

杯罩覆盖模式对烟田水热效应与烟苗生长的影响

李连豪¹ 索晨¹ 李超¹ 秦伟桦² 肖亚涛¹ 李栋浩³ 杨小密¹ 麻国震¹

(1. 河南农业大学机电工程学院, 郑州 450002; 2. 河南省烟草公司三门峡市公司, 三门峡 470002;
3. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450046)

摘要: 为探究杯罩覆盖模式对烟田土壤水热效益与烟苗生长的影响,通过田间试验分析杯罩覆盖模式(ZF)与传统地膜覆盖模式(DF)的土壤水热调控效益及对烟苗长势的影响。试验结果表明:ZF处理冠层净辐射日累积量达18.2 MJ/m²,较DF处理(16.5 MJ/m²)提高10.3%;DF处理因与土壤间隙较小,深度8 cm土壤热通量白天峰值(185 W/m²)较ZF处理(123 W/m²)高33.5%,但夜间ZF处理热通量散失更快;土壤含水率呈现“表层ZF处理高、深层DF处理高”的分布特征,深度10 cm ZF处理含水率较DF高1%~6%,深度30 cm低3%~5%;温度分布表现为ZF处理深度10 cm昼高夜低(白天高6.3%、夜晚低9.3%),深度20~30 cm全天低5.3%~6.1%;烟苗长势方面,ZF处理叶片数较DF处理多1.4片,根系占比显著提高1.24个百分点,但最大叶长短2.22 cm,株高与叶宽无显著差异。结果表明,杯罩覆盖模式在维持烟田表层土壤水热效益的同时,可提升烟苗长势,为干旱半干旱地区农业微环境调控提供了环保型技术方案。

关键词: 烟草; 新式移栽; 净辐射; 土壤热通量; 土壤温湿度; 烟苗长势

中图分类号: S201.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0343-08 **OSID:** 

Effect of Cup Covering Mode Instead of Plastic Film on Hydrothermal Effect and Tobacco Seedling Growth in Tobacco Field

Li Lianhao¹ Suo Chen¹ Li Chao¹ Qin Weihua² Xiao Yatao¹ Li Donghao³ Yang Xiaomi¹ Ma Guozhen¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China
2. Sanmenxia City Company, Henan Tobacco Company, Sanmenxia 470002, China
3. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Aiming to investigate the effects of cup mulching on soil water and heat benefits in tobacco fields and the growth of tobacco seedlings, a field experiment was conducted to systematically compare the soil water and heat regulation effects and seedling growth performance between the cup mulching mode (ZF) and the conventional plastic film mulching mode (DF). The results showed that the daily cumulative canopy net radiation of the ZF treatment reached 18.2 MJ/m², which was 10.3% higher than that of the DF treatment (16.5 MJ/m²). Due to the smaller gap between the film and soil surface, the daytime peak soil heat flux at 8 cm depth under DF (185 W/m²) was 33.5% higher than that under ZF (123 W/m²), whereas the heat flux dissipated more rapidly at night under ZF. Soil moisture exhibited a distribution characteristic of higher in the surface layer under ZF and higher in the deep layer under DF; the soil moisture content at 10 cm depth under ZF was 1%~6% higher than that under DF, while it was 3%~5% lower at 30 cm depth. For soil temperature, the temperature at 10 cm depth under ZF was higher in the daytime (by 6.3%) and lower at night (by 9.3%), and it was 5.3%~6.1% lower throughout the day at 20~30 cm depth compared with that under DF. In terms of tobacco seedling growth, the ZF treatment had 1.4 more leaves than that of DF, and the root mass ratio was significantly increased by 1.24 percentage points, but the maximum leaf length was 2.22 cm shorter; no significant differences were observed in plant height and leaf width. The research result demonstrated that the cup mulching mode can improve tobacco seedling growth while maintaining favorable soil water and heat

benefits in the surface layer of tobacco fields, providing an environmentally friendly technical scheme for agricultural microenvironment regulation in arid and semi-arid regions.

Key words: tobacco; new-type transplanting; net radiation; soil heat flux; soil temperature and moisture; tobacco seedling growth

0 引言

地膜覆盖技术作为农业生产中调控土壤微环境的关键手段^[1-2],自 20 世纪 70 年代引入我国以来,已在粮食作物、经济作物及园艺作物种植中得到广泛应用,成为保障农业增产增收的重要技术支撑之一。其核心作用机制在于通过塑料薄膜的物理阻隔效应,有效减少土壤水分蒸发,同时利用薄膜对太阳辐射的吸收与反射特性,提升表层土壤温度,从而为作物种子萌发、幼苗生长创造适宜的水热环境^[3-4]。

然而,地膜覆盖技术在带来显著经济效益的同时,长期应用引发的环境问题日益凸显。目前农业生产中广泛使用的聚乙烯地膜,由于化学结构稳定、生物降解性极差^[5-6],导致农田残膜不断累积。这些残膜碎片不仅破坏土壤团粒结构,使土壤容重增加 10%~15%、孔隙度降低 8%~12%,阻碍作物根系伸展与养分吸收^[7-8],还会缠绕农机部件,导致耕作效率下降 20%~30%,每年造成的直接经济损失超过 100 亿元^[9]。更严重的是,残膜在风化过程分解产生的微塑料(粒径小于 5 mm)可通过根系吸收进入作物体内,进而通过食物链富集,对人体健康构成潜在威胁,成为制约农业绿色发展的瓶颈^[10]。

针对传统地膜产生的环境问题,当前研究主要聚焦于 3 大方向:①可降解地膜研究,开发生物降解地膜^[11-12]以期在功能期内发挥增温保墒作用后自然降解^[13],研究表明,部分降解膜在特定条件下能维持水热效益^[14-15],但降解周期可控性^[16]、力学性能及对土壤微生物^[17]和作物生长^[18]的潜在影响仍需深入评估。②覆盖方式优化,探索沟垄局部覆膜、配色地膜^[19]或调整覆膜比例,旨在减少塑料用量并优化水热调控。③残膜污染治理,研发高效残膜回收机械^[20-21]以减少田间残留^[22-23]。然而,降解膜性能的稳定性、高成本以及残膜回收的彻底性和经济性仍是实际应用的挑战。如何在维持土壤微环境调控效益的同时,减少塑料污染,已成为农业工程领域亟待解决的关键科学问题。

杯罩移栽模式作为一种新型局部覆盖技术,通过物理屏障与可回收设计有机结合,为破解上述难题提供了新思路。该模式通过精准调控土壤水热环境,在减少塑料使用量的同时,有望实现与传统地膜相当甚至更优的微环境调控效果。水热效益作为衡

量覆盖技术效能的核心指标,直接影响作物根系生长、养分吸收及生理代谢过程。明确杯罩覆盖下土壤温度、湿度时空分布特征及其与传统地膜差异,解析对太阳辐射吸收、土壤热通量传导的影响机制,是评估该模式适用性的基础。

本研究以河南省三门峡市烟区为试验区域,通过监测不同覆盖处理下不同土壤深度的温湿度、冠层净辐射、土壤热通量等参数,系统分析杯罩与传统地膜的水热效益差异。以期揭示新型覆盖模式对土壤微环境的调控规律,为优化烟草栽培技术、推动环保型覆盖材料的应用提供理论依据,同时为干旱半干旱地区作物种植的微环境调控技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 井窖式杯罩移栽模式

井窖式移栽通过在地膜覆盖的垄面上挖掘深 15~20 cm 圆柱型窖穴,窖口直径为 8~10 cm,形成垂直井窖结构,将幼苗置于窖底,适合烟草、红薯等深根作物。该技术以深栽为核心,利用窖穴的保温保墒特性抵御早春低温与干旱,同时减少风害,显著提高幼苗成活率,尤其适用于北方干旱多风地区。杯罩移栽采用高约 20 cm、直径约 14 cm 可回收利用的透明塑料杯罩覆盖幼苗,形成微型温室环境。其核心是通过物理覆盖形成稳定的微环境,增温保湿,促进烟草幼苗的缓苗生长,同时隔绝害虫与外界风害。杯罩移栽模式如图 1 所示。

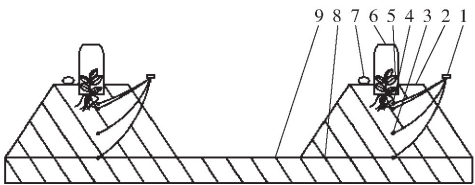


图 1 杯罩移栽模式示意图

Fig. 1 Transplanting mode of cup cover

1. 数据采集器 2. 垄顶 3. 土壤温湿度传感器 4. 土壤热通量传感器 5. 烟苗 6. 杯罩 7. 滴灌带 8. 窖底 9. 垄沟

1.2 研究区概况

于 2023—2025 年 4—5 月在河南省三门峡市渑池县烟区果园烟站试验田(34°46'N, 111°47'E)开展试验,该区域属暖温带大陆性季风气候,年均气温 13.2℃,无霜期 184~218 d,年日照时数约 2 354 h,降水集中于夏季且分布不均,土壤类型以褐土为主,质地

均一,0~20 cm 土层平均容重 1.3~1.5 g/cm³,田间持水率 25%~30%,pH 值 7.5~8.0,有机质含量 10~15 g/kg,具备北方烟区典型的土壤水热特征。

试验期内 4—5 月平均气温 20~25℃,适宜烟草移栽;光照强度 500~800 μmol/(m²·s),为烟草移栽期提供充足能量。自然降水较多,但存在阶段性干旱。

1.3 试验设计

试验设置 2 种薄膜覆盖处理:传统地膜覆盖(DF)和杯罩覆盖(ZF)。每个处理设 3 个重复,共 6 个小区,小区为完全随机布置。灌溉方式均为地表滴灌,滴灌系统采用支管加辅管,每个小区由压力表、闸阀和水表控制滴灌系统工作压力和灌水量。滴灌系统安装完成后,覆盖薄膜和杯罩。薄膜覆盖为全覆盖,垄沟位置覆盖 2~5 cm 土层,用于固定薄膜。除开始阶段灌水至饱和外,后续施用水肥时间和数量均按照当地农民惯例操作。选取 3 年种植期间天气相同的雨天和晴天作为典型天日。

1.4 试验材料

烟草品种为秦烟 96,采用起垄种植,每个小区 1 垄,垄宽 0.7 m,垄高 0.3 m,小区长 50 m,宽 1.2 m,面积 60 m²。烟苗种植株距为 0.5 m。烟苗移栽时间为 5 月 6 日,杯罩和地膜回收时间为 5 月 26 日。

1.5 测定项目与方法

土壤含水率、温度:利用传感器(ECTH-N01 型,山东仁科测控技术有限公司)长期监测距离垄顶 10、20、30 cm 土壤含水率、温度。采集数据间隔为 10 s,计算并存储每 10 min 的数据。

冠层净辐射和土壤热通量:分别于每个处理的 1 个小区安装全辐射计(RA-N01 型,山东仁科测控技术有限公司)监测冠层上方全辐射,安装高度为距垄顶 1 m。利用当地气象数据,如地表温度,气温和空气相对湿度等使用公式计算净辐射。分别于每个处理的 1 个小区,在距垄顶 8 cm 土壤深度位置安装土壤热通量板(SHF-N01 型,山东仁科测控技术有限公司)监测土壤热通量。采集数据间隔 10 s,计算并存储每 10 min 数据。

太阳净辐射(R_n)计算式为

$$R_n = (1 - \alpha) S - L_j \tag{1}$$

其中
$$L_j = L_1 - L_2 \tag{2}$$

$$L_1 = \varepsilon \sigma T_s^4 \tag{3}$$

式中 S ——太阳全辐射,W/m²
 α ——地表反照率,%
 L_j ——净长波辐射,W/m²
 L_1 ——地表向上发射的长波辐射,W/m²
 L_2 ——大气向下发射的逆辐射,W/m²

ε ——地表比辐射率,表征地表发射能力
 σ ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数,取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

T_s ——地表温度,K

逆辐射受气温、相对湿度、云量影响,常用 Brunt 公式,即

$$L_2 = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \tag{4}$$

式中 T_a ——近地面气温,K
 ε_a ——大气有效比辐射率
水汽压计算式为

$$e = RH e_s \tag{5}$$

其中
$$e_s = 0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T + 237.3} \right) \tag{6}$$

式中 e ——水汽压,kPa
 RH ——相对湿度
 e_s ——饱和水汽压,kPa
 T ——气温,℃

地膜覆盖下能量平衡方程可表示为

$$R_n = G + LE + H \tag{7}$$

式中 LE ——蒸发潜热,W/m²
 H ——感热通量,W/m²
 G ——土壤热通量,W/m²

1.6 数据处理

采用 Excel 2023 软件进行数据预处理,剔除明显异常值;使用 SPSS 26.0 软件进行方差分析,检验不同处理间差异显著性,显著水平设为 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖模式对净辐射的影响

不同覆盖处理烟草 3 年移栽期典型天日净辐射平均值变化如图 2 所示。由图 2 可知,2 种处理净辐射日变化均呈现明显的单峰曲线特征,符合太阳辐射的日变化规律。各处理各典型天在 12:00—14:00 达到净辐射最大值,各处理达到最大值的时间差异不大。ZF 处理净辐射峰值较 DF 处理高 10.5%,这一差异在白天的光合有效辐射阶段表现显著,而在早晚弱光时段差距缩小,日落后趋于一致。从净辐射日积分值来看,ZF 处理日累积净辐射为 18.2 MJ/m²,较 DF 处理(16.5 MJ/m²)高 10.3%。ZF 作为局部覆盖模式,仅覆盖烟苗周围约 15%的地表区域,其余裸土区域的反照率显著低于地膜,减少了太阳辐射的反射损失。

2.2 不同覆盖模式对土壤热通量的影响

不同覆盖处理烟草 3 年苗期典型天日深度 8 cm 处土壤热通量平均值变化如图 3 所示。由图 3 可知,2 种处理土壤热通量均呈昼夜周期性变

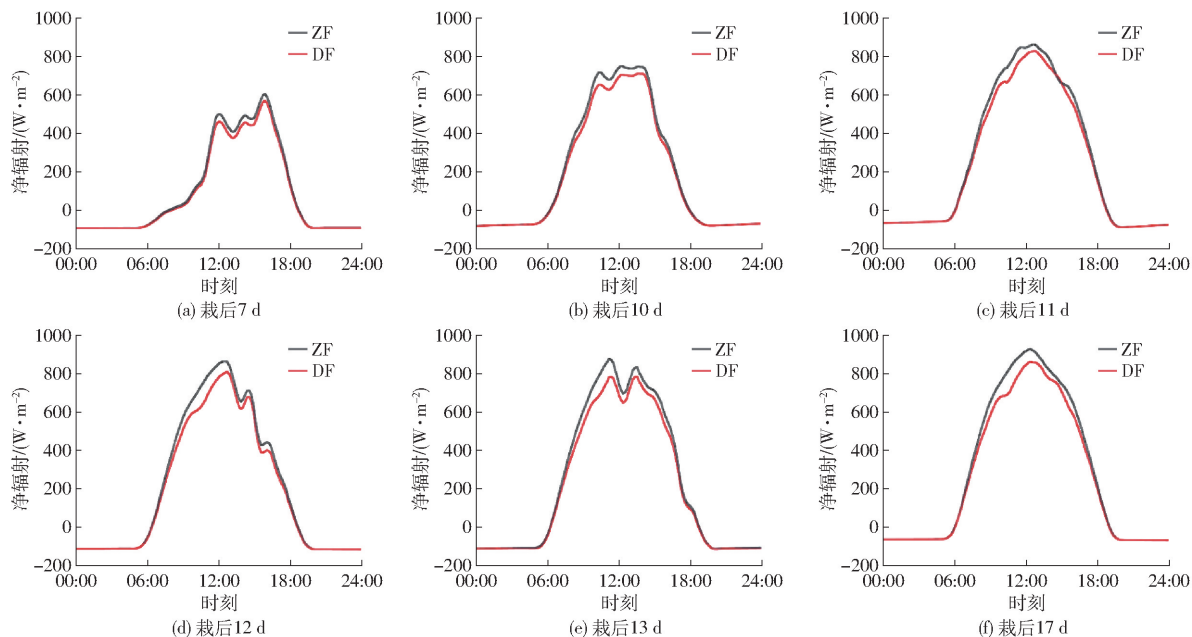


图 2 不同覆盖处理典型天日烟苗净辐射变化曲线

Fig. 2 Typical diurnal variation curves of net radiation of tobacco seedlings under different mulching treatments

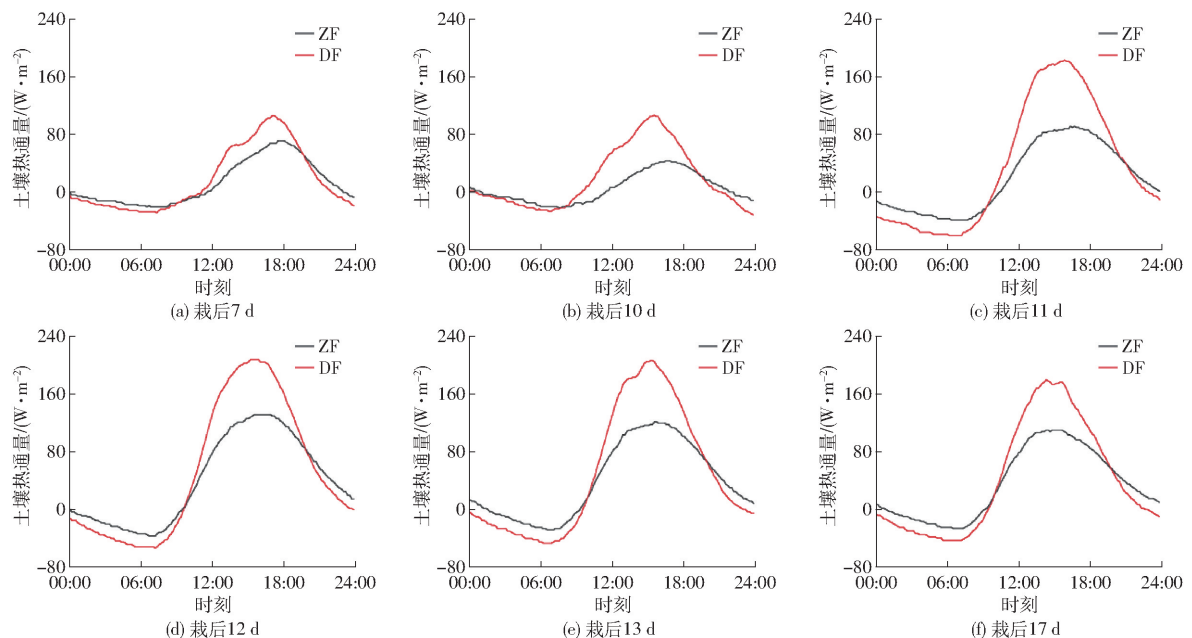


图 3 不同覆盖处理典型天日烟苗深度 8 cm 处土壤热通量变化曲线

Fig. 3 Typical diurnal variation curves of soil heat flux at 8 cm depth of tobacco seedlings under different mulching treatments

化^[24-25],白天为正(大气热量向表层土壤传导),夜晚为负(表层土壤热量向大气释放)。DF 处理白天热通量峰值为 185 W/m²,较 ZF 处理(123 W/m²)高 33.5%;夜间 ZF 处理热通量最低值为 -68 W/m²,低于 DF 处理(-52 W/m²)。DF 处理土壤热通量在苗期白天总体上高于 ZF 处理,但晚上 ZF 处理与 DF 处理呈现相反结果。ZF 处理杯罩与土壤间存在较厚空气层,显著阻碍了热量向土壤传导,导致白天热通量较低。夜间裸土区域土壤热量可通过长波辐射和对流直接向大气释放,而 DF 处理地膜阻隔作用减少了夜间热量逸散,ZF 处理热量散失更快。

2.3 不同覆盖模式对土壤含水率的影响

不同覆盖处理烟草 3 年移栽期典型天日不同深度处土壤温湿度平均值变化如图 4 所示。由图 4 可知,各处理不同深度土壤温湿度变化趋势一致。总体上,ZF 处理 10 cm 处土壤含水率大于 DF 处理。DF 处理 20 cm 和 30 cm 处土壤含水率总体上高于 ZF 处理。不同深度土壤温度日变化随气温而变化,ZF 处理 10 cm 处土壤温度在白天总体上高于 DF 处理,在夜晚小于 DF 处理。ZF 处理 20 cm 和 30 cm 处土壤温度总体上低于 DF 处理,在夜晚时差距较小,在白天时差距较大。ZF 处理 10 cm 最高土壤含

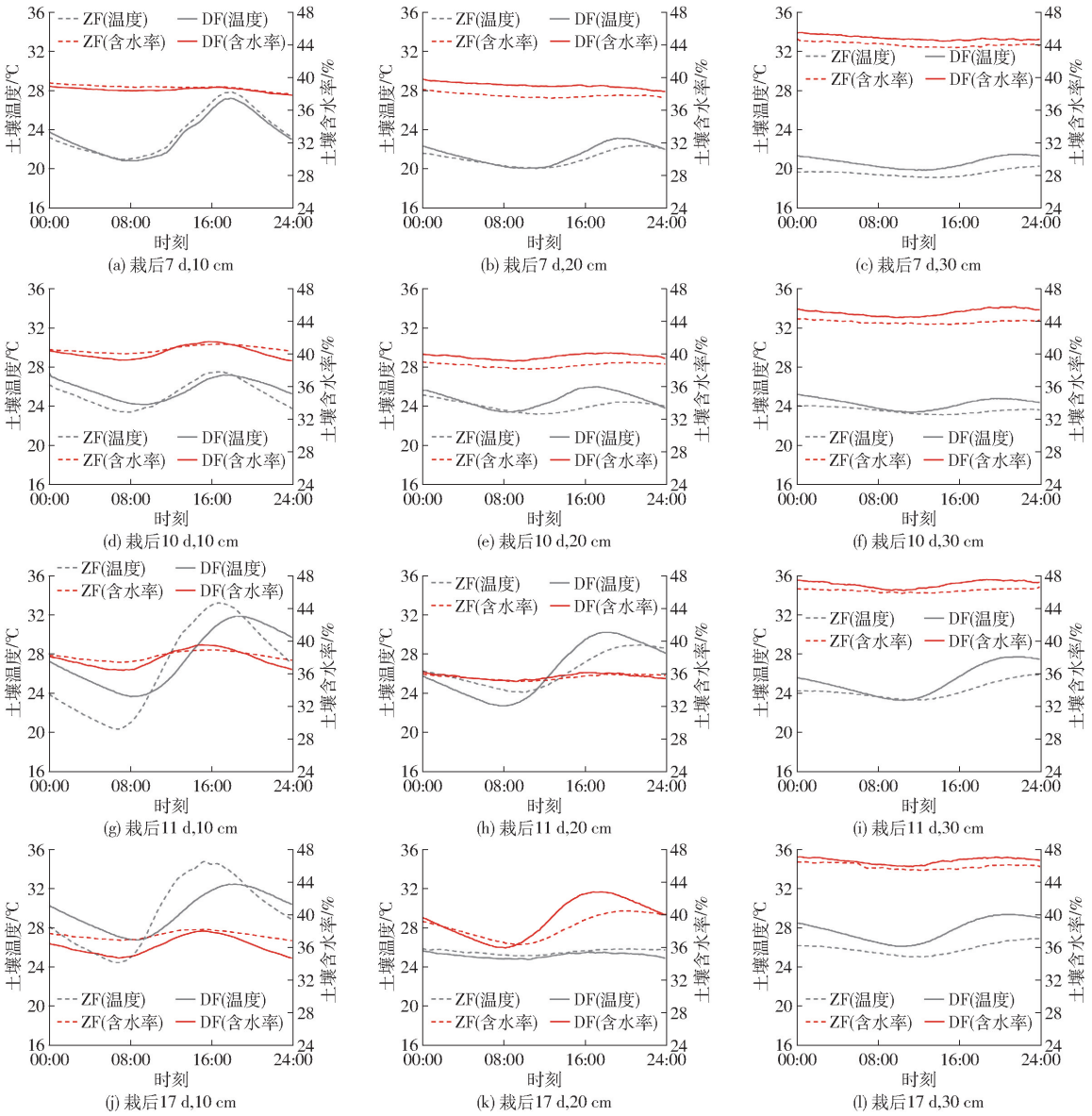


图 4 不同覆盖处理烟苗期不同深度处土壤温湿度典型日变化曲线

Fig. 4 Typical diurnal variation curves of soil temperature and moisture at different depths during tobacco seedling stage under different mulching treatments

水率较 DF 处理高 1%，最低土壤含水率高于 DF 处理 6%。ZF 处理 20 cm 最高土壤含水率较 DF 处理低 2%，最低土壤含水率低于 DF 处理 1%。ZF 处理 30 cm 最高土壤含水率较 DF 处理低 3%，最低土壤含水率低于 DF 处理 5%。ZF 处理的局部物理屏障作用减少了表层土壤水分的直接蒸发，但覆盖范围有限，深层土壤含水率低于 DF 处理。ZF 处理 10 cm 最高土壤温度较 DF 处理高 21%，最低土壤温度低于 DF 处理 26%。ZF 处理 20 cm 最高土壤温度较 DF 处理低 16%，最低土壤温度低于 DF 处理 4%。ZF 处理 30 cm 最高土壤温度较 DF 处理低 18%，最低土壤温度低于 DF 处理 8%。杯罩白天高透光率使热量快速聚集，空气层减少热传导损失，表层升温更快；“夜低”则因裸土区域夜间散热快，胁迫浅层

土壤温度快速下降。

2.4 不同覆盖模式对烟苗长势的影响

不同覆盖处理对烟苗长势及其指标显著性如表 1 所示。由表 1 可知，杯罩覆盖(ZF)与传统地膜覆盖(DF)处理下烟苗长势呈现明显分化：叶片数方面，ZF 处理单株均值为 5.4 片，较 DF 处理(4.0 片)多 1.4 片，组间差异极显著，表明 ZF 处理能显著促进烟苗叶片分化；株高上，ZF 处理均值为 14.34 cm，DF 处理为 15.00 cm，组间差值仅 -0.66 cm，无显著差异，说明 2 种覆盖模式对烟苗株高的调控效果相近；最大叶长上，DF 处理均值达 19.94 cm，较 ZF 处理(17.72 cm)长 2.22 cm，组间差异极显著，表明 DF 处理更有利于烟苗叶片的伸长生长；最大叶宽上，DF 处理均值为 8.54 cm，略高于 ZF 处理(7.64 cm)，

组间差值 -0.9 cm , p 值 0.063 接近 0.05 临界值,但差异性仍不显著;根系占比上,ZF 处理均值为 29.88% ,较 DF 处理 (28.64%) 高 1.24 个百分点,差异极显著,表明 ZF 处理在促进烟苗根系发育方面更具优势。综合来看,不同覆盖模式对烟苗生长的调控存在差异,ZF 覆盖更利于叶片分化和根系构建,DF 覆盖则在叶片伸长生长上表现更优,而二者对株高和叶宽的影响未达显著水平。

表 1 不同覆盖处理烟苗长势指标显著性
Tab.1 Significance of tobacco seedling growth index under different mulching treatments

参数	ZF 处理	DF 处理	<i>t</i>	<i>p</i>
叶片数	(5.4 ± 0.55) 片	(4.0 ± 0.71) 片	3.5	0.008 **
株高	(14.34 ± 0.88) cm	(15.00 ± 0.71) cm	-1.31	0.227
最大叶长	(17.72 ± 0.56) cm	(19.94 ± 0.93) cm	-4.78	<0.001 **
最大叶宽	(7.64 ± 0.75) cm	(8.54 ± 0.56) cm	-2.15	0.063
根系占比	(29.88 ± 0.47) %	(28.64 ± 0.52) %	3.78	0.005 **

注:**表示影响极显著($p < 0.01$)。

3 讨论

3.1 不同覆盖模式对净辐射和土壤热通量的影响

不同覆盖模式都是通过影响土壤-作物-大气系统间的水热传输而影响净辐射、土壤热通量及土壤温湿度的时空分布。地膜作为全域性覆盖物,与土壤表面形成紧密接触,蒸发潜热显著降低,净辐射主要分配给土壤热通量和感热通量,其中土壤热通量占比达 $40\% \sim 50\%$,因此 DF 处理土壤热通量较高。而杯罩覆盖(ZF)作为局部覆盖(仅占地表面积 15% 左右)杯罩内部因透光率高和空气层温室效应,净辐射主要分配给土壤热通量和蒸发潜热;杯罩外部裸土区域,净辐射则更多用于蒸发潜热和感热通量,土壤热通量占比仅 $10\% \sim 20\%$ 。这种非均匀分配导致 ZF 处理整体土壤热通量低于 DF 处理,但表层土壤在白天因局部能量集中而温度更高。夜间 DF 全域地膜可通过连续覆盖减少夜间长波辐射损失,维持深层热量^[26];而 ZF 处理裸土区域直接与大气进行热交换,且杯罩无法形成闭环保温,导致浅层热量快速逸散。此结果与 Bonachela 等^[27]关于“薄膜-土壤间隙影响热传输”的研究结论一致,验证了覆盖形态对热传导的关键调控作用。

净辐射差异源于覆盖模式对地表辐射吸收与反射特性的调控。本研究中,罩杯覆盖(ZF)日累积净辐射量 (18.2 MJ/m^2) 较传统地膜覆盖(DF)高 10.3% ,核心原因在于两者的覆盖范围与地表反照率差异:DF 为全域地膜覆盖,地膜表面光滑且反射率较高,导致大量短波辐射被反射损失^[28];而 ZF 为

局部覆盖,未覆盖的裸土区域反照率较低,减少了辐射反射损耗,同时杯罩的高透光率增强了局部辐射吸收效率,共同提升了净辐射累积量。

3.2 不同覆盖模式对土壤温湿度的影响

土壤温湿度的分层分布是覆盖模式与水热传导协同作用的结果^[29-30]。含水率方面,ZF 表层 (10 cm) 含水率较 DF 高 $1\% \sim 6\%$,因杯罩的局部物理屏障减少了表层水分蒸发,且滴灌水分在覆盖区域聚集;而 DF 深层 (30 cm) 含水率高 $3\% \sim 5\%$,是由于全域地膜覆盖全面抑制水分散失^[31-32]。ZF 覆盖分布与植株苗期浅根系 ($0 \sim 20\text{ cm}$) 的吸水需求更匹配,利于提升表层水分利用效率。

温度方面,ZF 表层呈现“昼高夜低”特征:白天杯罩的温室效应使热量快速聚集,空气层减少热损失^[33],表层升温更快;夜间因缺乏深层热量补给,裸土区域散热快,导致浅层温度骤降。而 DF 通过地膜全面覆盖减少表层土壤温度散失^[33-34],使深度 $20 \sim 30\text{ cm}$ 温度全天较 ZF 高 $5.3\% \sim 6.1\%$ 。

3.3 不同覆盖模式对烟苗长势的影响及其技术优势

从技术功能看,ZF“表层优、深层弱”水热特征更贴合干旱半干旱地区作物(如烟草)苗期主要根系的生长需求^[35],既能满足根系活动所需的温湿度条件,又可避免深层土壤的无效增温与水分消耗。这种水热调控优势直接体现在烟苗长势上:ZF 处理叶片数较 DF 处理多 1.4 片,根系占比显著提高 1.24 个百分点,表明其能更有效促进烟苗叶片分化与根系发育^[36];而 DF 处理虽在最大叶长上表现更优,但株高和最大叶宽无显著差异,对于烟草苗期长势调控效果不及 ZF 处理全面。此外 DF 全域覆盖虽能促进深层水热累积,但长期应用导致的残膜污染已成为突出问题。从环保性看,ZF 通过减少塑料用量且实现回收复用,有效规避了可降解地膜成本高、降解周期不稳定及残膜回收不彻底的弊端,在农业绿色发展背景下,其技术路径更具可持续性,尤其适用于对环保要求高且水资源短缺的干旱半干旱烟区。

4 结论

(1)ZF 处理凭借局部覆盖的低反照率优势,使冠层净辐射日累积量较 DF 提高 10.3% ,增加了表层土壤的能量输入。较 DF 处理更高的表层土壤温度更适配烟苗生长需求。

(2)湿度分布上,ZF 处理表层含水率较高,利于浅层土壤保墒;DF 处理深层含水率较高,全域保水效果明显。温度动态上,ZF 处理表层土壤温度偏高,深层温度偏低,减少了深层土壤无效积温。

(3)在环境与农艺影响上,ZF 处理大幅减少塑料用量且可回收,从根本上避免了残膜污染,同时其优化的水热条件有效促进了烟苗叶片分化与根系生长,为干旱半干旱地区农业绿色发展提供了可行路径。

参 考 文 献

[1] Song Wenhuan, Han Fanxiang, Bao Zhengyu, et al. Mulching practices improve soil moisture and enzyme activity in drylands, increasing potato yield[J]. *Agronomy*, 2024, 14(5): 1077.

[2] Ma Zhen, Ma Jiantao, Chai Yuwei, et al. Mulching improves the soil hydrothermal environment, soil aggregate content, and potato yield in dry farmland[J]. *Agronomy*, 2024, 14(11): 2470.

[3] Wu Lihong, Quan Hao, Wu Lina, et al. Plastic mulching enhances maize yield and water productivity by improving root characteristics, green leaf area, and photosynthesis for different cultivars in dryland regions [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 305: 109105.

[4] Han Fanxiang, Zhang Yuanhong, Chang Lei, et al. Mulching practice regulates the soil hydrothermal regime to improve crop productivity in the rainfed agroecosystem of the Loess Plateau in China[J]. *Agriculture*, 2024, 15(1): 76.

[5] Xia Hao, Shen Jia, Riaz M, et al. Effects of agricultural plastic films on crop growth and soil health in tobacco fields: a comparative study[J]. *Applied Soil Ecology*, 2025, 206: 105795.

[6] Guo Wei, Li Jizhi, Wu Zhengfeng, et al. Biodegradable and conventional mulches inhibit nitrogen fixation by peanut root nodules-potentially related to microplastics in the soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 480: 136423.

[7] Shangguan Xiudi, Wang Xin, Yuan Meng, et al. Comparative impacts of polyethylene and biodegradable film residues on soil microbial communities and rapeseed performance under field conditions[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2025, 161: 553807.

[8] 张金瑞, 任思洋, 戴吉照, 等. 地膜对农业生产的影响及其污染控制[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(20): 3983 – 3996.

Zhang Jinrui, Ren Siyang, Dai Jizhao, et al. Influence of plastic film on agricultural production and its pollution control[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(20): 3983 – 3996. (in Chinese)

[9] 付强, 孟禹彤, 侯仁杰, 等. 低密度聚乙烯微塑料对土壤养分、水稻生长与生理特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(6): 638 – 648.

Fu Qiang, Meng Yutong, Hou Renjie, et al. Effects of low-density polyethylene microplastics on soil nutrients, rice growth and physiological characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(6): 638 – 648. (in Chinese)

[10] Long Bibo, Li Fayong, Wang Ke, et al. Impact of plastic film mulching on microplastic in farmland soils in Guangdong Province, China[J]. *Heliyon*, 2023, 9(6): e16587.

[11] Li Ling, Zong Rui, Sun Chitao, et al. Effects of long-term biodegradable film mulching on yield and water productivity of maize in North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 304: 109094.

[12] 胡可欣, 米俊珍, 刘景辉, 等. 全生物降解渗水地膜覆盖对黄土高原旱作谷子土壤水热及产量的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29(3): 36 – 49.

Hu Kexin, Mi Junzhen, Liu Jinghui, et al. Effects of fully biodegradable water permeable mulch on soil hydrothermal and the yield of dry-crop foxtail millet on the Loess Plateau[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(3): 36 – 49. (in Chinese)

[13] 闫森宇, 李颖, 冯良山, 等. 可降解配色地膜降解机制及对东北春玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(24): 199 – 207.

Yan Miaoyu, Li Ying, Feng Liangshan, et al. Degradation mechanism for degradable color-matching mulch film and its effect on the yield of spring maize in Northeast China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2024, 40(24): 199 – 207. (in Chinese)

[14] Li Yingjie, Wang Meng, Li Qian, et al. Biodegradable film drip fertigation is more conducive to reducing the diversity and abundance of antibiotic resistance genes than plastic film drip fertigation[J/OL]. *Plant and Soil*, [2025 – 12 – 18]. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07212-0>.

[15] Zhang Guixin, Zhang Shibo, Xia Zhenqing, et al. Integrated effects of polyethylene/biodegradable residual film on soil hydrothermal conditions and spring maize growth in rain-fed dryland[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 305: 109103.

[16] Nicolò I, Noemi T, Di Mola I, et al. Biodegradable mulching films affect soil temperature and agronomic performance of open field eggplant in hot-arid environments[J]. *Italian Journal of Agronomy*, 2024, 19(4): 100025.

[17] 张旺旺, 王惟舒, 张远征, 等. 全生物降解地膜应用现状及其环境风险[J]. *环境科学*, 2026, 47(4): 2757 – 2766.

Zhang Wangwang, Wang Weishu, Zhang Yuanzheng, et al. Application and environmental risks of biodegradable films[J]. *Environmental Science*, 2026, 47(4): 2757 – 2766. (in Chinese)

[18] 路浩东, 赵少婷, 张俊丽, 等. 不同类型地膜降解规律及其对土壤理化性质的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(5): 1171 – 1181.

Lu Haodong, Zhao Shaoting, Zhang Junli, et al. The degradation laws of different types of mulch films and their influence on soil physical and chemical properties[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(5): 1171 – 1181. (in Chinese)

- [19] 李凯,罗世武,王湛,等. 不同类型地膜覆盖对宁夏旱作区土壤环境及饲用型作物生长的影响[J]. 河南农业科学,2025,54(1):90-100.
Li Kai, Luo Shiwu, Wang Zhan, et al. Effects of different types of surface mulching on soil environment and growth of forage crop in Ningxia dry farming area[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2025,54(1):90-100. (in Chinese)
- [20] 史明伟,王明刚,王伟,等. 棉秆粉碎与残膜回收打包一体机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(12):397-406.
Shi Mingwei, Wang Minggang, Wang Wei, et al. Design and experiment of integrated machine for cotton stalk crushing and residual film recycling and baling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(12):397-406. (in Chinese)
- [21] 史增录,姚洁婷,张学军,等. 柔性钉齿式残膜捡拾打包作业机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(11):308-319.
Shi Zenglu, Yao Jieting, Zhang Xuejun, et al. Design and test of flexible nail teeth type residual film picking and strapping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(11):308-319. (in Chinese)
- [22] 蒋德莉,颜利民,陈学庚,等. 纵向型钉齿链式地膜捡拾装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(1):267-281.
Jiang Deli, Yan Limin, Cheng Xuegeng, et al. Improved design and test of longitudinal nail-tooth-chain plasticfilm pickup device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(1):267-281. (in Chinese)
- [23] 杜文斌,杨春雷,杨锦鹏,等. 雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(1):116-126,295.
Du Wenbin, Yang Chunlei, Yang Jinpeng, et al. Design and experiment of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(1):116-126,295. (in Chinese)
- [24] 张友良,王凤新,聂唯,等. 滴灌条件下覆膜热效益及其对马铃薯生长的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(12):252-261.
Zhang Youliang, Wang Fengxin, Nie Wei, et al. Effects of film mulching on thermal conditions and potato growth under drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):252-261. (in Chinese)
- [25] 张友良,李躲,冯绍元,等. 覆膜滴灌紫薯农田水热传输规律及其对环境因子的响应[J]. 农业机械学报,2023,54(2):330-340.
Zhang Youliang, Li Duo, Feng Shaoyuan, et al. Water and heat transfer and response to environmental factors in drip irrigated purple potato field with film mulching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(2):330-340. (in Chinese)
- [26] 付强,颜培儒,李天霄,等. 冻融期不同覆盖和气象因子对土壤导热率和热通量的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(20):98-105.
Fu Qiang, Yan Peiru, Li Tianxiao, et al. Influence of different coverage and meteorological factors on soil thermal conductivity and heat flux during freezing and thawing period[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(20):98-105. (in Chinese)
- [27] Bonachela S, Granados M R, López J C, et al. How plastic mulches affect the thermal and radiative microclimate in an unheated low-cost greenhouse[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2011,152:65-72.
- [28] 韩信,张宝忠,车政,等. 荒漠草原生长季不同时间尺度水热通量变化特征及其影响因子[J]. 农业工程学报,2024,40(15):65-75.
Han Xin, Zhang Baozhong, Che Zheng, et al. Characteristics and impact factors of water and heat flux changes at different time scales during the growing season of desert grasslands[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(15):65-75. (in Chinese)
- [29] 冯可为,毛晓敏,郭同铠. 不同覆膜方式对西北旱区土壤水热盐及春玉米生长和产量的影响[J]. 农业资源与环境学报,2024,41(6):1260-1271,1236.
Feng Kewei, Mao Xiaomin, Guo Tongkai. Effects of different mulching methods on soil water, heat and salt dynamics and spring corn growth and yield in the dry zone of Northwest China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2024,41(6):1260-1271,1236. (in Chinese)
- [30] 何自涵,蒲全明,雍磊,等. 覆膜对西南紫土区黄瓜早春栽培土壤水热效应及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2025(3):195-202.
He Zihan, Pu Quanming, Yong Lei, et al. Effects of plastic film mulching on soil hydrothermal effect and yield of cucumber cultivated in early spring in purple soil area of Southwest China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2025(3):195-202. (in Chinese)
- [31] 王永亮,胥子航,李申,等. 不同覆盖措施对土壤水热状况及春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 作物学报,2024,50(5):1312-1324.
Wang Yongliang, Xu Zihang, Li Shen, et al. Effects of different mulching measures on moisture and temperature of soil and yield and water use efficiency of spring maize[J]. Acta Agronomica Sinica,2024,50(5):1312-1324. (in Chinese)
- [32] 郭睿思,刘目兴,易军,等. 干旱和半干旱区生物结皮层及其覆盖土壤的蒸发特征[J]. 农业工程学报,2025,41(6):117-127.
Guo Ruishi, Liu Muxing, Yi Jun, et al. Evaporation characteristics of biocrust layer and its covered soil in arid and semi-arid regions[J]. Transactions of the CSAE,2025,41(6):117-127. (in Chinese)

Xie Jiahe, He Xiangzhu, Wu Binjie. Detection of dispersion of modified carbon nanotubes in aqueous solution and influencing factors[J]. Electroplating and Coating, 2025, 44(1):134 – 139. (in Chinese)

[27] 吕寒梅. 纳米锂镧锆钽氧固体电解质粉体的分散性及其在固态锂电池中的应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2023.
Lü Hanmei. Dispersibility of nano lithium lanthanum zirconium tantalum oxide solid electrolyte powder and its application in solid-state lithium batteries[D]. Qingdao: Qingdao University, 2023. (in Chinese)

[28] Cheong A M, Tan K W, Tan C P, et al. Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) seed oil-in-water pickering nanoemulsions stabilised by mixture of sodium caseinate, Tween 20 and β -cyclodextrin[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 934 – 941.

[29] Maryudi M, Hakika D C, Amillia A. Morphology and selected properties of cellulose acetate membranes for environmental applications[J]. Polimery, 2024, 69(5): 292 – 299.

[30] 张娟娟, 陈晓峰, 林才, 等. 聚乙二醇为分散剂制备纳米生物活性玻璃粉体[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(2): 257 – 261.
Zhang Juanjuan, Chen Xiaofeng, Lin Cai, et al. Preparation of nanobioactive glass powders by polyethylene glycol as a dispersant[J]. Silicate Bulletin, 2010,29(2): 257 – 261. (in Chinese)

[31] 汪凌岳. 富勒烯基微纳结构调控及其电催化性能研究[D]. 盐城: 盐城工学院, 2024.
Wang Lingyue. Research on the regulation of fullerene-based micro-nano structures and their electrocatalytic performance[D]. Yancheng: Yancheng Institute of Technology, 2024. (in Chinese)

[32] 张好强, 吴昱鑫, 张傲, 等. 碳纳米管分散性及功能化表征方法的研究现状[J]. 炭素技术, 2024, 43(2): 1 – 5,70.
Zhang Haoqiang, Wu Yuxin, Zhang Ao, et al. Research status of dispersion and functional characterization methods of carbon nanotubes[J]. Carbon Technology, 2024, 43(2): 1 – 5,70. (in Chinese)

[33] Hu Y, Yang X, Cao S, et al. Effect of the dispersants on Pd species and catalytic activity of supported palladium catalyst[J]. Applied Surface Science, 2017, 400: 148 – 153.

[34] 汪义超. WxSnyMgzO 催化剂的制备工艺改进及性能评价[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
Wang Yichao. Improvement of preparation process and performance evaluation of WxSnyMgzO catalyst[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020. (in Chinese)

[35] Wakayama H, Setoyama N, Fukushima Y. Size-controlled synthesis and catalytic performance of Pt nanoparticles in micro- and mesoporous silica prepared using supercritical solvents[J]. Advanced Materials, 2003, 15(9): 742 – 745.

[36] Zhou Q, Huang Z, Ni J, et al. Boosting Pt utilization via strategic Co integration: structural and mechanistic investigation of high-performance Pt – Co alloy nanocatalysts for catalytic benzene combustion[J]. Applied Surface Science, 2024, 670: 160647.

(上接第 350 页)

[33] 王毅, 刘志刚, 刘永新, 等. 氧化-生物双降解膜对土壤水热变化及烟株生长的影响[J]. 中国烟草科学, 2023, 44(1): 24 – 31.
Wang Yi, Liu Zhigang, Liu Yongxin, et al. Effect of uncovering and applying degradable film on soil hydrothermal changes and flue-cured tobacco growth[J]. Chinese Tobacco Science, 2023, 44(1): 24 – 31. (in Chinese)

[34] 董勤各, 刘卿玥, 牛雨婷, 等. 不同覆膜灌溉方式下春玉米田土壤水盐氮动态变化规律[J]. 农业机械学报, 2025, 56(10): 671 – 683.
Dong Qin'ge, Liu Qingyue, Niu Yuting, et al. Effects of different mulch irrigation methods on soil water – salt – nitrogen dynamics in spring maize fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 671 – 683. (in Chinese)

[35] 赵引, 李国安, 夏江宝, 等. 覆膜和灌水量对制种玉米根系分布及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 104 – 114.
Zhao Yin, Li Guoan, Xia Jiangbao, et al. Effects of film mulching and irrigation amount on the root distribution and yield of seed-maize[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 104 – 114. (in Chinese)

[36] 穆晓国, 高虎, 李梅花, 等. 不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3439 – 3449.
Mu Xiaoguo, Gao Hu, Li Meihua, et al. Effects of diffent types of plastic film mulching on soil qualiuty, root growth, ang yield [J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3439 – 3449. (in Chinese)

[37] 张友良, 汪兆辉, 冯绍元, 等. 覆膜滴灌条件下滴灌湿润比和施氮量对甘薯生长的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 261 – 270.
Zhang Youliang, Wang Zhaohui, Feng Shaoyuan, et al. Effects of soil wetted percentages and nitrogen fertilizations on sweet potato growth under drip irrigation with film mulching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 261 – 270. (in Chinese)