中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

覆膜砂质农田土壤水分和CO_2分布特征及玉米根叶衰老响应

周立峰，杨宇翔，杨　荣

Root and leaf senescence of maize subject to spatial differentiation of soil water and CO_2 in sandy fields with plastic film mulching

ZHOU Lifeng, YANG Yuxiang, and YANG Rong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12357/cjea.20230289

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆和地膜覆盖条件下玉米农田土壤有机碳组分生长季动态

Seasonal dynamics of soil organic carbon fractions under straw and plastic film mulching of spring maize

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(3): 347–356

绿洲灌区玉米产量形成及水分利用特征对地膜覆盖方式及行距的响应

Responses of grain yield formation and water use characteristic of maize to plastic film mulching pattern and row spacing in oasis irrigation area in Northwest China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(5): 662–670

旱地雨养农业覆膜体系及其土壤生态环境效应

Review of plastic film mulching system and its impact on soil ecological envi–ronment in China's rainfed drylands

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(3): 317–328

不同覆盖方式对新复垦区土壤水热及春玉米产量的影响

Effects of different mulching on soil water–heat and spring maize yield in newly reclaimed land

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(5): 844–854

春小麦秸秆还田对后茬玉米干物质积累及产量形成的调控效应

Responses of dry matter accumulation and yield in a following maize crop to spring wheat straw returning

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1210–1218

氧化生物双降解地膜降解性能及其对东北雨养春玉米田间水热和生长的影响

Degradation property of oxo–biodegradable plastic film and its mulching effect on soil moisture, soil temperature and maize growth in rainfed Northeast China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(1): 72–80

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2024 年 1 月 第 32 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2024, 32(1): 83−94

DOI: 10.12357/cjea.20230289

周立峰, 杨宇翔, 杨荣. 覆膜砂质农田土壤水分和 CO_2 分布特征及玉米根叶衰老响应[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2024, 32(1): 83−94

ZHOU L F, YANG Y X, YANG R. Root and leaf senescence of maize subject to spatial differentiation of soil water and CO_2 in sandy fields with plastic film mulching[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(1): 83−94

覆膜砂质农田土壤水分和 CO_2 分布特征及玉米根叶衰老响应*

周立峰[1,2], 杨宇翔[1], 杨 荣[2**]

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院 昆明 650500; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 兰州 730000)

摘 要: 干旱区新垦绿洲沙地灌溉强度大, 农田覆膜后往往出现春玉米早衰现象。为探讨土壤水分和通气性是否是引发早衰的原因, 本研究在河西走廊绿洲春玉米农田设置不覆膜 (NM) 和覆膜 (PFM) 处理, 探求覆膜条件下土壤水分和 CO_2 分压 (pCO_2) 对玉米根系生长、绿叶面积衰减、光合生理以及籽粒产量与品质的影响。覆膜处理中, 覆膜区域的土壤 pCO_2 较未覆膜区域高 40% 以上; 未覆膜处理中, 对应区域的土壤 pCO_2 差异为 13.9%~24.0%。相比不覆膜处理的对应区域, 覆膜处理覆膜区域过高的土壤 pCO_2 使玉米花期根系活力下降 19.7%, 但非覆膜区根长密度和根系活力分别增加 22.7% 和 9.6%。覆膜提高了春玉米拔节期叶片光合速率 (20.0%) 和蒸腾速率 (8.5%), 但抑制了花后叶片光合速率 (−40.0%) 和蒸腾速率 (−18.0%); 覆膜处理相对绿叶面积衰减启动时间和衰减最大速率时间分别提前 1.7 d 和 7.1 d, 而平均衰减速率和最大衰减速率分别增加 6.7% 和 21.7%。覆膜的上述效应未显著影响玉米籽粒产量, 但使籽粒淀粉含量和蛋白质含量分别降低 20.1% 和 22.1%。以上结果表明, 在干旱区新垦绿洲沙地, 覆膜根区土壤 pCO_2 过高可能是导致玉米花后早衰和籽粒品质下降的重要原因, 后期建议开展适时揭膜、控制灌溉 (如亏缺灌溉、分根交替灌溉) 或加气灌溉对覆膜新垦绿洲农田土壤通气性的改善研究。

关键词: 绿洲化; 地膜覆盖; 土壤通气性; 玉米; 早衰

中图分类号: S275.6

Root and leaf senescence of maize subject to spatial differentiation of soil water and CO_2 in sandy fields with plastic film mulching*

ZHOU Lifeng[1,2], YANG Yuxiang[1], YANG Rong[2**]

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: High intensive irrigation is commonly found in newly reclaimed oasis sandy land in arid area, which easily causes plant senescence of spring maize in farmland with plastic film mulching. The previous studies have found that land cover significantly affected soil moisture and soil aeration, but the data of spatial differentiation of soil moisture and soil aeration under mulching condition was lacking. In order to explore whether soil moisture and aeration causes plant senescence, an experiment was conducted to in-

* 中国科学院战略性先导科技专项项目 (XDA23060302)、国家自然科学基金项目 (52369006) 和云南省基础研究计划项目 (202201BE070001-023) 资助

** 通信作者: 杨荣, 主要研究方向为绿洲农业生态学。E-mail: yangrong@lzb.ac.cn
周立峰, 主要研究方向为农田生态过程及模拟。E-mail: zhoulf@kust.edu.cn

收稿日期: 2023-05-23 接受日期: 2023-08-15

* This study was supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA23060302), National Natural Science Foundation of China (52369006), and the Yunnan Fundamental Research Projects (202201BE070001-023).

** Corresponding author, E-mail: yangrong@lzb.ac.cn

Received May 23, 2023; accepted Aug. 15, 2023

vestigate the effects of plastic film mulching on spatial differentiation of soil water and partial pressure of soil CO_2 (pCO_2) in root zone, root growth, green leaf duration, leaf photosynthetic physiology, grain yield and grain quality of spring maize in a sandy farmland in the Hexi Corridor (100°12′E, 39°20′N, 1370 m above sea level). Two treatments [plastic film mulching (PFM) and no mulching (NM)] were set up in this experiment. In the current study, oven drying method was used to determine soil water content. Soil gas was collected by gas well method, which was composed of collecting pipe, transmission pipe and a sampler. The CO_2 concentration of gas samples was analysed by a gas chromatograph (Agilent 7890A, Agilent, Palo Alto, USA). Plant roots were sampled using a steel drilling, washed into a nylon mesh bag, scanned with root a scanner (EPSON Perfection V700) and then obtained root length density (RLD) using WinRHIZOPro software. Soil moisture showed no significant difference in horizontal direction in NM treatment, whereas, the average soil moisture of mulched soil (narrow row and wide row at 5 cm distance from plants) was 28.1% (P<0.05), 15.2% (P<0.05) and 21.7% (P<0.05) higher than that under non-mulched soil (wide row at 25 cm distance from plants) before, 6-days after, and 9-days after irrigation. In PFM treatment, soil pCO_2 in mulched zone was 40% higher than that in the in non-mulched zone. Compared with NM, the excessively high soil pCO_2 under mulched zone under PFM treatment decreased the maize root activity by 19.7%, but the root distribution and activity in the non-mulch zone increased by 22.7% and 9.6%, respectively; the leaf photosynthetic rate and transpiration rate in PFM were increased by 20.0% and 8.5% at the jointing stage, respectively, but the corresponding value at grain filling stage were −40.0% and −18.0% respectively. In addition, compared with the NM, the senescence-start time and senescence-maximum time of green-leaves were 1.7 d and 7.1 d earlier in PFM, respectively, while the average and maximum green-leaves senescence rates were increased by 6.7% and 21.7% in PFM, respectively. The above effects of mulching did not significantly affect the yield of corn grain, but reduced the starch content and protein content of grain by 20.1% and 22.1%, respectively. The above results show that the excessively high soil pCO_2 after maize flowering in the newly reclaimed oasis sandy land in the arid area may be an important reason of plant senescence and grain quality degradation, and it is recommended to take timely film-uncovering, controlled irrigation (e.g., deficit irrigation, root alternating irrigation) or aerated irrigation to improve soil aeration.

Keywords: Oasisization; Plastic film mulching; Soil aeration; Maize; Plant senescence

全球人口已增加至 80 亿, 粮食生产面临持续增长压力并驱动全球耕地面积的不断扩大[1-2]。绿洲化是将自然生态系统 (如天然绿洲、绿洲-沙漠交错带) 转化为耕地的过程, 是中国、埃及、以色列、澳大利亚等国家新增耕地的重要方式[2]。中国西北干旱绿洲区占据了全国 40% 以上的可开垦耕地, 绿洲面积在过去 60 年中扩大了 4 倍[3]。尽管绿洲可开垦耕地资源丰富, 但地带性风沙土结构松散且缺乏有机质, 导致土壤水肥保蓄能力不足[3]。因此, 绿洲化进程往往伴随着过量灌溉以保证作物耗水需求。以临泽绿洲边缘的新垦农田为例, 春玉米 (*Zea mays* L.) 生育期灌溉次数常达二十余次, 总灌溉量超过 1000 mm。在这种过量灌溉模式下, 覆膜农田玉米常出现早衰症状。

地膜覆盖能显著改善土壤水热条件, 是干旱半干旱区广泛采用的栽培措施[4]。地膜覆盖对作物出苗[5]、植株营养生长与光合生理[6] 的正面作用已有大量报道, 但也有研究指出覆膜可能引发农田土壤温度过高[6]、有机质耗竭[7]、作物“奢侈耗水”[7] 和植株生育后期“脱水脱肥”[8] 等现象, 从而对作物后期生长及产量造成不利影响。土壤通气性调节土壤养分转化和作物生长, 是仅次于土壤水分和养分的第三大环境因子[9]。根系是作物获取土壤水分和养分的主要器官[10], 氧气 (O_2) 在维持根系生理代谢和功能方面发挥着重要作用[11]。土壤缺氧会极大地限制作物根系发育和土壤微生物活动[12-15], 进而对土壤养分供给和作物生长产生负面影响[16]。在土壤中, 土壤呼吸导致土壤-大气界面存在 O_2/CO_2 浓度梯度。土壤通过气体的对流和扩散吸收 O_2 并排放 CO_2, 从而将土壤气体中 O_2 和 CO_2 分压 (即土壤气体中 O_2 和 CO_2 所占的质量比例) 维持在稳定水平[17]。

近年来, 地表覆盖抑制土-气界面气体交换并导致土壤通气性不良的现象屡有报道[18-21]。例如, 在我国南方, 地表有机物覆盖引起土壤气体 CO_2 分压 (pCO_2) 过高、根系生长受限和人工林退化 [22]。在新疆的研究发现, 覆膜对土壤水热条件的改善并未显著提高棉花 (*Gossypium herbaceum* L.) 产量, 并推测该现象可能与土壤通气不良有关[22]。在我国西北地区的研究也发现, 膜下滴灌土壤通气不良激发了玉米气生根的生长, 使根系生长呈现浅层化分布, 限制了根系对土壤水肥的吸收并增加了作物早衰风险[23-24]。目前, 关于土壤压实[25-26]、淹水[27-28] 降低土壤气体中 O_2 和 CO_2 质量比的作用机制已有深入研究, 然而地表覆盖对土壤通气性的影响还有待进一步明确。

相比土壤中 O_2 分压 (pO_2), 土壤 pCO_2 对外界环境变化的响应更为敏感, 是土壤呼吸作用强弱的指示因子, 且对作物生理特性和产量的影响也更为明显[29-30]。因此, 土壤 pCO_2 广泛用于土壤通气性的表征。地膜通常覆盖于作物种植行, 形成了覆膜区域和未覆膜区域交替分布的非均匀性土-气地表界面,

并可能影响土壤通气性[31]。在新垦绿洲农田过量灌溉情景下, 覆膜是否会造成土壤 pCO_2 升高及其在覆膜区-未覆膜区的“两区”分布还不清楚, 其是否会导致作物根叶衰老并影响玉米籽粒的产量与品质也有待验证。因此, 本研究在河西走廊新垦绿洲农田针对土壤水分、CO_2 分布以及玉米根叶衰老与籽粒产量品质对覆膜的响应开展研究, 旨在为西北新垦绿洲农田的稳产增效提供理论与实践依据。

1　材料与方法

1.1　试验地基本情况

试验于 2020 年 4—10 月在中国科学院临泽内陆河流域研究站进行 (39°20′N, 100°12′E, 海拔 1370 m)。该地区属温带大陆性干旱荒漠气候, 多年平均降雨量为 117 mm, 蒸发量为 2390 mm, 降雨集中在 7—9 月。试验地年均气温为 7.6 ℃, 无霜期为 165 d, 年日照时数约为 3250~3500 h。试验站属中国生态系统研究网络 (CERN) 站, 站内设有标准气象观测站, 试验期春玉米生育期平均温度为 18.0 ℃, 累积降雨量为 100.5 mm, 累积蒸发量为 1845.5 mm (图 1)。当地采取井 (地下水) 渠 (黑河水) 结合的灌溉引水结构, 年地下水位在 4~6 m 之间波动, 地下水电导率为 0.73 dS·m^{-1}。试验地土壤为灌耕灰棕漠土(灌漠土), 基本理化性质如表 1 所示。当地种植的春玉米多为中晚熟品种, 种植制度为一年 1 季, 新垦沙地农田春玉米产量为 9000~12 000 kg·hm^{-2}。

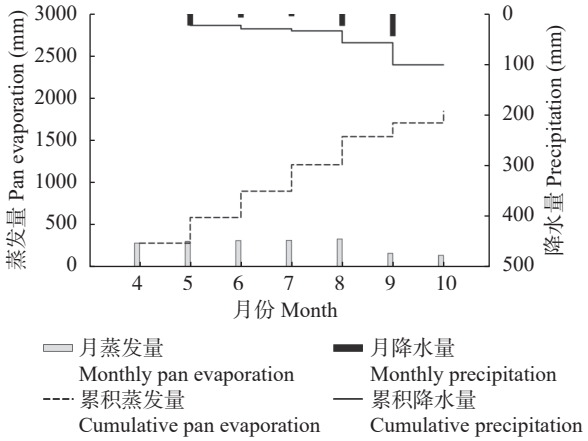

图 1　试验地玉米生育期 (2020 年 4—10 月) 气温、降水和水面蒸发量

Fig. 1　Air temperature, precipitation and pan evaporation during maize growth period (April to October in 2020) at the experimental site

表 1　试验地 0~120 cm 土层土壤基本理化性质

Table 1　Basic soil physical and chemical properties (0−120 cm depth) at the experimental site

土层深度 Soil depth (cm)	容重 Bulk density (g·cm^{-3})	田间持水量 Field capacity (%)	有机质 Organic matter (g·kg^{-1})	NO_3^- 含量 NO_3^- content (mg·kg^{-1})	NH_4^+ 含量 NH_4^+ content (mg·kg^{-1})	土壤粒径分布 Soil particle size distribution (%)		
						黏粒 Clay	粉粒 Slit	砂粒 Sand
0~20	1.43	33.2	7.81	18.5	13.2	16.2	18.3	65.5
20~40	1.49	31.9	3.73	12.3	21.8	13.1	18.3	68.6
40~60	1.52	28.6	2.78	9.8	13.4	11.2	14.2	74.6
60~90	1.56	26.5	2.22	6.7	7.3	9.6	9.8	80.6
90~120	1.58	24.3	1.57	5.8	6.2	7.8	6.4	85.8

1.2　试验设计及方法

试验设 2 个处理 (NM: 不覆盖; PFM: 地膜覆盖), 每个处理设 3 个重复, 小区面积 5 m×10 m。春玉米采用宽窄行种植, 窄行 40 cm, 宽行 60 cm, 株距为 30 cm。覆盖处理中, 地膜 (无色透明地膜, 膜厚度为 0.008 mm, 覆盖宽度为 60 cm) 覆盖在窄行, 覆盖度为 0.6。两个处理的灌水和除草措施保持一致。采用畦灌方式灌溉, 自玉米 3 叶期起每 10 d 灌溉 1 次, 灌水定额由 E601 型蒸发皿确定, 全生育期灌水 13 次, 总灌水量为 920.6 mm。两个处理的施肥也保持一致, 即氮肥 300 kg(N)·hm^{-2} 和磷肥 200 kg(P_2O_5)·hm^{-2}, 一半肥料以底肥的形式施入, 其余肥料于春玉米 6 叶期、10 叶期、抽雄期和灌浆期平均分次施入。于 4 月 12 日旋耕整地并起埂划分小区, 旋耕深度为 15 cm, 无秸秆覆盖; 4 月 15 日人工覆膜, 地膜两边以土压实; 4 月 20 日播种, 供试春玉米品种为‘陇单 10 号’, 播种方式为人工点播, 播种深度为 5 cm。

1.3　取样及测定方法

1.3.1　土壤含水率

在春玉米花期初, 采用烘干法测定灌水前和灌水后第 3 天、第 6 天和第 9 天的土壤含水率, 取样深度为 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 和 40~60 cm。水平方向上, 窄行取样点为距植株 0~20 cm 的中点, 即 10 cm; 宽行取样点分别为距植株 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm处的中点部位, 即 5 cm、15 cm 和 25 cm 处 (图 2), 每个小区重复取样 3 次。

1.3.2　土壤气体收集和 pCO_2 测定

在春玉米花期的第 7 天, 采用气井法收集土壤气

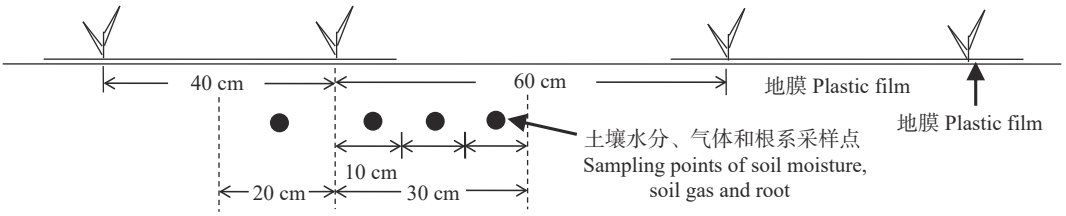

图 2 土壤水分测定的水平方向取样点示意图

Fig. 2 Diagram of sampling points in the horizontal direction for soil moisture measurement

体, 装置在 Wang 等[32] 的基础上略作改变, 主要由集气管、输气管和采样器组成, 水平采样点与土壤水分保持一致, 采样深度为 5 cm、15 cm、30 cm 和 50 cm, 每个小区设 3 个采样点。集气管由内径为 2.5 cm 的聚氯乙烯 (PVC) 管制成, PVC 管的下部被打孔, 并由防水膜覆盖, 允许土壤空气从周围土壤扩散到取样器中。将配有三通阀的微孔聚四氟乙烯管 (内径为 0.25 cm, 外径为 0.30 cm) 插入集气管, 用于连接集气管和采样器。在春玉米花期的第 7 天采集各层土壤气体, 并采用气相色谱仪 (Agilent 7890A, Agilent, Palo Alto, USA) 测定土壤 CO_2 分压 (图 3)。

1.3.3 根长密度 (RLD) 及根系活力

在春玉米花期的第 10 天采用根钻法采集根系样品, 每个小区重复取样 3 次, 取样点和土壤水分保持一致。根系取出后放入尼龙网袋中冲洗, 冲洗干净的根系样品经过扫描后 (EPSON Perfection V700) 使用 WinRHIZOPro STD4800 LA2400 软件分析得到 RLD。保存覆膜区和非覆膜区 0~20 cm 深度的作物根尖组织, 采用氯化三笨基四氮唑法测定根系活力。

1.3.4 叶片衰老及光合特性

从吐丝期开始, 在每个试验小区标记 3 株有代表性植株, 每周测量一次绿叶面积, 监测单株绿叶面积的动态变化。叶面积 (LA, cm^2) 计算如下所示:

$$LA = L \times W \times 0.75 \quad (1)$$

式中: L 为绿叶部分的叶脉长度 (cm), W 为绿叶部分的最大宽度 (cm)。

相对绿叶面积 (RGLA, %) 为吐丝后某时刻绿叶面积与吐丝期最大绿叶面积之比, 其变化过程用以下方程描述[33]。

$$y = e^{a-bx}/(1+e^{a-bx}) \quad (2)$$

式中: y 为某一时刻的 RGLA(%), x 为吐丝后的天数, 参数 a 与 b 分别和叶片衰老的启动时间和衰老速度有关。通常认为相对绿叶面积达到 95% 时为植株衰老启动时间 (T_s)。对上述方程求导可得到 RGLA 的最大衰减速率 (V_{max}) 及其发生时间 (T_{max})[34]。

在玉米吐丝期, 选择晴朗天气的上午 9:00—11:30, 各小区随机选取 3 株长势一致的玉米, 使用便携式气体交换系统 (Li-6400XT, Li-COR, USA) 测定旗叶的净光合速率 (P_n) 和蒸腾速率 (T_r), 采用人工光源测定叶片光合速率, 预设光强为 1500 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 每次测定重复 3 次。

1.3.5 干物质量、产量、收获系数和品质

于蜡熟期进行地上部干物质量和籽粒产量的测定。在各小区中间两行随机选择连续的 10 株玉米,

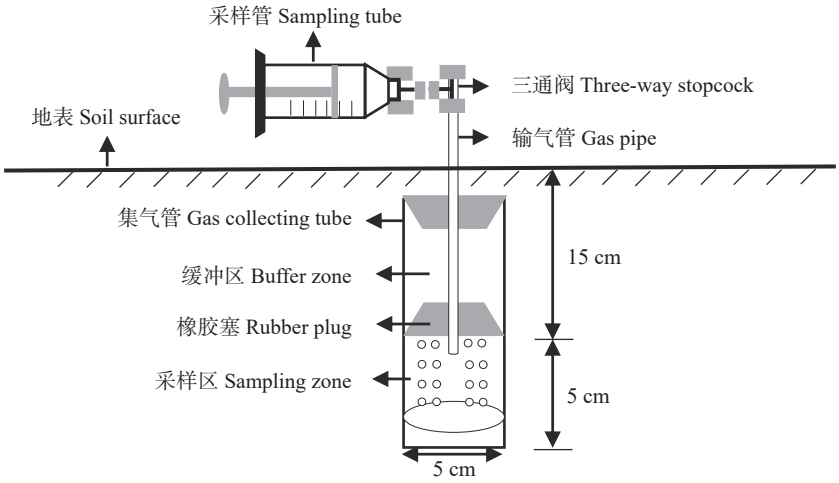

图 3 土壤气体采样系统 (以 15 cm 采样深度为例)

Fig. 3 Soil gas sampling system (taking the sampling depth of 15 cm as an example)

脱粒后记录每株的籽粒数和籽粒鲜重, 计算单株百粒重和籽粒产量, 百粒重与产量按称取重量的 15% 扣除水分。地上部植株装入纸袋后放入烘箱中于 105 ℃ 杀青 30 min, 然后于 75 ℃ 烘干至恒重。收获指数 (HI) 由籽粒产量 ($kg \cdot hm^{-2}$) 除以地上部干物质量 ($kg \cdot hm^{-2}$) 获得。籽粒粉碎后过 100 目筛, 其淀粉含量采用蒽酮比色法测定, 蛋白质含量采用凯氏定氮法测定。

1.4　计算及数据分析

利用 *t* 检验法进行两处理间各测定指标的比较, $P<0.05$ 则视为存在显著差异, 分析工具为 SPSS 15.0。采用 Sigmaplot 12.0 软件制图。

2　结果与分析

2.1　覆膜对春玉米根区土壤水分和 CO_2 分压的影响

2.1.1　对根区土壤水分的影响

灌水前后 NM 处理和 PFM 处理的土壤含水率如图 4 所示。结果表明, 除灌水后第 3 天外, NM 处理和 PFM 处理的土壤含水率差异均显著, 灌水前和灌水后第 3 天、6 天、9 天, PFM 处理的土壤含水率较 NM 处理分别高 16.9% ($P<0.05$)、5.2% ($P>0.05$)、9.8% ($P<0.05$) 和 10.8% ($P<0.05$)。此外, 覆膜还影响土壤水分的水平分布: 灌水前和灌水后第 6 天和 9 天, PFM 处理膜下土壤 (窄行及宽行距植株 5 cm) 平均含水率较膜间 (宽行距植株 25 cm) 分别高 28.1% ($P<0.05$)、15.2% ($P<0.05$) 和 21.7% ($P<0.05$); 相比而言, NM 处理在相应水平位置土壤含水率的差异仅在灌水后第 6天显著, 且与 PFM 处理结果相反, 宽行距植株 25 cm 处的土壤含水率较窄行及宽行距植株 5 cm 处的平均土壤含水率高 7.2% ($P<0.05$)。

2.1.2　对根区土壤 CO_2 分压的影响

从图 5 可以看出, 覆膜显著改变了根区土壤剖面的 pCO_2 分布。灌水前和灌水后第 3 天、6 天和 9 天, PFM 处理的土壤 pCO_2 均值较 NM 处理分别高 24.9%、34.3%、32.7% 和 28.9% ($P<0.05$)。整个观测

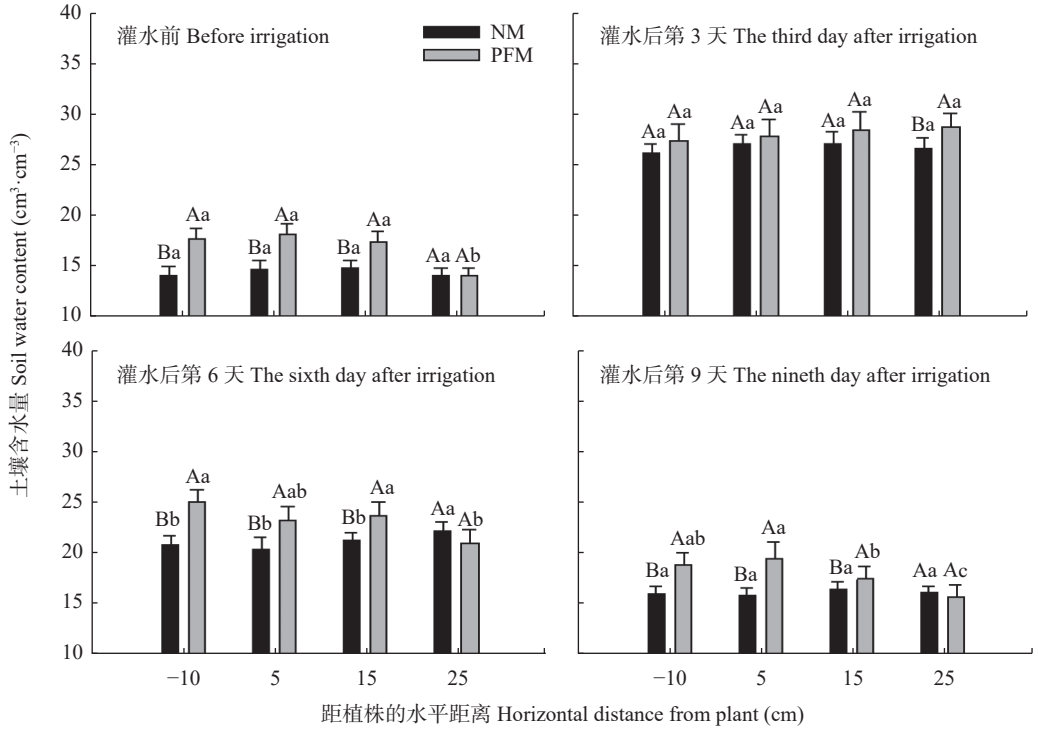

图 4　覆膜 (PFM) 和不覆膜 (NM) 处理下灌水前后春玉米根区土壤 (0~60 cm) 含水率

Fig. 4　Soil water content in root zone (0−60 cm) of spring maize before and after irrigation under no mulching (NM) and plastic film mulching (PFM) treatments

−10 为窄行在水平方向距植株 10 cm 处, 5、15 和 25 分别为宽行在水平方向距植株 5 cm、15 cm 和 25 cm 处; PFM 处理中, −10 和 5 为覆膜区域, 15 为覆膜区域边缘, 25 为不覆膜区域。不同小写字母表示同一处理不同水平距离间差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示同一水平距离两处理间差异显著 ($P<0.05$)。−10 is the sampling point at 10 cm distance from the plant in narrow row in the horizontal direction, and 5, 15 and 25 are the sampling points at 5 cm, 15 cm and 25 cm distance from the plant in wide row in the horizontal direction, respectively. Under PFM treatment, −10 and 5 refer to the mulching area, 15 refers to the edge of mulching area, and 25 refers to uncovered area. Different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$ level among different horizontal distances of the same treatment, and different capital letters indicate significant differences at $P<0.05$ level between different treatments at the same horizontal distance.

期, PFM 处理覆膜区域和不覆膜区域的土壤 pCO_2 均值较 NM 处理分别高 41.5% 和 13.8% (P<0.05); 灌水前和灌水后第 3 天、6 天和 9 天, PFM 处理膜下土壤 pCO_2 均值较 NM 处理相应区域分别高 37.7%、47.6%、43.3%和 36.2% (P<0.05), 膜间土壤 pCO_2 均值较 NM 处理相应区域分别高 8.2%、14.7%、14.6%和 17.3% (P<0.05)。水平方向上, 灌水前和灌水后第 3 天、6 天和 9 天, PFM 处理膜下土壤 pCO_2 较膜间土壤分别高 45.0%、49.7%、44.0% 和 43.9% (P<0.05), 而 NM 处理的相应值为 13.9%、16.2%、15.2% 和 24.0% (P<0.05)。

2.2 覆膜对春玉米物候及根冠生长的影响

2.2.1 植株物候期

研究结果表明, NM 和 PFM 处理的总生育期长度分别为 122.5 d 和 121.5 d, 物候期差异主要发生在苗期和拔节期。相比不覆膜处理, 覆膜处理将玉米苗期缩短了 6 d (P<0.05), 拔节期、抽雄期和灌浆期分别延长了 4 d、0.5 d 和 0.5 d, 因此两个处理的物候期在抽雄期和灌浆期已无显著差异。覆膜处理对植株根系取样、叶片光合测定和绿叶面积衰减动态观测不受物候期的影响 (图 6)。

2.2.2 根长密度分布和根系活力

覆膜对春玉米根系分布及活力的影响如图 7 所示。无论 NM 处理或 PFM 处理, 根长密度随垂直深度和水平方向的增大而逐渐递减。PFM 处理提高了表层土壤的根长密度 (图 7), 其在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的根长密度较 NM 处理分别高 10.2% 和 4.7% (P<0.05), 其余土层无显著性差异。此外, PFM 处理还改变了根系的水平分布特征。PFM 处理未覆膜区域土壤 (宽行距植株水平方向 25 cm 处) 的平均根长密度提高了 22.7% (图 7, P<0.05), 但是对覆膜区域土壤 (窄行及宽行 5 cm 处) 的根长密度无显著影响。与 NM 处理相比, PFM 处理使玉米根系整体上呈浅层化分布。覆膜还显著影响春玉米水平方向的根系活力 (图 7)。相比 NM 处理, PFM 处理覆膜区域

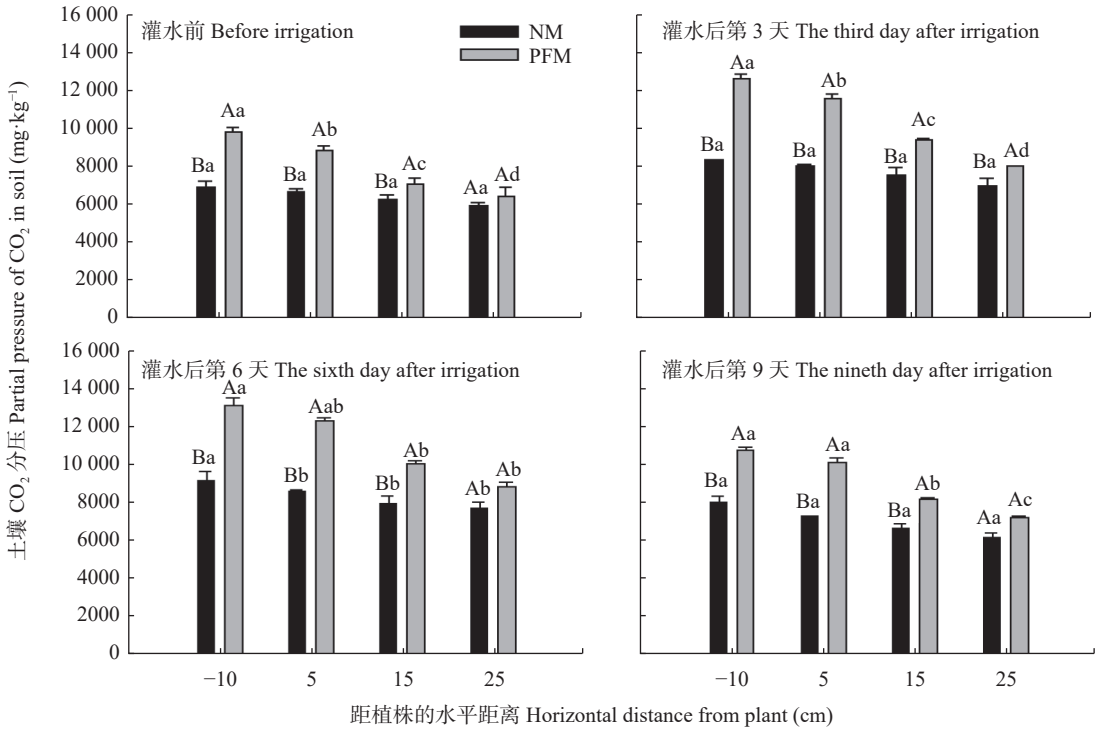

图 5 覆膜 (PFM) 和不覆膜 (NM) 处理下灌水前后春玉米生育期根区 (0~60 cm) 土壤 CO_2 分压

Fig. 5 Partial pressure of soil CO_2 (pCO_2) in root zone (0−60 cm) of spring maize before and after irrigation under no mulching (NM) and plastic film mulching (PFM) treatments

−10 为窄行在水平方向距植株 10 cm 处, 5、15 和 25 分别为宽行在水平方向距植株 5 cm、15 cm 和 25 cm 处; PFM 处理中, −10 和 5 为覆膜区域, 15 为覆膜区域边缘, 25 为不覆膜区域。不同小写字母表示同一处理不同水平距离间差异显著 (P<0.05), 不同大写字母表示同一水平距离两处理间差异显著 (P<0.05)。−10 is the sampling point at 10 cm distance from the plant in narrow row in the horizontal direction, and the 5, 15, and 25 are the sampling points at 5 cm, 15 cm, and 25 cm distance from the plant in wide row in the horizontal direction. Under PFM treatment, −10 and 5 refer to the mulching area, 15 refers to the edge of mulching area, and 25 refers to uncovered area. Different lowercase letters indicate significant differences at P<0.05 level among different horizontal distances at the same treatment, and different capital letters indicate significant differences at P<0.05 level between different treatments at the same horizontal distance.

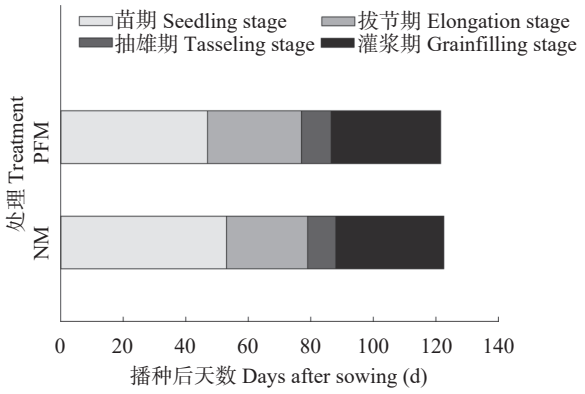

图 6　覆膜 (PFM) 和不覆膜 (NM) 处理下春玉米物候期

Fig. 6　Phenological phase of spring maize under no mulching (NM) and plastic film mulching (PFM) treatments

的根系活力降低 19.7% (P<0.05), 但非覆膜区域根系活力增加了 9.6% (P<0.05)。

2.2.3　相对绿叶面积动态

两个处理的相对绿叶面积变化均符合“S”型生长曲线, 可用 $y=e^{a-bx}/(1+e^{a-bx})$ 方程拟合 (图 8)。NM 处理相对绿叶面积的衰减启动时间 (T_s)、平均衰减速率 (V_m)、最大衰减速率 (V_{max}) 和最大衰减速率时间 (T_{max}) 分别为 9.3 d、1.5%·d^{-1}、2.3%·d^{-1} 和 36.0 d, 而覆膜处理的相应值分别为 7.6 d、1.6%·d^{-1}、2.8%·d^{-1} 和 28.9 d。PFM 和 NM 的相对绿叶面积的 T_s、V_{max} 和 T_{max} 均达显著差异水平 (P<0.05)。

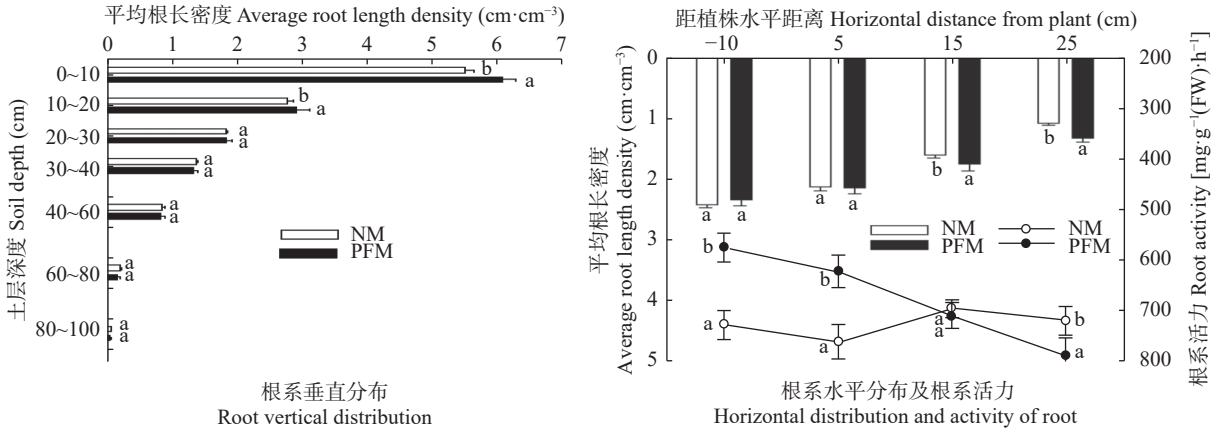

图 7　覆膜 (PFM) 和不覆膜 (NM) 处理下春玉米花期根长密度分布及根系活力

Fig. 7　Root length density and activity of spring maize at flower stage at different soil depth and horizontal distance from plant under no mulching (NM) and plastic film mulching (PFM) treatments

不同小写字母表示同一指标在同一垂直深度 (左图) 或水平距离 (右图) 不同处理间差异显著 (P<0.05)。右图中, −10 为窄行在水平方向距植株 10 cm 处, 5、15 和 25 分别为宽行在水平方向距植株 5 cm、15 cm 和 25 cm 处; PFM 处理中, −10 和 5 为覆膜区域, 15 为覆膜区域边缘, 25 为不覆膜区域; 柱子和带散点的折线分别为平均根长密度和根系活力。Different lowercase letters indicate significant differences at P<0.05 level of the same indicator among different treatments at the same depth (left figure) or horizontal distance (right figure). In the right figure, −10 is the sampling point at 10 cm distance from the plant in narrow row in the horizontal direction; 5, 15 and 25 are the sampling points at 5 cm, 15 cm and 25 cm distance from the plant in wide row in the horizontal direction, respectively. Under PFM treatment, −10 and 5 refer to the mulching area, 15 refers to the edge of mulching area, and 25 refers to uncovered area. Bars and lines with dots in the right figure refer to average root length density and root activity, respectively.

2.2.4　旗叶光合蒸腾速率

由图 9 可知, 覆膜对春玉米叶片光合和蒸腾速率的影响在作物拔节期 (6 月 15 日) 和灌浆期 (8 月 15 日) 存在差异。在拔节期, PFM 处理春玉米的叶片光合和蒸腾速率较 NM 处理分别高 20.0% 和 8.5% (P<0.05); 而在灌浆期, PFM 处理春玉米的叶片光合和蒸腾速率较 NM 处理分别低 40.0% 和 18.0% (P<0.05)。作物叶片光合速率和蒸腾速率之比反映了叶片尺度的水分利用效率。两个处理均表明, 叶片光合和蒸腾速率存在显著的线性关系 (图 9)。在拔节期和灌浆期, PFM 处理春玉米的叶片水分利用效率较 NM 处理分别高 10.6% (P>0.05) 和 26.9% (P<

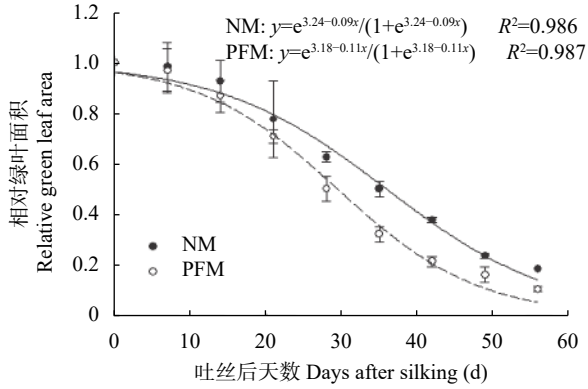

图 8　覆膜 (PFM) 和不覆膜 (NM) 处理下春玉米吐丝后相对绿叶面积的动态变化

Fig. 8　Dynamic changes of relative green leaf area after silking of spring maize under no mulching (NM) and plastic film mulching (PFM) treatments

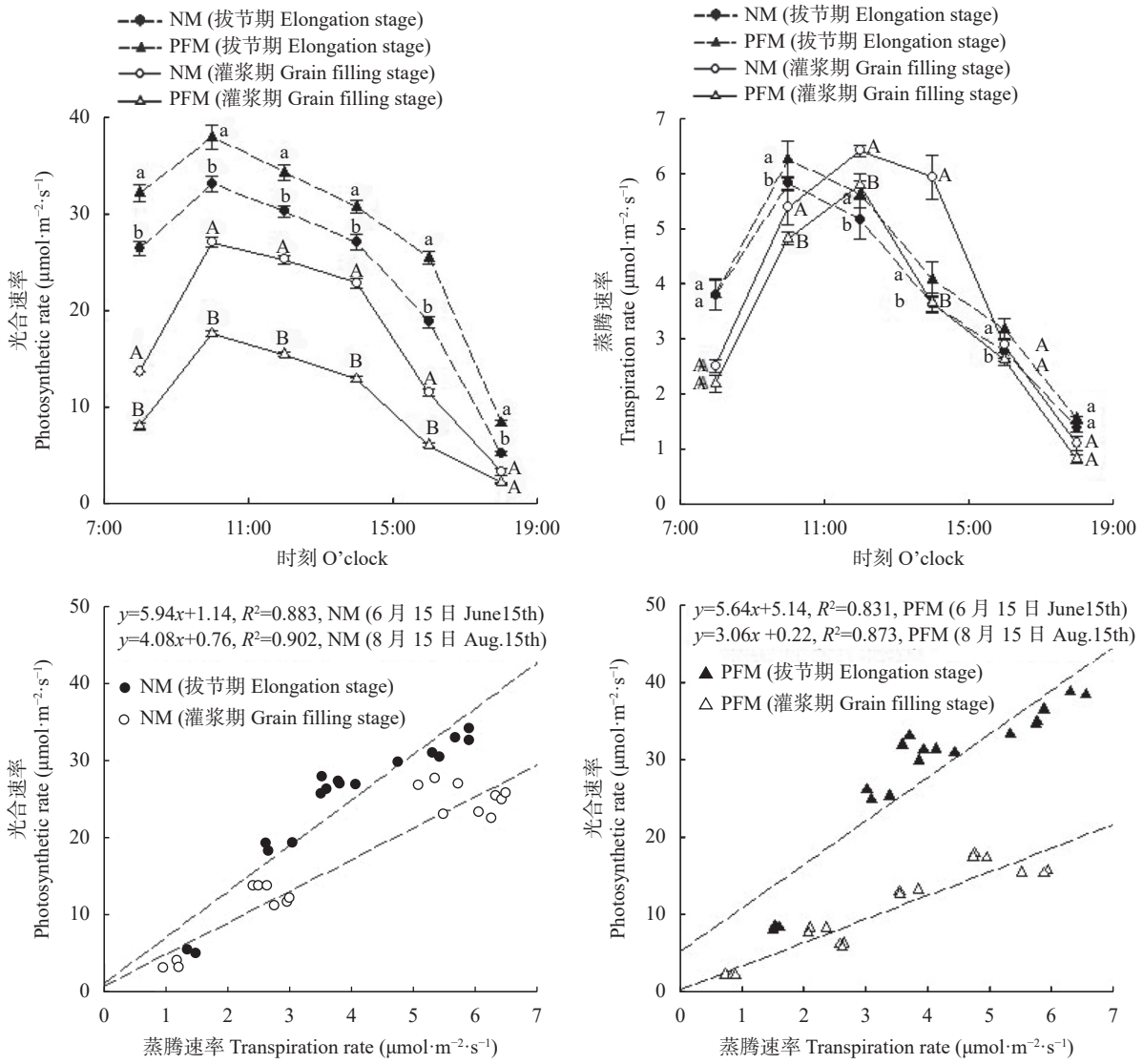

图 9 覆膜 (PFM) 和不覆膜 (NM) 处理下春玉米不同生长阶段叶片光合与蒸腾速率

Fig. 9 Leaf photosynthetic rates and transpiration rates of spring maize under no mulching (NM) and plastic film mulching (PFM) treatments at different growth stages

不同小写字母表示拔节期同一时间点两处理间差异显著 (P<0.05), 不同大写字母表示灌浆期同一时间点两处理间差异显著 (P<0.05)。Different lowercase letters indicate significant differences at P<0.05 level between different treatments at the same time at elongation stage, and different capital letters indicate significant differences at P<0.05 level between different treatments at the same time at grain filling stage.

0.05)。上述结果表明, 从作物叶片光合速率、蒸腾速率和叶片水分利用效率的角度看, 覆膜引发了春玉米花后叶片生理早衰。

2.3 春玉米籽粒产量和品质

由表 2 可知, PFM 处理与 NM 处理的玉米干物质量、产量和收获系数均无显著差异 (P<0.05), 但

表 2 覆膜 (PFM) 和不覆膜 (NM) 处理下春玉米干物质量、产量、收获系数及籽粒品质

Table 2 Dry biomass, grain yield, harvest index, and grain quality of spring maize under no mulching (NM) and plastic film mulching (PFM) treatments

处理 Treatment	干物质量 Dry biomass (kg·hm^{-2})	产量 Yield (kg·hm^{-2})	单株籽粒数 Kernel numbers per plant	百粒重 100-grain weight (g)	收获系数 Harvest index	淀粉含量 Starch content (%)	蛋白质含量 Protein content (%)
NM	19 185.2±506.3a	11 177.6±613.7a	601.9±58.1b	29.6±3.9a	0.58±0.06a	67.7±3.95a	11.3±0.86a
PFM	19 401.9±416.6a	10 658.5±309.5a	646.3±41.6a	26.8±4.5b	0.55±0.04a	53.5±4.36b	8.8±0.62b

同列不同小写字母表示两处理在P<0.05水平差异显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at P<0.05 level between different treatments.

PFM 处理春玉米籽粒淀粉含量和蛋白质含量分别较 NM 处理低 20.1% 和 22.1% (P<0.05)。这表明在干旱区新垦绿洲农田, 覆膜对作物产量无显著影响, 但降低了春玉米的籽粒品质。从产量构成要素看, PFM 百粒重较 NM 处理降低 9.6%, 但单株籽粒数提高 7.4%, 因此并未显著改变玉米籽粒产量。相关分析结果表明: 土壤水分和 pCO_2 存在正相关关系, 但与作物各指标相关性不显著。相比而言, 土壤 pCO_2 与春玉米植株根系活力、光合速率和籽粒品质存在显著负相关关系, 而与叶片失绿显著正相关 (表 3)。

表 3　春玉米籽粒产量和品质以及土壤和作物的其他指标的相关矩阵

Table 3　Correlation matrix containing grain yield and quality and other indexes of soil and crop of spring maize

	土壤水分 Soil moisture	土壤CO_2分压 Partial pressure of CO_2 in soil	根系活力 Root activity	光合速率 Photosynthetic rate	绿叶衰减启动时间 Leaf senescence start time	绿叶平均衰减速率 Average leaf senescence rate	产量 Grain yield	淀粉含量 Starch content	蛋白质含量 Protein content
土壤水分 Soil moisture	1.00	0.53*	−0.21	−0.14	0.19	0.28	0.25	−0.27	−0.18
土壤CO_2分压 Partial pressure of CO_2 in soil		1.00	−0.66*	−0.57*	0.73**	0.66*	0.32	−0.61*	−0.59*
根系活力 Root activity			1.00	0.62*	−0.51*	−0.57*	0.21	0.35	0.62*
光合速率 Photosynthetic rate				1.00	−0.78**	−0.82**	0.28	0.52*	0.48
绿叶衰减启动时间 Leaf senescence start time					1.00	0.73**	0.16	−0.69*	−0.52*
绿叶平均衰减速率 Average leaf senescence rate						1.00	0.41	−0.75**	−0.64*
产量 Grain yield							1.00	0.17	−0.22
淀粉含量 Starch content								1.00	−0.30
蛋白质含量 Protein content									1.00

*和**分别表示在P<0.05和P<0.01水平显著相关。* and ** indicate significant correlations at P<0.05 and P<0.01 levels, respectively.

3　讨论

在年均降水量少于 800 mm 的干旱、半干旱以及半湿润偏旱地区, 水热条件不足是限制作物产量的主要因素[35]。覆膜对土-气界面物质传输的阻隔不仅抑制了土面蒸发、减少了潜热损失, 还增加了地表长波逆辐射能量收入[4,36-37], 从而改善了农田水热条件。基于以上机制, 覆膜加快了叶片生长速率并增加了生物性耗水占蒸散发的比例[38-39]。虽然覆膜对土壤水热条件的改善已基本达成共识, 但其对作物产量的正负效应却均有报道。越来越多的研究表明, 覆膜在水热胁迫严重时能显著提高作物产量[35], 而当生长季降水量大于 770 mm 或生长季平均气温超过 24 ℃ 时, 覆膜对玉米的增产效应消失[40]。有学者认为, 覆膜虽然加速了作物生育前期的生长, 但有可能导致作物根冠生长失调及早衰。覆膜条件下, 作物冠层生长冗余被认为是引起作物根冠比失调和早衰的主要原因[41], 有学者据此提出了氮肥后移的施氮策略以保障覆膜作物花后冠层生长对养分的需求[8]。此外, 覆膜导致的根系浅层化分布可能降低根系吸收功能, 也可能是导致作物早衰的原因[42]。在我国南方雷竹 (*Phyllostachys praecox*) 林的研究[20] 同样表明, 有机物覆盖增加了土壤 CO_2 浓度并引起根系上浮, 从而不利于作物生长。以上研究表明, 随着降水和温度的升高, 地膜的增温保水作用对作物产量的影响会逐渐减弱, 而土壤通气状况可能成为影响作物产量的主要原因。

相关学者针对地膜覆盖对土壤通气性的影响已开展了一些研究。在新疆膜下滴灌棉田的研究发现[19], 覆膜后棉田土壤 CO_2 排放量减少 7.9%, 根区土壤 pCO_2(0.51%~2.59%)则显著高于不覆膜处理 (0.22%~2.40%), 覆膜在减少了棉田土壤排放 CO_2 的同时增加了土壤 pCO_2, 对土壤气体交换存在阻隔效应。在黄土高原雨养玉米农田的研究表明[43], 夏玉米生育期覆膜农田近地表 CO_2 浓度与不覆膜处理无显著差异, 然而覆膜农田根区土层的 pCO_2 (0.33%~0.88%) 显著高于不覆膜处理 (0.18%~0.61%)。上述研究表明, 覆膜显著增加了根区土壤的 pCO_2, 且在水分供应充足条件下更为显著。前人研究认为, 增加土壤呼吸和

减少 CO_2 排放是覆膜提高土壤 pCO_2 的主要原因。土壤呼吸是异养呼吸 (土壤微生物和动物呼吸) 和自养呼吸 (根呼吸) 的总和, 根呼吸速率通常远高于土壤微生物呼吸速率[9], 且根系周边的土壤微生物数量通常较高 (即根际效应)。本研究针对干旱区新垦绿洲农田的研究发现, 不覆膜和覆膜处理的土壤 pCO_2 在水平方向上虽然均表现出“两区分布”, 但在过程上有所不同。在不覆膜处理中, 土壤 pCO_2 的水平“两区分布”随灌水时间的增加愈发显著, 很可能与根系分布差异导致的土壤呼吸分异有关, 因为淹水会降低根系呼吸, 而随着水分入渗根系呼吸会逐渐恢复[23,28-29]。覆膜处理下, 土壤 CO_2 的“两区分布”不受灌水时间影响, 这表明地膜的阻隔效应是引起覆膜农田土壤 CO_2 “两区分布”的主要原因, 而并非灌水导致的土壤水分或温度变化。

在德国西南区的研究发现, 过高的土壤 pCO_2 抑制了根系生长, 导致了橡树 (*Quercus robur*) 林的退化[44]。有室内模拟试验表明, 当 pCO_2 为 0.5% 时, 仙人掌根呼吸抑制率达 40% 左右[29]。我国学者的试验同样证实, 土壤 pCO_2 增加使苜蓿 (*Medicago sativa*) 根冠比从 1.04 下降到 0.63, 苜蓿地上鲜重和地下鲜重分别下降 43.6% 和 66.1%, 苜蓿中的粗蛋白和总氨基酸分别下降约 15.2% 和 11.4%, 这表明 pCO_2 增加对根系的抑制作用大于地上部分[30]。在我国南方雷竹林[20] 的研究表明, 有机物覆盖增加了土壤 pCO_2, 不利于作物生长。笔者前期的膜下滴灌玉米试验同样发现, 玉米气生根的增多可能与土壤通气性不良有关[42]。本研究根据 E602 型蒸发皿灌水量, 土壤含水率在作物生育期均保持在田间持水量 (表 1) 的 60% 以上 (图 4), 因此水分不是限制作物根系生长的因素。此外, 在高频粗放的灌溉模式下, 地膜覆盖未显著改变新垦绿洲农田膜下土壤春玉米的根长密度, 但显著降低了该区域的根系活力; 相反, 覆膜显著提高了未覆膜区域的根长密度和根系活力。这表明根系对土壤 pCO_2 “两区分布”有显著的响应。此外, 覆膜虽然提高了新垦绿洲农田春玉米拔节期叶片光合速率和蒸腾速率, 但却引发了春玉米花后早衰。前人研究认为, 覆膜使作物前期生长冗余并导致作物生育后期根系无法维系地上部生长, 最终引发作物“脱水脱肥”和叶片早衰[8,41]。本研究进一步发现, 在新垦绿洲高频粗放的灌溉模式下, 覆膜区域土壤过高的 pCO_2 导致作物根系生长受限也可能是引起植株早衰的原因。然而, 在本研究中, 覆膜对春玉米灌浆的负面效应并未显著降低作物产量, 但对作物品质造成了不良影响。这是因为覆膜有利于拔节期作物生长, 其较高的单株籽粒数弥补了灌浆不足对百粒重的负面作用。在后期研究中, 需要关注覆膜对玉米品质的影响并开展相关机理及对策研究, 比如在覆膜条件下采取适时揭膜[45]、控制灌溉 (如亏缺灌溉、分根交替灌溉)[23] 或加气灌溉[12] 等对覆膜新垦绿洲农田土壤通气性的改善研究。

4 结论

在干旱区新垦绿洲农田, 相比不覆膜农田, 覆膜农田膜下土壤水分和 pCO_2 显著高于非覆膜区土壤, 表现出显著的“两区分布”特征。覆膜区域过高的土壤 pCO_2 抑制了覆膜区土壤根系活力, 但增加了未覆膜区土壤的根系密度和活力。覆膜虽然提高了春玉米拔节期叶片光合速率和蒸腾速率, 但抑制了花后叶片光合速率和蒸腾速率, 并加速了花后绿叶面积衰减。覆膜的上述效应虽未显著影响作物产量, 但降低了玉米籽粒淀粉含量和蛋白质含量。因此, 覆膜根区土壤 pCO_2 过高可能是导致作物花后根、叶早衰和籽粒品质降低的潜在因素, 后期建议开展适时揭膜、控制灌溉 (如亏缺灌溉、分根交替灌溉) 或加气灌溉对覆膜新垦绿洲农田土壤通气性的改善研究。

参考文献 References

[1] HUANG T T, YANG N, LU C, et al. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 214: 105171

[2] WANG T Y, WANG Z H, GUO L, et al. Experiences and challenges of agricultural development in an artificial oasis: A review[J]. Agricultural Systems, 2021, 193: 103220

[3] NIU Z R, SU Y Z, AN F J, et al. Changes in soil carbon and nitrogen content, associated with aggregate fractions, after conversion of sandy desert to irrigation farmland, northwest China[J]. Soil Use and Management, 2022, 38(1): 396−410

[4] GAN Y T, SIDDIQUE K H M, TURNER N C, et al. Ridge-furrow mulching systems — An innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[M]// Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2013: 429–476

[5] 李尚中, 王勇, 樊廷录, 等. 旱地玉米不同覆膜方式的水温及增产效应[J]. 中国农业科学, 2010, 43(5): 922−931
LI S Z, WANG Y, FAN T L, et al. Effects of different plastic film mulching modes on soil moisture, temperature and yield of dryland maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(5): 922−931

[6] 路海东, 薛吉全, 郝引川, 等. 播期对雨养旱地春玉米生长发育及水分利用的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(12): 1906−1914

LU H D, XUE J Q, HAO Y C, et al. Effects of sowing time on spring maize (*Zea mays* L.) growth and water use efficiency in rainfed dryland[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(12): 1906−1914

[7] 蒋锐, 郭升, 马德帝. 旱地雨养农业覆膜体系及其土壤生态环境效应[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 317−328
JIANG R, GUO S, MA D D. Review of plastic film mulching system and its impact on soil ecological environment in China's rainfed drylands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(3): 317−328

[8] 魏廷邦, 胡发龙, 赵财, 等. 氮肥后移对绿洲灌区玉米干物质积累和产量构成的调控效应[J]. 中国农业科学, 2017, 50(15): 2916−2927
WEI T B, HU F L, ZHAO C, et al. Response of dry matter accumulation and yield components of maize under N-fertilizer postponing application in oasis irrigation areas[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(15): 2916−2927

[9] BEN-NOAH I, FRIEDMAN S P. Review and evaluation of root respiration and of natural and agricultural processes of soil aeration[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1−47

[10] LYNCH J P. Roots of the second green revolution[J]. Australian Journal of Botany, 2007, 55(5): 493

[11] KUZYAKOV Y. Separating microbial respiration of exudates from root respiration in non-sterile soils: a comparison of four methods[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(11): 1621−1631

[12] DU Y D, NIU W Q, ZHANG Q A, et al. Effects of nitrogen on soil microbial abundance, enzyme activity, and nitrogen use efficiency in greenhouse celery under aerated irrigation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2018, 82(3): 606−613

[13] STADLER L B, LOVE N G. Impact of microbial physiology and microbial community structure on pharmaceutical fate driven by dissolved oxygen concentration in nitrifying bioreactors[J]. Water Research, 2016, 104: 189−199

[14] LI Y A, NIU W Q, ZHANG M Z, et al. Artificial soil aeration increases soil bacterial diversity and tomato root performance under greenhouse conditions[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(12): 1443−1461

[15] ZHU Y, DYCK M, CAI H J, et al. The effects of aerated irrigation on soil respiration, oxygen, and porosity[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(12): 2854−2868

[16] LIU Y, GUO K Y, ZHAO Y Z, et al. Change in composition and function of microbial communities in an acid bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil with the addition of three different biochars[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 473: 118336

[17] FRIEDMAN S P, NAFTALIEV B. A survey of the aeration status of drip-irrigated orchards[J]. Agricultural Water Management, 2012, 115: 132−147

[18] 陶丽佳, 王凤新, 顾小小. 膜下滴灌对土壤CO_2与CH_4浓度的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 330−336
TAO L J, WANG F X, GU X X. Influence of drip irrigation under plastic film mulching on concentrations of CO_2 and CH_4 in soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 330−336

[19] 俞永祥, 赵成义, 贾宏涛, 等. 覆膜对绿洲棉田土壤CO_2通量和CO_2浓度的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 155−160
YU Y X, ZHAO C Y, JIA H T, et al. Effects of plastic film mulching on soil CO_2 efflux and CO_2 concentration in an oasis cottonfield[J].ChineseJournalofAppliedEcology,2015,26(1):155−160

[20] XU M J, ZHUANG S Y, GUI R Y. Soil hypoxia induced by an organic-material mulching technique stimulates the bamboo rhizome up-floating of *Phyllostachys praecox*[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 14353

[21] QIAN Z Z, ZHUANG S Y, GAO J S, et al. Aeration increases soil bacterial diversity and nutrient transformation under mulching-induced hypoxic conditions[J]. Science of the Total Environment, 2022, 817: 153017

[22] QI J, NIE J J, ZHANG Y J, et al. Plastic film mulching does not increase the seedcotton yield due to the accelerated late-season leaf senescence of short-season cotton compared with non-mulching[J]. Field Crops Research, 2022, 287: 108660

[23] 罗宏海, 张宏芝, 陶先萍, 等. 膜下滴灌条件下水氮供应对棉花根系及叶片衰老特性的调节[J]. 中国农业科学, 2013, 46(10): 2142−2150
LUO H H, ZHANG H Z, TAO X P, et al. Effect of irrigation and nitrogen application regimes on senescent characters of roots and leaves in cotton with under-mulch-drip irrigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(10): 2142−2150

[24] ZHOU Y P, BASTIDA F, ZHOU B, et al. Soil fertility and crop production are fostered by micro-nano bubble irrigation with associated changes in soil bacterial community[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 141: 107663

[25] FLORES FERNÁNDEZ J L, HARTMANN P, SCHÄFFER J, et al. Initial recovery of compacted soil — Planting and technical treatments decrease CO_2 concentrations in soil and promote root growth[J]. Annals of Forest Science, 2017, 74(4): 1−12

[26] DE MORAES M T, DEBIASI H, FRANCHINI J C, et al. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 200: 104611

[27] 雷宏军, 胡世国, 潘红卫, 等. 土壤通气性与加氧灌溉研究进展[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 297−308
LEI H J, HU S G, PAN H W, et al. Advancement in research on soil aeration and oxygation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(2): 297−308

[28] BEN-NOAH I, NITSAN I, COHEN B, et al. Soil aeration using air injection in a citrus orchard with shallow groundwater[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106664

[29] NOBEL P S, PALTA J A. Soil O_2 and CO_2 effects on root respiration of cacti[J]. Plant and Soil, 1989, 120(2): 263−271

[30] ZHANG X Y, MA X, SONG H M. Quality degradation of alfalfa caused by CO_2 leakage from carbon capture and storage[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 246:

114147

[31] KADER M A, SENGE M, MOJID M A, et al. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 168: 155−166

[32] WANG Y Y, HU C S, MING H, et al. Concentration profiles of CH_4, CO_2 and N_2O in soils of a wheat-maize rotation ecosystem in North China Plain, measured weekly over a whole year[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 164: 260−272

[33] OOSTEROM E J, JAYACHANDRAN R, BIDINGER F R. Diallel analysis of the stay-green trait and its components in sorghum[J]. Crop Science, 1996, 36(3): 549−555

[34] 刘开昌, 董树亭, 赵海军, 等. 我国玉米自交系叶片保绿性及其与产量的关系[J]. 作物学报, 2009, 35(9): 1662−1671
LIU K C, DONG S T, ZHAO H J, et al. Leaf stay-green traits in Chinese maize inbred lines and their relationship with grain yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(9): 1662−1671

[35] QIN W, HU C S, OENEMA O. Soil mulching significantly enhances yields and water and nitrogen use efficiencies of maize and wheat: a meta-analysis[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 16210

[36] ZHOU L F, ZHAO W Z, HE J Q, et al. Simulating soil surface temperature under plastic film mulching during seedling emergence of spring maize with the RZ-SHAW and DNDC models[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104517

[37] 张彦群, 王建东, 龚时宏, 等. 基于液流计估测蒸腾分析覆膜滴灌玉米节水增产机理[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 89−97
ZHANG Y Q, WANG J D, GONG S H, et al. Analysis of water saving and yield increasing mechanism in maize field with drip irrigation under film mulching based on transpiration estimated by sap flow meter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 89−97

[38] WANG P, DENG Y J, LI X Y, et al. Dynamical effects of plastic mulch on evapotranspiration partitioning in a mulched agriculture ecosystem: measurement with numerical modeling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 268: 98−108

[39] LIN W, LIU W Z, ZHOU S S, et al. Influence of plastic film mulch on maize water use efficiency in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 224: 105710

[40] YU Y Y, TURNER N C, GONG Y H, et al. Benefits and limitations to straw- and plastic-film mulch on maize yield and water use efficiency: A meta-analysis across hydrothermal gradients[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 99: 138−147

[41] LI F M, GUO A H, WEI H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat[J]. Field Crops Research, 1999, 63(1): 79−86

[42] ZHOU L F, FENG H. Plastic film mulching stimulates brace root emergence and soil nutrient absorption of maize in an arid environment[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(2): 540−550

[43] NAN W G, YUE S C, HUANG H Z, et al. Effects of plastic film mulching on soil greenhouse gases (CO_2, CH_4 and N_2O) concentration within soil profiles in maize fields on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(2): 451−464

[44] GAERTIG T, SCHACK-KIRCHNER H, HILDEBRAND E E, et al. The impact of soil aeration on oak decline in southwestern Germany[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 159(1/2): 15−25

[45] 张守都, 栗岩峰, 李久生. 滴灌条件下揭膜时间对土壤酶活性及玉米吸氮量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(5): 454−460
ZHANG S D, LI Y F, LI J S. Effects of film-uncovering time on soil enzyme activity and maize nitrogen uptake under drip irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(5): 454−460