

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.035

覆膜和控/缓释肥互作对春玉米生长与氮素利用的影响

周翔^{1,2} 陈上^{1,2} 何川^{1,2} 徐芳^{1,2} 冯浩^{2,3} 何建强^{1,2}

(1. 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;
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 在陕西渭北旱塬地区永寿和长武试验站分别布设田间试验,研究地膜覆盖和控/缓释肥互作对玉米生长和氮素吸收利用的影响。设置了2种栽培方式(双垄沟覆膜、平作)和3种肥料类型(尿素、包膜控释肥和尿素配施双氰胺硝化抑制剂(DCD)缓释肥),共6个处理。通过对比分析不同处理春玉米叶面积指数(LAI)、干物质累积量、产量和氮素利用效率,评价不同互作方式对春玉米生长的影响。结果表明:覆膜可提高玉米产量14.0%~34.2%,减少土壤氮素的淋失,并且增加了0~40 cm土壤硝态氮含量,氮素利用效率和氮肥利用效率高于平作处理9.5%~23.7%。覆膜条件下,尿素基施处理的叶面积衰减速率分别高于包膜控释肥处理和尿素加施DCD处理42.0%~51.6%和55.4%~66.3%,开花期到成熟期干物质积累速率分别低于包膜控释肥处理和尿素加施DCD处理112.7%~155.2%和30.3%~44.7%。控/缓释肥延缓了覆膜条件下春玉米叶片的衰老速率和衰老时间,加快了玉米生育后期干物质积累速率,营养器官氮素转运量和转运效率均高于尿素基施处理4.2%~78.1%,并且氮素吸收效率和氮肥利用效率高于尿素基施处理6.6%~24.2%。因此,覆膜和控/缓释肥互作可以在一定程度上缓解覆膜条件下春玉米生长的早衰现象,促进玉米生长发育,提高氮肥利用效率,可以作为渭北旱塬春玉米增产的一项有效措施。

关键词: 春玉米; 早衰; 覆膜; 控/缓释肥; 氮素吸收利用; 渭北旱塬
中图分类号: S158; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)08-0321-10

Influences of Interactions of Plastic Film Mulching and Controlled/Slow Release Fertilizer on Growth and Nitrogen Utilization of Spring Maize

ZHOU Xiang^{1,2} CHEN Shang^{1,2} HE Chuan^{1,2} XU Fang^{1,2} FENG Hao^{2,3} HE Jianqiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to study the effects of interactions of plastic film mulching and controlled/slow release fertilizer on the growth and nitrogen utilization of spring maize, field experiments were conducted at two sites in Yongshou and Changwu on the Weibei Dryland in Shaanxi Province in 2017. The experiments included two cropping patterns (e. g. full plastic film mulching, M; flat planting, F), and three types of nitrogen fertilizer (e. g. urea fertilizer, U; control release fertilizer, CU; slow release fertilizer, SU). A total of six different treatments were involved consequently. Then the influences of different interactions on the growth of spring maize were evaluated through comparisons of leaf area index (LAI), biomass accumulation, grain yield and nitrogen utilization under different treatments. The results showed that plastic film mulching could significantly increase spring maize yield by 14.0% ~ 34.2% compared with

收稿日期: 2019-01-14 修回日期: 2019-02-14
基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTZDNY03-06)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1611)、西北农林科技大学人才专项(千人计划项目)和高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(B12007)
作者简介: 周翔(1993—),男,博士生,主要从事农业生态系统模拟研究,E-mail: zhouxiangnwf@163.com
通信作者: 何建强(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生态系统模拟研究,E-mail: jianqiang_he@nwsuaf.edu.cn

the flat planting treatment. The plastic mulching treatment increased nitrogen content in the 0 ~ 40 cm soil, reduced nitrogen leaching to deep soil layers, and increased nitrogen use efficiency by 9.5% ~ 23.7%. Under plastics film mulching, the leaf area aging rate of urea-based treatment (U) was higher than that of the coated controlled release fertilizer treatment (CU) and the urea added DCD treatment (SU) by 42.0% ~ 51.6% and 55.4% ~ 66.3%, respectively. The dry matter accumulation rate of urea-based treatment (U) from flowering to maturity was lower than that of the coated controlled release fertilizer treatment (CU) and the urea added DCD treatment (SU) by 112.7% ~ 155.2% and 30.3% ~ 44.7%, respectively. Under plastic film mulching, nitrogen transport amount and efficiency of vegetative organs of the controlled/slow release fertilizer treatment were higher than that of the urea-based treatment (U) by 4.2% ~ 78.1%, and the nitrogen absorption efficiency and nitrogen fertilizer utilization efficiency were higher than the urea treatment (U) by 6.6% ~ 24.2%. Therefore, the interactions of plastic film mulching and controlled/slow release fertilizer can alleviate premature aging of spring maize, promote the growth, and increase the efficiency of nitrogen fertilizer utilization of spring maize to some extent. Thus, the combination of plastic film mulching and controlled/slow release fertilizer can be used as an effective measure to increase corn yield in the Weibei Dryland in Shaanxi Province.

Key words: spring maize; premature aging; plastic film mulching; controlled/slow release fertilizer; nitrogen uptake and utilization; Weibei Dryland

0 引言

陕西渭北旱塬地处黄土高原南部半湿润易旱区,年降水量在 500 ~ 650 mm,降雨主要集中在 7—9 月。降水不足、早春低温、土地贫瘠是限制渭北旱塬玉米生产的重要原因^[1]。研究表明,使用地膜覆盖、制定合理的施肥制度、增加种植密度、降低无效蒸发等措施是改善玉米生产和提高水氮利用率的重要途径^[2-3]。覆膜具有明显的增温保墒效果,在早春低温和干旱半干旱地区得到了广泛推广,使得作物生产潜力得到极大发挥^[4]。但是,在覆膜条件下,传统的尿素一次性基施的施肥方式,使得玉米前期生长过快,而后期氮素供应不足,造成氮素供需错位,肥料利用率降低^[5-6]。因此,改进覆膜条件下的氮肥施用技术、提高氮肥利用率,对渭北旱塬玉米高产、高效和安全生产具有重要意义。

相关学者针对地膜覆盖条件下玉米生长和氮素利用状况进行了系统的研究。地膜覆盖和化肥有机肥交互的情况下,可以显著提高春玉米的产量^[1],增加土壤呼吸和有机氮矿化,显著增加 0 ~ 100 cm 土层的 NO_3^- -N 累积^[7-8]。但是 LI 等^[9]研究表明,生育期全程连续地膜覆盖会使作物生长前期土壤水分和养分耗竭严重,后期出现脱水脱肥现象,导致减产。在渭北旱塬地区,地膜覆盖结合传统的尿素一次性基施,使得玉米生育前期生长过快,后期土壤有效氮积累降低,出现脱氮现象,影响植株生育后期氮素的吸收和转运,从而降低氮素利用效率^[6,10]。同时,地膜覆盖条件下种植玉米,后期追肥费时费力,并且会对玉米植株产生一定程度的伤害^[11],因此后期追肥不是有效的解决方案。

近年来,控/缓释肥的研发和应用成为解决上述问题的有效途径。控/缓释肥通过包膜材料和抑制硝化反应等方法,可以有效控制氮素的释放速率,促进作物生育后期的氮素积累,促进氮素转运和分配,提高作物产量和肥料利用效率^[12]。ZHAO 等^[13]研究表明,作物对氮素吸收曲线与缓释肥的释放曲线相对应,由此得到缓释肥能很好地满足作物生长所需氮素的结论。目前,对控/缓释肥的研究大都集中在不同肥料类型、尿素与缓释肥料掺混等单因素对玉米生长、产量和氮素吸收利用的影响^[9-10,14-15]。周宝元等^[16]研究不同耕作方式下控/缓释肥对夏玉米产量以及氮素利用的影响,得出条带深松耕作下,控/缓释肥施用的作物产量和氮素利用效率最高,也由此证明种植方式能够显著影响不同类型肥料的施用效果。

控/缓释肥与覆膜、起垄等栽培方式结合,可以较好地发挥技术之间的耦合效应,使得覆膜的效应最大化^[10]。控/缓释肥可以与地膜覆盖协同调控土壤氮素供给^[17-18],改善作物氮素积累条件和干物质转移“源”——“库”过程的影响,对提高作物产量和水氮利用效率具有重要意义^[9,18-19]。

本文通过在陕西渭北旱塬地区开展不同栽培方式和氮肥施用类型条件下春玉米生长大田试验,研究地膜覆盖措施和控/缓释肥互作对玉米生长和氮素吸收利用的影响,以期进一步优化渭北旱塬地区春玉米种植的高效水肥利用方案,揭示地膜覆盖和控/缓释肥互作的增产机制。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

大田试验于 2017 年在陕西省永寿县渡马镇

(34°42'N,108°8'E,海拔 985 m)和中国科学院水利部水土保持研究所长武黄土高原农业生态试验站(35°14'N,107°41'E,海拔 1 220 m)两地进行。永寿试验站年平均气温 10.8℃,多年平均降水量 580 mm

(主要集中在 7—9 月)。长武试验站年平均气温 9.5℃,多年平均降水量为 578 mm(主要集中在 7—9 月)。两个试验站土壤初始理化性质如表 1 所示,2017 年春玉米生育期内逐日气温和降雨量如图 1 所示。

表 1 永寿和长武试验站土壤初始理化性质

Tab. 1 Initial soil properties of experimental sites in Changwu and Yongshou

站点	土壤类型	容重/ (g·cm ⁻³)	田间持水量/ (cm ³ ·cm ⁻³)	凋萎系数/ (cm ³ ·cm ⁻³)	有机碳质量比/ (g·kg ⁻¹)	pH 值	全氮质量比/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮质量比/ (g·kg ⁻¹)
永寿	黑垆土	1.35	28.06	8.92	14.97	8.38	0.90	28.71
长武	黑垆土	1.29	27.24	7.30	16.50	8.12	0.86	26.66

注:田间持水量、凋萎系数和容重为 0~100 cm 土层平均值;pH 值、有机碳、全氮、碱解氮含量为 0~20 cm 土层平均值。

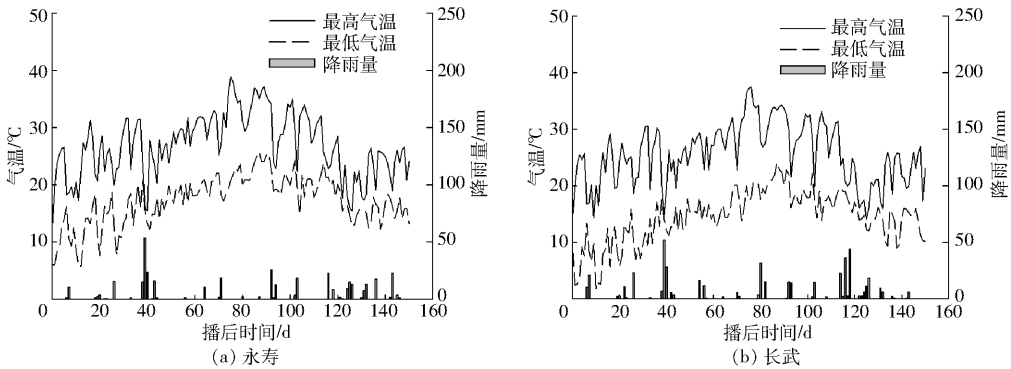


图 1 永寿和长武试验站 2017 年春玉米生育期内逐日气温和降雨量

Fig. 1 Daily temperature and precipitation during growing seasons of spring maize in Yongshou and Changwu in 2017

1.2 试验设计

两个试验站玉米种植为雨养模式,无灌溉措施。试验设置双垄沟全膜覆盖(M)和平作不覆膜(F)2种栽培方式,同时设置3种氮肥类型:尿素(U)、包膜控释肥(CU)、尿素和双氰胺硝化抑制剂(DCD)配施(SU),总体施氮水平皆为本地推荐施氮量225 kg/hm²,共6个处理,每个处理3个重复(表2)。供试玉米为“先玉335”。平作处理采用宽窄行播种方式,宽行60 cm,窄行40 cm,株距30 cm;覆膜采用双垄沟全膜栽培方式,大垄宽60 cm,小垄宽40 cm,株距30 cm,播种密度为67 000 株/hm²。

供试玉米于每年4月底播种(人工点播),9月中下旬收获。

如表2所示,试验所用的肥料为尿素(含N大于等于46%)、包膜控释肥(含N40%,史丹利公司生产,由有机高分子材料作为包膜材料对颗粒尿素进行包裹,氮素释放曲线为S型,属控释肥料,释放期为90 d)和双氰胺硝化抑制剂(用量一般是10%的施肥纯氮量,属缓释肥),磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅大于等于16%),钾肥为硫酸钾(含K₂O大于等于50%),肥料全部以一次性基施的方式施入,不设置追肥处理。

表 2 春玉米不同栽培方式和不同氮肥类型施用试验处理

Tab. 2 Treatments of different cropping patterns and types of nitrogen fertilizer in spring maize experiment

处理编号	栽培方式	氮肥类型	施肥水平/(kg·hm ⁻²)
MU	双垄沟覆膜	尿素	225(N)、150(P ₂ O ₅)、90(K ₂ O)
MCU		包膜控释肥	225(N)、150(P ₂ O ₅)、90(K ₂ O)
MSU		尿素+DCD	225(N)、150(P ₂ O ₅)、90(K ₂ O)
FU	平作不覆膜	尿素	225(N)、150(P ₂ O ₅)、90(K ₂ O)
FCU		包膜控释肥	225(N)、150(P ₂ O ₅)、90(K ₂ O)
FSU		尿素+DCD	225(N)、150(P ₂ O ₅)、90(K ₂ O)

1.3 试验测定项目和方法

1.3.1 土壤硝态氮累积量

玉米生育期内,用土钻法采集土样,每个小区随

机选取3个样点,每个土层混合采样,平作处理采样分别是0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm,而全膜双垄沟的土壤采样则先取垄上

土样(高垄 15 cm,低垄 10 cm),再取垄下 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 处土样。永寿试验站在玉米苗期(47 d)、拔节期(69 d)、开花期(85 d)、灌浆期(112 d)、收获期(150 d);长武试验站在玉米拔节期(55 d)、开花期(84 d)、灌浆期(119 d)、收获期(146 d)每个生育期采集土样一次,每次取完土样用干燥法进行土壤含水率的测定。采用 2 mol/L 氯化钾溶液浸提新鲜土样,浸提液用连续流动分析仪(AUTO Analysis-Ⅲ型,德国 Bran Luebbe 公司)测定,并根据各层土壤的容重换算成土壤硝态氮累积量^[20]

$$M=\frac{CHY}{10}$$

(1)

式中 M ——土壤硝态氮累积量,kg/hm²
 C ——土壤硝态氮质量比,mg/kg
 H ——土层深度,cm
 Y ——土壤容重,g/cm³

1.3.2 叶面积、生物量、产量和植株氮素含量

永寿试验站在玉米苗期(47 d)、拔节期(69 d)、开花期(85 d)、灌浆期(112 d)、收获期(150 d);长武试验站在玉米拔节期(55 d)、开花期(84 d)、灌浆期(119 d)、收获期(146 d)每个生育期每个小区取 3 株玉米,测量叶面积。并且在各个生育期每个小区随机取样 3 株玉米,鲜样在 105℃ 下杀青 30 min,75℃ 下干燥至质量恒定后测定干物质量。植株样品粉碎后,过 1 mm 筛,采用 H₂SO₄-H₂O₂法消煮,凯氏定氮法测定茎秆和籽粒氮素含量。在玉米成熟期各小区随机选取 10 株玉米风干脱粒测定籽粒的总质量,最终折算成含水率 14% 的产量,并折算成公顷产量。

1.3.3 氮素吸收、转运及利用效率相关指标

春玉米生产过程中氮素吸收、转运和利用效率相关的指标定义如下^[21]:

植株氮素吸收量(kg/hm²)为植株氮素含量与

干物质量的乘积,营养器官氮素转移量(kg/hm²)为开花期营养器官氮素吸收量与成熟期营养器官氮素吸收量的差值,开花期后氮素吸收量(kg/hm²)为成熟期氮素吸收总量与开花期营养器官氮素吸收量的差值。

营养器官氮素转移率(%)为营养器官氮素转移量与开花期营养器官氮素吸收量比值的百分数,氮素吸收效率(kg/kg)为植株氮素累积量与施氮量的比值,氮素利用效率(kg/kg)为籽粒产量与植株氮素累积量的比值,氮肥利用效率(kg/kg)为籽粒产量与施氮量的比值,氮素收获指数为籽粒氮素吸收量与植株氮素吸收量的比值。

1.4 数据统计分析

试验数据采用 Excel 2010 进行整理汇总,使用 SPSS 19.0 对栽培方式和肥料类型两个因素进行显著性方差分析(LSD, $P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 覆膜和控/缓释肥互作对叶面积指数的影响

随着生育期进程的推进,春玉米叶面积指数(LAI)呈现先增大后减小的趋势(图 2)。生育前期,M 处理叶面积指数高于 F 处理 38.4%~240.4%,有显著性差异($P<0.01$),覆膜可以较好地促进玉米生育前期叶面积生长。两个试验站 6 个处理 LAI 的峰值没有显著性差异($P>0.05$),但是叶面积衰减速率有显著性差异($P<0.05$)。MU 处理叶面积指数比其他 5 个处理提前产生衰减。永寿试验站,M 处理条件下,U 处理 LAI 衰减速率高于 CU 处理和 SU 处理 42.0%~51.6% 和 55.4%~66.3%,U 处理与 CU 和 SU 处理有显著性差异($P<0.05$),控/缓释肥有效地减缓了 LAI 的衰减速率(图 2a)。但在长武试验站,M 处理条件下,不同肥料类型的叶面积衰减速率没有显著性差异($P>0.05$),但是与尿素基施相比控/缓释肥延缓了叶面

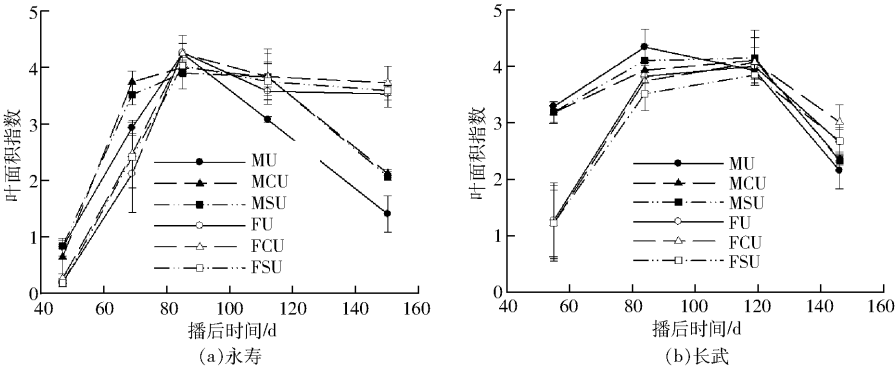


图2 永寿和长武试验站不同栽培方式和氮肥类型处理对玉米叶面积指数的影响

Fig.2 Effects of different cropping patterns and types of nitrogen fertilizer on leaf area index of spring maize in Yongshou and Changwu

积衰减的时间,并且长武试验站玉米收获期的 LAI 在 2.2 ~ 3.0 之间,保持较高的数值。F 处理条件下,U 处理叶面积指数衰减速率比 CU 处理快 27.2% ~ 42.0%,比 SU 处理快 15.1% ~ 66.3%,F 处理条件下 U 处理叶面积指数衰减速率显著快于 CU 处理和 SU 处理($P < 0.05$) (图 2b)。

2.2 覆膜和控/缓释肥互作对春玉米干物质累积的影响

全生育期 M 处理干物质累积量与 F 处理相比有显著的提高($P < 0.01$) (图 3)。在全生育期 M 处理干物质累积量比 F 处理高 77.8% ~ 200.0%。M 处理条件下,成熟期 CU 处理干物质累积量高于 U 处理 10.7% ~ 19.7%;成熟期 SU 处理干物质累积量高于 U 处理 3.1% ~ 6.1%。控/缓释肥基施和尿素基施相比显著提高了成熟期玉米的干物质累积量,且 SU 处理比 CU 处理更显著。M 处理条件下,

开花期到成熟期 CU 处理干物质累积速率高于 U 处理 112.7% ~ 155.2%;开花期到成熟期 SU 处理干物质累积速率高于 U 处理 30.3% ~ 44.7%,U 处理开花期到成熟期干物质累积速率显著低于 SU 和 CU 处理($P < 0.05$)。开花期及之前,控/缓释肥基施处理干物质累积量低于尿素基施处理,因此控/缓释肥基施对开花期到成熟期干物质累积速率有显著促进作用。

如图 3 所示,F 处理条件下,除了永寿试验站 CU 处理成熟期干物质累积量高于 U 处理 15.8% ($P < 0.05$),其他肥料类型对干物质累积量的影响有差异但是并不显著($P > 0.05$),F 处理条件下,CU 处理干物质累积量比 SU 处理高。F 处理条件下,CU 和 SU 处理干物质累积速率高于 U 处理 5.3% ~ 19.2%,控/缓释肥基施对开花期到成熟期干物质累积速率有促进作用,但是并不显著($P > 0.05$)。

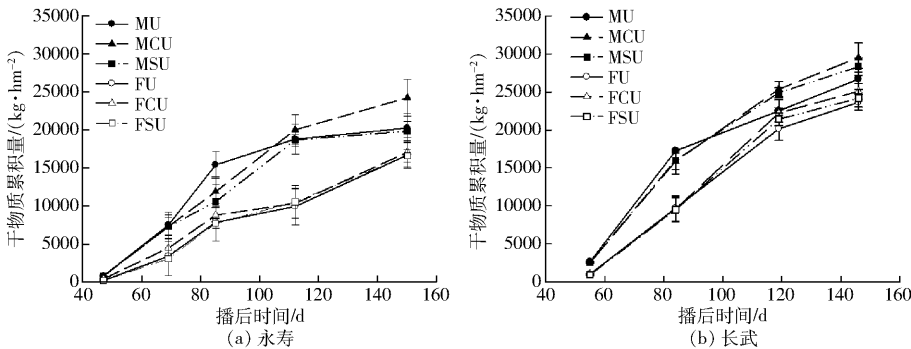


图 3 永寿和长武试验站不同栽培方式和氮肥类型处理对地上部干物质累积量的影响
Fig. 3 Effects of different cropping patterns and types of nitrogen fertilizer on dry biomass accumulation of maize in Yongshou and Changwu

2.3 覆膜和控/缓释肥互作对产量的影响

相同栽培方式下,U 处理产量与 CU 处理和 SU 处理有显著性差异(图 4,图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)).相同肥料类型条件下,M 处理产量高出 F 处理 40.0% ~ 64.8%。永寿试

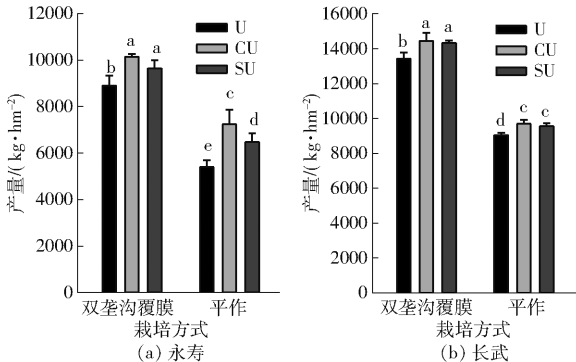


图 4 永寿和长武试验站不同栽培方式和氮肥类型处理对玉米产量的影响

验站相同栽培方式,CU 处理产量高出 U 处理 14.0% ~ 34.2%,长武试验站为 7.0% ~ 8.5%;SU 处理产量高出 U 处理 8.5% ~ 19.9%,长武试验站为 5.6% ~ 6.6%。其中无论是 M 处理还是 F 处理条件下,CU 处理产量都最高,SU 处理次之,且两种肥料类型在 M 处理产量增长率更高,即 M 处理条件下,控/缓释肥对产量的提升作用更显著。

2.4 覆膜和控/缓释肥互作对开花期前后氮素累积及转运的影响

栽培方式相同的情况下,CU 和 SU 处理营养器官向籽粒转运量和转运效率高于 U 处理 4.2% ~ 78.1%,CU 和 SU 处理与 U 处理相比提高了营养器官向籽粒氮素转运量和转运效率(表 3)。MCU 和 MSU 处理营养器官氮素转运量和转运效率最高。M 处理条件下,控/缓释肥处理高于尿素处理开花期后氮素吸收量 43.6% ~ 54.7%。控/缓释肥显著增加了玉米生育后期氮素吸收量。相同肥料类型处理下,M 处理开花期后氮素吸收量大于 F 处理 12.3% ~ 185.5%。相同肥料类型处理下,M 处理营养器官氮

Fig. 4 Effects of different cropping patterns and types of nitrogen fertilizer on grain yield of spring maize in Yongshou and Changwu

素转运量和转运效率大于 F 处理 21.7% ~ 217.7%。覆膜显著提高营养器官氮素转运量、转运效率和开花期后氮素吸收量。由此可见,控/缓释肥和覆膜都有利于开花期后氮素吸收和营养器官氮素向籽粒转移。

表 3 永寿和长武试验站不同栽培方式和不同氮肥类型处理对玉米开花期前后氮素累积和转运的影响

Tab.3 Effects of different cropping patterns and different types of nitrogen fertilizer on pre- and post-flowering N accumulation and remobilization of spring maize in Yongshou and Changwu

站点	处理	开花期营养	开花期后氮	营养器官	氮素转
		器官含氮量/ (kg·hm ⁻²)	素吸收量/ (kg·hm ⁻²)	氮素转运量/ (kg·hm ⁻²)	运效率/ %
永寿	MU	97.66 ^c	24.33 ^b	39.81 ^b	45.43 ^c
	MCU	110.39 ^{ab}	37.44 ^a	55.96 ^a	50.65 ^b
	MSU	99.05 ^c	39.42 ^a	56.41 ^a	56.88 ^a
	FU	104.74 ^{bc}	16.55 ^{bc}	14.94 ^d	14.30 ^e
	FCU	116.99 ^a	15.93 ^c	26.60 ^c	22.71 ^d
	FSU	105.21 ^{bc}	14.31 ^c	25.79 ^c	24.49 ^d
长武	MU	99.88 ^c	32.02 ^b	69.32 ^a	69.37 ^a
	MCU	103.66 ^{bc}	47.19 ^a	72.26 ^a	69.76 ^a
	MSU	111.44 ^b	45.99 ^a	75.09 ^a	67.41 ^a
	FU	105.74 ^{bc}	28.51 ^b	41.62 ^d	39.37 ^c
	FCU	107.73 ^{bc}	16.54 ^c	54.10 ^c	50.23 ^b
	FSU	119.63 ^a	18.60 ^c	61.71 ^b	51.61 ^b

注:表中数值为平均值($n=3$),同列不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

2.5 玉米收获期土壤硝态氮分布和累积

双垄沟覆膜条件下,由于玉米种植是先施肥再起垄,导致大量的肥料堆积到垄上,并且覆膜显著增加了有机氮的矿化^[22-23],使垄上的硝态氮累积量很高(图5)。在 M 处理条件下,U 处理垄上土层氮素累积量高于 CU 和 SU 处理 44.2% ~ 106.4%,U 处理显著高于 CU 和 SU 处理($P<0.05$)。控/缓释肥可以有效缓解覆膜条件下土壤氮素在表面“集聚”,并且垄上的氮素很难被玉米直接吸收利用。如图6所示,相同肥料类型情况下,M 处理条件下,0~40 cm 土层的硝态氮含量所占 0~100 cm 土层硝态氮含量比例高于 F 处理 7.0% ~ 303.5%,有显著性差异($P<0.05$)。覆膜能够增加 0~40 cm 土层氮素所占的比例,减少土壤氮素向更深土层淋失,显著提高氮素利用效率和氮肥利用效率。

相同栽培条件下,U 处理收获期土壤氮素累积量高于 CU 和 SU 处理 33.9% ~ 100.0%,U 处理收获期土壤氮素累积量显著高于 CU 和 SU 处理($P<0.05$),说明控/释肥有利于作物吸收氮素,从而减少土壤中硝态氮残留^[14]。而且 CU 和 SU 处理与 U

处理相比,U 处理的累积峰已经下移,说明控/缓释肥可以有效减缓硝态氮随下渗水的运移速度,并且使更多的土壤硝态氮留在 0~40 cm 的土壤根层,提高氮素吸收效率,降低其对深层地下水的污染潜势^[23-25]。

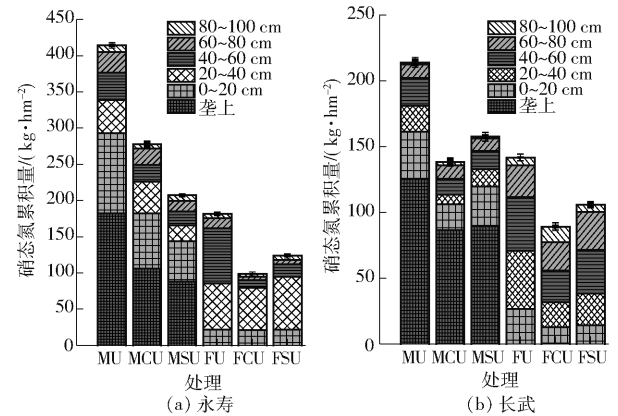


图 5 永寿和长武试验站不同栽培方式和氮肥类型处理对玉米收获期垄上和 0~100 cm 土层硝态氮累积量的影响

Fig.5 Effects of different cropping patterns and types of nitrogen fertilizer on NO₃⁻-N accumulation amount at ridge and 0~100 cm soil layer during post-harvest period of spring maize in Yongshou and Changwu

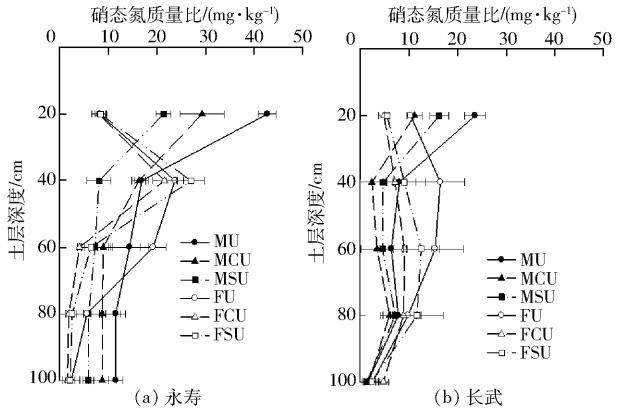


图 6 永寿和长武试验站不同栽培方式和氮肥类型处理对玉米收获期 0~100 cm 土层硝态氮分布的影响

Fig.6 Effects of different cropping patterns and types of nitrogen fertilizer on distribution of NO₃⁻-N in 0~100 cm soil layer during post-harvest period of spring maize in Yongshou and Changwu

2.6 覆膜和控/缓释肥互作对氮肥利用效率的影响

M 处理条件下,CU 和 SU 处理成熟期氮素积累量高于 U 处理 9.5% ~ 23.7%,而在 F 处理条件下,CU 和 SU 处理成熟期氮素积累量与 U 处理相比没有显著差异(表4)。地膜覆盖条件下,控/缓释肥显著提高氮素累积量,与干物质累积量有相同趋势。M 处理条件下,CU 和 SU 处理氮素吸收效率和氮肥利用效率高于 U 处理 6.6% ~ 24.2%,CU 和 SU 处理氮素吸收效率和氮肥利用效率与 U 处理相比有显著提高。相同栽培方式条件下,不同肥料类型氮

收获指数没有显著差异。F 处理条件下,CU 和 SU 处理氮素利用效率和氮肥利用效率高于 U 处理 5.6% ~ 54.0%。相同肥料类型条件下,除了永寿试验站 U 处理,M 处理各种氮素吸收利用指标高于 F 处理 5.1% ~ 51.6%。双垄沟覆膜与平作处理相比对各种氮素吸收利用指标都有显著提高。

表 4 永寿和长武试验站不同栽培方式和氮肥类型处理对玉米氮素吸收利用的影响

Tab.4 Effects of different cropping patterns and different types of nitrogen fertilizer on nitrogen uptake and use efficiency of spring maize in Yongshou and Changwu						
站点	处理	成熟期氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)	氮素吸收效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮素利用效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥利用效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮收获指数
永寿	MU	145.83 ^c	0.66 ^e	59.51 ^a	39.55 ^b	0.68 ^b
	MCU	180.35 ^a	0.82 ^a	54.75 ^b	45.08 ^a	0.71 ^b
	MSU	172.27 ^b	0.77 ^d	56.02 ^a	42.90 ^a	0.75 ^a
	FU	169.56 ^{bc}	0.73 ^{bc}	28.79 ^d	20.91 ^e	0.45 ^d
	FCU	177.76 ^{ab}	0.75 ^{ab}	42.75 ^c	32.19 ^c	0.47 ^{cd}
	FSU	165.61 ^{cd}	0.71 ^{cd}	40.74 ^c	28.77 ^d	0.50 ^c
长武	MU	177.48 ^b	0.79 ^b	75.69 ^a	59.69 ^b	0.83 ^a
	MCU	194.37 ^a	0.87 ^a	74.32 ^a	64.19 ^a	0.84 ^a
	MSU	198.60 ^a	0.88 ^a	72.23 ^a	63.65 ^a	0.82 ^a
	FU	169.59 ^{bc}	0.75 ^{bc}	53.42 ^c	40.23 ^d	0.62 ^c
	FCU	159.00 ^d	0.71 ^d	60.96 ^b	43.06 ^c	0.66 ^b
	FSU	160.44 ^{cd}	0.71 ^{cd}	59.58 ^b	42.50 ^c	0.64 ^{bc}

3 讨论

3.1 覆膜和控/缓释肥互作对春玉米生长和产量的影响

控/缓释肥的作用在于缓慢释放养分,使得整个生育期土壤中有足够的养分,增大玉米生育后期叶面积指数及光合生产能力^[26]。本研究中,覆膜条件下,CU 和 SU 处理与 U 处理相比,生育后期的叶面积衰减速率明显放缓,干物质积累速率也有所提升。M 处理条件下,尿素一次性基施使得玉米前期生长速率过快,后期土壤有效氮含量降低,出现后期脱肥现象,影响植株后期氮素吸收和向籽粒的转运,从而降低了玉米氮肥利用率^[27]。本研究发现覆膜可显著提高玉米的生物量和产量,其原因是控/缓释肥导致氮素后移,保证土壤氮素的供应,有效协调生育后期氮素,增大了开花期以后叶片净光合速率和蒸腾速率,促进光合同化物向籽粒进行转移^[26,28-29]。本研究中玉米收获时,控/缓释肥处理下玉米叶面积指数还保持较高数值,籽粒还处于灌浆阶段,可以将玉米收获期适当延后,更好地发挥控/缓释肥对玉米产量和干物质积累的促进作用。

3.2 覆膜和控/缓释肥互作对玉米氮素转运和利用的影响

作物氮素的吸收和转运是植株利用氮素的主要形式,明确作物氮素吸收转运的动态过程是提高氮肥利用效率的关键^[28,30]。氮肥后移较传统一次性基施能延迟玉米植株氮素累积活跃的时间,使玉米

代谢酶活性保持较高水平^[28],并且能显著提高玉米植株氮素积累量,尤其是玉米生育后期的氮素积累量^[31]。前人研究表明,控/缓释氮肥在对作物生长和产量方面与氮素后移相比有接近或显著增加的效果^[32]。覆膜条件下,控/缓释肥处理成熟期植株含氮量较尿素基施处理提高 9.5% ~ 23.7%,且开花期后氮素吸收量控/缓释肥处理高于尿素基施 43.6% ~ 54.7%。本研究中相同栽培方式下,不同肥料类型的氮收获指数没有显著性差异,氮收获指数是籽粒氮素吸收量和植株氮素吸收量的比值,因为不同肥料类型的施氮量相同,即使尿素基施条件下玉米出现氮素亏缺的情况,植株吸收到的土壤中氮素会优先满足籽粒的氮素积累^[33]。

控/缓释肥处理既保持了较高的碳、氮运转率,又避免生育后期叶片早衰,从而维持了生长中后期叶片的高光合能力,为产量与氮肥利用效率提高奠定了基础^[34-35]。本研究中,相同种植条件下,CU 和 SU 处理营养器官向籽粒转运量和转运效率高于 U 处理 4.2% ~ 78.1%,但是丁民伟等^[36]研究表明,施氮量是植株氮素累积量的决定因素,花粒期追肥导致营养器官氮素转运量显著降低。这也说明,在光照和降雨充足的地区,控/缓释肥氮素后移效应可能不再显著,在本研究中已经得到一部分验证,2017 年永寿和长武试验站玉米生育期降雨量为 381.6 mm 和 481.3 mm,控/缓释肥的效应使永寿试验站的各个指标的响应程度明显高于长武试验站。

3.3 覆膜和控缓释肥互作对土壤氮素残留的影响

因为控/缓释肥本身缓慢释放氮素,相比一次性基施尿素降低了向深层次淋溶的风险^[37],能够更多地让作物吸收,因此收获后缓释肥处理土壤硝态氮累积明显低于尿素处理^[26],本研究结果表明,成熟期 CU 和 SU 处理垄上和 0 ~ 100 cm 硝态氮累积量明显低于 U 处理。说明控/缓释肥有利于作物对土壤氮素的吸收,显著提高了玉米生育期的氮素吸收效率^[38],减少了土壤硝态氮的残留和土壤硝态氮的无效损失^[26,39]。但是邵蕾等^[40]研究指出,控/缓释肥表层的氮素残留量显著增加,增加幅度为 6.4% ~ 20.9%,可能是因为区域气候、栽培方式和施肥量不同对氮素残留的规律不同。

4 结论

(1)耕作方式上,与平作不覆膜相比,覆膜促进春玉米生育前期叶片生长,显著提高地上部生物量和产量。覆膜处理下玉米各种氮素吸收利用指标都

有显著提高,且形成土壤表面氮素“集聚”,0 ~ 40 cm土层土壤氮素含量在 0 ~ 100 cm 土层占比增加。

(2)与控/缓释肥处理相比,尿素基施处理的春玉米生育前期生长较快,其中覆膜条件下尿素基施处理土壤氮素消耗加剧,生育后期出现一定程度的脱氮,干物质积累速率显著低于其他 5 个处理,植株衰老提前。

(3)覆膜条件下,控/缓释肥有效减缓叶面积衰减速率和衰减时间,提高渭北旱塬春玉米产量和生育后期干物质积累速率。与尿素基施相比,控/缓释肥显著提高玉米生育后期氮素转运和吸收,覆膜和控/缓释肥互作有效地缓解了覆膜尿素基施处理的脱氮现象。

(4)控/缓释肥显著促进玉米植株氮素的吸收和利用,减少土壤中硝态氮残留,降低其对深层地下水的污染,缓解覆膜尿素基施处理土壤氮素的表面“集聚”现象。

参 考 文 献

[1] 司政邦,李军,周婷婷. 耕作与施肥模式对渭北旱塬春玉米土壤肥力和产量的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(1): 25-33.
SI Zhengbang, LI Jun, ZHOU Tingting. Effects of tillage practices and fertilization patterns on soil nutrients dynamics and yield performance of spring maize in Weibei Highland[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2016, 25(1): 25-33. (in Chinese)

[2] 薛吉全,张仁和,马国胜,等. 种植密度、氮肥和水分胁迫对玉米产量形成的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(6): 1022-1029.
XUE Jiquan, ZHANG Renhe, MA Guosheng, et al. Effects of plant density, nitrogen application, and water stress on yield formation of maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(6): 1022-1029. (in Chinese)

[3] 山仑,陈国良. 黄土高原旱地农业的理论与实践[M]. 北京:科学出版社,1993.

[4] 冯浩,刘匡,余坤,等. 不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 192-201.
FENG Hao, LIU Xia, YU Kun, et al. Effects of different mulching patterns on soil moisture, soil temperature and summer maize growth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 192-201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161224&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.024. (in Chinese)

[5] MENG F Q, CHEN X P, ZHANG F S, et al. In-season root-zone nitrogen management strategies for improving nitrogen use efficiency in high-yielding maize production in China[J]. Pedosphere, 2012, 22(3): 294-303.

[6] 王寅,冯国忠,张天山,等. 控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 518-528.
WANG Yin, FENG Guozhong, ZHANG Tianshan, et al. Effects of mixed application of controlled-release N fertilizer and common urea on grain yield, N uptake and soil N balance in continuous spring maize production[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(3): 518-528. (in Chinese)

[7] 李世清,李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 240-242.
LI Shiqing, LI Shengxiu. Leaching loss of nitrate from semiarid area agroecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2): 240-242. (in Chinese)

[8] 李世清,李生秀,邵明安,等. 半干旱农田生态系统长期施肥对土壤有机氮组分和微生物体氮的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(6): 859-864.
LI Shiqing, LI Shengxiu, SHAO Ming'an, et al. Effects of long-term application of fertilizers on soil organic nitrogen components and microbial biomass nitrogen in semiarid farmland ecological system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(6): 859-864. (in Chinese)

[9] LI F M, GUO A H, WEI H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat[J]. Field Crops Research, 1999, 63(1): 79-86.

[10] 赵欢,唐兵,张萌,等. 缓释肥减量施用对覆膜栽培玉米产量与养分吸收及利用率的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(12): 2877-2882.
ZHAO Huan, TANG Bing, ZHANG Meng, et al. Effects of reducing slow-release fertilizer application amount on corn yield

- and nutrient absorption rate under film-mulching pattern[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(12):2877–2882. (in Chinese)
- [11] 王宜伦, 李潮海, 王瑾, 等. 缓/控释肥在玉米生产中的应用与展望[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 254–257. WANG Yilun, LI Chaohai, WANG Jin, et al. Application and prospect of slow/controlled release fertilizers in maize production[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(24): 254–257. (in Chinese)
- [12] ZHAI J H, GAO Y J, ZHOU J B. The review of controlled/slow release fertilizer[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20: 45–48.
- [13] ZHAO Z, VERBURG K, HUTH N. Modelling sugarcane nitrogen uptake patterns to inform design of controlled release fertiliser for synchrony of N supply and demand[J]. Field Crops Research, 2017, 213: 51–64.
- [14] 郭金金, 张富仓, 王海东, 等. 不同施氮量下缓释氮肥与尿素掺混对玉米生长与氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(20): 3930–3943. GUO Jinjin, ZHANG Fucang, WANG Haidong, et al. Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on maize growth and nitrogen uptake under different nitrogen application rates[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(20): 3930–3943. (in Chinese)
- [15] JI Jinghong, LI Yuying, LIU Shuangquan, et al. Effects of controlled-release urea on grain yield of spring maize, nitrogen use efficiency and nitrogen balance[J]. Journal of Agricultural Resources & Environment, 2017, 34(2):153–160.
- [16] 周宝元, 王新兵, 王志敏, 等. 不同耕作方式下缓释肥对夏玉米产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 821–829. ZHOU Baoyuan, WANG Xinbing, WANG Zhimin, et al. Effect of slow-release fertilizer and tillage practice on grain yield and nitrogen efficiency of summer maize (*Z. mays* L.) [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(3): 821–829. (in Chinese)
- [17] 范亚宁, 李世清, 李生秀. 半湿润地区农田夏玉米氮肥利用率及土壤硝态氮动态变化[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 799–806. FAN Yaning, LI Shiqing, LI Shengxiu. Utilization rate of fertilizer N and dynamics changes of soil NO_3^- -N in summer maize field in semi-humid area of northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4): 799–806. (in Chinese)
- [18] 朱晓霞, 刘兆辉, 江丽华, 等. 控释肥减施对冬小麦产量、氮效率及土壤剖面硝态氮的影响[J]. 山东农业科学, 2012, 44(3): 63–67. ZHU Xiaoxia, LIU Zhaohui, JIANG Lihua, et al. Effects of decreasing application amount of control-released fertilizer on winter wheat yield, nitrogen efficiency and NO_3^- -N in soil[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2012, 44(3): 63–67. (in Chinese)
- [19] 易镇邪, 王璞, 张红芳, 等. 氮肥类型与施用量对华北平原夏玉米源库关系的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 14–20. YI Zhenxie, WANG Pu, ZHANG Hongfang, et al. Effects of type and application rate of nitrogen fertilizer on source-sink relationship in summer maize in North China Plain[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2006, 12(3): 14–20. (in Chinese)
- [20] 马忠明, 孙景玲. 施氮量对间作玉米土壤硝态氮累积量及氮肥利用率的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(9): 1305–1310. MA Zhongming, SUN Jingling. Effects of nitrogen rates on NO_3^- -N accumulation and nitrogen use efficiency under maize and wheat inter cropped system[J]. Journal of Nuclear Agriculture Science, 2012, 26(9): 1305–1310. (in Chinese)
- [21] MOLL R H, KAMPRATH E J, JACKSON W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization[J]. Agronomy Journal, 1962, 74(3): 562–564.
- [22] 李世清, 李东方, 李凤民, 等. 半干旱农田生态系统地膜覆盖的土壤生态效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 25–33. LI Shiqing, LI Dongfang, LI Fengmin, et al. Soil ecological effects of plastic film mulching in semiarid agro-ecological system [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2003, 31(5): 25–33. (in Chinese)
- [23] 蒋锐, 郭升, 马德帝. 旱地雨养农业覆膜体系及其土壤生态环境效应[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 317–328. JIANG Rui, GUO Sheng, MA Dedi. Review of plastic film mulching system and its impact on soil ecological environment in Chinese rainfed drylands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(3):317–328. (in Chinese)
- [24] 葛均筑, 徐莹, 袁国印, 等. 覆膜对长江中游春玉米氮肥利用效率及土壤速效氮素的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 296–306. GE Junzhu, XU Ying, YUAN Guoyin, et al. Effects of film mulching on nitrogen use efficiency of spring maize and soil available nitrogen variations in the middle reaches of Yangtze River[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(2): 296–306. (in Chinese)
- [25] 王伟, 于兴修, 汉强, 等. 丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4212–4219. WANG Wei, YU Xingxiu, HAN Qiang, et al. Change of soil nitrogen leaching with summer maize growing periods under plastic film mulched cultivation in Danjiangkou reservoir area, China[J]. Environmental Science, 2016, 37(11): 4212–4219. (in Chinese)
- [26] 胡娟, 吴景贵, 孙继梅, 等. 氮肥减量与缓控肥配施对土壤供氮特征及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 116–120. HU Juan, WU Jinggui, SUN Jimei, et al. Effects of reduced nitrogen fertilization and its combined application with slow and

- controlled release fertilizer on soil nitrogen characteristics and yield of maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 116–120. (in Chinese)
- [27] 李强, 王朝辉, 李富翠, 等. 氮肥管理与地膜覆盖对旱地冬小麦产量和氮素利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(1): 93–100.
- LI Qiang, WANG Zhaohui, LI Fucui, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on yield and nitrogen use efficiency in winter wheat growing on dryland with plastic film mulching[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2014, 40(1): 93–100. (in Chinese)
- [28] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮时期对高产夏玉米氮代谢关键酶活性及抗氧化特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1591–1598.
- LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al. Effects of nitrogen application period on the nitrogen metabolism key enzymes activities and antioxidant characteristics of high-yielding summer maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1591–1598. (in Chinese)
- [29] CHADDY P A, HARUNA A O, NIK M A M, et al. Effect of k-n-humates on dry matter production and nutrient use efficiency of maize in Sarawak, Malaysia[J]. *The Scientific World Journal*, 2010, 10:1282–1292.
- [30] ZOTARELLI L, SCHOLBERG J M, DUKES M D, et al. Fertilizer residence time affects nitrogen uptake efficiency and growth of sweet corn[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(3): 1271.
- [31] 李鹏, 姜巍. 缓控释肥料对玉米产量的影响[J]. *现代化农业*, 2013(2): 24–25.
- LI Peng, JIANG Wei. Effect of slow and controlled release fertilizer on maize yield[J]. *Modernizing Agriculture*, 2013(2): 24–25. (in Chinese)
- [32] 李宗新, 王庆成, 刘霞, 等. 控释肥对夏玉米的应用效应研究[J]. *玉米科学*, 2007, 15(6): 89–92.
- LI Zongxin, WANG Qingcheng, LIU Xia, et al. Studies of applying effect of controlled-release fertilizer on summer maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(6): 89–92. (in Chinese)
- [33] 高磊, 李余良, 李武, 等. 不同施氮水平对南方甜玉米氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1215–1224.
- GAO Lei, LI Yuliang, LI Wu, et al. Effects of nitrogen application on yields and nitrogen use efficiencies of sweet corn in south China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1215–1224. (in Chinese)
- [34] 武文明, 陈洪俭, 王世济, 等. 氮肥运筹对苗期受渍夏玉米干物质和氮素积累与转运的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(8): 1246–1256.
- WU Wenming, CHEN Hongjian, WANG Shiji, et al. Effects of nitrogen fertilization application regime on dry matter, nitrogen accumulation and transportation in summer maize under waterlogging at the seedling stage[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2015, 41(8): 1246–1256. (in Chinese)
- [35] 赵欢, 张萌, 秦松, 等. 缓释肥减量施用对覆膜栽培玉米生物性状、干物质积累与养分分配的影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(1): 139–146.
- ZHAO Huan, ZHANG Meng, QIN Song, et al. Effects of controlled release fertilizer reduction in plastic mulching on biological characteristics, dry matter accumulation and distribution of nutrient content of maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(1): 139–146. (in Chinese)
- [36] 丁民伟, 杜雄, 刘梦星, 等. 氮素运筹对夏玉米产量形成与氮素利用效果的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1100–1107.
- DING Minwei, DU Xiong, LIU Mengxing, et al. Effects of nitrogen management modes on yield formation and nitrogen utilization efficiency of summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2010, 16(5): 1100–1107. (in Chinese)
- [37] 张务帅, 陈宝成, 李成亮, 等. 控释氮肥控释钾肥不同配比对小麦生长及土壤肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 178–183.
- ZHANG Wushuai, CHEN Baocheng, LI Chengliang, et al. Effects of different proportion of controlled release nitrogen and potassium fertilizers on wheat growth and soil fertility[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 178–183. (in Chinese)
- [38] 李雨繁, 贾可, 王金艳, 等. 不同类型高氮复混(合)肥氮挥发特性及其对氮素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 615–623.
- LI Yufan, JIA Ke, WANG Jinyan, et al. Ammonia volatilization characteristics of different kinds of high-nitrogen compound fertilizers and their effects on nitrogen balance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(3): 615–623. (in Chinese)
- [39] WANG Yilun, WANG Qun, HAN Dan, et al. Effects of postponing N application on metabolism, absorption and utilization of nitrogen of summer maize in super high yield region[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2013, 14(1): 131–134.
- [40] 邵蕾, 张民, 王丽霞. 不同控释肥类型及施肥方式对肥料利用率和氮素平衡的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 115–119.
- SHAO Lei, ZHANG Min, WANG Lixia. Effects of different control ledrelease fertilizers and different applying methods on fertilizer use efficiency and nitrogen balance[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 115–119. (in Chinese)