

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.014

东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响*

刘 洋^{1,2} 栗岩峰² 李久生² 严海军¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为从农田土壤水、热循环角度揭示玉米膜下滴灌节水增产机理,于2011—2013年在东北半湿润区开展了玉米田间试验,对膜下滴灌、不覆膜滴灌和地面灌玉米田进行了土壤温度、含水率、田间小气候、作物生长、养分积累及产量的观测和分析。结果表明:与不覆膜滴灌和地面灌相比,膜下滴灌提高了玉米生育前期的土壤温度,苗期5~25 cm的日均土壤温度增加2.3℃,土壤积温增加87℃;整个生育期土壤积温增加115~150℃。覆膜减少了土壤蒸发,膜下滴灌玉米生育期的土壤蒸发量比不覆膜滴灌降低53%,提高了玉米生育前期的土壤含水率。膜下滴灌提高了典型日的冠层空气温度并降低了冠层空气湿度,可能导致作物蒸腾量的增加。膜下滴灌明显增加了玉米生育前期的氮素吸收量,促进了玉米的营养生长,为生育后期的生殖生长积累了更多的营养物质,成熟期的地上部分干物质质量分别比不覆膜滴灌和地面灌增加14%和23%,氮素吸收量分别增加16%和28%。膜下滴灌营造了有利于玉米生长的土壤水、热环境,平均产量分别比不覆膜滴灌和地面灌处理提高11%和21%,水分利用效率分别提高9%和18%。

关键词: 土壤温度 玉米 生长 产量 膜下滴灌 东北半湿润区

中图分类号: S275.6; S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0093-12

Effects of Mulched Drip Irrigation on Water and Heat Conditions in Field and Maize Yield in Sub-humid Region of Northeast China

Liu Yang^{1,2} Li Yanfeng² Li Jiusheng² Yan Haijun¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Maize is one of the main grain crops in Northeast China. Droughts are often accompanied by low temperatures during seedling stage in the region, which often harmfully affect the establishment of the seedling. Drip irrigation under plastic film mulch is an alternative that has been applied to maize production in Northeast China in recent years for supplying complementary irrigation and increasing accumulated temperature. For better understanding of the effects of mulched drip irrigation on water and heat conditions in field and maize yield in sub-humid regions, field experiments were carried out in the sub-humid environment of Heilongjiang Province, China, during the growing seasons of maize in 2011, 2012 and 2013. In the experiments, three treatments, including mulched drip irrigation, non-mulched drip irrigation and surface irrigation were tested. The daily soil temperature was recorded manually at 08:00, 14:00, and 18:00 at 5 cm intervals within the 5~25 cm profile by geothermometers in 2012 and 2013. In addition, high-revolution soil water-heat-salt automatic systems (ECH₂O) were used to continuously monitor soil water content and temperature at fixed locations of the mulched and non-

收稿日期: 2015-02-04 修回日期: 2015-03-10

* 国家自然科学基金资助项目(51479211)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD08B02)

作者简介: 刘洋, 博士生, 主要从事节水灌溉理论及技术研究, E-mail: liuyang. ailove@163.com

通讯作者: 李久生, 研究员, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论及技术研究, E-mail: jiushengli@126.com

mulched drip irrigation treatments within the 20 ~ 80 cm profile in 2013. Micro-lysimeters (MLS) with inner diameter of 10 cm and height of 15 cm were fabricated to measure evaporation from the soil surface during the growing season of 2013. Additionally, air temperature and humidity in canopy were measured using a Kestrel 4 000 pocket weather station during selected typical days. Plant height, leaf area index (LAI), aboveground dry matter, and nitrogen uptake were also measured during the seedling, jointing, tasseling, filling, and physiological maturity stages of maize. The results indicated that mulched drip irrigation increased the daily temperature at 5 ~ 25 cm soil depth by 2.3℃ compared with that of the non-mulched treatments. Accordingly, the accumulated soil temperature for the mulched drip irrigation treatment was about 87℃ higher than that for the non-mulched treatments during the seedling stage, which led to the highest increment of accumulated soil temperature during the whole growing season (115 ~ 150℃). Furthermore, the daily evaporation rate from the soil surface for the mulched drip irrigation treatment (0.7 mm/d) was 53% lower than that for the non-mulched drip irrigation treatment (1.5 mm/d), resulting in a higher water content in topsoil layer during the early growing season. Compared with the non-mulched drip irrigation treatment, the mulched drip irrigation produced a higher air temperature and lower air humidity in canopy at sunny days of the jointing stage, implying a greater transpiration rate for the mulched drip irrigation treatment. In terms of crop growth, the growth speed of plant height, LAI, aboveground dry matter and nitrogen uptake with the growing degree days (GDD) for the mulched drip irrigation treatment was obviously greater than those for the non-mulched drip irrigation and surface irrigation treatments during the early growing stage. At the physiological maturity stage, the aboveground dry matter averaged over the three growing seasons for the mulched drip irrigation treatment was 14% and 23% greater than that for the non-mulched drip irrigation and surface irrigation treatments, respectively. Accordingly, the nitrogen uptake for the mulched drip irrigation treatment was 16% and 28% greater than those for the non-mulched drip irrigation and surface irrigation treatments, respectively. The three-year average grain yield and water use efficiency (WUE) for the mulched drip irrigation treatment were 11% and 8% greater than those for the non-mulched drip irrigation treatment, and 21% and 18% greater than those for surface irrigation treatment, respectively. In conclusion, mulched drip irrigation produced a more favorable water-heat environment in field which promoted crop growth and improved maize yield and WUE.

Key words: Soil temperature Maize Growth Yield Mulched drip irrigation Sub-humid region of Northeast China

引言

东北地区是我国玉米主产区和重要的商品粮基地,农业生产以“雨养”为主,降水量地域间差异很大,年际波动也较大^[1],玉米生育期水分亏缺量多年平均值达 10 ~ 220 mm^[2],而且东北地区春季气温回升慢、气温低,常对玉米生长和产量带来不利影响^[3]。滴灌作为一种局部灌溉技术,可以随时将水、肥施入土壤^[4],既可以为出苗和苗期生长创造适宜的水分和养分条件,还可以解决生育中后期植株较高机械难以进地施肥的困难,提高水肥利用率。作为一种栽培方法,覆膜可以有效提高土壤积温^[5]、减少土壤蒸发^[6]、减少化肥淋失^[7]、提高作物产量^[8]。将滴灌技术与覆膜栽培方法结合形成膜下滴灌技术,可以有效解决东北地区玉米种植中面临的生育前期积温不足和整个

生育期的灌水施肥问题。

膜下滴灌技术可以有效调控土壤水热^[9-13]、提高土壤酶活性^[14]、促进作物生长和提高产量^[15-23],在国内外已经得到了广泛应用。很多研究表明,膜下滴灌可以通过改变土壤水热运动影响土壤温度、土壤含水率变化。胡晓棠等^[9]在新疆石河子的研究表明膜下滴灌增加了棉花蕾期的地表温度 4 ~ 5℃。曹玉军等^[10]在东北半干旱区的研究表明膜下滴灌增加了玉米苗期至拔节期 5 ~ 25 cm 土层的温度约 2.8℃,明显提高了 0 ~ 60 cm 土层的含水率。谢夏玲等^[11]在甘肃武威研究了玉米膜下滴灌土壤温度的变化规律,结果表明膜下滴灌的各层土壤温度随灌溉定额增大而减小,特别是土壤浅层温度变化剧烈。张治等^[12]研究表明棉花膜下滴灌可以缓解土壤高地温低含水率或低地温高含水率的矛盾。

李明思等^[13]在新疆石河子研究表明覆膜滴灌条件下的土壤湿润比高于不覆膜滴灌,单根毛管控制面积内的土壤耗水量低于不覆膜滴灌。膜下滴灌引起的土壤水热变化对促进作物生长有重要的作用,如张振华等^[15]在甘肃民勤的研究表明膜下滴灌作物根系层的上部处于较好的水热条件,进而促进了作物上层根系的生长。国内外有关膜下滴灌增产效果的研究很多,涉及的作物包括棉花、西红柿、秋葵、甘蓝、马铃薯、洋葱、黄瓜、玉米等^[16-23]。如康静^[23]在内蒙古半干旱区的试验结果表明膜下滴灌的玉米产量比不覆膜滴灌提高 10%。膜下滴灌条件下土壤水热状况的改变对作物生长的影响也与作物自身状况有关。对于黄瓜等喜温作物,膜下滴灌的增产效果明显^[22],但对于高温敏感作物,膜下滴灌会抑制作物的生长。如王凤新等^[20]研究表明膜下滴灌能明显减少马铃薯生育前期的土壤蒸发,维持较高土壤含水率,但马铃薯中后期仍覆膜会导致土壤温度过高而引起产量下降。从以上研究可以看出,膜下滴灌的研究区域较多集中在我国西北干旱或半干旱地区,研究的作物以棉花、果树、蔬菜等经济作物为主。而在东北半湿润区,对玉米等主要粮食作物采用膜下滴灌技术后的节水增产机制还缺乏系统深入的研究。另外,大多数研究都表明膜下滴灌可以增加表层土壤的温度和含水率、改善土壤水热状况、增加作物产量,但却未能建立土壤水热变化与作物生长和养分累积过程之间的联系,从而难以全面揭示膜下滴灌的节水增产机制。本文利用东北半湿润区连续开展 3 年的田间试验数据,研究膜下滴灌对土壤水热状况、田间小气候、玉米生长、养分累积以及产量的影响,为进一步探索膜下滴灌的节水增产机制、指导东北地区玉米膜下滴灌生产实践提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于 2011—2013 年玉米 (*Zea mays* L.) 生育

期内在黑龙江省水利科学研究院综合试验研究基地进行。该基地位于东经 125°45′,北纬 45°22′,属中温带大陆性季风气候,1980—2012 年全年平均气温 4.8℃,年平均降水量 543.1 mm。2011、2012、2013 年玉米生育期(5—9 月)平均气温分别为 19.7、20.0、20.3℃,略低于多年(1999—2010 年)平均值(表 1)。土壤类型为黑土,根据国际制土壤质地分类标准,0~80 cm 剖面的土壤均为粉壤土,随深度没有明显变化(表 2)。2013 年在试验地块 3 个代表性位置,按深度 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~80 cm 用体积 100 cm³ 的环刀取样,测定土壤主要物理性能指标。0~80 cm 土层的平均干容重(环刀法)为 1.34 g/cm³,平均饱和含水率(环刀法)为 0.46 cm³/cm³,田间持水率(威尔科克斯法)为 0.36 cm³/cm³。取吸力 1.5 MPa 下的含水率作为凋萎系数,采用高速恒温冷冻离心机(CR21G,HITACHI,日本)测定,结果为 0.22 cm³/cm³。高速离心机测定的凋萎系数接近于 60% 的田间持水率,但试验过程中当土壤含水率接近 60% 田间持水率时,并没有发现永久凋萎现象,这可能是因为高速离心机法测定土壤持水特性过程中随着转速(压力)的不断增加,土壤不断压实,土壤结构发生变化^[24],使高速离心机测定的凋萎系数高于真实的凋萎系数。耕层(0~80 cm)平均土壤有机质含量(重铬酸钾容量法)为 25.1 g/kg。

表 1 玉米生育期内月平均气温

Tab.1 Air temperature of each month during maize growing seasons						℃
年份	月份					生育期 均值
	5	6	7	8	9	
2011 年	14.9	21.6	24.5	22.8	15.0	19.7
2012 年	16.4	21.3	23.9	21.8	16.4	20.0
2013 年	17.9	21.4	23.9	22.5	15.8	20.3
多年平均值 (1999—2010 年)	16.2	22.2	24.2	22.7	17.1	20.5

表 2 土壤物理特性

Tab.2 Soil physical characteristics

深度/cm	不同粒径颗粒所占体积百分数/%			土壤质地	有机质含量 /(g·kg ⁻¹)
	0.02~2.0 mm	0.002~0.02 mm	0~0.002 mm		
0~20	39.1	54.4	6.5	粉壤土	31.6
20~40	34.5	58.7	6.8	粉壤土	25.5
40~80	33.4	59.4	7.2	粉壤土	18.1

1.2 试验设计

选取滴灌和地面灌两种灌水方式,考虑覆膜的影响。由于地面灌覆膜后在生育后期难以实施补充

灌溉和追肥处理,在东北地区很少应用,为此设置膜下滴灌、不覆膜滴灌和地面灌(不覆膜)3 个处理,每个处理 3 个重复,共 9 个小区,小区的尺寸为 40 m ×

5.2 m,随机排列布置。采用大垄双行栽培模式,相邻两垄间距 130 cm,垄上行距 50 cm,垄间行距 80 cm,垄宽 100 cm,垄高 15 cm,沟底宽 30 cm,每个小区包含 4 垄,每垄种植 2 行玉米,共 8 行(图 1),玉米株距 33 cm,种植密度为 46 620 株/hm²。试验中土壤及作物取样点布置在小区的中间 4 行,小区之间未设置保护行。试验区四周设置保护区。播种前,对试验地块进行旋耕、翻平耙细和起垄作业,旋耕深度 25~30 cm。土壤表层(约 5 cm)温度达到

8~9℃播种,2011、2012、2013 年的播种日期分别为 5 月 5 日、5 月 4 日和 5 月 9 日。播种后覆膜前在土壤表面喷施除草剂进行封闭灭草。覆膜和铺设滴灌带同步进行。选用北京绿源公司生产的内镶片式滴灌带,0.1 MPa 下滴头标称流量 2.0 L/h,滴头间距 30 cm。滴灌带沿玉米行向铺设于垄中间,每条滴灌带控制 2 行玉米。2011、2012、2013 年玉米的收获日期分别为 9 月 15 日、9 月 27 日和 9 月 25 日。

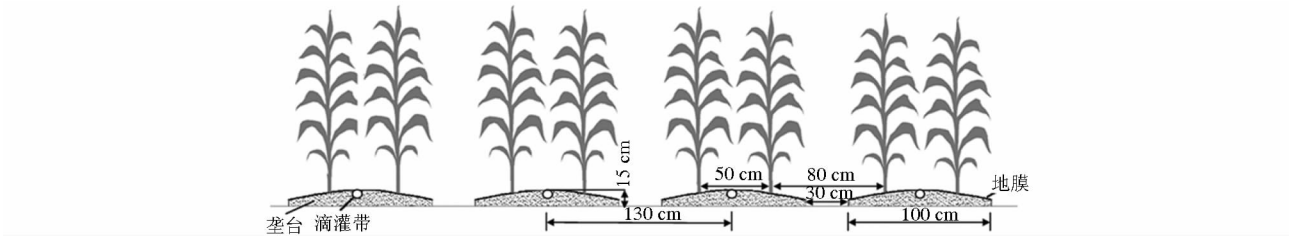


图 1 玉米膜下滴灌覆膜种植方式和滴灌带布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cropping pattern and lateral layout of driplines under plastic mulch for maize

1.3 灌溉与施肥

根据试验地历史气象资料,1980—2013 年玉米生育期(5—9 月)的平均有效降水量(大于 5 mm)为 404 mm,玉米生育期内的降水量总体上较为充足,与采用适宜的覆膜栽培方式和合理施肥管理措施相比,灌溉制度对产量影响相对较小。但玉米生育期极易发生春旱,导致出苗率降低。生育期内也经常出现阶段性无降水的情况,所以玉米的灌溉制度需要考虑施肥灌溉的需要同时结合实际的降水情况制定。2011—2013 年玉米生育期的有效降水量相对较多,2011 年玉米生育期内的有效降水量(大于

5 mm)为 308.9 mm,属平水年,2012、2013 年有效降水量分别为 481.5 mm 和 527.9 mm,属湿润年。因此,采用的灌溉制度为:2011 年拔节期(7 月 16 日)灌水 15 mm,抽穗期(8 月 2 日)、灌浆期(8 月 15 日)各灌水 10 mm;2012 年播种后降水较少,灌出苗水 10 mm(5 月 12 日)、保苗水 15 mm(5 月 26 日),拔节期(6 月 25 日)、抽穗期(7 月 17 日)和灌浆期(8 月 24 日)各灌水 15 mm;2013 年拔节期(7 月 8 日)、抽穗期(7 月 25 日)和灌浆期(8 月 11 日)各灌水 15 mm;所有处理的灌水量相同。玉米生育期内的有效降水量和灌水量见图 2。

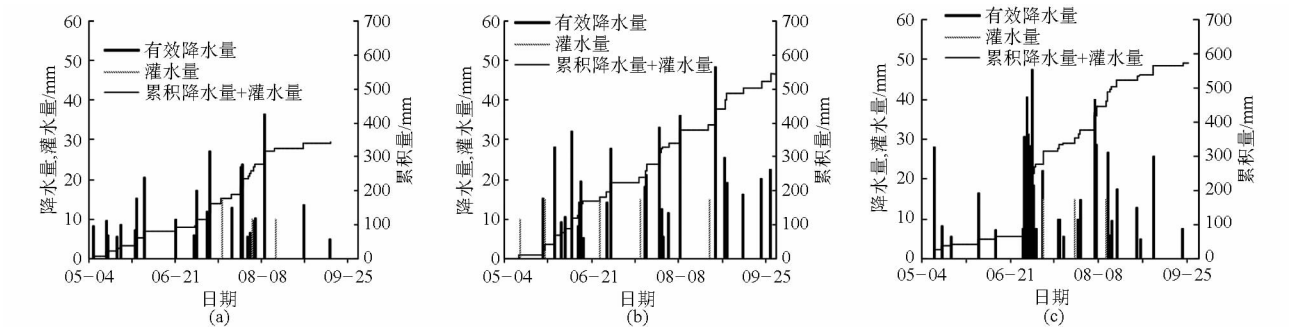


图 2 玉米生育期内有效降水量和灌水量

Fig. 2 Effective rainfall and irrigation amounts during growing seasons of maize

(a) 2011 年 (b) 2012 年 (c) 2013 年

2011、2012 年播种前,根据当地丰产经验一次性施基肥磷酸二铵 300 kg/hm²,硫酸钾 150 kg/hm²,硫酸锌 22.5 kg/hm²,折合纯氮量 54.0 kg/hm²,有效磷(P₂O₅) 138.0 kg/hm²,有效钾(K₂O) 81.0 kg/hm²;2013 年未施基肥。近年东北黑土区玉米氮肥试验研究的结果显示^[25],施氮量超过 200 kg/hm²后玉米产量不再增加,本研究中生育期追肥量定为

326 kg/hm²尿素(折合纯氮量为 150 kg/hm²),这与当地农户普遍采用的 300~450 kg/hm²尿素(折合纯氮量约 140~200 kg/hm²)追肥量大体一致。研究表明滴灌分次施肥更有利于玉米对肥料的吸收^[26],将追肥量平均分成 3 次,在拔节期、抽穗期和灌浆期施入,每个小区每次施入尿素 2.25 kg。膜下滴灌和不覆膜滴灌处理的每个小区单独使用压差式施肥罐

(30 L,北京绿源公司)追肥。在施肥罐的上下游分别安装精度为 5% 的压力表,控制通过施肥罐的压差和系统首部压力,施肥罐出口压力恒定为 0.10 MPa,压差控制在 0.05 MPa 左右。为保证均匀施肥,每次施肥前需要先灌入一定量的清水,系统稳定后进行施肥,最后对系统进行冲洗。在灌水量为 10 mm 时,灌水和施肥大约需要 2.5 h,灌水施肥顺序为:首先通入清水灌溉约 40 min,系统稳定后施肥 15~30 min,剩余时间冲洗系统^[27-28]。地面灌处理采用人工撒肥,施肥日期和施肥量与滴灌处理相同。

1.4 观测指标

1.4.1 土壤温度

使用曲管地温计测量土壤温度(2012、2013 年),2013 年增加 EM50 土壤多参数自动监测系统和 ECH₂O-TE 传感器(5TE,Decagon Devices 公司,美国)监测土壤温度和含水率。2012 年分别选取膜下滴灌、不覆膜滴灌和地面灌处理各 2 个小区,每个小区安装 1 组曲管地温计;2013 年在膜下滴灌和不覆膜滴灌处理的每个小区安装 1 组曲管地温计,埋设深度分别为 5、10、15、20、25 cm;埋设位置为行上两株玉米之间;地温计观测时间为每日 08:00、14:00 和 18:00。2013 年选取膜下滴灌和不覆膜滴灌处理各 1 个小区各安装 1 组 EM50,埋设深度分别为 20、30、45、65、85 cm;埋设位置与曲管地温计相同,每 30 min 自动采集 1 次数据。

1.4.2 土壤水分

为了获得典型时段土壤水分分布,生育期初始、灌水前后和生育期结束时用土钻法取样,2011 年和 2012 年在 0~80 cm 土层按 10 cm 等间距分层取样,2013 年按 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 分层取样;每个小区取 1 个点,取土位置在行上(沿滴灌带方向)两个灌水器中间。

不同处理下玉米生育期耗水量采用水量平衡法计算

$$ET = P + M - R - D - \Delta S \tag{1}$$

其中
$$\Delta S = 1\,000z(\theta_{i2} - \theta_{i1}) \tag{2}$$

式中 ET ——耗水量,mm
 P ——有效降水量,mm
 M ——灌水量,mm
 R ——地表径流量,mm
 D ——深层渗漏量,mm
 ΔS ——土壤储水量的变化量,mm
 z ——计划湿润层深度,m
 θ_{i1}, θ_{i2} —— t_1, t_2 时刻根区 0~80 cm 深度土壤的平均含水率,cm³/cm³

试验区地势平坦, R 可忽略不计; D 根据根区土

壤的最大可持水量估算。

1.4.3 土壤蒸发

土壤蒸发量使用自制的微型蒸发器监测。微型蒸发器由内筒和外筒组成,均由 PVC 管制成,内筒内径 10 cm,高 15 cm,外筒内径略大于内筒,高度与内筒相同。每日 17:00—18:00 测量,计算 2 次称量结果的差值,根据内筒内径截面积转换为蒸发量(单位:mm/d)。发生有效降水(大于 5 mm)或灌水后更换微型蒸发器土体,每次更换土体取原状土。2013 年选取膜下滴灌和不覆膜滴灌处理各 2 个小区,在每个小区的垄上滴灌带正下方(桶位 1)和垄沟处(桶位 2)各安装 1 组微型蒸发器,分别代表膜内和膜外的蒸发水量。土壤蒸发量由膜内和膜外的蒸发水量按面积加权平均得到,计算公式为

$$E_a = \alpha E_1 + \beta E_2 \tag{3}$$

式中 E_a ——土壤蒸发量
 E_1, E_2 ——膜内、膜外的蒸发水量
 α, β ——加权系数,取值分别为 0.77 和 0.23

1.4.4 冠层空气温湿度

使用便携式气象仪(Kestrel 4000, Nielsen-Kellerman 公司,美国)测量玉米冠层空气的温度和湿度,研究膜下滴灌对玉米冠层空气温度和湿度的影响。每个生育期选取典型天气(晴、阴)测定冠层温、湿度的日变化过程,测定时间从 08:00 到 18:00 每隔 2 h 观测一次。选取膜下滴灌处理和不覆膜滴灌处理各 1 个小区,在各个小区的中心区域玉米行上测量,测试高度为土壤表面到玉米冠层顶部,按 20 cm 等间距分层测量,每层测试 3 次。

1.4.5 作物生长指标

每个小区沿滴灌带方向按等间距(13 m)布置 3 个测点,在每个测点选生长状况良好、具有代表性的 3 株玉米植株,在玉米苗期、拔节期、抽穗期和灌浆期测定株高和所有完全展开叶片的长和宽。每次测量时,选择具有代表性的 15 片不同尺寸的叶片,测量叶片的长和宽,然后带回室内用网格交叉法测量叶片的实际面积,用叶片的实际面积除以长和宽的乘积确定修正系数(一般为 0.74~0.76),来计算叶面积指数(LAI)。在玉米苗期、拔节期、抽穗期和成熟期分别测定玉米植株地上部分的干物质质量,成熟期时分茎叶、籽粒测试。植株取样点位置与株高测点相同。取整个植株样品(地上部分)在 105℃ 杀青 0.5 h,然后在 70℃ 下干燥至恒质量,称量植株干物质质量,将称量后的样品磨碎后充分混合,用凯氏定氮仪(Kjeltec 2300, FOSS 公司,丹麦)测定植株的全氮含量,计算植株的氮素吸收量。将玉米的生长(株高、LAI、地上部分干物质质量、氮素吸收量)

与有效积温(GDD)建立回归关系,有效积温的计算公式为^[29]

$$GDD = \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_{\text{base}} \right) \quad (4)$$

式中 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ ——最高、最低气温
 T_{base} ——最低临界温度,取 10℃
 n ——生育期天数

$T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 的最高和最低临界温度分别为 30℃ 和 10℃,即当 $T_{\max}$ 或 $T_{\min}$ 超过 30℃ 时,按 30℃ 计算,当 $T_{\max}$ 或 $T_{\min}$ 低于 10℃ 时,按 10℃ 计算。

考种取样在每个小区按等间距(10 m)布置 4 个观测点,每个测点取 2 行,每行取 3 株,共 6 株(样方面积 $2 \times 3 \times 0.65 \text{ m} \times 0.33 \text{ m} = 1.287 \text{ m}^2$),分别测量穗长、秃尖长和穗粒数,风干后脱粒,测定百粒质量、穗粒质量、含水率,产量折算为质量含水率 14% 的标准产量^[30]。

水分利用效率(WUE)的计算公式为

$$WUE = Y/ET \quad (5)$$

式中 WUE ——水分利用效率,kg/(hm²·mm)
 Y ——单位面积玉米产量,kg/hm²

1.5 统计分析方法

利用最小显著差数法(LSD 法)在同一试验因素不同水平间进行多重比较,分析工具采用 SPSS

15.0 和 Microsoft Office Excel 2007 软件。

2 结果与讨论

2.1 土壤温度

图 3 给出了 2013 年膜下滴灌和不覆膜滴灌处理在不同生育阶段 20 cm 深度处土壤温度的典型日变化(EM50 监测)。膜下滴灌处理在玉米苗期、拔节期和抽穗期典型日的土壤温度都高于不覆膜滴灌处理,苗期的温差最大,拔节期次之,抽穗期最小。膜下滴灌与不覆膜滴灌处理在典型日的土壤温度最大差距出现在午后。例如,膜下滴灌与不覆膜滴灌处理在苗期的典型日(6 月 1 日)20 cm 深度处的最大土壤温差为 3.9℃,出现在 15:00—15:30;类似地,膜下滴灌与不覆膜滴灌处理在抽穗期典型日(7 月 30 日)20 cm 深度处的最大温差为 1.0℃,出现在 15:00。

图 4 和图 5 分别给出了 2012、2013 年玉米生育期曲管地温计监测的膜下滴灌、不覆膜滴灌和地面灌处理 5~25 cm 深度的日均土壤温度。2012 年的监测结果表明不覆膜滴灌和地面灌处理的土壤温度差异很小,所以 2013 年没有监测地面灌处理。膜下滴灌处理在玉米生育期的土壤积温高于不覆膜滴灌和地面灌处理。膜下滴灌处理 2012 年玉米生育

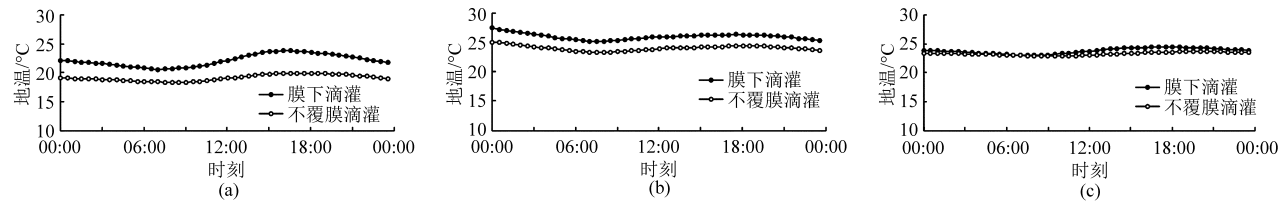


图 3 不同生育阶段深度 20 cm 土壤温度的典型日变化

Fig.3 Variation of soil temperature at 20 cm depth within typical days during growing seasons of maize

(a) 苗期(2013 年 6 月 1 日) (b) 拔节期(2013 年 6 月 26 日) (c) 抽穗期(2013 年 7 月 30 日)

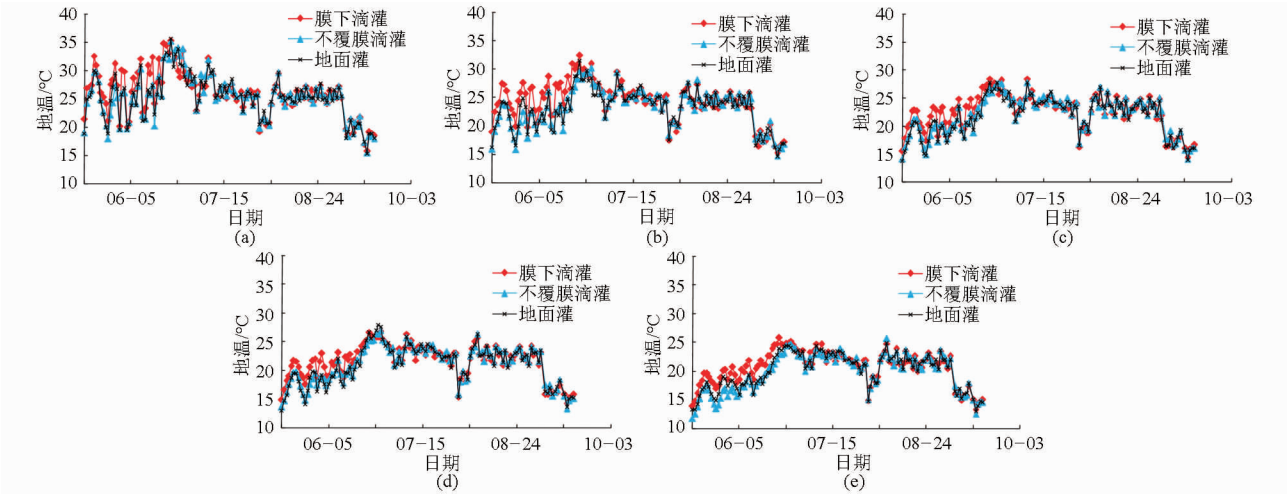


图 4 2012 年玉米生育期土壤温度的变化

Fig.4 Changes of daily mean soil temperature at different depths during 2012 growing season of maize

(a) 5 cm (b) 10 cm (c) 15 cm (d) 20 cm (e) 25 cm

期的土壤积温(5~25 cm)比不覆膜滴灌和地面灌处理分别增加了 120℃和 115℃,2013 年比不覆膜滴灌处理增加了 150℃,这与康静^[23]在内蒙古半干旱区提出的膜下滴灌增加玉米生育期 0~25 cm 土层积温约 130℃的研究结果大致相当。膜下滴灌对土壤温度的增加主要表现在玉米生育前期(苗期-拔节期),且随着土壤深度的增加增温效果

逐渐减弱。膜下滴灌处理 2012、2013 年玉米苗期的日平均土壤温度比不覆膜滴灌处理高 2.3℃,土壤积温分别增加 86℃和 88℃,占整个生育期积温增加值的 72%和 59%。地膜对土壤潜热交换的消除、显热交换的减弱和夜间有效发射辐射的抑制可能是导致膜下滴灌土壤温度升高的主要原因^[5]。

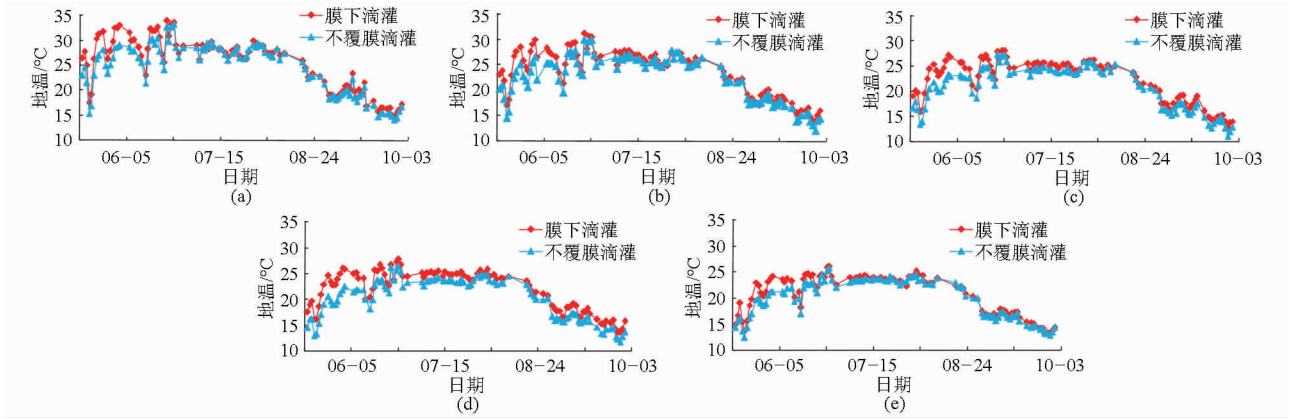


图 5 2013 年玉米生育期土壤温度的变化

Fig. 5 Changes of daily mean soil temperature at different depths during 2013 growing season of maize

(a) 5 cm (b) 10 cm (c) 15 cm (d) 20 cm (e) 25 cm

2.2 土壤蒸发和土壤含水率

图 6 给出了膜下滴灌和不覆膜滴灌处理土壤蒸发量在生育期内的变化。膜下滴灌处理垄上的土壤蒸发量(有地膜覆盖)明显低于垄沟处(无地膜覆盖,图 6a),而不覆膜滴灌处理垄上和垄沟处的土壤蒸发量相差不大(图 6b),膜下滴灌处理的土壤蒸发量明显低于不覆膜滴灌处理(图 6c)。

2013 年玉米生育期内膜下滴灌处理的日均土壤蒸发量为 0.7 mm/d,比不覆膜滴灌处理的日均土壤蒸发量(1.5 mm/d)降低了 53%,王罕博等^[6]在山西寿阳的研究表明覆膜后玉米全生育期的土壤蒸发量减少了 58%。膜下滴灌可以明显降低玉米生育期的土壤蒸发量,起到保水稳墒的作用。

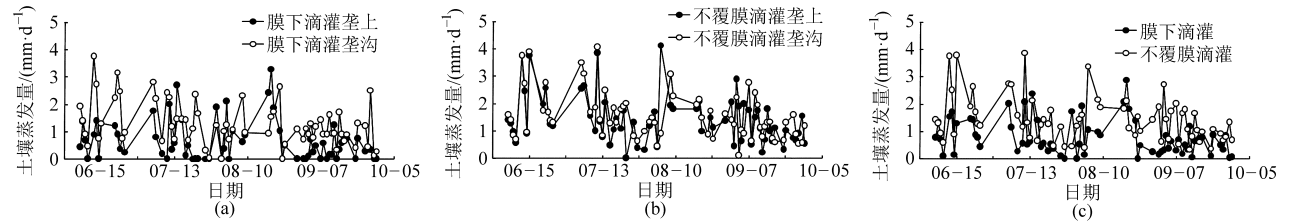


图 6 2013 年玉米生育期的土壤蒸发量变化

Fig. 6 Changes of soil evaporation during 2013 growing season of maize

图 7 给出了膜下滴灌和不覆膜滴灌处理在 20 cm 和 45 cm 深度处土壤含水率在 2013 年生育期内的变化情况(EM50 监测结果)。膜下滴灌处理在玉米生育前期的土壤含水率明显高于不覆膜滴灌处理,2013 年玉米苗期(6 月 5 日—6 月 25 日)土壤 20 cm 深度处的平均含水率比不覆膜滴灌处理高 13%,主要原因是膜下滴灌减少了玉米生育前期的土壤蒸发量,减少了土壤水分的损耗;另外,膜下滴灌为玉米生育前期提供了更好的土壤水、热条件,可能促进了玉米的营养生长,增加了玉米的蒸腾耗水量,缩小了膜下滴灌与不覆膜滴灌处理土壤含水率

的差距。随着玉米生长和进入雨季,覆膜减少土壤蒸发量的效果减弱,并且地膜在一定程度上阻隔了降水入渗,从 7 月开始,2 个处理 20 cm 深度处的土壤含水率遇降水后都有所增加,但膜下滴灌处理的增幅小于不覆膜滴灌处理;在 45 cm 深度处,二者相差不大。例如 2013 年 6 月 27 日—7 月 4 日连续降水后(图 2),膜下滴灌处理在 20 cm 处的土壤含水率增加了 8%,而不覆膜处理增加了 25%。玉米生育中后期(7 月 15 日—9 月 15 日),膜下滴灌与不覆膜滴灌处理的土壤含水率大体上相差不大,这可能是由于玉米达到生殖生长阶段且降水量增加的结果。

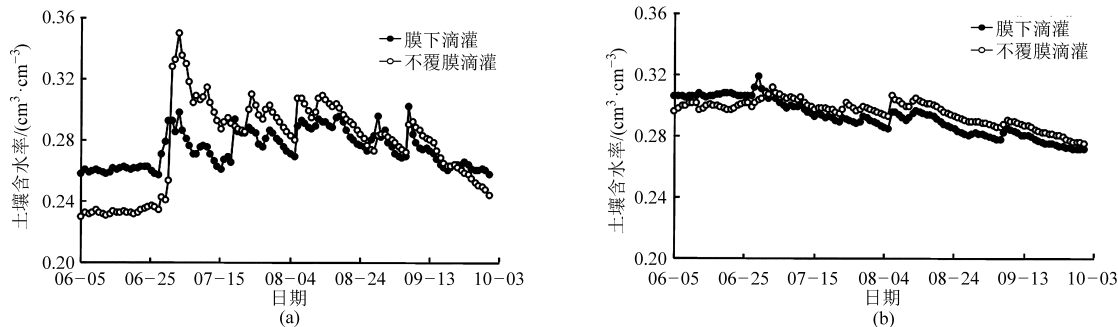


图 7 2013 年玉米生育期的土壤含水率变化

Fig. 7 Changes of soil water content during 2013 growing season of maize

(a) 20 cm (b) 45 cm

2.3 冠层空气温度和湿度

本研究发现,晴天时覆膜对冠层空气温度和湿度的影响较大,阴天时覆膜对冠层空气温度和湿度的影响较小,所以本文给出了玉米拔节期典型日(2013 年 7 月 5 日,晴天)玉米冠层内空气温度和湿度随距地面高度的变化情况(图 8),由于之前的连续降水,2 个处理在典型日的土壤含水率都保持在较高水平(图 7)。膜下滴灌处理的冠层空气温度明显高于不覆膜滴灌处理,冠层空气湿度明显低于不覆膜滴灌处理,且随着距离地面高度的增加,2 个处理冠层内空气温度和湿度差距逐渐缩小。这可能是

覆膜限制了土壤与大气间的水汽交换、增加了土壤温度和减少了土壤蒸发的结果。根据能量平衡原理可知,冠层内气温主要受太阳辐射和空气湿度影响,由于覆膜抑制了土壤蒸发,影响膜下滴灌冠层温度的水汽交换则主要来自叶片蒸腾。在土壤水分供给充足的情况下,叶片的蒸腾速率主要和气孔内外的水汽压差有关。冠层空气温度的增加和冠层空气湿度的降低会增大叶片内外水汽压差,进而增加田间蒸腾水分驱动力、提高蒸腾速率,可能导致膜下滴灌处理玉米蒸腾量的增加。王罕博等^[6]的研究已表明,覆膜处理的作物蒸腾量高于不覆膜处理。

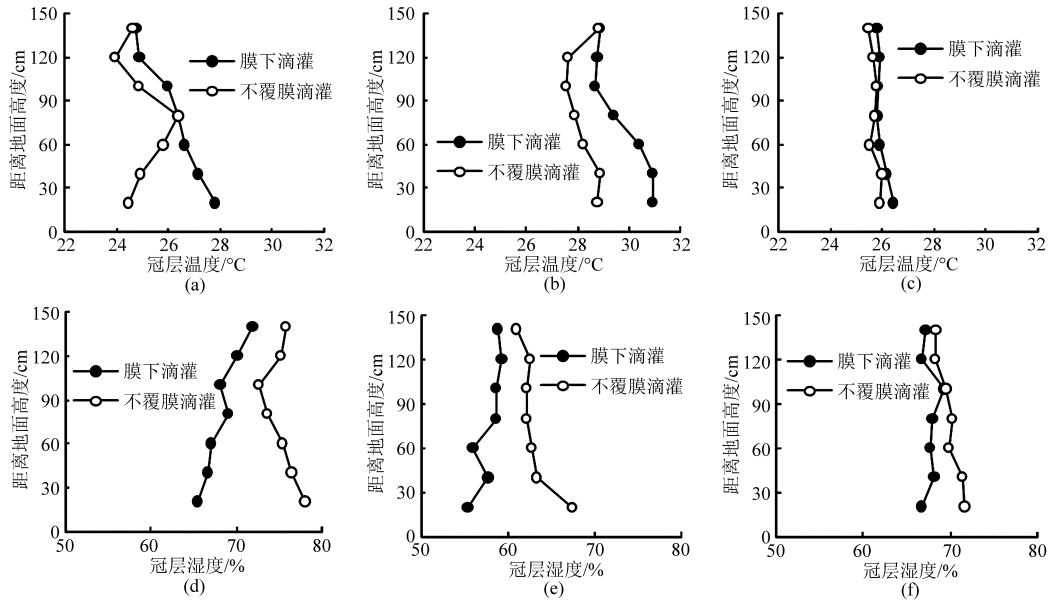


图 8 典型日玉米冠层内空气温度和湿度随高度的变化

Fig. 8 Changes of air temperature and humidity in canopy during a typically sunny day

(a) 08:00 冠层温度 (b) 14:00 冠层温度 (c) 18:00 冠层温度 (d) 08:00 冠层湿度 (e) 14:00 冠层湿度 (f) 18:00 冠层湿度

2.4 株高和叶面积指数

图 9 和图 10 分别给出了 2012 年和 2013 年玉米生育期各处理的株高和叶面积指数(LAI)随有效积温(GDD)的变化。玉米生育期内各处理的株高和 LAI 随有效积温的增加而不断增加,相同积温下,膜下滴灌处理在玉米生育前期的株高和 LAI 高于不

覆膜滴灌和地面灌处理。将 2012 年和 2013 年各处理的 LAI 与有效积温建立二次多项式回归关系(式(6)~(8))可以发现,膜下滴灌处理在玉米生育前期的 LAI 的生长速度(斜率)高于不覆膜滴灌和地面灌处理。例如 2012 年和 2013 年玉米苗期至拔节期(有效积温 300~600℃),膜下滴灌处理的

LAI 平均值 (1.37) 分别比不覆膜滴灌 (1.12) 和地面灌处理 (1.10) 高 22% 和 37%, 平均生长速度 (斜率) 比地面灌处理高 13% (图 10c)。这可能是由于在营养生长阶段, 膜下滴灌营造了更适宜的农田土壤温度 (图 4、图 5) 和土壤水分 (图 7) 环境, 显著提高了玉米苗期株高和叶片生长, 使其峰值到达时间明显早于不覆膜滴灌和地面灌处理。当有效积温达

到 880 ~ 1 000℃ 时, 各处理的株高和 LAI 达到最大值 (图 9、图 10)。随着玉米进入生殖生长阶段, 各处理的株高不再增加, 而 LAI 一段时间后逐渐下降, 各处理株高和 LAI 的差距逐渐缩小。例如 2012 年和 2013 年玉米灌浆期, 膜下滴灌处理的株高和 LAI 分别仅比不覆膜滴灌和地面灌处理增加 1% ~ 12%。

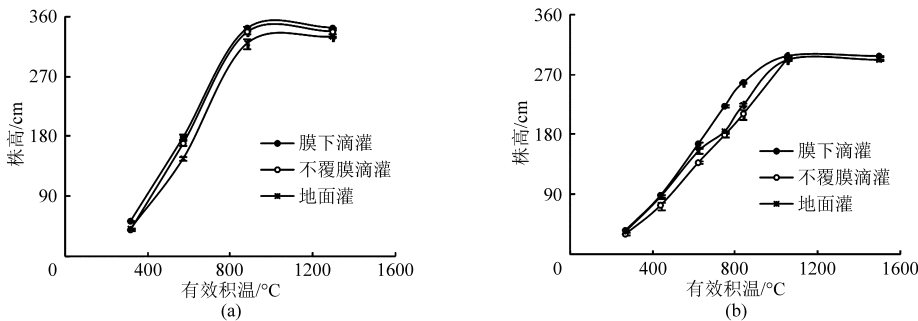


图 9 玉米株高随生育期有效积温的变化
Fig. 9 Changes of plant height with growing degree days (GDD)
(a) 2012 年 (b) 2013 年

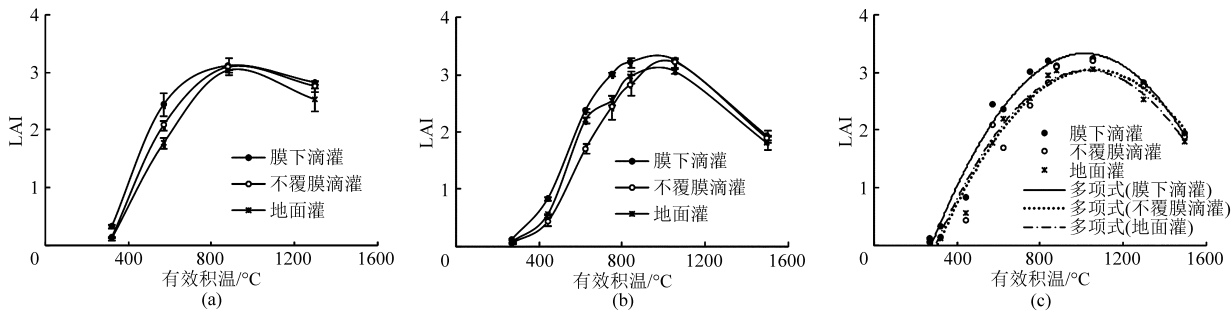


图 10 玉米 LAI 随生育期有效积温的变化
Fig. 10 Changes of LAI with growing degree days (GDD)
(a) 2012 年 (b) 2013 年 (c) 2012 年和 2013 年合并

LAI 与有效积温的回归关系分别为:

膜下滴灌处理

$$y = -6 \times 10^{-6} x^2 + 0.0124x - 2.9442 \quad (R^2 = 0.9713) \quad (6)$$

不覆膜滴灌处理

$$y = -5 \times 10^{-6} x^2 + 0.0114x - 2.9529 \quad (R^2 = 0.9453) \quad (7)$$

地面灌处理

$$y = -6 \times 10^{-6} x^2 + 0.0116x - 2.9564 \quad (R^2 = 0.9678) \quad (8)$$

2.5 地上部分干物质质量和氮素吸收量

图 11 和图 12 分别给出 2012 年和 2013 年玉米生育期各处理的地上部分干物质质量和氮素吸收量随有效积温 (GDD) 的变化。玉米生育期内各处理的地上部分干物质质量随有效积温的增加持续增加, 相同有效积温时, 膜下滴灌处理的地上部分干物质质量高于不覆膜滴灌和地面灌处理。将 2012 年

和 2013 年各处理的地上部分干物质质量、氮素吸收量与有效积温建立二次多项式回归关系 (式 (9) ~ (11)) 和 (式 (12) ~ (14)) 可以发现, 膜下滴灌处理在玉米生育前期的地上部分干物质质量和氮素吸收量随有效积温的增加而迅速增长, 生长速度 (斜率) 明显高于不覆膜滴灌和地面灌处理。例如 2012 年和 2013 年玉米苗期 (有效积温 100 ~ 500℃), 膜下滴灌处理地上部分干物质质量的平均增长速度 (10.1 kg/(hm²·℃)) 分别比不覆膜滴灌 (6.7 kg/(hm²·℃)) 和地面灌处理 (5.6 kg/(hm²·℃)) 高 51% 和 80% (图 11c), 氮素吸收量的平均增长速度 (0.31 kg/(hm²·℃)) 分别比不覆膜滴灌 (0.25 kg/(hm²·℃)) 和地面灌处理 (0.20 kg/(hm²·℃)) 高 24% 和 52%。这可能是由于膜下滴灌促进了玉米生育前期叶片的生长 (图 10), 增加了光合作用对干物质的累积; 而且良好的土壤水热条件也促进了玉米根系对氮素等养分的吸收 (图 12)。随着玉米

的不断生长,膜下滴灌处理在玉米生育中后期的地上部分干物质质量与不覆膜滴灌处理的差距不再增大,但与地面灌处理的差距继续增加,这可能是由于生育中后期雨水较多(图 2),地面灌处理土壤养分

淋失风险有所增加^[31]。玉米成熟期时,膜下滴灌处理地上部分干物质质量和氮素吸收量分别比不覆膜滴灌处理高 9% ~ 22% 和 12% ~ 27%,比地面灌处理高 22% ~ 26% 和 23% ~ 39%。

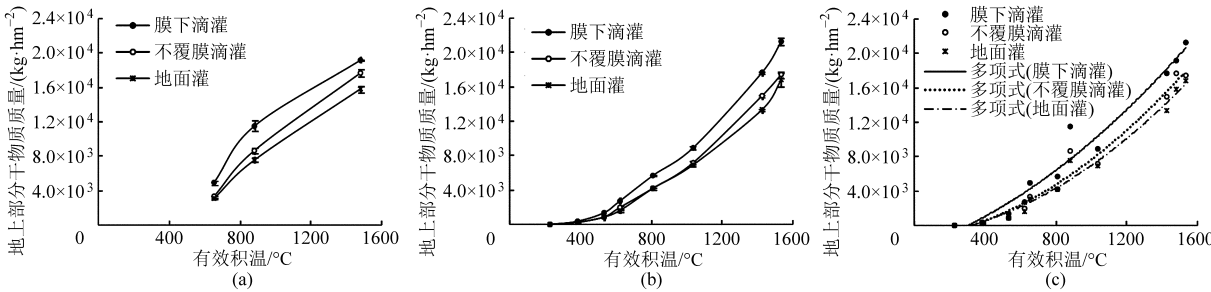


图 11 玉米地上部分干物质质量随生育期有效积温的变化

Fig. 11 Changes of aboveground dry matter with growing degree days (GDD)

(a) 2012 年 (b) 2013 年 (c) 2012 年和 2013 年合并

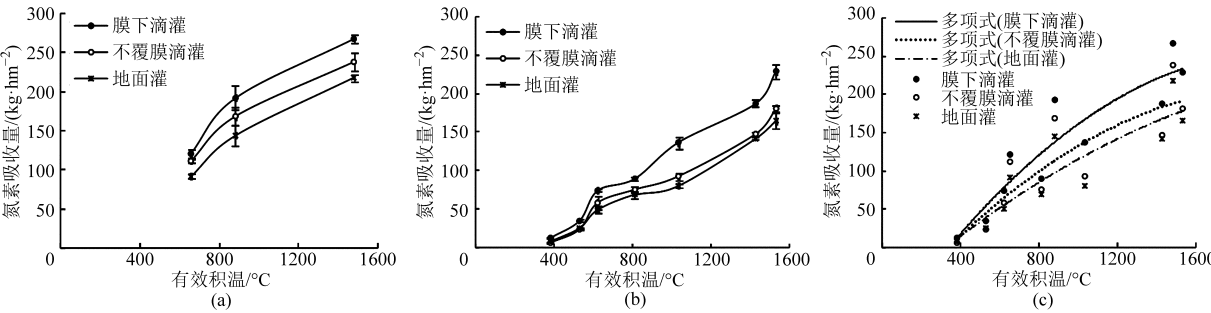


图 12 玉米氮素吸收量随生育期有效积温的变化

Fig. 12 Changes of nitrogen uptake with growing degree days (GDD)

(a) 2012 年 (b) 2013 年 (c) 2012 年和 2013 年合并

地上部分干物质质量与有效积温的回归关系分别为:

膜下滴灌处理

$$y = 5 \times 10^{-6} x^2 + 0.0071x - 2.7146 \quad (R^2 = 0.9637) \quad (9)$$

不覆膜滴灌处理

$$y = 7 \times 10^{-6} x^2 + 0.0025x - 1.4935 \quad (R^2 = 0.9729) \quad (10)$$

地面灌处理

$$y = 6 \times 10^{-6} x^2 + 0.0020x - 1.2658 \quad (R^2 = 0.9790) \quad (11)$$

氮素吸收量与有效积温的回归关系分别为:

膜下滴灌处理

$$y = -9 \times 10^{-5} x^2 + 0.3649x - 113.29 \quad (R^2 = 0.8516) \quad (12)$$

不覆膜滴灌处理

$$y = -7 \times 10^{-5} x^2 + 0.2928x - 93.819 \quad (R^2 = 0.7791) \quad (13)$$

地面灌处理

$$y = -4 \times 10^{-5} x^2 + 0.2286x - 69.651 \quad (R^2 = 0.7969) \quad (14)$$

2.6 产量及其构成要素

表 3 给出了各处理的玉米产量及其构成要素。3 年试验膜下滴灌处理的穗粒数均显著高于地面灌处理,2011 年和 2013 年膜下滴灌处理的百粒质量均显著高于地面灌处理,这是膜下滴灌产量显著高于地面灌(高 18% ~ 25%)的原因。与不覆膜滴灌处理相比,覆膜处理的产量提高 10% ~ 12%,覆膜提高了穗粒数和百粒质量仍是增产的主要原因。从表中还可以看出,各处理的玉米生育期 ET 值差异不显著,这可能是由于玉米生育期的有效降水量较多,灌溉水量占作物耗水量(ET)的比例仅为 8% ~ 13%,削弱了灌水技术和栽培方式对玉米耗水的影响。而且,膜下滴灌玉米冠层空气温度的增加和冠层空气湿度的降低可能导致作物腾发量(T)的增加,一定程度上抵消了覆膜对土壤蒸发量(E)的减少,致使膜下滴灌的 ET 值比不覆膜滴灌处理高 1% ~ 3%。而康静^[23]在内蒙古的研究表明膜下滴灌玉米的 ET 值比不覆膜滴灌处理低 3%,这可能是由于半干旱地区空气干燥,不覆膜滴灌处理的土壤蒸发量较大,玉米的耗水量高于膜下滴灌。因此,玉米的水分利用效率(WUE)主要取决于产量,膜下滴灌

处理 2012 年和 2013 年的 WUE 比不覆膜滴灌处理高,比地面灌处理分别高 16% 和 20% ;2012 年和 2013 年膜下滴灌处理的 WUE 都显著高于地面灌处理。在不覆膜条件下,与地面灌 + 肥料撒施相比,滴灌施肥可以明显提高产量,2011、2012、2013 年滴灌玉米的产量分别比地面灌处理增加 14%、5% 和 8% ,滴灌的增产作用在平水年(2011 年)高于湿润

年(2012 年和 2013 年)。曹玉军等^[10]在吉林西部半干旱区的试验结果表明覆膜滴灌的玉米产量比不覆膜滴灌增加 22% ,高于本研究 10% ~12% 的增产幅度,这可能是由于在松嫩平原西南部冬季干旱多风,夏季炎热干燥,田间蒸发强烈,覆膜后可以更加有效地减少土壤蒸发,覆膜滴灌的增产效果更加明显。

表 3 玉米产量及其构成要素
Tab.3 Maize yield and its components

年份	处理	穗长 /cm	秃尖长 /cm	穗粒数	百粒 质量/g	产量 /(kg·hm ⁻²)	ET /mm	WUE /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2011 年	膜下滴灌	22.9 ^a	2.0 ^a	669.2 ^a	39.3 ^a	10 972.6 ^a		
	不覆膜滴灌	21.0 ^b	2.1 ^a	649.9 ^{ab}	39.2 ^a	9 985.2 ^b		
	地面灌	22.1 ^a	1.8 ^a	621.1 ^b	35.0 ^b	8 749.7 ^c		
2012 年	膜下滴灌	20.7 ^a	0.6 ^a	692.2 ^a	39.7 ^a	12 394.1 ^a	565.9 ^a	21.9 ^a
	不覆膜滴灌	20.3 ^a	0.6 ^a	683.7 ^{ab}	38.1 ^a	11 059.4 ^{ab}	551.2 ^a	20.1 ^{ab}
	地面灌	20.8 ^a	0.7 ^a	665.9 ^b	37.8 ^a	10 528.7 ^b	561.1 ^a	18.8 ^b
2013 年	膜下滴灌	21.2 ^a	0.4 ^b	667.4 ^a	41.5 ^a	11 188.7 ^a	536.8 ^a	20.8 ^a
	不覆膜滴灌	19.4 ^b	0.5 ^{ab}	632.7 ^b	38.3 ^b	10 116.3 ^b	529.9 ^a	19.1 ^b
	地面灌	19.0 ^c	1.0 ^a	636.4 ^b	37.7 ^b	9 383.1 ^c	538.2 ^a	17.4 ^c

注:同一列年份相同的处理中标有相同字母的数字在 $p>0.05$ 水平上差异不显著(LSD 法)。

2012 年(湿润年)各处理的平均产量比 2011 年(平水年)和 2013 年(湿润年)分别高 14% 和 11% 。2011 年的灌水量与有效降水量之和为 343 mm,比 2012 年的 552 mm 低 61% ,可能是 2011 年玉米产量低于 2012 年的主要原因;2013 年生育期内灌水量与有效降水量之和(573 mm)虽然较大,但玉米生育期中、后期集中降水较多(图 2),可能引起较多的氮素淋失^[31],致使 2013 年玉米收获时各处理的氮素吸收量均值低于 2012 年(图 12),产量也低于 2012 年。

膜下滴灌玉米增产的主要原因:一是覆膜为作物生长提供了适宜的水热条件,促进了氮素等养分的吸收利用和干物质的积累;二是采用滴灌进行灌水和施肥可以及时满足作物对水分和养分的需求,提高了水分和肥料利用率。在东北半湿润区,滴灌的增产效果与降水年型有关,在湿润年份,有效降水量大体上可以满足玉米的耗水需求,覆膜的贡献可能大于滴灌作用,而在干旱年份,滴灌的作用会明显

增加。例如,东北地区玉米苗期容易发生春旱,覆膜后膜内土壤含水率低、温度高,如果没有及时灌水,会发生“烤苗”,造成玉米减产、甚至绝产。

3 结束语

2011—2013 年在东北半湿润区开展了玉米田间试验,研究了大垄双行栽培模式下,膜下滴灌对土壤温度、含水率、田间小气候、玉米生长、养分累积以及产量的影响,主要结论为:与不覆膜滴灌和地面灌相比,膜下滴灌提高了玉米生育前期的土壤温度,减少了土壤蒸发,提高了生育前期的土壤含水率,提高了冠层空气温度、降低了冠层空气湿度;膜下滴灌营造了更好的土壤水、热环境,增加了玉米生育前期氮素等养分的吸收,促进了玉米的营养生长,为生育期后期的生殖生长积累了更多的营养物质,提高了穗粒数和百粒质量,平均产量分别比不覆膜滴灌和地面灌处理高 11% 和 21% ,平均水分利用效率(WUE)分别高 9% 和 18% 。

参 考 文 献

1 周琳. 东北气候[M]. 北京:气象出版社,1991:43-55.
2 刘钰,汪林,倪广恒,等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报,2009,25(12):6-12.
Liu Yu, Wang Lin, Ni Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 6-12. (in Chinese)
3 马树庆,王琪,郭建平,等. 东北地区玉米地膜覆盖增温增产效应的地域变化规律[J]. 农业工程学报,2007,23(8): 66-71.
Ma Shuqing, Wang Qi, Guo Jianping, et al. Geographical change law of effects of cotton plastic mulching on increasing temperature and production in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 66-71. (in Chinese)

- 4 陈剑,张泽,John A Yunger,等. 滴灌精准施肥装置棉田施氮配肥能力研究[J]. 农业机械学报,2014,45(12):62-68.
Chen Jian, Zhang Ze, John A Yunger, et al. Distribution and application of urea with precision fertilization device of drip irrigation in cotton fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 62-68. (in Chinese)
- 5 王树森,邓根云. 地膜覆盖增温机制研究[J]. 中国农业科学,1991,24(3):74-78.
Wang Shusen, Deng Genyun. A study on the mechanism of soil temperature increasing under plastic mulch[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1991, 24(3): 74-78. (in Chinese)
- 6 王罕博,龚道枝,梅旭荣,等. 覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散动态比较[J]. 农业工程学报,2012,28(22):88-94.
Wang Hanbo, Gong Daozhi, Mei Xurong, et al. Dynamics comparison of rain-fed spring maize growth and evapotranspiration in plastic mulching and un-mulching fields[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 88-94. (in Chinese)
- 7 Romic D, Romic M, Borosic J, et al. Mulching decreases nitrate leaching in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation[J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(2): 87-97.
- 8 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 Xian Yue, 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)
- 9 胡晓棠,李明思. 膜下滴灌对棉花根际土壤环境的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(3):121-123.
Hu Xiaotang, Li Mingsi. Effect of trickle irrigation under sub-film on the soil conditions of rhizosphere in cotton[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(3): 121-123. (in Chinese)
- 10 曹玉军,魏雯雯,徐国安,等. 半干旱区不同地膜覆盖滴灌对土壤水、温变化及玉米生长的影响[J]. 玉米科学,2013,21(1):107-113.
Cao Yujun, Wei Wenwen, Xu Guoan, et al. Effects of different films on soil water, temperature and corn growth characteristics under drip-irrigation conditions in semi-arid region[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(1): 107-113. (in Chinese)
- 11 谢夏玲,赵元忠. 玉米膜下滴灌土壤温度的变化规律[J]. 灌溉排水学报,2008,27(1):90-92.
Xie Xialing, Zhao Yuanzhong. Patterns of soil temperature under drip irrigation with mulch in maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(1): 90-92. (in Chinese)
- 12 张治,田富强,钟瑞森,等. 新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律[J]. 农业工程学报,2011,27(1):44-51.
Zhang Zhi, Tian Fuqiang, Zhong Ruisen, et al. Spatial and temporal pattern of soil temperature in cotton field under mulched drip irrigation condition in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 44-51. (in Chinese)
- 13 李明思,康绍忠,杨海梅. 地膜覆盖对滴灌土壤湿润区及棉花耗水与生长的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(6):49-54.
Li Mingsi, Kang Shaozhong, Yang Haimei. Effects of plastic film mulch on the soil wetting pattern, water consumption and growth of cotton under drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 49-54. (in Chinese)
- 14 窦超银,康跃虎,万书勤,等. 覆膜滴灌对地下水浅埋区重度盐碱地土壤酶活性的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(3):44-51.
Dou Chaoyin, Kang Yuehu, Wan Shuqin, et al. Effect of mulch-drip irrigation on soil enzyme activities of saline-sodic soil with shallow water table[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 44-51. (in Chinese)
- 15 张振华,蔡焕杰,杨润亚,等. 沙漠绿洲灌区膜下滴灌作物需水量及作物系数研究[J]. 农业工程学报,2004,20(5):97-100.
Zhang Zhenhua, Cai Huanjie, Yang Runya, et al. Water requirements and crop coefficients of drip-irrigated crop under mulch in Minqin County Oasis[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 97-100. (in Chinese)
- 16 马富裕,李俊华,李明思,等. 棉花膜下滴灌增产机理及主要配套技术研究[J]. 新疆农业大学学报,1999,22(1):63-68.
Ma Fuyu, Li Junhua, Li Mingsi, et al. Study on increased yield mechanism under mulch drip irrigation and main coordinated techniques[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 1999, 22(1): 63-68. (in Chinese)
- 17 Shrivastava P K, Parikh M M, Sawani N G, et al. Effect of drip irrigation and mulching on tomato yield[J]. Agricultural Water Management, 1994, 25(2): 179-184.
- 18 Tiwari K N, Mal P K, Singh R M, et al. Response of okra to drip irrigation under mulch and non-mulch conditions[J]. Agricultural Water Management, 1998, 38(2): 91-102
- 19 Tiwari K N, Singh Ajai, Mal P K. Effect of drip irrigation on yield of cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) under mulch and non-mulch conditions[J]. Agricultural Water Management, 2003, 58(1): 19-28.
- 20 Wang F X, Wu X X, Shock C C, et al. Effect of drip irrigation regimes on potato tuber yield and quality under plastic mulch in arid Northeast China[J]. Field Crops Research, 2011, 122(1): 78-84.
- 21 Spehia R S, Sharma V, Raina J N, et al. Effect of irrigation levels and polyethylene mulching on growth, yield and quality of rabi onion (*Allium cepa*) [J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2013, 83(11): 1184-1188.
- 22 Yaghi T, Arslan A, Naoum F. Cucumber (*Cucumis sativs*, L.) water use efficiency (WUE) under plastic mulch and drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2013, 128: 149-157.
- 23 康静. 内蒙古东北地区玉米覆膜灌溉的效应研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
Kang Jing. The effects of maize growth under mulched under mulched drip irrigation in the Northeast Inner Mongolia Region[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

35(12): 2252 – 2257. (in Chinese)

19 郭银巧, 李存东, 郭新宇, 等. 玉米水分管理动态知识模型的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 165 – 169.
Guo Yingqiao, Li Cundong, Guo Xinyu, et al. Design and implementation of dynamic knowledge model for maize water management[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 165 – 169. (in Chinese)

20 赵福成, 景立权, 闫发宝, 等. 灌浆期高温胁迫对甜玉米籽粒糖分积累和蔗糖代谢相关酶活性的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(9): 1644 – 1651.
Zhao Fucheng, Jing Liquan, Yan Fabao, et al. Effects of heat stress during grain filling on sugar accumulation and enzyme activity associated with sucrose metabolism in sweet corn[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(9): 1644 – 1651. (in Chinese)

21 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 不同时段低温冷害对玉米灌浆和产量的影响模拟[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(9): 115 – 127.
Zhang Jianping, Zhao Yanxia, Wang Chunyi, et al. Modeling the impact of low temperature disaster during different development stages on grain filling processes and yields of maize[J]. Journal of Northwest A&F University: Nature Science Edition, 2012, 40(9): 115 – 127. (in Chinese)

22 史建国, 崔海岩, 赵斌, 等. 花粒期光照对夏玉米产量和籽粒灌浆特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4427 – 4434.
Shi Jianguo, Cui Haiyan, Zhao Bin, et al. Effect of light on yield and characteristics of grain-filling of summer maize from flowering to maturity[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(21): 4427 – 4434. (in Chinese)

23 曹彩云, 李科江, 崔彦宏, 等. 长期定位施肥对夏玉米籽粒灌浆影响的模拟研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 48 – 53.
Cao Caiyun, Li Kejiang, Cui Yanhong, et al. Modeling the effect of long-term fertilization on grain filling of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(1): 48 – 53. (in Chinese)

24 张智猛, 戴良香, 胡昌浩, 等. 玉米灌浆期水分差异供应对籽粒淀粉积累及其酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(4): 636 – 643.
Zhang Zhimeng, Dai Liangxiang, Hu Changhao, et al. Effects of different water treatments on starch accumulation and related enzyme activity in grain of maize during grain filling period[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(4): 636 – 643. (in Chinese)

25 汪可欣, 付强, 姜辛, 等. 秸秆覆盖模式对玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 181 – 186.
Wang Kexin, Fu Qiang, Jiang Xin, et al. Effect of straw mulching mode on maize physiological index and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 181 – 186. (in Chinese)

26 Yang J C, Peng S B, Visperas R M, et al. Grain and dry matter yields and partitioning of assimilates in Japonica/Indica hybrid rice[J]. Crop Sciences, 2002, 42(3): 756 – 772.

27 付雪丽, 张惠, 贾继增, 等. 冬小麦-夏玉米“双晚”种植模式的产量形成及资源效率研究[J]. 作物学报, 2009, 35(9): 1708 – 1714.
Fu Xueli, Zhang Hui, Jia Jizeng, et al. Yield performance and resources use efficiency of winter wheat and summer maize in double late-cropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(9): 1708 – 1714. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 104 页)

24 吕殿青, 邵明安, 王全九. 土壤持水特征测定中的容重变化及其确定方法[J]. 水利学报, 2003, 34(3): 110 – 114.  
Lü Dianqing, Shao Ming'an, Wang Quanjiu. Bulk density changing during measuring soil water retention characteristics and its determining method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(3): 110 – 114. (in Chinese)

25 赵京考, 卢静, 谷思玉, 等. 降雨量和氮素对黑土区春玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 74 – 78.  
Zhao Jingkao, Lu Jing, Gu Siyu, et al. Effects of precipitation and nitrogen on spring corn yield in black soil region[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 74 – 78. (in Chinese)

26 Tarkalson D D, Payero J O. Comparison of nitrogen fertilization methods and rates for subsurface drip irrigated corn in the semi-arid great plains[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(5): 1633 – 1643.

27 Li J, Meng Y, Li B. Field evaluation of fertigation uniformity as affected by injector type and manufacturing variability of emitters[J]. Irrigation Science, 2007, 25(2): 117 – 125.

28 Li J, Meng Y, Liu Y. Hydraulic performance of differential pressure tanks for fertigation[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(6): 1815 – 1822.

29 Dajaman K, Irmak S, Rathje W R, et al. Maize evapotranspiration, yield production functions, biomass, grain yield, harvest index, and yield response factors under full and limited irrigation[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(2): 273 – 293.

30 GB 1353—2009 玉米[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

31 Wang Z, Li J, Li Y. Effect of drip irrigation system uniformity and nitrogen applied on deep percolation and nitrate leaching during growing seasons of spring maize in semi-humid region[J]. Irrigation Science, 2014, 32(3): 221 – 236.