

# 黑土区肥料运筹对玉米生物性状及水肥利用效率的影响

胡蜀东, 王秀茹

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:**为了寻求东北黑土耕作区适宜的水肥管理模式,在大田试验的基础上,设计了有膜(M)和无膜(W)两种覆盖处理,3个施肥水平 $230 \text{ kg N}/\text{hm}^2$ (W1), $280 \text{ kg N}/\text{hm}^2$ (W2)和 $330 \text{ kg N}/\text{hm}^2$ (W3),3种施肥比例 $60\%-40\%-0\%$ (F1), $60\%-20\%-20\%$ (F2)和 $33\%-33\%-33\%$ (F3),分别设置1组对照,共计20种处理。研究了覆膜、施肥量与施肥方式的差异对作物耗水量、玉米作物生长性状、水分利用效率以及肥料偏生产力的影响。结果表明:覆膜处理减少了土壤水分的无效蒸发,随着施肥量的增加,玉米植株的生长优势明显,同时植株对于土壤水分的需求量也相应增加,在WW3F2施肥处理条件下的土壤水分消耗最大;施肥量和施肥比例的不同导致玉米植株的生长性状及产量存在一定的差异,在施肥比例方案 $60\%-20\%-20\%$ (F2)下,随着施肥量的增加,植株对于土壤养分的利用效率提高,其中MW3F2处理方式下植株产量相对MW3F1和MW3F3处理分别提升了2.8%和12.7%;在肥料运筹模式选取中,采用提升耗水量和肥料用量的方式,能够提高了玉米的产量,降低了土壤水分利用效率和肥料偏生产力。综合耗水量和肥料用量两个因素,MW1F2和MW3F2模式在黑土区优势较为明显。

**关键词:**水肥耦合; 覆膜; 耗水量; 水分利用效率

中图分类号:S158.3 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2017)04-0219-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.04.035

## Effects of Fertilization on Biological Properties and Water and Fertilizer Use Efficiency of Maize in Black Soil Region of Northeast China

HU Shudong, WANG Xiuru

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

**Abstract:** From April 15 to October 15 in 2015, a field experiment was carried out to explore the appropriate water and fertilizer management mode in the farming area of black soil in Northeast China. In this paper, the effects of mulching, fertilizer amount and fertilization model on water consumption, maize biological characters, water use efficiency (WUE) and partial fertilizer productivity were studied. The experiment consist of two mulching treatments, i. e. mulching (M) and no-mulching (W), 3 fertilization levels with  $230 \text{ kg N}/\text{hm}^2$  (W1),  $280 \text{ kg N}/\text{hm}^2$  (W2) and  $330 \text{ kg N}/\text{hm}^2$  (W3), and 3 fertilization schemes of  $60\%-40\%-0\%$  (F1),  $60\%-20\%-20\%$  (F2),  $33\%-33\%-33\%$  (F3), a total of 20 treatments. Results showed that the film mulching treatments reduced the ineffective evaporation of soil moisture. Plant grew much better with the increase of fertilizer amount, then the demand for soil moisture increased, and the maximum soil moisture consumption treatment was WW3F2. Moreover, the differences of fertilizer amount and fertilization scheme result in different biological characters and plant yield. Soil nutrient use efficiency increased with increasing fertilizer amount under F2 treatment, specifically, plant yield of MW3F2 increased by 2.8% and 12.7% compared with MW3F1 and MW3F3, respectively. Finally, heavy fertilization and water consumption could increase the yield, while decreased WUE and fertilizer partial productivity, and also MW1F2 and MW3F2 were the priority of planting pattern in black soil area.

**Keywords:** water and fertilizer; film mulching; water consumption; WUE

水资源短缺一直以来是受人类关注的世界性问题,在我国水资源人均占有量匮乏,并且在地域和季节分配上

极其不平衡,尤其是在我国的东北、西北和华北地区,在一定程度上制约了地方的经济与社会发展<sup>[1-3]</sup>。随着全

球水资源短缺的现状日益加剧,人们为了提高农业生产效率,往往通过增加施肥量来增加粮食的产量,非但没有收到预想的增产效果,反而使土壤的盐渍化程度加重,土壤板结恶化<sup>[4-5]</sup>。随着节水、节肥和新型灌溉理论和技术的推广,逐渐体现出水肥合理调配能够明显地提高作物产量和水肥利用效率<sup>[6-9]</sup>。水分与肥料对于作物的生长影响不是孤立的,而是存在相互作用、相互依存的关系,二者有效结合是提升农业生产效率、改善农业土壤环境的重要途径<sup>[10-11]</sup>。

近年来,国内外对于农田水肥耦合效应进行了大量的研究,Cabello 等<sup>[12]</sup>在西瓜生育过程中,控制不同灌水量与施肥处理,探究了西瓜的生长性状及产量,发现一定条件下的水分亏缺处理不会明显降低西瓜的产量,反而能获得较高的水分利用效率;Bruulsema 等<sup>[13]</sup>提出确保肥料发挥最大的效益需要同时兼顾系统的生产能力、经济利润、可持续性以及环境生态效益,并且确定了在综合肥料生产效率情况下多目标适宜的肥料运筹模式;Cabello 等<sup>[14]</sup>研究了不同水氮处理对于甜瓜产量和品质的影响,表明当灌水量与实际蒸发量相同、施氮量为  $90 \text{ kg N}/\text{hm}^2$  时,其水分利用效率最高,在中度水分亏缺的条件下,对其产量和品质影响较小;孙文涛等<sup>[15]</sup>研究表明影响番茄产量的主要因素是灌水量与钾肥的交互作用,其次は氮肥的施用量;吴立峰等<sup>[16]</sup>研究了滴灌施肥条件下水肥耦合对于棉花籽面产量、水分利用效率和净收益的影响,探求了满足目标综合效益最大化的滴灌水肥用量;李建明等<sup>[17]</sup>研究了大棚滴管灌溉上限与施肥量耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响,建立了光合与产量指标的数学模型,分析了水肥两因子的耦合效应。之前的研究大多侧重于水肥配合比对于作物光合作用的影响,而对于综合考虑覆盖、滴灌及肥料运筹方式等因素对于玉米生长性状和水氮利用效率的研究较少。

松嫩平原黑土区玉米种植仍然存在着沿用地面灌溉、地面撒施等传统灌水施肥方式,部分地区由于用养失调、灌溉施肥不合理等原因导致作物水肥利用效率低下,而研究玉米的施肥频率、单次施肥量以及施肥运筹方式的研究较少。本文研究了黑土区滴灌条件下不同施肥方案对于作物生长性状、对水肥利用效率的影响以及黑土区春玉米水肥耦合效应的响应机理,从而得到玉米最优水肥组合方案,并将为松嫩平原黑土区开展膜下滴灌种植模式和制定最佳肥料运筹模式提供理论支撑和借鉴意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

该试验区位于黑龙江省哈尔滨市新农镇试验田,

区域位于黑龙江省南部,地处于松嫩平原腹地,地理位置为北纬  $45^{\circ}53' \sim 46^{\circ}33'$ ,东经  $123^{\circ}45' \sim 124^{\circ}31'$  之间,平均海拔 143 m。该试验场全年日照时数在 2 450~2 600 h 之间,可以满足农作物生长的需要,全年无霜期 120 d 左右。全年最低温在 1 月份,平均气温为  $-20.5^{\circ}\text{C}$ ,最高温在 7 月份,平均气温为  $21.6^{\circ}\text{C}$ 。年均蒸发量在 1 000~1 150 mm 之间,年均降水量为 654.2 mm,作物生育期内空气相对湿度为 72%。试验区土壤类型为壤土,土壤颗粒结构空隙相对较大,质地疏松,持水能力较强。通过典型区域抽样检测可知,土壤干容重的平均水平为  $1.38 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,有机质含量  $2.12 \text{ g}/\text{kg}$ ,速效磷含量  $13.67 \text{ mg}/\text{kg}$ ,速效钾含量  $182.30 \text{ mg}/\text{kg}$ ,全氮含量  $0.88 \text{ g}/\text{kg}$ ,碱解氮含量  $52.20 \text{ mg}/\text{kg}$ 。

### 1.2 试验设置

试验于 2015 年 4 月 15 日至 10 月 15 日进行,共布置 60 个试验小区,每个小区设置为  $5.2 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ ,在试验区周围设置 1 m 宽的保护行。采用大垄双行栽培模式,相邻两垄间距 130 cm,垄上播种行距 40 cm,垄宽 100 cm,垄高 15 cm,垄间沟底宽 30 cm,地膜宽度 120 cm(厚度 0.008 mm),采用有孔处理形式。每个小区布置 4 垒,每垄种植 2 行玉米,玉米株距 20 cm(图 1)。每个小区布置 4 条滴灌带,每条滴灌带位于垄上玉米行中间,滴灌带选用绿源公司生产的滴头流量为  $1.38 \text{ L}/\text{h}$  的薄壁滴灌带,滴头间距为 30 cm,管外径为 16 cm。播种前参考当地的传统施肥量,各处理施氮  $52 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,试验肥料为尿素。在试验前期,通过一次性取土样,采用烘干法测定土壤初始质量含水率,求得土壤的饱和含水率和土壤干容重,土壤田间持水率通过威尔科克斯法测定<sup>[18]</sup>,有机质成分和土壤质地分别通过容量法<sup>[19]</sup>和比重法<sup>[20]</sup>进行测定。具体结果见表 1。

表 1 土壤物理参数

土层 深度/cm	饱和 含水率/%	初始 含水率/%	田间 持水率/%	土壤 干容重/%	有机质/ %	土壤 质地
0~20	42.80	28.60	34.73	1.47	3.38	
20~40	41.60	28.77	33.86	1.52	3.07	
40~60	39.11	29.34	34.02	1.49	1.87	壤土
60~80	40.45	28.18	34.27	1.56	1.12	
80~100	39.33	27.34	32.69	1.59	2.34	

综合考虑覆膜和各生育期施肥比例对于作物长势以及水肥利用效率的响应关系,播种模式分为有膜(M)和无膜(W)两种处理,同时,在播种前施肥的基础上,结合东北松嫩平原种植玉米施肥管理粗放以及农田水土流失较严重的现状,参考当地传统的施肥经验以及参考文献的施肥量和施肥频率<sup>[21]</sup>,在玉米全生育期内的施肥量分别设置为 230, 280, 330 kg N/

$\text{hm}^2$  3个水平,分别定义为 W1、W2、W3 处理。同时,考虑玉米生长过程及玉米不同生育期对于肥料的需求量差异,分别于玉米的拔节、抽穗、灌浆初期进行追肥,每种施肥量设置3种施肥比例,分别为 60%—40%—0%, 60%—20%—20% 和 33%—33%—33%,分别定义为 F1、F2、F3,每种处理重复3次。此

外,在有膜和无膜处理条件下,分别设置1种无施肥的对照组(MCK 和 WCK),共计 20 种试验处理方式。播种前,随底肥统一灌水 10 mm,每次施肥的时候,为满足追肥需要,追肥期统一灌水 15 mm,使肥料随水施入大田,施肥的日期分别为 7 月 3 日,7 月 25 日和 8 月 9 日。

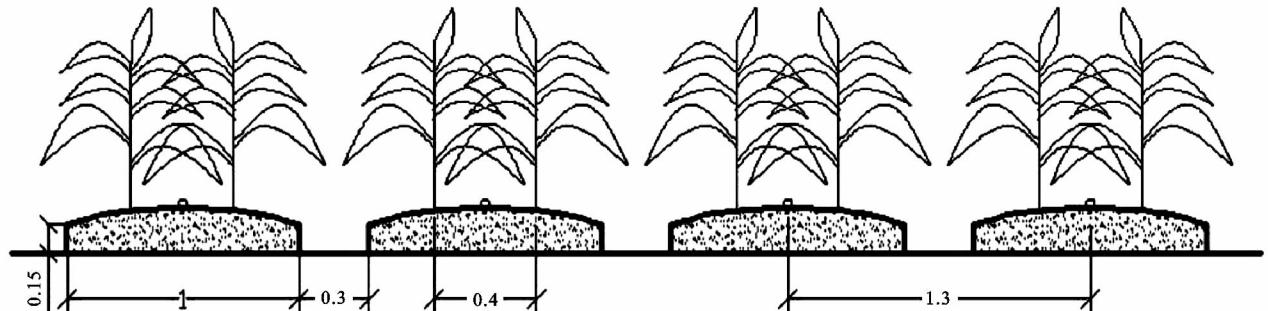


图 1 小区玉米栽培布置示意

### 1.3 研究方法

(1) 土壤含水率:采用时域反射仪(TDR)进行测定,TDR 测管埋深 1 m,主要测定 20, 40, 60, 80, 100 cm 处的含水率,取其平均值作为植株根系含水率。同时,在不同生育时期,采用烘干法测定土壤含水率,用以校核 TDR 的测量精度。

(2) 作物耗水量 ET:玉米田间耗水量计算公式为<sup>[22-23]</sup>:

$$ET = P_r + U + I - D - R - \Delta W$$

式中:  $ET$  为作物耗水量( $\text{mm}$ );  $P_r$  为降水量( $\text{mm}$ );  $U$  为地下水补给量( $\text{mm}$ );  $I$  为灌水量( $\text{mm}$ );  $R$  为径流量( $\text{mm}$ );  $D$  为深层渗漏( $\text{mm}$ );  $\Delta W$  为试验初期和末期土壤储水量的变化量( $\text{mm}$ )。

由于试验区内地下水位较低,并且小区内没有径流,故  $P_r$ 、 $U$ 、 $R$ 、 $D$  均可以忽略不计,将公式化简为:

$$ET = P_r + I - \Delta W$$

(3) 棵间蒸发量  $E$ :采用微型蒸渗仪和电子天平(精度 0.1 g)测定棵间蒸发量,每天下午 5:00 测量一次。微型蒸渗仪由内外两个 PVC 材质小桶组成,内桶高度 15 cm,外径 11 cm,壁厚 0.30 cm。内桶直径稍小于外桶,两桶高度一致。用微型蒸渗仪取土时,先将内桶打入原土中,取出后将底部修平,并用纱布包裹,再将外桶置于取土处固定。每小区安装 2 个微型蒸渗仪,根据两次称量结果差值和内桶表面积,换算得到逐日土壤蒸发量。其中,在无覆膜处理下,蒸渗仪埋置在玉米植株棵间地表处,不做其他处理,而在覆膜处理下,将蒸渗仪埋置于地表后,进行覆膜处理。称重时将薄膜掀起,称重后做好覆盖处理,保证试验处理的对比性,避免土壤水分无效蒸发。

(4) 作物生长指标:株高测算采用从地面到植株顶部的高度;茎粗测定地面上近地面第三节间的直径;叶面积测定设置为在每个生育期选取具有代表性

的苗株,测定叶片的长( $L$ )、宽( $B$ ),计算公式为:

$$\text{单株叶面积} = \frac{\sum L \times B \times 0.75}{N}$$

叶面积指数的计算公式为:

$$\text{LAI} = 0.75 \rho \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n L_{ij} \times W_{ij}}{m}$$

式中: 0.75 为校正系数;  $\rho$  为玉米植株密度;  $m$  为测量株数;  $L_{ij}$  和  $W_{ij}$  分别为第  $i$  株玉米的第  $j$  片叶片的长度和最大宽度。

(5) 水分利用效率和肥料偏生产力:作物水分利用效率( $\text{kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ )的计算公式为:

$$\text{WUE} = \frac{Y}{ET}$$

式中:  $Y$  为作物产量。

肥料偏生产力( $\text{kg}/\text{kg}$ )的计算公式为:

$$\text{PFP} = \frac{Y}{F_T}$$

式中:  $F_T$  为肥料使用总量( $\text{kg}$ )。

(6) 在试验区的西侧安置(PC-3 锦州阳光)自动气象站 1 台,记录大气环境中环境温度、露点温度、环境湿度、 $\text{CO}_2$  浓度、蒸发量、饱和水汽压等指标。玉米生育期内试验区的气温、辐射、降水以及蒸发量情况见图 2 和图 3。

采用 SPSS 19.0 软件对不同处理条件下玉米植株的各测量指标进行相关性分析和回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤含水率变化

在旱作玉米生育期内,不同覆膜、施肥处理条件下土壤含水率变化过程见表 2。随作物生育期的变化,土壤含水率的变化趋势整体呈现下降趋势。通过显著性分析可知,施肥方式的不同与土壤水分的差异具有一定的相关性,覆膜处理中,这种相关性更加显

著。同时,施肥量和施肥方式的交互作用与土壤的含水率的关联性较低。

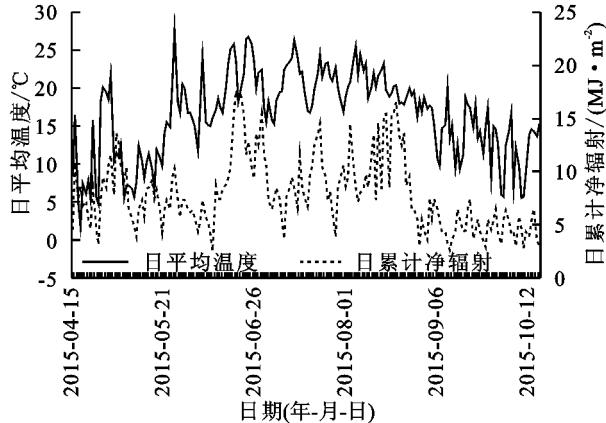


图 2 试验区温度变化曲线

在 WW1F1、WW1F2、WW1F3 施肥方案中拔节期土壤含水率分别为 29.03%、29.32% 和 30.45%, 对比发现 WW1F3 处理下含水率水平最高。拔节期的玉米植株处于生长的旺盛时期, 对于土壤的含水率需求量较大, 而 WW1F1、WW1F2 处理促进了植株对于土壤水分的吸收, 所以这两种处理的土壤含水率低于 WW1F3 处理。在 W2 施肥量水平下, 其施肥量相对于 W1 有所增加, WW2F1、WW2F2、WW2F3 处理下土壤含水率相对于 WW1F1、WW1F2、WW1F3 处理有所降低, 对比 3 种不同施肥比例方案下的土壤含水率状况, 表

现出 WW2F1 和 WW2F2 处理的含水率较 WW2F3 处理分别减少 2.34%、3.50%, 产生这种现象的原因是由于 F1 和 F2 施肥比例下拔节期植株的生长旺盛, 耗水量较大。同理, 在 W3 施肥量下, 这种趋势表现的更加明显, 330 kg N/hm<sup>2</sup> 施肥量可为植株生长提供充足的氮素供给, 因此 WW3F2 施肥方案下作物的耗水量最大。而对照组 WCK 处理地块的土壤含水率处于较高的水平, 分别高于不同施肥量处理条件, 说明植株对于土壤水分的消耗量较低。

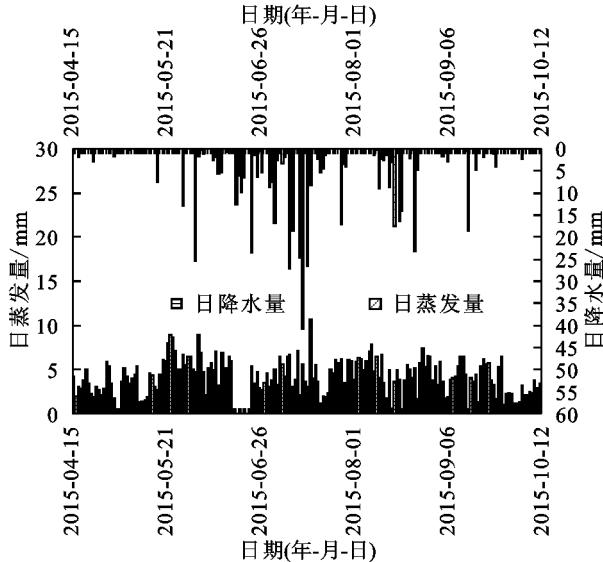


图 3 试验区降水变化过程

表 2 不同处理条件下各个生育期土壤含水率变化

单位: %

施肥量	施肥 处理	无覆膜处理 W			覆膜处理 M		
		拔节期	抽穗期	灌浆期	拔节期	抽穗期	灌浆期
W1	F1	29.03	28.81	26.74	29.39	30.56	27.57
	F2	29.32	27.31	25.54	29.87	30.86	26.17
	F3	30.45	27.74	27.13	30.73	29.45	23.98
W2	F1	27.97	26.83	24.18	30.11	27.70	24.56
	F2	26.81	24.37	23.46	29.26	25.53	23.89
	F3	30.31	23.80	25.11	32.54	24.97	24.97
W3	F1	26.55	25.10	24.21	28.81	26.48	25.68
	F2	25.12	22.37	23.78	27.83	25.53	24.37
	F3	28.87	26.40	23.99	31.60	26.66	24.11
CK		29.56	28.31	27.59	32.35	30.66	28.46
施肥量		F=21.34	F=7.65	F=9.37	F=21.54	F=31.24	F=12.74*
施肥方式		F=15.49*	F=12.37	F=14.57*	F=11.24*	F=7.51*	F=8.64*
施肥量×施肥方式		F=1.042	F=0.896*	F=1.875	F=1.074*	F=0.967	F=1.237*

注: \* 表示在 0.05 水平上差异显著; \*\* 表示在 0.01 水平上差异显著。下同。

在抽穗期和灌浆期, 植株对土壤水分需求进一步增加, 土壤含水率逐渐降低, 在 WW1F1 处理中, 抽穗期和灌浆期土壤含水率相对于拔节期分别降低 0.22% 和 2.29%, 而在 WW1F2 处理中, 抽穗期和灌水期土壤含水率相对于拔节期分别降低了 2.01% 和 3.78%, 土壤含水率的降低幅度大于 WW1F1 处理; WW1F3 处理在灌浆期土壤含水率相对于拔节期降低了 3.32%, 对比分析可知, WW1F2 处理(60%—20%—20%)作物耗水量最大。同时, 在 W2 施肥量的情况下, WW2F1、

WW2F2、WW2F3 处理中土壤含水率在灌浆期相对于拔节期的缩减量分别为 3.79%、3.35% 和 5.2%, WW2F2 处理中土壤含水率的变化幅度较大。同理, 随着土壤施肥量的增加, 在 W3 水平下, WW3F2 方案中土壤含水率处于较低的水平。在不同施肥总量以及覆膜条件下, F1、F2 和 F3 施肥比例中土壤含水率的变化趋势与无覆膜处理的变化趋势一致, 但是整体含水率水平高于无覆膜处理。

通过分析作物生育期内土壤含水率变化差异的原

因可知,在玉米植株的全生育过程中,土壤水分的消耗主要有两种方式:一是受环境中温度、辐射、风速等气象因子的驱动影响而产生的无效蒸腾;二是植株蒸腾作用所产生的消耗,植株根系从土壤中吸收水分,同时植株体内所需的矿质元素伴随其运输、蒸腾能力的强弱也体现了植株的长势优劣。在本研究中,随着施肥量的增加,土壤含水率水平逐渐降低,表明植株的蒸腾能力逐渐增强,也从侧面反映了其长势良好。同时,结合植物生理过程特征,F2施肥比例方案更满足植株生长对于矿质元素的需要,因此,F2方案下的土壤含水率水平相对较低。此外,覆膜处理在保证植株充分吸收土壤矿质元素的同时,也避免了土壤水分的大量散失,对于土壤的保温、保墒起到了积极作用。

## 2.2 植株生长及产量的差异

在玉米植株生育期内,选择在拔节期测量统计植株的株高、茎粗、叶面积指数等指标,并且在成熟期对其进行测产。从表3可以看出,在WW1F1、WW1F2、WW1F3处理下的玉米植株株高分别为224,236,221 cm,其中F2施肥比例下的玉米植株处于相对较高的水平,相对于对照组(WCK)分别增加5,17,2 cm,表明施肥对增强植株的生长具有一定的促进作用。随着施肥量的增加,在WW2F1、WW2F2

和WW2F3处理下玉米植株的株高相对于WW1F1、WW1F2、WW1F3处理分别增加了10,5,9 cm,尽管WW2F2处理中,株高增加的数值相对较低,但植株株高却最大;此外,WW3F2处理相对于另外两种处理同样体现出较强的株高优势。在覆膜条件下,由于覆盖具有良好的保水保肥效果,植株的株高整体相对于无覆膜处理有所提高,并且在MW3F2处理中,植株的株高处于最高水平。

在玉米植株的生长过程中,随着植株的茎粗增加,其抗倒伏能力增强。WW1F1、WW1F2、WW1F3处理中植株的茎粗分别为2.51,2.64,2.63 cm,F2和F3处理水平下,植株的茎粗优势较强,在同等施肥处理条件下,覆膜处理(M)植株的茎粗增加,MW1F1、MW1F2和MW1F3处理下植株的茎粗相对于WW1F1、WW1F2和WW1F3处理分别增加了3.1%,1.9%和1.5%。同时,随着土壤施肥量的增加,植株对于土壤中养分吸收更加充分,植株的生长状况良好,在W2和W3施肥水平下,植株的茎粗与株高呈现出正比例增长趋势,在MW3F2处理中,植株的茎粗达到了2.91 cm,相对于其他处理有了显著提高。此外,通过对比分析可知,玉米植株的叶面积随施肥量的增加同样体现出增大的趋势。

表3 不同处理条件下植株生物性状差异

施肥量	施肥处理	无覆膜处理 W				覆膜处理 M			
		株高/cm	茎粗/cm	叶面积/cm <sup>2</sup>	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	株高/cm	茎粗/cm	叶面积/cm <sup>2</sup>	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
W1/230	F1	224	2.51	6354	7515	231	2.59	6413	8023
	F2	236	2.64	6511	8244	246	2.69	6654	9373
	F3	221	2.63	6413	7834	237	2.67	6498	8823
W2/280	F1	234	2.59	6824	8645	253	2.62	6913	9159
	F2	241	2.73	6913	9561	261	2.76	7123	10519
	F3	230	2.64	6846	8342	260	2.68	7024	9818
W3/330	F1	251	2.71	7013	9531	258	2.83	7316	9928
	F2	263	2.86	7221	10585	271	2.91	7484	10206
	F3	253	2.71	7198	9793	263	2.72	7298	9051
CK		219	2.31	6013	7631	229	2.46	6376	8195
施肥量		$F=27.58^*$	$F=2.75$	$F=87.41$	$F=134.41$	$F=21.45$	$F=3.75$	$F=97.32$	$F=87.35$
施肥方式		$F=9.34^*$	$F=4.57^*$	$F=35.87$	$F=54.86^*$	$F=10.21^*$	$F=7.52^{**}$	$F=75.54^*$	$F=42.45^*$
施肥量×施肥方式		$F=0.343^*$	$F=2.456^*$	$F=1.241^*$	$F=2.347$	$F=1.347^*$	$F=2.976^*$	$F=1.321$	$F=1.875^*$

此外,统计不同处理条件下作物产量可知,在有膜和无膜覆盖处理中,W1、W2、W3施肥条件下,F2(60%—20%—20%)施肥比例处理条件下的作物产量均高于F1和F3施肥比例方案。通过表3分析可知,单纯的增加施肥量对于提升植株的株高、茎粗、叶面积指数以及作物的产量关系影响效果较低,而改善施肥的方式以及施肥量与施肥方式的交互作用对于改善植株的生长性状差异性显著。

通过分析玉米植株的长势以及作物产量的差异可知,植株的株高、茎粗、叶面积等形态指标是土壤养分、水分以及环境共同作用的结果。在试验区内,

其所处的环境差异不大,因此,植株的长势差异主要取决于土壤施肥总量及其施肥比例方案。随着土壤施肥量的增加,逐渐满足作物生长的需要,植株的性状优势愈发明显。由于拔节期植株处于生长的旺盛期,对于土壤养分的需求量较大,而抽穗期和灌浆期对其依赖程度相对较低,F2(60%—20%—20%)施肥比例方案下的植株长势优于其他两种方案,表明充足的施肥量以及适宜的施肥方式对于植株的性状改良和产量的提升具有一定的影响。此外,合理的肥料运筹模式更容易促进植株光合作用的效果,保证果实的积累。

### 2.3 作物耗水量动态变化及其与叶面积指数关系

在旱作玉米的生育过程中,作物耗水量的多少决定植株对土壤矿质元素的吸收,影响水肥耦合的作用机制,进而决定作物干物质的积累,从另一个角度作

物耗水量也对植株的水分利用效率和肥料偏生产力起到一定的关联作用。在试验过程中,通过记录灌水量、大气降水量以及核算土壤含水率变化量来计算作物生育过程中的耗水量,具体情况见图 4。

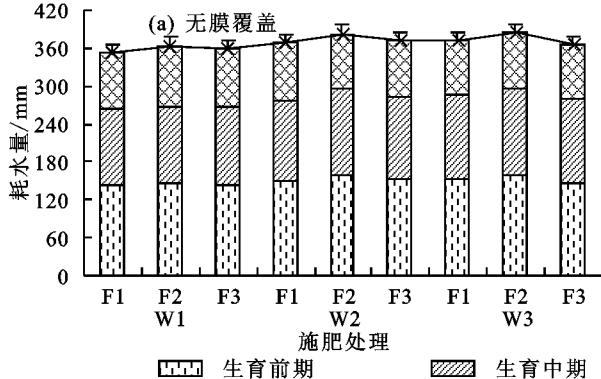


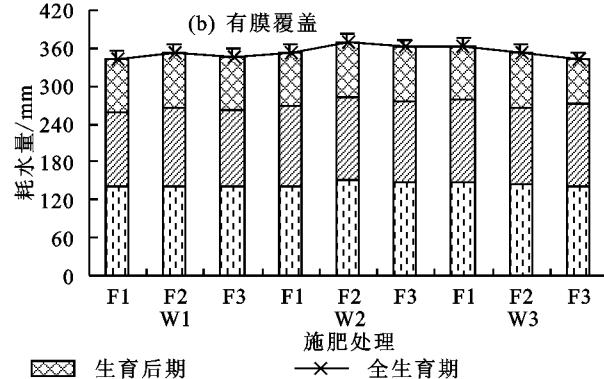
图 4 不同处理条件下含水量差异分析

在 WW1F1 处理中作物耗水量为 352.16 mm,而 WW1F2、WW1F3 处理的耗水量分别为 364.12 mm 和 358.19 mm,通过比较可知,WW1F2 处理的土壤水分消耗量较大;在 W2 施肥量水平下,WW2F2 处理的作物耗水量相对于 WW2F1 和 WW2F3 处理分别增加了 3.9% 和 3.1%。同理,在 W3 施肥量水平下,WW3F2 处理的耗水量同样要超过 WW3F1 和 WW3F3 处理,在整个作物生育过程中,3 种施肥量情况中,F2 的施肥比例方案土壤水分消耗最大。

而对比覆膜处理可知,薄膜的覆盖在一定程度上阻碍了土壤水分的无效蒸发,而土壤水分的消耗方式主要是植株的蒸腾和根系的吸收,因此作物耗水量与无覆膜处理相比具有一定程度的缩减。其中,MW1F1、MW1F2、MW1F3 这 3 个处理作物的耗水量相对于无覆膜处理 WW1F1、WW1F2、WW1F3 分别降低了 2.86%,3.19% 和 3.05%,MW1F2 处理耗水量的降低趋势最为明显。与此同时,在 W2、W3 施肥量水平下,3 个处理中 F2 施肥比例下的节水能力最为明显。

根据微型蒸渗仪测量得出的棵间蒸发量  $E$  及上述的植株耗水量  $ET$ ,结合植株的叶面积指数 LAI,求证  $E/ET$  与 LAI 的关系见表 4。

表 4 各处理  $E/ET$  与 LAI 的关系



均表现出较好的指数关系,并且判定系数整体保持在 0.7 以上,体现出较好的相关性,整体上施肥处理二者的相关性强于无施肥的对照组。具体比较不同处理下的差异水平可知,覆膜条件下叶面积指数 LAI 与  $E/ET$  的相关性整体上高于无覆膜处理。此外,随着施肥量的增加,其  $E/ET$  与 LAI 的相关性有增强趋势,并且在不同施肥量条件下,F2 施肥比例方案的效果最为明显。

综合上述对于不同处理条件下的土壤水分的消耗状况以及植株长势差异可知,充足的养分以及合理的施肥比例方案促进了植株叶片的发育,作为植株光合作用以及蒸腾的主要器官,叶片长势的优劣决定着植株的物质积累及果实的形成;另一方面,蒸腾作用的强弱影响着棵间蒸发,决定着土壤水分的消耗。因此, $E/ET$  与 LAI 之间指数关系构建的精度以及拟合效果水平是植株生长发育与代谢程度状况的重要体现,表明随着土壤施肥量的增加,植株的代谢程度增强,并且在不同施肥量水平下,F2 施肥比例方案效果最为明显。

### 2.4 水肥利用效率的差异性及相关性分析

通过测算玉米植株的产量、生育期土壤含水率以及施加化肥总量,计算得出土壤水分利用效率和肥料偏生产力见图 5 和图 6。

由于无覆膜处理条件下,土壤水分消耗量较大,因此,覆膜处理条件下土壤水分利用效率整体优于无覆膜处理。通过具体分析可知,在 WW1F1 处理中土壤水分利用效率为  $21.34 \text{ kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ,WW1F2 和 WW1F3 处理中,土壤水分利用效率分别为  $22.64 \text{ kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$  和  $21.87 \text{ kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ,变化幅度较小,而在相同施肥方案中,覆膜处理条件下 MW1F1、MW1F2、MW1F3 处理相对于 WW1F1、WW1F2、WW1F3 处理分别提升了 9.88%,17.44% 和 16.41%,覆膜处理在保持土壤水分的同时,增加

从表 4 可以看出,各处理条件下  $E/ET$  与 LAI

施肥量 处理	无覆膜处理 W		覆膜处理 M	
	拟合曲线方程	R <sup>2</sup>	拟合曲线方程	R <sup>2</sup>
W1	$y = 0.8546e^{-0.57x}$	0.734	$y = 0.6637e^{-0.83x}$	0.752
	$y = 0.7412e^{-0.78x}$	0.794	$y = 0.8679e^{-0.74x}$	0.896
	$y = 0.8809e^{-0.56x}$	0.747	$y = 0.6478e^{-0.86x}$	0.754
W2	$y = 0.5175e^{-0.39x}$	0.716	$y = 0.8712e^{-0.72x}$	0.772
	$y = 0.7461e^{-0.57x}$	0.854	$y = 0.5746e^{-0.45x}$	0.903
	$y = 0.9130e^{-0.75x}$	0.787	$y = 0.8031e^{-0.77x}$	0.714
W3	$y = 0.7146e^{-0.63x}$	0.794	$y = 0.6647e^{-0.69x}$	0.814
	$y = 0.5947e^{-0.57x}$	0.826	$y = 0.8746e^{-0.57x}$	0.932
	$y = 0.7451e^{-0.49x}$	0.751	$y = 0.5972e^{-0.87x}$	0.784
CK	$y = 0.6712e^{-0.67x}$	0.712	$y = 0.3127e^{-0.58x}$	0.731

了作物的产量,土壤水分效率逐步提高。并且在 W3 施肥水平下,覆膜处理条件下 MW3F1、MW3F2、MW3F3 处理土壤水分利用效率相对于无覆膜条件下 WW1F1、WW1F2、WW1F3 处理分别提升了 28.44%,28.00% 和 20.94%, 并且 MW3F2 处理中土壤水分的利用效率达到最大值。

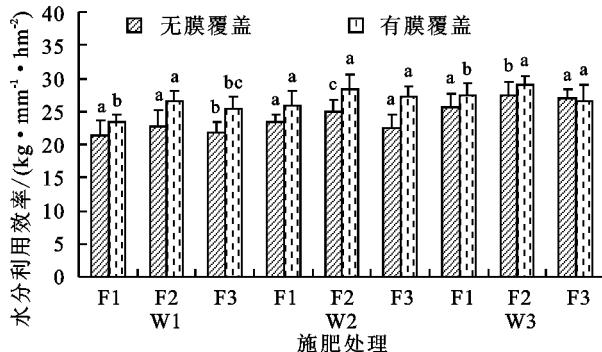


图 5 不同处理条件下水分利用效率差异分析

此外,分析对比土壤肥料偏生产力整体变化趋势可知,随着施肥量的增加,土壤的肥料偏生产力呈现出下降的趋势,表明随着施肥量的增加,单位肥料所生产的粮食出现了减弱趋势。具体分析可知,在 WW1F1、WW1F2、WW1F3 处理的土壤肥料偏生产力分别为 32.67, 35.84, 34.06 kg/kg, 而覆膜条件下,随着玉米产量的提升,其肥料偏生产能力也在增

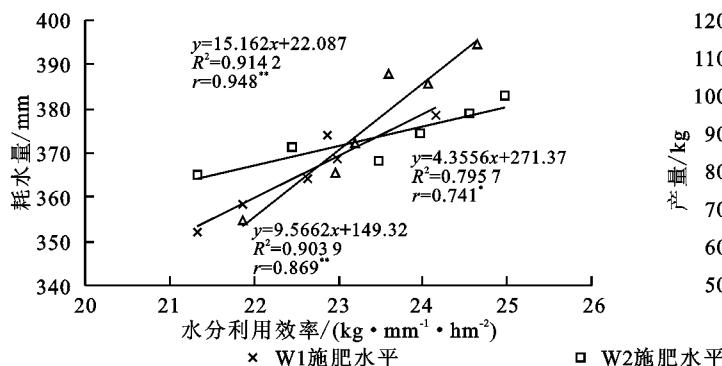
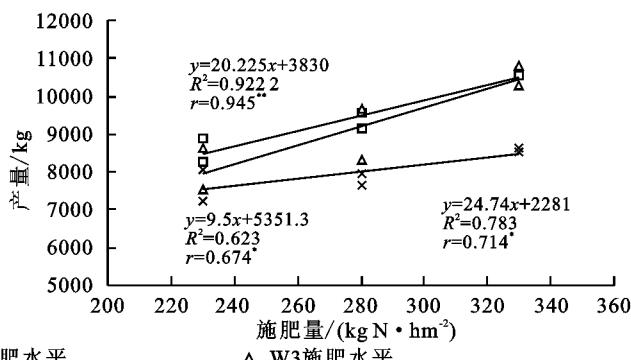


图 6 不同处理条件下肥料偏生产力差异分析

在测算不同水肥处理土壤水分利用效率和肥料偏生产力的基础之上,进行水肥利用效率回归分析,具体情况见图 7 和图 8。



注: \* 表示在 0.05 水平差异显著; \*\* 表示在 0.01 水平差异显著; r 表示皮尔逊相关系数; R² 表示回归分析的判定系数。

图 7 耗水量与水分利用效率相关关系

由土壤水分利用效率和作物耗水量相关性分析可知,在不同施肥水平下,土壤水分与肥料的耦合关系差异影响着玉米植株的产量,进而导致土壤水分利用效率存在一定差异。首先,通过 SPSS 19.0 对试验测定的 3 种不同施肥水平下的耗水量和水分利用效率进行 Pearson 相关性分析,W3 水肥水平下的相关系数为 0.948,而在 W1 和 W2 水平下,其相关系数依次为 0.869 和 0.741,并且在 W3、W1 水平下通过  $P=0.01$  显著性检验,在 W2 水平下通过  $P=0.05$  的显著性检验;随着施肥量的增加,3 种不同施肥水平条件下耗水量与土壤水分利用效率的相关系数表现为  $W3 > W1 > W2$ ,表明在 3 种不同施肥水平下,W3 处理能够较好地提升土壤水分利用效率。另外,通过回归分析可知,各处理判定系数  $R^2$  都高于 0.795 1,各处理耗水量随水

强,MW1F1、MW1F2、MW1F3 处理的土壤肥料偏生产力相对于 WW1F1、WW1F2、WW1F3 处理分别提升 6.7%, 13.69%, 12.6%。其中在覆膜条件下 F2 施肥比例方案下肥料偏生产力最高。而在 W2、W3 施肥水平下,尽管玉米植株的产量出现了一定程度的增加,但是大量的肥料消耗降低了肥料偏生产力,因此,W3 施肥水平下,MW3F1、MW3F2 和 MW3F3 处理的土壤肥料偏生产力分别为 28.88, 32.07, 29.67 kg/kg, 相比 WW1F1、WW1F2、WW1F3 处理出现了不同程度的降低。

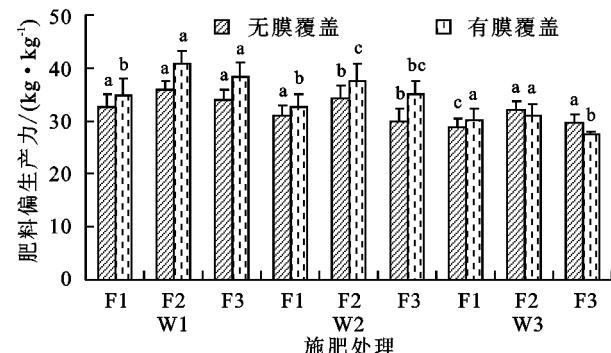


图 8 产量与施肥量相关关系

分生产效率的提高,其线性增长趋势明显。

同样,在作物产量与施肥量的 Pearson 相关性分析中,F1 施肥方案下的作物产量与施肥量之间的相关系数为 0.674,而 F2 和 F3 施肥方案下,二者的相关系数均呈现不同程度增加,并且 F2 施肥方案通过  $P=0.01$  显著性检验,该方案下产量与施肥量相关性最强,F1、F3 施肥方案通过  $P=0.05$  显著性检验。进而通过回归分析可知,在 F1 施肥比例条件下,二者之间的判定系数  $R^2$  为 0.623,其产量随着施肥量线性增长的趋势较差,而在 F2 和 F3 施肥比例方案下,其相关系数分别相对于 F1 方案提升了 0.299 和 0.160,其增长规律更符合图中的线性回归方程,增加土壤施肥量在一定程度上增加了玉米植株的产量。综合来看,从施肥方案最佳的角度来分析,F2 施肥比

例在玉米生产中充分地发挥了调节促进作用。

### 3 结论

(1)旱作玉米生育过程中,植物体内对于土壤矿质元素的吸收需要水分的运输,同时,植株叶片的蒸腾以及光合作用也需要大量的水分参与,土壤水分处于不断被消耗的状态。覆膜和无覆膜条件下,W3 水肥水平下 3 种施肥比例方案分别相对于 W1、W2 水平下的 3 种施肥方案土壤水分消耗有所增加,表明随着土壤施肥量的增加,植株对于土壤水分的消耗增大。而覆膜处理抑制了土壤水分无效蒸发,WW3F2 施肥比例方案的耗水量最大。

(2)覆膜、施肥量以及施肥方案的不同也导致了生育期内玉米植株的株高、茎粗、叶面积以及产量存在着一定的差异。充足的养分供应促进作物快速、高效地发育,并且适当合理的施肥方案有针对性地满足植株生长的需要。在 W3 施肥水平下,F2 施肥比例更有助于促进植株的光合产物的积累。覆膜处理起到了保温、保墒的作用,为作物的生长提供的适宜的环境。综合植株的生长指标及产量积累的角度分析,MW3F2 处理更适宜于该地区的农业生产。

(3)综合玉米植株生长过程中耗水量、肥料施用量以及玉米植株的产量等综合因素,土壤水分消耗与肥料施用量在一定程度上决定着产量积累,进而分别影响着土壤水分利用效率和肥料偏生产力。从水分利用效率的角度来看,MW3F2 处理的土壤水分利用效率最高;而从肥料偏生产力的角度来看,覆膜条件下 MW1F2 处理最为优越。在东北黑土区,开展 MW1F2 和 MW3F2 种植模式对于改善土壤生态环境,提高水分利用效率,提升粮食产能具有显著的效果。

#### 参考文献:

- [1] 杜红霞,吴普特,冯浩,等.氮施用量对夏玉米土壤水氮动态及水肥利用效率的影响[J].中国水土保持科学,2009,7(4):82-87.
- [2] 徐海,王益权,刘军.半干旱偏湿润地区旱地小麦土壤水肥耦合的时空变异特征[J].干旱地区农业研究,2009,27(2):184-188.
- [3] 周罕觅,张富仓,Roger K,等.水肥耦合对苹果幼树产量、品质和水肥利用的效应[J].农业机械学报,2015,46(12):173-183.
- [4] 李邵,薛绪掌,郭文善,等.水肥耦合对温室盆栽黄瓜产量与水分利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(2):376-381.
- [5] 王秀康,邢英英,张富仓.膜下滴灌施肥番茄水肥供应量的优化研究[J].农业机械学报,2016,47(1):141-150.
- [6] Nayyar H, Singh S, Kaur S, et al. Differential sensitivity of macrocarpa and microcarpa types of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to water stress: Association of contrasting stress response with oxidative injury[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2006, 48(11): 1318-1329.
- [7] 马国胜,薛吉全,路海东,等.播种时期与密度对关中灌区夏玉米群体生理指标的影响[J].应用生态学报,2007,18(6):1247-1253.
- [8] 刘小刚,张岩,程金焕,等.水氮耦合下小粒咖啡幼树生理特性与水氮利用效率[J].农业机械学报,2014,45(8):160-166.
- [9] 温利利,刘文智,李淑文,等.水肥耦合对夏玉米生物学特性和产量的影响[J].河北农业大学学报,2012,35(3):14-19.
- [10] Banedjschafie S, Bastani S, Widmoser P, et al. Improvement of water use and N fertilizer efficiency by subsoil irrigation of winter wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(1): 1-7.
- [11] 王鹏勃,李建明,丁娟娟,等.水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2015,48(2):314-323.
- [12] Cabello M J, Castellanos M T, Romojarro F, et al. Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates[J]. 2009, 96(5): 866-874.
- [13] Bruulsema T W, Witt C, Garcia F, et al. A global framework for fertilizer BMPs[J]. Better Crops with Plant Food, 2008(2):13-15.
- [14] Cabello M J, Castellanos M T, Romojarro F, et al. Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(5): 866-874.
- [15] 孙文涛,张玉龙,王思林,等.滴灌条件下水肥耦合对温室番茄产量效应的研究[J].土壤通报,2005,36(2):202-205.
- [16] 吴立峰,张富仓,范军亮,等.水肥耦合对棉花产量、收益及水分利用效率的效应[J].农业机械学报,2015,46(12):164-172.
- [17] 李建明,潘铜华,王玲慧,等.水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2014,30(10):82-90.
- [18] 高肖彦,刘廷玺,段利民,等.科尔沁沙丘—草甸田间持水量的综合测定与影响[J].干旱区研究,2016,33(6):1336-1344.
- [19] 何东健,陈煦.土壤有机质含量田间实时测定方法[J].农业机械学报,2015,46(1):127-132.
- [20] 龙江,陈荣,张念.比重计法测定土壤质地温度控制重要性的研究[J].安徽地质,2014(1):63-65.
- [21] 刘德江,李青军,高伟,等.施肥对玉米养分吸收利用、产量及肥料效益的影响[J].中国土壤与肥料,2009(4):56-59.
- [22] Oweis T Y, Farahani H J, Hachum A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in northern Syria[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8): 1239-1248.
- [23] 何俊仕,边晓东,付玉娟,等.西辽河平原主要作物耗水量及耗水规律研究[J].节水灌溉,2012(11):1-4.