

免耕或深松结合秸秆覆盖提升土壤碳氮水含量 和马铃薯产量的协同效应

张 龙, 李 简, 赵富贵, 李 丹, 侯贤清, 李 荣*

(宁夏大学农学院, 宁夏银川 750021)

摘要:【目的】研究不同耕作方式结合秸秆覆盖措施对土壤有机碳、全氮、水含量及马铃薯产量的影响,以探明耕作结合秸秆覆盖措施的增产机理,为宁南旱作节水农业发展提供技术和理论参考。【方法】于2014—2016年开展田间定位试验,设置6个处理:免耕+秸秆覆盖(NS)、免耕+不覆盖(NN)、深松+秸秆覆盖(SS)、深松+不覆盖(SN)、传统耕作+秸秆覆盖(CS)、传统耕作+不覆盖(CN)。在2016年马铃薯收获期取样测定了0—40 cm土层土壤有机碳与全氮含量,播种、现蕾、块茎形成和块茎膨大期测定了0—200 cm土层土壤蓄水量,苗期、现蕾、块茎形成、块茎膨大以及收获期测定了地上部生物量,成熟期调查了产量。【结果】同一耕作措施下,覆盖秸秆较不覆盖能显著提高0—40 cm土层土壤碳、氮含量,提高马铃薯播种期、现蕾期、块茎形成期和块茎膨大期0—200 cm土层土壤蓄水量。以CN处理为对照,0—20 cm土层土壤碳、氮含量的提高幅度以SS处理最高,增幅分别为29.9%和24.7%,20—40 cm土层则以NS处理最高,增幅分别为52.4%和27.4% ($P<0.05$);播种期土壤蓄水量2014年(干旱年)以NS处理最高,2015年(平水年)和2016年(干旱年)以SS处理最高,增幅依次为6.4%、11.4%和29.6%;马铃薯关键生育期平均土壤蓄水量的增幅在2014和2016年以SS处理最高,分别为21.6%和26.0%,2015年以NS处理最高,增幅为17.2%。根据马铃薯生物量累积动态变化的Logistic模型计算,3年均以SS处理进入快速增长起始期最早,最大累积速率在2014年以NS处理最高,2015和2016年以SS处理最高。相比CN,马铃薯产量2014年以NS处理最佳,增幅为51.8%,2015和2016年均以SS处理最佳,增幅分别为36.7%和87.5%。降水年型、耕作方式和秸秆覆盖对土壤蓄水量、马铃薯地上部生物量以及产量的影响均达到极显著水平,秸秆覆盖对土壤碳、氮含量的影响也达到极显著水平 ($P<0.01$)。马铃薯产量与土壤碳含量呈显著正相关,与土壤全氮、蓄水量和生物量呈极显著正相关,土壤有机碳、氮含量和蓄水量之间也呈极显著正相关。【结论】不同耕作措施配合秸秆覆盖可进一步提高土壤碳、氮含量和0—200 cm土层蓄水量,保证马铃薯稳产高产。在秸秆覆盖条件下,连续深松能够显著提升0—20 cm土层土壤碳、氮含量,提早马铃薯的生物量快速累积期,并在干旱年份延长快速增长持续期和提高最大累积速率;免耕在第一年提高马铃薯产量的效果最佳,但连续免耕的增产效果不如连续深松甚至传统耕作。因此,综合考虑土壤碳氮水与作物产量的协同效应,建议免耕、深松配合秸秆覆盖措施在宁南山区马铃薯栽培中进行推广应用。

关键词: 免耕; 深松; 秸秆覆盖; 土壤碳氮; 土壤蓄水量; 马铃薯产量

Synergistic effect of no-tillage or sub-soiling tillage with straw mulching increasing soil carbon, nitrogen and water storage and potato yield

ZHANG Long, LI Jian, ZHAO Fu-gui, LI Dan, HOU Xian-qing, LI Rong*
(School of Agriculture, Ningxia University, Ningxia, Yinchuan 750021, China)

Abstract: 【Objective】 We studied the effects of tillage methods combined with straw mulching on soil carbon, nitrogen and water storage to provide technical and theoretical support for water-saving potato production in southern Ningxia. 【Methods】 A field experiment was conducted from 2014 to 2016 in Guyuan City, Ningxia.

收稿日期: 2022-04-18 接受日期: 2022-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860362, 32160515); 宁夏自然科学基金项目(2021AAC03003, 2022AAC03061)。

联系方式: 张龙 E-mail: zhanglongax0905@163.com; * 通信作者 李荣 E-mail: lirong_mail@126.com

There were six treatments, including no-tillage with and without straw mulching (NS, NN), sub-soiling tillage with and without straw mulching (SS, SN), and traditional tillage with and without straw mulching (CS, CN). The organic carbon and total nitrogen (TN) in 0–20 cm and 20–40 cm soil layer were determined at maturing stage of potato in 2016. Soil samples were collected at 0–200 cm deep every 20 cm to determine the water storage before sowing and the key growth stages of potato. The potato plants were sampled at whole growing stages to investigate aboveground biomass (AB), while potato yield was investigated at harvest. **【 Results 】** Compared with no straw mulching in the three tillage methods, straw mulching ($P<0.05$) increased soil total C and N content and water storage. SS treatment had higher soil C and N than CN (29.9% and 24.7%) in the 0–20 cm layer; NS recorded the highest soil C and N in the 20–40 cm layer. Before sowing potatoes, the highest soil water storage in 2014 and 2015 was recorded in NS and SS, respectively. SS ($P<0.05$) increased the potato's mean soil water storage at key growth stages by 21.6% and 26.0% in 2014 and 2016, respectively. Similarly, NS increased mean soil water storage by 17.2% in 2015. According to the logistic growth equation simulation, the potato's rapid growth stage was the earliest in SS treatment. The maximum accumulation rate of potato biomass was higher in NS in 2014 and SS in 2015 and 2016. NS treatment recorded the highest potato yield in 2014, with an increase of 51.8% over CN. Similarly, SS had the highest yield in 2015 and 2016, increased by 36.7% and 87.5% over CN. Annual precipitation, tillage method, and straw mulching were highly significant on soil water storage, potato aboveground biomass and yield. Straw mulching ($P<0.05$) affected soil C and N contents. Potato yield was ($P<0.05$) positively correlated with soil C, and potato yield had a significantly positive relationship with soil N, water storage and potato biomass. We found a ($P<0.05$) correlation among soil C, N, and water storage.

【 Conclusions 】 Combining the three tillage methods with straw mulching increases the soil carbon and nitrogen contents in the 0–40 cm layer and water storage in the 0–200 cm layer throughout the potato growing period, promoting the accumulation of aboveground biomass and potato yield. Applying straw mulching to the subsoiling increases soil C and N in the 0–20 cm layer, rapidly enhances the growth stages and fosters optimum biomass accumulation in dry years. No-tillage with straw mulching treatment had the highest yield in the first year but was lower than the range recorded under subsoiling with straw mulching and conventional tillage with straw mulching. Therefore, comprehensively considering the synergistic effect of soil carbon, nitrogen, water storage and crop yield, the application of straw mulching to no-tillage and sub-soiling are recommended for the potato production in southern Ningxia.

Key words: no-tillage; subsoiling; straw mulching; soil carbon and nitrogen; soil water storage; potato yield

马铃薯为世界四大粮食作物之一^[1]。我国西北黄土丘陵旱作农业生产区, 年降水有限, 且大多以无效、微效降水为主, 制约着马铃薯的生长和产量的提高^[2]。此外, 该区常年采用传统铧犁对土壤进行频繁耕作、耙耱, 严重破坏了 0—15 cm 土层的土壤结构和团聚体稳定性, 致使土壤有机质分解, 养分流失, 保水能力变差, 耕地质量整体降低^[3-4]。因此, 亟需研究适宜的耕作和培肥措施来增加土壤肥力, 提高作物生育期的水肥供应, 实现旱地作物增产增收。

少耕和免耕在一定程度上可以增碳、保水, 改善土壤通透性^[5-6], 深松可打破犁底层, 降低土壤容重, 有利于雨水下渗, 促进根系下扎, 提高深层土壤养分的有效性^[7]。但也有研究发现, 长期免耕会导致土壤紧实, 不利于作物根系生长和产量的提高,

连年深松降低土壤水分的蓄存^[4]。旱地土壤实施秸秆地表覆盖不仅能够提高耕层土壤碳、氮含量, 还可改善田间水分状况, 促进作物生长和增产^[8-9]。研究表明, 耕作结合秸秆覆盖能减轻土壤干燥程度, 增加土壤蓄水量^[10], 协调农田土壤水、热及养分环境, 促进马铃薯生育中后期生长^[11]。殷文等^[12]试验结果表明, 免耕覆盖秸秆能够促进作物生物量累积, 进而提高玉米产量。宋霄君等^[13]研究表明, 深松结合秸秆覆盖提高土壤表层 (0—20 cm) 碳氮含量的效果优于免耕覆盖。本研究连续 3 年开展大田定位试验, 比较了不同耕作方式结合秸秆覆盖下旱地土壤有机碳、全氮及蓄水量, 调查了马铃薯的生长和产量, 为西北黄土丘陵旱作马铃薯高产栽培和可持续发展提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2014—2016 年在宁夏固原市彭阳县城阳乡长城塬旱作农业试验站实施。研究区位于宁夏南部山区, 为西北黄土丘陵区 (E106°52', N36°15'), 平均海拔 1800 m, 年平均降水量 431 mm 左右, 且时空分布不均, 7—9 月占全年降雨量 60% 以上, 属典型雨养区。年均气温 8.1℃, 无霜期 120~160 天。2014、2015 和 2016 年降水总量分别为 396.3、463.2、369.0 mm, 马铃薯生育期 (5—9 月) 降水量分别为 283.4、331.7、248.4 mm。本研究采用国内较常用的降水年型划分标准^[14]划分试验年降水类型。丰水年: $p_i > \bar{p} + 0.33\delta$, 干旱年: $p_i < \bar{p} - 0.33\delta$, 式中: p_i 为试验当年降雨量 (mm), $\bar{p}$ 为多年平均降雨量 (mm), δ 为多年降雨量的均方差。根据宁夏彭阳县 40 年 (1977—2016 年) 平均降水量 (430.5 mm) 和均方差 (99.4 mm) 数据, 丰水年降雨量 >472.3 mm, 干旱年降雨量 <406.7 mm。将试验年份降水年型进行划分, 2014 和 2016 年为干旱年份, 2015 年为平水年份。试验田为旱塬地, 地势平坦, 土壤为黄绵土。播种前 0—40 cm 土层土壤有机碳、全氮含量分别为 4.36、0.60 g/kg, 速效氮、磷、钾含量分别为 58.6、8.4、150 mg/kg, 属低等肥力水平。

1.2 试验设计

试验共设置 6 个处理, 分别为免耕秸秆覆盖 (NS)、免耕不覆盖 (NN)、深松秸秆覆盖 (SS)、深松不覆盖 (SN)、传统耕作秸秆覆盖 (CS)、传统耕作不

覆盖 (CN), 随机区组排列, 3 次重复, 18 个小区, 各小区长宽分别为 4 和 9 m。试验处理及耕作管理如表 1, 秸秆为玉米秸秆。

试验地 2013 年前为春玉米, 已采用传统耕作方式多年。供试马铃薯品种为陇薯 3 号, 平作栽培方式, 宽窄行种植 (宽行 60 cm, 窄行 40 cm, 株距 40 cm), 种植密度 5 万株/hm², 穴播后少量覆土。试验期间无水浇灌, 人工除草。施肥处理结合秋耕实行施肥, 施肥量为农家肥 (腐熟牛粪) 30 t/hm², 尿素 (N≥46%) 150 kg/hm², 磷酸二铵 (N≥18%, P₂O₅≥46%) 150 kg/hm², 硫酸钾 (K₂O≥50%) 150 kg/hm²。马铃薯分别于 2014 年 4 月 28 日、2015 年 5 月 2 日和 2016 年 5 月 4 日播种, 于 2014 年 10 月 3 日、2015 年 9 月 23 日和 2016 年 10 月 2 日收获。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤有机碳和全氮含量测定 2013 年试验田处理前和 2016 年 10 月马铃薯收获后采集 0—20、20—40 cm 土层土样, 装入自封袋中带回实验室风干、磨细, 过 0.25 mm 筛, 分别采用重铬酸钾容量法—外加热法、凯氏定氮法^[15]测定有机碳和全氮含量。

1.3.2 土壤水分测定 在马铃薯播种、现蕾 (播后 60 天)、块茎形成 (播后 90 天) 及块茎膨大期 (播后 120 天), 利用土钻采取 0—200 cm 土层鲜土样, 每 20 cm 为 1 层, 烘干法测定土壤质量含水量, 重复 3 次。

土壤蓄水量^[15]公式:

$$W = 10 \times h \times a \times b$$

式中: W 为土壤蓄水量 (mm); 10 为换算系数 (cm 换算为 mm); h 为土层深度 (cm); a 是土壤容重 (g/cm³);

表 1 试验处理具体实施方法

Table 1 Practices for each experimental treatment

处理 Treatment	具体方法 Practice details	代码 Code
免耕秸秆覆盖 No tillage with straw mulching	马铃薯收获后, 不耕作, 土壤以玉米秸秆均匀覆盖 After potato harvest, no tillage and the soil was mulched directly with maize straw	NS
免耕秸秆不覆盖 No tillage without straw mulching	试验期内不进行耕作, 土壤也不覆盖秸秆 No-tillage, and no maize straw mulching throughout the experiment	NN
深松秸秆覆盖 Sub-soiling with straw mulching	马铃薯收获后至冻结前, 间隔深松土壤, 间距40 cm, 深度30 cm, 然后用玉米秸秆覆盖土壤 After potato harvest and before frozen, subsoiling to 30 cm deep with the interval of 40 cm, then mulching with maize straw	SS
深松秸秆不覆盖 Sub-soiling without straw mulching	耕作方法同SS, 无秸秆覆盖 Tillage was the same as SS, no maize straw mulching	SN
传统耕作秸秆覆盖 Traditional tillage with straw mulching	作物收获后至冻结前, 耙、耢各1次, 翻耕约20 cm深, 玉米秸秆覆盖 After potato harvest and before frozen, ploughing (20 cm deep) and harrowing the soil, then mulching with maize straw	CS
传统耕作秸秆不覆盖 Traditional tillage without straw mulching	耕作方法同CS, 不覆盖秸秆 Tillage was the same as CS, but no straw mulching of the soil	CN

b 是土壤含水率(%)。

1.3.3 马铃薯块茎生长特征模拟预测 在马铃薯播种后 30、60、90、120、150 天定期取植株样 5 株,测定马铃薯地上部生物量,利用 Logistic 方程^[12]计算并拟合马铃薯生长期相关特征值,方程式为:

$$Y = \frac{K_m}{1 + ae^{-bt}}$$

式中: Y 为马铃薯某一时期生物量观测值 (t/hm^2); K_m 为马铃薯生物量理论最大值 (t/hm^2); t 为播种后天数 (d); a 、 b 为方程特定拟合参数。

将 Logistic 方程进行一、二阶求导,得到马铃薯生物量快速增长期起始时间 T_1 (d); 快速增长期终止时间 T_2 (d); 最大累积速率 V_{max} [$t/(hm^2 \cdot d)$]; a 、 b 、 K_m 同上,具体公式如下:

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

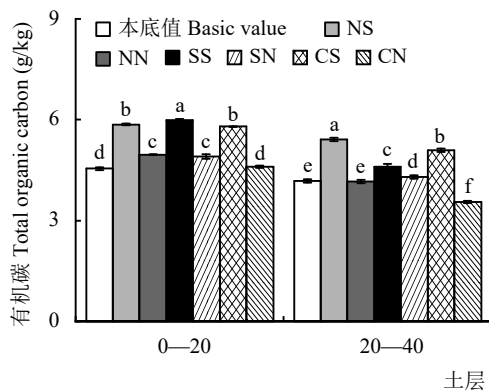
$$T_2 = \frac{1}{b} \times \ln \frac{a}{2 - \sqrt{3}}$$

$$V_{max} = \frac{K_m \times b}{4}$$

1.3.4 马铃薯产量测定 于马铃薯收获期测定各小区产量,重复 3 次,最后折算成单位面积产量。

1.4 数据分析与绘图

利用 Excel 2016 进行数据整理和计算,利用 DPS 2005 软件进行多重比较,运用 SPSS 21.0 进行皮尔逊相关性分析和方差分析;采用 Origin 2021 绘制图表,应用 Curve Expert 模拟 Logistic 方程参数。



2 结果与分析

2.1 耕作结合秸秆覆盖对土壤有机碳和全氮含量的影响

连续 3 年不同耕作和秸秆覆盖处理 2016 年收获期 0—40 cm 土层有机碳和全氮含量测定结果(图 1)表明,各处理 0—40 cm 土层有机碳(除 NN 和 CN 处理 20—40 cm 土层)和全氮含量较试验开始前均有所增加,且 0—20 cm 土层有机碳和全氮含量增幅明显高于 20—40 cm 土层。耕作结合秸秆覆盖处理下 0—20 cm 土层有机碳和全氮含量均以 SS 处理最高,分别较 CN 处理显著增加 29.9% 和 24.7%,在 20—40 cm 土层以 NS 处理最高,较 CN 处理分别显著增加 52.4% 和 27.4%。

0—20 cm 土层,在相同耕作管理措施下,NS、SS 和 CS 处理总有机碳和全氮含量均显著高于秸秆不覆盖处理,土壤有机碳含量分别提高 18.1%、22.2% 和 25.6%,全氮含量分别显著提高 16.7%、26.3% 和 21.0%。20—40 cm 土层,NS、SS 和 CS 处理土壤有机碳含量分别比同种耕作措施下不覆盖处理显著提高 30.0%、7.2% 和 43.4%,全氮含量分别显著提高 19.7%、5.6% 和 22.6%。无秸秆覆盖时 0—20 cm 土层土壤有机碳和全氮含量以 NN 处理最高,20—40 cm 土层以 SN 处理最高。

2.2 耕作结合秸秆覆盖对土壤蓄水量的影响

连续 3 年不同耕作结合秸秆覆盖可显著提高马

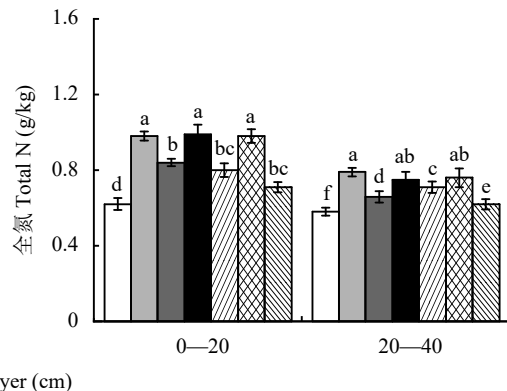


图 1 不同处理 0—20 和 20—40 cm 土层土壤有机碳及全氮含量

Fig. 1 Total soil organic carbon and total nitrogen in 0—20 and 20—40 cm soil layers under different treatments

注:本底值为 2013 年数据,其他为 2016 年数据;NS—免耕秸秆覆盖处理;NN—免耕秸秆不覆盖处理;SS—深松秸秆覆盖处理;SN—深松秸秆不覆盖处理;CS—传统耕作秸秆覆盖处理;CN—传统耕作秸秆不覆盖处理。柱上不同小写字母表示同一土层处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: The basic value was in 2013, and the others were in 2016. NS—No-tillage with straw mulching treatment; NN—No-tillage without straw mulching treatment; SS—Sub-soiling tillage with straw mulching treatment; SN—Sub-soiling tillage without straw mulching treatment; CS—Traditional tillage with straw mulching treatment; CN—Traditional tillage without straw mulching treatment. Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments of the same layer at the 0.05 level.

铃薯播种期和关键生育期(现蕾期、块茎形成和块茎膨大期)土壤蓄水量(表2)。播种期,在相同耕作管理措施下,2014年(干旱年)NS、SS和CS处理土壤蓄水量分别比秸秆不覆盖处理显著提高6.4%、4.8%和6.3%,2015年(平水年)分别显著提高7.7%、9.3%和9.0%,2016年(干旱年)分别显著提高25.1%、31.1%和24.2%。无秸秆覆盖时2014年土壤蓄水量以SN处理最高,2015和2016年均以NN处理最高。综合所有处理,2014年土壤蓄水量以NS处理效果最佳,较CN处理显著增加6.4%,2015和2016年土壤蓄水量均以SS处理效果最佳,较CN处理分别显著增加11.4%和29.6%。

马铃薯进入关键需水阶段,各处理0—200 cm土层蓄水量急剧下降。在相同耕作管理措施下,2014年NS、SS和CS处理各生育期土壤蓄水量分别比秸秆不覆盖处理平均显著提高14.6%、18.0%和15.9%,

2015年分别平均显著提高14.9%、10.4%和11.8%,2016年分别平均显著提高22.4%、23.9%和21.65%。无秸秆覆盖时,干旱年和平水年关键生育期土壤蓄水量均以SN处理最高。综合所有处理,2014年各生育期土壤蓄水量以SS处理效果最好,平均较CN处理显著增加21.6%;2015年各生育期土壤蓄水量以NS处理效果最好,平均较CN处理显著增加17.2%;2016年现蕾期以NS处理土壤蓄水量效果最好,较CN处理显著增加26.4%,块茎形成期和膨大期以SS处理效果最好,平均较CN处理显著增加28.3%,马铃薯关键生育期SS处理较CN处理土壤蓄水量增加26.0%。可见,不同耕作结合地表秸秆覆盖具有很好的保水效果。

2.3 耕作结合秸秆覆盖对马铃薯地上部生物量累积动态的影响

以天数为变量,利用Logistic自然生长方程对马

表2 不同处理马铃薯播种期及关键生育期0—200 cm土层蓄水量(mm)

Table 2 Soil water storage (0–200 cm) in sowing and key growth period of potato under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	播种 Sowing	现蕾 Budding	块茎形成 Tuber initiation	块茎膨大 Tuber expansion
2014	NS	506.6 a	380.6 b	363.3 b	344.3 b
	NN	476.0 b	345.6 d	303.3 d	300.8 d
	SS	504.4 a	431.8 a	382.9 a	360.9 a
	SN	481.4 b	368.2 c	325.8 c	302.3 d
	CS	506.1 a	426.4 a	363.4 b	330.2 c
	CN	476.2 b	364.0 c	299.8 d	302.8 d
2015	NS	556.6 a	469.4 a	381.4 a	357.7 a
	NN	516.6 b	413.9 d	326.8 c	311.1 c
	SS	557.6 a	467.0 a	369.9 b	344.9 b
	SN	510.3 b	430.1 c	328.3 c	312.2 c
	CS	545.9 a	445.0 b	370.3 b	338.0 b
	CN	500.6 b	398.9 e	325.6 c	307.1 c
2016	NS	500.7 a	441.5 a	412.4 b	375.5 b
	NN	400.3 c	354.2 cd	330.6 c	319.6 c
	SS	505.4 a	425.0 b	437.3 a	396.0 a
	SN	385.5 d	361.3 c	334.1 c	320.0 c
	CS	484.3 b	417.9 b	406.9 b	389.8 a
	CN	389.9 d	349.3 d	330.2 c	318.9 c

注: NS—免耕秸秆覆盖处理; NN—免耕秸秆不覆盖处理; SS—深松秸秆覆盖处理; SN—深松秸秆不覆盖处理; CS—传统耕作秸秆覆盖处理; CN—传统耕作秸秆不覆盖处理。同列数据后不同小写字母表示处理间在0.05水平差异显著。
Note: NS—No-tillage with straw mulching treatment; NN—No-tillage without straw mulching treatment; SS—Sub-soiling tillage with straw mulching treatment; SN—Sub-soiling tillage without straw mulching treatment; CS—Traditional tillage with straw mulching treatment; CN—Traditional tillage without straw mulching treatment. Values followed by different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.

表 3 不同处理下马铃薯地上部生物量动态累积模型参数特征值

Table 3 Parameters and eigenvalues of above-ground biomass accumulation model of potato under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	拟合参数 Parameter			R^2	快速增长期特征值 Eigenvalue at rapid growth period				
		K_m (t/hm ²)	a	b		T_1 (d)	T_2 (d)	T_0 (d)	ΔT (d)	V_{max} [t/(hm ² ·d)]
2014	NS	124.9	306.6	0.08	0.93	56.5	90.3	73.4	33.8	2.44
	NN	100.1	1207.8	0.09	0.95	62.8	91.5	77.1	28.9	2.30
	SS	121.3	291.3	0.08	0.94	55.9	89.6	72.8	33.9	2.36
	SN	95.6	699.1	0.09	0.94	57.5	86.5	72.0	30.6	2.18
	CS	112.1	452.9	0.08	0.90	58.5	90.6	74.6	32.1	2.30
	CN	78.3	559.9	0.09	0.91	58.3	88.9	73.6	28.6	1.68
2015	NS	89.1	1342.7	0.09	0.98	66.9	96.8	81.9	29.9	1.96
	NN	75.9	26141.4	0.12	0.92	75.0	97.4	86.2	22.3	2.24
	SS	99.2	2646.4	0.10	0.95	66.3	92.9	79.6	26.6	2.46
	SN	80.7	4317.8	0.10	0.92	71.3	97.9	84.6	26.6	2.00
	CS	87.2	2736.0	0.09	0.98	70.2	98.2	84.2	28.0	2.05
	CN	67.8	81667.3	0.13	0.99	76.3	96.4	86.3	20.1	2.22
2016	NS	91.8	334.2	0.08	0.99	56.9	89.1	72.7	33.9	1.84
	NN	68.8	425.4	0.08	0.94	60.0	93.3	76.6	32.3	1.36
	SS	89.9	406.4	0.09	0.94	52.1	81.4	66.8	35.2	2.02
	SN	74.5	315.2	0.08	0.93	59.2	94.3	76.7	29.1	1.40
	CS	79.0	563.9	0.09	0.98	57.0	87.0	72.0	29.9	1.74
	CN	57.5	1100.0	0.10	0.90	58.6	85.8	72.2	27.2	1.39

注: NS—免耕秸秆覆盖处理; NN—免耕秸秆不覆盖处理; SS—深松秸秆覆盖处理; SN—深松秸秆不覆盖处理; CS—传统耕作秸秆覆盖处理; CN—传统耕作秸秆不覆盖处理。 T_1 —快速增长初期; T_2 —快速增长末期; ΔT —快速增长期持续时间; T_0 —最快增长点出现时间; V_{max} —最大累积速率; R^2 —单位时间与地上部生物量拟合优度。

Note: NS—No-tillage with straw mulching treatment; NN—No-tillage without straw mulching treatment; SS—Sub-soiling tillage with straw mulching treatment; SN—Sub-soiling tillage without straw mulching treatment; CS—Traditional tillage with straw mulching treatment; CN—Traditional tillage without straw mulching treatment. T_1 —Earlier rapid growth phase; T_2 —Late rapid growth stage; ΔT —Rapid growth duration; T_0 —Time for rapist growing point appear; V_{max} —Maximum accumulation rate at rapid growing point; R^2 —Fit goodness between unit time and aboveground biomass.

铃薯地上生物量进行参数模拟和定量分析, 结果(表 3)发现, 不同耕作结合秸秆覆盖处理下马铃薯地上部生物量随生育进程的 Logistic 模型拟合优度($R^2>0.9$)良好。马铃薯地上部生物量累积快速增长期 3 年均以 SS 处理起始最早, 较 CN 处理分别提前 2.4、10.0 和 6.5 天。快速增长持续期在 2015 年(平水年)以 NS 处理最长, 较 CN 处理延长 9.8 天, 2014 年(干旱年)和 2016 年(干旱年)均以 SS 处理最长, 较 CN 处理分别延长 3.3 和 8.1 天。最大累积速率在 2014 年以 NS 处理最高, 较 CN 处理提高 45.2%, 2015 和 2016 年均以 SS 处理最高, 较 CN 处理分别提高 15.3% 和 45.3%。

与同种耕作措施下秸秆不覆盖处理相比, 2014

年 NS、SS 和 CS 处理快速增长持续期分别延长 5.1、5.0 和 1.5 天, 最大累积速率分别提高 6.1%、8.3% 和 36.9%; 2015 年 NS 和 CS 处理快速增长持续期分别延长 7.6 和 7.9 天, SS 处理最大累积速率提高 23.0%; 2016 年 NS、SS 和 CS 处理快速增长持续期分别延长 1.6、6.2 和 2.8 天; 最大累积速率分别提高 35.3%、44.3% 和 25.2%。无秸秆覆盖时, 马铃薯地上部生物量 3 年快速增长累积持续期均以 SN 处理最长。快速增长期内的最大累积速率在 2014 和 2015 年以 NN 处理最高, 2016 年以 SN 处理最大。

2.4 耕作结合秸秆覆盖对马铃薯产量的影响

连续 3 年不同耕作和秸秆覆盖处理马铃薯产量测定结果(图 2)显示, 各处理下马铃薯产量以 2014

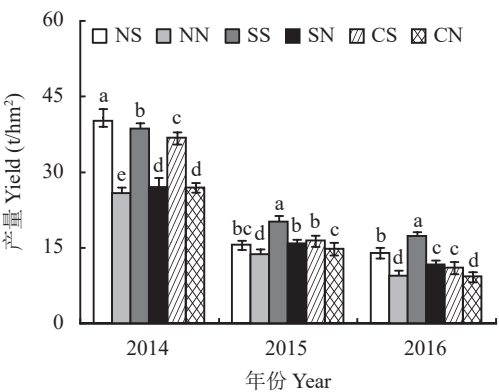


图 2 不同处理下马铃薯产量

Fig. 2 Potato yield under different treatments

注: NS—免耕秸秆覆盖处理; NN—免耕秸秆不覆盖处理; SS—深松秸秆覆盖处理; SN—深松秸秆不覆盖处理; CS—传统耕作秸秆覆盖处理; CN—传统耕作秸秆不覆盖处理。柱上不同字母表示同一年处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: NS—No-tillage with straw mulching treatment; NN—No-tillage without straw mulching treatment; SS—Sub-soiling tillage with straw mulching treatment; SN—Sub-soiling tillage without straw mulching treatment; CS—Traditional tillage with straw mulching treatment; CN—Traditional tillage without straw mulching treatment. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same year at the 0.05 level.

年(干旱年)最高, 2015 年(平水年)次之, 2016 年(干旱年)最低。在所有处理中, 2014 年马铃薯产量以 NS 处理最高, 较 CN 处理显著提高 51.8%, 2015 和 2016 年均以 SS 处理最高, 分别较 CN 处理显著

提高 36.7% 和 87.5%。

在相同耕作管理措施下, 2014 年 NS、SS 和 CS 处理马铃薯产量分别比秸秆不覆盖处理显著提高 58.7%、43.2% 和 36.6%, 2015 年分别显著提高 14.1%、27.3% 和 10.8%, 2016 年分别显著提高 49.0%、49.2% 和 19.6%。无秸秆覆盖时马铃薯产量 3 年均以 SN 处理最高。

2.5 耕作结合秸秆覆盖下马铃薯生长与产量对土壤碳、氮、水含量的响应

表 4 结果表明, 耕作方式、秸秆覆盖措施及两者交互作用对土壤有机碳均有极显著影响 ($P<0.01$), 秸秆覆盖对土壤全氮影响极显著 ($P<0.01$)。降水年份、耕作方式、秸秆覆盖措施、年份与秸秆覆盖交互作用对马铃薯关键生育期土壤蓄水量和地上部生物量均有极显著影响 ($P<0.01$), 耕作与秸秆覆盖措施交互作用、降水年份与耕作、覆盖三者交互的效应也达到显著水平 ($P<0.05$)。年份、耕作方式、秸秆覆盖以及其两两之间或三者之间的交互作用对马铃薯产量的影响均达到极显著水平 ($P<0.01$)。

相关性分析结果(表 5)表明, 马铃薯产量与土壤有机碳呈显著正相关性, 与土壤全氮、马铃薯播种和关键生育期(现蕾、块茎形成和块茎膨大期)土壤蓄水量以及生物量均呈极显著正相关。此外还发现, 土壤有机碳、全氮以及蓄水量之间存在极显著

表 4 试验年份、耕作方法和秸秆覆盖对土壤肥力和马铃薯产量的效应分析

Table 4 ANOVA on the effects of experimental year, tillage method, and straw mulching on soil fertility and potato yield

因子 Factor	试验年份 (E) Experimental year	耕作方式 (T) Tillage method	秸秆覆盖 (M) Straw mulching	E×T	E×M	T×M	E×T×M
X_1		81.15**	2341.90**			79.76**	
X_2		0.08 ^{ns}	215.28**			0.88 ^{ns}	
X_3	915.16**	10.29**	1260.48**	2.61 ^{ns}	199.10**	1.78 ^{ns}	3.33*
X_4	1017.08**	76.52**	3200.92**	99.80**	62.40**	2.13 ^{ns}	25.78**
X_5	917.29**	139.50**	8698.71**	48.11**	289.78**	5.69**	26.41**
X_6	225.73**	15.14**	1611.00**	10.28**	58.66**	8.94**	11.26**
X_7	226.19**	30.68**	284.61**	2.84*	9.82**	2.36 ^{ns}	3.45*
X_8	7969.374**	1601.499**	9976.06**	94.25**	171.935**	46.408**	177.637**
X_9	3367.76**	358.29**	4537.41**	41.85**	67.08**	4.71*	42.26**
Y	3546.57**	52.21**	876.87**	15.45**	198.89**	19.33**	6.90**

注: $X_1 \sim X_2$ 分别指 0—40 cm 土层平均有机碳和全氮; $X_3 \sim X_6$ 分别指马铃薯播种、现蕾、块茎形成和块茎膨大期 0—200 cm 土层蓄水量; $X_7 \sim X_9$ 分别指现蕾、块茎形成和块茎膨大期马铃薯地上部生物量; Y—马铃薯产量。*— $P<0.05$; **— $P<0.01$; ns—不显著。

Note: $X_1 \sim X_2$ were the organic carbon and total N in 0—40 cm soil layer; $X_3 \sim X_6$ were the water storage in 0—200 cm soil layer at sowing, budding, tuber formation and tuber expansion stage of potato; $X_7 \sim X_9$ were the aboveground biomass of potato at the budding, tuber formation and tuber expansion stage; Y—Potato yield. *— $P<0.05$; **— $P<0.01$; ns—No significant effect.

表 5 土壤有机碳、全氮、蓄水量和生物量与马铃薯产量的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of soil organic carbon, total nitrogen, water storage, and potato biomass and yield

指标 Index	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
X_2	0.986**								
X_3	0.948**	0.984**							
X_4	0.929**	0.973**	0.974**						
X_5	0.928**	0.975**	0.988**	0.996**					
X_6	0.916*	0.968**	0.993**	0.985**	0.996**				
X_7	0.895*	0.931**	0.932**	0.958**	0.959**	0.948**			
X_8	0.869*	0.901*	0.912*	0.932**	0.937**	0.929**	0.988**		
X_9	0.928**	0.956**	0.962**	0.965**	0.972**	0.967**	0.987**	0.988**	
Y	0.856*	0.920**	0.946**	0.969**	0.975**	0.973**	0.982**	0.963**	0.969**

注: X_1 ~ X_2 分别指收获期0—40 cm土层平均土壤有机碳和全氮; X_3 ~ X_6 分别指马铃薯播种、现蕾、块茎形成和块茎膨大期0—200 cm土层土壤蓄水量; X_7 ~ X_9 分别指现蕾、块茎形成和块茎膨大期马铃薯地上部生物量; Y —3年马铃薯平均产量。*— $P<0.05$; **— $P<0.01$; ns—效果不显著。

Note: X_1 ~ X_2 were the average soil organic carbon and total N in 0—40 cm soil layer at harvest; X_3 ~ X_6 were the soil water storage in 0—200 cm layer at the sowing, budding, tuber formation and tuber expansion stage of potato; X_7 ~ X_9 were the aboveground biomass of potato at the budding, tuber formation and tuber expansion stage; Y —Average potato yield for 3 years. *— $P<0.05$; **— $P<0.01$; ns—No significant effect.

正相关关系。结合方差分析和相关性分析结果得知, 耕作结合秸秆覆盖措施能够实现土壤碳、氮、水之间的协同效应, 进而促进马铃薯地上部生物量累积和块茎产量的提高。

3 讨论

3.1 耕作结合秸秆覆盖对土壤有机碳和全氮含量的影响

与传统耕作相比, 少耕和免耕结合秸秆覆盖措施可提高土壤耕层有机碳的积累, 进而促进作物增产和养分的高效利用^[16]。本试验中, 3个耕作方式下, 秸秆覆盖处理的有机碳和全氮含量均高于不覆盖处理, 其中0—20 cm土层以深松覆盖秸秆处理最高, 20—40 cm土层以免耕覆盖秸秆处理最高。这主要因为覆盖秸秆进入土壤后, 增加了微生物数量和活性, 促进了秸秆的降解和对氮素的固持^[17]。深松能够破除犁底层, 促进作物根系向深层分布, 提高作物对深层土壤养分的吸收利用^[7]; 而免耕土壤容重较大, 作物根系生长受阻, 减少了对深层土壤养分的吸收^[18]。此外, 深松改善了土壤亚表层(20—35 cm)通气条件, 加速了该层的土壤有机质矿化^[19], 而免耕措施下土壤结构稳定, 下层(20—40 cm)微团聚体和黏粒结合的有机碳稳定性高于上层(0—20 cm), 不易被微生物分解利用^[20-21]。与试验开始时相比, 3个耕作措施结合秸秆覆盖处理的0—20 cm土层有机碳和

全氮含量增幅明显高于20—40 cm土层, 这是因为秸秆整秆覆盖, 没有进行加工粉碎处理翻入土壤, 从而暴露于土壤表面致使分解速率下降^[22]。此外, 无秸秆覆盖时深松处理的20—40 cm土层有机碳含量均高于免耕和传统耕作, 而免耕和传统耕作下的有机碳含量较试验处理前均有所下降, 以传统耕作方式降幅最大, 这与王碧胜等^[22]的研究结果相似。究其原因, 在无秸秆投入条件下, 免耕处理导致土壤容重增加, 阻止了根系在深层的分布, 进而使地上凋落物或秸秆还田下的外源有机残渣积累在表层, 导致耕层碳氮等养分出现分层化, 而传统耕作对土壤翻动频繁, 导致土壤结构破坏严重, 加快了地表有机物质的矿化流失^[23]。

3.2 耕作结合秸秆覆盖对土壤水分的影响

有研究报道, 休闲期免耕/深松轮耕结合覆盖措施较传统耕作不覆盖可提高春玉米播种期0—200 cm土层土壤贮水量^[24]。邓妍等^[25]研究发现, 夏休闲翻耕覆盖可显著提高作物播前土壤蓄水量, 以丰水年效果最佳。本研究结果(表2)表明, 不同耕作覆盖秸秆对马铃薯播种期0—200 cm土层蓄水量均有不同程度的提高, 2014年(干旱年)以免耕覆盖秸秆处理土壤蓄水量最高, 2015年(平水年)和2016年(干旱年)均以深松覆盖秸秆处理最高, 而传统耕作无秸秆覆盖处理土壤蓄水量最低, 究其原因: 1)耕作覆盖措施对作物播种期土壤水分的影响主要依赖于休闲期降雨量和耕作措施^[26], 且保护性耕作在作物播前未进

行耕作因而减少了土壤扰动^[27]; 2) 秋季作物收获后进行深松结合秸秆覆盖能增加休闲期降水入渗, 及时补充土壤水分, 缓解干旱年水分匮乏^[28], 免耕结合秸秆覆盖可降低春季土壤水分蒸发损失^[29], 而传统耕作方式扰动土壤频繁, 使土壤水分蒸发强烈^[11]。

李荣等^[29]研究表明, 深松覆盖秸秆对马铃薯生育中后期土壤蓄水量有显著的提升效果。刘继龙等^[30]研究认为, 免耕和传统耕作结合秸秆覆盖可显著提高玉米生育后期土壤蓄水量, 尤其以免耕覆盖秸秆处理对水分影响最为显著。本研究结果(表 2)表明, 深松结合秸秆覆盖能提高干旱年份(2014 年和 2016 年)马铃薯块茎形成期和膨大期土壤蓄水量, 而免耕覆盖秸秆措施可增加平水年份(2015 年)马铃薯关键生育期土壤蓄水量, 这是由于在干旱年份, 深松结合秸秆覆盖不仅可降低作物生育前期土壤水分蒸发, 还能促进生育后期降雨入渗^[29]; 在平水年份, 免耕结合秸秆覆盖在抑制水分散失的同时, 还能减弱与地表水分的交换, 使深层水分上移, 进而提高土壤的蓄水量^[31]。

3.3 耕作结合秸秆覆盖对马铃薯产量的影响

Logistic 方程能准确反映作物地上生物量累积动态状况, 而作物地上部生物量积累速率与耕作方式^[32]、覆盖措施^[33]关系密切。普雪可等^[33]研究表明, 沟垄耕作结合秸秆覆盖较传统耕作能够提高作物地上部生物量累积速率和理论最大值, 并延长快速累积持续时间。本研究通过 Logistic 对马铃薯地上部生物量动态增长模拟发现(表 3), 秸秆覆盖处理的地上部生物量累积理论最大值均高于不覆盖处理, 与传统耕作相比, 不同耕作结合秸秆覆盖能够显著提高马铃薯地上部生物量快速增长期内的最大累积速率, 使其提前进入快速累积期, 并延长持续时间。这是因为耕作覆盖措施可为马铃薯生长发育提供较好的土壤水热环境, 而传统耕作方式下植株易受干旱和高温胁迫, 限制马铃薯生物量累积^[34]。

在干旱地区, 深松和免耕结合秸秆覆盖可改善土壤肥力, 提高作物产量^[35]。李荣等^[29]研究表明, 深松秸秆覆盖与传统耕作相比可提高作物产量。本研究结果(图 2)表明, 耕作措施、秸秆覆盖及其两者交互均能显著提高马铃薯产量, 免耕结合秸秆覆盖处理在 2014 年(干旱年)增产效果最好, 而在 2015 年(平水年)和 2016 年(干旱年)以深松结合秸秆覆盖处理增产效果好, 分析其原因: 一, 秋季深松能积蓄更多的秋季雨水, 实现秋雨春用^[29,35], 同时秸秆覆盖下较好的水分条件在一定程度上弥补低温对马铃

薯生育前期生长的影响, 且能降低中后期高温胁迫对块茎生长的不利影响, 从而显著提高马铃薯产量^[36-37]。二, 可能与试验期间免耕秸秆覆盖和深松覆盖秸秆处理年际间土壤水分蓄存有关。本研究还发现, 秸秆覆盖下不同耕作处理的马铃薯产量随种植年份延长都表现出下降趋势, 这可能与试验期间马铃薯连作种植有关, 一方面主要是因为作物连作引起了土壤养分失衡和微生物菌群结构失调^[38], 另一方面连作致使土壤性质恶化, 形成了特定土壤环境和根际条件, 影响土壤微生物活动, 造成有益微生物量减少^[39], 再加上地表秸秆覆盖后田间水热环境改善, 为病虫的生存提供了有利环境, 从而影响马铃薯的正常生命活动, 导致连作使其产量下降。

3.4 耕作结合秸秆覆盖下土壤碳氮水协同效应对马铃薯产量的影响

在秸秆覆盖或还田条件下进行保护性耕作可改善土壤环境质量, 增强水肥耦合效应, 实现土壤碳氮水协同效应的总体提升, 进而提高作物产量^[40-41]。通过方差和相关性分析结果(表 4、表 5)发现, 土壤有机碳、全氮和蓄水量之间存在极显著正相关关系, 土壤碳、氮、水含量与马铃薯产量之间存在显著正相关, 而耕作覆盖秸秆措施可通过提高土壤耕层碳氮含量和马铃薯生育期土壤蓄水量, 进而促进马铃薯地上部生物量累积和块茎产量的提高。究其可能有 3 方面的原因: 1) 深松能有效阻止连年翻耕带来的弊端, 破除犁底层, 提高土壤保水能力, 促进秸秆腐解, 增加表层和耕层养分的累积, 从而达到以水调肥增肥的效果^[40]; 2) 秸秆还田处理使得土壤碳加速循环, 同时又保持土壤碳素的净增, 从而使得较多有机质矿化分解, 产生过多的氮素供作物生长^[42]; 3) 免耕和深松在秸秆材料投入时, 可综合提升土壤碳、氮、水含量, 土壤水分和养分充足, 从而提高作物产量^[41]。然而 3 年研究期间, 不同降雨年型下耕作结合秸秆覆盖对旱作土壤碳、氮、水含量、生物量以及马铃薯产量均有显著影响, 但马铃薯增产效果还与土壤温度、微生物活动及作物阶段耗水状况等因素有关, 且马铃薯产量年际间波动极大, 只涉及两个干旱年和一个平水年, 缺乏丰水年, 因此, 还需进一步通过长年限研究, 才能准确评析耕作结合秸秆覆盖下马铃薯增产机制。本研究还发现, 在秸秆覆盖条件下, 免耕在第一年提高马铃薯产量的效果最佳, 但连年免耕的增产效果不如深松甚至传统耕作。因此, 免耕与深松交替进行,

结合秸秆覆盖可能是宁南旱作区马铃薯生产较为适宜的耕作覆盖措施,然而这仍需在降水年型、土壤肥力、马铃薯与玉米轮作等条件下进行长期定位试验,以验证试验结果的准确性和可靠性。

4 结论

不论何种耕作措施,秸秆覆盖可极显著提高0—40 cm 土层土壤有机碳、全氮含量和0—200 cm 土层水分含量,保证马铃薯稳产高产。在秸秆覆盖条件下,连续深松能够显著提升0—20 cm 土层土壤碳、氮含量,提早马铃薯生物量快速累积期,并在干旱年可延长马铃薯生物量快速增长的持续期和最大累积速率;免耕在第一年提高马铃薯产量的效果最佳,但连续免耕的增产效果不如连续深松甚至传统耕作。因此,综合考虑土壤碳氮水与作物产量的协同效应,建议免耕、深松配合秸秆覆盖措施在宁南山区马铃薯栽培中进行推广应用。

参考文献:

- [1] 侯乾. 连作马铃薯全生育期根际微生物多样性研究及施肥对其的影响[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2020.
Hou Q. The rhizosphere microbial diversity during the growth period of continuous cropping potato and the effect of fertilization[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [2] 侯贤清, 汤京, 余龙龙, 等. 秋耕覆盖对马铃薯生长及水分利用效率的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(2): 165–172.
Hou X Q, Tang J, Yu L L, *et al.* Effect of autumn mulching tillage on growth and water use efficiency of potato[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(2): 165–172.
- [3] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期免耕和深松提高了土壤团聚体颗粒态有机碳及全氮含量[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(2): 334–344.
Li J, Wu H J, Wu X P, *et al.* Long-term conservation tillage enhanced organic carbon and nitrogen contents of particulate organic matter in soil aggregates[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(2): 334–344.
- [4] 侯贤清, 李荣, 贾志宽, 韩清芳. 西北旱作农田不同耕作模式对土壤性状及小麦产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1146–1157.
Hou X Q, Li R, Jia Z K, Han Q F. Effects of different tillage practices on soil properties and wheat yields in dry farmland of northwest China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(5): 1146–1157.
- [5] Ina-I Sanchez, Fultz Lisa-M, Lofton Josh, *et al.* Soil biological response to integration of cover crops and nitrogen rates in a conservation tillage corn production system[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83(5): 1356–1367.
- [6] 冯倩倩, 韩惠芳, 张亚运, 等. 耕作方式对麦—玉轮作农田固碳、保水性能及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(4): 869–879.
Feng Q Q, Han H F, Zhang Y Y, *et al.* Effects of tillage methods on soil carbon sequestration and water holding capacity and yield in wheat–maize rotation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 869–879.
- [7] 郑洪兵, 刘武仁, 罗洋, 等. 耕作方式对农田土壤水分变化特征水分利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 264–270.
Zheng H B, Liu W R, Luo Y, *et al.* Effect of different tillage methods on soil water content and water use efficiency in cropland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 264–270.
- [8] 田效琴, 贾会娟, 熊瑛, 等. 保护性耕作下蚕豆生育期土壤有机碳、氮含量变化与分布特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(5): 1132–1141.
Tian X Q, Jia H J, Xiong Y, *et al.* Changes and distribution characteristics of contents of soil organic carbon and nitrogen in broad bean growth period under conservation tillage[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(5): 1132–1141.
- [9] 苗芳芳, 勉有明, 普雪可, 等. 耕作覆盖对宁南旱区土壤团粒结构及马铃薯水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(11): 2366–2376.
Miao F F, Mian Y M, Pu X K, *et al.* Effects of tillage with mulching on soil aggregate structure and water use efficiency of potato in dry-farming area of southern Ningxia[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(11): 2366–2376.
- [10] 赵晶, 刘萌, 付威, 等. 传统耕作结合秸秆地膜双元覆盖是提高渭北旱塬春玉米产量和养分吸收的有效措施[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(7): 1151–1163.
Zhao J, Liu M, Fu W, *et al.* Conventional tillage and dual mulching of straw and plastic film has stable effects on spring maize yield and nutrient absorption in Weibei dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(7): 1151–1163.
- [11] 侯贤清, 李荣. 秋耕覆盖对土壤水热肥与马铃薯生长的影响分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(12): 262–275.
Hou X Q, Li R. Effects of autumn tillage with mulching on soil water, temperature and nutrient and potato growth[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 262–275.
- [12] 殷文, 陈桂平, 郭瑶, 等. 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[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(8): 1210–1218.
Yin W, Chen G P, Guo Y, *et al.* Responses of dry matter accumulation and yield in a following maize crop to spring wheat straw returning[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(8): 1210–1218.
- [13] 宋霄君, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作可提高表层土壤碳氮含量和根际土壤酶活性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1588–1597.
Song X J, Wu H J, Wu X P, *et al.* Long-term conservation tillage improves surface soil carbon and nitrogen content and rhizosphere soil enzyme activities[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1588–1597.
- [14] 张晶, 党建友, 张定一, 等. 不同降水年型下小麦产量、品质及水分利用效率对有机无机肥配施的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1625–1635.

- Zhang J, Dang J Y, Zhang D Y, *et al.* Response of yield, quality and water use efficiency of wheat to different combinations of organic manures and chemical fertilizers under different yearly precipitations [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1625–1635.
- [15] 勉有明, 苗芳芳, 吴鹏年, 等. 施氮量对扬黄灌区土壤水分、温度、碳氮及玉米产量的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39(9): 950–958.
- Mian Y M, Miao F F, Wu P N, *et al.* Effects of nitrogen application rates on soil water, temperature, carbon nitrogen, and maize yield in Yanghuang irrigation area[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(9): 950–958.
- [16] 许淑青, 张仁陟, 董博, 等. 耕作方式对耕层土壤结构性能及有机碳含量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(2): 203–208.
- Xu S Q, Zhang R Z, Dong B, *et al.* Effect of tillage practices on structural properties and content of organic carbon in tilled soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(2): 203–208.
- [17] 祁剑英, 马守田, 刘冰洋, 等. 保护性耕作对土壤有机碳稳定化影响的研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(1): 1–9.
- Qi J Y, Ma S T, Liu B Y, *et al.* Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon stabilization[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(1): 1–9.
- [18] Zhang L, Wang J, Fu G Z, Zhao Y G. Rotary tillage in rotation with plowing tillage improves soil properties and crop yield in a wheat-maize cropping system[J]. *PLoS ONE*, 2018, 13(6).
- [19] 王旭东, 张霞, 王彦丽, 李军. 不同耕作方式对黄土高原黑垆土有机碳库组成的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 229–237.
- Wang X D, Zhang X, Wang Y L, Li J. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool composition in dark Loessial soil on Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 229–237.
- [20] 杨永辉, 武继承, 丁晋利, 等. 长期免耕对不同土层土壤结构与有机碳分布的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 173–182.
- Yang Y H, Wu J C, Ding J L, *et al.* Effects of long-term no-tillage on soil structure and organic carbon distribution in different soil layers[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9): 173–182.
- [21] 黄双双, 霍常富, 解宏图, 等. 表层和下层免耕黑土有机碳矿化速率及激发效应[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 1877–1884.
- Huang S S, Huo C F, Xie H T, *et al.* Soil organic carbon mineralization and priming effects in the topsoil and subsoil under no-tillage black soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(6): 1877–1884.
- [22] 王碧胜, 蔡典雄, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作对土壤有机碳和玉米产量及水分利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1455–1464.
- Wang B S, Cai D X, Wu X P, *et al.* Effects of long-term conservation tillage on soil organic carbon, maize yield and water utilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1455–1464.
- [23] 陈文超, 徐生, 朱安宁, 等. 保护性耕作对潮土碳、氮含量的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(9): 224–230.
- Chen W C, Xu S, Zhu A N, *et al.* Effects of conservation tillage on carbon and nitrogen contents in fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(9): 224–230.
- [24] Wang S L, Wang H, Zhang Y H, *et al.* The influence of rotational tillage on soil water storage, water use efficiency and maize yield in semi-arid areas under varied rainfall conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 203: 376–384.
- [25] 邓妍, 高志强, 孙敏, 等. 夏闲期深翻覆盖对旱地麦田土壤水分及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 132–138.
- Deng Y, Gao Z Q, Sun M, *et al.* Effects of deep plowing and mulch in fallow period on soil water and yield of wheat in dryland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 132–138.
- [26] Hou X Q, Li R. Potato tuber yields in semi-arid environments are increased by tillage and mulching practices[J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110(6): 2641–2651.
- [27] 宋振伟, 邓艾兴, 郭金瑞, 等. 整地时期对东北雨养区土壤含水量及玉米产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 254–258.
- Sun Z W, Deng A X, Guo J R, *et al.* Impacts of soil preparation period on soil water storage and corn yield in rain-fed area of Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5): 254–258.
- [28] 于琦, 李军, 周栋, 等. 不同降水年型黄土旱塬冬小麦免耕与深松轮耕蓄墒增收效应[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(11): 1870–1882.
- Yu Q, Li J, Zhou D, *et al.* Effects of no-tillage/subsoiling rotational tillage system on increasing soil water storage and crop yield under different precipitation patterns of winter wheat in the Loess Plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(11): 1870–1882.
- [29] 李荣, 侯贤清. 深松条件下不同地表覆盖对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(20): 115–123.
- Li R, Hou X Q. Effects of different ground surface mulch under subsoiling on potato yield and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(20): 115–123.
- [30] 刘继龙, 李佳文, 周延, 等. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 333–339.
- Liu J L, Li J W, Zhou Y, *et al.* Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 333–339.
- [31] 薛志伟. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦—夏玉米耗水特性的影响[D]. 河南郑州: 河南农业大学硕士学位论文, 2014.
- Xue Z W. Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics in a winter wheat and summer maize rotation system [D]. Zhengzhou, Henan: MS Thesis of Henan Agricultural University, 2014.
- [32] 苗芳芳. 不同耕作深度对土壤结构、水分及作物生长的影响[D]. 宁夏银川: 宁夏大学硕士学位论文, 2021.
- Miao F F. Effects of soil structure, water and crop growth under different tillage depths[D]. Yinchuan, Ningxia: MS Thesis of Ningxia University, 2021.
- [33] 普雪可, 吴春花, 勉有明, 等. 不同覆盖方式对旱作马铃薯生长及土壤水热特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(4): 734–747.
- Pu X K, Wu C H, Mian Y M, *et al.* Effects of different mulching patterns on growth of potato and characteristics of soil water and temperature in dry farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(4): 734–747.
- [34] 侯贤清, 李荣, 马菲, 等. 休闲期耕作覆盖对马铃薯苗期生理生态与

- 产量的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 263–273.
- Hou X Q, Li R, Ma F, *et al.* Effects of tillage with mulching during fallow period on physiological ecology in seedling stage and yield of potato in dry-farming areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 263–273.
- [35] 李念念, 孙敏, 高志强, 等. 极端年型旱地麦田深松和覆盖播种水分消耗与植株氮素吸收、利用关系的研究[J]. 中国农业科学, 2018, 51(18): 3455–3469.
- Li N N, Sun M, Gao Z Q, *et al.* A study on the relationship between water consumption and nitrogen absorption, utilization under sub-soiling during the fallow period plus mulched-sowing in humid and dry years of dryland wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(18): 3455–3469.
- [36] 汤瑛芳, 高世铭, 王亚红, 等. 旱地马铃薯不同覆盖种植方式的土壤水热效应及其对产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 1–7, 13.
- Tang Y F, Gao S M, Wang Y H, *et al.* Soil water and thermal effects of different mulching and planting methods and their influences on yield in dryland potato production[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(1): 1–7, 13.
- [37] 赵天武, 黄高宝, 轩春香, 等. 黄土高原旱地不同保护性耕作措施对马铃薯田土壤水温效应及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 101–106.
- Zhao T W, Huang G B, Xuan C X, *et al.* Different conservation tillage related with soil water, soil temperature and yield of potato in rainfed farming system[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(1): 101–106.
- [38] 雷金银, 何进勤, 周丽娜, 等. 生物培肥及AMF对马铃薯连作土壤微生物特征及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (4): 90–94.
- Lei J Y, He J Q, Zhou L N, *et al.* Effects of biological fertilization and AMF on soil microbial characteristics and yield of potato continuous cropping[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020, (4): 90–94.
- [39] 谭雪莲, 郭晓冬, 马明生, 等. 连作对马铃薯土壤微生物区系和产量的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(9): 1322–1325.
- Tan X L, Guo X D, Ma M S, *et al.* Effects of continuous cropping on soil microflora and yield of potato[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(9): 1322–1325.
- [40] 王淑兰, 王浩, 李娟, 等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1530–1540.
- Wang S L, Wang H, Li J, *et al.* Effects of long-term straw mulching on soil organic carbon, nitrogen and moisture and spring maize yield on rain-fed croplands under different patterns of soil tillage practice [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1530–1540.
- [41] 高日平, 赵沛义, 韩云飞, 等. 秸秆还田与氮肥运筹对土壤水碳氮耦合及作物产量的影响[J]. 土壤, 2021, 53(5): 952–960.
- Gao R P, Zhao P Y, Han Y F, *et al.* Effects of straw returning and nitrogen application on soil water, carbon and nitrogen coupling and crop yield[J]. *Soils*, 2021, 53(5): 952–960.
- [42] 段华平, 牛永志, 卞新民. 耕作方式和秸秆还田对直播稻田土壤有机碳及水稻产量的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 23–27.
- Duan H P, Niu Y Z, Bian X M. Effects of tillage mode and straw return on soil organic carbon and rice yield in direct seeding rice field[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(3): 23–27.