

# 化肥与有机肥结合对旱地覆膜春小麦产量形成和土壤碱解氮累积影响

尹嘉德<sup>1,2</sup>, 侯慧芝<sup>1,2</sup>, 张绪成<sup>1,2</sup>, 于显枫<sup>1,2</sup>,  
王红丽<sup>1,2</sup>, 方彦杰<sup>1,2</sup>, 张国平<sup>1,2</sup>, 雷康宁<sup>1,2</sup>, 马一凡<sup>1,2</sup>

(1.甘肃省农业科学院旱地农业研究所,兰州 730070; 2.甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室,兰州 730070)

**摘要:** 针对黄土高原半干旱地区瘠薄的土壤、较低的氮肥固持率和传统的一次性基施化肥制度造成覆膜小麦生育期内土壤氮供需不平衡,引起早衰和水分生产潜力限制的问题。于 2016—2017 年,在陇中雨养农业地区进行大田试验,化学肥料氮磷钾肥按照传统施肥量相同基施的情况下,布置全膜覆土(PMS)、全膜覆土+高量有机肥(PMO)、裸地(CK)处理,研究不同处理对小麦干物质积累特征、土壤碱解氮变化和产量形成的影响。结果表明:干物质积累特征方面,PMO 较 PMS 全生育期干物质积累量平均提高 11.93%,进一步提高拔节—抽穗和灌浆—成熟阶段干物质质量累积速率,干物质积累量最大增长速率及生育期平均增长速率分别提高 11.53%和 11.42%,快速生长期无显著延长;PMO 较 PMS 和 CK 处理 0—30 cm 土层土壤有机质(SOM)含量分别平均提高 42.79%和 43.73%,0—50 cm 土层土壤碱解氮(SAN)含量分别平均提高 110.67%和 42.80%;PMO 较 PMS 播前至收后 0—50 cm 土层 SAN 累积量降低幅度减少 111.15%和增加 SAN 下移趋势;与 PMS 相比,PMO 进一步优化产量构成,显著提高春小麦籽粒产量和生物产量,但显著降低氮素偏生产力 and 增加收后土壤 SAN 累积量。因此,化肥和高量有机肥基施可提高半干旱区覆膜小麦干物质累积速率和耕层土壤碱解氮含量,降低扬花后低氮素限制,促进增产,但增加土壤氮素残留量,可以通过合理减施措施加以调控。

**关键词:** 地膜覆盖; 化肥基施; 有机肥; 干物质积累; 土壤氮素

**中图分类号:** S512.1<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2021)02-0279-09

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.02.037

## Effects of the Combination of Chemical and Organic Fertilizer on Spring Wheat Grain Yield Formation and Soil Available Nitrogen Accumulation Under Plastic Mulched Rain-fed Area

YIN Jiade<sup>1,2</sup>, HOU Huizhi<sup>1,2</sup>, ZHANG Xucheng<sup>1,2</sup>, YU Xianfeng<sup>1,2</sup>, WANG Hongli<sup>1,2</sup>,  
FANG Yanjie<sup>1,2</sup>, ZHANG Guoping<sup>1,2</sup>, LEI Kangning<sup>1,2</sup>, MA Yifan<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Dry-land Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070;

2. Gansu Province Key Laboratory of High Water Utilization on Dryland, Lanzhou 730070)

**Abstract:** The poor soil fertility, lower nitrogen fertilizer retention and total fertilizer application before sowing, are the key factors which result in the nitrogen imbalance between soil supplying and crop requirement, causing the wheat presenility and the limited soil water productivity potential on the semiarid rain-fed loess plateau. A field experiment was conducted in 2016 and 2017 on the rain-fed central Gansu province, to understand the effects of different treatments on the wheat dry matter accumulation, soil available nitrogen changing dynamics and yield formation. The three treatments were: (1) Whole field mulched by soil-plastic (PMS), (2) PMS with organic fertilizer application, and (3) without soil-plastic mulching and organic fertilizer application (CK), the chemical nitrogen (N), potassium (P) and phosphate (K) were applied before sowing totally in all treatments and with same amount. The results showed that the dry matter of PMO averagely increased by 11.93% in the whole growth period, further increased the dry matter accumulation rate in jointing-heading and filling-harvesting stages, as compared with PMS. Correspondingly, the max growth rate and average growth rate of dry matter increased by 11.53% and 11.42%, but the rapid growth stage did

收稿日期: 2020-09-04

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200403); 国家自然科学基金项目(31560355); 甘肃省农业科学院农业科技创新专项(2020GAAS32)

第一作者: 尹嘉德(1992—), 男, 甘肃酒泉人, 主要从事旱地资源高效利用研究。E-mail: yinjiade@qq.com

通信作者: 张绪成(1973—), 男, 甘肃民勤人, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: gszhangxuch@163.com

not significantly differ between PMO and PMS. The soil organic matter (SOM) content in 0—30 cm profile of PMO increased by 42.79% and 43.73% compared with PMS and CK, respectively. The soil available nitrogen (SAN) content in 0—50 cm profile correspondingly increased by 110.67% and 42.80%. The decrease extent of soil nitrogen accumulation in 0—50 cm profile from sowing to harvesting stage of PMO decreased by 111.15% but increased the SAN down-transporting, as compared with PMS. Compared with PMS, PMO optimized the grain yield component factors, significantly increased grain yield and biomass. However, it decreased the nitrogen fertilizer partial productivity and increased the SAN accumulation at harvesting stage. Consequently, the chemical fertilizer with organic fertilizer increased wheat biomass, dry matter accumulation rate and relieved nitrogen limitation in post-flowering stage, resulting in the higher grain yield. However, the SAN accumulation risk also occurred, which should be regulated by decreasing fertilizer application amount.

**Keywords:** plastic mulching; fertilizers as basal; organic fertilizer; dry matter accumulation characteristics; soil nitrogen

小麦作为黄土高原地区主要粮食作物之一,充分挖掘作物水分生产潜力,提高单位面积产量是未来粮食生产的必由之路<sup>[1-2]</sup>。陇中地区较为贫瘠的黄绵土养分承载能力弱,对养分固持效率低,加之降雨时空与小麦关键生育期经常错位,使喜氮作物旱地覆膜小麦在基施肥种植的情况下,极易发生无机氮淋失、生育期氮素供需不平衡矛盾和脱肥现象,导致水分生产潜力不能稳而有效地发挥<sup>[3-5]</sup>。有研究<sup>[4-8]</sup>表明,半干旱雨养农业地区,地膜覆盖小麦、玉米等喜氮粮食作物,由于覆膜增强水热效应,土壤养分活化,易造成土壤氮硝化、反硝化、淋失和下渗,随着生育期推进,土壤有效氮可利用性降低;或在拔节期和小麦花后追施氮肥,但旱区土壤墒情不稳和施肥困难,作物吸收氮素困难,使作物需肥与土壤供肥关系协调困难<sup>[9-10]</sup>,成本增加。作物生育后期缺氮使叶片光合受阻和功能期缩短,不利于籽粒灌浆<sup>[11-12]</sup>。土壤无机氮动态变化与覆膜小麦干物质质量和产量形成密切相关<sup>[8-10]</sup>,小麦不同生育期作物干物质积累特征与籽粒产量形成密切相关<sup>[13]</sup>。旱区作物改善施肥制度要求一方面要提供小麦生育前期生长的氮素基础需求,促进营养生长和形态器官的建成;另一方面要缓解中后期氮素吸收受抑现象,Austin<sup>[14]</sup>从氮素经济学角度认为,小麦增产途径之一是增加小麦开花后的氮吸收量,而增施有机肥可提高土壤持续供氮能力<sup>[15-16]</sup>,是缓解旱区作物氮素供需不平衡有效措施之一。

旱地农田地膜覆盖可改善土壤水热生境,较裸地处理干物质积累量和产量平均提升 20% 以上,但氮素矿化速率加快,随着生育期推进使土壤氮素有效性降低<sup>[5-8]</sup>;同时,地膜覆盖前期土壤氮快速矿化而下渗,导致 70—100 cm 土层以下硝态氮残留量增加<sup>[4,17]</sup>,这对于集中在 0—50 cm 土层 90% 以上的小麦根系利用受限。有机肥、秸秆等外源碳材料的输入可以补充土壤碳库,有利于提高土壤无机氮固持能力,降低作物生长初期间氮素过早损耗风险<sup>[18-20]</sup>。崔

红艳等<sup>[21]</sup>通过增施有机肥可提高黄土高原半干旱地区胡麻干物质积累量和产量;Wei 等<sup>[22]</sup>在小麦、玉米种植将有机无机肥配施比单施有机肥处理和单施化肥处理平均提高 29% 和 8%。基于 23 年定位试验研究<sup>[23]</sup>表明,增施有机肥比单施化肥显著提高表层土壤有机碳、氮磷钾等组分含量,但有机肥及秸秆还田在不同的生态区域中也将造成氮素的淋失风险<sup>[24-26]</sup>。面对黄绵土极为贫瘠的土壤,较高碳氮比秸秆分解时增加作物对土壤氮素竞争<sup>[27]</sup>,短期内对作物生长产生负面影响,因而选择传统基施化肥用量的基础上配施高量有机肥。通过研究覆膜下化肥和有机肥基施对春小麦地上部干物质质量积累特征及产量构成要素和地下部土壤有机质含量、碱解氮变化的调控,探究其对旱区覆膜小麦水分生产潜力提升和土壤碱解氮积累的影响,明确半干旱区覆膜小麦有机肥替代部分化肥和化肥减施保产增产可行性,以期为优化该区覆膜作物养分管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

于 2016 年和 2017 年的 3—7 月在甘肃省定西市安定区团结镇甘肃省农业科学院定西试验站(104°36'E, 35°35'N)进行试验。试验区地处中温带半干旱气候区,为典型的旱作区。海拔 1 970 m,年平均气温 6.2 °C,年辐射总量 5 898 MJ/m<sup>2</sup>,年日照时间 2 500 h,≥10 °C 积温 2 075.1 °C,无霜期占约全年 1/3,年均降水量 415 mm,6—9 月降水量占年降水量近 70%,降水相对变率为 24%,400 mm 降水保证率接近 50%。2016 年小麦全生育期内降水 182.1 mm,集中在 5 月,苗期和成熟期降雨少;2017 年小麦全生育期内降雨 142.6 mm,降雨集中在 5 月底至 6 月中旬,灌浆期和成熟期降雨较少。试验小区土壤为黄绵土,0—30 cm 耕层土壤平均容重为 1.25 g/cm<sup>3</sup>,田间持水量为 21.18%,凋萎系数为 7.2%,pH 8.4,土壤养分基本状况为有机质 11.99 g/kg,全氮 1.2

g/kg,全磷 0.7 g/kg,全钾 17.3 g/kg,碱解氮 5.6 mg/kg,速效磷 8.7 mg/kg,速效钾 121.5 mg/kg。

## 1.2 试验设计

以甘肃省农业科学院育成的春小麦品种“陇春27”为试验材料,该品种在甘肃陇中地区具有较高的推广面积。试验采用单因素完全随机法,覆膜处理采用全膜覆土穴播方式(技术核心为:在农田种植区域,地膜全部覆盖并且膜上完全平铺 1~2 cm 细土,其不仅具有地膜覆盖技术的优点,并且有效地解决春小麦苗穴错位问题,使出苗率和公顷穗数提高;有效地抑制杂草,降低无效耗水;显著调节土壤温度,降低春小麦生长后期受到地膜光辐射的高温胁迫伤害<sup>[5]</sup>),布置全膜覆土平作穴播(PMS)、全膜覆土平作穴播+有机肥(PMO)、裸地平作穴播(CK)处理,每处理 3 次重复。小区面积 6 m×10 m,行距 20 cm,穴距 12.5 cm,每穴 8~10 株,密度 450 万株/hm<sup>2</sup>。经走访调查当地农户地膜覆盖小麦施肥习惯,确定本试验施肥水平为:尿素(含 N 46%)150 kg/hm<sup>2</sup>,过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%~16%)75 kg/hm<sup>2</sup>,氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%)45 kg/hm<sup>2</sup>。根据当地土壤养分状况和小麦潜在产量,有机肥施量估算为 30 000 kg/hm<sup>2</sup>(风干发酵腐熟完全的羊粪含全氮 0.5%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.35%,K<sub>2</sub>O 0.4%),参照相关文献对比,本试验有机肥施量在半干旱地区属于高量水平。施肥及整地方式:在播前肥料全部作为底肥施入,人工将有机肥和化肥均匀洒在规定小区地表,用旋耕机翻入,翻耕深度约 10~15 cm,之后不再追肥;休闲期不揭膜,地膜平铺于整个地面,在膜上覆土 1~2 cm。

本试验在甘肃中部半干旱雨养农业区进行,试验区土壤密度低,土壤水分条件差,2016 年较 2017 年前期早情严重,播种期至苗期墒情差,导致播种密度、出苗率和最后查苗公顷穗数不匹配,较 2017 年各处理穗数减少 50 万穗/hm<sup>2</sup> 左右。除人工修整小区和除草外不采取其他田间管理措施。

## 1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质取样与测定 春小麦播种后 30 天的苗期开始取样,每隔 15~20 天取 1 次样,每小区内随机取样 20 株,根系部分去掉,共 3 个重复;在烘箱中于 105 °C 下杀青 30 min,之后在 70 °C 下烘干至恒重。分别利用 Logistic 生长模型<sup>[28]</sup>,以时间为变量,对相关参数进行拟合,计算快速生长期相关特征值,方程式为:

$$Y = \frac{k_m}{1 + a e^{bt}} \quad (1)$$

式中:Y 为春小麦某一时间点个体干物质质量实测值(g);K<sub>m</sub> 为春小麦个体干物质质量的理论最大值(g);t

为播种后天数(d);a、b 为方程特定拟合参数。

将 Logistic 方程分别进行一阶、二阶求导,得到春小麦个体干物质质量快速生长期盛期起始时间 T<sub>1</sub>(d)、快速生长盛期终止时间 T<sub>2</sub>(d)和最大累积速率 V<sub>max</sub>(g/d)。

$$T_1 = \frac{1}{b} \times \ln \frac{a}{2 + \sqrt{3}} \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{1}{b} \times \ln \frac{a}{2 - \sqrt{3}} \quad (3)$$

$$V_{\max} = \frac{k_m \times b}{4} \quad (4)$$

1.3.2 土壤养分取样与测定 在取样时间用土钻垂直打孔取土,分别取 0—10,10—20,20—30,30—50 cm 土层土样,每个小区取 3 个点混匀装入自封袋,取 3 个重复,之后置于室内晾干、磨细、过筛、测定。采用重铬酸钾法测定土壤有机质;采用碱解扩散法测定土壤速效氮。

## 1.3.3 土壤碱解氮累积量(SAN Accumulation, SAN<sub>A</sub>)

SAN<sub>A</sub>(kg/hm<sup>2</sup>)=单位土壤面积(hm<sup>2</sup>)×土层厚度(cm)×土壤容重(g/cm<sup>3</sup>)×土壤碱解氮含量(g/kg)/10

1.3.4 作物产量 各小区单打单收,进行人工脱粒,籽粒晒干后统计产量,并换算成公顷产量,为籽粒产量;各小区单打籽粒留下的秸秆、麦穗壳等地上部干物质质量加上籽粒产量,换算成公顷产量,为生物产量。

1.3.5 氮素投入偏生产力 (partial factor productivity of nitrogen, PFP<sub>N</sub>),指投入单位氮素所生产的生物产量。

PFP<sub>N</sub>(kg/kg)=施氮区生物产量(kg/hm<sup>2</sup>)/施氮量(kg/hm<sup>2</sup>)

## 1.4 数据处理与分析

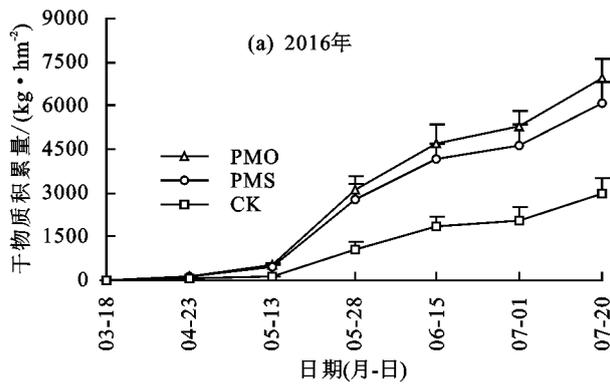
使用 SPSS 22.0 软件进行方差分析,采取 LSD 法在 P<0.05 和 P<0.01 水平进行显著性检验,利用 Microsoft Excel 2016 进行回归分析和 Logistic 方程求导并制图。

# 2 结果与分析

## 2.1 覆膜下化肥和有机肥基施对春小麦干物质积累特征的影响

2.1.1 不同处理春小麦干物质积累量动态 从图 1 可以看出,2016 年和 2017 年春小麦干物质积累量覆膜处理 PMO 和 PMS 较裸地处理 CK 在 30 天以后苗期至分蘖期间开始出现差异,且差异逐渐显著;PMO 与 PMS 处理在 60 天以后拔节期逐渐出现明显差异;各处理差异在收获期达到最大。PMO 春小麦全生育期干物质积累量在 2016 年较 PMS 和 CK 分别平均增加 13.48% 和 155.25%;在 2017 年较 PMS 和 CK 分别平均增加 10.38% 和 238.21%,均差

异显著( $P < 0.05$ )。综合来看,覆膜下化肥配施高量



有机肥对干物质积累量有显著促进效应。

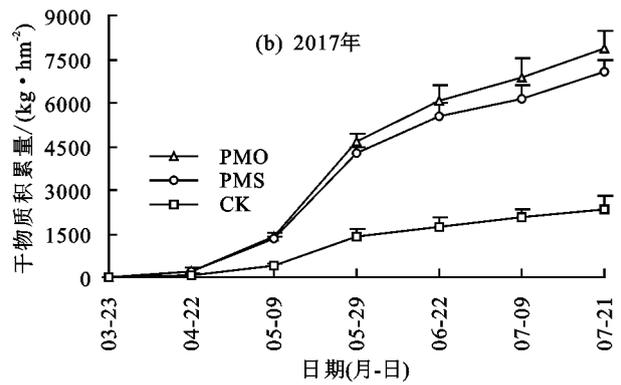


图 1 不同处理春小麦干物质积累量动态

2.1.2 不同处理春小麦干物质积累速率 从图 2 可以看出,2016 年和 2017 年春小麦干物质质量积累在不同时段的积累速率基本一致,均为  $PMO > PMS > CK$ ,出现 2 个高峰期,分别在小麦的拔节—抽穗阶段和灌浆—成熟阶段,前一阶段植株营养生长期干物质质量积累速率高于后一阶段生殖生长期;覆膜处理干物

质量积累速率显著高于裸地处理。PMO 春小麦干物质质量积累速率较 PMS 在 60 天后出现差异,说明 PMO 进一步提高拔节期至抽穗期植株营养生长速率和生育后期灌浆速率,增强库源强度,2 年干物质积累速率变化基本相似,出现的差异可能与取样时间点和降雨量有关。

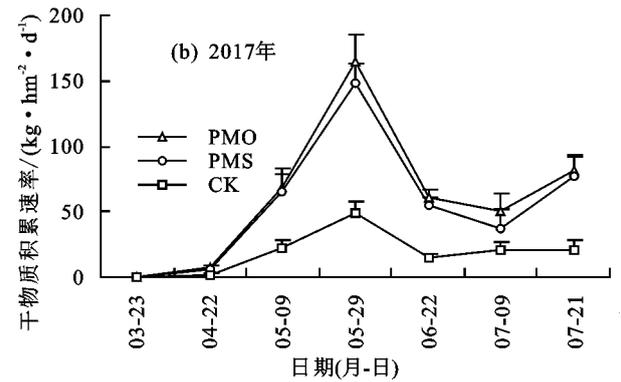
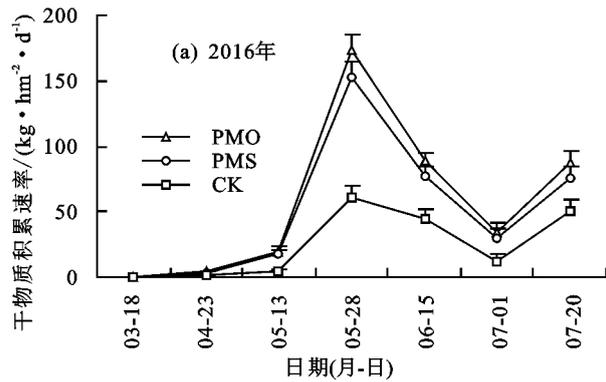


图 2 不同处理春小麦干物质积累速率动态

2.1.3 不同处理春小麦干物质质量动态累积特征 从表 1 可以看出,通过 Verhulst<sup>[28-29]</sup>提出的 Logistic 作物生长曲线逻辑模型,以时间( $t$ )为变量和春小麦干物质积累量( $Y$ )用 Logistic 方程积分形式  $Y = K / (1 + a e^{bt})$  加以描述,并可根据该方程求得其快速生长期相关特征值。获得回归方程经  $F(95\%)$  检验均达显著水平,决定系数  $R^2 > 0.95$ ,  $P < 0.01$ ,说明 Logistic 方程曲线较好地模拟春小麦干物质积累量相关特征值。2016 年,覆膜处理 PMO 和 PMS 最快速生长期较 CK 延长 1 天左右,PMO 较 PMS 最快速生长期延长 0.5 天,但处理间没有显著差异( $P > 0.05$ );2017 年,PMO 最快速生长期较 PMS 无明显差异( $P > 0.05$ ),覆膜处理 PMO 和 PMS 最快速生长期较 CK 延长 2 天左右,主要原因是覆膜处理较好的土壤墒情延长快速生长期。2016 年,PMO 干物质积累量最快速生长期增长速率较 PMS 和 CK 分别提高 10.83% 和 125.28%,生育期干物质积累量平均增长速率分别提高 11.74% 和 127.16%;2017 年,PMO 干物质积累量快速生长期增长速率较 PMS 和 CK 分别提高

12.22% 和 140.17%,生育期干物质积累量平均增长速率分别提高 11.09% 和 239.06%。

## 2.2 覆膜下化肥和有机肥基施对春小麦土壤有机质的影响

从图 3 可以看出,全膜覆土穴播条件下基施有机肥显著增加耕层土壤有机质含量。2016 年和 2017 年 PMO 处理 0—30 cm 土层土壤有机质含量较 PMS 和 CK 平均提高 42.79% 和 43.73%,其中,0—20 cm 土层土壤有机质含量差异表现显著( $P < 0.01$ ),且施有机肥年限对 0—20 cm 土层土壤有机质含量提升具有显著促进效应( $P < 0.05$ );各处理 30—50 cm 土层土壤有机质含量无差异且无明显变化;PMS 和 CK 之间 0—50 cm 土层土壤有机质含量无显著差异( $P < 0.05$ )。

## 2.3 覆膜下化肥和有机肥基施对春小麦土壤碱解氮的影响

2.3.1 不同处理春小麦土壤剖面碱解氮含量动态变化 从图 4 可以看出,不同处理麦田 0—50 cm 土层土壤碱解氮含量随生育期推进的变化规律。2016 年,除 CK 处理,春小麦全生育期土壤碱解氮含量基

本呈下降趋势, PMS 从 100 天开始下降程度低于 PMO; 0—10 cm 土层, PMO 土壤碱解氮含量较 PMS 和 CK 平均提高 118.89% 和 157.36%; 10—20 cm 土层, 较 PMS 和 CK 平均提高 117.09% 和 43.18%; 20—30 cm 土层, 较 PMS 平均提高 75.17%, 较 CK 降低; 30—50 cm 土层, 较 PMS 和 CK 平均提高 75.15% 和 10.89%; 0—50 cm 土层, 整体较 PMS 和 CK 平均提高 97.86% 和 36.21%。2017 年, 除 CK 处理, 春小麦生育期土壤碱解氮含量呈下降趋势, PMO 从 110 天开始土壤碱解氮含量呈增加趋势; 0—10 cm 土层, PMO 土壤碱解氮含量较 PMS 和 CK 平均提高 182.04% 和 178.02%; 10—20 cm 土层, 较 PMS 和 CK 平均提高 185.03% 和 56.69%; 20—30 cm 土层, 较 PMS 平均提高 74.16%, 与 CK 无明显差异; 30—

50 cm 土层, 较 PMS 和 CK 平均提高 74.16% 和 15.83%; 0—50 cm 土层, 整体较 PMS 和 CK 平均提高 123.74% 和 49.39%。综合 2 年试验结果看出, 随着时间和土层深度推进, PMS 土壤碱解氮含量较 CK 降低, 是由于 PMS 覆膜植株对氮素利用程度高于 CK; 在生育期前 90 天左右, PMS 0—10 cm 土层土壤碱解氮含量显著高于裸地 CK, 而 10—50 cm 土层土壤碱解氮含量低于 CK, 说明 PMS 降低碱解氮下渗趋势; PMO 碱解氮含量整体显著高于 PMS, 尤其在 90~110 天扬花期至灌浆期 PMS 较 PMO 下降速率变化缓慢, 且没有明显下移趋势, 说明 PMO 在此时期矿化速率较快, 土壤供氮潜力、作物氮吸收能力高于 PMS, 但收获期时, PMO 0—50 cm 土层较高的土壤碱解氮含量, 增加无机氮淋失风险。

表 1 不同处理春小麦个体干物质质量动态累积模型参数特征值

年份	处理	$K_m$	回归方程	$R^2$	$\Delta T/d$	$V_{max}/$ ( $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$V_{AVG}/$ ( $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )
2016	PMO	7.22	$Y=7224.33/(1+637.92e^{-0.077776t})$	0.964**	33.87a	0.140a	0.055a
	PMS	6.31	$Y=6319.45/(1+699.35e^{-0.079106t})$	0.964**	33.29a	0.125b	0.049b
	CK	3.15	$Y=3153.80/(1+1028.63e^{-0.078885t})$	0.962**	32.39a	0.062c	0.024c
2017	PMO	8.22	$Y=8219.47/(1+201.78e^{-0.068525t})$	0.976**	38.43a	0.141a	0.065a
	PMS	7.45	$Y=7442.71/(1+188.79e^{-0.067693t})$	0.972**	38.01a	0.125b	0.059b
	CK	2.43	$Y=2431.89/(1+246.81e^{-0.071661t})$	0.974**	36.75b	0.059c	0.019c

注:  $K_m$  为生物量的理论最大值;  $\Delta T$  为最快生长时间;  $V_{max}$  为快速生长期最大累积速率;  $V_{AVG}$  为平均增长速率。同列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。NS、\* 和 \*\* 分别表示无显著差异及在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。下同。

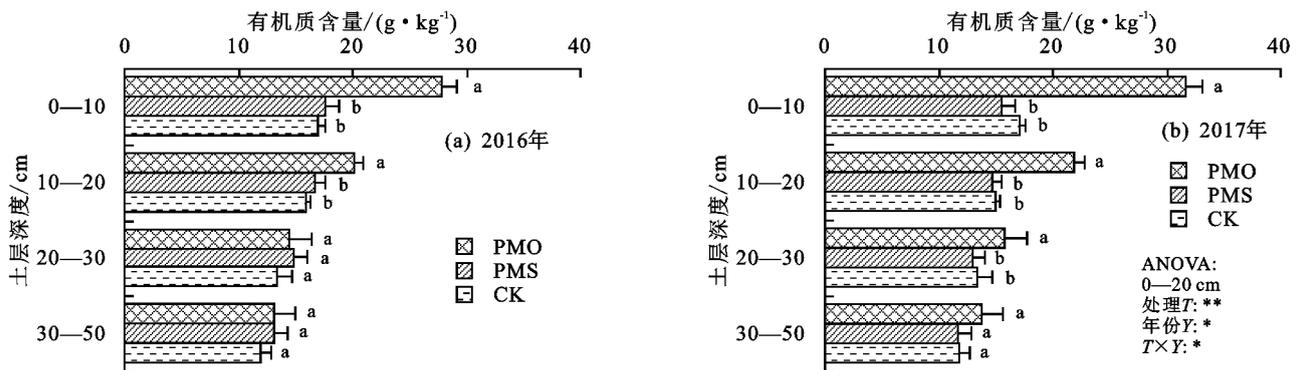


图 3 不同处理小麦土壤有机质含量

2.3.2 不同处理春小麦土壤生育期碱解氮累积量变化 由图 5 可知, 播前至收获后 0—50 cm 土层土壤碱解氮累积量降低。在 2016 年, PMS 较 PMO 和 CK 提高 64.27% 和 166.07%, PMO 较 CK 提高 61.98%, 处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 2017 年, PMS 较 PMO 和 CK 分别提高 160.03% 和 162.62% ( $P < 0.05$ )。综合 2 年试验结果, PMO 较 PMS 处理土壤碱解氮累积量降低, 是由于 PMO 配施高量有机肥在生育中后期满足在小麦生长需氮的同时, 保持较高的氮矿化速率, 收获后碱解氮累积量较高, 而 CK 变化量少的原因是由于其不覆膜处理, 水热效应降低, 氮素矿化速率低和作物氮吸收少。

## 2.4 覆膜下化肥和有机肥基施对春小麦产量构成的影响

从图 6 可以看出, 由于 2016 年前期较差的墒情, 受出苗率影响, 公顷穗数显著低于 2017 年, 但穗粒数和千粒重整体优于 2017 年。2016 年, PMO 公顷穗数、穗粒数和千粒重与 PMS 无显著差异, 与 CK 差异显著, 产量较 PMS 和 CK 显著提高; 2017 年, PMO 公顷穗数、穗粒数和产量较 PMS 和 CK 显著提高, 千粒重无显著差异 ( $P < 0.05$ )。综合 2 年试验结果, PMO 处理产量构成要素表现最好, 与 CK 相比, PMO 较 PMS 可进一步优化产量构成; PMO 公顷穗数、穗粒数、千粒重较 PMS 和 CK 分别平均提高

2.45%, 4.14%, 3.51% 和 13.17%, 93.15%, 29.80%。

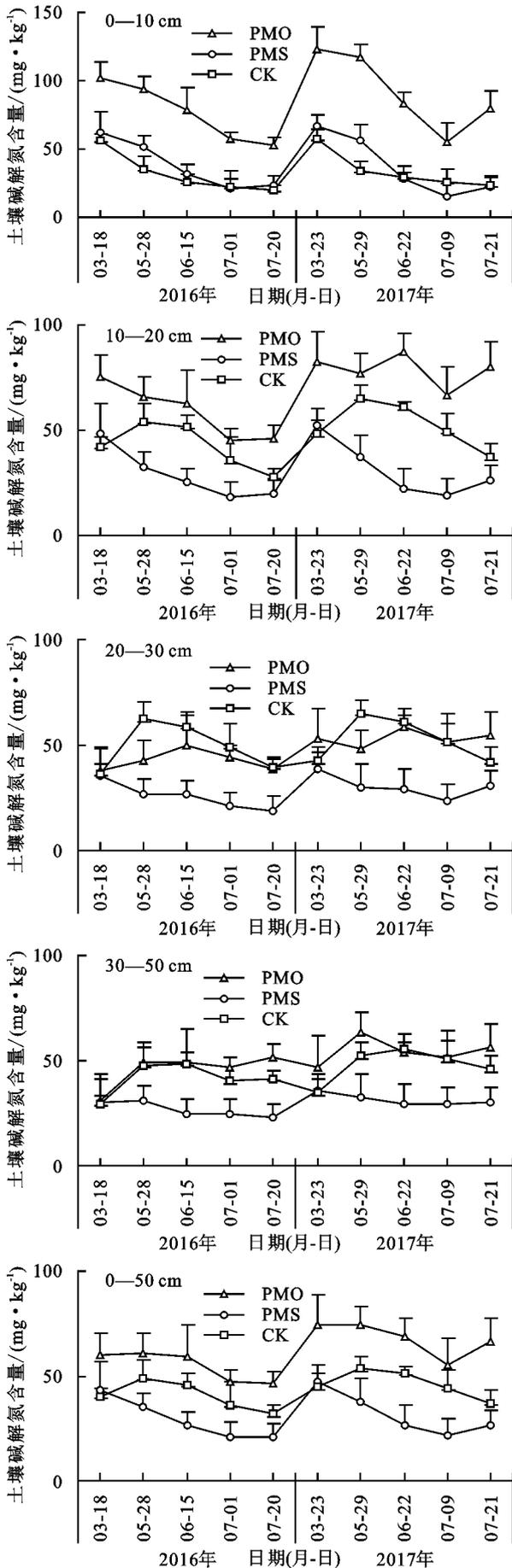


图 4 不同处理小麦 0—50 cm 土层土壤碱解氮含量

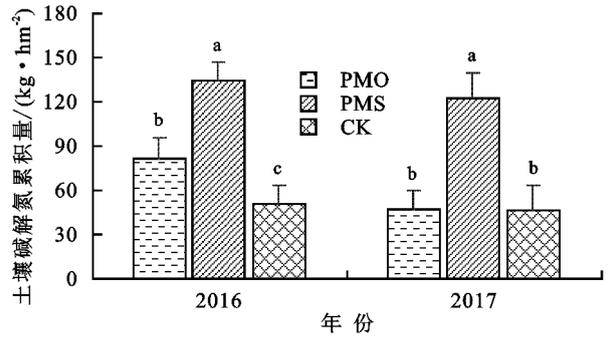


图 5 不同处理小麦 0—50 cm 土层土壤碱解氮累积量

## 2.5 覆膜下化肥和有机肥基施对春小麦产量和氮素偏生产力影响

氮的投入量指单位面积氮肥用量和有机肥(腐熟完全的干羊粪)中含全氮量的投入。从表 2 可以看出,各处理和年际投入均对籽粒产量、生物产量、氮素偏生产力和收后 0—50 cm 土壤碱解氮累积量具有显著影响,且交互效应差异显著( $P < 0.05$ );覆膜处理 PMO 和 PMS 的籽粒产量、生物产量和氮素偏生产力随年份略有上升,PMO 和 CK 收获后 0—50 cm 土壤碱解氮累积量随年份显著增加。综合 2 年试验结果,PMO 籽粒产量、生物产量较 PMS 和 CK 分别平均提高 9.11%, 53.74% 和 10.31%, 57.08%; PMS 和 CK 氮素偏生产力较 PMO 分别平均提高 82.92%, 58.17%。PMO 收获后 0—50 cm 土层土壤碱解氮累积量较 PMS 显著增加,说明其碱解氮含量显著盈余,裸地 CK 土壤碱解氮累积量高于 PMS,是由于其对氮素利用效率低。可以看出,PMO 氮素偏生产偏低,一方面是由于投入以全氮计算为主;另一方面是由于有机肥投入过量促使碱解氮盈余,并且覆膜下高量有机肥与化肥配施增加的碱解氮氮矿化溢出程度高于产量和生物量提升程度。今后试验可以通过化肥和有机肥减施合理配施手段在增产的基础上进行调控。

## 3 讨论

### 3.1 覆膜下化肥和有机肥基施与春小麦干物质积累特征的关系

在黄土高原半干旱地区,尤其陇中属于气候偏寒冷的旱作区,地膜覆盖极大地改善了土壤水热环境,促进作物干物质积累,成为增产的基础<sup>[5-7]</sup>。作物生长受到不同环境因子的影响,通过施肥、灌水及覆膜方式等农艺措施的优化可以改善干物质积累过程,起到增产效果<sup>[5,10-11,16,29]</sup>。增施高量氮肥可显著提高小麦干物质最大积累速率和平均积累速率,使干物质高峰期提前<sup>[30]</sup>;氮肥后移较传统施氮由于对氮素的补偿,可促进玉米花后干物质积累以及向籽粒中转运<sup>[31]</sup>。常规种植配施有机肥可延缓作物叶片衰老,灌浆时提高速率和延长期限<sup>[32]</sup>,促进中后期干物质

量积累<sup>[21,33]</sup>。本研究表明,PMO 较 PMS 全生育期干物质累积量平均提高 11.93%,干物质累积量最大增长速率、生育期平均增长速率分别提高 11.53% 和 11.42%;进一步提高拔节—抽穗和灌浆—成熟阶段干物质质量累积速率,但是最大速率增长天数没有显著变化,这一点与前人<sup>[10-11,32]</sup>研究不同,这可能是物候期与积温相关。对干物质积累特征的正向调控说明,

旱作区全膜覆土条件下基施化肥和高量有机肥,提高土壤有机质含量,提高土壤对氮肥固持能力,保证前期作物生长的同时补偿作物生育中后期氮的亏缺,降低该地区春小麦生育中后期氮素吸收限制的影响,提高叶绿素含量并延缓分解,改善光合特性,从而提高全生育期干物质积累速率、后期灌浆速率和干物质累积量,为增产奠定基础。

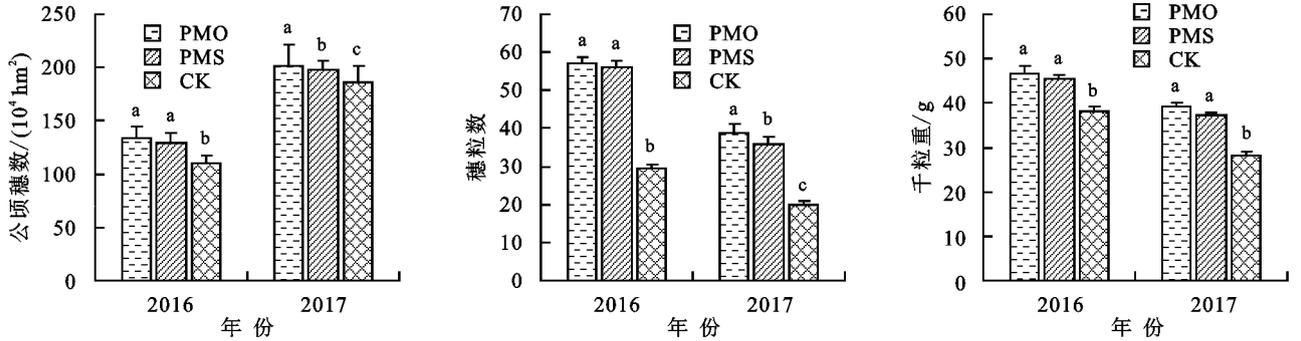


图 6 不同处理小麦产量构成

表 2 不同处理小麦产量和氮素偏生产力

年份	处理	投入氮量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	籽粒产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	生物产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	氮素偏生产力/ (kg·kg <sup>-1</sup> )	收后土壤碱解氮累积量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
2016	PMO	300	2875.67a	6251.46a	20.84c	278.06a
	PMS	150	2542.67b	5650.38b	37.67a	124.31c
	CK	150	1936.68c	4502.51c	30.02b	190.07b
2017	PMO	300	2924.52a	7498.77a	24.99c	398.37a
	PMS	150	2782.02b	6818.97b	45.46a	160.61c
	CK	150	1839.30c	4277.44c	28.52b	220.37b
显著性(P)						
处理(T)			**	***	**	**
年份(Y)			*	*	*	*
T×Y			*	*	*	*

当决定系数  $R^2 > 0.9$  时,干物质积累回归方程能够较高程度拟合不同处理方式作物干物质积累变化过程<sup>[28]</sup>。魏廷邦等<sup>[29]</sup>通过 Logistic 方程模拟灌溉区玉米干物质积累过程表明,干物质积累量变化与追施氮肥量和时机紧密相关。本试验发现,不同年份各处理干物质积累量变化方程存在显著差异,造成这种差异主要是由于增施有机肥增加氮的投入和覆膜对特定生育时期干物质积累量积累速率的影响不同,而且年际间降雨时空差异、覆膜和有机肥对不同年际间的水热、养分变化也同样影响春小麦的光合生理生态特性<sup>[5-6,20,32]</sup>,最终影响干物质的积累过程<sup>[34]</sup>。

### 3.2 覆膜下化肥和有机肥基施与春小麦土壤有机质和碱解氮动态变化的关系

有研究<sup>[16,18-23]</sup>表明,农田通过外援碳的输入,如发酵腐熟的牲畜粪便、作物秸秆和废料残渣等有机物料,可以增加碳氮库容,提升对土壤碳氮养分的固持,

增强土壤肥力,延长肥效;同时,施有机肥将带来氮素的损失风险,有机肥的施用增加反硝化过程中气态氮损失,增强异养微生物与氨氧化菌对铵态氮的竞争力等途径<sup>[24-26]</sup>。张丽娟等<sup>[35]</sup>研究发现,有机肥在短期内可以减少硝态氮淋溶损失;Sugihara 等<sup>[16]</sup>通过有机肥与化肥合理配施,使前期固持的氮素在作物生长中后期发生释放,促进土壤供氮与作物需氮时机相一致,但增施有机肥过量,导致氮素残留,通过淋失和反硝化损失<sup>[26]</sup>。粮食作物对 75 cm 以下土壤氮较难被利用<sup>[35]</sup>,小麦的 90% 以上根系主要集中在 0—50 cm,所以,0—50 cm 土壤无机氮动态变化将显著影响小麦对氮利用效率和生长速率。

单纯覆膜处理 PMS,由于优化土壤水热环境,进一步使土壤氮矿化加快和作物生长前期生长加快,因此,在生育期前 90 天扬花期左右,0—10 cm 土层土壤碱解氮含量显著高于裸地 CK,10—50 cm 土层土

壤碱解氮含量下移趋势显著低于 CK; 并且 PMS 播前至收后碱解氮累积量较 PMO 和 CK 下降幅度高, 说明 PMS 处理可以降低土壤无机氮积累量和淋溶下移趋势, 减少土壤氮残留量<sup>[7-8]</sup>, 但可能造成脱氮风险<sup>[4,8]</sup>。PMO 处理全生育期 0—20 cm 土层土壤有机质含量和 0—50 cm 土层土壤碱解氮含量显著高于 PMS 和 CK, 尤其在 90 天以后碱解氮含量下降程度低于 PMS, 且播前至收后碱解氮累积量减少程度低于 PMS, 说明 PMO 处理较 PMS 提高碱解氮矿化速率和氮素持续高供应能力, 可降低生于扬花期后土壤氮素限制, 但收后碱解氮较高的累积量和土壤较弱的养分承载能力, 极大增加氮素损失风险<sup>[24-26]</sup>。

### 3.3 覆膜下化肥和有机肥基施与春小麦增产的关系

Zhang 等<sup>[36]</sup>通过整合分析中国 143 篇发表文献表明, 牲畜粪肥配施化肥后, 旱地作物产量提高 6.6%, 有机肥全部替代化肥使产量降低 9.6%。研究<sup>[16,18-23]</sup>认为, 施有机肥一方面提升土壤养分、微量元素和微生物活性, 提高养分有效性; 另一方面, 能够增强养分固持程度, 使养分不至于过快矿化和流失, 促进作物需氮和土壤供氮相一致, 从而增加作物产量; 也有研究<sup>[37]</sup>表明, 生物炭添加可刺激作物根系的伸长, 而单加氮肥却没有影响, 即外援碳输入和氮肥配施可以加速根系与微生物的相互作用, 克服养分限制并维持作物生产力, 实现可持续生产; Austin<sup>[15]</sup>研究表明, 增加小麦开花后的氮吸收量, 是小麦增产的有效途径。本研究中, PMO 和 PMS 处理由于覆膜较裸地 CK 的产量构成要素显著提高, PMO 较 PMS 进一步促进公顷穗数、穗粒数和千粒重增加; 穗粒数和籽粒粒重形成与开花期后土壤有效氮供应状况紧密相关, 90~110 天左右扬花期至灌浆期春小麦需氮关键期, 这期间 PMO 土壤碱解氮含量高于 PMS 且下降速率较高, 而 PMS 这一时期土壤碱解氮含量下降缓慢, 反映出 PMO 与 PMS 处理间土壤氮素供应、小麦根系对氮素吸收能力差异, 因而, PMO 处理降低该区传统的一次性基施肥覆膜小麦生长后期氮素吸收受限程度, 使覆膜春小麦穗粒数和籽粒重进一步增加, 水分生产潜力进一步挖掘, 是 PMO 处理小麦籽粒产量和生物产量显著提升原因之一。其次, 根据碱解氮累积量和下移趋势来看, 有机肥投入与产量提升不匹配, 说明在黄土高原半干旱区配施有机肥可以提高旱地覆膜春小麦产量, 但对土壤氮素固持能力较弱, 需要调控有机肥用量, 做到提升产量和土壤肥力的同时, 降低氮素损失风险。

## 4 结论

(1) PMO 处理可以显著提高旱地覆膜春小麦干

物质累积量、最快累积速率和平均累积速率, 提高 0—30 cm 土层土壤有机质含量和全生育期 0—50 cm 土层土壤碱解氮含量;

(2) PMO 处理能够降低旱地覆膜春小麦扬花期后氮素限制, 优化产量构成, 进而提高籽粒产量, 但是产量提升程度与高有机肥投入量不匹配, 降低了氮素偏生产力, 增加氮素残留量。

因此, 在黄土高原陇中贫瘠的半干旱地区, 通过化肥和有机肥结合是有限的降雨条件下提高传统的一次性基施肥制度覆膜春小麦水分生产潜力的有效途径, 但是今后试验中应基于当地土壤养分承载能力, 通过合理地化肥减施及有机肥配施或可以隔季增施有机肥进行有效地调控, 提高有机碳输入和土壤氮素固持能力, 改善土壤生境, 克服作物生长养分限制和降低氮损失, 使产量产出和氮素投入相匹配。

### 参考文献:

- [1] 杨艳昭, 封志明, 林耀明. 甘肃省小麦水分平衡及其时空分布模式[J]. 地理研究, 2005, 24(6): 853-859.
- [2] 米国华, 张福锁, 王震宇. 小麦超高产生理基础探讨: 小麦后期碳氮代谢交互与粒重形成[J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(5): 73-78.
- [3] 肖国举, 王静. 黄土高原集水农业研究进展[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 1003-1011.
- [4] 李世清, 李凤民, 宋秋华, 等. 半干旱地区不同地膜覆盖时期对土壤氮素有效性的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1519-1526.
- [5] 侯慧芝, 吕军峰, 郭天文, 等. 旱地全膜覆土穴播对春小麦耗水、产量和土壤水分平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(22): 4392-4404.
- [6] 王俊, 李凤民, 宋秋华, 等. 地膜覆盖对土壤水温和春小麦产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 205-210.
- [7] 李强, 王朝辉, 戴健, 等. 氮肥调控与地表覆盖对旱地冬小麦氮素吸收及残留淋失的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1380-1389.
- [8] 李廷亮, 谢英荷, 高志强, 等. 黄土高原旱地小麦覆膜增产与氮肥增效分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2735-2746.
- [9] 陈年来, 孙小妹, 张玉鑫, 等. 土壤水分和氮素水平对春小麦水分与氮素利用效率的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 74-81.
- [10] 江文文, 尹燕桦, 王振林, 等. 花后高温胁迫下氮肥追施后移对小麦产量及旗叶生理特性的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(5): 942-949.
- [11] 李强, 马晓君, 程秋博, 等. 氮肥对不同耐低氮性玉米品种花后物质生产及叶片功能特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1): 17-26.

- [12] 赵长星,鲁成凯,王信宏,等.不同产量水平下花生功能叶片氮素代谢特征的研究[J].中国生态农业学报,2013,21(5):561-565.
- [13] 赵姣,郑志芳,方艳茹,等.基于动态模拟模型分析冬小麦干物质积累特征对产量的影响[J].作物学报,2013,39(2):300-308.
- [14] Austin R B. Crop characteristics and the potential yield of wheat[J].The Journal of Agricultural Science,1982,98(2):447-453.
- [15] 谢驾阳,王朝辉,李生秀,等.地表覆盖对西北旱地土壤有机氮累积及矿化的影响[J].中国农业科学,2010,43(3):507-513.
- [16] Sugihara S, Funakawa S, Kilasara M, et al. Dynamics of microbial biomass nitrogen in relation to plant nitrogen uptake during the crop growth period in a dry tropical cropland in Tanzania[J].Soil Science and Plant Nutrition,2010,56(1):105-114.
- [17] Liu J L, Zhan A, Chen H, et al. Response of nitrogen use efficiency and soil nitrate dynamics to soil mulching in dryland maize (*Zea mays* L.) fields[J].Nutrient Cycling in Agroecosystems,2015,101(2):271-283.
- [18] Zhao S C, Li K J, Zhou W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China[J].Agriculture Ecosystems and Environment,2016,21(6):82-88.
- [19] Liu Z J, Rong Q L, Zhou W, et al. Effects of inorganic and organic amendment on soil chemical properties, enzyme activities, microbial community and soil quality in yellow clayey soil[J].PLoS One,2017,12:1-20.
- [20] 高飞,贾志宽,韩清芳,等.有机肥对宁夏南部旱农区土壤物理性状及水分的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(7):105-110.
- [21] 崔红艳,许维成,孙毓民,等.有机肥对胡麻产量和品质的影响[J].核农学报,2014,28(3):518-525.
- [22] Wei W L, Yan Y, Cao J, et al. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: An integrated analysis of long-term experiments[J].Agriculture Ecosystems and Environment,2016,225:86-92.
- [23] 张水清,黄绍敏,李慧,等.华北潮土区长期有机培肥下土壤有机碳和养分状况的动态变化[J].核农学报,2014,28(12):2247-2253.
- [24] Kramer S B, Reganold J P, Glover J D, et al. Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2006,103(12):4522-4527.
- [25] Wang J, Zhu B, Zhang J B, et al. Mechanisms of soil N dynamics following long-term application of organic fertilizers to subtropical rain-fed purple soil[J].Soil Biology and Biochemistry,2015,91(39):222-231.
- [26] 蒋美佳,刘晓林,冯钰梅,等.有机肥配施保水剂对紫色土水分入渗及氮素淋溶的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):99-104.
- [27] 凌宁,荀卫兵,沈其荣.根际沉积碳与秸秆碳共存下作物与微生物氮素竞争机制及其调控[J].南京农业大学学报,2018,41(4):589-597.
- [28] 莫惠栋. Logistic 方程及其应用[J].江苏农学院学报,1983,4(2):53-57.
- [29] 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.
- [30] 李国强,汤亮,张文字,等.不同株型小麦干物质积累与分配对氮肥响应的动态分析[J].作物学报,2009,35(12):2258-2265.
- [31] 文熙宸,王小春,邓小燕,等.玉米—大豆套作模式下氮肥运筹对玉米产量及干物质积累与转运的影响[J].作物学报,2015,41(3):448-457.
- [32] 任伟,赵鑫,黄收兵,等.不同密度下增施有机肥对夏玉米物质生产及产量构成的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(10):1146-1155.
- [33] Morihiro M, Zhao B Z, Yasuo O, et al. Nitrate leaching in an Andisol treated with different types of fertilizers[J].Environmental Pollution,2003,121(3):477-487.
- [34] 张黛静,陈倩青,宗洁静,等.增施有机肥对冬小麦同化物积累与分配的影响[J].应用生态学报,2019,30(6):1869-1876.
- [35] 张丽娟,巨晓棠,张福锁,等.土壤剖面不同层次标记动态氮的运移及其后效[J].中国农业科学,2007,40(9):1964-1972.
- [36] Zhang X Y, Fang Q C, Zhang T, et al. Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: A meta-analysis[J].Global Change Biology,2020,26(2):888-900.
- [37] Song X N, Bahar S R, Bernard L, et al. Combined biochar and nitrogen application stimulates enzyme activity and root plasticity[J].Science of the Total Environment,2020,735(13):9393-9398.