

# 地下铺膜对温室芹菜种植土壤深层渗漏的影响

杜志达<sup>a</sup>, 邵龙潭<sup>b</sup>

(大连理工大学 a. 水利工程学院; b. 工程力学系, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为了探讨温室蔬菜种植过程中不同地下铺膜方式对深层渗漏的影响, 选择芹菜作为试验样本, 在试验区域布置了不同间隔宽度的平面条带和 U 型条带共四个试验组以及一个不铺膜的对照组, 进行试验研究。试验时采用 PR1 分层水分探头和烘干法监测土壤水分变化过程, 根据实测根层土壤水分含量确定各试区的灌水时间, 在温室大棚内设置自动气象站收集环境气象数据, 利用能量平衡法计算芹菜生育期的腾发量, 最终通过水量平衡方程计算各种铺膜方式下的深层渗漏, 分析地下铺膜对深层渗漏的影响。在各种地下铺膜方式下, 芹菜均长势良好, 并且都取得了不同程度的减少深层渗漏的效果, 其中 U 型铺膜减小深层渗漏的效果好于平面铺膜, 而相同铺膜方式下间隔越小效果越好。铺膜后, 灌水间隔时间有所加长, 大部分方案的总灌水量和灌水次数均有所降低, 在最理想的情况下深层渗漏降低了 50%。研究表明, 温室大棚蔬菜种植, 采用地下铺膜的方法可以有效降低深层渗漏, 节约灌溉用水, 但在不同条件下优化的布置参数仍需通过进一步的试验或数值分析才能得到。

**关键词:** 地下铺膜; 水量平衡; 能量平衡法; 温室; 深层渗漏; 节水灌溉

**中图分类号:** S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2013) 03-0160-05

## Effects of Film Placed under Ground on Deep Percolation of Planting Soil for Cultivating Celery in Greenhouse

DU Zhi da<sup>a</sup>, SHAO Long tan<sup>b</sup>

(a. School of Hydraulic Engineering; b. Department of Engineering Mechanics,  
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of different film placed under ground forms on the deep percolation of cultivating vegetable in greenhouse, celery was chosen as the experimental sample, and four experimental groups with different film placed under ground forms in the horizontal strip and U-shaped strip with different interval widths were designed in the study area and another group without film placed under ground was also conducted for comparison. The variation process of soil moisture was measured by the PR1 layered moisture probe combining with the oven drying method. The time for irrigation was determined based on the observation data of soil moisture in the root layer. The automatic meteorological station was set up in the greenhouse to collect the meteorological data. The evapotranspiration of celery during the growth period was calculated using the energy balance method. The deep percolation for each type of film placed under ground was calculated using the water balance equation, which can be used to determine the impacts of different film placed under ground forms on the deep percolation. The results showed that under all types of film placed under ground, the celery grows well and the deep percolation is reduced to some extent. The film placed under ground in the U-shaped strip has better effects on reducing deep percolation than that in the horizontal strip and the effect of reducing deep percolation is better for the same film placed under ground form with smaller interval widths. After the film placed under ground, the time interval between irrigations increases, the total amount of irrigation and the frequency of irrigation reduce for most cases, and the deep percolation reduces by 50% under the ideal situation. Consequently, the deep percolation can be reduced and irrigation water can be saved using the film placed under ground when cultivating vegetable in greenhouse, but the optimal configuration parameters under various conditions need further experimental or numerical analysis.

**Key words:** film placed under ground; water balance; energy balance method; greenhouse; deep percolation; water saving irrigation.

在地表以下一定深度铺设塑料薄膜形成人工隔水层以防止水分和养分渗漏的作法由来已久。20世纪60年代,美

国和日本的学者曾对砂土层下铺设黏土、塑料薄膜或沥青等人工隔水层进行过研究<sup>[1]</sup>。陈彩富和钱太涛<sup>[2]</sup>等在中国宁

夏腾格里沙漠的流沙地中试验铺设塑料薄膜隔水层, 种植农林作物后取得了增产效果, 此后利用在地下铺设塑料薄膜以实现沙漠农林作物种植的方法逐渐发展成为沙地衬膜栽培技术。近年来, 沙地衬膜水稻栽培技术在内蒙古东部的科尔沁沙地已经发展成熟并得到了大规模的推广应用<sup>[37]</sup>, 沙地衬膜小麦栽培技术也取得了一定的研究成果<sup>[8-10]</sup>。不仅沙漠地区, 地下全面铺设塑料薄膜的做法在非沙漠地区的常规稻田中也有采用, 而且人们还在常规旱作农田中进行了局部铺设塑料薄膜的试验和应用。Barth H. K 介绍了一种改进的地下灌溉系统 SIS, 与常规地下滴灌相比, 除采用特殊的管路结构防止地下滴灌管堵塞外, 主要改进在于在滴灌管下部铺设 V 型聚乙烯薄膜条带, 各条带之间间隔一定距离, 这也属于一种局部铺膜的做法。滴灌管下部的薄膜条带可有效减少深层渗漏, 促进水分向上部根区运动, 改善了灌溉效果, 条带之间的空隙又能将多余的降雨渗出<sup>[11]</sup>。王伟<sup>[12]</sup>也进行了类似的试验, 通过在滴灌带下方铺设阻水塑料布, 明显改变了地下滴灌湿润体的形状及湿润体内部的土壤水分分布。与普通地下滴灌相比, 铺设阻水塑料布增大了沿毛管纵向的湿润宽度, 提高了湿润锋向上的运移高度, 减小了水分向下的入渗深度, 同时, 增大了滴灌带上层土壤的含水量。于国丰<sup>[13]</sup>在研制微润水器进行沙地灌溉试验时, 在灌水器下方局部铺设了塑料布, 也取得了节水的效果。由此可见, 地下铺膜能够有效减少深层渗漏, 改善灌溉效果。但是, 对于地下铺膜特别是局部铺膜, 如何选择合理的铺膜方式、铺膜对根区水分运动的影响如何, 以往研究涉及很少。

蔬菜由于根系浅, 需水量大, 灌水频繁, 传统的漫灌往往会造成很大的水肥渗漏<sup>[14-15]</sup>。针对此问题, 以往的主要对策是采用喷灌、滴灌、渗灌等管路灌溉<sup>[16-18]</sup>, 以及与地膜覆盖结合的各种灌溉方法, 如膜上、膜孔、膜侧灌溉, 膜下沟灌、滴灌、渗灌等<sup>[19-21]</sup>, 而很少应用地下铺膜设置人工节水层的方法。

在蔬菜种植中, 合理的地下铺膜方式需要根据铺膜后根区水分运动与变化的规律来确定。鉴于温室蔬菜在我国蔬菜种植中占有相当大的比重且主要采用传统的漫灌方式, 所以本文以温室芹菜种植为例, 通过实测芹菜生长过程中温室内环境气象及土壤水分数据, 进行根区水量平衡分析, 研究漫灌条件下, 各种铺膜方式对深层渗漏的影响, 为应用地下铺膜的方法进行温室蔬菜种植提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区情况

本研究选取的试验区位于辽宁省大连市营城子地区, 地处辽东半岛南端, 东临黄海, 属于沿海低台地, 海拔 15~30 m, 地下水埋深 10~15 m。本区属暖温带湿润、半湿润大陆性季风气候, 四季分明, 气候温和, 降雨集中, 季风明显。试验区土体深厚, 质地均一, 土体中很少见到砾石和粗砂, 土壤质地为中壤或重壤。根据试验, 土壤有关特性参数见表 1。

试验使用的温室为日光型塑料大棚, 东西两侧和北面为保温砖墙, 顶部为轻型钢架焊接结构, 占地面积 688 m<sup>2</sup>, 棚内净宽 6.8 m, 净高 3 m, 净长 80 m。内部布置水池、灌溉管路、作业道, 主种植区宽 6.2 m, 长 76.6 m。

表 1 试验土壤的水分物理参数

Table 1 The physical parameters of the experimental soil

土层	深度 / cm	田间持水量 / (cm <sup>3</sup> · cm <sup>-3</sup> )	干密度 / (g · cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ / (cm <sup>3</sup> · cm <sup>-3</sup> )	$K_s$ / (cm · s <sup>-1</sup> )
耕层	0~30	0.22	1.25	0.52	$6.60 \times 10^{-4}$
基层	>30	0.29	1.43	0.46	$2.43 \times 10^{-4}$

### 1.2 试验内容

以往的地下铺膜试验主要注重对铺膜技术的节水和灌溉效果研究, 而很少有对不同铺膜方式效果的对比试验。Barth<sup>[11]</sup>介绍的地下灌溉系统 SIS 是使用聚乙烯塑料膜进行条带方式铺膜, 膜厚度为 0.06 mm, 条带宽度为 60 cm, 在地下铺成近似水平的 V 型, 铺膜深度为 30~80 cm, 相邻条带间隔约 140 cm。采用专门设计的带有 V 型犁头的机械铺膜并同时膜上埋设滴灌管, 对土壤结构扰动较小。其他试验中, 以在地下铺水平膜带或者膜块居多<sup>[12-13]</sup>。

考虑到温室内蔬菜种植的特点, 本试验选用了水平条带、U 型条带两种铺膜方式。采用的塑料薄膜为 0.12 mm 厚的聚氯乙烯棚膜, 两种铺膜方式的铺膜深度均为地表下 40 cm。水平条带膜宽为 40 cm, 条带间隔布置为 10 cm 和 40 cm 两种, U 型条带膜宽为 70 cm, 两边各折起 20 cm, 其水平投影宽也为 40 cm, 条带间隔同样布置为 10 cm 和 40 cm 两种, 方案编号及参数见表 2。大棚种植区划分为 5 个区域, 布置 4 组铺膜方案及 1 组不铺膜的对照组, 每组铺膜方案的布置宽度为 12 m, 相邻区域之间设置 1 m 深的塑料薄膜进行竖向分隔。铺膜采用人工挖土铺设, 挖土和回填时尽量保证耕层和心土层不掺混, 铺设后浇水使挖方回填部位充分沉降密实, 然后整平作畦。

表 2 水平条带和 U 型条带地下铺膜参数

Table 2 The configuration parameters of ground film forms in the horizontal strip and U-shaped strip

方案编号	铺膜方式	参数设置 / cm				薄膜水平投影比例 (%)
		薄膜水平投影宽度 <i>a</i>	条带间隔 <i>b</i>	埋深 <i>c</i>	两边折起高度 <i>d</i>	
1 号	不铺膜					
2 号	水平条带	40	40	40	-	50
3 号	U 型条带	40	10	40	-	80
4 号	U 型条带	40	40	40	20	50
5 号	U 型条带	40	10	40	20	80

试验于 2009 年 4 月至 7 月间进行, 试验区芹菜供试品种为美国文图拉西芹, 采用畦栽, 栽植密度约为 12 株/m<sup>2</sup>。试验前进行播种育苗, 芹菜 7~8 片叶时定植到大棚中, 定植时底肥施肥量为有机肥 7.5 kg/m<sup>2</sup>, 磷酸二铵 75 g/m<sup>2</sup>。从芹菜定植开始进行大棚内环境气象和土壤含水量的数据观测, 以根层田间持水量的 65% 作为灌水控制下限标准, 根据根层实测土壤含水量情况确定灌水时间, 每次灌溉水量统一为 40 mm。芹菜定植后外叶生长期根层深度按 20 cm 计, 立心期和心叶生长期根层深度按 30 cm 计。灌溉采用地面漫灌, 大棚内设有比较完善的灌溉管路和计量系统。各试验方案和对照组除了各自的灌溉时间外, 其他条件及管理措施保证一致。

### 1.3 测试与数据采集

在大棚内中部设置自动气象站,采集芹菜定植后全生育期的环境气象数据,包括净辐射、土壤热通量、风速、大气压、50 cm 和 200 cm 两个高度的相对湿度和温度。净辐射的测量采用 FNP 1 型净全辐射表,安装高程距地面 1.5 m。土壤热通量采用 HTH-2 型土壤热通量计,埋设在地表面下 2~3 cm 处。由于大棚内风速较小,采用 STF10V3 型风速传感器测量风速,这种传感器可以测量 1m/s 以下的风速。温度和湿度采用 DB4200SY 11 型温湿度变送器测量。大气压采用 LT/DY 型大气压力传感器测量。这些传感器采用 4 20 mA 或者 0 5V 的信号输出,使用德国 E+ H 公司生产的 RSG30 型数据记录仪(Ecograph T)进行连续采集数据,采样时间间隔设定为 15 min。

对于土壤含水量,在每个试区埋设两个与 PR1/4d 配套的 ATS1 探管,每天定期采用 PR1/4d 型分层水分探头和 HH2 型手持式测表监测各区域 0~40 cm 土壤剖面的水分分布变化过程。根据 PR1 的测试数据,根层土壤平均含水量接近灌溉控制下限时,开始用烘干法在灌水前和灌水后加密测量,以烘干法实测数据作为灌溉控制依据。另外芹菜定植后和采摘时也用烘干法进行各试区土壤含水量的全面测试。烘干法测试时,在每个试区薄膜条带上及薄膜条带之间分别取样,测点在整个试区内随机均匀布置,条带上及条带间测量点数量均大于 6 个。在各测点处用土钻以 5 cm 深度逐层钻取土样,土样直径 4 cm,取每层土样中部合适重量的土体装入铝盒测试含水量。取样测试深度均为 100 cm,薄膜条带部位取样时,土钻直接穿透薄膜取样,并对每次取样地点进行标识,避免以后在邻近点取样,取样钻孔用相同质地的土壤分层回填压实。

### 1.4 深层渗漏计算方法

本研究采用水量平衡方程分析计算不同铺膜方式下的深层渗漏。考虑到蔬菜生长的特点,为便于分析,作物体内保存的水量忽略不计,而将地下铺膜深度 40 cm 作为计算深度,推求通过 40 cm 深度底面的深层渗漏,分析公式如下:

$$DP = I - \Delta W - E_t \quad (1)$$

式中:  $I$  为本时段灌溉水量;  $\Delta W$  为时段初和时段末土壤贮水量差值;  $E_t$  为作物的腾发量;  $DP$  为深层渗漏,以上各参数单位均为 mm。

作物腾发量即作物需水量  $E_t$  可利用能量平衡法根据实测的大棚内的环境数据推求,公式如下<sup>[22]</sup>:

$$LE_t = (R_n - G) / (1 + \gamma(T_2 - T_1)) / (e_2 - e_1) \quad (2)$$

式中:  $L$  为汽化潜热 ( $\text{MJ/kg}$ );  $R_n$  为净辐射 ( $\text{W/m}^2$ );  $G$  为土壤热通量 ( $\text{W/m}^2$ );  $\gamma$  为湿度计常数 ( $\text{kPa/}^\circ\text{C}$ ),  $\gamma = 0.665 \times 10^{-3} P$ ,  $P$  为大气压 ( $\text{kPa}$ );  $T_1$ 、 $T_2$  为两个高度的温度 ( $^\circ\text{C}$ );  $e_1$ 、 $e_2$  为两个高度的水汽压 ( $\text{kPa}$ )。

## 2 试验结果与分析

芹菜在 4 月 19 日定植,7 月 1 日采摘,整个生长期共 73 d。根据实测大棚内的环境气象数据,采用能量平衡法计算的逐日芹菜腾发量见图 1,整个生长期累计腾发量为 160 8 mm。

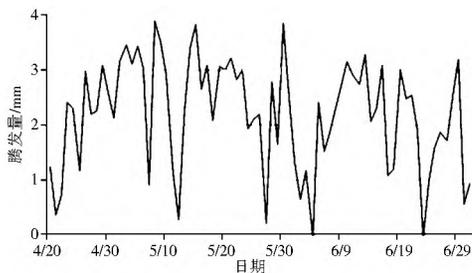


图 1 逐日腾发量过程线

Fig. 1 Daily evapotranspiration

根据测试结果,计算得出 40 cm 土壤底部的深层渗漏见表 3。不铺膜的 1 号方案在整个芹菜生育期灌水量为 240 mm,土壤贮水量变化基本持平,40 cm 地层底部深层渗漏为 80.2 mm,表明在通常种植条件下,温室蔬菜种植的深层渗漏还是非常可观的,在本例中达到了灌水量的 1/3。在采取地下铺膜措施的其他处理中,深层渗漏有了不同程度的减小;2 号方案,即在 40 cm 地层下按 40 cm 间距铺设宽度为 40 cm 的水平膜带,生育期灌水量为 240 mm,深层渗漏为 68.4 mm;3 号方案水平膜带间距为 10 cm,灌水量为 200 mm,深层渗漏为 58.6 mm,可见在根层下部铺设水平膜带对减少深层渗漏是有一定效果的,并且随着膜带间距的缩小,效果增强。但总体上讲,铺设水平膜带的效果并不十分明显,特别是间距较大时,与不铺膜的情况比较接近,当间距较小时才有一定效果,40 cm 宽的膜带,间距 10 cm 左右时,深层渗漏仍然为灌水量的 1/3 左右,但总灌水量下降了 1/4;4 号方案为 U 型铺膜,水平投影宽度为 40 cm,两边各折起 20 cm,间隔宽度为 40 cm,效果与 3 号方案即水平铺膜间隔宽度 10 cm 时基本相同;5 号方案同样为 U 型铺膜,间隔宽度为 10 cm,是本次试验中效果最为明显的,深层渗漏为 39.6 mm,为不铺膜方案的 1/2,且总灌水量降低了 40 mm。由试验结果可以看出,U 型铺膜减小深层渗漏的效果比水平铺膜显著,缩小铺膜间距也能明显减少深层渗漏。

表 3 40 cm 深度深层渗漏计算表

Table 3 The calculated deep percolation values for the 40 cm deep soil

方案	灌水量/mm	土壤贮水量变化/mm	深层渗漏/mm
1 号	240.0	- 1.0	80.2
2 号	240.0	10.7	68.4
3 号	200.0	- 19.4	58.6
4 号	200.0	- 17.1	56.3
5 号	200.0	- 0.4	39.6

各方案条件下 40 cm 深土壤贮水量变化过程见图 2。铺膜的四种方案与不铺膜相比,根层土壤含水量的变化过程非常相似。在整个生育期内,各方案根层土壤含水量都能较好地控制在适宜的范围,根层土壤干湿周期变化没有出现灌水后根层土壤长期处于高含水量从而影响到芹菜生长的情况,现场各种方案芹菜生长状况也没有明显区别,长势良好,这说明本试验中各种铺膜方案采用的膜带布置参数都比较合适。从图 2 中也可以看出铺膜对灌水周期的影响;不铺膜时各个阶段的灌水周期不同,在 5~15 d 之间;铺膜后,周期有所增长,变为 8~18 d;除 2 号方案外,铺膜方案均比不铺膜

减少了一次灌溉, 减少灌溉水量为 40 mm。

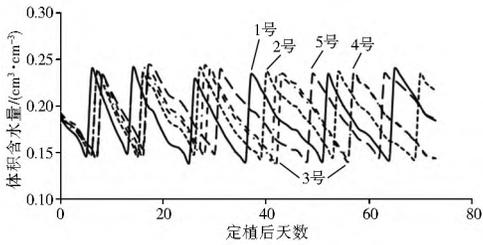


图2 各种方案40 cm 深土层贮水量变化过程  
Fig.2 Variations of soil water storage in the 40 cm deep soil under different scenarios

为了比较四种铺膜方案薄膜上土壤含水量及薄膜条带

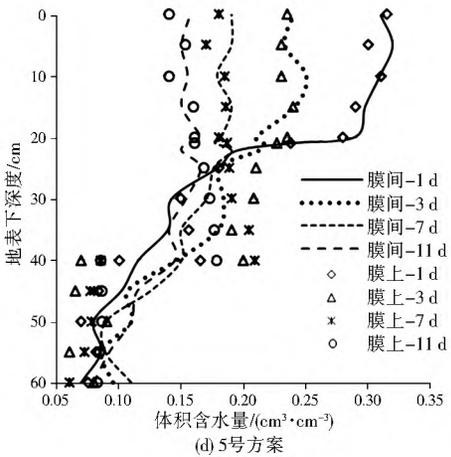
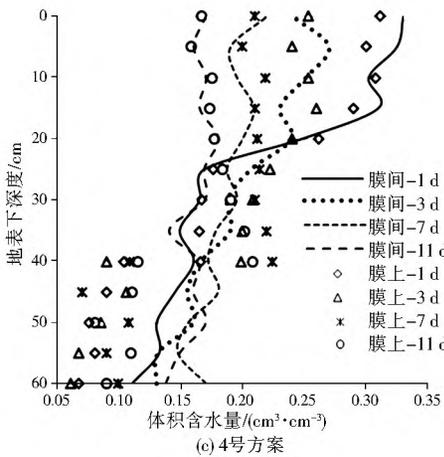
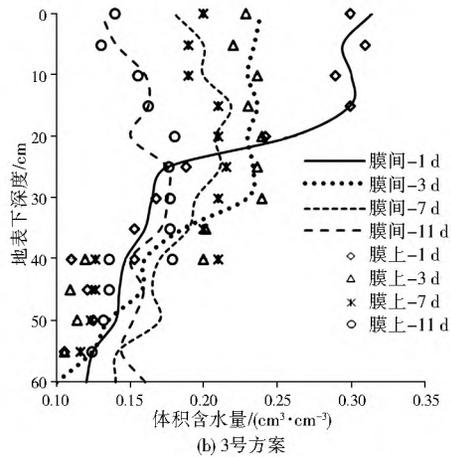
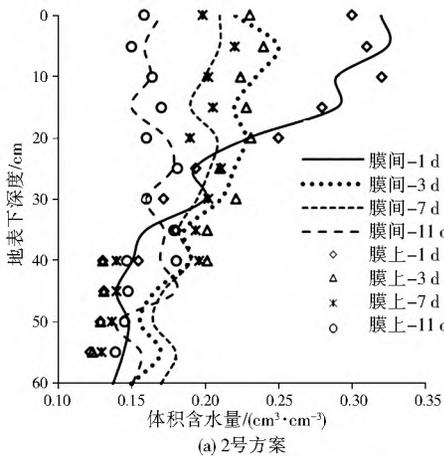


图3 各种铺膜方案膜带中心和间隔中心剖面含水量分布变化

Fig. 3 Variations of water content distribution at the film center and interval center profiles under different ground film forms

U 型铺膜在地表下 20 cm 范围的膜上和间隔部位的含水量和变化过程基本一致, 含水量均匀性较好, 20~ 40 cm 范围, 膜上土壤含水量明显高出间隔部位, 大于 40 cm 膜下部位, 含水量同样有一个陡降, 而且也明显低于膜间部位。这两个深度范围铺膜部位和间隔之间的差别随着灌水后时间的增长而缩小, 但差别始终明显。所以对 U 型铺膜芹菜根区土壤含水量的均匀性来说, 表层较好, 下层不均匀, 总体上其均匀性不如平面铺膜好。从测试数据上看, U 型铺膜两组方案, 根区土壤含水量均匀性没有明显差别或规律。

### 3 结论

(1) 温室蔬菜种植采用条带式铺膜能够起到减少深层渗

之间土壤含水量的差异, 即铺膜灌水后根层土壤水分分布的均匀性, 根据实测数据绘制出各方案在第 4 次灌水(时间在 5 月末至 6 月初)之后 1 d、3 d、7 d、11 d 土壤水分分布变化情况, 见图 3。

从图中可以看出, 水平铺膜在地表下 30 cm 范围的铺膜部位和膜带间隔部位土壤含水量基本一致, 变化过程相近, 所以芹菜生长实际到达的根区范围土壤含水量比较均匀, 间隔 40 cm 和间隔 10 cm 没有明显区别。两种水平铺膜方案的 30~ 40 cm 地层, 即铺膜高度以上 10 cm 范围, 膜上部位的土壤含水量明显高于间隔部位, 随着灌水后时间的延长, 差距逐步缩小。大于 40 cm 膜下部位土壤含水量有一个陡降, 明显低于间隔部位, 二者之间的差距也随灌水后时间的增长而缩小。

漏的作用, 只要布置参数合适, 能够将根层土壤含水量控制在适宜范围内, 而不至于对蔬菜的生长造成不良影响。

(2) 铺膜条带可以采用水平或 U 型两种布置方式, 但从减少深层渗漏的角度看, U 型铺膜的效果好于平面铺膜, 而且铺膜间隔越小, 效果越明显。

(3) 平面铺膜, 30 cm 深度根层的土壤含水量在平面分布上的均匀性较好, 铺膜部位与间隔部位含水量和变化过程基本相同; U 型铺膜的均匀性稍差, 主要体现在膜上靠近薄膜部分 U 型槽里土壤含水量偏高。

(4) 与本例透水性相近的温室芹菜种植, 地下铺膜布置参数设置为膜宽 40 cm, 间隔 10 cm 左右, 埋深 40 cm, U 型折起高度 15~ 20 cm 应当是较为适宜的。但是, 对于不同蔬

菜品种以及在不同生长阶段,优化的铺膜布置参数还需经过进一步的试验或数值分析才能确定。

#### 参考文献(References):

- [1] 程道远,陈文瑞,赵小玲,等.流沙地铺设沥青隔水层防渗试验报告[J].中国沙漠,1986,6(2):52-56.(CHENG Daoyuan, CHENG Wenrui, ZHAO Xiaoling, et al. Application of Impermeable Asphalt Layer in Sandy Soil[J]. Journal of Desert Research, 1986, 6(2): 52-56. (in Chinese))
- [2] 陈彩富,钱太涛.流动沙丘的改良利用与经济效益—以沙坡头地区为例[J].中国沙漠,1984,4(3):37-44.(CHEN Caifu, QIAN Tai-tao. Transformation and Utilization of Sand Land and Its Beneficial Result—Case Study in Shapotou, Zhongwei, Ningxia[J]. Journal of Desert Research, 1984, 4(3): 37-44. (in Chinese))
- [3] 黄学文,何宗颖,严哲洙.科尔沁沙地奈曼旗水稻生产潜力与增产途径[J].中国沙漠,1994,14(1):75-78.(HUANG Xuewen, HE Zongying, YAN Zhezhu. Climatic Potential Productivity of Rich and Its High Yield Way in Naiman Banner[J]. Journal of Desert Research, 1993, 14(1): 75-78. (in Chinese))
- [4] 黄学文,严哲洙.沙地薄膜水稻栽培研究[J].中国沙漠,1995,15(Supp. 1):17-24.(HUANG Xuewen, YAN Zhezhu. Study on Water saving and High yield Cultural Techniques in Film bottomed Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 1995, 15(Supp. 1): 17-24. (in Chinese))
- [5] 黄学文.沙地薄膜水稻的灌溉制度[J].中国沙漠,1995,15(Supp. 1):70-74.(HUANG Xuewen. Irrigation System of Film bottomed Sandy Rice Field[J]. Journal of Desert Research, 1995, 15(Supp. 1): 70-74. (in Chinese))
- [6] 黄学文,沙地薄膜水稻生长特征[J].中国沙漠,1995,15(Supp. 1):54-58.(HUANG Xuewen. Analysis on Rice Characteristics in Film bottomed Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 1995, 15(supp. 1): 54-58. (in Chinese))
- [7] 赵哈林,黄学文,刘新民.沙地薄膜水稻栽培技术规程[J].中国沙漠,1995,15(Supp. 1):7-16.(ZHAO Hailin, HUANG Xuewen, LIU Xinmin. Specification of Rice Cultivation on Film bottomed Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 1995, 15(Supp. 1): 7-16. (in Chinese))
- [8] LING Tao, REN Jun. Wheat Growth and Yield under Different Depth Film bottomed Cultivation in Sandy Land[J]. Soil & Tillage Research, 2004, 76(2): 139-145.
- [9] ZHOU Xiaolei, WANG Hui, CHEN Quanguo, et al. Coupling Effects of Depth of Film bottomed Tillage and Amount of Irrigation and Nitrogen Fertilizer on Spring Wheat Yield[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(1): 251-261.
- [10] 刘千枝,任珺,王志泰.沙地衬膜对小麦生长和产量的影响[J].甘肃农业大学学报,2000,35(2):162-166.(LIU Qianzhi, REN Jun, WANG Zhitai. Effect of the Film bottom Sandy Land on the Growth and Yield of Wheat[J]. Journal of Gansu Agriculture University, 2000, 35(2): 162-166. (in Chinese))
- [11] Barth, H. K., Sustainable and Effective Irrigation Through a New Subsoil Irrigation System(SIS)[J]. Agricultural Water Management, 1999, 40(2-3): 283-290.
- [12] 王伟,李光永,段中珉,等.利用工程措施改变地下滴灌土壤湿润模式的试验[J].节水灌溉,2000,(3):22-24.(WANG Wei, LI Guangyong, DUAN Zhongmin, et al. Experiment Using the Engineering Measures to Change the Subsurface Drip Irrigation Soil Wetting Pattern[J]. Water Saving Irrigation, 2000, (3): 22-24. (in Chinese))
- [13] 于国丰,王保泽,李春龙,等.微润灌水器的研制及沙地灌溉试验[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(11):218-222.229.(YU Guofeng, WANG Baوزه, LI Chunlong, et al. Development of the Micro douche and Irrigation Experiment in Sands[J]. Journal of North A & F University (Nat. Sci. Ed.), 2007, 35(11): 218-222. 229. (in Chinese))
- [14] 范凤翠,张立峰,李志宏,等.日光温室番茄控制土壤深层渗漏的灌水量指标[J].农业工程学报,2010,26(10):83-89.(FAN Fengcui, ZHANG Lipei, LI Zhihong, et al. Tomato Irrigation Index for Soil Water Leakage Control in Greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 83-89. (in Chinese))
- [15] 于红梅.控制土壤含水量对蔬菜产量及露地菜田水分渗漏量的影响[J].中国农学通报,2007,23(4):232-236.(YU Hongmei. Effect of Control soil Water Content on Vegetable Yield and the Characteristic of Water Drainage in Vegetable Filed[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(4): 232-236. (in Chinese))
- [16] 曹优明,陈倩,王秀茹,等.北京市大棚蔬菜节水灌溉技术[J].吉林农业科学,2011,36(3):48-52.(CAO Youming, CHEN Qian, WANG Xiuru, et al. Studies on Water saving Irrigation Technology of Awning Vegetables in Beijing[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2011, 36(3): 48-52. (in Chinese))
- [17] 张书函,许翠平,刘洪禄,等.日光温室晚春茬生菜渗灌技术试验研究[J].灌溉排水,2002,21(4):28-31.34.(ZHANG Shuhan, XU Cuiping, LIU Honglu, et al. Application of Subsurface Irrigation in Lettuce Cultivated in Late Spring in Solar Plastic Greenhouses[J]. Irrigation and Drainage, 2002, 21(4): 28-31. 34. (in Chinese))
- [18] 陈新明,蔡焕杰,王健,等.根区局部控水无压地下灌溉技术在温室大棚中的试验研究[J].农业工程学报,2005,21(7):30-33.(CHEN Xinming, CAI Huanjie, WANG Jian, et al. Experimental Study on the Technology of Partial Rootzone Non-pressure Subirrigation Applied in Greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 30-33. (in Chinese))
- [19] 黄铁抓,范凤翠,李志宏,等.日光温室番茄减蒸控漏节水灌溉技术综合效果比较[J].河北农业科学,2012,16(4):60-63.69.(HUANG Tiezhua, FAN Fengcui, LI Zhihong, et al. Comparison of Comprehensive Effect of Water saving Irrigation Technique of Reducing Evaporation and Controlling Water Leakage in Greenhouse Tomato[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2012, 16(4): 60-63. 69. (in Chinese))
- [20] 石然,孟卫东.膜上灌溉条件不同灌水量对温室番茄生长及水分利用的影响[J].北京农业,2010,(S1):198-200.(SHI Ran, MENG Weidong. Effect of Irrigation Conditions on the Membrane of Different Irrigation on Growth and Water use of Greenhouse Tomato[J]. Beijing Agriculture, 2010, (S1): 198-200. (in Chinese))
- [21] 郑国保,孔德杰,张源沛,等.灌水量对日光温室辣椒膜下滴灌耗水规律的影响[J].农业科学研究,2010,31(4):50-52.(ZHENG Guobao, KONG Dejie, ZHANG Yuanpei, et al. Effects of Drip Irrigation Under Film on Water Consumption of Pepper in Solar Greenhouse[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2010, 31(4): 50-52. (in Chinese))
- [22] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.(LEI Zhidong, YANG Shixiu, XIE Senchuan. Soil Water Dynamic[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese))