

孙果丽,何苏南,陈环宇,等. 生物降解地膜覆盖对滨海盐碱耕地土壤环境、碳固存和大豆产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(1): 79-89.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.01.009

生物降解地膜覆盖对滨海盐碱耕地土壤环境、碳固存和大豆产量的影响

孙果丽¹, 何苏南¹, 陈环宇¹, 郁凯¹, 贺亭亭¹, 严旋娜², 徐磊², 陈爱晶³, 张振华¹, 邢锦城¹

(1.江苏沿海地区农业科学研究所,江苏盐城 224002; 2.江苏省农业科学院农业设施与装备研究所,江苏南京 210014; 3.盐城市耕地质量保护站,江苏盐城 224005)

摘要: 为探究不同生物降解地膜覆盖对滨海盐碱地土壤环境、碳固存和大豆产量的影响,本研究设置不覆膜(对照,CK)、聚乙烯低膜覆盖处理(PE)、功能寿命为55~65 d的生物降解地膜覆盖处理(BDM₁)、功能寿命为65~75 d的生物降解地膜覆盖处理(BDM₂)、功能寿命为75~85 d的生物降解地膜覆盖处理(BDM₃)。结果表明,生物降解地膜主要通过调节土壤温湿度影响土壤养分含量。生物降解地膜覆盖处理土壤含盐量和土壤pH值低于对照,土壤平均温度、平均湿度高于对照。BDM₂处理土壤有机碳含量和有机碳储量显著高于CK、PE处理、BDM₁处理、BDM₃处理($P<0.05$)。BDM₂处理土壤水稳性团聚体含量、土壤平均重量直径、土壤几何平均直径均显著高于CK、PE处理、BDM₁处理、BDM₃处理($P<0.05$)。且BDM₂处理土壤团聚体分形维数显著低于CK、BDM₁处理、BDM₃处理($P<0.05$)。PE处理、BDM₁处理、BDM₂处理、BDM₃处理土壤中团聚体有机碳、微团聚体有机碳含量显著高于CK($P<0.05$)。BDM₂处理土壤大团聚体有机碳含量、中团聚体有机碳含量、微团聚体有机碳含量显著高于CK、PE处理、BDM₁处理($P<0.05$)。综上,生物降解地膜覆盖通过改善土壤水热条件抑制返盐,促进团聚体稳定与有机碳积累,改善土壤结构,提高土壤养分有效性,进而提升大豆产量。其中,BDM₂覆膜处理对土壤改良与增产效果最为显著,可替代传统聚乙烯地膜,在江苏省滨海盐碱耕地上推广应用。

关键词: 生物降解地膜; 土壤团聚体; 土壤有机碳; 大豆; 盐碱土

中图分类号: S626.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)01-0079-11

Effects of biodegradable plastic film mulching on soil environment, carbon sequestration and soybean yield in coastal saline-alkali farmland

SUN Guoli¹, HE Sunan¹, CHEN Huanyu¹, YU Kai¹, HE Tingting¹, YAN Xuanna², XU Lei², CHEN Aijing³, ZHANG Zhenhua¹, XING Jincheng¹

(1. Institute of Agricultural Sciences in the Coastal District of Jiangsu Province, Yancheng 224002, China; 2. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Yancheng Cultivated Land Quality Protection Station, Yancheng 224005, China)

收稿日期: 2025-09-18

基金项目: 盐城市基础研究计划青年基金项目(YCBK2024014); 亚夫科技服务项目[KF(24)1219]; 农业农村部沿海盐碱地科学观测实验站开放课题暨所基金项目(YHS202302)

作者简介: 孙果丽(1989-), 女, 山西运城人, 博士, 助理研究员, 主要从事耐盐作物和盐碱地改良研究。(E-mail) sungl4726@163.com

通讯作者: 邢锦城, (E-mail) sdauxxx@163.com

Abstract: To explore the effects of different biodegradable plastic film mulching practices on soil environment, carbon sequestration, and soybean yield in coastal saline-alkali land, this study set up five treatments: no

film mulching (control, CK), polyethylene film mulching (PE), biodegradable plastic film mulching with a functional lifespan of 55–65 days (BDM₁), biodegradable plastic film mulching with a functional lifespan of 65–75 days (BDM₂), and biodegradable plastic film mulching with a functional lifespan of 75–85 days (BDM₃). The results showed that biodegradable plastic film mulching affected soil nutrient contents mainly by regulating soil temperature and moisture. The soil salt content and pH under biodegradable plastic film mulching treatments were lower than those of the control, while the average soil temperature and average soil moisture were higher than those of the control. The soil organic carbon content and organic carbon storage in the BDM₂ treatment were significantly higher than those in the CK, PE, BDM₁, and BDM₃ treatments ($P < 0.05$). The contents of water-stable aggregates, mean weight diameter, and geometric mean diameter of soil in the BDM₂ treatment were significantly higher than those in the CK, PE, BDM₁, and BDM₃ treatments ($P < 0.05$). In addition, the fractal dimension of soil aggregates in the BDM₂ treatment was significantly lower than that in the CK, BDM₁, and BDM₃ ($P < 0.05$). The contents of aggregate-associated organic carbon and microaggregate-associated organic carbon in soil under the PE, BDM₁, BDM₂, and BDM₃ treatments were significantly higher than those in the CK ($P < 0.05$). The contents of macroaggregate-associated organic carbon, mesoaggregate-associated organic carbon, and microaggregate-associated organic carbon in the BDM₂ treatment were significantly higher than those in the CK, PE, and BDM₁ treatments ($P < 0.05$). In conclusion, biodegradable plastic film mulching inhibited soil salt return by improving soil hydrothermal conditions, promoted aggregate stability and organic carbon accumulation, improved soil structure, enhanced soil nutrient availability, and then increased soybean yield. Among these treatments, the BDM₂ treatment exhibited the most significant effects on soil improvement and yield increase, which could replace traditional polyethylene film and be popularized and applied in coastal saline-alkali farmland of Jiangsu province.

Key words: biodegradable plastic film; soil aggregate; soil organic carbon; soybean; saline-alkali soil

地膜覆盖栽培以其显著的增温、保墒效果,在农业生产上得到广泛应用。然而,传统塑料地膜降解周期长、土壤残留污染严重,长期使用加重环境负担,不利于农田可持续生产^[1]。生物降解地膜作为新型合成地膜,可在自然环境中完全降解为二氧化碳和水,被认为是应对农田“白色污染”的潜在途径^[2]。但由于光照、温度、湿度、微生物活动和环境pH值等因素的影响,生物降解地膜的降解过程可控性差^[3],应重点关注其功能寿命与作物生长期的适配性^[4]。

生物降解地膜受当地水热气候、土壤性质、地膜自身特性、覆盖作物类型及田间管理等因素的综合影响,其覆盖效应和降解速率存在显著差异^[5-6]。在不同农作区域中,如何实现生物地膜功能寿命与作物生长周期的良好匹配是其发挥覆盖效应的前提。前人已经对玉米^[7]、棉花^[8]等作物系统开展了不同功能寿命生物降解地膜覆盖效应的研究。生物降解地膜覆盖既可以改善土壤水热条件,同时可以抑制土壤盐渍化,促进农田种植系统固碳^[9-10]。江苏滨海盐碱耕地土壤结构薄弱、保水性较差,在夏季旱涝急转气候下常易发生土壤返盐,严重影响到大豆的生长和产量以及生产收益。

目前,针对滨海盐碱地这一特定的农田生态系统,关于作物生育周期与生物地膜功能寿命适配研究还鲜有报道。因此,本研究拟针对江苏滨海盐碱地大豆,应用不同功能寿命的生物降解地膜覆盖,对土壤水分、温度、盐分、碳氮变化、团粒结构等性状进行跟踪监测,结合农田土壤固碳和作物产量等指标,评价不同功能寿命的生物降解地膜在滨海盐碱地大豆生产的田间适用效果,筛选出可以在该地区应用的最适功能寿命的生物降解地膜。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

本试验在江苏省盐城市大丰区滩涂农业示范基地(北纬32°59′44″,东经120°49′27″,海拔13.3 m)开展。当地年均气温13~16℃,年均降雨量900~1300 mm,年日照时数2100~2600 h,大豆生长期的日降雨量和日均气温变化如图1。试验地土壤类型为滨海盐土,耕层土壤基本理化性质为全氮含量0.87 g/kg,碱解氮含量55.28 mg/kg,速效磷含量72.05 mg/kg,速效钾含量134.68 mg/kg,水溶性盐含量1.74 g/kg,有机质含量13.46 g/kg,pH值为8.64。

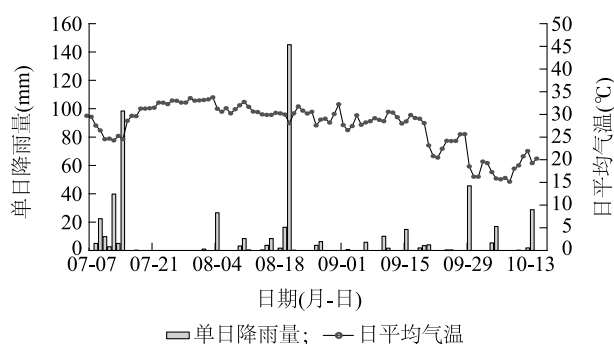


图1 大豆生育期降水量和气温

Fig.1 Precipitation and air temperature during soybean growing period

表1 所用地膜基本参数

Table 1 Basic parameters of the plastic films used in this study

地膜	成分	颜色	厚度 (mm)	宽度 (cm)	最大负荷		断裂标称应变		水汽透过率 (%)	功能寿命 (d)
					纵向(N)	横向(N)	纵向(%)	横向(%)		
PE	线性低密度聚乙烯	无色	0.01	210	1.57	1.36	585	412	24.4	150~180
BDM ₁	聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯、聚丙烯共聚物、助剂	黑色	0.01	210	4.27	4.15	308	647	492.1	55~65
BDM ₂	聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯、聚丙烯共聚物、助剂	黑色	0.01	210	3.67	2.39	230	429	513.1	65~75
BDM ₃	聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯、聚碳酸亚丙酯、助剂	黑色	0.01	210	2.75	2.25	297	429	583.9	75~85

1.3 试验设计

本研究针对江苏滨海盐碱耕地夏大豆种植区,应用覆膜播种机开展大豆覆膜田间试验,共设置5个处理,分别为不覆膜(对照,CK)、聚乙烯地膜覆盖处理(PE)、BDM₁生物降解地膜覆盖处理(BDM₁)、BDM₂生物降解地膜覆盖处理(BDM₂)、BDM₃生物降解地膜覆盖处理(BDM₃)。每个处理设3个重复,每个试验小区设置长×宽为10 m×10 m,面积100 m²。

1.4 测定指标与测定方法

1.4.1 田间土壤湿度、温度和电导率监测方法 播种10 d后,待土壤结构稳定,在各试验小区布设原位土壤监测系统。该系统由北京棠华科技有限公司提供,主要包括土壤温湿盐传感器、数据采集器及太阳能电池板等模块,可对土壤温度、湿度、电导率(EC)等参数进行长期精准监测。监测系统每30 min自动记录1次数据,并实时上传至科技云数据平台。其中土壤湿度以田间单位体积含水量(m³/m³)表示。本研究观测大豆盐害敏感期(8月1日至8月31日),即苗期的土壤指标。

1.4.2 土壤理化性质测定方法 在大豆成熟期,各小区随机选取5个样点采集0~20 cm耕层土壤,混匀后

1.2 试验材料

试验材料选用耐盐大豆品种徐豆27,该品种为当地主要栽培种。于2024年7月7日播种,2024年10月15日收获,夏播生育期99 d。利用覆膜直播机开展田间作业,株距10 cm,行距40 cm。播种量为75 kg/hm²。兑水喷施叶面有机水溶肥(海尔曼大豆专用肥)30 kg/hm²,苗期、花期、鼓粒期各喷施1次。

传统塑料地膜采购自市场。BDM₁、BDM₂、BDM₃生物降解地膜由江苏省农业科学院农业设施与装备研究所提供。所用地膜如表1所示。

带回实验室,风干过筛。土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定,速效磷含量采用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾含量采用NH₄OAc浸提-火焰光度法测定,土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定。土壤pH值采用电位法测定,土壤总含盐量采用烘干法测定^[11]。土壤容重采用环刀法测定。

土壤有机碳储量计算公式如下^[12]: $SOC_{stock} = BD \times H \times SOC \times 10$

式中, BD 为土壤容重,单位 g/cm³; H 为土层深度,单位 m; SOC 为土壤有机碳含量,单位 g/kg。计算收获后与播种前土壤有机碳储量差值,得到土壤碳储量变化量。

1.4.3 土壤团聚体稳定性指标测定方法 在大豆成熟期,另取表层土壤,采用湿筛法通过团聚体分析仪测定土壤团粒结构,依次使用2.00 mm、1.00 mm、0.50 mm、0.25 mm、0.05 mm孔径网筛对土壤团粒结构进行分级,并利用重铬酸钾-外加热法测定各粒径土壤的有机碳含量。团聚体稳定性指标计算公式如下^[13]:

水稳性团聚体含量(WSA) = $\frac{\text{湿筛后直径} > 0.25 \text{ mm 的土壤重量}}{\text{烘干土壤重量}} \times 100\%$

平均重量直径(MWD)= $\sum(X_i \times W_i)$

几何平均直径(GMD)= $\exp\left(\frac{\sum(W_i \times \ln X_i)}{\sum W_i}\right)$

团聚体分形维数(D): $\ln\left[\frac{W_{(r>d_i)}}{W}\right] = (3-D)\ln\left[\frac{d_i}{d_{\max}}\right]$

式中, W_i 为第*i*级粒径土壤团聚体的重量; X_i 为第*i*级粒径土壤团聚体的平均直径; d_i 为第*i*粒级的粒径; d_{\max} 为最大粒径,取 2.00 mm; $W_{(r>d_i)}$ 为粒径小于 d_i 的累积重量; W 为土壤总重量。令 $y = \ln\left[\frac{W_{(r<d_i)}}{W}\right]$, $x = \ln\left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)$, 通过拟合二者的线性关系得到斜率 k , 则分形维数 $D = 3 - k$ 。

1.5 产量测定

大豆收获前,在各小区选择长势均匀连续 10 株大豆植株,带回室内进行考种,分别测定大豆株高、单株有效荚数、每荚粒数、百粒重。大豆成熟后,每小区随机选择 3 个采样点,每个采样点 1 m×1 m。将每个采样点的大豆收割后脱粒,晾晒至恒重,称量

并计算实测产量(籽粒含水量以 13% 计)。

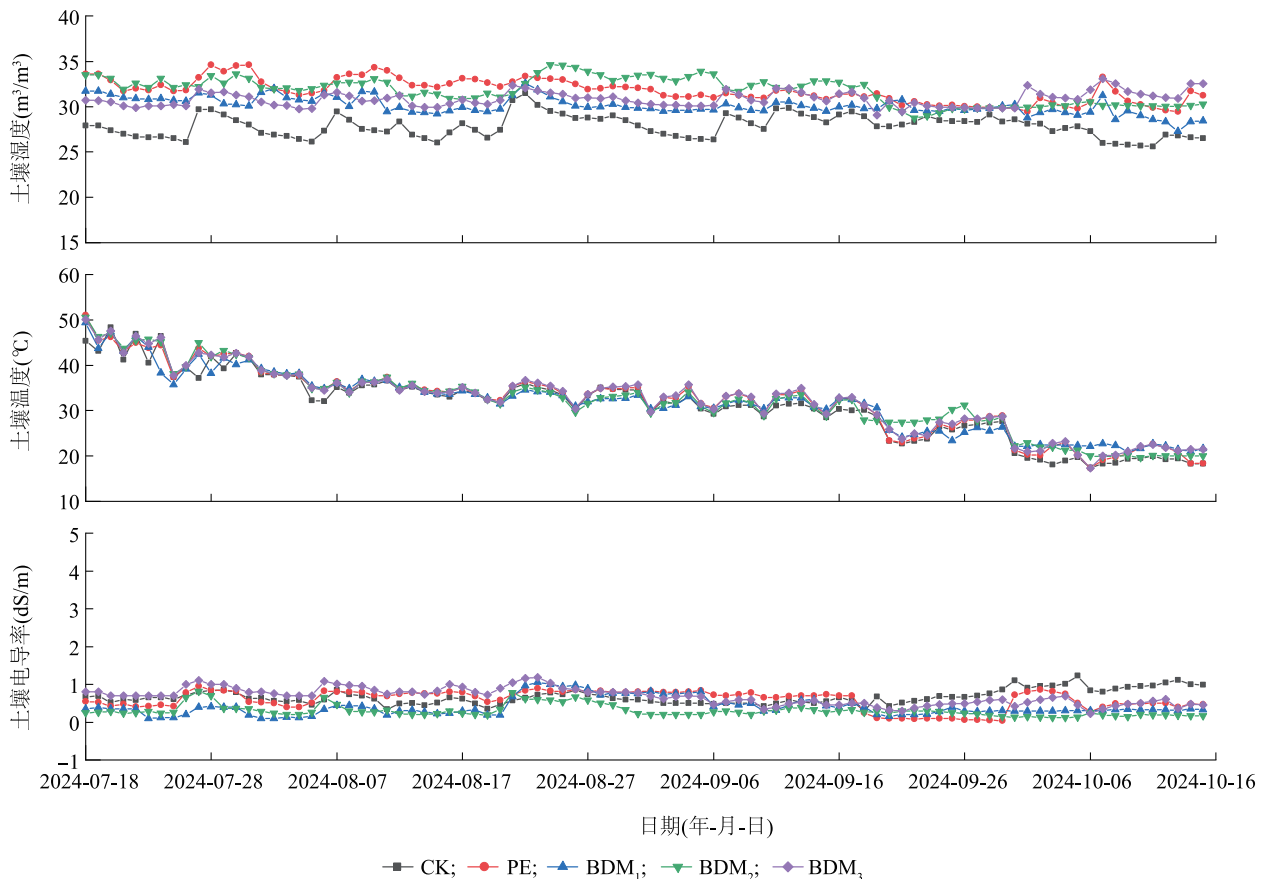
1.6 数据处理与分析

利用 Microsoft Office 2016 进行数据整理,利用 DPS 9.01 软件进行单因素方差分析,利用邓肯新复极差法进行差异显著性检验($P < 0.05$),利用 Origin 2021 软件进行绘图和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 覆膜处理对土壤温度、湿度和电导率的影响

如图 2 所示,与 CK 相比,覆膜处理土壤平均湿度提高 8.10%~14.08%,土壤温度增加 2.39%~4.27%。与 PE 处理相比,BDM₁ 处理土壤平均湿度和平均温度分别降低 5.22%、0.94%,BDM₂ 处理土壤平均湿度和平均温度分别增加 0.02%、0.01%,BDM₃ 处理土壤平均湿度降低 2.82%,土壤温度提高 0.87%。在整个大豆生长周期,BDM₁ 处理、BDM₂ 处理土壤电导率值均低于 CK。



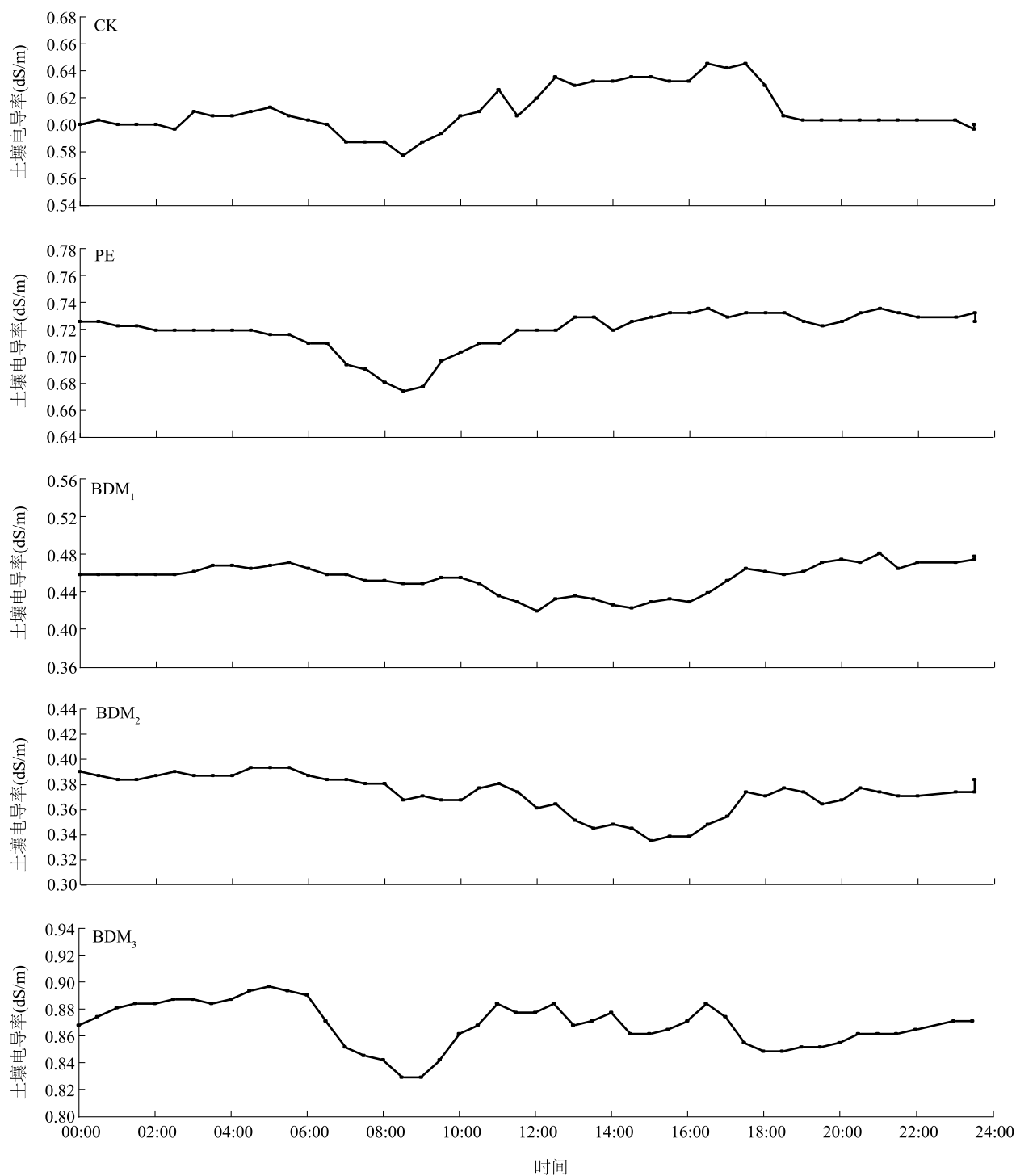
CK:不覆膜(对照);PE:覆盖聚乙烯地膜;BDM₁:覆盖 BDM₁生物降解地膜;BDM₂:覆盖 BDM₂生物降解地膜;BDM₃:覆盖 BDM₃生物降解地膜。

图 2 大豆生育期土壤温度、湿度和电导率

Fig.2 Soil temperature, moisture and electrical conductivity during soybean growing period

如图3所示,CK、PE处理和BDM₃处理土壤电导率>0.60 dS/m,其日动态变化趋势较剧烈,均在9:00左右表现出明显的波谷;BDM₁处理、BDM₂处理

土壤盐分小于0.5 dS/m,日变化趋势趋缓,且在15:00左右出现波谷。



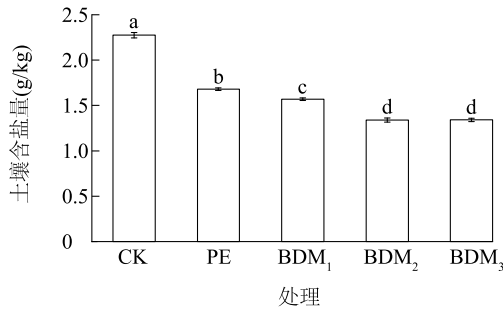
CK:不覆膜(对照);PE:覆盖聚乙烯地膜;BDM₁:覆盖BDM₁生物降解地膜;BDM₂:覆盖BDM₂生物降解地膜;BDM₃:覆盖BDM₃生物降解地膜。

图3 不同处理土壤电导率日动态变化曲线

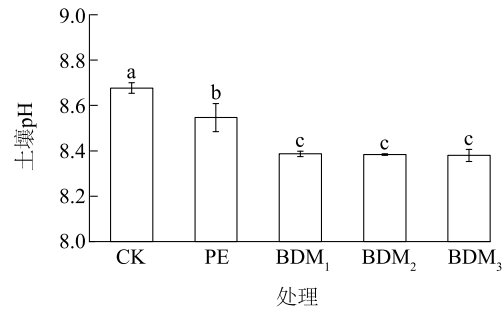
Fig.3 Diurnal dynamic variation curves of soil electrical conductivity under different treatments

2.2 覆膜处理对土壤含盐量和 pH 值的影响

如图 4 所示,覆膜处理土壤含盐量均显著低于 CK ($P < 0.05$),BDM₁处理、BDM₂处理、BDM₃处理土壤盐分含量相显著低于 PE 处理 ($P < 0.05$)。覆膜



处理土壤 pH 值均显著低于 CK ($P < 0.05$),BDM₁处理、BDM₂处理、BDM₃处理土壤 pH 值均显著低于 PE 处理 ($P < 0.05$)。



CK:不覆膜(对照);PE:覆盖聚乙烯地膜;BDM₁:覆盖 BDM₁生物降解地膜;BDM₂:覆盖 BDM₂生物降解地膜;BDM₃:覆盖 BDM₃生物降解地膜。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同处理土壤含盐量、pH 值

Fig.4 Soil salt content and pH under different treatments

2.3 覆膜处理对土壤速效养分含量的影响

如表 2 所示,BDM₂处理、BDM₃处理土壤碱解氮含量显著高于 CK、PE 处理 ($P < 0.05$)。BDM₂处理、BDM₃处理土壤速效磷含量、土壤速效钾含量显著高于 CK、BDM₁处理 ($P < 0.05$)。BDM₂处理、BDM₃处理的土壤碱解氮含量、速效磷含量、速效钾含量均显著高于 CK ($P < 0.05$)。

表 2 不同处理土壤速效养分含量

Table 2 Soil available nutrient contents under different treatments

处理	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
CK	89.87±2.28d	85.03±0.53c	127.20±2.40c
PE	92.45±2.21cd	90.68±0.82ab	141.47±1.71ab
BDM ₁	97.30±2.24bc	87.08±0.96bc	137.57±2.54bc
BDM ₂	103.88±4.03a	94.60±4.11a	151.97±5.61a
BDM ₃	101.85±1.85ab	92.86±1.02a	150.30±3.72a

CK:不覆膜(对照);PE:覆盖聚乙烯地膜;BDM₁:覆盖 BDM₁生物降解地膜;BDM₂:覆盖 BDM₂生物降解地膜;BDM₃:覆盖 BDM₃生物降解地膜。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 覆膜处理对土壤有机碳含量和土壤容重的影响

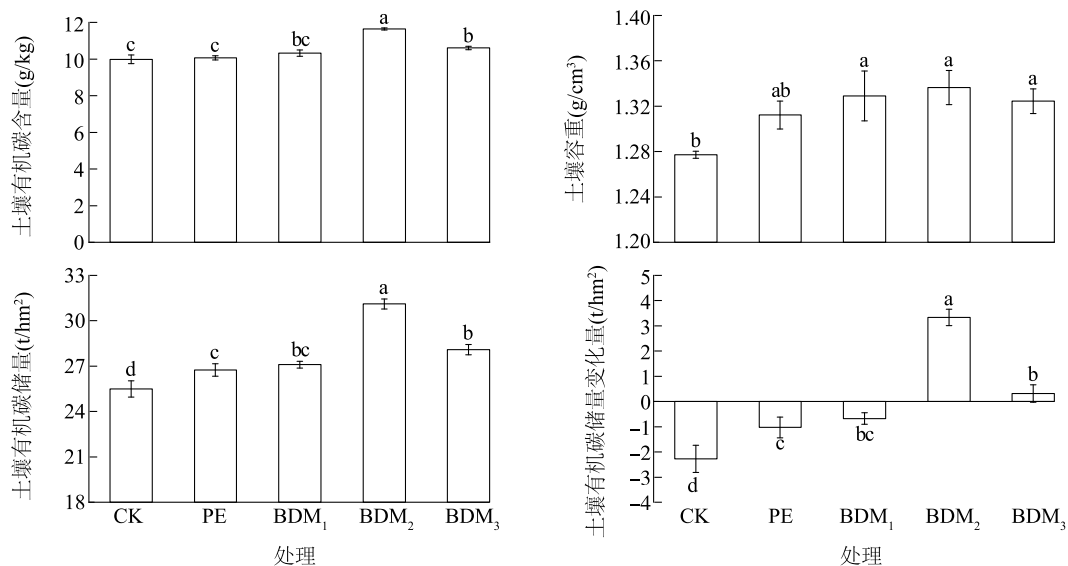
如图 5 所示,BDM₂处理、BDM₃处理土壤有机碳含量显著高于 CK、PE 处理 ($P < 0.05$),BDM₁处理、BDM₂处理、BDM₃处理土壤容重显著高于 CK ($P < 0.05$)。PE 处理、BDM₁处理、BDM₂处理、BDM₃处理土壤有机碳储量显著高于 CK ($P < 0.05$),BDM₂处

理土壤有机碳储量显著高于 PE 处理、BDM₁处理、BDM₃处理、CK ($P < 0.05$)。BDM₁处理、BDM₂处理、BDM₃处理地膜覆盖处理土壤容重均显著高于 CK ($P < 0.05$)。与大豆播种前相比,BDM₂处理、BDM₃处理土壤有机碳储量增加,而 CK、PE 处理、BDM₁处理土壤有机碳储量减少。

2.5 覆膜处理对土壤团聚体结构的影响

如图 6 所示,PE 处理、BDM₂处理、BDM₃处理土壤水稳性团聚体含量显著高于 CK ($P < 0.05$)。BDM₁处理、BDM₂处理、BDM₃处理土壤平均重量直径显著高于 CK ($P < 0.05$)。PE 处理、BDM₁处理、BDM₂处理、BDM₃处理土壤几何平均直径显著高于 CK ($P < 0.05$)。BDM₂处理土壤水稳性团聚体含量、土壤平均重量直径、土壤几何平均直径均显著高于 CK、PE 处理、BDM₁处理、BDM₃处理 ($P < 0.05$)。且 BDM₂处理土壤团聚体分形维数显著低于 CK、BDM₁处理、BDM₃处理 ($P < 0.05$)。

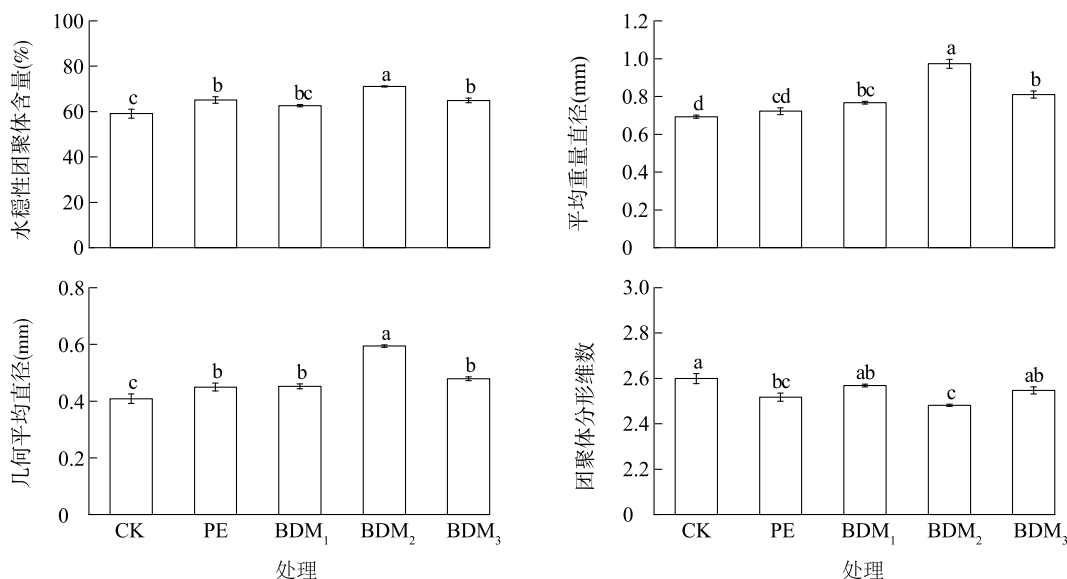
如表 3 所示,BDM₂处理、土壤大团聚体 (>2.00 mm)有机碳含量显著高于 CK、BDM₁处理 ($P < 0.05$)。PE 处理、BDM₁处理、BDM₂处理、BDM₃处理土壤中团聚体 (0.25~2.00 mm)有机碳含量、微团聚体 (<0.25 mm)有机碳含量显著高于 CK ($P < 0.05$)。BDM₂处理土壤大团聚体有机碳含量、中团聚体有机碳含量、微团聚体有机碳含量显著高于 CK、PE 处理、BDM₁处理 ($P < 0.05$)。



CK:不覆膜(对照);PE:覆盖聚乙烯地膜;BDM₁:覆盖 BDM₁生物降解地膜;BDM₂:覆盖 BDM₂生物降解地膜;BDM₃:覆盖 BDM₃生物降解地膜。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

图 5 不同处理土壤有机碳含量和有机碳储量

Fig.5 Soil organic carbon content and organic carbon storage under different treatments



CK:不覆膜(对照);PE:覆盖聚乙烯地膜;BDM₁:覆盖 BDM₁生物降解地膜;BDM₂:覆盖 BDM₂生物降解地膜;BDM₃:覆盖 BDM₃生物降解地膜。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

图 6 不同处理土壤团聚体结构

Fig.6 Soil aggregate structure under different treatments

2.6 覆膜处理对大豆产量要素的影响

如表 4 所示,PE 处理、BDM₁ 处理、BDM₂ 处理、BDM₃ 处理大豆单位面积株数显著高于 CK ($P<0.05$)。BDM₁ 处理、BDM₂ 处理大豆单株有效荚数显著高于 CK、PE 处理、BDM₃ 处理 ($P<0.05$)。PE 处

理、BDM₂ 处理大豆单株粒数显著高于 CK ($P<0.05$)。BDM₁ 处理、BDM₂ 处理、BDM₃ 处理大豆百粒重显著高于 CK ($P<0.05$)。PE 处理、BDM₁ 处理、BDM₂ 处理、BDM₃ 处理大豆实测产量显著高于 CK ($P<0.05$)。

表 3 不同粒径土壤团聚体有机碳含量

Table 3 Soil organic carbon content in soil aggregates with different particle sizes

处理	大团聚体有机碳含量(g/kg)	中团聚体有机碳含量(g/kg)	微团聚体有机碳含量(g/kg)
CK	10.37±0.14c	9.32±0.15c	6.84±0.25d
PE	10.89±0.11b	10.16±0.21b	7.44±0.09c
BDM ₁	10.56±0.12bc	10.15±0.19b	8.07±0.13b
BDM ₂	11.29±0.04a	10.92±0.01a	8.52±0.10a
BDM ₃	10.78±0.09b	10.33±0.29ab	8.82±0.08a

CK: 不覆膜对照; PE: 覆盖聚乙烯地膜; BDM₁: 覆盖 BDM₁ 生物降解地膜; BDM₂: 覆盖 BDM₂ 生物降解地膜; BDM₃: 覆盖 BDM₃ 生物降解地膜。同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 4 不同处理大豆产量要素

Table 4 Soybean yield components under different treatments

处理	单位面积株数 ($\times 10^4$ 株, 1 hm ²)	单株有效荚数 (个)	单株粒数 (粒)	百粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)
CK	21.18±0.03b	20.20±1.16b	1.31±0.05b	19.42±0.25c	1 017.40±21.82b
PE	21.31±0.03a	18.24±0.67b	1.54±0.04a	19.88±0.12bc	1 111.06±21.43a
BDM ₁	21.34±0.10a	23.28±0.80a	1.46±0.03ab	19.98±0.19ab	1 094.42±23.59a
BDM ₂	21.29±0.06a	24.01±0.84a	1.53±0.05a	20.44±0.08a	1 156.39±14.94a
BDM ₃	21.31±0.03a	19.87±1.69b	1.48±0.11ab	20.37±0.13a	1 146.86±8.75a

CK: 不覆膜对照; PE: 覆盖聚乙烯地膜; BDM₁: 覆盖 BDM₁ 生物降解地膜; BDM₂: 覆盖 BDM₂ 生物降解地膜; BDM₃: 覆盖 BDM₃ 生物降解地膜。同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 5 各指标相关性分析

Table 5 Correlation analysis of various indicators

指标	SOC _{stock}	SOC	BD	AN	AP	AK	WSA	W	T	pH	PPA	PN	SN	SW	GY
SOC _{stock}	1.00														
SOC	0.96**	1.00													
BD	0.60*	0.34	1.00												
AN	0.67**	0.68**	0.31	1.00											
AP	0.53*	0.44	0.47	0.34	1.00										
AK	0.73**	0.70**	0.45	0.80**	0.60*	1.00									
WSA	0.91**	0.86**	0.59*	0.64**	0.50*	0.73**	1.00								
W	0.68**	0.74**	0.14	0.46	0.47	0.55*	0.56*	1.00							
T	-0.03	-0.04	0.02	-0.45	0.13	-0.35	0.06	-0.31	1.00						
pH	-0.58*	-0.44	-0.67**	-0.65**	-0.29	-0.66**	-0.63**	-0.19	0.34	1.00					
PPA	0.43	0.25	0.71**	0.17	0.56*	0.48	0.44	0.30	-0.06	-0.43	1.00				
PN	0.46	0.45	0.27	0.53*	0.17	0.45	0.28	0.34	-0.37	-0.60*	-0.03	1.00			
SN	0.05	-0.07	0.36	0.06	0.12	0.15	0.30	-0.24	0.22	-0.16	0.42	-0.64**	1.00		
SW	0.62**	0.50*	0.66**	0.73**	0.30	0.67**	0.60*	0.27	-0.47	-0.83**	0.51*	0.38	0.29	1.00	
GY	0.69**	0.61*	0.56*	0.52*	0.44	0.81**	0.63**	0.44	-0.24	-0.69**	0.40	0.52*	0.08	0.57*	1.00

* 表示相关性显著 ($P < 0.05$); ** 表示相关性极显著 ($P < 0.01$)。SOC: 土壤有机碳含量; BD: 土壤容重; SOC_{stock}: 土壤有机碳储量; AN: 土壤碱解氮含量; AP: 土壤速效磷含量; AK: 土壤速效钾含量; WSA: 土壤水稳性团聚体含量; W: 土壤湿度; T: 土壤温度; PPA: 大豆株数; PN: 大豆每株荚数; SN: 大豆每荚粒数; SW: 大豆百粒重; GY: 大豆籽粒产量。

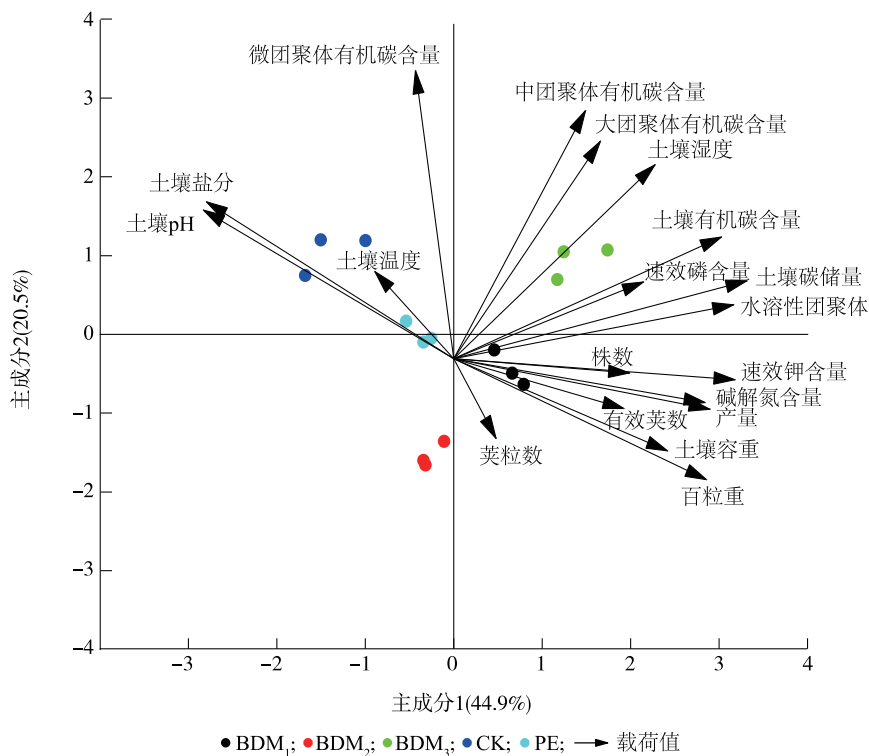
2.7 相关性分析

如表 5 所示, 土壤有机碳储量分别和土壤有机碳含量、土壤速效钾含量、土壤水稳性团聚体含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 土壤有机碳含量分别和土壤碱解氮含量、土壤速效钾含量、土壤湿度呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。大豆产量分别与土壤碱解氮含量、土壤速效钾含量、土壤有机碳含量、土壤水稳性团聚体含量、土壤容重、大豆每株荚数、大豆百粒重呈显著或极显著正相关 ($P < 0.05$)。同时, 大豆产量和土壤 pH 值呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。

2.8 主成分分析

如图7所示,主成分1(PC1)和主成分2(PC2)的方差贡献率分别为44.9%和20.5%,累计解释

65.4%的总变异。CK特征是土壤pH值与盐分含量较高。BDM₃处理特征是土壤有机碳含量与酶活性较高。



CK:不覆膜(对照);PE:覆盖聚乙烯地膜;BDM₁:覆盖BDM₁生物降解地膜;BDM₂:覆盖BDM₂生物降解地膜;BDM₃:覆盖BDM₃生物降解地膜。

图7 各指标主成分分析

Fig.7 Principal component analysis of various indicators

3 讨论

3.1 生物降解地膜对土壤环境的影响

本研究发现,生物降解地膜覆盖处理土壤含盐量和土壤pH值低于对照,土壤平均温度、平均湿度高于对照。生物降解地膜膜下形成微型内部水循环系统,膜下凝结水可为表层土壤提供微量淡水补充,有助于降低土壤表层盐分浓度^[14]。同时,地膜阻隔了土壤与大气之间的水分交换,促使盐分向土壤深层迁移,从而减少作物根区的盐分积累量^[15]。李凯等^[16]研究发现,生物降解地膜的降解速率通常高于普通PE地膜,二者在增温与保湿效果方面存在显著差异。这主要是因为随着土壤温度升高,生物降解地膜快速降解,其在作物生长中后期的保温、保墒性能下降^[17]。

地膜覆盖通常通过影响土壤碳、氮的输入与输

出,进而调节土壤有机碳的积累^[18-20]。本研究发现,生物降解地膜能够提高土壤有机碳含量和有机碳储量,其中BDM₂处理土壤有机碳含量和有机碳储量显著高于CK、PE处理、BDM₁处理、BDM₃处理($P < 0.05$)。一方面,生物降解地膜具有良好的保湿效应,可增加土壤孔隙度,促进土壤有机碳的积累,从而提高土壤碳储量^[21-22]。另一方面,地膜能够减少土壤侵蚀、抑制水分蒸发、缓解降雨对土表的直接冲击,从而增强土壤团聚体稳定性^[23]。本研究结果表明,生物降解地膜覆盖处理土壤容重显著高于不覆膜对照($P < 0.05$),表明生物降解地膜导致土壤固结,不利于植物根系生长。

平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数(D)是反映土壤团聚体稳定性的重要指标。 MWD 值与 GMD 值越高,表明土壤团聚体稳定性越高、越不易分散;分形维数越大,表明团聚体粒

径分布越均匀^[24]。本研究中,BDM₂处理土壤水稳性团聚体含量、土壤平均重量直径、土壤几何平均直径均显著高于CK、PE处理、BDM₁处理、BDM₃处理($P<0.05$)。且BDM₂处理土壤团聚体分形维数显著低于CK、BDM₁处理、BDM₃处理($P<0.05$)。

生物降解地膜的功能寿命差异会影响土壤微团聚体中的有机碳含量。Yu等^[25]研究发现,大团聚体中的有机碳主要来源于植物代谢,而小团聚体中的有机碳则更多来自微生物转化过程。生物降解地膜在降解过程中释放的有机物及微塑料等物质进入土壤后,可能激发微生物活性、丰富菌群结构,进而提高微生物对碳的转化效率,影响微团聚体中有机碳的积累^[26]。本研究发现,PE处理、BDM₁处理、BDM₂处理、BDM₃处理土壤中团聚体有机碳、微团聚体有机碳含量显著高于CK($P<0.05$)。BDM₂处理土壤大团聚体有机碳含量、中团聚体有机碳含量、微团聚体有机碳含量显著高于CK、PE处理、BDM₁处理($P<0.05$)。

3.2 生物降解地膜对盐碱地大豆产量的影响

本研究发现,覆膜处理大豆产量均显著高于不覆膜对照($P<0.05$)。生物降解地膜主要通过降低土壤蒸腾速率^[27]、提升土壤温度^[14]以及增加土壤速效养分含量^[28]等途径增产。生物降解地膜的增产效果可能与当地降雨量^[29]、地膜降解速率^[8]、地膜厚度^[30]等多种因素有关。

4 结论

本研究结果表明,生物降解地膜覆盖处理土壤含盐量和土壤pH值低于对照,土壤平均温度、平均湿度高于对照。BDM₂处理土壤有机碳含量和有机碳储量显著高于CK、PE处理、BDM₁处理、BDM₃处理($P<0.05$)。BDM₂处理土壤水稳性团聚体含量、土壤平均重量直径、土壤几何平均直径均显著高于CK、PE处理、BDM₁处理、BDM₃处理($P<0.05$)。且BDM₂处理土壤团聚体分形维数显著低于CK、BDM₁处理、BDM₃处理($P<0.05$)。PE处理、BDM₁处理、BDM₂处理、BDM₃处理土壤中团聚体有机碳、微团聚体有机碳含量显著高于CK($P<0.05$)。BDM₂处理土壤大团聚体有机碳含量、中团聚体有机碳含量、微团聚体有机碳含量显著高于CK、PE处理、BDM₁处理($P<0.05$)。综上,BDM₂处理覆膜处理对土壤改良与增产效果最为显著,可替代传统聚乙烯地膜,在

江苏省滨海盐碱耕地上推广应用。

参考文献:

- [1] LIU K E, HE Q W, YAN R C. 'White revolution' to 'white pollution'— agricultural plastic film mulch in China[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(9): 091001.
- [2] 巩文雯,王甲辰,董文涛,等. 基于文献计量的全球生物降解地膜研究进展与热点分析[J]. 土壤通报, 2024, 55(1): 254-264.
- [3] 张明明,周迎鑫,陈敬文,等. 可降解地膜分类与研发应用现状[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(6): 1278-1287.
- [4] 辛承松,罗振,唐薇,等. 生物降解地膜对盐碱地棉花生长发育和产量的影响[J]. 中国棉花, 2017, 44(11): 8-11.
- [5] 郭波,杨振兴,何文清,等. 生物可降解地膜的应用效果及存在问题[J]. 中国农业气象, 2023, 44(11): 977-994.
- [6] 金安妮,余奋霞,王玉林,等. PBAT全生物降解地膜降解特征[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 551-559.
- [7] ZHANG W W, WANG W S, ZHANG Y Z, et al. Determining the optimal degradation rate of biodegradable films in a maize farmland based on the EWM-TOPSIS model[J]. Agricultural Water Management, 2025, 309: 109359.
- [8] WANG D W, WANG Z H, DING H W, et al. Effects of biodegradable mulching films on soil hydrothermal conditions and yield of drip-irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(6): 153-165.
- [9] WANG C Y, DONG J W, JI B X, et al. Sub-soil biodegradable film mulching: a sustainable solution for enhancing winter wheat yield and shaping soil microbial communities in saline-alkali soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025, 495: 139020.
- [10] AKHIR M A M, MUSTAPHA M. Formulation of biodegradable plastic mulch film for agriculture crop protection; a review [J]. Polymer Reviews, 2022, 62(4): 890-918.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 徐艳张,段增强,张琳,等. 区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨[J]. 土壤通报, 2005, 6: 22-25.
- [13] 祁迎春,王益权,刘军,等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340-347.
- [14] ZHANG W W, WANG L H, ZHOU J Q, et al. Degradability of biodegradable plastic films and its mulching effects on soil temperature and maize yield in northeastern China [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(2): 146-153.
- [15] 杨超昱,王静,吕雯,等. PBAT对盐碱地玉米根区土壤水盐及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 343-351.
- [16] 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.
- [17] CHEN N, LI X Y, SIMUNEK J, et al. Evaluating the effects of

- biodegradable and plastic film mulching on soil temperature in a drip-irrigated field [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213. DOI:10.1016/j.still.2021.105116.
- [18] LIU Z H, ZHAO C X, ZHANG N H, et al. Degradable film mulching increases soil carbon sequestration in major Chinese dryland agroecosystems[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1):11.
- [19] 王 雯,秦富林,刘远超,等. 不同覆膜材料对沙地马铃薯产量及土壤细菌群落的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(22):228-234.
- [20] 王文静,刘亚军,胡启国,等. 不同地膜覆盖与施肥方式对土壤质量及甘薯生长发育的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(10):62-68.
- [21] YU Y X, ZHANG Y X, XIAO M, et al. A meta-analysis of film mulching cultivation effects on soil organic carbon and soil greenhouse gas fluxes[J]. *Catena*, 2021, 206:105483.
- [22] YIN M H, LI Y N, FANG H, et al. Biodegradable mulching film with an optimum degradation rate improves soil environment and enhances maize growth [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 216:127-137.
- [23] DOMAGALA-SWIATKIEWICZ I, SIWEK P. The effect of direct covering with biodegradable nonwoven film on the physical and chemical properties of soil[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2013, 22(3):667-674.
- [24] 刘亚龙,王 萍,汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3):627-643.
- [25] YU H, HUANG X, YANG K, et al. Differential effects of microplastics on soil organic carbon via lignin phenols and amino sugars in soil aggregates[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2025, 19(7):14.
- [26] MAZZON M, GIOACCHINI P, MONTECCHIO D, et al. Biodegradable plastics: effects on functionality and fertility of two different soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 169:104216.
- [27] CHEN N, LI X Y, SHI H B, et al. Assessment and modeling of maize evapotranspiration and yield with plastic and biodegradable film mulch[J]. *Agricultural and Forest Meteorology Agric For Meteorol*, 2021, 307:10847411.
- [28] 于 婕,雷 佳,李 丹,等. 不同地膜的降解特征及其对旱区马铃薯生长和土壤微环境的影响[J]. *核农学报*, 2025, 39(1):170-181.
- [29] HUANG F Y, LIU Z H, LI Z Y, et al. Is biodegradable film an alternative to polyethylene plastic film for improving maize productivity in rainfed agricultural areas? evidence from field experiments [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 272:107868.
- [30] UZAMURERA A G, ZHAO Z Y, WANG P Y, et al. Thickness effects of polyethylene and biodegradable film residuals on soil properties and dryland maize productivity [J]. *Chemosphere*, 2023, 329:138602.

(责任编辑:成纾寒)