

青海高原春小麦留茬高度对后茬绿肥生物量 and 水分利用效率的影响

李 飞¹, 宋明丹², 蒋福祯², 韩 梅², 严清彪², 李正鹏²

(1.青海大学农牧学院,青海 西宁 810016; 2.青海大学农林科学院,青海 西宁 810016)

摘 要:针对青海高原地区麦后休闲期长、光热水资源利用效率不高的现状,2019 年设置麦后不同留茬高度(0、20、40 cm)复种绿肥田间试验,研究其对箭筈豌豆和毛叶苕子 2 种复种绿肥的生物量、叶面积指数(LAI)和水分利用效率(WUE)的影响,探讨青海高原春小麦与绿肥的高效复种模式。结果表明,绿肥总干物质质量随留茬高度的增加而降低,箭筈豌豆留茬 0、20、40 cm 干物质总量分别为 5 756.45、4 046.09、3 534.09 kg·hm⁻²;毛叶苕子分别为 3 462.69、2 642.75、2 011.34 kg·hm⁻²;根冠比则随着留茬高度的增高而增大,箭筈豌豆留茬 0、20、40 cm 根冠比由 0.043 增加至 0.057 和 0.047,毛叶苕子由 0.07 增加至 0.08 和 0.083;且毛叶苕子的根冠比显著高于箭筈豌豆 59.2%。绿肥地上部各器官干重及 LAI 均随留茬高度的增加而降低,其中,箭筈豌豆 LAI 随着留茬高度的增加由 1.72 降至 1.34 和 0.95,毛叶苕子由 1.00 降至 0.77 和 0.59;茎叶比随留茬高度的增高而增大,箭筈豌豆留茬 0、20、40 cm 茎叶比分别为 0.78、0.89、0.99,毛叶苕子为 0.82、0.84、0.86。箭筈豌豆的茎干重、叶干重、茎叶比和 LAI 分别比毛叶苕子显著高 141.1%、135.4%、6.0%和 69.6%。两种绿肥 WUE 均随留茬高度的增加而降低,箭筈豌豆的干物质质量和 WUE 分别比毛叶苕子显著高 62.2%和 60.0%。麦后不留茬复种箭筈豌豆处理具有最高的生物量和水分利用效率,能够充分利用麦后休闲期光热水资源,是本研究推荐的麦后复种绿肥模式。

关键词:春小麦;复种绿肥;留茬高度;绿肥生物量;水分利用效率;青海高原

中图分类号:S344.6;S512.1 **文献标志码:**A

Effects of stubble height of spring wheat on biomass and water use efficiency of green manure on Qinghai Plateau

LI Fei¹, SONG Mingdan², JIANG Fuzhen², HAN Mei², YAN Qingbiao², LI Zhengpeng²

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;

2. Academy of Agriculture and Forestry, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: In view of the long leisure period after wheat and low utilization efficiency of light and hot water resources on Qinghai Plateau, a field experiment of multiple green manure crops with different stubble heights (0, 20 cm, and 40 cm) following wheat harvest was set up in 2019 to study its effects on biomass, leaf area index (LAI), and water use efficiency (WUE) of two multiple cropping green manure, namely *Common vetch* and *Hairy vetch*. The results showed that the total dry matter mass of green manure decreased with the increase of stubble height, and the total dry matter mass at 0, 20 cm, and 40 cm after stubble was 5 756.45, 4 046.09 kg·hm⁻², and 3 534.09 kg·hm⁻², respectively. The weight of *Common vetch* was 3 462.69, 2 642.75 kg·hm⁻², and 2 011.34 kg·hm⁻², respectively. Root-shoot ratio increased with increasing stubble height. Root-shoot ratio increased from 0.043 to 0.057 and 0.047 at 0, 20 cm, and 40 cm, respectively, after stubble of *Hairy vetch*, and from 0.07 to 0.08 and 0.083, respectively. The root-shoot ratio of *Hairy vetch* was significantly higher than that of *Common vetch* by 59.2%. The dry weight and LAI of each organ in green manure decreased with increasing stubble height, among which LAI of *Common vetch* decreased from 1.72 to 1.34 and 0.95, and that of *Hairy vetch* decreased from 1.00 to

0.77 and 0.59. The ratio of stem to leaf increased with increasing stubble height, and ratio of stem to leaf was 0.78, 0.89, and 0.99, and that of *Hairy vetch* was 0.82, 0.84, and 0.86 for all 3 depths, respectively. The stem dry weight, leaf dry weight, stem-leaf ratio, and *LAI* of *Common vetch* were significantly higher than those of *Hairy vetch* by 141.1%, 135.4%, 6.0% and 69.6%, respectively. The *WUE* of the two green manure decreased with increasing stubble height, and the dry matter quality and *WUE* of common vetch were significantly higher than those of *Hairy vetch* by 62.2% and 60.0%, respectively. The treatment of no stubble and multiple cropping common vetch after wheat had the highest biomass and water use efficiency, and made full use of the light and hot water resources during the leisure period after wheat, it is the recommended green manure model for multiple cropping after wheat in this study.

Keywords: spring wheat; multiple cropping green manure; stubble height; green manure biomass; water use efficiency; Qinghai Plateau

青海高原东部农区为高寒干旱气候区,气候资源较为丰富,作物生长一季有余,两季不足^[1]。春小麦是该区主要作物,收获后到入冬前有 2~3 个月的休闲期,而此期正值当地雨热同季,大片土地裸露造成光、温、水、土等资源浪费^[2]。绿肥是我国传统农业生产中的重要有机肥源,具有培肥土壤、保水保土、控制环境污染以及提高作物产量等作用^[3],在该地区进行麦后复种绿肥不仅能够充分利用休闲期的气候资源,而且可延长土地的绿色覆盖时间,改良土壤质地,有效遏制土地沙化^[4-5]。

前人在绿肥方面进行了许多研究^[6-8],涉及绿肥和农作物的种植方式、绿肥品种栽培、绿肥减施化肥、绿肥对土壤养分以及土地耕作的影响等方面。有研究表明:小麦留茬 0~35 cm 范围内,留茬越高,对后茬作物生长的养分状况改善越好,以留茬 16.5 cm 最佳^[9]。合理控制秸秆的留茬高度不仅保证了秸秆资源的循环高效利用,也促进了农业的可持续发展。王秀等^[10]研究表明,冬小麦收获时留茬一定高度,直接播种下一季作物,可提高土壤水分含量,使下季作物增产。采取留茬耕作不仅可以减少土地表面秸秆的覆盖率、降低地温、减小太阳辐射及水分蒸发,而且可以创造有利于旱地作物生长的气候条件^[11],为作物的生长发育提供更多的水分。Cutforth 等^[12]研究发现,小麦留茬高度在 0~30 cm 时,随留茬高度的增高,作物产量及水分利用效率均有增加的趋势。

箭筈豌豆和毛叶苕子是青海高原 2 个主栽豆科绿肥作物种类,耐寒耐旱,抗病高产,且生长迅速,但两者均具有茎秆柔软、分枝性强、易匍匐的特点。待绿肥覆盖地面以后,由于其匍匐的特性,容易导致绿肥茎叶腐烂、病害严重等问题。有研究表明,稻草适当留茬能够改善土壤的水热条件,为绿肥生长创造适宜的环境,有利于提高豆科绿肥的产草

量^[13]。留茬免耕栽培由于减少耕翻对土壤的翻动,土壤孔隙度相对稳定,可有效减缓土壤蒸发,增加土壤蓄水量^[14]。

目前关于青海高原东部农区的绿肥种植模式研究主要集中在复种绿肥对主作物产量、土壤肥力及微生物数量的影响^[15-16],而关于小麦留茬高度对复种绿肥生长的影响研究较少。本研究提出麦后高留茬复种绿肥模式,于小麦收获后留茬,硬茬播种豆科绿肥,以麦秆支撑绿肥冠层,以期解决绿肥生长不良的问题,待绿肥生长停止后,麦茬与绿肥一起翻压还田。基于此,本研究通过田间小区试验,研究麦后不同留茬高度对后茬复种绿肥的生长以及水分利用效率的影响,寻求适合于当地的绿肥复种方式,为青海高原东部农区绿肥的种植利用提供一定的理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在青海省西宁市城北区莫家庄青海大学农林科学院试验园(36°56'N, 101°74'E)进行。该地区海拔 2 290 m,属高原大陆性半干旱气候,气候冷凉,具有低温干燥日照强的气候条件。年平均气温 5.9℃,年平均日照时数 2 748 h,日照率为 62.8%,年辐射总量 612.5 J·cm⁻²,其中光合有效辐射占 43%。光源充足。全年平均气温日较差达 13.5℃,7—9 月的降水量占全年降水量的 60%~70%,夜间雨量较大,年平均降水量 367.5 mm,年均蒸发量可达 1 729.8 mm^[1]。土壤类型为栗钙土。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 7—10 月进行。春小麦收获时留茬高度设置 3 个水平,分别为 0 cm(H0)、20 cm(H1)、40 cm(H2),麦后复种绿肥种类设置 2 个水平,分别为箭筈豌豆(J)和毛叶苕子(M),两因素完

全组合,共6个处理,分别为JH0、JH1、JH2、MH0、MH1、MH2,重复4次,共24个小区,小区面积3 m×5 m,随机区组排列。

2019年7月26日绿肥点播于收获后的麦茬行内(每穴3粒,行距10 cm),播种量15 kg·hm⁻²,播深2 cm,于2019年10月20日收获。

1.3 测定指标与方法

在绿肥收获期采样,采样方法和测定指标如下:

植株干重:每小区随机选10株植株,挖出其周围长、宽、深均为20 cm土体中的根系,带回实验室进行根、茎、叶分离,用清水将根系冲洗干净,植株各部分器官在105℃杀青30 min,75℃下烘至恒重,称量,计算根冠比、茎叶比。

叶面积指数(LAI):叶面积用图像分析法测定^[17],LAI=叶片总面积/土地面积。

土壤含水量和容重:于绿肥播种前和收获后,在小区中间用直径5 cm的土钻采集0~40 cm土样(每10 cm一层),装于铝盒,在105℃下烘干至恒重,称量,计算土壤含水量。于绿肥收获后用环刀测定相应土层容重。

作物耗水量和水分利用效率:参照李正鹏等^[18]的计算方法。

土壤体积含水率 $\theta(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$ 计算如下:

$$\theta = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \cdot B \tag{1}$$

式中, W_1 和 W_2 分别为湿土和干土质量(g); B 为土壤容重,0~40 cm土层容重为1.27~1.58 g·cm⁻³。

土壤剖面储水量SWS(mm)计算如下:

$$SWS = \sum_{i=1}^n (\theta_i Z_i) \tag{2}$$

式中, i 为土层; θ_i 为第*i*层土壤的体积含水率(cm³·cm⁻³); Z_i 为第*i*层土壤的厚度(mm)。

作物耗水量(ETa)计算如下:

$$ETa = Pr + I + \Delta SWS - R - D + K \tag{3}$$

式中, ETa 为作物耗水量(蒸发蒸腾量); Pr 为生育期降雨量,本研究中绿肥生育期降水量为162 mm; I 为灌溉量,本研究中生育期灌水量为0; ΔSWS 为播种与收获时40 cm土层土壤储水量之差; R 为地表径流, D 为渗漏量, K 为地下水补给量。所有计量的单位均为mm。本试验区地下水位埋深约50 m, I 、 R 、 D 和 K 忽略不计。

根据绿肥实际耗水量计算水分利用效率,公式如下:

$$WUE = \frac{Y}{10ETa} \tag{4}$$

式中, WUE 为水分利用效率(kg·m⁻³); Y 为绿肥干物质产量(kg·hm⁻²)。

1.4 数据分析

试验数据用Excel 2019软件进行归纳整理和作图,用SPSS 25.0软件进行统计分析,各处理间的差异显著性用Duncan法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 小麦留茬高度对复种绿肥地上和地下生物量的影响

小麦留茬高度对复种绿肥收获期地上和地下生物量的影响见图1和表1。箭筈豌豆和毛叶苕子的地上部干重、地下部干重和总干重均随留茬高度的增高而降低。由图1可知,地上部干重:JH2比JH0降低了38.7%,MH2比MH0降低了42.4%;地下部干重:JH2比JH0降低了36.1%,MH2比MH0降低了34.3%。因此,总干重JH2比JH0降低了38.6%,MH2比MH0降低了41.9%。作物的根和冠是相互作用互相依存的。根的生长发育会影响地上部分的生长。根冠比对植物生长有着重要影响^[19]。毛叶苕子的根冠比随着留茬高度的增高而增大,MH2比MH0增高了18.6%。

在绿肥种类方面,箭筈豌豆(J)的地上部干重显著高于毛叶苕子(M)64.7%;二者的地下部干重差异不显著;箭筈豌豆(J)的总干重显著高于毛叶苕子(M)62.2%;毛叶苕子(M)的根冠比显著高于箭筈豌豆(J)59.2%。在留茬高度方面,植株地上部干重、地下部干重及总干重均随留茬高度的增高而显著降低($P<0.05$),不同留茬高度下的根冠比差异不显著。

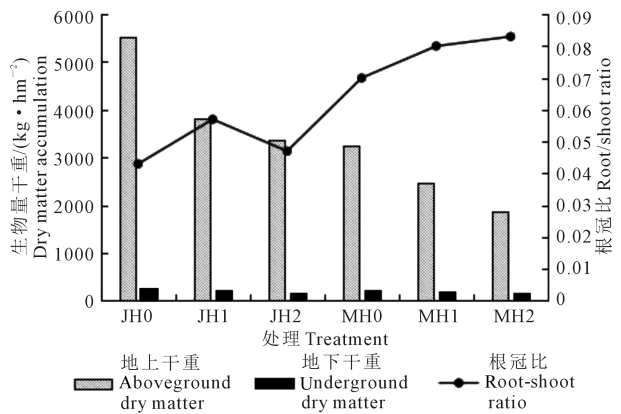


图1 各处理的地上和地下部生物量及根冠比

Fig.1 The aboveground and underground biomass and root-shoot ratio of each treatment

多重比较结果表明,绿肥种类对地上部干重、总干重和根冠比的影响达到极显著水平($P<0.01$),留茬高度对地上部干重和总干重的影响达到极显著水平($P<0.01$),对地下部干重的影响达到显著水平($P<0.05$),绿肥种类和留茬高度的交互作用不显著。收获期绿肥生物量干重随留茬高度的增加而降低,毛叶苕子的根冠比随着留茬高度的增高而增大。

2.2 小麦留茬高度对复种绿肥茎叶干重及叶面积指数的影响

通过分析各处理对复种绿肥收获期茎叶干重及叶面积指数(LAI)的影响(图 2)可知:箭筈豌豆的茎干重和叶干重均随留茬高度的增高而降低,JH2 比 JH0 降低了 37.0%和 50.9%;毛叶苕子的茎干重和叶干重均表现为 H0 最大,H2 次之,H1 最小,MH1 比 MH0 分别降低了 80.2%和 79.1%;箭筈豌豆和毛叶苕子的茎叶比均随留茬高度的增高而增加,JH2 比 JH0 增高了 26.9%,MH2 比 MH0 增高了 4.9%;箭筈豌豆和毛叶苕子 LAI 均随留茬高度的增

高而降低,JH2 比 JH0 降低了 44.8%,MH2 比 MH0 降低了 41.0%。

由表 2 可知,对于绿肥种类,箭筈豌豆(J)的茎干重、叶干重、茎叶比和 LAI 显著高于毛叶苕子(M),分别高出 141.1%、135.4%、6.0%和 69.6%。对于留茬高度,茎干重、叶干重均随留茬高度的增高而降低,茎叶比随留茬高度增加而显著增大, LAI 随留茬高度的增高有降低趋势。

方差分析结果表明,绿肥种类对茎、叶干重的影响达到极显著水平($P<0.01$),对茎叶比和 LAI 的影响显著($P<0.05$);留茬高度对茎、叶干重和茎叶比的影响达到极显著水平,绿肥种类和留茬高度交互间差异不显著。

2.3 小麦留茬高度对复种绿肥耗水量及水分利用效率的影响

水分利用效率(WUE)反映了不同作物生长过程中单位水分的能量转换效率,是衡量作物抗旱能力的重要指标。它受蒸腾速率和蒸发速率共同影响,

表 1 小麦不同留茬高度对复种绿肥地上和地下部生物量的影响

Table 1 Effect of stubble height on aboveground and underground biomass of multiple cropping green manure					
因素 Factor	水平 Level	地上部干重/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Aboveground dry matter	地下部干重/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Underground dry matter	总干重/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Total dry matter	根冠比 Root-shoot ratio
绿肥种类 Green manure	J	4036.68a	187.44a	4224.13a	0.049b
	M	2450.68b	184.59a	2604.51b	0.078a
留茬高度 Stubble height	H0	4248.32a	217.99a	4466.31a	0.057a
	H1	2967.96b	189.67a	3133.92b	0.068a
	H2	2514.76c	146.24b	2642.71c	0.065a
方差分析 ANOVA	绿肥种类 Green manure	**	NS	**	**
	留茬高度 Stubble height	**	*	**	NS
	绿肥种类×留茬高度 Green manure×Stubble height	NS	NS	NS	NS

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);NS表示没有显著差异;*表示差异显著($P<0.05$);**表示差异极显著($P<0.01$),下同。
Note: Different letters within a column indicate significant differences ($P<0.05$); NS indicates no significant difference; * indicates significant difference ($P<0.05$), ** represents extremely significant difference ($P<0.01$). The same below.

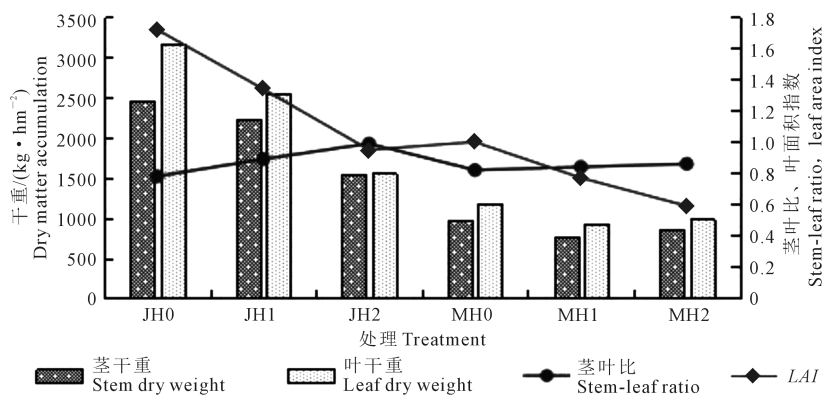


图 2 各处理的茎、叶干重及叶面积指数
Fig.2 Stem and leaf dry weight and leaf area index of each treatment

高的水分利用效率有助于植物在干旱条件下保持一定的产量。本研究中绿肥生育期降水量为 162 mm,由图 3 可知:播种前储水量箭筈豌豆和毛叶苕子均表现为:H2>H0>H1,且箭筈豌豆的播前储水量大于毛叶苕子(72.3~75.7 mm>69.4~73.4 mm);箭筈豌豆的收获期储水量随着留茬高度的增加而增加,JH0 比 JH2 降低 8.5%;毛叶苕子的储水消耗量随着留茬高度的增加而降低,MH2 比 MH0 降低了 10.1%;毛叶苕子的耗水量随着留茬高度的增加而增加,MH2 比 MH0 增加了 5.0%;箭筈豌豆和毛叶

苕子的生物量干重和水分利用效率则随着留茬高度的增加而降低,JH2 比 JH0 分别降低了 38.6%和 34.4%,MH2 比 MH0 分别降低了 41.9%和 46.5%。

由表 3 可知,绿肥种类和留茬高度对生物量干重、水分利用效率的影响均达到极显著水平($P<0.01$)。对于绿肥种类,箭筈豌豆的生物量干重、水分利用效率显著高于毛叶苕子,分别高出 62.2%和 60.0%;生物量干重、水分利用效率随留茬高度的增高而降低,不同留茬高度间差异显著,H2 比 H0 分别降低了 40.8%和 39.3%。

表 2 小麦不同留茬高度对复种绿肥茎、叶干重及叶面积指数的影响

Table 2 Effect of stubble height on stem and leaf dry weight and of multiple cropping green manure

因素 Factor	水平 Level	茎干重/(kg·hm ⁻²) Dry matter of stems	叶干重/(kg·hm ⁻²) Dry matter of leaves	茎叶比 Stem-leaf ratio	叶面积指数 Leaf area index
绿肥种类 Green manure	J	2076.76a	2421.63a	0.89a	1.34a
	M	861.31b	1028.78b	0.84b	0.79b
留茬高度 Stubble height	H0	1711.16a	2170.08a	0.80c	1.36a
	H1	1496.71a	1733.80b	0.87b	1.06ab
	H2	1199.24b	1271.74c	0.93a	0.77b
方差分析 ANOVA	绿肥种类 Green manure	*	*	*	*
	留茬高度 Stubble height	*	*	*	*
	绿肥种类×留茬高度	NS	NS	NS	NS
	Green manure×Stubble height				

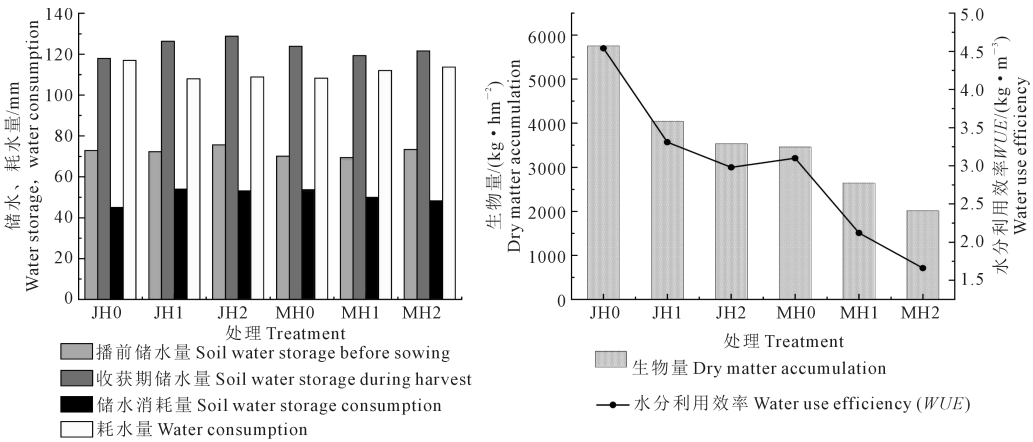


图 3 各处理的耗水量及水分利用效率

Fig.3 Water consumption and water use efficiency of each treatment

表 3 小麦不同留茬高度对复种绿肥耗水量及水分利用效率的影响

Table 3 Effect of stubble height on water consumption and water use efficiency of multiple cropping green manure

因素 Factor	水平 Level	播前储水量 Soil water storage before sowing/mm	收获期储水量 Soil water storage during harvest/mm	储水消耗量 Soil water storage consumption/mm	耗水量 Water consumption /mm	生物量 Biomass /(kg·hm ⁻²)	水分利用效率 WUE/(kg·m ⁻³)
绿肥种类 Green manure	J	73.65a	124.37a	50.72a	111.28a	4224.13a	3.61a
	M	70.97a	121.62a	50.65a	111.35a	2604.51b	2.30b
留茬高度 Stubble height	H0	71.53a	120.89a	49.37a	112.64a	4466.31a	3.82a
	H1	70.87a	122.87a	52.00a	109.00a	3133.92b	2.71b
	H2	74.53a	125.23a	50.70a	111.31a	2642.71c	2.32c
方差分析 ANOVA	绿肥种类 Green manure	NS	NS	NS	NS	*	*
	留茬高度 Stubble height	NS	NS	NS	NS	*	*
	绿肥种类×留茬高度	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	Green manure×Stubble height						

3 讨 论

青海高原东部农区为高寒干旱气候区,毛叶苕子和箭筈豌豆耐寒抗旱,抗病性强,生长迅速,易获得高产,是比较适宜青海地区种植的优良豆科绿肥作物品种。麦后复种绿肥不仅能有效利用小麦收获后充足的光、热、水资源,还能吸收小麦收获后残留的土壤养分,为绿肥生长发育提供有利条件^[2,21~23]。毛叶苕子和箭筈豌豆茎秆木质化程度较低,具有较强的匍匐性,易使下部通风透光不良,另外青海地区秋季雨水偏多,非常容易出现茎基部腐烂问题。有研究表明,麦后高留茬能为绿肥的生长提供一定的通透性并改善光照分布,提高光能利用率,使绿肥产量迅速积累,同时,其直立茎秆为绿肥的向上生长提供支撑,避免了单播中常出现的倒伏减产、下层枝叶脱落、霉变等现象^[24]。本研究探讨了春小麦收获后不同留茬高度对后茬绿肥生长以及水分利用效率的影响,结果表明,留茬高度越高绿肥生物量越小,这可能是由于本研究中绿肥生长期仅 60 余天,至绿肥收获翻压尚处于营养生长阶段,麦茬的遮挡作用导致绿肥吸收的光热资源不足,不利于早期绿肥的建植和生长,虽然茬高对绿肥的生长起到一定的支撑作用,但其促进绿肥生长可能主要表现在绿肥生长后期。

本研究结果表明,相同的光热水资源条件下,箭筈豌豆的生物量显著高于毛叶苕子,这可能是由于毛叶苕子茎四棱中空,匍匐性强,而箭筈豌豆稍直立,茎干纤细斜生喜攀援,从而导致箭筈豌豆的光能利用效率高于毛叶苕子。本研究以绿肥生长和水分利用效率为目标,提出不留茬种植箭筈豌豆是较理想的复种模式,关于秸秆和绿肥联合还田的后茬效应需要进一步研究,综合绿肥生长、后茬高产、培肥地力为目标的复种模式需要进一步探讨。

4 结 论

1) 收获期绿肥生物量干重随留茬高度的增加而降低,且毛叶苕子的根冠比显著高于箭筈豌豆 59.2%。

2) 收获期绿肥地上各部干重及叶面积指数均随留茬高度的增加而降低。箭筈豌豆的茎、叶干重、茎叶比和 LAI 显著高于毛叶苕子,分别高 141.1%、135.4%、6.0% 和 69.6%。

3) 收获期绿肥生物量干重和水分利用效率均随留茬高度的增加而降低。箭筈豌豆的生物量干重、水分利用效率分别显著高于毛叶苕子 62.2% 和 60.0%。

因此,麦后不留茬复种箭筈豌豆具有最高的生物量和水分利用效率,能充分利用麦后休闲期光、热、水资源,是本研究推荐的麦后复种绿肥模式。

参 考 文 献:

- [1] 韩梅,胥婷婷,曹卫东.青海高原长期复种绿肥毛叶苕子对土壤供氮能力的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(6):104-109.
- [2] 段玉,曹卫东,妥德宝,等.麦后复种毛叶苕子增产效果研究[J].内蒙古农业科技,2010,(5):42-43.
- [3] 齐晓晨,赵库,叶祖鹏,等.苦豆子绿肥对甜瓜生长及营养特性的影响[J].中国农业科技导报,2018,20(6):104-112.
- [4] 郭从阳,王天河,杨文元,等.河西地区麦后复种饲用(绿肥)油菜栽培技术及效益分析[J].草业科学,2008,25(3):90-92.
- [5] 李文广,杨晓晓,黄春国,等.饲料油菜作绿肥对后茬麦田土壤肥力及细菌群落的影响[J].中国农业科学,2019,52(15):2664-2677.
- [6] 卢秉林,包兴国,张久东,等.间作绿肥饲草与减施氮肥对河西绿洲灌区玉米产量和土壤肥力的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(2):170-175.
- [7] 张久东,包兴国,曹卫东,等.间作绿肥作物对玉米产量和土壤肥力的影响[J].中国土壤与肥料,2013,(4):43-47.
- [8] 袁金华,俄胜哲,车宗贤,等.水肥管理对春小麦产量和根际土壤肥力特征的影响[J].土壤与作物,2017,6(1):17-24.
- [9] 张杰,沈春燕,马建洲.小麦留高茬还田的生态效应[J].农业环境与发展,2003,20(1):17-18.
- [10] 王秀,赵四申,贾素梅,等.麦茬高度对免耕夏玉米田土壤水分和土壤温度的影响[J].河北农业科学,2001,5(3):10-15.
- [11] 韩梅,张宏亮,郭石生,等.复种绿肥对后茬作物增产及肥地效果的研究[J].湖北农业科学,2013,52(17):4080-4082.
- [12] Cutforth H, McConkey B, Angadi S, et al. Extra-tall stubble can increase crop yield in the semiarid Canadian Prairie[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2011, 91(4):783-785.
- [13] 韩梅.青海高原复种绿肥毛叶苕子对土壤微生物生物量碳、氮的影响[J].微生物学杂志,2019,39(4):34-39.
- [14] 周国朋,谢志坚,曹卫东,等.稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J].农业工程学报,2017,33(23):157-163.
- [15] 张建军,党翼,赵刚,等.留膜留茬免耕栽培对旱作玉米田土壤养分、微生物数量及酶活性的影响[J].草业学报,2020,29(2):123-133.
- [16] 杨玉娥.高海拔地区复种绿肥的好处及其高产栽培技术[J].陕西农业科学,2013,59(6):264-265.
- [17] 吴千华,孟祥丽,刘一鸣.植物叶面积测定方法探讨[J].热带林业,2018,46(2):37-39.
- [18] 李正鹏,宋明丹,冯浩.不同降水年型水氮运筹对冬小麦耗水和产量的影响[J].农业工程学报,2018,34(18):160-167.
- [19] 李清.主要绿肥根冠比的初步研究[J].南方农机,2019,50(13):23-32.
- [20] 魏孝荣,郝明德,张春霞,等.土壤干旱条件下外源锌、锰对夏玉米光合特性的影响[J].作物学报,2005,31(8):1101-1104.
- [21] 张力文,钟国成,张利,等.3 种鼠尾草属植物光合作用-光响应特性研究[J].草业学报,2012,21(2):70-76.
- [22] 刘广才,杨祁峰,李隆,等.小麦/玉米间作优势及地上部与地下部因素的相对贡献[J].植物生态学报,2008,32(2):477-484.
- [23] 雍太文,杨文钰,向达兵,等.小麦/玉米/大豆套作的产量、氮营养表现及其种间竞争力的评定[J].草业学报,2012,21(1):50-58.
- [24] 富新年,潘正武,孟祥君,等.高寒地区甘引 1 号黑麦与箭筈豌豆混播试验研究[J].畜牧兽医杂志,2016,35(4):15-17,20.