

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.91038

## 种植密度对 2 个青稞品种抗倒伏及秸秆饲用特性的影响

赵小红<sup>1</sup> 白羿雄<sup>1,2,3,\*</sup> 王 凯<sup>1</sup> 姚有华<sup>1,2</sup> 姚晓华<sup>1,2</sup> 吴昆仑<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> 青海大学农林科学院，青海西宁 810016; <sup>2</sup> 青海省青稞遗传育种重点实验室 / 国家麦类改良中心青海青稞分中心，青海西宁 810016;  
<sup>3</sup> 西北农林科技大学农学院，陕西杨凌 712100

**摘要：**种植密度是影响青稞抗倒伏和秸秆饲用特性的重要因子。以抗倒伏品种昆仑 14 号和倒伏品种门源亮蓝为试验材料，比较研究种植密度对这 2 个品种生长发育、抗倒伏特性和秸秆饲用特性的影响。结果表明，种植密度对 2 个品种的抗倒伏和秸秆饲用特性的影响存在差异。随着种植密度的增加，昆仑 14 号根长、根体积、根数和根干重先增后降，茎粗和壁厚依次下降；门源亮蓝根系和茎秆相关指标则随种植密度增大而下降。昆仑 14 号抗倒伏相关指标先增后降，但整个生育期未发生倒伏；门源亮蓝各指标均显著降低，诱发倒伏现象提前发生，致使倒伏率增大、倒伏程度加剧。昆仑 14 号茎秆中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、半纤维素、纤维素和木质素等化学成分含量随密度增加先增后降，门源亮蓝各成分含量呈下降趋势，相对饲喂价值随密度增加呈现增高的趋势。综合抗倒伏特性与秸秆饲用特性，昆仑 14 号最佳种植密度为  $375 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ，门源亮蓝粮饲兼用时适宜密度为  $300 \times 10^4 \sim 375 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ 。

**关键词：**青稞；种植密度；生长发育；抗倒性；饲草特性

## Effects of planting density on lodging resistance and straw forage characteristics in two hulless barley varieties

ZHAO Xiao-Hong<sup>1</sup>, BAI Yi-Xiong<sup>1,2,3,\*</sup>, WANG Kai<sup>1,2</sup>, YAO You-Hua<sup>1,2</sup>, YAO Xiao-Hua<sup>1,2</sup>, and WU Kun-Lun<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Agriculture and Forestry Academy, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China; Qinghai Key Laboratory of Hulless Barley Genetics and Breeding / Hulless Barley Branch of State Wheat Improvement Centre, Xining 810016, Qinghai, China; <sup>3</sup> College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China

**Abstract:** Planting density is an important factor affecting the lodging resistance and straw feeding characteristics of hulless barley. Two varieties the lodging-resistant variety Kunlun 14 and the lodging variety Menyuanlianglan, were used to study the effects of planting density on the growth and development, lodging characteristics and straw feeding characteristics. The effects of planting density on two varieties were not entirely consistent. With the increase of planting density, the traits of root and stem increased firstly and decreased then in Kunlun 14, whereas gradually decreased in Menyuanlianglan; and the relative lodging-resistance indexes of Kunlun 14 were increased firstly and decreased then, without lodging occurred, while these in Menyuanlianglan were significantly declined, resulted in lodging in early stage, lodging rate and degree increased; the chemical constituents neutral detergent fiber, acid detergent fiber, cellulose, hemicellulose and lignin in the stem of Kunlun 14 increased firstly and decreased then with the increase of planting density, whereas these of Menyuanlianglan showed a downward trend, with the increased relative feeding value. Based on lodging resistance and straw forage characteristics of two varieties, we concluded that the suitable density of Kunlun 14 should be  $3.75 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ , and that of Menyuanlianglan for grain and forage should be  $3.00 \times 10^6$  to  $3.75 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ .

本研究由青海省农林科学院创新基金重点研发项目(2019-NKY-01)，国家现代农业产业技术体系(大麦青稞)建设专项(CAS-05)和青海大学中青年科研基金项目(2017-QNY-2)资助。

This study was supported by the Qinghai Provincial Academy of Agriculture and Forestry Innovation Fund Key Research and Development Project (2019-NKY-01), the China Agriculture Research System (Barley and Hulless Barley) (CAS-05), and the Qinghai University Young and Middle-aged Research Fund Project (2017-QNY-2).

\* 通信作者(Corresponding authors): 白羿雄, E-mail: yixiongbai@163.com, Tel: 0971-5311970; 吴昆仑, E-mail: wklqaaf@163.com, Tel: 0971-5311970

第一作者联系方式: E-mail: 825626698@qq.com

Received (收稿日期): 2019-05-20; Accepted (接受日期): 2019-09-26; Published online (网络出版日期): 2019-10-14.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20191014.1105.004.html>

**Keywords:** hulless barley (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. f.); planting density; growth and development; lodging resistance; forage characteristics

青稞是青藏高原最具特色的农作物和藏区第一大作物,也是藏区农牧民不可替代的最重要的粮食作物<sup>[1]</sup>。同时,青稞秸秆作为高原地区牲畜优良的补饲饲料,为青藏高原畜牧业发展提供重要支撑,粮草双高青稞的生产对藏区农牧业发展具有重要意义。

合理的群体结构有利于提高温、光、水、肥等的综合利用率,从而发挥作物的产量潜能。种植密度是建立合理群体以确保高产的重要因素,可以通过改善作物冠层结构影响产量和倒伏程度<sup>[2-3]</sup>。目前,国内外关于种植密度对作物的影响有广泛的报道,如对小麦<sup>[4-5]</sup>、玉米<sup>[6]</sup>、水稻<sup>[7]</sup>等研究表明,过高种植密度通过影响单株冠层结构<sup>[2]</sup>、茎秆特性<sup>[8]</sup>和根系特性<sup>[9]</sup>等增加了作物倒伏的风险。有研究认为,一定范围内增加种植密度可以提高植物群体光能利用率,增加作物群体生物量,而过高的种植密度容易削弱中下层叶片的光照条件,使群体光能利用率降低<sup>[10-11]</sup>,进而影响株高、茎秆强度和壁厚、木质素含量和重心等倒伏相关特性,导致茎秆抗倒性降低<sup>[12-14]</sup>。白羿雄等<sup>[15]</sup>研究表明茎长、茎重、茎秆强度和穗重与青稞抗倒伏密切相关。此外,受种植密度影响青稞秸秆饲用价值也发生相应变化。Cusicanqui等<sup>[16]</sup>研究表明,随着种植密度增加,饲草品质下降,体外消化率和粗蛋白含量下降。目前,有关种植密度对青稞抗倒伏特性影响和秸秆饲草化利用影响的研究鲜有报道。本研究通过比较分析种植密度对不同抗倒性青稞品种生长发育、倒伏特性和秸秆饲用价值的影响,旨在为藏区青稞选择适宜的种植密度,兼顾丰产和秸秆饲用价值,为其高产栽培和高效利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料和地点

选用不同抗倒性的代表性青稞品种,即青海地区主栽抗倒伏品种昆仑14号和典型倒伏品种门源亮蓝。昆仑14号植株株型紧凑、茎秆粗壮、根系发达、穗粒数多、穗部饱满、植株繁茂性好,为粮草双高的抗倒伏青稞品种。门源亮蓝分蘖少、植株高大而茎秆细、穗短且穗粒数少、生育期短、一般在灌浆期严重倒伏。2017—2018年在青海省西宁市北郊青海省农林科学院作物所试验田(101°74'E, 36°56'N)进行试验,

试验地土质为沙壤土,含全氮 1.78 g kg<sup>-1</sup>、速效钾 286 mg kg<sup>-1</sup>、速效磷 37.48 mg kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

采用随机区组设计,5个种植密度,分别为150×10<sup>4</sup>(T1)、225×10<sup>4</sup>(T2)、300×10<sup>4</sup>(T3)、375×10<sup>4</sup>(T4)和450×10<sup>4</sup>株 hm<sup>-2</sup>(T5),3次重复。小区面积为10 m<sup>2</sup>(2.5 m×4.0 m),行距0.2 m。2017年4月7日播种,2017年7月25日收获;2018年4月11日播种,2018年7月26日收获;田间管理同大田。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 倒伏率和倒伏程度调查 参照王凯等<sup>[17]</sup>方法,开花期、灌浆期和成熟期分别调查和记录田间倒伏率(lodging rate, LR)和倒伏程度(lodging degree, LD)。

1.3.2 青稞农艺性状测定 成熟期随机选取各处理小区中青稞单株10株,采取室内考种的方法对根部、茎部和穗部的农艺性状进行统计。参照白羿雄等<sup>[15]</sup>方法测定根系和茎部形态指标,测量与倒伏密切相关的基部第2、第3、第4节间茎长、茎粗、壁厚和茎秆强度等指标。

1.3.3 饲草品质及产量测定 成熟期从基部刈割青稞秸秆,饲草收获面积10 m<sup>2</sup>,收获后人工去除植株穗部,70℃烘干至恒重用于饲草产量的测定。随机选取数株茎秆烘干剪碎,用高速万能粉碎机(FW100,天津华鑫)粉碎成粉末过筛,参照池宁琳方法<sup>[18]</sup>测定茎秆中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)、纤维素、半纤维素、木质素含量,参照GB/6432-94标准,用凯氏定氮法测定<sup>[19]</sup>茎秆中粗蛋白含量(crude protein, CP)。秸秆相对饲用价值(relative feed value, RFV)根据中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维的含量采用以下公式计算<sup>[20]</sup>。

$$RFV = (88.9 - 0.779 \times ADF) \times (120/NDF)/1.29$$

### 1.4 数据分析

用Microsoft Excel 2010处理数据和作图,用SPSS 20.0软件对2年试验数据进行方差分析和显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 种植密度对青稞生长特性的影响

种植密度对植株不同器官生长发育的影响存在

差异(表 1)。随着种植密度增大, 昆仑 14 号根长、根体积、根干重和根数先增后减, 在 T3 均达到最大值; 门源亮蓝各项指标均呈下降趋势。昆仑 14 号根长较长, 体积较大、根干重较重和根数较多, 各项指标两年平均值较门源亮蓝分别高出 38.41%、37.24%、153.46% 和 52.62%。

随着种植密度增大, 青稞植株基部茎节壁厚变薄, 茎粗变细。昆仑 14 号基部第 2、第 3、第 4 茎节茎粗和壁厚均大于门源亮蓝, 两年均值分别高 23.05%、29.87%、40.67% 和 76.45%、73.91%、68.82%。籽粒产量与种植密度密切相关, 随着种植密度增大, 2 个品种籽粒产量均先增加后减少, 昆仑 14 号和门源亮蓝分别在 T4 和 T2 水平下籽粒产量最高, 平均为  $7.98 \text{ t hm}^{-2}$  和  $3.41 \text{ t hm}^{-2}$ 。表明过度密植(T5)会严重限制青稞茎秆和根系的生长发育, 导致籽粒产量下降(图 1)。

## 2.2 种植密度对青稞抗倒伏特性的影响

2.2.1 种植密度对抗倒伏相关特性的影响 种植密度影响下, 穗部和茎部相关指标差异显著(表 2)。随着种植密度增加, 昆仑 14 号茎节茎长、茎重和茎秆强度先增后减, 在 T3 处理达到最大值; 而门源亮蓝茎秆特性相关指标逐渐下降, 穗重则先增后降。

与门源亮蓝相比, 昆仑 14 号基部茎长较短(第 4 节除外), 相差 15.38%; 茎重较重, 茎秆强度较强, 各指标两年平均较门源亮蓝高 87.23% 和 269.09%; 昆仑 14 号穗重较重, 2 年平均比门源亮蓝高出 139.99%。过度密植(T5)时茎长伸长, 茎重变轻, 茎秆强度变弱, 抗倒伏能力减弱, 表明过度密植使倒伏风险加大, 并使穗部发育受限。

2.2.2 种植密度对倒伏率的影响 种植密度对不同抗倒性青稞品种倒伏率和倒伏程度的影响不同(表 3)。抗倒品种昆仑 14 号在不同种植密度处理下 2 年间各个生育期均不倒伏。过度密植 T5 水平下, 倒伏品种门源亮蓝 2 年均于开花期轻度倒伏, 在其他处理下于灌浆早期发生轻度倒伏, 表明过度密植引发倒伏的时期提前。灌浆期各处理均出现不同程度倒伏, 且种植密度越大倒伏率越高, 倒伏程度越严重, 即过密种植倒伏率增大、倒伏程度加重。青稞植株的抗倒能力随着种植密度增大而减小, 表明过大的群体是导致倒伏的原因之一。

## 2.3 种植密度对青稞饲草产量和品质的影响

2.3.1 对秸秆产量的影响 随着种植密度的增大, 昆仑 14 号的秸秆产量先增后降, T1~T5 水平两年平均秸秆产量分别为 4.56、4.35、6.84、14.57 和  $13.46 \text{ t hm}^{-2}$ , 在 T4 达到最大值; 门源亮蓝秸秆产量则依次增加, 分别为 2.40、3.30、7.81、8.51 和  $8.84 \text{ t hm}^{-2}$ , 平均增幅为 3.88%~136.67%。昆仑 14 号饲用秸秆产量较高, 两年平均较门源亮蓝高 41.91%。表明适度增大种植密度是提高秸秆产量的可行措施(图 2)。

2.3.2 对饲用品质的影响 种植密度对青稞秸秆饲用品质有较大的影响, 对纤维类物质和粗蛋白含量影响差异显著(表 4)。随着种植密度的增大, 昆仑 14 号茎秆中 NDF、ADF、半纤维素、纤维素和木质素等物质含量变化趋势相同, 都表现为先增后减, 粗蛋白含量和相对饲喂价值则先减后增; 门源亮蓝中纤维类物质含量随种植密度增加而降低, 粗蛋白含量和相对饲喂价值逐渐增加。

昆仑 14 号 NDF、ADF、半纤维素、纤维素和木质素物质含量均高于门源亮蓝, 2 年平均较其高 19.24%、22.17%、12.95%、12.60% 和 49.09%; 门源亮蓝具有更高的粗蛋白含量和 RFV, 2 年平均较昆仑 14 号分别高 32.62% 和 37.74%。结果表明, 随着种植密度增大, 青稞饲草品质有逐步优化的趋势, 即适度增加种植密度使秸秆木质化程度降低, 粗蛋白等营养物质含量升高, 秸秆的营养价值和饲喂价值相对提升。

## 2.4 青稞丰产与秸秆饲用品质的种植密度平衡点分析

昆仑 14 号 T3 水平抗倒性最佳、T4 秸秆和籽粒产量达到最大值、T5 秸秆相对饲喂价值最高; 门源亮蓝 T1 抗倒性最佳、T2 籽粒产量最高、T5 秸秆产量和相对饲用价值为最大值。

昆仑 14 号两年均在 T4 水平达到籽粒和秸秆产量最大值, 均值分别为  $7.98 \text{ t hm}^{-2}$  和  $14.57 \text{ t hm}^{-2}$ , 而平均秸秆相对饲喂价值为 56.60%, 较最大值下降 17.69%; T5 两年平均秸秆相对饲喂价达到最大值 68.76%, 籽粒和秸秆产量平均为  $7.21 \text{ t hm}^{-2}$  和  $13.46 \text{ t hm}^{-2}$ , 较最大值分别降低 9.65% 和 7.62%; 门源亮蓝 2 年均在 T2 获得籽粒产量最大值, 为  $3.43 \text{ t hm}^{-2}$ , 但该水平下秸秆产量和相对饲喂价值均值较低, 较

表1 种植密度对茎节和根系性状的影响  
Table 1 Effect of planting density on stem and root characteristics

品种 Variety	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Internode external diameter (mm)				壁厚 Internode wall thickness (mm)				根长 Root length (mm)	体积 Root volume (cm <sup>3</sup> )	根干重 Root weight (g)			
			基部第2节		基部第4节		基部第2节		基部第4节							
			2nd node from the base	3rd node from the base	4th node from the base	base	2nd node from the base	3rd node from the base	4th node from the base	base						
2017	昆仑14号	T1	108.78 b	4.29 a	3.84 a	3.99 a	0.48 a	0.47 a	0.39 a	71.75 e	0.16 a	0.32 bc	23.80 d			
	Kunlun 14	T2	112.07 a	3.78 ab	3.60 ab	3.78 ab	0.41 ab	0.42 ab	0.31 b	76.08 c	0.17 a	0.33 bc	26.18 c			
		T3	112.31 a	3.47 b	3.44 ab	3.68 b	0.38 ab	0.40 ab	0.31 b	105.74 a	0.18 a	0.47 a	27.67 b			
		T4	112.93 a	3.43 b	3.37 ab	3.59 b	0.37 ab	0.38 b	0.28 b	84.52 b	0.17 a	0.39 ab	29.16 a			
		T5	112.47 a	2.70 c	3.14 b	3.53 b	0.36 b	0.37 b	0.27 b	73.98 d	0.14 a	0.26 c	27.67 b			
	门源亮蓝	T1	114.42 a	3.30 a	2.99 a	2.88 a	0.29 a	0.29 a	0.22 a	98.10 a	0.18 a	0.28 a	26.01 a			
	Menyuanlianglan	T2	112.64 a	2.98 ab	2.72 ab	2.62 ab	0.28 ab	0.29 a	0.22 a	88.82 b	0.17 a	0.19 b	18.06 b			
		T3	111.51 a	2.83 b	2.57 b	2.57 abc	0.26 ab	0.28 a	0.20 a	62.22 c	0.14 ab	0.12 c	16.53 c			
		T4	113.61 a	2.79 b	2.52 b	2.42 bc	0.22 ab	0.22 ab	0.18 a	47.08 d	0.10 b	0.11 c	15.00 d			
		T5	111.84 a	2.38 c	2.52 b	2.32 c	0.20 b	0.20 b	0.18 a	44.70 e	0.08 b	0.08 d	14.38 d			
2018	昆仑14号	T1	118.97 b	3.90 a	3.50 a	3.50 a	0.41 a	0.40 a	0.32 a	67.69 d	0.16 a	0.25 bc	20.00 b			
	Kunlun 14	T2	122.57 a	3.43 b	3.21 ab	3.32 a	0.35 b	0.35 ab	0.26 b	71.77 c	0.15 ab	0.26 bc	22.00 ab			
		T3	122.83 a	3.15 b	3.07 bc	3.23 a	0.33 b	0.33 ab	0.25 b	99.75 a	0.13 ab	0.37 a	24.75 a			
		T4	121.30 a	3.12 b	3.01 bc	3.15 a	0.32 b	0.32 b	0.23 b	79.74 b	0.12 bc	0.31 ab	24.50 a			
		T5	120.68 ab	2.45 c	2.80 c	3.10 a	0.31 b	0.31 b	0.23 b	69.78 cd	0.101 c	0.21 c	23.25 a			
	门源亮蓝	T1	122.87 a	3.03 a	2.67 a	2.69 a	0.21 a	0.21 a	0.16 a	71.72 a	0.12 a	0.18 a	21.25 a			
	Menyuanlianglan	T2	120.96 b	2.74 a	2.45 a	2.45 a	0.20 a	0.20 a	0.16 a	64.94 b	0.10 ab	0.12 b	14.75 b			
		T3	119.75 b	2.60 a	2.32 a	2.40 a	0.19 a	0.20 a	0.14 a	45.49 c	0.07 bc	0.08 c	13.50 bc			
		T4	122.00 a	2.56 a	2.27 a	2.26 a	0.16 ab	0.16 a	0.13 a	34.42 d	0.06 c	0.07 cd	12.25 c			
		T5	120.10 b	2.18 b	2.21 a	2.17 a	0.14 b	0.14 a	0.13 a	32.68 e	0.04 c	0.05 d	11.75 c			

同列标以不同小写字母的数值表示在  $P \leq 0.05$  水平上差异显著。T1: 150×10<sup>4</sup> 棵 hm<sup>-2</sup>; T2: 225×10<sup>4</sup> 棵 hm<sup>-2</sup>; T3: 300×10<sup>4</sup> 棵 hm<sup>-2</sup>; T4: 375×10<sup>4</sup> 棵 hm<sup>-2</sup>; T5: 450×10<sup>4</sup> 棵 hm<sup>-2</sup>。  
Values within the same column followed by different lowercase letters are significantly different at  $P \leq 0.05$ . T1: 1.50×10<sup>6</sup> plants hm<sup>-2</sup>; T2: 2.25×10<sup>6</sup> plants hm<sup>-2</sup>; T3: 3.00×10<sup>6</sup> plants hm<sup>-2</sup>; T4: 3.75×10<sup>6</sup> plants hm<sup>-2</sup>; T5: 4.50×10<sup>6</sup> plants hm<sup>-2</sup>.

表 2 种植密度对倒伏特性的影响  
Table 2 Effect of planting density on lodging characteristics

品种 Variety	处理 Treatment	茎长 Stem length (cm)	茎重 Stem weight (g)				茎秆强度 Stem strength			
			基部第 2 节 2nd node from the base		基部第 3 节 3rd node from the base		基部第 4 节 4th node from the base		基部第 2 节 2nd node from the base	
			基部第 2 节 2nd node from the base	基部第 3 节 3rd node from the base	基部第 4 节 4th node from the base	基部第 2 节 2nd node from the base	基部第 3 节 3rd node from the base	基部第 4 节 4th node from the base	基部第 2 节 2nd node from the base	基部第 3 节 3rd node from the base
2017										
昆仑 14 号 Kunlun 14	T1	10.56 b	13.36 a	22.84 a	0.28 b	0.24 b	0.27 b	0.27 b	10.60 ab	6.57 a
	T2	10.76 b	13.95 a	20.05 a	0.29 b	0.27 b	0.28 b	0.28 b	14.54 ab	7.15 a
	T3	13.07 a	16.30 a	23.31 a	0.35 a	0.40 a	0.36 a	0.36 a	19.34 a	9.11 a
	T4	12.50 a	15.00 a	21.36 a	0.25 b	0.23 bc	0.24 b	0.24 b	9.92 b	5.99 a
	T5	11.84 ab	14.23 a	20.75 a	0.24 b	0.22 c	0.23 b	0.23 b	9.54 b	4.15 b
门源亮蓝 Menyuanlianglan	T1	13.65 c	14.99 b	17.94 c	0.14 ab	0.16 ab	0.16 b	0.16 b	4.07 b	1.85 b
	T2	13.10 c	14.90 b	17.00 c	0.15 a	0.16 a	0.19 a	0.16 a	4.63 a	2.35 a
	T3	14.36 bc	16.06 b	18.49 bc	0.13 b	0.15 abc	0.15 b	0.15 b	2.97 c	1.56 c
	T4	16.22 ab	16.27 ac	20.13 ab	0.11 c	0.13 bc	0.14 b	0.13 bc	2.10 d	1.48 c
	T5	16.96 a	18.51 a	20.55 a	0.10 c	0.12 c	0.14 b	0.12 c	1.77 d	1.413 c
2018										
昆仑 14 号 Kunlun 14	T1	11.25 d	14.15 d	21.67 c	0.28 a	0.34 a	0.28 a	0.28 a	7.31 c	4.45 b
	T2	13.30 b	15.00 cd	22.28 bc	0.23 ab	0.21 b	0.22 a	0.22 a	10.03 b	4.84 b
	T3	13.90 a	17.53 a	25.90 a	0.22 b	0.19 b	0.21 a	0.21 a	13.34 a	6.61 a
	T4	12.60 c	16.13 b	23.73 b	0.20 b	0.19 b	0.19 a	0.19 a	6.84 d	4.06 b
	T5	11.45 d	15.30 bc	22.68 bc	0.19 b	0.17 b	0.18 a	0.17 b	6.58 d	2.81 c
门源亮蓝 Menyuanlianglan	T1	14.28 d	16.30 c	18.68 c	0.14 a	0.15 a	0.17 a	0.17 a	3.73 a	1.86 a
	T2	14.87 d	16.40 c	19.70 bc	0.13 a	0.14 a	0.14 ab	0.14 ab	3.28 a	1.49 a
	T3	15.65 c	17.57 b	20.30 b	0.12 a	0.13 a	0.13 ab	0.13 ab	2.39 b	1.24 a
	T4	17.67 b	17.80 b	22.10 a	0.10 a	0.12 a	0.11 bc	0.11 bc	1.69 bc	1.17 a
	T5	18.48 a	20.25 a	22.93 a	0.09 a	0.11 a	0.08 c	0.08 c	1.43 c	1.21
										1.01 b

同列标以不同小写字母的数值表示在  $P \leq 0.05$  水平上差异显著。T1: 150×10<sup>4</sup> 株 hm<sup>-2</sup>; T2: 225×10<sup>4</sup> 株 hm<sup>-2</sup>; T3: 300×10<sup>4</sup> 株 hm<sup>-2</sup>; T4: 375×10<sup>4</sup> 株 hm<sup>-2</sup>; T5: 450×10<sup>4</sup> 株 hm<sup>-2</sup>。  
Values within the same column followed by different lowercase letters are significantly different at  $P \leq 0.05$ . T1: 1.50×10<sup>6</sup> plants hm<sup>-2</sup>; T2: 2.25×10<sup>6</sup> plants hm<sup>-2</sup>; T3: 3.00×10<sup>6</sup> plants hm<sup>-2</sup>; T4: 3.75×10<sup>6</sup> plants hm<sup>-2</sup>; T5: 4.50×10<sup>6</sup> plants hm<sup>-2</sup>.

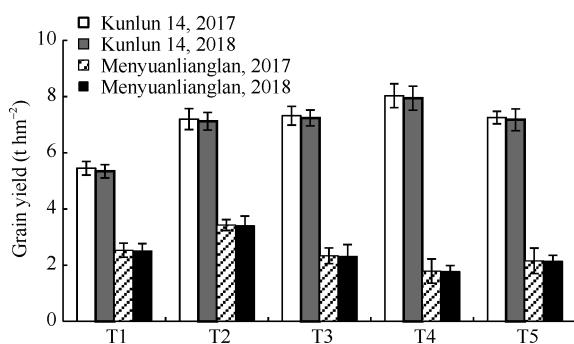


图1 种植密度对籽粒产量的影响

Fig. 1 Effect of planting density on grain yield

T1:  $150 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T2:  $225 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T3:  $300 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ;T4:  $375 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T5:  $450 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ 。T1:  $1.50 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T2:  $2.25 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T3:  $3.00 \times 10^6$ plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T4:  $3.75 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T5:  $4.50 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ .

最大值分别下降 62.67% 和 11.11%; 两年中 T5 稻秆产量和相对饲喂价值均达到最大值, 分别为  $8.48 \text{ t hm}^{-2}$  和 86.22%, 但该水平下籽粒产量为  $2.16 \text{ t hm}^{-2}$ , 比最大值低 37.10%; T3 水平两年籽粒产量、稻秆产量和相对饲喂价值的均值较其对应最大值降低, 分别降低 31.86%、11.69% 和 4.93%; T4 水平籽粒产量、稻秆产量和相对饲喂价值的两年均值较最大值分别降低 47.84%、3.73% 和 2.81%。生产中要根据青稞生产目标, 综合考虑上述各因素选择适宜的种植密度, 昆仑 14 号作为粮食作物和粮饲兼用时适宜密度均为  $375 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; 门源亮蓝做粮食作物时适宜密度为  $225 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ , 而粮饲兼用时适宜种植密度为  $300 \times 10^4 \sim 375 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ 。

表3 种植密度对青稞田间倒伏率的影响

Table 3 Effect of planting density on lodging in hulless barley field (%)

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	开花期 Anthesis stage		灌浆期 Filling stage		成熟期 Mature stage	
			LR	LD	LR	LD	LR	LD
2017	昆仑 14 号 Kunlun 14	T1	0	0	0	0	0	0
		T2	0	0	0	0	0	0
		T3	0	0	0	0	0	0
		T4	0	0	0	0	0	0
		T5	0	0	0	0	0	0
	门源亮蓝 Menyuanlianglan	T1	0	0	37.95	3	80.87	5
		T2	0	0	38.92	3	81.43	5
		T3	0	0	51.79	4	83.05	5
		T4	0	0	56.50	4	83.09	5
		T5	19.38	1	74.50	4	95.09	5
2018	昆仑 14 号 Kunlun 14	T1	0	0	0	0	0	0
		T2	0	0	0	0	0	0
		T3	0	0	0	0	0	0
		T4	0	0	0	0	0	0
		T5	0	0	0	0	0	0
	门源亮蓝 Menyuanlianglan	T1	0	0	45.67	3	97.33	5
		T2	0	0	46.84	3	98.00	5
		T3	0	0	62.33	4	99.95	5
		T4	0	0	68.00	4	100.00	5
		T5	23.33	1	89.67	5	100.00	5

同列标以不同小写字母的数值表示在  $P \leq 0.05$  水平上差异显著。LR: 倒伏率; LD: 倒伏程度; T1:  $150 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T2:  $225 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T3:  $300 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T4:  $375 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T5:  $450 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ 。

Values within the same column followed by different lowercase letters are significantly different at  $P \leq 0.05$ . LR: lodging rate; LD: lodging degree; T1:  $1.50 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T2:  $2.25 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T3:  $3.00 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T4:  $3.75 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T5:  $4.50 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ .

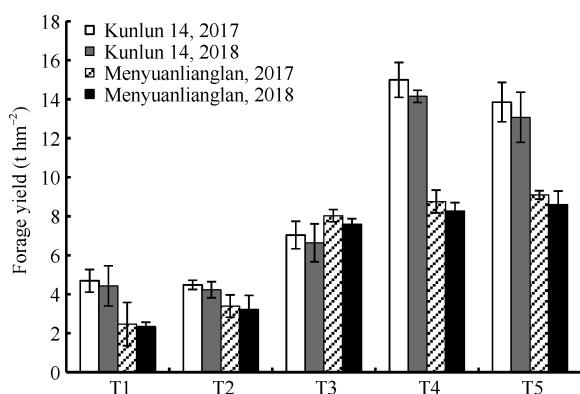


图2 种植密度对秸秆产量的影响

Fig. 2 Effect of planting density on forage yield

T1:  $150 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T2:  $225 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T3:  $300 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ;  
T4:  $375 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T5:  $450 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ 。

T1:  $1.50 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T2:  $2.25 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T3:  $3.00 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ;  
T4:  $3.75 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T5:  $4.50 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ 。

表4 种植密度对青稞饲草品质的影响

Table 4 Effect of planting density on the quality of hulless barley forage

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	粗蛋白 Crude protein (%)	NDF (%)	ADF (%)	半纤维素 Hemicellulose (%)	纤维素 Cellulose (%)	木质素 Lignin (%)	RFV
2017	昆仑 14 号 Kunlun 14	T1	1.69 ab	75.61 c	53.40 ab	22.56 c	36.44 d	15.17 d	58.20 b
		T2	1.70 ab	79.47 b	55.87 ab	23.98 b	37.20 c	18.20 b	53.11 c
		T3	1.68 ab	84.81 a	60.11 a	25.09 a	39.62 a	19.99 a	46.14 d
		T4	1.91 a	79.07 b	55.31 ab	24.14 b	37.72 b	17.12 c	53.89 c
		T5	1.65 b	71.77 d	48.97 b	23.16 c	35.77 e	12.79 e	65.79 a
	门源亮蓝 Menyuan lianglan	T1	1.79 b	69.67 a	47.97 a	22.03 a	35.19 a	12.38 a	68.81 d
		T2	1.94 b	67.14 b	46.06 b	21.42 ab	34.07 b	11.61 ab	73.46 c
		T3	2.33 a	64.63 c	43.95 c	21.00 bc	32.50 c	11.09 bc	78.67 b
		T4	2.47 a	63.74 c	43.35 c	20.70 bc	32.13 c	10.86 c	80.45 ab
		T5	2.70 a	62.51 d	42.68 d	20.14 c	31.97 c	10.36 c	82.81 a
2018	昆仑 14 号 Kunlun 14	T1	1.83 ab	71.95 c	50.72 d	21.23 b	34.88 cd	15.84 c	63.85 b
		T2	1.84 ab	75.63 b	53.07 bc	22.56 a	35.61 bc	17.46 b	58.50 c
		T3	1.81 b	80.71 a	57.10 a	23.61 a	37.92 a	19.18 a	51.19 d
		T4	1.78 b	75.25 b	52.54 cd	22.71 a	36.11 b	16.43 c	59.30 c
		T5	1.93 a	68.31 d	46.51 e	21.79 a	34.24 d	12.27 d	71.73 a
	门源亮蓝 Menyuan lianglan	T1	2.10 d	66.30 a	45.56 a	20.73 a	33.68 a	11.88 a	74.94 d
		T2	2.20 cd	63.90 b	43.75 b	20.15 ab	32.61 a	11.14 b	79.81 c
		T3	2.52 bc	61.51 c	41.75 c	19.76 b	31.11 b	10.64 bc	85.26 b
		T4	2.67 ab	60.66 cd	41.18 c	19.48 c	30.76 b	10.42 cd	87.13 b
		T5	2.92 a	59.49 d	40.54 c	18.95 c	30.60 b	9.94 d	89.62 a

同列标以不同小写字母的数值表示在  $P \leq 0.05$  水平上差异显著。NDF: 中性洗涤纤维; ADF: 酸性洗涤纤维; RFV: 相对饲用价值; T1:  $150 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T2:  $225 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T3:  $300 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T4:  $375 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; T5:  $450 \times 10^4$  株  $\text{hm}^{-2}$ 。

Values within the same column followed by different lowercase letters are significantly different at  $P \leq 0.05$ . NDF: neutral detergent fiber; ADF: acid detergent fiber; RFV: relative feed value; T1:  $1.50 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T2:  $2.25 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T3:  $3.00 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T4:  $3.75 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ; T5:  $4.50 \times 10^6$  plants  $\text{hm}^{-2}$ .

### 3 讨论

#### 3.1 种植密度对青稞生长发育的影响

已有研究表明, 种植密度可通过影响作物生理状况和冠层结构来调控植株的生长发育<sup>[10,21]</sup>。随着种植密度的增大, 作物株高、基部节间长度均增加<sup>[22-23]</sup>, 节间直径、壁厚、机械强度下降<sup>[24]</sup>, 根系生长发育受到抑制<sup>[9]</sup>, 最终影响产量及其构成因素<sup>[25]</sup>。本研究表明, 过度密植会严重抑制茎秆和根系的生长发育。昆仑 14 号在 T3 水平之后根系直径、体积、根干重、根数等和茎秆茎粗、壁厚均显著下降; 门源亮蓝根系和茎秆生长发育均受密度明显限制。种植密度对不同抗倒性青稞品种生长发育的影响存在一定差异, 可能与品种的胁迫耐受性和生产潜能相关<sup>[26]</sup>。密度增大导致相邻植株冠层遮蔽, 单株光合

作用大幅度下降,引起植物的避荫反应,使其将更多的同化物从储存器官分配到营养器官,引发茎秆快速纵向伸长,导致壁厚变薄、茎粗变细;密度增加同时加剧了根系生长的空间压力,抑制根系的横向生长,限制营养物质和水分等的吸收,影响植株正常的生长发育,导致倒伏率增加,产量下降<sup>[27-29]</sup>。

### 3.2 种植密度对青稞倒伏特性和饲草特性的影响

茎秆抗倒伏能力与基部节间的形态结构和化学成分密切相关,纤维素在茎秆中起骨架作用,半纤维素贯穿骨架结构,并与纤维束外围的木质素通过共价键构成网络结构,使茎秆坚硬<sup>[30]</sup>。有研究表明木质素含量和组成是影响细胞壁刚度和植物体机械强度的重要因素,植物细胞壁中的木质素积累不仅受到发育调节,而且还受到生物和非生物胁迫等环境条件的影响<sup>[31-32]</sup>。本研究表明,随着种植密度增加,门源亮蓝倒伏时期提前、倒伏率增大、倒伏程度加重。昆仑14号随着种植密度的增大,茎秆中木质素、纤维素和半纤维素含量先增后降,茎长、茎重和秆强等呈相同的变化趋势,过度密植使茎秆抗倒伏能力下降,倒伏风险加大,但受到品种自身遗传特性的影响,并未出现倒伏现象;门源亮蓝随密度增大倒伏率增加倒伏程度加重。原因可能为高密度群体郁蔽程度变高,茎秆支撑性减弱,降低了冠层碳同化和叶片对光的截留效率<sup>[33]</sup>,植株生长发育减弱同时增加了虫害的发生,使蚜虫虫口密度显著增加,部分茎秆被蚜虫啃食加剧了植株倒伏程度。

目前关于密度对青稞秸秆品质和饲用价值影响的研究报道相对较少。饲草营养品质特性的指标主要有粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维以及相对饲喂价值等。本研究表明随着种植密度增大,昆仑14号饲草产量先增后降,门源亮蓝则依次增加,但增幅逐渐趋于平缓;秸秆相对饲喂价值变化相反。增大种植密度使秸秆中木质素含量降低,纤维素的消化率增加,而NDF、ADF等消化率低的物质含量下降,粗蛋白和相对饲喂价值提高,这与王彦华等<sup>[20]</sup>对紫花苜蓿的研究结果相似。通过对比发现,门源亮蓝秸秆NDF、ADF和木质素等含量较低,营养成分含量较高,其相对饲用价值高于昆仑14号,这可能与品种遗传特性以及植株倒伏状态密切相关,造成该差别的机理有待进一步研究。

### 3.3 青稞丰产与秸秆饲用品质的种植密度平衡点

作物的适宜种植密度受气候、用途、栽培技术和耐密性等因素的影响<sup>[34]</sup>。在生产实践中要根据生

产目标选择适宜的种植密度。2017年和2018年参试青稞的根、茎、穗和产量等相关指标存在差异,这可能与两年间降水量、光照等自然条件不同相关,但两个品种各项指标受种植密度影响变化趋势基本相似。昆仑14号T3水平抗倒性最强、T4秸秆和籽粒产量均达到最大值、T5秸秆相对饲用价值最高;门源亮蓝T1抗倒性较好、T2籽粒产量最高, T5秸秆产量最高、秸秆饲用品质最佳。表明青稞秸秆抗倒性与其相对饲用价值呈负相关,抗倒能力和籽粒产量较高的密度水平下,秸秆木质化程度较高,消化率低的成分含量增加,营养物质含量降低,相对饲喂价值较低,无法实现青稞的粮饲兼用的利益最大化;反之,相对饲用价值最大的种植密度下,青稞秸秆细弱、叶片衰老、光合速率降低,易发生倒伏和各类病虫害,倒伏植株在田间堆积,下层秸秆腐烂,使其饲用价值降低甚至无法利用,导致整体经济效益下降。

## 4 结论

适度密植可以促进青稞的生长发育,提高饲用秸秆产量;过度密植则严重限制青稞的生长发育,使其抗倒性降低,且秸秆中纤维素含量降低,粗蛋白含量增加,秸秆相对饲用价值提高。昆仑14号丰产与高效利用的最佳适宜密度为375万株·hm<sup>-2</sup>;门源亮蓝粮饲兼用时适宜种植密度为300~375万株·hm<sup>-2</sup>。

## References

- [1] 吴昆仑, 赵媛, 迟德钊. 青稞Wx基因多态性与直链淀粉含量的关系. 作物学报, 2012, 38: 71~79.  
Wu K L, Zhao Y, Chi D Z. Relationship polymorphism of Wx gene and amylose content in hulless barley. *Acta Agric Sin*, 2012, 38: 71~79 (in Chinese with English abstract).
- [2] Khan S, Anwar S, Kuai J, Ullah S, Fahad S, Zhou G S. Optimization of nitrogen rate and planting density for improving yield, nitrogen use efficiency, and lodging resistance in oilseed rape. *Front Plant Sci*, 2017, 8: 532.
- [3] 杨吉顺, 高辉远, 刘鹏, 李耕, 董树亭, 张吉旺, 王敬峰. 种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响. 作物学报, 2010, 36: 1226~1233.  
Yang J S, Gao H Y, Liu P, Li G, Dong S T, Zhang J W, Wang J F. Effects of planting density and row spacing on canopy apparent photosynthesis of high-yield summer corn. *Acta Agron Sci*, 2010, 36: 1226~1233 (in Chinese with English abstract).
- [4] Xiao Y G, Liu J J, Li H S, Cao X Y, Xia X C, He Z H. Lodging resistance and yield potential of winter wheat: effect of planting density and genotype. *Front Agric Sci Engineer*, 2015, 2: 168~178.
- [5] Li J C, Yin J, Wei F Z. Effects of planting density on characters of

- culm and culm lodging resistant index in winter wheat. *Acta Agron Sin*, 2005, 31: 662–666.
- [6] 姚敏娜, 施志国, 薛军, 杨再文, 勾玲, 张旺锋. 种植密度对玉米茎秆皮层结构及抗倒伏能力的影响. 新疆农业科学, 2013, 50: 2006–2014.
- Yao M N, Shi Z G, Xue J, Yang Z W, Gou L, Zhang W F. The effects of different planting densities on the cortex structure of stem and lodging resistance in maize. *Xinjiang Agric Sci*, 2013, 50: 2006–2014 (in Chinese with English abstract).
- [7] Lin X Q, Zhu D F, Chen H Z, Cheng S H, Uphoff N. Effect of plant density and nitrogen fertilizer rates on grain yield and nitrogen uptake of hybrid rice (*Oryza sativa* L.). *J Agric Biotechnol Sustain Dev*, 2009, 1: 44–53.
- Tian B, Liu Y, Zhang L, Zhang L X, Li H J. Stem lodging parameters of the basal three internodes associated with plant population densities and developmental stages in foxtail millet (*Setaria italica*) cultivars differing in resistance to lodging. *Crop Pasture Sci*, 2017, 68: 349–357.
- [9] 石德杨, 李艳红, 夏德军, 张吉旺, 刘鹏, 赵斌, 董树亭. 种植密度对夏玉米根系特性及氮肥吸收的影响. 中国农业科学, 2017, 50: 2006–2017.
- Shi D Y, Li Y H, Xia D J, Zhang J W, Liu P, Zhao B, Dong S T. Effects of planting density on root characteristics and nitrogen uptake in summer maize. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 2006–2017 (in Chinese with English abstract).
- [10] Konno Y. Feedback regulation of constant leaf standing crop in *Sasa tsuboiana* grasslands. *Ecol Res*, 2001, 16: 459–469.
- 肖继兵, 刘志, 孔凡信, 辛宗绪, 吴宏生. 种植方式和密度对高粱群体结构和产量的影响. 中国农业科学, 2018, 51: 4264–4276.
- Xiao J B, Liu Z, Kong F X, Xin Z X, Wu H S. Effects of planting pattern and density on population structure and yield of sorghum. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 4264–4276 (in Chinese with English abstract).
- [12] Kong E, Liu D C, Guo X L, Yang W L, Sun J Z, Li X, Zhan K H, Cui D Q, Lin J X, Zhang A M. Anatomical and chemical characteristics associated with lodging resistance in wheat. *Crop J*, 2013, 1: 43–49.
- Tian B, Liu Y, Zhang L, Li H. Stem lodging parameters of the basal three internodes associated with plant population densities and developmental stages in foxtail millet (*Setaria italica*) cultivars differing in resistance to lodging. *Crop Past Sci*, 2017, 68: 349–357.
- [14] Ookawa T, Ishihara K. Varietal difference of physical characteristics of the culm related to lodging resistance in paddy rice. *Jpn J Crop Sci*, 1992, 61: 419–425.
- 白羿雄, 姚晓华, 姚有华, 吴昆仑. 青稞抗倒伏性状的基因型差异. 中国农业科学, 2019, 52: 228–238.
- Bai Y X, Yao X H, Yao Y H, Wu K L. Difference of traits relating to lodging resistance in hulless barley genotypes. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 228–238 (in Chinese with English abstract).
- [16] Cusicanqui J A, Lauer J G. Plant density and hybrid influence on corn forage yield and quality. *Agron J*, 1999, 91: 911–915.
- [17] 王凯, 赵小红, 姚晓华, 姚有华, 白羿雄, 吴昆仑. 茎秆特性和木质素合成与青稞抗倒伏关系. 作物学报, 2019, 45: 632–638.
- Wang K, Zhao X H, Yao X H, Yao Y H, Bai Y X, Wu K L. Relationship of stem characteristics and lignin synthesis with lodging resistance of hulless barley. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 632–638 (in Chinese with English abstract).
- [18] 池宁琳. 植物纤维中不溶性碳水化合物的测定. 上海: 复旦大学, 2012. pp 27–28.
- Chi N L. Determination of Insoluble Carbohydrates in Plant Fibers. Shanghai: Fudan University, 2012. pp 27–28 (in Chinese).
- [19] GB/6432-94. 饲料粗蛋白质的测定方法. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- GB/6432-94. Method for the Determination of Crude Protein in feedstuffs. Beijing: China Standards Press, 2000.
- [20] 王彦华, 王成章, 李德锋, 郑爱荣, 齐胜利, 李冠真. 播种量和品种对紫花苜蓿植株动态变化、产量及品质的影响. 草业学报, 2017, 26: 123–135.
- Wang Y H, Wang C Z, Li D F, Zheng A R, Qi S L, Li G Z. Effects of seeding rate on plant number, production performance, and quality of alfalfa. *Acta Pratac Sin*, 2017, 26: 123–135 (in Chinese with English abstract).
- [21] 梁烜赫, 徐晨, 赵鑫, 陈宝玉, 胡宇, 曹铁华. 干旱对不同种植密度玉米生长发育及产量的影响. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 15–19.
- Liang X H, Xu C, Zhao X, Chen B Y, Hu Y, Cao T H. The impact of drought and planting density on growth and yield of maize. *J Irrig Drain*, 2018, 37(11): 15–19 (in Chinese with English abstract).
- [22] Lashkari M, Madani H, Ardakani M R, Golzardi F, Zargari K. Effect of plant density on yield and yield components of different corn (*Zea mays* L.) hybrids. *Am-Euras J Agric Environ Sci*, 2011, 10: 450–457.
- [23] Sangoli L, Graciotti M A, Rampazzo C, Bianchetti P. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. *Field Crops Res*, 2002, 79: 39–51.
- [24] 邵庆勤, 周琴, 王笑, 蔡剑, 黄梅, 戴廷波, 姜东. 种植密度对不同小麦品种茎秆形态特征、化学成分及抗倒性能的影响. 南京农业大学学报, 2018, 41: 808–816.
- Shao Q Q, Zhou Q, Wang X, Cai J, Huang M, Dai T B, Jiang D. Effects of planting density on stem morphological characteristics, chemical composition and lodging resistance of different wheat varieties. *J Nanjing Agric Univ*, 2018, 41: 808–816 (in Chinese with English abstract).
- [25] Chen B, Zhang Z, Yan L, Hou X, Zhang W, Zhang G. Effects of different row spacing and planting density on the main agronomic characters and yield of a maize variety Xianyu 335. *Agric Sci Technol*, 2017, 18: 801–804.
- Tollenaar M, Lee E A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Res*, 2002, 75: 161–169.
- [27] Duncan W G. Leaf angles, leaf area, and canopy photosynthesis. *Crop Sci*, 1971, 11: 482–485.
- [28] Hammer G L, Dong Z, McLean G, Doherty A, Messina C, Schusler J, Cooper M. Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the US corn belt? *Crop Sci*, 2009, 49: 299–312.
- [29] Franklin K A. Shade avoidance. *New Phytol*, 2008, 179: 930–944.

- [30] 张晓阳, 杜凤光, 常春, 王林风. 纤维素生物质水解与应用. 郑州: 郑州大学出版社, 2012. pp 3–17.
- Zhang X Y, Du F G, Chang C, Wang L F. Hydrolysis and Application of Cellulose Biomass. Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2012. pp 3–17 (in Chinese).
- [31] Chabannes M, Ruel K, Yoshinaga A, Chabber B, Jauneau A, Joseleau J P, Boudet A M. In situ analysis of lignins in transgenic tobacco reveals a differential impact of individual transformations on the spatial patterns of lignin deposition at the cellular and subcellular levels. *Plant J*, 2001, 28: 271–282.
- [32] Moura J C, Bonine C A, Dornelas M C, Mazzafera P. Abiotic and biotic stresses and changes in the lignin content and composition in plants. *J Integr Plant Biol*, 2010, 52: 360–376.
- [33] Setter T L, Laureles E V, Mazaredo A M. Lodging reduces yield of rice by self-shading and reductions in canopy photosynthesis. *Field Crops Res*, 1997, 49: 95–106.
- [34] 于德花, 陈小芳, 毕云霞, 邵秋玲. 种植密度对不同株型青贮玉米产量及相关特性的影响. 草业科学, 2018, 35: 1465–1471.
- Yu D H, Chen X F, Bi Y X, Shao Q L. Effect of planting density on yield and related traits of silage maize with different plant types. *Pratac Sci*, 2018, 35: 1465–1471 (in Chinese with English abstract).