

不同覆盖方式对旱作农田土壤碳氮 含量及玉米产量的影响

王钰皓, 庞津雯, 杨佳霖, 刘 畅, 刘子涵, 杨宝平, 贾志宽, 张 鹏

(西北农林科技大学农学院/农业农村部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室/
西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:设置垄膜沟播(R)、平作全覆膜(P)和平作秸秆覆盖(S)3种不同覆盖栽培模式,以传统平作(CK)为对照,通过3 a大田定位试验,研究不同覆盖方式对农田土壤碳氮及其组分变化、玉米干物质积累和籽粒产量的影响。结果表明:连续覆盖3 a后,R和P处理土壤有机碳和全氮含量及储量均呈逐渐下降趋势,而S处理则呈上升趋势且每年的增幅逐渐增大;各处理0~40 cm土层土壤有机碳储量均表现为 $S>R>P>CK$,全氮储量表现为 $S>CK>R>P$,S处理有机碳和全氮储量分别较CK提高3.4%和7.5%;与CK相比,R和P处理可提高土壤碳氮比,在0~20 cm土层平均分别提高7.9%和9.6%($P<0.05$),而S处理0~20 cm土层土壤碳氮比平均降低了9.9%($P<0.05$);各覆膜处理(R和P)均较CK显著降低了0~40 cm土层土壤可溶性有机碳(DOC)和土壤可溶性有机氮(DON)含量,而S处理较CK处理0~60 cm土层DOC和DON含量2 a平均均提高6.2%;各处理收获期硝态氮含量在0~100 cm剖面中的垂直分布与CK无明显差异;各处理土壤铵态氮含量均低于硝态氮含量,且在不同土层中的波动较小,R和P处理提高了深层(60~100 cm)土壤铵态氮的含量,分别提高了30.4%和32.4%($P<0.05$);覆膜处理(R和P)显著增加了玉米植株的干物质积累并提高籽粒产量,各覆盖处理(R、P和S)籽粒产量分别较CK平均提高了17.4%($P<0.05$)、17.9%($P<0.05$)和3.2%。总体而言,地膜覆盖(尤其是平作覆膜处理P)对玉米产量的提高有明显的效果,秸秆覆盖(S)对提高土壤碳氮的积累及保持土壤可持续性有积极作用。

关键词:覆盖方式;旱作农田;土壤有机碳;土壤氮;玉米;产量

中图分类号:S513 **文献标志码:**A

Effects of different mulching methods on soil carbon and nitrogen content and maize yield in semiarid farmland

WANG Yuhao, PANG Jinwen, YANG Jialin, LIU Chang, LIU Zihan,

YANG Baoping, JIA Zhikuan, ZHANG Peng

(College of Agronomy, Northwest A & F University/ Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Farming
in Northwest Loess Plateau, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/ Institute of Water-saving Agriculture
in Arid Areas of China (IWSA), Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A 3-years located experiment with four mulching patterns (R, ridge-furrow with film mulching planting; P, flat planting with full plastic-film mulching; S, straw mulching; and CK, conventional tillage without mulching) during the whole season were carried out. The effects of different mulching patterns on the change of farmland soil carbon and nitrogen and its components, the influence of the dry matter accumulation and grain yield of maize were studied to identify the effects of different mulching methods on regulating soil carbon. After 3-years, the content and storage of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) showed a gradual decline trend under R and P, while S treatment showed an upward trend with an accelerating rate each year. The SOC storage in 0~40 cm soil layer of each treatment was $S>CK>R>P$, while the TN storage was $S>CK>R>P$. Compared with CK, S in-

收稿日期:2021-04-17

修回日期: 2021-07-21

基金项目:国家重点研究计划项目(2021YFE0101302);国家自然科学基金(31801314,31901475);中国博士后科学基金特别资助项目(2019T120951)

作者简介:王钰皓(1998-),男,河南郑州人,硕士研究生,研究方向为玉米高效栽培理论与技术。E-mail: wangyuhao@nwfau.edu.cn

通信作者:张鹏(1987-),男,陕西榆林人,副教授,主要从事玉米高效栽培理论与技术研究。E-mail: pengzhang121@nwfau.edu.cn

creased SOC and TN storage by 3.4% and 7.5%, respectively. Compared with CK, soil C/ N ratio increased by 7.9% ($P<0.05$) and 9.6% ($P<0.05$) in 0~20 cm soil layer under R and P, respectively. The C/N ratio of 0~20 cm soil layer was decreased by 9.9% ($P<0.05$) under S. Compared with CK, film mulching treatments (R and P) significantly reduced the contents of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) in 0~40 cm soil layer, while S treatment increased the contents of DOC and DON by 6.2% in two years. There was no significant difference in the vertical distribution of nitrate nitrogen (NO_3^+-N) content in the 0~100 cm profile between all treatments and CK. The content of NH_4^+-N in soil was lower than that of NO_3^+-N under different treatments, and the variation was small in different soil layers. The content of NH_4^+-N in deep soil (60~100 cm) increased significantly by 30.4% and 32.4% ($P<0.05$) under R and P, respectively. Film mulching treatments (R and P) significantly increased dry matter accumulation and grain yield, averagely increased by 17.4% ($P<0.05$) and 17.9% ($P<0.05$) under film mulching treatments (R and P) respectively when compared with CK. In general, plastic film mulching (especially P) significantly promoted the grain yield, and straw mulching had a positive effect on improving soil carbon and nitrogen accumulation and maintaining soil sustainability.

Keywords: mulching method; dryland farmland; soil organic carbon; soil nitrogen; maize; yield

我国北方旱作区光热资源丰富、农业生产潜力大,是重要的粮食后备生产区^[1]。该区降水少且季节分布不均,与农作物需水期不匹配,导致作物产量低而不稳,已成为限制当地高效农业发展的主要因素^[2],要依据不同地区的限制因素的差异合理选择种植模式以保证农田生产力^[3]。同时,当地长期及大面积的地膜应用导致土壤结构与养分的退化^[4],增加了水土流失及土壤侵蚀,使土壤肥力持续下降影响作物生长^[5]。因此,通过有效覆盖措施,改善土壤水分及养分从而调节该区农业生产的变率或不稳定性,对保障我国粮食安全具有重要意义。

大量研究表明,覆盖措施具有保墒抑蒸、改善土壤温度、提高作物产量和水分利用效率的作用,在我国西北旱作农业中广泛应用^[6-7]。随着应用面积的不断扩大,覆盖技术对土壤及作物生产的持续性受到越来越多的关注。地膜覆盖在使作物增产的同时会消耗地力,造成土壤水分、有机质和养分的下降^[7]。土壤碳氮含量受地膜覆盖时间长短的影响,在水肥不能充分保证的旱地上,长期地膜覆盖会导致地力的严重耗竭^[8-9]。地膜全覆盖后土层颗粒有机碳氮和潜在可矿化碳氮含量及其所占比例均有不同程度地下降,从长期来看地膜全覆盖不利于土壤碳氮的固定^[10]。因此,部分研究得出通过秸秆覆盖或半膜覆盖的方式来替代全膜覆盖。相较于地膜覆盖,秸秆带状覆盖还田能增加土壤碳输入^[11],提高耕层土壤有机碳和可溶性有机碳的含量^[12],是增加土壤碳库储量及质量的有效措施^[13]。还有研究表明,秸秆覆盖可通过减少 NO_3^+-N 在整个土层的累积损失量来减少硝态氮淋溶累积^[14],提高玉米产量^[15-16],有效实现农田秸秆资源化利用^[17]。

大量研究得出,覆盖技术对作物产量的影响并不是孤立的,而是通过改变土壤特性及养分含量来影响的。然而目前的研究多关注于农田覆盖对水分高效利用和产量提升方面,而对于旱作农田土壤碳氮变化与作物产量间的关系的研究较少。因此,本研究以春玉米为研究对象,设置垄膜沟播、平作全覆膜、平作秸秆覆盖3种覆盖措施,系统研究不同覆盖模式对旱作农田土壤碳氮变化及玉米产量的影响,探究不同覆盖模式对旱作农田土壤质量及作物产量的影响机制,以期完善和筛选旱地玉米高产可持续发展覆盖模式提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

在陕西杨凌西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院试验田(34°20'N, 108°04'E)进行试验,该区海拔490 m,年均降水量630 mm,年均气温13.0℃,年均日照时数为2 196 h,年蒸发量933 mm,干燥指数为1.38~1.59,无霜期220 d,土壤类型为壤土。试验开始时(2015年)表层(0~20 cm)土壤全氮含量1.21 g·kg⁻¹,有机质13.81 g·kg⁻¹,速效氮53.35 mg·kg⁻¹,速效磷21.35 mg·kg⁻¹和速效钾142.97 mg·kg⁻¹。

试验年间玉米生育期年际间气温波动较小(图1),生育期日平均气温为11.3℃~33.6℃。2015、2016年和2017年玉米生育期降水量分别为185.1、269.8 mm和243.7 mm,2015年降水频率和降水量分布较为均匀;2016年播后20 d内几乎无降水,延迟了裸地平作玉米的出苗时间,且生育后期降水频率大于生育前期;2017年玉米生育期的降水频率较

前两年明显减少,且主要集中在生育前期。与该点近 40 年玉米生育期平均降水量(245.2 mm)相比,依据标准化降水指数(SPI 值),2015 年是干旱年,2016、2017 年是平水年。

1.2 试验设计

试验采取完全随机设计,设置 4 个处理,分别是:垄膜沟播(R)、平作全覆膜(P)、平作秸秆覆盖(S)和传统平作(CK),每个处理均重复 3 次。小区种植面积为 52.8 m²(11 m × 4.8 m)。作物为玉米,品种为大丰 30(当地大面积种植品种),2015、2016 年和 2017 年的播种日期分别为 4 月 19 日、4 月 19 日和 4 月 20 日;收获日期分别为 8 月 15 日、8 月 20 日和 8 月 6 日。播种密度为 67 000 株 · hm⁻²(60 cm × 25 cm),用鹰嘴播种(施肥)器人工播种,播种深度为 4~5 cm。播种时各处理用人工鹰嘴播种(施肥)器施基肥(N 140 kg · hm⁻²和 P₂O₅ 150 kg · hm⁻²),玉米播种 69~75 d 后在玉米棵间进行追肥(N 140 kg · hm⁻²),施肥深度为 4~5 cm,全生育期不灌水。试验期间所有处理没有发生病虫害,并根据情况进行人工除草。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤样品 采用五点混合采样法采集 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 各土层土壤,将 5 个点的土样充分混匀作为该小区代表性土样。将土样放于室内风干,剔除样品中植物根系、砾石等杂物,将样品过 2 mm 筛,储藏于 4℃ 冰箱中用于各项指标的测定。

土壤有机碳含量(DOC)采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法^[18]测定,根据公式(1)计算出土壤有机碳储量;土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定^[18],土壤全氮储量用公式(2)计算,根据公式(3)计算出土壤碳氮比。土壤硝态氮和铵态氮使用连续流动分析仪测定。可溶性有机碳含量采用总有机碳分析仪

测定;总可溶性氮含量使用连续注射流动分析仪测定^[19],根据公式(4)计算出土壤可溶性有机氮含量。

$$T_{SOC} = S \times d \times SD \times SOC \times 10^{-5} \tag{1}$$

$$T_{TN} = S \times d \times SD \times TN \times 10^{-5} \tag{2}$$

式中, T_{SOC} 为土壤有机碳储量(mg · hm⁻²), T_{TN} 为土壤全氮储量(mg · hm⁻²), S 为土地面积(hm⁻²), d 为土层深度(cm), SD 为土壤容重(g · cm⁻³), SOC 为土壤有机碳含量(g · kg⁻¹), TN 为全氮含量。

$$C/N = SOC/TN \tag{3}$$

$$DON = TSN - NO_3^- - N - NH_4^+ - N \tag{4}$$

式中, DON 为可溶性有机氮含量(mg · kg⁻¹), TSN 为总可溶性氮含量(mg · kg⁻¹), $NO_3^- - N$ 为硝态氮含量(mg · kg⁻¹), $NH_4^+ - N$ 为铵态氮含量(mg · kg⁻¹)。

1.3.2 玉米生物量及产量 玉米播种后,每隔 20 d,各小区选取 3 株长势一致有代表性的植株进行破坏性取样,105℃ 杀青 30 min,然后放入 80℃ 烘箱烘干至恒重,测定各生育时期地上部生物积累量。收获时,每个小区选取 4 行有代表性的玉米,每行连续随机收获 10 株玉米进行产量测定。

1.4 数据分析

采用单因素方差分析法(IBM SPSS Statistics)分析处理之间的差异(显著差异在 95%的置信水平下确定),当检测到差异显著时($P < 0.05$),使用最小显著差异法(LSD)进行多重比较。Origin 2021b 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖方式对土壤有机碳、全氮和碳氮比的影响

2.1.1 土壤有机碳及全氮含量 连年覆盖(除 S 处理外)导致土壤有机碳含量呈逐年下降趋势,连续覆盖 3 a 后,R、P 和 CK 处理 0~40 cm 土层土壤有机

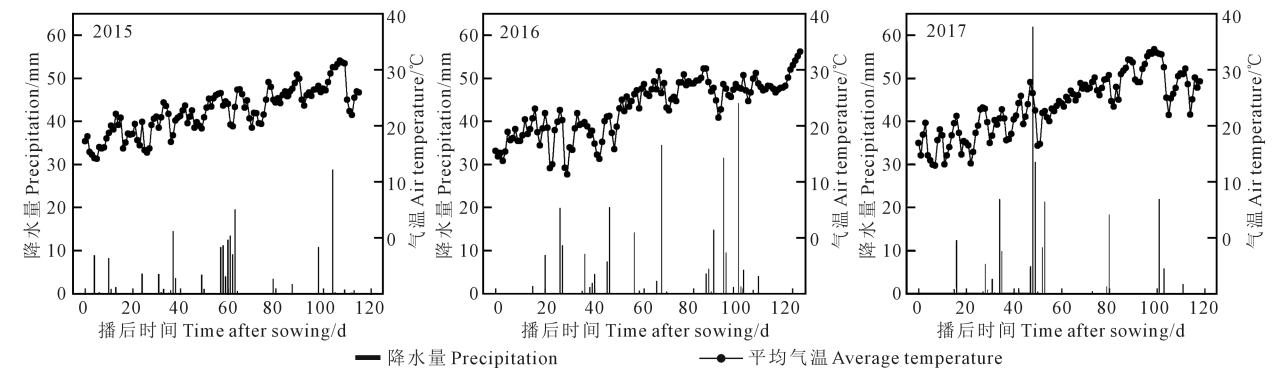


图 1 2015—2017 年玉米生育期降水量和日平均气温

Fig.1 Precipitation and daily average temperature during maize growth period of 2015–2017

碳含量比试验前分别降低了 2.7%、2.9%和 6.0%,其中 CK 处理降幅最大,R 和 P 处理降幅差异不明显,而 S 处理平均增长了 3.5%,且每年的增幅逐渐增大。

连续覆盖 R、P 和 CK 处理 0~40 cm 土层土壤全氮含量较试验前分别降低了 18.2%、19.2%和 9.1%,R 和 P 处理的土壤全氮含量降幅大于 CK,S 处理的全氮含量整体呈缓慢上升趋势(表 1)。

2.1.2 土壤有机碳及全氮储量 不同覆盖模式下各处理 0~20 cm 土层土壤有机碳储量均高于 20~40 cm 土层(图 2)。0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤有机碳储量变化范围分别为 20.1~21.4 mg·hm⁻²和 16.1~18.5 mg·hm⁻²。覆盖 3 a 后,除 S 处理外,其余各处理各土层土壤有机碳储量均呈下降趋势,R、P 和 CK 处理 0~40 cm 土层的有机碳储量分别下降了 2.1%、2.2%和 3.4%,而秸秆覆盖(S)增加了 3.4%。与试验前相比,两个土层表现一致,除了 S 处理外,其他处理土壤有机碳年消长速率均为负。R、P 和 CK 处理 0~20 cm 土层土壤有机碳储量的降幅分别为 0.6%、0.5%和 1.8%,均明显小于 20~40 cm 土层(3.8%、4.0%和 5.1%)。

各处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤全氮储量的变化范围分别为 2.4~3.1 mg·hm⁻²和 1.7~2.3 mg·hm⁻²,0~20 cm 土层土壤全氮储量明显高于 20~40 cm 土层,各处理土壤全氮储量均表现为 S>CK>R>P。各处理(除 S 外)两个土层的土壤全氮储量均随着覆盖年限增长呈下降趋势,连续覆盖 3 a 后

R、P 和 CK 处理 0~40 cm 土层全氮储量分别下降了 15.6%、17.4%和 7.5%,而秸秆覆盖(S)处理增加了 7.5%。地膜覆盖(R 和 P)处理 0~20 cm 土层土壤全氮储量的降幅(13.4%和 14.6%)均小于 20~40 cm 土层(18.4%和 21.0%)。

2.1.3 土壤碳氮比(C/N) 连续覆盖 3 a 后各处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤碳氮比变化范围分别为 6.79~8.45 和 7.77~10.06。与 CK 相比,R 和 P 处理 0~20 cm 土层土壤碳氮比平均增加了 7.9%和 9.6%,S 处理降低了 9.9%(*P*<0.05);在 20~40 cm 土层,R 和 P 处理碳氮比较 CK 增加了 15.5%和 19.1%(*P*<0.05),而 S 处理较 CK 降低了 3.0%,差异不显著(表 2)。

2.2 不同覆盖方式对土壤可溶性碳、氮组分的影响

2.2.1 可溶性有机碳(DOC) 连续覆盖 3 a 后,各处理 DOC 含量在 0~60 cm 土层均随着土层加深而逐渐降低(图 3)。在 2016、2017 年,各土层各处理 DOC 含量变化均为 S>CK>P>R,其中各土层 DOC 含量均表现为覆膜处理(R 和 P)显著低于 CK,0~60 cm 土层平均降低 9.5%和 6.3%(*P*<0.05),而秸秆覆盖(S)处理 DOC 含量高于 CK,平均增加了 6.2%。

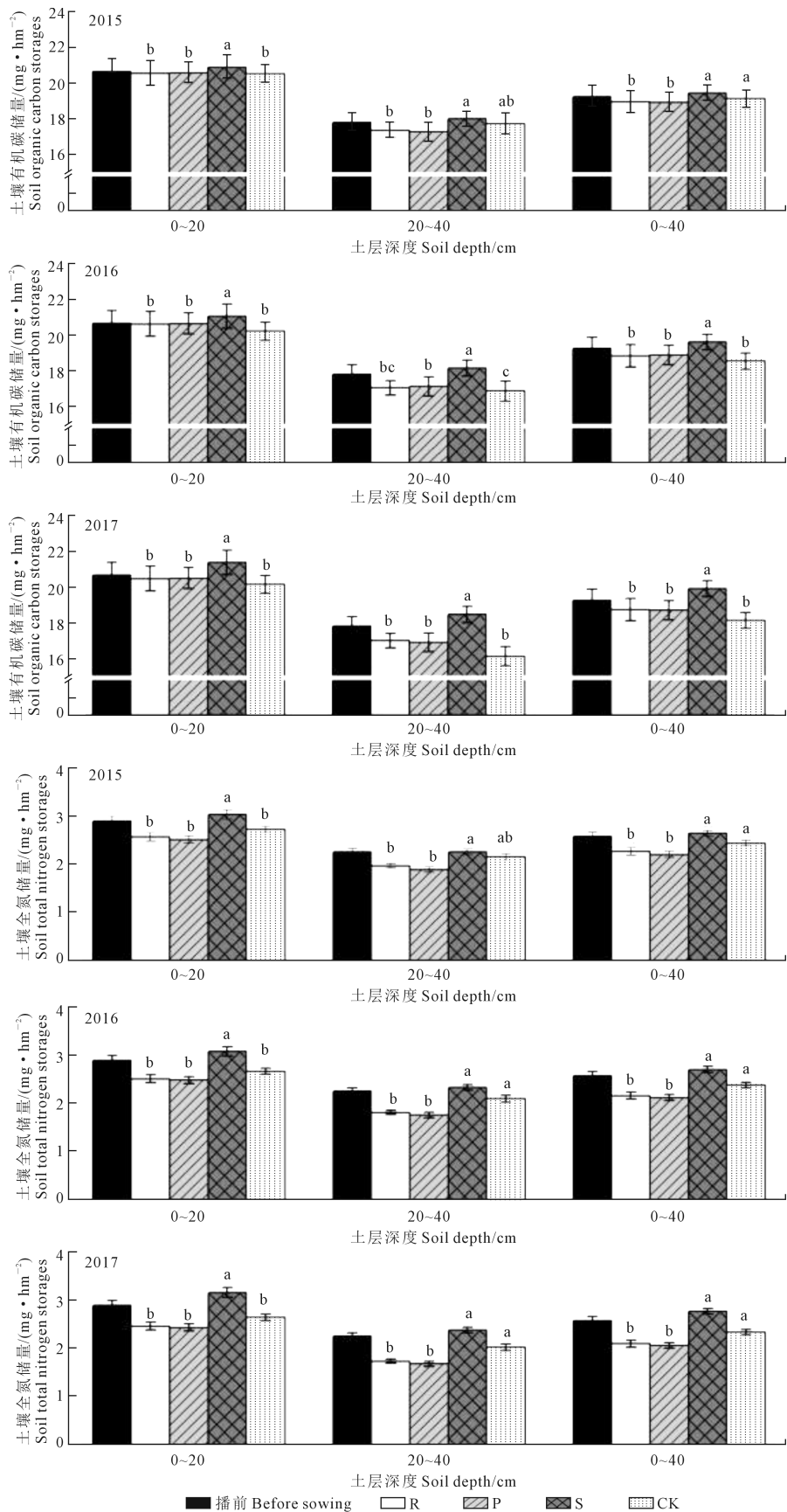
2.2.2 可溶性有机氮(DON) 在各试验年份,各处理土壤可溶性氮(DON)的分布均随土层的加深逐渐降低(图 4)。连续覆盖 3 a 后,不同覆盖模式对 0~40 cm 土层 DON 含量的影响不同。2016 年和 2017 年各土层 DON 含量均表现为覆膜处理(R 和 P)

表 1 不同覆盖方式下土壤有机碳和全氮含量的变化

Table 1 Changes of soil organic carbon and total nitrogen content under different mulching conditions

土层 Layer/cm	处理 Treatment	有机碳 Organic carbon SOC/(g·kg ⁻¹)				全氮 Total nitrogen TN/(g·kg ⁻¹)			
		播前 Before sowing	2015	2016	2017 增长速率 Increase rate /(g·kg ⁻¹ ·a ⁻¹)	播前 Before sowing	2015	2016	2017 增长速率 Increase rate /(g·kg ⁻¹ ·a ⁻¹)
0~20	R	8.01	7.97b	7.99b	7.93b	1.12	0.99b	0.97b	0.95b
	P		7.98b	8.00b	7.94b		0.97b	0.96b	0.94b
	S		8.10a	8.16a	8.28a		1.17a	1.19a	1.22a
	CK		7.96a	7.83b	7.80c		1.05a	1.03a	1.02a
20~40	R	6.9	6.73a	6.60b	6.58b	0.87	0.76ab	0.70bc	0.67c
	P		6.70a	6.63b	6.54b		0.73b	0.68c	0.65c
	S		6.98a	7.03a	7.15a		0.87a	0.90a	0.92a
	CK		6.87a	6.53b	6.24c		0.81a	0.83ab	0.78b
0~40	R	7.46	7.35b	7.30b	7.26b	0.99	0.88b	0.84b	0.81b
	P		7.34b	7.32b	7.24b		0.85b	0.82b	0.80b
	S		7.54a	7.60a	7.72a		1.02a	1.05a	1.07a
	CK		7.42ab	7.18b	7.02c		0.94a	0.92a	0.90a

注:不同字母表示处理间差异达到显著水平(*P*<0.05),下同。
Note: Different letters indicate significant differences between treatments at *P*<0.05, the same below.



注:不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同.
Note: Different letters indicate significant differences at $P<0.05$, the same below.

图 2 不同覆盖方式下土壤有机碳和土壤全氮储量的变化

Fig.2 Spatial variation of soil organic carbon and total nitrogen storages under different mulching patterns

显著 ($P<0.05$) 低于 CK, 而秸秆覆盖 (S) 处理的 DON 含量高于 CK。其中 0~60 cm 覆膜处理 (R 和 P) 两年的 DON 含量分别较 CK 平均降低了 7.2% 和 4.7% ($P<0.05$), 而秸秆覆盖处理 (S) 平均增加了 6.2%。在 40~60 cm 土层, 各覆盖处理与 CK 间均无显著差异。

2.3 不同覆盖方式对土壤硝态氮和铵态氮的影响

2.3.1 土壤硝态氮(NO_3^--N) 不同覆盖模式下土壤硝态氮含量在 0~100 cm 土层中的变化受不同降雨年份的影响(图 5)。2016 年各处理 0~100 cm 土层硝态氮含量表现为减少—增加—减少的趋势, 2017 年则表现为先减少后增加的趋势, 两年处理间差异主要集中在土壤表层(0~20 cm)和深层(80~100 cm)。覆膜处理促进了作物对氮素的吸收, 降低了土壤硝态氮在深层土壤的积累, 与 CK 相比, R 和 P 处理 80~100 cm 土层硝态氮含量平均降低了 6.3% 和 60.7% ($P<0.05$), 而 S 处理各土层硝态氮分布与 CK 间均无显著差异 ($P>0.05$)。

2.3.2 土壤铵态氮(NH_4^+-N) 不同覆盖模式下各处理土壤铵态氮含量均低于硝态氮含量, 且在不同土层中的波动较小, 各处理的变化范围为 1.55~3.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 5)。同硝态氮一样, 不同覆盖模式下铵态氮含量在年际间表现也不尽相同, 2016 年, 各处理的铵态氮含量均随土壤深度的增加而逐渐降低, 且覆膜处理 (R 和 P) 铵态氮含量较 CK 降

低, 0~40 cm 土层较 CK 分别降低了 19.7% 和 13.0% ($P<0.05$), 而 S 在不同土层与 CK 均无显著差异。2017 年, 各覆膜处理 (R 和 P) 土壤铵态氮含量均较 CK 提高, 主要集中在深层 (60~100 cm) 土壤, R 和 P 处理分别提高 30.4% 和 32.4% ($P<0.05$), 而 S 处理与 CK 间仍无显著差异。

2.4 不同覆盖方式对玉米各生育时期单株干物质积累量的影响

在各年份, 各覆盖处理下玉米干物质积累变化一致, 均表现出逐渐增加的趋势, 且处理间的差异随着生育进程的推进逐渐增大, 但在不同降雨年份存在一定的差异(图 6)。与 CK 相比, 各覆膜处理

表 2 不同覆盖方式下土壤的碳氮比
Table 2 Soil carbon to nitrogen ratio under different mulching patterns

土层 Layer/cm	处理 Treatment	播前 Before-sowing	2015	2016	2017	平均 Average
0~20	R	7.15	8.05a	8.24a	8.35a	8.21ab
	P		8.23a	8.33a	8.45a	8.34a
	S		6.92c	6.86c	6.79c	6.86c
	CK		7.58b	7.60b	7.65b	7.61b
20~40	R	7.93	8.86ab	9.43a	9.82b	9.37a
	P		9.18a	9.75a	10.06a	9.66a
	S		8.02c	7.81c	7.77c	7.87c
	CK		8.28bc	8.06b	8.00c	8.11b
0~40	R	7.54	8.46a	8.84b	9.09a	8.79a
	P		8.71a	9.04a	9.26a	9.00a
	S		7.47b	7.34c	7.28b	7.36b
	CK		7.93b	7.83bc	7.83b	7.86b

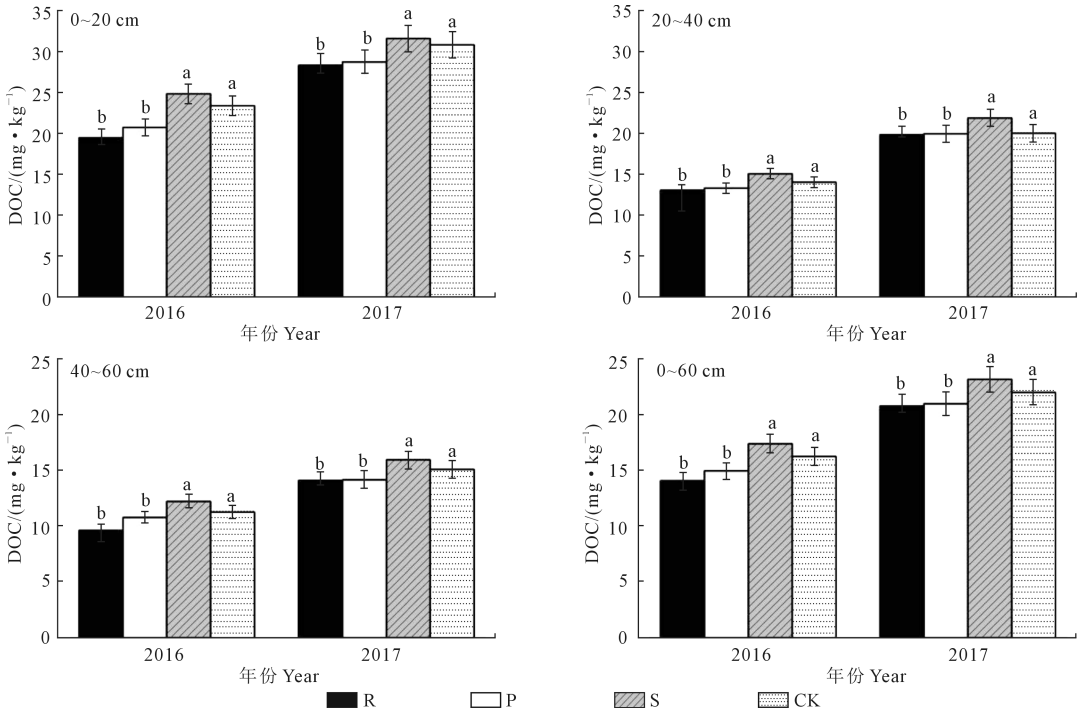


图 3 2016 年和 2017 年不同覆盖模式下玉米收获期的土壤可溶性有机碳 (DOC) 含量

Fig.3 Soil dissolved organic carbon (DOC) content at harvest under different mulching patterns in 2016 and 2017

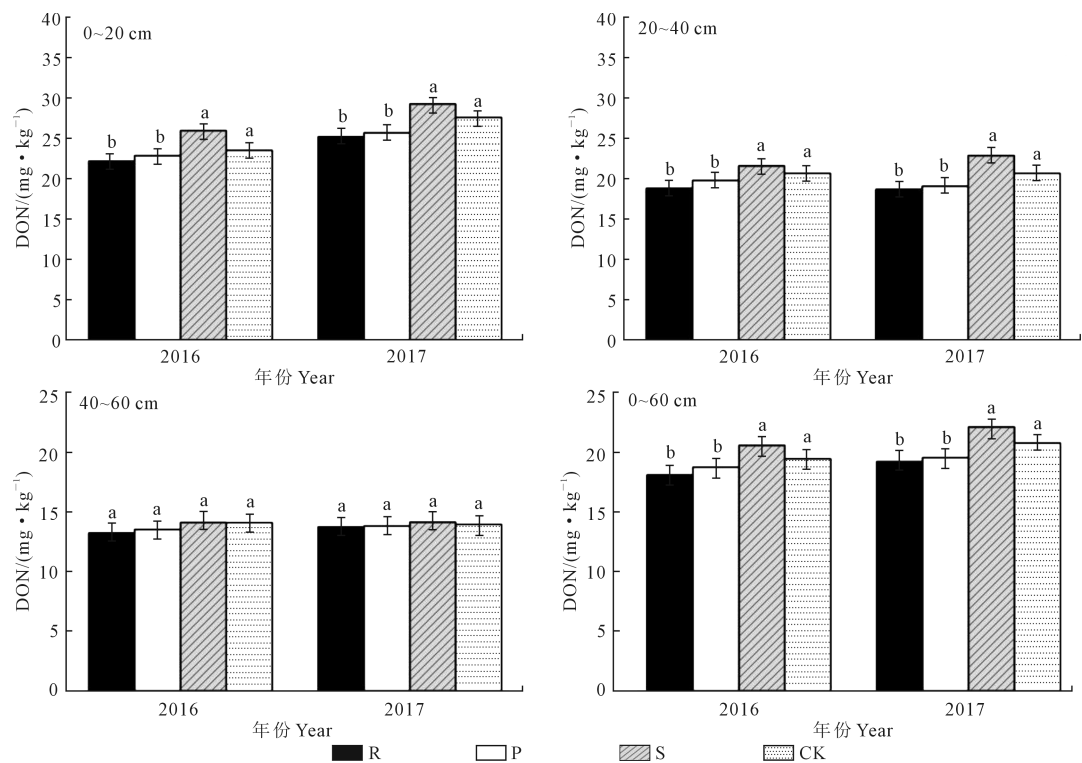


图 4 2016 年和 2017 年不同覆盖模式下玉米收获期土壤可溶性有机氮 (DON) 含量

Fig.4 Soil dissolved organic nitrogen (DON) content at harvest under different mulching patterns in 2016 and 2017

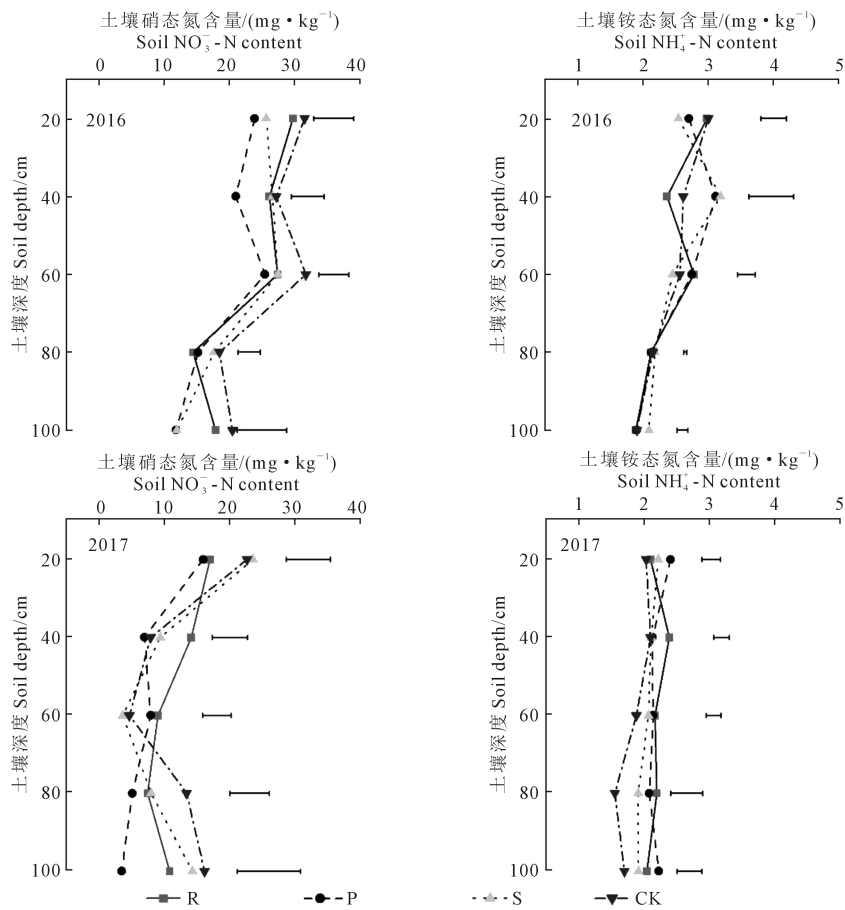


图 5 不同覆盖方式下玉米收获期 0~100 cm 土层土壤硝态氮、铵态氮含量

Fig.5 Soil NO₃⁻-N and NH₄⁺-N content in the 0~100 cm soil layer at harvest under different mulching patterns

在 3 个试验年间均显著提高了玉米收获期的干物质质量,R 和 P 处理分别平均提高 19.2% ($P<0.05$) 和 20.7% ($P<0.05$)。秸秆覆盖(S)处理玉米干物质积累量的变化受降水量的显著影响,2015 年(干旱年),S 处理下各个生育期的干物质质量较 CK 有不同程度的降低,且在收获期达到最大,其收获期的干物质质量较 CK 降低 10.0% ($P<0.05$),而在 2016 年,S 处理各个生育时期的干物质质量均高于 CK,平均提高了 29.5% ($P<0.05$),在 2017 年 S 处理干物质积累量变化与 CK 基本一致,差异不明显,收获期降低了 9.0% ($P>0.05$)。

2.5 不同覆盖条件对玉米籽粒产量的影响

3 个试验年间均以覆膜处理下的产量最高,R 和 P 处理分别较 CK 平均提高了 17.4% 和 17.9% (P

<0.05),两个覆膜处理间无显著差异(图 7)。秸秆覆盖(S)处理的产量在年际间表现出一定的差异,在 2016 年较 CK 提高了 15.4% ($P<0.05$),而在 2015、2017 年均略低于 CK,差异不显著;3 个试验年间,S 处理的玉米产量较 CK 平均提高了 3.2%。各处理的玉米产量在年际间 R 和 P 处理的变幅要小于 S 和 CK 处理,S 处理的变幅最大。

2.6 玉米产量与土壤碳氮含量的相关性分析

玉米产量与土壤有机碳、全氮、可溶性有机碳、可溶性有机氮、硝态氮和铵态氮均呈正相关,其中土壤有机碳、可溶性有机碳、可溶性有机氮、铵态氮与玉米产量的正相关达到显著水平,其相关性系数分别为 0.36、0.59、0.66 和 0.40。土壤硝态氮与玉米产量的相关性系数为 0.50,呈极显著正相关。

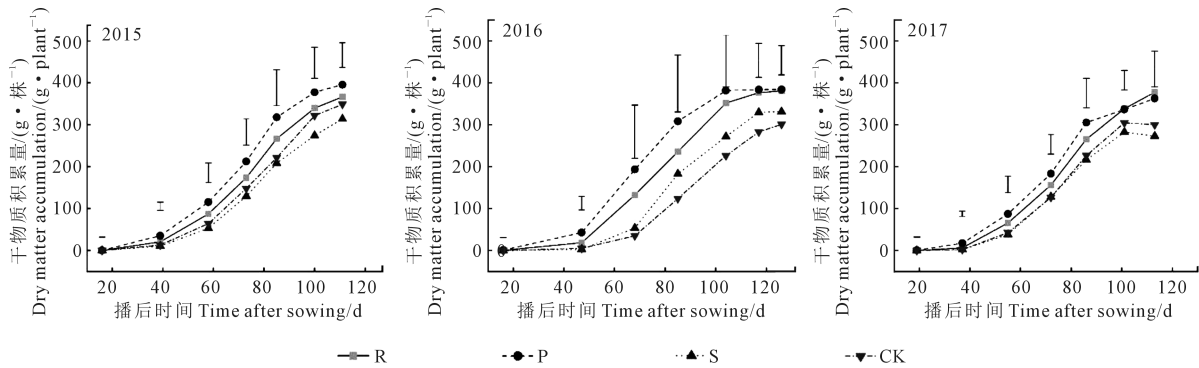


图 6 不同覆盖方式下玉米单株干物质积累动态
Fig.6 Accumulation dynamics of dry matter per plant of maize under different mulching patterns

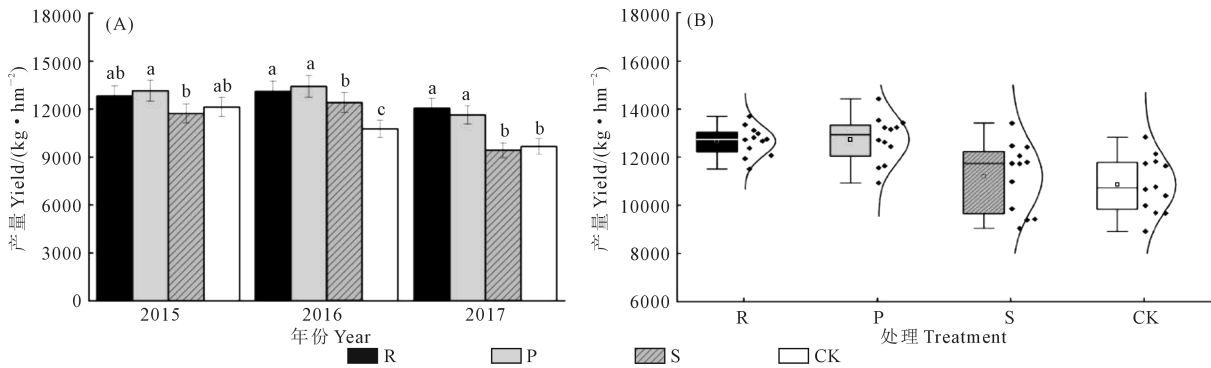


图 7 不同覆盖方式下玉米产量
Fig.7 Maize yield under different mulching patterns

3 讨 论

3.1 不同覆盖方式对土壤碳的影响

大量研究发现土壤碳周转受覆盖方式的影响^[8,10,13]。本试验结果表明,秸秆覆盖下土壤的碳库含量显著提高,各组分碳含量均有所提升。Zhang 等^[20]的研究也表明,不同覆盖方式能够影响土壤有机碳及其组分含量。原因可能是覆盖的秸秆腐殖

化后可有效补充土壤碳源^[21]。卜玉山等^[22]研究得出相比较地膜覆盖,秸秆覆盖能增加土壤有机质、速效氮、钾、磷等营养元素的积累,但地膜覆盖不仅不能起到此作用,甚至还使土壤表层的有机质含量降低,这与本试验中除了秸秆覆盖外其他处理的土壤 SOC 年消长速率均为负的结果一致,R 和 P 处理 SOC 消长率在 20~40 cm 土层平均下降超过 15.0%。原因是秸秆覆盖改善了土壤的光热资源,使土壤微

生物活性提高,促进了土壤 SOC 的积累。本研究结果还发现,秸秆覆盖处理较其他处理可显著提高土壤 DOC 含量,平均提高 6.2%~14.1%,这可能是因为秸秆覆盖能促进土壤微生物活性,使土壤不稳定碳得到稳固,进而补充土壤可溶性碳组分^[23];另一方面,覆膜处理能阻止土壤水热散失,改善土壤水温环境,加速微生物对土壤可溶性有机碳组分的利用,进而降低土壤 DOC 含量^[24]。本试验中,各处理土壤有机碳及可溶性有机碳含量均随土层加深呈下降趋势,其中秸秆覆盖处理表层(0~20 cm)土壤 SOC 与 DOC 含量较深层(20~40 cm)分别平均提高 15.8%和 44.3%。原因是土壤接受外界影响是由表层到深层,土层越深土壤接收秸秆等有机物质的输入越少,导致出现外界影响随着土层加深不断减弱的现象^[25-26]。

3.2 不同覆盖方式对土壤氮的影响

大量研究表明秸秆覆盖可提高土壤氮素的积累^[14]。本试验中各覆盖处理中除秸秆覆盖处理(S)外均降低了土壤氮素的积累。因为秸秆覆盖可通过降低微生物对土壤氮素的分解而增加土壤氮素含量及其有效性^[27],另外由于地膜覆盖缺少秸秆等有机物质的输入,加速了氮素的矿化损失,进而降低了土壤氮素的积累^[28]。在本研究中秸秆覆盖处理较其他处理可显著降低土壤 C/N(降幅达 6.8%~22.3%)。可能因为土壤有机碳含量的提高促进了微生物的活性与分解作用,从而提高了土壤氮素的积累与利用效率^[29]。本研究也发现连续多年秸秆覆盖后,表层(0~20 cm)土壤全氮及可溶性有机氮含量比深层(20~40 cm)分别高 32.6%和 27.7%($P<0.05$),冀雅珍等^[30]研究得出了类似结果。因为表层土壤良好的水热及通气状况有利于微生物的生长与活动,同时表层土壤含有大量的凋落物等碳源,从而显著提高了表层土壤氮组分。本试验中土壤硝态氮的含量受到当年降水量的影响,以收获期为例,降雨量增加时下层(80~100 cm)土壤的硝态氮含量较高,降雨量减少时上层土壤(0~40 cm)含量较高。这与李世清等^[31]的研究结果类似,硝态氮是土壤中矿质的主要残存形式,且易受到土壤淋溶影响,所以与土壤中的水分分布密不可分。各处理土壤铵态氮含量差异不大,可能是由于覆盖处理增加了土壤温度及水分含量,促进了硝化细菌的生长,导致土壤铵态氮转化为硝态氮,使土壤 N_2O 排放通量增加并挥发到大气中^[32]。

3.3 不同覆盖方式对玉米干物质积累及产量的影响

干物质积累是作物形态建成和产量形成的基

础,覆盖处理能够通过改善土壤的水热环境来调节作物的生长,从而影响产量^[12,14,28]。李尚中等^[33]研究发现,随着旱地地膜栽培模式的演替,玉米抗旱增产能力逐步增强,玉米干物质积累量、产量、水分利用效率和籽粒容重均得到了显著提高。本研究中,3 个试验年间均以覆膜处理下的产量最高,R 和 P 处理的产量分别较 CK 平均提高了 17.4%和 17.9%($P<0.05$)。这是由于地膜覆盖可显著改善土壤的水热环境,促进玉米根部的生长,增加了玉米的干物质积累,提高了玉米植株的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率等光合性能,从而促进了玉米产量的增加^[34-35]。S 处理下仅 2016 年的玉米产量显著高于 CK。可能因为 2016 年播后 20 d 内几乎无降水,延迟了裸地平作玉米的出苗时间;而秸秆覆盖能降低土壤表面的风速,减少了土壤的水热散失,进而缓解了干旱对出苗的影响,提高了玉米产量^[23]。

4 结 论

1)连续多年秸秆覆盖处理显著提高了土壤有机碳和全氮的含量及储量,且表层高于深层;地膜覆盖处理土壤有机碳和全氮含量及储量均呈现降低趋势。

2)秸秆覆盖处理较其他处理提高了土壤可溶性有机碳氮的含量,显著降低了土壤碳氮比;各处理收获期土壤铵态氮含量均低于硝态氮含量,且在不同土层中的波动较小。

3)地膜覆盖处理可显著提高玉米植株干物质积累和产量,S 处理产量提高不明显。

综上,从提高产量的角度来看,地膜覆盖方式更优,能有效提高作物产量;从提高土壤可持续性生产及环保的角度来看,秸秆覆盖方式更好,能够培肥土壤、提高土壤碳氮的积累。

参 考 文 献:

[1] ZHANG S L, SADRAS V, CHEN X P, et al. Water use efficiency of dryland wheat in the Loess Plateau in response to soil and crop management[J]. Field Crops Research, 2013, 151: 9-18.

[2] 肖蓓,崔步礼,李东昇,等.黄土高原不同气候区降水时空变化特征[J].中国水土保持科学,2017,15(1):51-61.

XIAO B, CUI B L, LI D S, et al. Temporal and spatial variations of precipitation in different climatic regions of the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(1): 51-61.

[3] HUANG F Y, LIU Z H, ZHANG P, et al. Hydrothermal effects on maize productivity with different planting patterns in a rainfed farmland area[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: 104794.

[4] 白娜玲,张海韵,张翰林,等.不同地膜覆盖对土壤环境及苜蓿生长

- 的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(11):2569-2577.
- BAI N L, ZHANG H Y, ZHANG H L, et al. Effects of different mulching films on soil environment and taro growth[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020,39(11):2569-2577.
- [5] REN X L, CAI T, CHEN X L, et al. Effect of rainfall concentration with different ridge widths on winter wheat production under semiarid climate[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 77: 20-27.
- [6] REN X, CHEN X, JIA Z. Effect of rainfall collecting with ridge and furrow on soil moisture and root growth of corn in semiarid northwest China[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2010, 196(2): 109-122.
- [7] JIA Q M, XU Y Y, ALI S, et al. Strategies of supplemental irrigation and modified planting densities to improve the root growth and lodging resistance of maize (*Zea mays* L.) under the ridge-furrow rainfall harvesting system[J]. Field Crops Research, 2018, 224: 48-59.
- [8] 卜玉山,邵海林,王建程,等.秸秆与地膜覆盖春玉米和春小麦耕层土壤碳氮动态[J].中国生态农业学报,2010,18(2):322-326.
- BU Y S, SHAO H L, WANG J C, et al. Dynamics of soil carbon and nitrogen in plowed layer of spring corn and spring wheat fields mulched with straw and plastic film[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2010, 18(2): 322-326.
- [9] 梁贻仓,王俊,刘全全,等.地表覆盖对黄土高原土壤有机碳及其组分的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):161-167.
- LIANG Y C, WANG J, LIU Q Q, et al. Effects of soil surface mulching on soil organic carbon and its fractions in a wheat field in Loess Plateau, China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(5): 161-167.
- [10] 付鑫,王俊,赵丹丹.地膜覆盖对黄土高原旱作春玉米田土壤碳氮组分的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):239-243.
- FU X, WANG J, ZHAO D D. Effects of plastic film mulching on soil carbon and nitrogen fractions in a dryland spring maize field on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 239-243.
- [11] 李文军,彭保发,杨奇勇.长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响[J].中国农业科学,2015,48(3):488-500.
- LI W J, PENG B F, YANG Q Y. Effects of long-term fertilization on organic carbon and nitrogen accumulation and activity in a paddy soil in double cropping rice area in Dongting lake of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(3): 488-500.
- [12] 张莉,李玉义,逢焕成,等.玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响[J].农业资源与环境学报,2019,36(2):160-168.
- ZHANG L, LI Y Y, PANG H C, et al. Effects of granulated maize straw incorporation on soil organic carbon contents and grain yield[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(2): 160-168.
- [13] 张彤勋,皮小敏,孙本华,等.秸秆与地膜覆盖对旱作土类土壤碳氮组分的影响[J].西北农业学报,2018,27(8):1225-1233.
- ZHANG T X, PI X M, SUN B H, et al. Effects of straw and plastic film mulching on carbon and nitrogen components in Lou soil of dryland[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2018, 27(8): 1225-1233.
- [14] 胡锦昇,樊军,付威,等.保护性耕作措施对旱地春玉米土壤水分和硝态氮淋溶累积的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1188-1198.
- HU J S, FAN J, FU W, et al. Effects of conservation tillage measures on soil water and NO_3^- -N leaching in dryland maize cropland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1188-1198.
- [15] 张万锋,杨树青,刘鹏,等.秸秆覆盖方式和施氮量对河套灌区夏玉米氮利用及产量影响[J].农业工程学报,2020,36(21):71-79.
- ZHANG W F, YANG S Q, LIU P, et al. Effects of stover mulching combined with N application on N use efficiency and yield of summer maize in Hetaoirrigated district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(21): 71-79.
- [16] JIANG H, HAN X Z, ZOU W X, et al. Seasonal and long-term changes in soil physical properties and organic carbon fractions as affected by manure application rates in the Mollisol region of Northeast China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 268: 133-143.
- [17] 张亚丽,张兴昌,邵明安,等.秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J].水土保持学报,2004,18(1):85-88.
- ZHANG Y L, ZHANG X C, SHAO M A, et al. Impact of straw cover on mineral nitrogen loss by runoff on loess slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 85-88.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社,2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] MCKNIGHT D M, HARNISH R, WERSHAW R L, et al. Chemical characteristics of particulate, colloidal, and dissolved organic material in loch vale watershed, Rocky Mountain National Park[J]. Biogeochemistry, 1997, 36(1): 99-124.
- [20] ZHANG P, WEI T, JIA Z K, et al. Stratification of soil organic C, N and the C:N ratio as affected by different plastic film mulching modes in a semiarid region of China[J]. Soil Research, 2019, 57(4): 408-417.
- [21] 赵如浪,冯佰利,蒋树怀,等.黄土高原旱地保护性耕作农田土壤团聚体特性变化研究[J].中国农业大学学报,2011,16(4):74-79.
- ZHAO R L, FENG B L, JIANG S H, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in dry land of Loess Plateau[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(4): 74-79.
- [22] 卜玉山,苗果园,周乃健,等.地膜和秸秆覆盖土壤肥力效应分析与比较[J].中国农业科学,2006,39(5):1069-1075.
- BU Y S, MIAO G Y, ZHOU N J, et al. Analysis and comparison of the effects of plastic film mulching and straw mulching on soil fertility[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(5): 1069-1075.
- [23] 付鑫,王俊,刘全全,等.秸秆和地膜覆盖对旱作玉米田土壤团聚体及有机碳的影响[J].土壤通报,2016,47(2):405-413.
- FU X, WANG J, LIU Q Q, et al. Effect of straw and plastic film mulching on aggregate size distribution and organic carbon contents in a rainfed corn field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(2): 405-413.
- [24] MULVANEY R L, KHAN S A, ELLSWORTH T R. Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: a global dilemma for sustainable cereal production[J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(6): 2295-2314.