

# 冬小麦-夏玉米轮作模式下地下滴灌管埋深 与耕作方式适配性研究

张俊<sup>1,3</sup>, 慕飞<sup>2</sup>, 张琳琳<sup>4</sup>

(1. 陕西省土地工程建设集团, 陕西 西安 710075; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;  
3. 陕西地建关天投资建设有限公司, 陕西 宝鸡 721000; 4. 陕西黄河古贤水利枢纽开发有限公司, 陕西 西安 710032)

**摘要:** 为确定适宜的地下滴灌毛管埋深与配套耕作方式, 以关中地区冬小麦-夏玉米轮作区为研究对象, 设置 5 种不同毛管埋深(0、10、20、30、40 cm)和 2 种耕作方式(旋耕和免耕), 分析了不同处理对冬小麦-夏玉米生长和产量的影响。结果表明: 与地表滴灌相比, 地下滴灌促进了冬小麦-夏玉米生长及产量的形成。毛管埋深 40 cm 处理减缓了冬小麦-夏玉米前期株高和叶面积生长(2.42%~21.03%), 显著降低了夏玉米干物质积累(8.47%)。与地表滴灌相比, 冬小麦、夏玉米产量增幅分别为 3.55%~7.68% 和 2.53%~5.16%。毛管埋深为 30 cm 和 40 cm 时, 不同耕作方式处理之间无显著差异( $P<0.05$ )。综合考虑田间生产实践, 免耕与毛管埋深 30 cm 地下滴灌组合可作为关中地区冬小麦-夏玉米轮作较为适宜的种植模式。

**关键词:** 冬小麦-夏玉米轮作; 地下滴灌; 毛管埋深; 旋耕; 免耕

**中图分类号:** S512.1<sup>+</sup>1; S513; S344; S275.4 **文献标志码:** A

## Study on the daptability of subsurface drip irrigation capillary burying depth and cultivation method under winter wheat-summer maize rotation mode

ZHANG Jun<sup>1,3</sup>, MU Fei<sup>2</sup>, ZHANG Linlin<sup>4</sup>

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710075, China;  
2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
3. Shaanxi Dijian Guantian Investment and Construction Co., Ltd., Baoji, Shaanxi, 721000, China;  
4. Shaanxi Huanghe Guxian Water Conservancy Development Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China)

**Abstract:** To determine the optimal burial depth for subsurface drip irrigation capillaries and the corresponding cultivation methods, the study focused on the winter wheat-summer maize rotation area in the Guanzhong region. Five capillary burial depths (0, 10 cm, 20 cm, 30 cm, and 40 cm) and two cultivation methods (rotary tillage and no-tillage) were set up, and their effects on the growth and yield of winter wheat and summer maize were analyzed. The results indicated that compared with surface drip irrigation, subsurface drip irrigation had a promoting effect on the growth and yield of winter wheat-summer maize. The capillary burial depth of 40 cm treatment slowed down the early plant height and leaf area growth of winter wheat-summer maize (2.42%~21.03%), and significantly reduced the dry matter accumulation of summer corn (8.47%). Compared with surface drip irrigation, the yield increase of winter wheat-summer maize was 3.55%~7.68% and 2.53%~5.16%, respectively. When the capillary burial depth was set to 30 cm or 40 cm, no significant differences were observed between the various cultivation methods. Considering field production practices, the combination of no-tillage and underground drip irrigation with a capillary burial depth of 30 cm is recommended as a more suitable planting method for the winter wheat-summer maize rotation system in the Guanzhong region.

**Keywords:** winter wheat-summer maize rotation; subsurface drip irrigation; burying depth of capillaries; rotary tillage; no tillage

气候变暖和水资源短缺问题日益严峻,漫灌和畦灌等灌溉方式已无法更好地满足进一步提高我国水土资源利用效率的需求。滴灌是最高效节水的灌水方式,一般分为地表滴灌和地下滴灌。由于地表滴灌毛管铺设于地表,不仅影响农事活动,还需每茬更换滴灌带,造成经济浪费。地下滴灌毛管埋入地下,能够显著减少水分蒸发、提高产量和水分利用效率<sup>[1]</sup>,近年来在全球范围内得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。在干旱半干旱地区,地下滴灌技术的推广对缓解水资源紧缺、促进可持续农业发展具有重要意义。

毛管埋深是地下滴灌工程的重要技术要素,对作物生长、产量及水分利用效率有重要影响,毛管埋深过浅则易在其他农业活动中破坏或者影响其工作,毛管埋深过大则难以满足作物苗期的水分供给。Boujelben<sup>[3]</sup>研究表明地中海气候条件下,毛管埋深 35 cm 的玉米叶面积、百粒重和产量均显著高于毛管埋深为 0、5、20 cm 情况。李蓓等<sup>[4]</sup>研究表明毛管埋深 15 cm 和 30 cm 的地下滴灌春玉米产量显著高于地表滴灌。Umair 等<sup>[5]</sup>发现华北地区地下滴灌可以减少 15% 蒸发损失,显著提高冬小麦产量和地上部生物量。窦超银等<sup>[6]</sup>研究表明,风沙土地地区玉米地下滴灌适宜的毛管埋深为 30 cm 左右。关中地区降水量在 500~600 mm 之间,以壤质土壤为主,大田作物以冬小麦-夏玉米轮作方式种植,地下滴灌是否适合该地区应用,是否比地表滴灌有更好的节水增产效益,针对以上问题目前研究相对较少。为了保障地下滴灌高效安全运行,必须选择适宜的耕作方式,目前综合考虑耕作方式和地下滴灌的研究还未见报道。

因此,本文以冬小麦-夏玉米轮作种植制度为研究对象,从毛管埋深和耕作方式组合对作物生长与产量的影响角度分析,确定适宜的毛管埋深和耕作方式,为关中地区地下滴灌应用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

本试验于 2022 年 10 月—2024 年 6 月在西北农林科技大学灌溉试验站(108°23'E, 34°20'N, 海拔 520 m)进行,试验区域属于暖温带季风半湿润易干旱气候,年平均气温为 13℃,年平均降雨量为 554 mm(主要集中在 7—9 月)。土壤为壤土,0~60 cm 深土壤田间持水率为 23.5%,容重为 1.51 g·cm<sup>-3</sup>。试验前土壤(0~20 cm)pH 值为 8.10,土壤有机质含

量为 10.02 g·kg<sup>-1</sup>、速效磷含量为 23.32 mg·kg<sup>-1</sup>、速效氮含量为 76.58 mg·kg<sup>-1</sup>。地下水埋深较大,对耕层土壤补水可忽略不计。试验期间日降雨量和日平均气温由放置在试验地块中间的小型气象站获得,气象资料如图 1 所示。

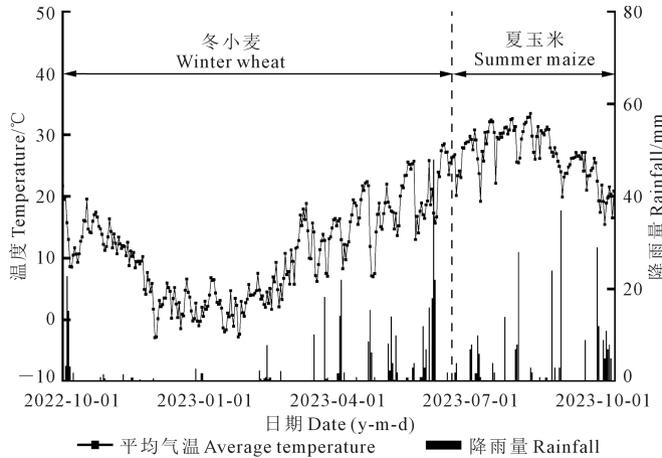


图 1 冬小麦-夏玉米全生育期日降雨量和日均气温

Fig.1 Daily rainfall and average daily temperature of winter wheat-summer maize during the whole reproductive period

### 1.2 试验设计

本试验分为两部分,第一部分为毛管埋深单因素试验:冬小麦播前旋耕(旋耕深度为 20 cm),以地表滴灌作为对照(CK1),设置 4 个地下滴灌处理,毛管埋深分别为 10 (CT10)、20 (CT20)、30 (CT30)、40 cm (CT40),各处理 3 次重复。第二部分为毛管埋深和耕作方式双因素试验:冬小麦季结束后免耕种植玉米,地表滴灌以及毛管埋深 10 cm 和 20 cm 处理均不进行耕作,毛管埋深为 30 cm 和 40 cm 处理分为两部分,一部分免耕,另一部分旋耕(旋耕深度为 20cm)。因此夏玉米有 5 个免耕处理和 2 个旋耕处理,分别为免耕地表滴灌(CK2),免耕毛管埋深 10 (NT10)、20 (NT20)、30 (NT30)、40 cm (NT40),旋耕毛管埋深 30 cm (CT30)和 40 cm 处理(CT40),由于该地区流行冬小麦-夏玉米轮作,第二部分试验建立在第一部分试验基础上(夏玉米 CT30 和 CT40 与冬小麦 CT30 和 CT40 一致),所有处理 3 次重复。

冬小麦灌水量根据土壤水分上、下限进行控制(表 1)。每个小区布置 3 根 trime 管,每 7~10 d 采用时域反射计(TDR-150,北京宏昌信科技有限公司)测量土壤含水率 1 次,以烘干法校正。当土壤含水率达到冬小麦灌水下限(田间持水量  $\theta_f$  的比值)要求时进行灌水<sup>[7]</sup>。

表 1 冬小麦不同生育阶段灌水量

Table 1 Irrigation levels of winter wheat during different growing stages

生育期 Growing stage	灌水阈值 Irrigation threshold/(% $\theta_t$ )		计划湿润层深度 Designed depth of wetted soil layer/mm
	下限 Lower limit	上限 Upper limit	
	苗期~返青期 Seedling~regreening stage	60~65	
拔节期~孕穗期 Jointing~booting stage	65~70	90	600
抽穗期~开花期 Heading~anthesis stage	70~75	90	600
灌浆期~成熟期 Filling~maturity	60~65	80	600

冬小麦灌水量<sup>[8]</sup>:

$$M = S\rho_b p h (q_1 - q_2) / \eta \quad (1)$$

式中, $M$ 为灌水量( $\text{m}^3$ ); $S$ 为计划湿润面积,为 $48 \text{ m}^2$ ;  $\rho_b$ 为土壤容重,为 $1.51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $p$ 为土壤湿润比,大田滴灌取值 $0.8$ ;  $h$ 为计划湿润层深度( $\text{m}$ );  $\theta_t$ 为田间持水量,取 $23\%$ ;  $q_1$ 为灌溉上限( $\%$ );  $q_2$ 为灌溉下限( $\%$ );  $\eta$ 为水分利用系数,取值 $0.95$ 。

夏玉米灌水量根据 FAO-56 Penman Monteith 公式计算,计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)} \quad (2)$$

式中, $ET_0$ 为参考作物蒸发蒸腾量( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $R_n$ 和  $G$ 分别为净辐射和土壤热通量( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $T$ 为 $2 \text{ m}$ 高处日平均气温( $^{\circ}\text{C}$ );  $\gamma$ 为干湿表常数( $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $\mu_2$ 为 $2 \text{ m}$ 高处的风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $e_s$ 和  $e_a$ 分别为饱和水汽压和实际水汽压( $\text{kPa}$ );  $\Delta$ 为饱和水汽压与温度关系曲线在某处的斜率( $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )。上述气象数据均由位于试验地块中央的小型气象站获得。

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (3)$$

式中, $ET_c$ 为玉米实际蒸发蒸腾量( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $K_c$ 为作物系数,分别取 $0.7$ (苗期)、 $1.2$ (拔节~灌浆期)、 $0.6$ (蜡熟~成熟期)。

夏玉米灌水量由试验区田间土壤水分入渗试验确定<sup>[9]</sup>,将灌水量定为 $22 \text{ mm}$ (亏缺灌溉,75%  $ET_c$ )。冬小麦-夏玉米灌溉制度见表 2。

冬小麦播种前分别基施氮、磷、钾肥 $50$ 、 $90$ 、 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,拔节期追施氮肥 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。夏玉米播种前分别基施氮、磷、钾肥 $57$ 、 $90$ 、 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,拔节期追施氮肥 $114 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。氮、磷、钾肥分别为尿素

表 2 冬小麦-夏玉米灌溉制度

Table 2 Irrigation scheduling of winter wheat-summer maize

冬小麦 Winter wheat		夏玉米 Summer maize	
日期 Date (y-m-d)	灌水量/mm Irrigation amount	日期 Date (y-m-d)	灌水量/mm Irrigation amount
2022-10-24	10	2023-07-17	10
2022-12-06	22	2023-07-20	22
2023-03-06	22	2023-08-08	22
2023-03-27	24	2023-08-16	22
2023-04-17	35	2023-09-01	22
2023-05-19	35		
总计 Total	148		98

注:10 mm 灌水量仅用于苗期施肥。

Note: 10 mm irrigation amount was only used for seeding fertilization.

(含 $\text{N} \geq 46\%$ )、过磷酸钙(含 $\text{P}_2\text{O}_5 \geq 16\%$ )和氯化钾(含 $\text{K}_2\text{O} \geq 62\%$ )。磷、钾肥于冬小麦-夏玉米播前全部撒施,氮肥溶解后通过比例施肥泵经滴灌系统施入土壤。施肥时前 $1/4$ 时间灌水,中间 $1/2$ 时间开始施肥,后 $1/4$ 时间灌水<sup>[10]</sup>。夏玉米种植方式为一管一行,株距 $27 \text{ cm}$ ,行距 $60 \text{ cm}$ ,种植密度 $61728 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。冬小麦播种密度为 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,采用一管三行的种植模式,行距 $20 \text{ cm}$ 。所有小区均人工及时除草,以防病虫害。

试验小区长 $20 \text{ m}$ ,宽 $2.4 \text{ m}$ 。滴灌系统由叠片过滤器、压力表、比例施肥泵、球阀、水表、空气阀、冲洗管、埋地式滴灌管等组成。每个小区布设 $3$ 根滴灌管(大禹节水集团股份有限公司内镶扁平底滴灌管),毛管间距 $60 \text{ cm}$ ,滴头流量 $1.38 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ,滴头间距 $30 \text{ cm}$ ,毛管直径 $16 \text{ mm}$ 、壁厚 $0.6 \text{ mm}$ (该型号毛管是地下滴灌专用毛管),每个小区独立配备球阀和水表。

### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 叶面积指数 每个小区选取 $15$ 株冬小麦或夏玉米植株,于冬小麦返青期和夏玉米全生育期采用精度为 $1 \text{ mm}$ 的直尺测量全部展开叶的叶片长和宽,冬小麦其余生育期采用冠层分析仪进行测量。叶面积为:

$$S = \frac{\sum L \cdot B \cdot K}{N} \quad (4)$$

叶面积指数(leaf area index, LAI):

$LAI = \text{单株叶面积} \times \text{单位土地面积株数} / \text{单位土地面积}$  (5)

1.3.2 株高和地上部生物量 于冬小麦返青期、拔节期、开花期和成熟期选取长势均匀,具有代表性的 $3$ 行小麦,每行选取 $20 \text{ cm}$ 沿茎基部齐地剪短,采用精度为 $1 \text{ mm}$ 的卷尺测量株高。

将冬小麦植株分为叶、茎、穗 3 部分置于鼓风干燥箱中 105℃ 杀青 30 min, 75℃ 烘干至恒重, 称量其生物量。

于夏玉米苗期、拔节期、开花期和成熟期选取长势均匀且具有代表性的 15 株玉米植株, 按照类似方法测量株高和生物量。

**1.3.3 产量及其构成要素** 冬小麦成熟期每个小区随机选取 1 m<sup>2</sup>, 测量有效穗数(籽粒数大于 5 粒的穗数); 穗粒数(每 m<sup>2</sup> 选取 10 株小麦进行统计)。自然风干后用电子天平测量百粒重和千粒重, 置于烘箱 75℃ 烘干至恒重, 折算为 14% 含水量即为产量, 夏玉米成熟期每个小区选取中间 4 行进行人工收割, 每行长度为 2 m, 测定穗长、穗行数 and 行粒数。自然风干后测定百粒重和千粒重, 最后置于烘箱 75℃ 烘干至恒重, 折算为 14% 含水量即为产量。

**1.3.4 灌溉水利用效率及经济效益** 灌溉水利用效率按下式计算:

$$IWUE = Y/I \quad (6)$$

式中,  $Y$  为籽粒产量(kg · hm<sup>-2</sup>);  $I$  为灌水量(mm)。

通过考虑不同作物的现行市场价格 (<http://www.agri.cn/>) 和最终产量, 计算出不同处理的经济效益。根据投入成本和产出价值, 计算出总收益和净收益。

## 1.4 数据处理

采用 SPSS 26.0 统计软件进行显著性分析和方差分析, 采用 Origin Pro 2018 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 毛管理深和耕作方式对冬小麦-夏玉米株高和叶面积指数的影响

图 2 为不同毛管理深地下滴灌冬小麦的株高和叶面积指数。毛管理深对冬小麦株高和叶面积指数有显著影响( $P < 0.05$ )。在返青期, 毛管理深对株高的影响最大, 达到极显著水平( $P < 0.01$ ), 株高随毛管理深增大而减小, CT40 处理株高最小, 较 CK1 处理显著减小了 3.95%。随着生育期推进, 不同毛管理深处理之间株高差异逐渐缩小, 灌浆期毛管理深对株高的影响降为显著水平( $P < 0.05$ ), 其中 CT30 和 CT40 处理较 CK1 处理显著减小了 2.77% 和 6.44%(图 2A)。返青期至开花期, 叶面积指数均随毛管理深增大而减小, 其中 CT40 处理最小, 显著小于 CK1 处理, 其余毛管理深处理之间无显著差异。

毛管理深和耕作方式对夏玉米苗期、拔节期和开花期株高有显著影响( $P < 0.05$ ), 仅对苗期叶面积

指数有显著影响, 对拔节期和开花期无显著影响(图 3)。NT40 处理苗期株高和叶面积指数比较 CK2 显著降低了 21.03% 和 2.42%, 拔节期株高显著降低了 9.75%, 开花期株高显著降低了 3.90%。与 NT40 处理比较, CT40 处理苗期、拔节期和开花期玉米株高分别显著提高了 23.09%、8.16% 和 4.21%。免耕条件下, 毛管理深对夏玉米株高和叶面积的影响随生育期推进逐渐减小; 相同埋深下, 旋耕处理较免耕处理更利于夏玉米株高和叶面积增长。

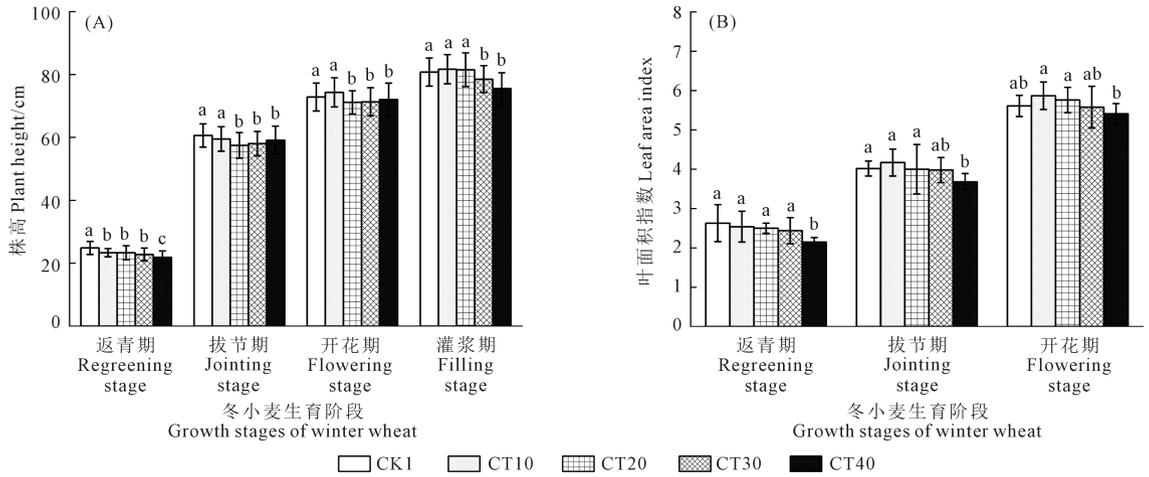
### 2.2 毛管理深和耕作方式对冬小麦-夏玉米地上部干物质质量的影响

毛管理深对冬小麦开花期和成熟期地上部干物质质量的影响显著( $P < 0.05$ ), 对苗期和拔节期无显著影响。开花期, CT20 处理较 CK1 地上部干物质质量显著提高了 11.99% ( $P < 0.05$ ), CT10、CT30 和 CT40 处理与 CK 处理之间无显著差异。成熟期不同毛管理深处理较 CK1 处理显著提高了地上部干物质质量, CT20 处理提升幅度最大, 显著提高了 7.79%, 但不同毛管理深处理之间无显著差异(图 4)。

毛管理深和耕作方式对夏玉米地上部干物质质量的影响如图 4B。除拔节期外, 毛管理深和耕作方式对夏玉米其他生育期地上部干物质质量均有显著影响( $P < 0.05$ )。免耕条件下, NT40 处理在夏玉米苗期、开花期和成熟期的地上部干物质质量均显著低于 CK2 处理, 其他毛管理深处理之间无显著差异。当毛管理深为 30 cm 和 40 cm 时, 耕作方式对夏玉米开花期和成熟期地上部干物质质量有显著影响, 旋耕处理显著高于免耕处理。夏玉米开花期, CT40 处理地上部干物质质量较 NT40 处理显著提高了 8.47%, 成熟期, CT30 处理地上部干物质质量较 NT30 处理显著提高了 7.19%, CT40 处理较 NT40 处理显著提高 8.71%。

### 2.3 毛管理深和耕作方式对冬小麦-夏玉米产量及其构成要素的影响

地下滴灌毛管理深对冬小麦产量及其构成要素的影响见表 3。随埋深增加, 单位面积穗数呈现先增加后减小的趋势, CT30 处理最大, 比 CK1 处理显著提高了 14.33%, 其余埋深处理与 CK1 差异不显著。穗粒数和千粒重均随毛管理深的增加而增加, CT40 处理最大, 分别比 CK1 提高了 27.45% ( $P < 0.05$ ) 和 5.73% ( $P > 0.05$ )。与 CK1 相比, 地下滴灌不同毛管理深处理显著提高了冬小麦产量, 具体表现为 CT20 > CT40 > CT30 > CT10, 产量增幅为 3.55% ~ 7.68%, 但不同毛管理深处理之间差异不显著。



注:不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ( $P<0.05$ ). Same as below.

图 2 毛管理深对冬小麦不同生育阶段株高和叶面积指数的影响

Fig.2 Effects of capillary burial depth on plant height and leaf area index of winter wheat at different growth stages

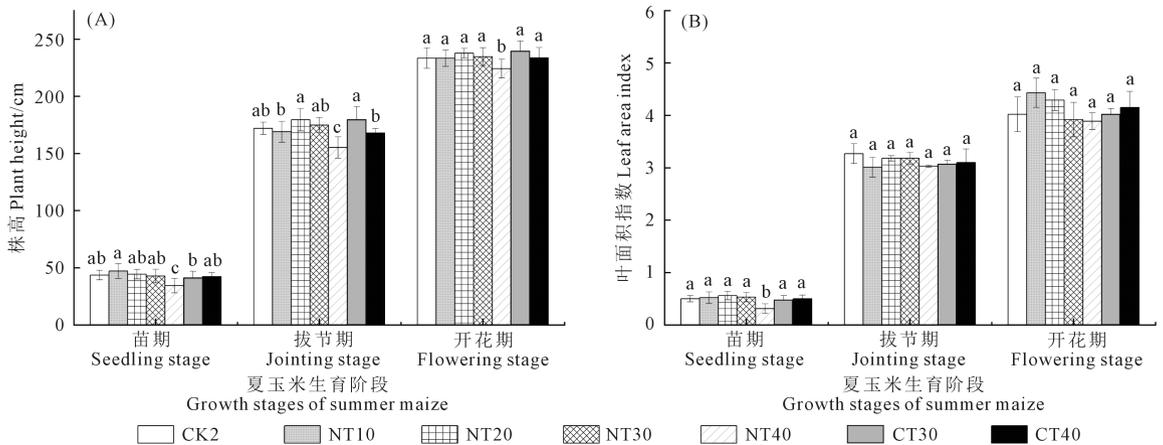


图 3 毛管理深和耕作方式对夏玉米不同生育阶段株高和叶面积指数的影响

Fig.3 Effects of capillary burial depth on plant height and leaf area index of summer maize at different growth stages

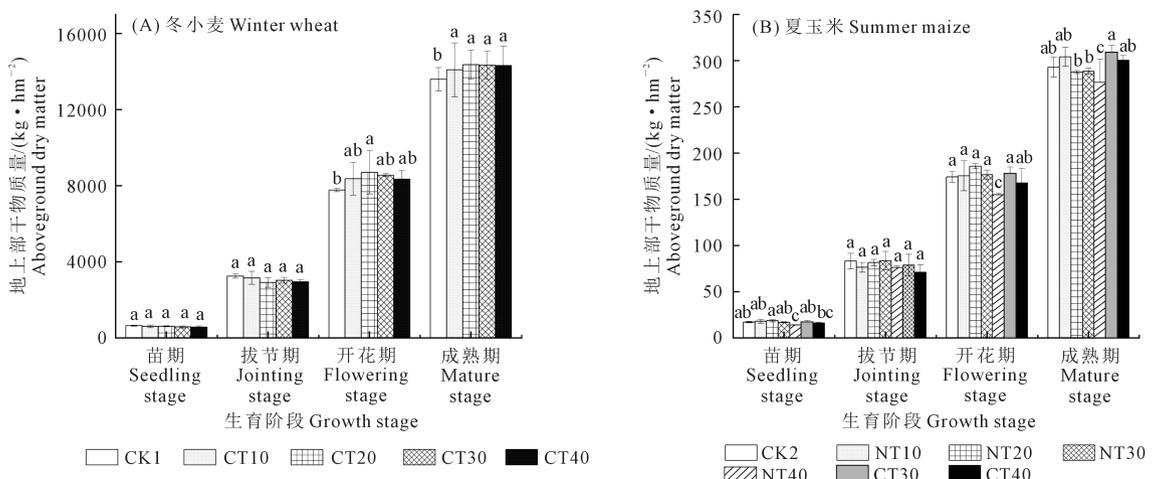


图 4 毛管理深对冬小麦-夏玉米地上部干物质量的影响

Fig.4 Effects of capillary burial depth on dry matter quality of winter wheat and summer maize

表 4 为毛管理深和耕作方式对夏玉米产量及其构成要素的影响。方差分析表明,毛管理深对夏玉米行粒数无显著影响( $P>0.05$ ),对穗长、穗行数、百粒重和产量有显著影响( $P<0.05$ )。与 CK2 处理相比,免耕条件下 NT40 处理显著降低了夏玉米穗长和产量,其他毛管理深处理与 CK2 处理无显著差异;地

下滴灌不同毛管理深处理显著提高了夏玉米穗行数和百粒重,但不同毛管理深处理之间差异并不显著。耕作方式对夏玉米穗行数有显著影响( $P<0.05$ ),对穗长、行粒数、百粒重和产量均无显著影响( $P>0.05$ )。耕作方式和毛管理深交互作用对夏玉米穗行数、行粒数、百粒重和产量均无显著影响( $P>0.05$ )。

表 3 毛管理深对冬小麦产量及其构成要素的影响

Table 3 Effects of capillary burial depth on the yield of winter wheat and its components

处理 Treatment	单位面积穗数 Spike density/ $(10^4 \text{hm}^{-2})$	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-Kernels weight/g	产量 Yield/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$
CK1	439.67±14.15b	36.70±3.31b	37.87±0.74a	5677.03±142.99b
CT10	462.33±24.82ab	40.26±1.80b	38.11±1.56a	5878.80±551.94a
CT20	491.33±31.64ab	40.78±5.41ab	38.27±0.38a	6113.17±368.58a
CT30	502.67±27.49a	41.30±4.87ab	38.76±1.28a	5952.37±200.21a
CT40	449.00±24.44b	45.19±2.78a	40.04±1.26a	6029.47±372.81a

注:同列数据不同小写字母代表处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at  $P<0.05$ . The same below.

表 4 毛管理深和耕作方式对夏玉米产量及其构成要素的影响

Table 4 Effects of capillary burial depth and tillage practices on summer maize yield and its components

处理 Treatment	穗长 Ear length/cm	穗行数 Ear row	行粒数 Number per row	百粒重 100-Kernels weight/g	产量 Yield/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$
CK2	18.39±0.49a	14.22±1.20b	39.56±1.13a	36.81±1.28b	10.66±0.35a
NT10	18.64±0.61a	14.67±1.41a	40.44±1.59a	40.31±2.25a	10.98±0.82a
NT20	18.38±0.69a	15.00±1.00a	41.00±1.66a	40.86±2.56a	10.93±0.27a
NT30	18.94±0.42a	15.33±1.00a	40.89±2.47a	41.55±1.84a	11.11±0.43a
NT40	17.68±0.52b	15.56±0.88a	40.42±2.01a	40.67±1.14a	9.68±0.39b
CT30	18.69±0.64a	14.89±1.05a	40.56±1.94a	41.01±1.95a	11.21±0.24a
CT40	17.29±1.31b	14.56±0.88b	40.11±1.67a	40.23±1.05a	9.87±0.29b

显著性分析 Significance analysis

耕作方式 Tillage method	ns	*	ns	ns	ns
毛管理深 Capillary buried depth	*	*	ns	*	**
交互作用 Interaction	ns	ns	ns	ns	ns

注: \*、\*\* 和 ns 分别表示显著差异( $P<0.05$ )、极显著差异( $P<0.01$ )和没有显著差异( $P>0.05$ )。

Note: \*, \*\*, and ns represent significant ( $P<0.05$ ), highly significant ( $P<0.01$ ), and no significant ( $P>0.05$ ) differences, respectively.

随试验的进行,补充了 2023—2024 年冬小麦产量,如图 5 所示。与 CK2 处理相比,免耕条件下 NT40 和 CT40 显著降低了冬小麦产量,其他毛管理深处理与 CK2 处理间无显著差异;免耕条件下,地下滴灌不同毛管理深处理显著影响了冬小麦产量,随着滴灌管理深的增加,冬小麦产量呈现先增加后减小的趋势。

#### 2.4 毛管理深和耕作方式对冬小麦-夏玉米灌溉水利用效率和经济效益的影响

各处理灌溉水利用效率如图 6 所示。冬小麦灌溉水利用效率以 CT20 最高、CK1 最低。随着滴灌管

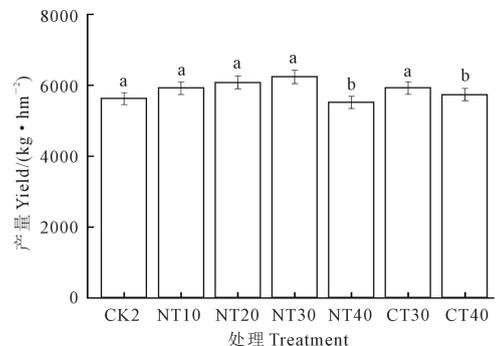


图 5 耕作方式和毛管理深对冬小麦产量的影响  
Fig.5 Effects of capillary burial depth and cultivation method on yield of winter wheat

埋深的增加,灌溉水利用效率呈现先增加后减小的趋势。夏玉米以 NT30 和 CT30 最高、CT40 和 NT40 最低;冬小麦以 NT30 最高。

耕作方式显著影响种植成本和经济效益(表 5)。按照现行玉米和小麦价格(玉米 2 元·kg<sup>-1</sup>,小麦 2.5 元·kg<sup>-1</sup>)和产量计算总收入。农业投入主要包括耕作费用(旋耕 2 遍并整平,1 500 元·hm<sup>-2</sup>),收获(750 元·hm<sup>-2</sup>),人工费用、化肥投入(主要包括氮肥、磷肥和钾肥)、管道折旧(滴灌带的

价格按照 0.1 元·m<sup>-1</sup>计,根据使用年限计算折旧费)和其他费用(杀虫剂、水费和电费)。冬小麦净收益为 5 777~10 595 元·hm<sup>-2</sup>,夏玉米净收益为 12 257~16 337 元·hm<sup>-2</sup>。传统耕作由于机械耕作、滴灌带需要频繁更换导致投入费用显著增加,优化耕作措施配合地下滴灌显著提高了经济效益。总体而言 2022—2023 冬小麦以 CT30 净收入最高,2023 生长季夏玉米和 2023—2024 生长季冬小麦以 NT30 净收入最高。

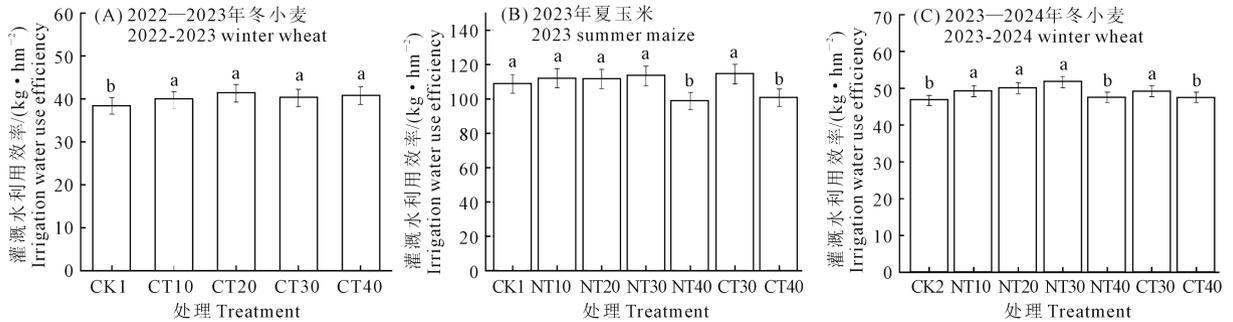


图 6 毛管埋深对冬小麦-夏玉米灌溉水利用效率的影响

Fig.6 Effects of capillary burial depth on irrigation water use efficiency in winter wheat-summer maize

表 5 毛管埋深和耕作方式对冬小麦-夏玉米经济效益的影响/(CNY·hm<sup>-2</sup>)

Table 5 Effects of capillary burial depth and tillage practices on the economic performance of winter wheat-summer maize

年份 Year	处理 Treatment	耕作 Tillage	收获 Harvest	人工费 Labor cost	化肥 Chemical fertilizer	管道折旧 Pipeline depreciation	其他 Other	总投入 Total investment	总收入 Total income	净收入 Net income
2022—2023 冬小麦 2022—2023 winter wheat	CK1	1500	750	1200	3000	1666	300	8416	14193	5777
	CT10	1500	750	1300	3000	1666	300	8516	14697	6181
	CT20	1500	750	1400	3000	1666	300	8616	15283	6667
	CT30	1500	750	1500	3000	333	300	7383	14881	7498
	CT40	1500	750	1600	3000	333	300	7483	15074	7591
2023 夏玉米 2023 summer maize	CK2	0	750	1200	3000	1666	300	6916	21320	14404
	NT10	0	750	1300	3000	333	300	5683	21960	16277
	NT20	0	750	1400	3000	333	300	5783	21860	16077
	NT30	0	750	1500	3000	333	300	5883	22220	16337
	NT40	0	750	1600	3000	333	300	5983	19360	13377
	CT30	1500	750	1500	3000	333	300	7383	22420	15037
2023—2024 冬小麦 2023—2024 winter wheat	CT40	1500	750	1600	3000	333	300	7483	19740	12257
	CK2	0	750	1200	3000	1666	300	6916	14050	7134
	NT10	0	750	600	3000	333	300	4983	14788	9805
	NT20	0	750	600	3000	333	300	4983	15200	10217
	NT30	0	750	600	3000	333	300	4983	15578	10595
	NT40	0	750	600	3000	333	300	4983	14288	9305
	CT30	1500	750	600	3000	333	300	6483	14800	8317
CT40	1500	750	600	3000	333	300	6483	14338	7855	

### 3 讨论

株高、叶面积指数和地上部生物量是农作物重要生物学性状,直接反映着作物的生长状态。本研究表明,毛管埋深为 40 cm 时冬小麦-夏玉米生长前期株高和叶面积指数显著低于地表滴灌,但随生育

期推进,其负面影响逐渐减小。与地下滴灌其他埋深相比,毛管埋深为 40 cm 处理虽然对冬小麦无显著影响,但显著降低了夏玉米地上部干物质量和产量。这可能因为冬小麦根系下扎较深,其主根系主要分布在 0~100 cm 以内,拔节期之后 40~80 cm 土层根系占比显著增大<sup>[11]</sup>,同时土壤湿润体呈椭球

型<sup>[12]</sup>,便于冬小麦中后期吸水吸肥,因此减小了毛管埋深对作物前期产生的不利影响。玉米较上层的根系主要负责吸收营养和水分<sup>[13]</sup>,毛管埋深过大时可能会导致玉米前期吸水吸肥困难,营养生长缓慢,以至于中后期难以弥补,不利于增产。埋深太大时,地下滴灌可能无法及时保障水肥供应,不利于作物前期生长,进而导致产量下降。

确定适宜的毛管埋深应综合考虑土壤条件、作物种类、根系生长和耕作方式等因素<sup>[14-15]</sup>,胡笑涛等<sup>[16]</sup>建议了毛管埋设在土壤耕作层以下且使土壤表层蒸发最少的临界深度。本研究结果表明,耕作层(20 cm)及以下,即毛管埋深为 20 cm 和 30 cm 时,不同耕作方式对夏玉米产量及其构成因素无显著影响。免耕会导致土壤体积分量增加、土壤质密紧实以及孔隙降低,进而不利于作物生长<sup>[17-18]</sup>,并且与旋耕相比会显著降低小麦-玉米生物量和产量<sup>[19-22]</sup>。本试验结果表明,与旋耕相比,免耕虽然降低了夏玉米株高、叶面积、地上部干物质质量和产量,但并未达到显著水平。这可能是由于地下滴灌较地表滴灌会显著改善土壤孔隙度,并且毛管埋深越大(20 cm 和 30 cm),其改善效果越好<sup>[23]</sup>,这在一定程度上会抵消免耕对土壤带来的负面影响。除此之外,免耕与地下滴灌结合也比较适合田间生产实践,与旋耕地下滴灌相比,免耕保留了地表植物残茬,从而增加了土壤有机质含量<sup>[24]</sup>,提高土壤肥力。长期来看,免耕有助于形成良好的土壤团粒结构<sup>[25]</sup>,使得土壤水分更加均匀,而旋耕虽然在短期内促进作物生长,但长期使用旋耕会导致耕层变浅及土壤退化<sup>[26]</sup>,进而降低产量。免耕降低了田间劳动强度,减少了人力成本、机械使用成本和能源消耗,从而降低了碳排放,提高了经济效益和环境效益。综合而言,免耕比较适合地下滴灌,毛管埋深 10、20、30 cm 处理之间冬小麦和夏玉米产量均无显著差异,但毛管埋深 20 cm 和 30 cm 处理增产幅度较大。因此,免耕地下滴灌毛管埋深 30 cm 是冬小麦-夏玉米轮作制度中较为适宜的种植模式。

本研究通过大田试验研究了不同毛管埋深和耕作方式对轮作冬小麦-夏玉米生长和产量的影响,对关中地区大田地下滴灌的应用具有重要的指导意义,但由于试验时间有限,其对作物生长及产量的长期影响仍需进一步研究和验证。

## 4 结 论

1)与地表滴灌相比,地下滴灌促进关中地区冬小麦-夏玉米成熟期干物质积累并提高了产量。

2)毛管埋深 40 cm 处理会显著降低夏玉米产量,其余不同毛管埋深处理地下滴灌之间产量差异不显著,免耕毛管 30 cm 埋深处理夏玉米产量较地表滴灌提高了 4.22%,毛管埋深 30 cm 处理冬小麦产量较地表滴灌显著提高了 4.85%。

3)免耕毛管 30 cm 埋深处理显著提高了冬小麦和夏玉米的灌溉水利用效率和经济效益。综合产量、灌溉水利用效率和经济效益,免耕毛管埋深 30 cm 是关中地区较为适合的种植模式。

## 参 考 文 献:

- [1] 杨开鑫,赵建涛,王旭哲,等.不同灌溉方式及施磷对紫花苜蓿产量、品质及水磷利用效率的影响[J].农业工程学报,2023,39(21):130-138.  
YANG K X, ZHAO J T, WANG X Z, et al. Effects of different irrigation methods and phosphorus application on alfalfa yield, quality and water and phosphorus use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(21): 130-138.
- [2] LAMM F R, COLAIZZI P D, SORENSEN R B. A 2020 vision of subsurface drip irrigation in the U.S.[J]. Transactions of the ASABE, 2021, 64(4): 1319-1343.
- [3] BOUJELBEN A. Effects of surface and subsurface drip irrigation on agronomic parameters of maize (*Zea mays* L.) under Tunisian climatic condition[J]. Journal of Natural Product & Plant Resources, 2011, 1(3): 8-14.
- [4] 李蓓,李久生.滴灌带埋深对田间土壤水氮分布及春玉米产量的影响[J].中国水利水电科学研究院学报,2009,7(3):222-226.  
LI B, LI J S. Effects of drip irrigation placement depth on distribution of soil water & nitrogen and spring maize yield[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2009, 7(3): 222-226.
- [5] UMAIR M, HUSSAIN T, JIANG H, et al. Water-saving potential of subsurface drip irrigation for winter wheat[J]. Sustainability, 2019, 11(10): 2978.
- [6] 窦超银,孟维忠,佟威,等.风沙土玉米地下滴灌毛管适宜埋深试验研究[J].人民黄河,2018,40(5):153-156.  
DOU C Y, MENG W Z, TONG W, et al. Experimental study on appropriate depth of drip line in subsurface drip irrigation for maize on aeolian sandy soil[J]. Yellow River, 2018, 40(5): 153-156.
- [7] 闫世程.冬小麦滴灌施肥水肥高效利用机制研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2020.  
YAN S C. Study on efficient utilization mechanism of water and fertilizer for drip fertilization of winter wheat[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2020.
- [8] WANG J W, NIU W Q, LI Y, et al. Subsurface drip irrigation enhances soil nitrogen and phosphorus metabolism in tomato root zones and promotes tomato growth[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 124: 240-251.
- [9] 陆军胜.滴灌水肥一体化冬小麦-夏玉米水氮效应及夏玉米氮肥供应决策研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.  
LU J S. Study on water and nitrogen effect of winter wheat/summer maize under drip irrigation and nitrogen fertilizer supply decision of

- summer maize[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2021.
- [10] 栗岩峰, 李久生, 饶敏杰. 滴灌施肥时水肥顺序对番茄根系分布和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 205-207.  
LI Y F, LI J S, RAO M J. Effects of drip fertigation strategies on root distribution and yield of tomato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(7): 205-207.
- [11] 刘荣花, 朱自玺, 方文松, 等. 冬小麦根系分布规律[J]. 生态学杂志, 2008, 27(11): 2024-2027.  
LIU R H, ZHU Z X, FANG W S, et al. Distribution pattern of winter wheat root system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(11): 2024-2027.
- [12] 范严伟, 赵彤, 白贵林, 等. 水平微润灌湿润体 HYDRUS-2D 模拟及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 115-124.  
FAN Y W, ZHAO T, BAI G L, et al. HYDRUS-2D simulation of wet body in horizontal micro-moistening irrigation and its influencing factors[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(4): 115-124.
- [13] 鄂玉江, 戴俊英, 顾慰连. 玉米根系的生长规律及其与产量关系的研究I. 玉米根系生长和吸收能力与地上部分的关系[J]. 作物学报, 1988, (2): 149.  
E Y J, DAI J Y, GU W L. Study on the growth rule of maize root and its relationship with yield I. relationship between maize root growth and absorptive capacity and aboveground portion[J]. Acta Agronomica Sinica, 1988, (2): 149.
- [14] 李道西, 罗金耀. 地下滴灌技术的研究及其进展[J]. 中国农村水利水电, 2003, (7): 15-18.  
LI D X, LUO J Y. Summary on research and development of subsurface drip irrigation techniques[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003, (7): 15-18.
- [15] 黄兴法, 李光永. 地下滴灌技术的研究现状与发展[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 176-181.  
HUANG X F, LI G Y. Present situation and development of subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(2): 176-181.
- [16] 胡笑涛, 康绍忠, 马孝义. 地下滴灌灌水均匀度研究现状及展望[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(2): 113-117.  
HU X T, KANG S Z, MA X Y. The statue quo and prospect of uniformity under subsurface drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2000, 18(2): 113-117.
- [17] 孔凡磊, 陈阜, 张海林, 等. 轮耕对土壤物理性状和冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 150-155.  
KONG F L, CHEN F, ZHANG H L, et al. Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 150-155.
- [18] 王小彬, 蔡典雄, 金轲, 等. 旱坡地麦田夏闲期耕作措施对土壤水分有效性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(9): 1044-1049.  
WANG X B, CAI D X, JIN K, et al. Water availability for winter wheat affected by summer fallow tillage practices in sloping dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(9): 1044-1049.
- [19] 刘世平, 张洪程, 戴其根, 等. 免耕套种与秸秆还田对农田生态环境及小麦生长的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 393-396.  
LIU S P, ZHANG H C, DAI Q G, et al. Effects of no-tillage plus inter-planting and remaining straw on the field on cropland eco-environment and wheat growth[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 393-396.
- [20] 李素娟, 陈继康, 陈阜, 等. 华北平原免耕冬小麦生长发育特征研究[J]. 作物学报, 2008, 34(2): 290-296.  
LI S J, CHEN J K, CHEN F, et al. Characteristics of growth and development of winter wheat under zero-tillage in North China plain[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(2): 290-296.
- [21] 李瑞平, 谢瑞芝, 罗洋, 等. 典型黑土区不同保护性耕作方式对玉米生长发育及产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2024, 32(1): 71-82.  
LI R P, XIE R Z, LUO Y, et al. Effects of different conservation tillage methods on maize growth and yield formation in typical black soil area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(1): 71-82.
- [22] 冯跃华, 邹应斌, ROLAND J B, 等. 不同耕作方式对杂交水稻根系特性及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(4): 693-701.  
FENG Y H, ZOU Y B, ROLAND J B, et al. Effects of different tillage system on the root properties and the yield in hybrid rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(4): 693-701.
- [23] 王京伟, 牛文全, 郭丽丽, 等. 适宜的毛管理深提高温室番茄品质及产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 90-97.  
WANG J W, NIU W Q, GUO L L, et al. Suitable buried depth of drip irrigation improving yield and quality of tomato in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 90-97.
- [24] SUN J, WANG Z, DU Y D, et al. Optimized tillage improves yield and energy efficiency while reducing carbon footprint in winter wheat-summer maize rotation systems[J]. Science of the Total Environment, 2022, 820: 153278.
- [25] SUN J, NIU W Q, DU Y D, et al. Combined tillage: a management strategy to improve rainfed maize tolerance to extreme events in northwestern China [J]. Agricultural Water Management, 2023, 289: 108503.
- [26] 胡钧铭, 陈胜男, 韦翔华, 等. 耕作对健康耕层结构的影响及发展趋势[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 95-103.  
HU J M, CHEN S N, WEI X H, et al. Effects of tillage model on health plough layer structure and its development trends[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(2): 95-103.