偏生产力之间的相关关系
Fig. 5 Correlations between nitrogen uptake, yield and nitrogen use efficiency

变化趋势与前人研究结果也一致,其中覆盖种植的土壤有机质含量均低于 CK 对照,覆盖 M3 处理与 CK 差异显著,主要是因为覆盖种植增加了有机质的分解、转化,促进作物对养分的吸收引起的^[13]。

3.2 不同处理对土壤硝态氮含量变化及分布的影响

在玉米生长所需的资源中,养分起着重要的作用,土壤养分供应能力直接决定着作物产量的高低。夏冬等^[26]研究发现,地面覆盖可以改善土壤肥力状况,促进作物对养分的吸收。高亚军等^[27]研究认为,与常规无覆盖模式相比,地膜覆盖和垄沟种植显著提高了作物对氮素的吸收,但同时也增加了土壤 0~200 cm 的硝态氮残留,这与地膜覆盖导致有机氮矿化增加有关,但土壤含水率较大时,容易导致硝态氮的淋溶损失。本试验在生物降解膜覆盖的情况下发现,土壤 0~200 cm 平均硝态氮含量随着播种后天数的增加,呈现出逐渐减小的趋势,其中在播种后 20~60 d 硝态氮含量减小程度最为显著,60~120 d 减小程度较为平缓(图 2),主要是因为该时段玉米处于快速生长的时期,对土壤养分需求量大,而引起土壤养分快速下降^[10]。在 4 种处理当中, M1、M2 和 M3 覆盖处理 0~200 cm 土壤硝态氮累积量显著高于 CK 处理($P < 0.05$),这与前人研究结果一致,说明可降解地膜覆盖与前人研究的普通地膜有类似的改变土壤养分环境的作用。

本试验对土壤硝态氮含量随土层深度的变化做了进一步研究(图 3),研究发现在不做追肥处理的情况下,随着土层深度的增加不同土层硝态氮含量有着很大的差异,其中主要体现在峰值的变化方面,

在播种后 20 d,硝态氮峰值出现在 10~20 cm 土层,说明硝态氮主要累积在该土层,随着播种后天数的增加,硝态氮峰值有着显著地下移淋洗现象,在播种后 60 d 左右,各个处理的硝态氮峰值下移到 80 cm 土层左右,在播种后 100 d 左右,硝态氮峰值主要体现在 120 cm 土层左右,每个处理都有不同程度的淋洗现象,其中,集水处理 M2、M3 的淋洗程度要高于 M1 和 CK 处理,可能原因在于土壤水肥密切相关,氮肥易溶于水,随着水分的入渗向下运移,当土壤水分增加时,对氮肥的淋洗程度也加深。对播种后 100 d 土壤硝态氮峰值研究发现,虽然 M2、M3 淋洗程度较深,但峰值在 120~140 cm 土层左右,仍然处于玉米根系活动范围内,不存在硝态氮深层累积污染的可能^[28]。本文只研究了陕西关中地区 300~400 mm 降水量下硝态氮的分布和变化情况,不够完善,对于水分充沛或者干旱地区,不同覆盖种植下硝态氮随土层深度的变化情况如何,以及硝态氮淋洗程度如何还需要进一步的试验和研究。

3.3 不同处理下作物对氮素的吸收利用情况

不同覆盖种植方式能够提高作物对肥料的吸收利用。高亚军等^[27]研究认为,与常规无覆盖模式相比,地膜覆盖和垄沟种植显著提高了作物对氮素的吸收,从而促进了作物产量的累积。王彩绒等^[29]研究表明,覆膜集雨协调了土壤水分和养分的关系,有利于植株的协调生长,促进了地上部的养分携出量,最终获得高产。本研究发现(图 5),玉米对氮素的吸收累积量与玉米地上部干物质量有较好的一元线性关系,在玉米地上部干物质量累积增加的同时,对

氮素的吸收累积量也呈现增加的趋势,这与前人研究的覆膜增加作物对氮素的吸收相一致,其中,覆盖处理 M1、M2 和 M3 较 CK 对照相比显著增加了作物对氮素的吸收累积量($P < 0.05$),M3 处理的作物吸氮量最高(表 3),进一步说明了合理的覆盖种植能够改善作物对氮肥的吸收累积量,也是我国农业进行覆盖种植的目的所在。对氮素利用效率研究发现,覆盖 M1、M2 和 M3 处理的作物氮素利用效率和氮肥偏生产力均显著高于 CK 处理($P < 0.05$),其中 M3 处理能够有效地增加玉米产量,在肥料利用效率方面也最佳,对于解决干旱半干旱地区地膜污染、氮肥施用量高引起的土壤和水体污染以及肥料利用率低等问题具有较好的效果和实际意义。本文不足之处在于仅在氮肥用量适中(150 kg/hm^2)的情况下研究了不同覆盖处理对作物氮素吸收累积和利用效率的影响,对于氮肥亏缺以及氮肥过高条件下的氮素利用情况未有研究,还需要进一步的研究和完善。

4 结论

(1)可降解膜覆盖 M1、M2、M3 处理 0 ~ 50 cm 土壤养分含量均高于 CK 对照,其中碱解氮、速效磷和速效钾含量与 CK 对照差异显著($P < 0.05$)。M1、M2、M3 处理 2 年平均土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量分别较 CK 增加 6.43%、5.49% 和 18.73%。不同覆盖种植处理对土壤的全氮、全磷、全钾含量的影响无显著差异。

(2)不同处理下 0 ~ 200 cm 土层硝态氮含量均表现为随着播种后天数的增加呈现逐渐减少的变化趋势,其中,在播种后 20 ~ 60 d 左右硝态氮含量下降速率较快,在播种后 60 ~ 120 d 硝态氮含量下降速率趋于平缓,在播种后 60 d 左右,各个处理硝态氮含量峰值主要出现在 80 cm 土层左右,在播种后 100 d 左右,各个处理硝态氮含量峰值主要出现在 120 cm 土层左右。其中 M3 处理硝态氮淋洗程度最深。

(3)覆盖处理 M1、M2 和 M3 较 CK 对照相比显著增加了作物对氮素的吸收累积量($P < 0.05$),2 年平均吸氮量分别比 CK 对照提高了 8.67%、10.19%、12.86%。氮素利用效率和氮肥偏生产力与 CK 相比差异显著($P < 0.05$),其中,M3 处理的氮肥利用效率最高,比覆盖 M1、M2 处理分别提高了 49.30%、33.10%,产量和氮肥偏生产力也优于其他 2 种覆盖种植方式。

(4)降解膜覆盖不仅能解决地膜污染问题,而且能有效地提高肥料的利用效率,促进作物产量的提高,对于干旱半干旱地区农业可持续发展具有重要的意义。其中,M3 覆盖种植方式能更好地改善土壤表层养分、促进作物氮素吸收利用和地上部干物质累积、提高作物产量和氮肥利用效率,为旱区较为有效、合理的覆盖种植方式。因此,连垄全降解膜覆盖(M3)在干旱半干旱地区推广应用意义重大,但降解膜的经济成本、施肥方式等还有待进一步地研究。

参 考 文 献

1 张德奇,廖允成,贾志宽. 旱区地膜覆盖技术的研究进展及发展前景[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(1):208-213.
Zhang Deqi, Liao Yuncheng, Jia Zhikuan. Research advances and prospects of film mulching in arid and semi-arid areas [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(1): 208-213. (in Chinese)

2 李小英,段争虎,刘理臣,等. 黄土高原西部不同集雨保水措施下土壤水分变异特征[J]. 农业机械学报,2014,45(3):118-123.
Li Xiaoying, Duan Zhenghu, Liu Lichen, et al. Variation of soil moisture under different rainwater harvesting and conservation practices in the western part of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 118-123. (in Chinese)

3 董合干,刘彤,李勇冠,等. 新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(8):91-99.
Dong Hegan, Liu Tong, Li Yongguan, et al. Effects of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 91-99. (in Chinese)

4 徐刚,杜晓明,曹云者,等. 典型地区农用地膜残留水平及其形态特征研究[J]. 农业环境科学学报,2005,24(1):79-83.
Xu Gang, Du Xiaoming, Cao Yunzhe, et al. Residue levels and morphology of agricultural plastic film in representative areas of China [J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2005, 24(1): 79-83. (in Chinese)

5 严昌荣,王序俭,何文清,等. 新疆山河子地区棉田土壤中地膜残留研究[J]. 生态学报,2008,28(7):3470-3474.
Yan Changrong, Wang Xujian, He Wenqing, et al. The residue of plastic film in cotton fields in Shihezi, Xinjiang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3470-3474. (in Chinese)

6 严昌荣,梅旭荣,何文清,等. 农用地膜残留污染的现状与防治田[J]. 农业工程学报,2006,22(11):269-272.
Yan Changrong, Mei Xurong, He Wenqing, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 269-272. (in Chinese)

7 刘敏,黄占斌,杨玉姣. 可生物降解地膜的研究进展与发展趋势[J]. 中国农学通报,2008,24(9):439-443.
Liu Min, Huang Zhanbin, Yang Yujiao. A study on status and developmental trend of biodegradable plastic film [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(9): 439-443. (in Chinese)

- 8 杨玉姣,黄占斌,闫玉敏,等.可降解地膜覆盖对土壤温度和玉米成苗的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(增刊):10-14.
Yang Yujiao, Huang Zhanbin, Yan Yumin, et al. Effects on temperature and moisture of soil and seeding of maize to biodegradable film coverage [J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2010, 29(Supp.): 10-14. (in Chinese)
- 9 Li Rong, Hou Xianqing, Jia Zhikuan, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rain fed area of the Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2013, 116: 101-109.
- 10 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 CSAE, 2011, 27(6): 25-30. (in Chinese)
- 11 申丽霞,王璞,张丽丽.可降解地膜的降解性能及对土壤温度、水分和玉米生长的影响[J].农业工程学报,2012,28(4):111-116.
Shen Lixia, Wang Pu, Zhang Lili. Degradation property of degradable film and its effect on soil temperature and moisture and maize growth [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 111-116. (in Chinese)
- 12 李振华,张丽芳,康暄,等.降解地膜覆盖对土壤环境和旱地马铃薯生育的影响[J].中国农学通报,2011,27(5):249-253.
Li Zhenhua, Zhang Lifang, Kang Xuan, et al. Research of soil environment and fertility of potato grow in dry land mulching degradable plastic film [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(5): 249-253. (in Chinese)
- 13 王鑫,胥国宾,任志刚,等.无公害可降解地膜对玉米生长及土壤环境的影响[J].中国农业生态学报,2007,15(1):78-81.
Wang Xin, Xu Guobin, Ren Zhigang, et al. Effects of environment-friendly degradable films on corn growth and soil environment [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(1): 78-81. (in Chinese)
- 14 王星,吕家珑,孙本华.覆盖可降解地膜对玉米生长和土壤环境的影响[J].农业环境科学学报,2003,22(4):397-401.
Wang Xing, Lü Jialong, Sun Benhua. Effect of covering degradable films on corn and soil environment [J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2003, 22(4): 397-401. (in Chinese)
- 15 范明生,刘学军,江荣凤,等.覆盖旱作方式和施氮水平对稻-麦轮作体系生产力和氮素利用的影响[J].生态学报,2004,24(11):2591-2596.
Fan Mingsheng, Liu Xuejun, Jiang Rongfeng, et al. Effects of non-flooded mulching cultivation and N rates on productivity and N utilization in rice-wheat cropping systems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2591-2596. (in Chinese)
- 16 李仙岳,彭遵原,史海滨,等.不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J].农业机械学报,2015,46(2):97-103.
Li Xianyue, Peng Zunyuan, Shi Haibin, et al. Effects of different degradable films mulching on soil water potential, temperature and sunflower growth [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 97-103. (in Chinese)
- 17 张冬梅,池宝亮,黄学芳,等.地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响[J].农业工程学报,2008,24(4):99-102.
Zhang Dongmei, Chi Baoliang, Huang Xuefang, et al. Analysis of adverse effects on maize yield deccssc resulted from plastic film mulching in dryland[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 99-102. (in Chinese)
- 18 石玉,于振文.施氮量及底追比例对小麦产量、土壤硝态氮含量和氮平衡的影响[J].生态学报,2006,26(11):3661-3669.
Shi Yu, Yu Zhenwen. Effects of nitrogen fertilizer rate and ratio of base and topdressing on yield of wheat, content of soil nitrate and nitrogen balance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3661-3669. (in Chinese)
- 19 吉艳芝,冯万忠,郝晓然,等.不同施肥模式对华北平原小麦-玉米轮作体系产量及土壤硝态氮的影响[J].生态环境学报,2014,23(11):1725-1731.
Ji Yanzhi, Feng Wanzhong, Hao Xiaoran, et al. Effects of different fertilization pattern on the yield of the rotation system of wheat and maize and soil nitrate accumulation in North China Plain [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(11): 1725-1731. (in Chinese)
- 20 刘立军,桑大志,刘翠莲,等.实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J].中国农业科学,2003,36(12):1456-1461.
Liu Lijun, Sang Dazhi, Liu Cuilian, et al. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(12): 1456-1461. (in Chinese)
- 21 李荣,侯贤清,贾志宽,等.沟垄全覆盖种植方式对旱地玉米生长及水分利用效率的影响[J].生态学报,2013,33(7):2282-2291.
Li Rong, Hou Xianqing, Jia Zhikuan, et al. Effects of planting with ridge and furrow mulching on maize growth, yield and water use efficiency in dryland farming[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2282-2291. (in Chinese)
- 22 杜金哲,李文雄,胡尚连,等.春小麦不同品质类型氮的吸收、转化利用及与籽粒产量和蛋白质含量的关系[J].作物学报,2001,27(2):253-260.
Du Jinzhe, Li Wenxiong, Hu Shanglian, et al. Nitrogen assimilation, transfer and utilization in relation to grain protein content and yield of spring wheat genotypes differing in quality[J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(2): 253-260. (in Chinese)
- 23 Dobermann A, Dawe D, Rotter R P, et al. Reversal of rice yield decline in a long-term continuous cropping experiment[J]. Agronomy Journal, 2000, 92(4): 633-643.
- 24 周丽娜,雷金银.覆膜方式对坡耕地春玉米产量、土壤水分和养分的影响[J].中国农学通报,2014,30(33):20-25.
Zhou Li'na, Lei Jinyin. Effect of plastic film mulching methods on spring maize yield, soil water and nutrients in slope farmland [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(33): 20-25. (in Chinese)

- affecting factors in an arid region of Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 104: 193 – 202.
- 23 魏新光, 王铁良, 刘守阳, 等. 种植年限对黄土丘陵半干旱区山地枣树蒸腾的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 171 – 180.
Wei Xinguang, Wang Tieliang, Liu Shouyang, et al. Effect of planting years on jujube transpiration in semi-arid hilly areas of Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 171 – 180. (in Chinese)
- 24 Consoli S, Papa R. Corrected surface energy balance to measure and model the evapotranspiration of irrigated orange orchards in semi-arid Mediterranean conditions [J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(5): 1159 – 1171.
- 25 Cammalleri C, Rallo G, Agnese C, et al. Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 120: 89 – 97.
- 26 Juhász Á, Hrotkó K. Comparison of the transpiration part of two sources evapotranspiration model and the measurements of sap flow in the estimation of the transpiration of sweet cherry orchards [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 143: 142 – 150.
- 27 党宏忠, 杨文斌, 李卫, 等. 民勤绿洲二白杨树干液流的径向变化及时滞特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 9(9): 2501 – 2510.
Dang Hongzhong, Yang Wenbin, Li Wei, et al. Radial variation and time lag of sap flow of *Populus gansuensis* in Minqin Oasis, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 9(9): 2501 – 2510. (in Chinese)
- 28 Granier A, Bréda N. Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements[J]. *Annales des Sciences Forestières*, 1996, 53(2 – 3): 537 – 546.
- 29 Paudel I, Naor A, Gal Y, et al. Simulating nectarine tree transpiration and dynamic water storage from responses of leaf conductance to light and sap flow to stem water potential and vapor pressure deficit [J]. *Tree Physiology*, 2015, 35(4): 425 – 438.
- 30 Bell D M, Ward E J, Oishi A C, et al. A state-space modeling approach to estimating canopy conductance and associated uncertainties from sap flux density data [J]. *Tree Physiology*, 2015, 35(7): 792 – 802.
- 31 卫新东, 刘守阳, 陈滇豫, 等. Shuttleworth – Wallace 模型模拟陕北枣林蒸散适用性分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 142 – 151.
Wei Xindong, Liu Shouyang, Chen Dianyu, et al. Applicability of Shuttleworth – Wallace model for evapotranspiration estimation of jujube forests in loess hilly-gully region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 142 – 151. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 142 页)

- 25 宋秋华, 李凤民, 王俊, 等. 覆膜对春小麦农田微生物数量和土壤养分的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(12): 2015 – 2032.
Song Qiuhua, Li Fengmin, Wang Jun, et al. Effect of various mulching durations with plastic film on soil microbial quantity and plant nutrients of spring wheat field in semi-arid loess plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2015 – 2032. (in Chinese)
- 26 夏冬, 李洁英, 王广龙, 等. 不同覆盖方式对土壤肥力和番茄产量及品质的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1826 – 1832.
Xia Dong, Li Jieying, Wang Guanglong, et al. Effects of different mulching methods on soil fertility and the yield and quality of tomato[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7): 1826 – 1832. (in Chinese)
- 27 高亚军, 李云, 李生秀, 等. 旱地小麦不同栽培条件对土壤硝态氮残留的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 2901 – 2910.
Gao Yajun, Li Yun, Li Shengxiu, et al. Effects of different wheat cultivation methods on residual nitrate nitrogen in soil in dryland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2901 – 2910. (in Chinese)
- 28 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. *生态环境*, 2003, 12(1): 24 – 25.
Ju Xiaotang, Zhang Fusuo. Nitrate accumulation and its implication to environment in north China [J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1): 24 – 25. (in Chinese)
- 29 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 沟垄覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(2): 208 – 214.
Wang Cairong, Tian Xiaohong, Li Shengxiu. Effects of plastic sheet-mulching on ridge for rainwater-harvesting cultivation on WUE and yield of winter wheat[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2004, 37(2): 208 – 214. (in Chinese)