

DOI:10.11686/cyxb2025342

<http://cyxb.magtech.com.cn>

雍嘉仪, 雍佳熹, 张颖, 等. 5 种燕麦再生生长性能及饲草品质对留茬高度的响应. 草业学报, 2026, 35(8): 97—111.

YONG Jia-yi, YONG Jia-xi, ZHANG Ying, *et al.* Regrowth and forage quality responses to stubble height in five oat varieties. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(8): 97—111.

5 种燕麦再生生长性能及饲草品质对留茬高度的响应

雍嘉仪¹, 雍佳熹¹, 张颖¹, 胡海英^{1,2*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学草业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要:宁夏是我国优势农产品区域布局中重要的优势畜牧业生产基地。牧草作为畜牧业的重要物质基础, 探究其再生能力对畜牧业的可持续发展有重要意义。本研究采用盆栽试验, 对燕麦 5 个品种[‘挑战者’(TZZ)、‘甜燕 1 号’(TY)、‘牧乐思’(MLS)、‘喜韵’(XY)和‘白燕 7 号’(BY)]于抽穗期进行刈割处理, 刈割留茬高度为 5、10 和 15 cm, 以齐地刈割为对照(CK), 分析不同品种在不同留茬高度下的再生机制及其种内差异。结果表明: 1) 随留茬高度的增加, 5 种燕麦的株高、分蘖数、叶面积和茎叶生物量逐渐增加, 根生物量、根冠比逐渐降低。在 5 cm 处理下, TY 和 MLS 的茎叶生物量呈欠补偿生长, TZZ、XY 和 BY 的茎叶生物量呈等补偿生长; 在 10 cm 处理下, XY 和 MLS 的茎叶生物量呈等补偿生长, TZZ、TY、BY 的茎叶生物量呈超补偿生长; 在 15 cm 处理下, 5 种燕麦的茎叶生物量均呈超补偿生长。2) 5 种燕麦叶片和根中的淀粉、可溶性糖含量基本随留茬高度的增加而增加, 根中可溶性糖含量均高于叶片。留茬 5 cm 时, TZZ、TY 和 MLS 叶片和根中的可溶性蛋白含量均最低, BY 反之。刈割后燕麦中粗蛋白含量降低, 中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量增加, 粗蛋白含量随留茬高度的增加而显著增加($P < 0.05$), 中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量随留茬高度的增加而降低, 相对饲草质量随留茬高度的增加而增加。3) 由主成分分析结果可知, 变异范围表现为 $MLS > TZZ > TY \approx BY > XY$ 。灰色关联度分析显示, 15 cm 处理下各品种的加权排名均高于 5 cm 处理, 排名由高到低依次为 $MLS-15\text{ cm} > TZZ-15\text{ cm} > TY-15\text{ cm} > TY-10\text{ cm} > BY-15\text{ cm} > TZZ-10\text{ cm} > MLS-10\text{ cm} > XY-15\text{ cm} > BY-10\text{ cm} > TY-5\text{ cm} > BY-5\text{ cm} > XY-10\text{ cm} > XY-5\text{ cm} > MLS-5\text{ cm} > TZZ-5\text{ cm}$ 。

关键词: 燕麦; 留茬高度; 再生; 饲草品质; 补偿生长

Regrowth and forage quality responses to stubble height in five oat varieties

YONG Jia-yi¹, YONG Jia-xi¹, ZHANG Ying¹, HU Hai-ying^{1,2*}

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia University Grass and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China

Abstract: Within China, Ningxia makes an important contribution to national animal husbandry and production for human benefit. Information on the regenerative capacity of forage species is essential to forage supply for the sustainable development of animal husbandry in the region. This study reports a pot experiment on five oat varieties denoted: ‘Challenger’ (TZZ), ‘Tianyan No. 1’ (TY), ‘Molasses’ (MLS), ‘Xiyun’ (XY), and ‘Baiyan No. 7’ (BY), with stubble height treatments of 5, 10, and 15 cm, and a control treatment of cutting at ground level (CK). The regenerative mechanisms and differences among the five varieties under the different stubble heights were analyzed at the heading stage. It was found that: 1) With increase in stubble height, the plant height, tiller number, leaf area, and stem and leaf biomass of the five oat varieties gradually increased, while the root biomass and root-

收稿日期: 2025-08-27; 改回日期: 2025-10-13

基金项目: 宁夏重点研发计划引进专项(2024BEH04147)和宁夏重点研发计划重点项目(2022BEG02011)资助。

作者简介: 雍嘉仪(2001—), 女, 宁夏中卫人, 在读硕士。E-mail: 1683141753@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: haiying@nxu.edu.cn

shoot ratio gradually decreased. Under the 5 cm treatment, the stem and leaf biomass of TY and MLS was inhibited, while that of TZZ, XY, and BY showed equal-compensatory growth. Under the 10 cm treatments, the stem and leaf biomass of XY and MLS showed equal-compensatory growth, while that of TZZ, TY, and BY showed over-compensatory growth. Under the 15 cm treatments, the stem and leaf biomass of all five oat varieties showed over-compensatory growth. 2) The starch and soluble sugar contents in the leaves and roots of the five oat varieties increased with increase in stubble height. The soluble protein contents in the leaves and roots of TZZ, TY, and MLS increased with increase in stubble height, while those of XY and BY decreased. After cutting, the crude protein content of oats decreased, while the neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF) contents increased. The crude protein content significantly increased with increase in stubble height ($P < 0.05$), while the NDF and ADF contents decreased. The relative feeding value increased with increase in stubble height. 3) Principal component analysis results indicated that the variation range was $MLS > TZZ > TY$ and $BY > XY$. The grey relational analysis showed that the weighted rankings of all varieties under the 15 cm treatments were higher than those under the 5 cm treatments. The rankings from high to low were $MLS-15\text{ cm} > TZZ-15\text{ cm} > TY-15\text{ cm} > TY-10\text{ cm} > BY-15\text{ cm} > TZZ-10\text{ cm} > MLS-10\text{ cm} > XY-15\text{ cm} > BY-10\text{ cm} > TY-5\text{ cm} > BY-5\text{ cm} > XY-10\text{ cm} > XY-5\text{ cm} > MLS-5\text{ cm} > TZZ-5\text{ cm}$.

Key words: oat; stubble height; regrowth; forage quality; compensatory growth

近年来,随着全球人口增长和对畜产品需求的日益提高,畜牧业发展需要大量优质牧草。刈割是牧草农业生产中的重要环节,牧草刈割后可加工调制成青贮草、半干贮草或干草,能提高草地和牧草的利用率,并满足家畜的营养需求。刈割强度的不同对草地植物的影响也不同,通常用留茬高度来表征,一般来说,对草地高留茬刈割,获得的地上生物量较少,而对草地低留茬刈割,可以收获较高的地上生物量。但留茬过低有破坏生长点的风险,使牧草基部损失大量叶片,光合作用减弱,其再生生长性能和地下器官的营养物质积累都会受到影响^[1]。

补偿性生长是指生物在经历逆境或损伤后,通过加速生长或修复过程来补偿损失的生长量或组织,有助于生物在面对外界压力时适应和恢复,这是生物应对外界压力的一种适应性机制^[2]。适度刈割能促进植物的超补偿生长,一方面通过伤害植物的正常组织抑制植物的生长,另一方面通过去除顶端和衰老组织刺激植物的生长。因此,植物的补偿性生长取决于这种促进与抑制间的净效应^[3]。马红彬等^[4]研究表明,刈割使植物用于光合作用的叶面积快速减少,破坏叶片能量的收支平衡,引发生理生化反应,从而引发植物的补偿生长,以弥补刈割造成的能量损失。杨灿鑫^[5]研究显示,适度的刈割促使短尖苔草(*Carex brevicuspis*)启动补偿性生长机制,叶绿素合成加快,含量增多。郭安琪等^[6]在研究刈割后黑麦草(*Lolium perenne*)生理保护作用对其补偿性生长的影响时表明,全割后叶片补偿性生长最明显,轻度和中度次之,重度刈割无补偿性生长。陈红等^[7]的研究发现,不论在营养生长早期还是后期刈割,留茬高更有利于燕麦(*Avena sativa*)的补偿作用,燕麦的补偿能力更大一些。刈割后植物再生能力的强弱与其补偿性生长的生理机制紧密相关^[8]。Nowak等^[9]研究认为,牧草组织和器官的重新构建决定了牧草的再生过程。刈割后,植物剩余的叶片部分可能影响植株的叶面积建成以及再生茎叶的干物质量,例如,可溶性糖为再生生长提供能量和碳骨架,牧草体内提升的碳同化能力可协助其生成补偿性光合作用,有利于刈割后的牧草加速生长。另外,刈割会影响碳水化合物含量和分布,加快碳水化合物的合成与转移,刺激补偿生长,促进分生组织和新器官生成^[10]。非结构性碳水化合物是植物贮藏养分的主要存在形式,是植物再生的重要物质基础,对植物营养代谢、翌年萌发和刈后再生等具有重要作用^[11]。张盼等^[12]研究表明,刈割后,甜高粱(*Sorghum bicolor* ‘Dochna’)通过促进叶片淀粉积累,增加叶片和根系蔗糖积累以及降低纤维素含量等动态调节机制,保障地上部优先再生,其次恢复根系生长发育,协同促进其快速再生。杨惠敏等^[13]发现,植物在刈割后,贮藏在根部的大量有机物可以分解为可溶性糖和蛋白质,保障地上部剩余叶片的再生。因此,根部有机物贮存通常被认为是牧草恢复生长和草地持久性的标志^[14]。Wang等^[15]通过研究黑麦草的再生,发现根系诱导的细胞分裂素是影响黑麦草再生的最直接因素。细胞分裂素水平的提高对再生芽的萌发和维持生长具有重要的促进作用^[16]。

张璐^[17]的研究结果表明,细胞分裂素(cytokinin, CTK)与燕麦再生芽、再生产量及再生力呈显著正相关。因此改变植物内源激素含量是提高燕麦再生产量的一条重要途径。

燕麦是禾本科燕麦属一年生草本植物,产区主要集中在北半球的温带地区,是重要的牧草、饲料和粮食作物^[18]。燕麦具有喜冷凉、耐贫瘠等特点,具有丰富的营养价值和较好的饲喂适口性。随着我国畜牧业迅速发展,燕麦作为第一大禾本科商品草,其市场需求量日益加大^[19]。宁夏地处中国西北内陆,属温带大陆性干旱半干旱气候,水资源短缺、土地荒漠化风险高,饲草季节性供需矛盾突出。在此背景下,燕麦的再生能力为实现资源的集约利用与畜牧业的可持续发展提供了有效途径。再生燕麦实现了“一播两收”甚至“一播多收”,头茬刈割后,再生草能快速填补饲草的供应缺口,大幅提高了单位土地面积的年生物产量与利用效率。从生态安全角度来看,刈割后再生植被能持续覆盖地表,有效减少因地表裸露造成的水土流失与扬尘,对于维护脆弱的农田生态系统有积极作用。然而,刈割措施应用于燕麦栽植的案例较少,对具有性状稳定的适于刈割的燕麦品种的选择的研究比较缺乏。本研究以 5 种燕麦为对象,设置不同留茬高度处理,研究不同燕麦品种的再生性、生物量分配、非结构性碳水化合物等生理性状以及饲草品质的变化与差异,为适于刈割的燕麦种质资源筛选和丰产栽培技术提供一定的试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

5 份燕麦种质材料均购自宁夏西贝农林牧生态科技公司,具体信息详见表 1。试验于 2024 年 7—11 月在宁夏大学农科实验实习基地玻璃温室及宁夏大学草业科学实验室进行,试验期间玻璃室内平均气温为 26~30 ℃,平均湿度为 52%~67%。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计。将熟化淡灰钙土与砂土 3:1 混匀,加入定量蛭石、珍珠岩,施入底肥后混匀,装入高 20 cm,直径 18 cm 的花盆中。试验土壤有机质含量为 15.08 g·kg⁻¹,碱解氮含量为 51.2 mg·kg⁻¹,速效磷含量为 18.7 mg·kg⁻¹,速效钾含量为 128.93 mg·kg⁻¹,pH 值为 8.23。种植时选取颗粒饱满、无损伤的燕麦种子,于育苗盘进行育苗,待种子发芽后正常管理至幼苗长到 10 cm 高时,移栽至花盆中,定植 5 株。移植前测试最大田间持水量,为 28%。试验期间正常水分供给,保持土壤水分含量为田间持水量的 60%~70%。

当各品种燕麦生长处于抽穗期时,按照留茬高度剪去地上部分叶片,模拟刈割处理,共设 4 个刈割留茬高度,分别为低留茬 5 cm、中留茬 10 cm、高留茬 15 cm、齐地刈割(留茬高度 0 cm,对照组 CK),5 个品种共 20 个处理,设置 4 个重复,贴好标签随机摆放,并将每个盆中心的植物在其基部用彩环标记。刈割前测定 CK 的各项指标,刈割后再生长一个月收获,并测定各留茬高度处理(5、10、15 cm)的指标。均在上午 9:00—11:00 进行收获,以避免水溶性碳水化合物的昼夜变化^[20]。

1.3 指标测定

统计燕麦茎基部的分蘖数量。用水平刻度尺测量株高,为燕麦顶端到土壤表面的距离。测定燕麦相同节位叶片的长和宽,计算叶面积,叶面积=叶长×叶宽×0.76(校正系数)。在最终收获时,统计存活的燕麦植株,计算存活率。刈割后,待新叶片长出后选取并标记叶片,在收获前一定时间段内,测量叶片的长度,通过以下公式计算叶片长度变化与时间的比率,即为叶片生长速率。

$$LGR=(LLls-LLes)/D$$

(1)

式中:LGR 表示叶片生长速率(leaf growth rate);LLls 表示后一时期叶长(leaf length at later stage);LLes 表示前一时期叶长(leaf length at earlier stage);D 表示天数。

表 1 5 种供试燕麦品种熟性及生育期
Table 1 Maturity and period of duration of five oats varieties for test

简称 Abbreviation	品种 Variety	熟性 Maturity	生育期 Period of duration (d)
TZZ	挑战者 Challenger	中熟 Mid-maturing	108
TY	甜燕 1 号 Tianyan No. 1	早熟 Early-maturing	85
MLS	牧乐思 Molasses	晚熟 Late-maturing	115
XY	喜韵 Xiyun	中熟 Mid-maturing	110
BY	白燕 7 号 Baiyan No. 7	早熟 Early-maturing	85

各处理采集完整燕麦植株,称重前用滤纸吸干表面水分。用1/10000电子天平(LE204E/02,上海)分别称量各器官的鲜重,将样品置于105℃烘箱中杀青30 min,65℃干燥至恒重,冷却后分别称取各器官干重,计算根冠比。

$$R/S = DW_{RB}/DW_{SB} \quad (2)$$

式中: R/S 表示根冠比(root-shoot ratio); DW_{RB} 表示根系生物量干重(root biomass dry weight); DW_{SB} 表示地上生物量干重(shoot biomass dry weight)。

将各处理燕麦叶片和根系分开,用液氮速冻,在-80℃冰箱保存。采用手持叶绿素仪(SPAD-502Plus,日本)测定相对叶绿素含量,采用试剂盒(Cominbio,苏州科铭生物技术有限公司)测定淀粉含量,采用蒽酮比色法^[21]测定可溶性糖含量,采用考马斯亮蓝法^[22]测定可溶性蛋白含量。

采用手持近红外分析仪(ZX-50IQ,美国)测定牧草饲草品质。对燕麦而言,相对饲草质量(relative forage quality, RFQ)为无量纲综合评价指数,用于量化饲草能量可利用性与消化特性的相对水平,采用下列公式计算^[23]:

$$DMI = 120/NDF \quad (3)$$

$$DDM = 88.9 - 0.779 \times ADF \quad (4)$$

$$RFQ = 1.9499 \times (DMI \times DDM / 1.29) - 67.038 \quad (5)$$

式中: DMI 为干物质采食量(dry matter intake); DDM 为可消化干物质含量(digestible dry matter); ADF 为酸性洗涤纤维(acid detergent fiber); NDF 为中性洗涤纤维(neutral detergent fiber)。

补偿指数(compensation index, CI)的测算公式^[2]为:

$$CI = G/C \quad (6)$$

式中: C 表示刈割后各处理收获的地上生物量; G 表示刈割处理和最终收获的地上生物量之和。若 $CI > 1$,且 G 显著高于 C ,则为超补偿生长(over-compensatory growth);若 $CI = 1$,且 G 与 C 无显著差异,则为等补偿生长(equal-compensatory growth);若 $CI < 1$,且 G 显著低于 C ,则为欠补偿生长(under-compensatory growth)。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2018和SPSS 27.0对数据进行整理和统计分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA),通过Duncan法进行数据间的差异显著性检验($P < 0.05$),采用Origin 2024和Excel 2018进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 不同留茬高度对5种燕麦分蘖数的影响

TZZ、TY和MLS的分蘖数随留茬高度增加而增加(图1),且在高留茬下显著高于CK($P < 0.05$)。XY的分蘖数在5 cm处理下显著高于CK($P < 0.05$),且随留茬高度的增加而降低,BY各处理下与CK均无显著差异($P > 0.05$),与其他品种相比,BY在CK处理下分蘖数最多。在5 cm处理下,XY和BY的分蘖数显著高于TZZ和MLS($P < 0.05$)。在10 cm处理下,各品种分蘖数差异不显著($P > 0.05$)。在15 cm处理下,TZZ的分蘖数最多,为4.67个。

2.2 不同留茬高度对5种燕麦株高和叶片生长速率的影响

不同品种在同一处理下,株高增长幅度存在差异,表明燕麦品种对不同处理的响应有差别(图2)。刈割后,5个品种的燕麦株高均随留茬高度的增大而

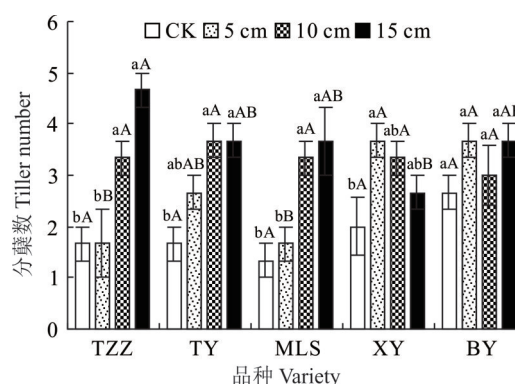


图1 不同留茬高度对5种燕麦分蘖数的影响

Fig. 1 Effect of different stubble height on the tiller number of five oats

不同小写字母表示同一品种不同留茬高度处理之间差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示同一留茬高度处理下不同品种之间差异显著($P < 0.05$),下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different stubble height treatments of the same variety ($P < 0.05$), and different uppercase letters indicate significant differences among different varieties under the same stubble height treatments ($P < 0.05$). The same below.

增大。TZZ、TY、MLS、XY、BY 在留茬高度 5 cm 处理下的株高分别为 CK 的 59.3%、50.8%、41.6%、58.3%、65.3%；在 10 cm 处理下的株高分别为 CK 的 80.0%、73.2%、50.0%、59.8%、66.1%；在 15 cm 处理下的株高分别为 CK 的 90.6%、86.0%、67.6%、61.5%、84.0%。CK 处理下 MLS 的株高及叶片生长速率显著高于其他 4 个品种 ($P < 0.05$)。TZZ 在 10 和 15 cm 处理下叶片生长速率显著高于 CK ($P < 0.05$)，刈割后 XY 和 BY 叶片生长速率均高于 CK，其中，XY-15 cm 和 BY-10 cm 变化显著 ($P < 0.05$)。由此可见，高留茬高度有利于 TZZ、TY 和 MLS 再生，留茬高度过低抑制其再生，而留茬高度对 XY 和 BY 株高的影响较小。

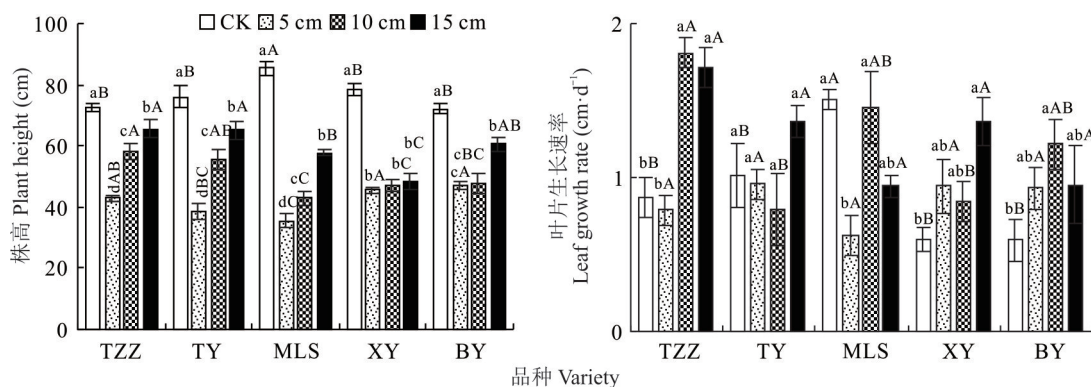


图 2 不同留茬高度对 5 种燕麦株高和叶片生长速率的影响

Fig. 2 Effect of different stubble height on the plant height and leaf growth rate of five oats

2.3 不同留茬高度对 5 种燕麦叶面积和生物量的影响

留茬 5 cm 处理时对各品种的叶面积均产生了显著的抑制作用 ($P < 0.05$)，随着留茬高度的增加，叶面积逐渐增大 (图 3)。TY 的叶面积对留茬高度的变化不敏感，BY 在所有留茬高度下表现均较差。刈割前，TY 和 MLS 茎叶生物量显著高于 TZZ、XY 和 BY ($P < 0.05$)。刈割后，茎叶生物量随留茬高度的增大而增大，根生物量和根冠

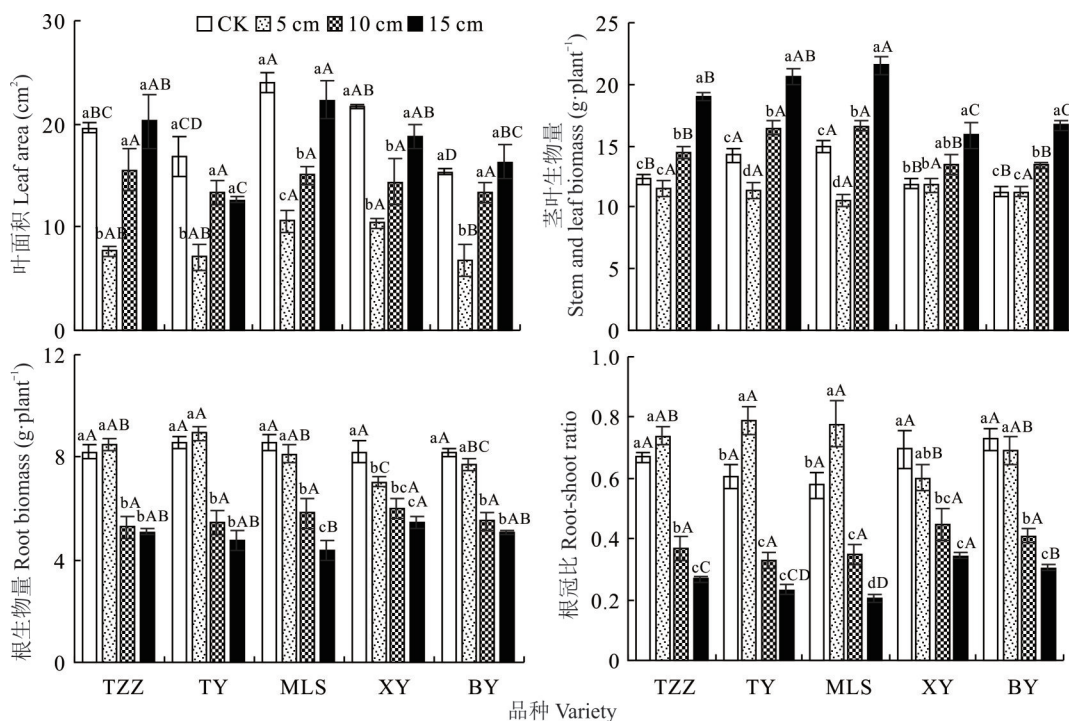


图 3 不同留茬高度对 5 种燕麦叶面积和生物量的影响

Fig. 3 Effect of different stubble height on the leaf area and plant biomass of five oats

比相反。5个品种的茎叶生物量在15 cm处理下均显著高于CK($P<0.05$),除XY之外的其余4个品种在10 cm处理下显著高于CK($P<0.05$)。TZZ和TY在5 cm处理下根生物量高于CK($P>0.05$),XY在5 cm处理下根生物量显著低于TZZ、TY、MLS($P<0.05$)。TY在5 cm处理下根冠比显著高于CK($P<0.05$),XY在5 cm处理下根冠比最大,15 cm处理下根冠比最小。在15 cm处理下各品种茎叶生物量均呈超补偿生长;在10 cm处理下MLS和XY的茎叶生物量呈等补偿生长,其余3个品种呈超补偿生长;在5 cm处理下,TY和MLS的茎叶生物量呈欠补偿生长,其余3个品种呈等补偿生长(表2)。呈超补偿生长的燕麦品种排序由高到低为TZZ-15 cm>BY-15 cm>TY-15 cm≈MLS-15 cm>XY-15 cm>BY-10 cm>TZZ-10 cm>TY-10 cm。另外,留茬高度显著影响燕麦的存活率,随留茬高度的增加,存活率也在增加。TZZ在5 cm刈割时存活率仅20%,而10、15 cm时存活率提升至80%;TY在5 cm刈割的存活率为42.5%,15 cm提升至84%。在5 cm留茬高度下,XY的存活率最高,达55%。

2.4 不同留茬高度对5种燕麦相对叶绿素含量的影响

随着留茬高度的增加,相对叶绿素含量逐渐增加(图4)。刈割前,XY的相对叶绿素含量显著低于其他品种。在5 cm留茬高度下,TZZ和MLS的相对叶绿素含量显著低于其他品种($P<0.05$)。各品种在15 cm处理下,叶片相对叶绿素含量均恢复至CK水平,其中TZZ较CK高出了3.8%,XY较CK高出了10.1%。

2.5 不同留茬高度对5种燕麦淀粉和可溶性糖含量的影响

燕麦在刈割后叶片中的淀粉含量会减少(图5)。高留茬高度处理下叶片淀粉含量会高于低留茬高度处理。TY在留茬10 cm时叶片中淀粉含量最高,留茬5 cm时叶片中淀粉含量最低。在15 cm留茬高度处理下,5个品种的燕麦叶片中的淀粉含量均低于CK,BY的叶片淀粉含量最低。TY在留茬15 cm处理下,根中的淀粉含量显著高于另外两个留茬高度,MLS的3个留茬高度处理的根中淀粉含量均显著低于CK($P<$

表2 不同留茬高度对5种燕麦地上生物量补偿性生长的影响
Table 2 Effect of different stubble height on the compensatory growth of aboveground biomass of five oats

品种 Variety	SH (cm)	CI	SR (%)
TZZ	0 (CK)	1.000±0.00cA	100.0
	5	0.936±0.07cAB	20.0
	10	1.172±0.01bA	80.0
	15	1.548±0.03aA	80.0
TY	0 (CK)	1.000±0.00cA	100.0
	5	0.796±0.07dAB	42.5
	10	1.154±0.04bA	57.5
	15	1.445±0.06aA	84.0
MLS	0 (CK)	1.000±0.00bA	100.0
	5	0.710±0.06cB	45.0
	10	1.116±0.05bA	34.3
	15	1.445±0.08aA	77.1
XY	0 (CK)	1.000±0.00bA	100.0
	5	0.993±0.09bA	55.0
	10	1.138±0.07abA	70.0
	15	1.336±0.14aA	70.0
BY	0 (CK)	1.000±0.00cA	100.0
	5	0.995±0.07cA	40.0
	10	1.191±0.05bA	60.0
	15	1.478±0.02aA	80.0

SH: 留茬高度 Stubble height; CI: 补偿指数 Compensation index; SR: 存活率 Survival rate; 不同小写字母表示同一品种不同留茬高度处理之间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示同一留茬高度处理不同品种之间差异显著($P<0.05$),下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different stubble height treatments of the same variety ($P<0.05$), and different uppercase letters indicate significant differences among different varieties under the same stubble height treatments ($P<0.05$). The same below.

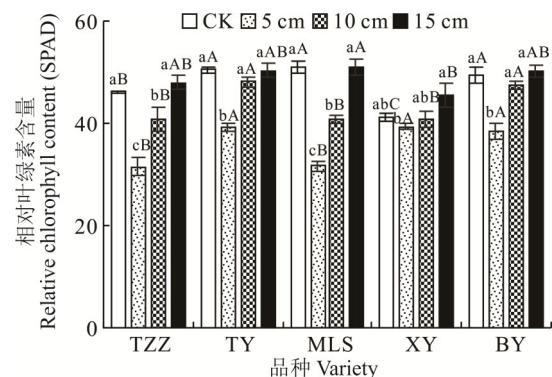


图4 不同留茬高度对5种燕麦相对叶绿素含量的影响

Fig. 4 Effect of different stubble height on relative chlorophyll content of five oats

0.05)。各品种根中可溶性糖含量均高于叶片,除BY外,留茬高度增加,叶片和根中的可溶性糖含量随之增加。各品种在留茬 15 cm 时根中的可溶性糖含量均显著高于CK($P<0.05$),TY 在 10 cm 处理下根中可溶性糖含量显著高于CK($P<0.05$)。

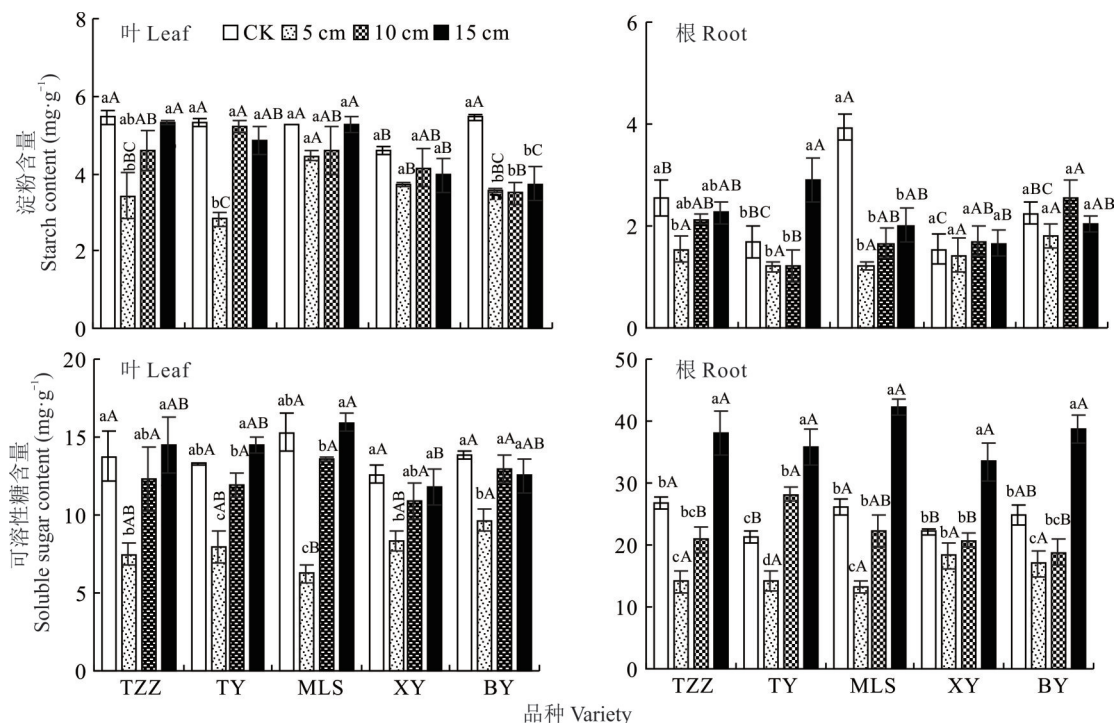


图5 不同留茬高度对5种燕麦淀粉和可溶性糖含量的影响

Fig. 5 Effect of different stubble height on the contents of soluble sugar and starch of five oats

2.6 不同留茬高度对5种燕麦可溶性蛋白含量的影响

CK中BY叶片和根中的可溶性蛋白含量最高(图6),显著高于各留茬高度处理($P<0.05$)。除TZZ的15 cm处理外,所有品种留茬高度处理中叶片的可溶性蛋白含量均低于CK。TZZ留茬5 cm时根中可溶性蛋白含量显著低于其他处理($P<0.05$),叶片中显著低于CK和15 cm处理($P<0.05$)。TY在留茬10 cm时,叶片和根中可溶性蛋白的含量最高。MLS在留茬15 cm时叶片和根中的可溶性蛋白含量显著高于5 cm处理($P<0.05$)。XY在刈割15 cm时叶片和根中可溶性蛋白含量均低于该品种的两个留茬高度处理,且显著低于TZZ、MLS、BY的15 cm处理($P<0.05$)。

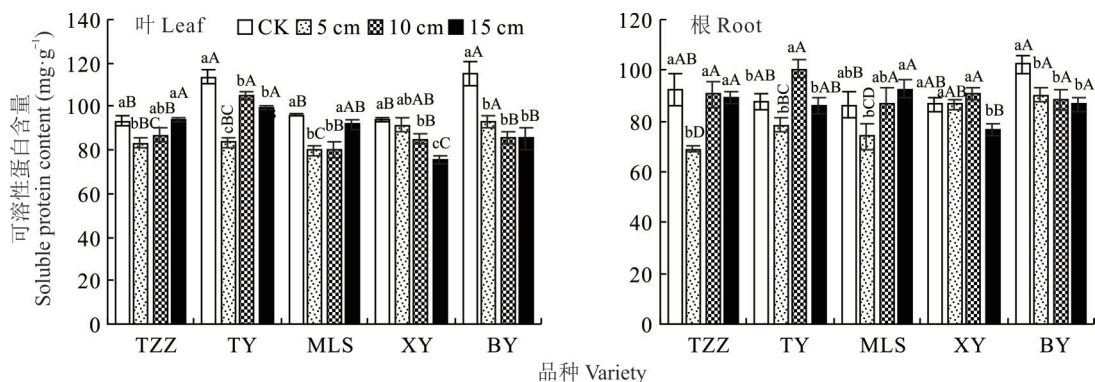


图6 不同留茬高度对5种燕麦可溶性蛋白含量的影响

Fig. 6 Effect of different stubble height on the contents of soluble protein of five oats

2.7 不同留茬高度对5种燕麦牧草饲草品质的影响

在CK处理下TY中的粗蛋白含量最高(表3),NDF和ADF最低,与其他品种差异显著($P<0.05$),XY中NDF含量最高,TZZ和BY中ADF含量最高。刈割后,粗蛋白含量减少,且随留茬高度的增加而增加,TZZ和TY在刈割15 cm处理下恢复至CK水平,而MLS、XY和BY分别较CK减少了12.2%、20.5%、18.5%。刈割后,NDF和ADF含量基本均增加,但随着留茬高度的增加而降低。XY在刈割5 cm处理下ADF含量显著低于其他品种($P<0.05$)。各品种5 cm处理下的RFQ均最低,RFQ随留茬高度的增加而增加,XY在15 cm处理下的RFQ最高。

表3 不同留茬高度对5种燕麦牧草饲草品质的影响

Table 3 Effect of different stubble height on forage nutritional quality of five oats

品种 Variety	留茬高度 SH (cm)	粗蛋白 CP (%)	中性洗涤纤维 NDF (%)	酸性洗涤纤维 ADF (%)	相对饲草 质量 RFQ
TZZ	0 (CK)	18.03±0.10aD	53.55±0.45aA	30.91±0.36dA	152.56±2.51bC
	5	12.51±0.63cAB	52.25±0.62aC	39.69±0.20aA	134.28±2.03cA
	10	15.05±0.37bA	50.66±0.34bCD	34.58±0.79bA	154.82±2.46bB
	15	17.91±1.09aB	48.17±0.25cB	32.89±0.34cA	171.25±0.29aBC
TY	0 (CK)	20.29±0.30aA	47.41±0.95cC	27.34±0.83cC	161.89±7.47aA
	5	13.82±0.67bA	56.11±0.11aB	35.37±0.39aD	131.27±1.31cA
	10	14.61±0.74bA	54.38±0.39aB	33.16±0.86bAB	143.37±3.02cC
	15	20.01±0.74aA	51.91±1.03bA	31.34±0.40bB	158.53±5.32bC
MLS	0 (CK)	19.58±0.16aAB	51.64±0.63cB	29.53±0.27cB	164.49±3.29aB
	5	10.82±0.79dBC	58.76±0.35aA	38.37±0.51aB	115.12±0.89cB
	10	12.72±0.17cB	56.77±0.52bA	32.74±0.38bAB	135.56±2.75bC
	15	17.19±0.50bB	52.04±0.41cA	28.92±0.39cC	164.31±0.84aBC
XY	0 (CK)	19.10±0.33aBC	53.94±0.33bA	28.96±0.20cB	156.09±1.87bBC
	5	11.19±0.63cBC	57.60±0.36aA	34.01±0.39aE	129.51±2.05cA
	10	12.46±0.65cB	49.42±0.40cD	32.33±0.71bAB	166.86±3.59bA
	15	15.19±0.11bC	44.71±0.85dC	25.98±0.58dD	211.75±6.17aA
BY	0 (CK)	18.35±0.37aCD	53.21±0.40bAB	30.91±0.23bA	153.95±1.32bBC
	5	10.16±0.21dC	59.11±0.89aA	37.17±0.26aC	116.96±2.12cB
	10	12.23±0.32cB	51.56±0.63bC	31.43±0.66bB	159.68±4.58bAB
	15	14.95±0.28bC	50.89±1.21bA	26.62±0.43cD	176.18±5.53aB

CP: Crude protein; NDF: Neutral detergent fiber; ADF: Acid detergent fiber; RFQ: Relative forage quality.

2.8 不同留茬高度处理下燕麦各项指标的相关性分析和主成分分析

对5种燕麦在不同留茬高度处理下的各项指标进行相关性分析(图7),分蘖数与茎叶生物量、补偿指数、可溶性糖含量呈极显著正相关($P<0.01$),与根生物量和根冠比呈极显著负相关($P<0.001$)。存活率、株高、叶面积和茎叶生物量均与相对叶绿素含量、淀粉、可溶性糖、粗蛋白含量和相对饲草质量呈极显著正相关($P<0.01$),与根冠比、NDF和ADF含量呈显著负相关($P<0.05$)。补偿指数与分蘖数、茎叶生物量、相对叶绿素、可溶性糖含量和相对饲草质量呈极显著正相关($P<0.001$),与根生物量、根冠比、NDF和ADF含量呈极显著负相关($P<0.001$)。相对饲草质量与存活率、株高、叶面积、茎叶生物量、补偿指数、相对叶绿素含量、可溶性糖和粗蛋白含量呈极显著正相关($P<0.001$),与根冠比、NDF和ADF含量呈极显著负相关($P<0.001$)。

对5种燕麦不同留茬高度处理下呈正相关的指标进行主成分分析(图8),PC1和PC2分别解释了48.6%和18.8%的总方差,累计解释率为67.4%。存活率、叶面积、相对叶绿素含量、可溶性糖和粗蛋白含量在第一主成

分上有较高载荷,分蘖数、茎叶生物量和补偿指数在第二主成分上有较高载荷,各品种之间指标作用范围大部分重叠,变异范围:MLS>TZZ>TY≈BY>XY。

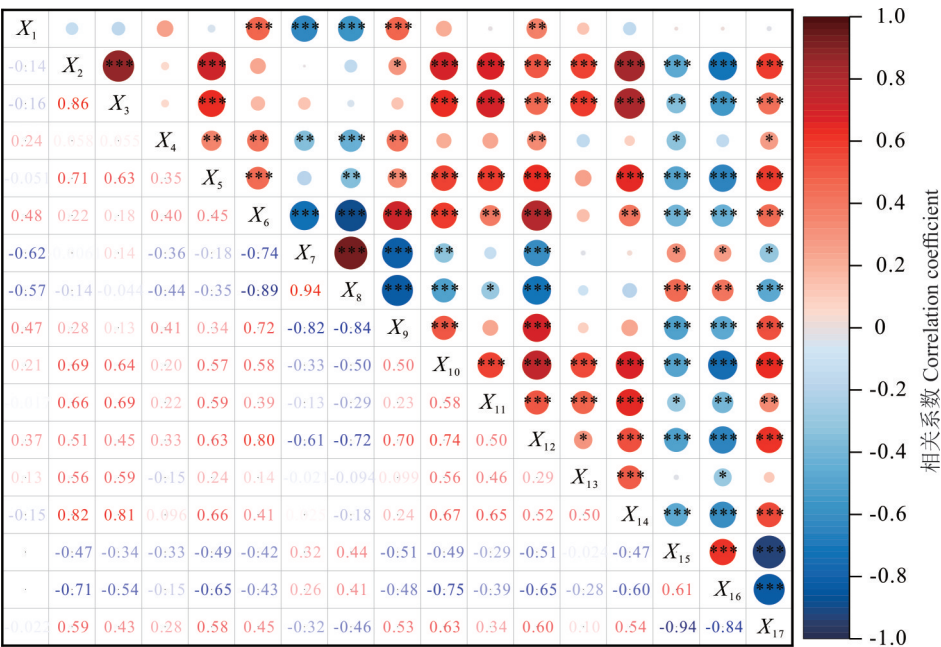


图 7 不同留茬高度处理下燕麦各项指标的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of various indicators of oats under different stubble height treatments

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$; X_1 : 分蘖数 Tiller number; X_2 : 存活率 Survival rate; X_3 : 株高 Plant height; X_4 : 叶片生长速率 Leaf growth rate; X_5 : 叶面积 Leaf area; X_6 : 茎叶生物量 Stem and leaf biomass; X_7 : 根生物量 Root biomass; X_8 : 根冠比 Root-shoot ratio; X_9 : 补偿指数 Compensation index; X_{10} : 相对叶绿素 Relative chlorophyll; X_{11} : 淀粉 Starch; X_{12} : 可溶性糖 Soluble sugar; X_{13} : 可溶性蛋白 Soluble protein; X_{14} : 粗蛋白 Crude protein; X_{15} : 中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber; X_{16} : 酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber; X_{17} : 相对饲草质量 Relative forage quality. 下同 The same below.

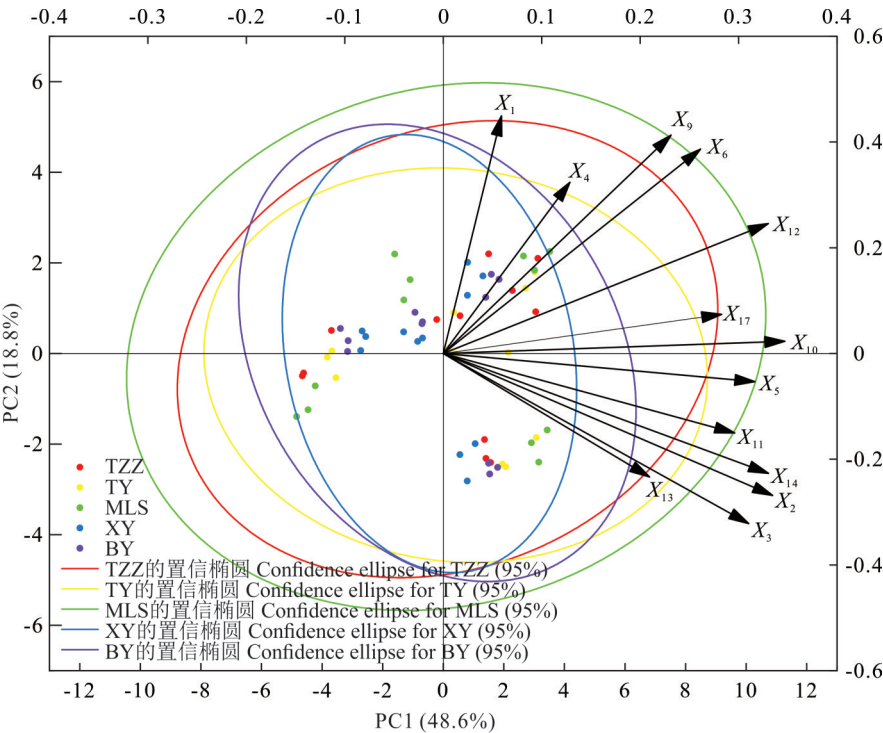


图 8 不同留茬高度处理下 5 种燕麦各项指标的主成分分析

Fig. 8 Principal component analysis of various indicators of five oats under different stubble height treatments

2.9 不同留茬高度处理下燕麦各项指标的灰色关联度分析

将不同留茬高度刈割处理的燕麦各项指标进行无量纲化处理得到数据标准化值,计算加权关联度,旨在克服单一评价指标的局限性,对涉及不同品种与留茬高度的20个处理进行多指标综合评判。分析结果表明,各处理与理想方案的关联度存在显著差异,其排名清晰地显示了最优与最劣的刈割措施(表4),刈割后各处理的加权排名由高到低依次为:MLS-15 cm>TZZ-15 cm>TY-15 cm>TY-10 cm>BY-15 cm>TZZ-10 cm>MLS-10 cm>XY-15 cm>BY-10 cm>TY-5 cm>BY-5 cm>XY-10 cm>XY-5 cm>MLS-5 cm>TZZ-5 cm。MLS在15 cm处理下的关联性最强,在所有处理中综合表现最佳。而5 cm刈割处理(如TZZ-5 cm、XY-5 cm和MLS-5 cm)排名较低,表明刈割留茬过低不利于燕麦生长。留茬高度越高,燕麦再生各项指标的表现越好。

3 讨论

3.1 不同留茬高度对燕麦再生株高与分蘖数的影响

燕麦再生途径以分蘖节再生为主。刈割后,植物通过激活分生组织启动再生生长,保留的茎基部仍含有活跃的分蘖节,可快速萌发新蘖,从而增加单位面积内的茎数,间接提升群体株高。株高的恢复速度与留茬高度密切相关。研究表明,较高的留茬通常保留更多光合组织和生长点,可为再生提供充足的碳源和能量,缩短再生周期^[24]。当分蘖节受损或留茬高度极低时,燕麦可能通过残存茎秆的内叶腋芽再生,但效率较低^[25]。王竞绍^[26]研究发现,高丹草(*Sorghum bicolor*)的茎蘖数随留茬高度的增加而逐渐增加。本研究中,TZZ、TY和BY在15 cm处理下的株高分别达到CK的90.6%、86.0%和84.0%,分蘖数随留茬高度的增加而增加,尤其是TZZ和TY在15 cm处理下的分蘖数显著高于5 cm处理,XY的15 cm处理株高恢复最低,分蘖数也低于5 cm处理,表明高留茬刈割能够促进燕麦株高的恢复以及分蘖的萌发,有利于燕麦的再生生长,与前人研究结果^[27-28]一致。

3.2 不同留茬高度对燕麦的器官生物量分配以及补偿性生长的影响

叶片是植物进行光合作用的主要器官。燕麦是典型的C₃禾草,刈割后剩余叶片的光合效率以及叶面积的重建是再生初期的主要碳源。保留更多功能叶可维持较高的光合速率^[29],保留叶面积超过30%可显著加速再生^[30]。牧草刈割后优先再生地上部分,通过改变植株生物量的空间分配模式等实现补偿生长^[31]。王茜等^[32]研究发现,刈割使植株茎干重在地上生物量中占比下降,而叶干重占比上升。这表明刈割后剩余叶片对冬小麦(*Triticum aestivum*)的生长和生物量分配有重要影响,一定程度上反映了剩余叶片数量和功能与再生及光合产物分配的关系。在本研究中,刈割后燕麦叶面积减小,刈割过低抑制了叶面积和叶片生长速率,导致燕麦地上生物量累积受阻,高留茬高度则通过保留更多功能叶促进再生。5 cm处理下,TY和MLS的茎叶生物量呈欠补偿生长,其余品种呈等补偿生长,此时燕麦大量叶片被除去,总光合作用面积下降,导致燕麦因地上组织的损失向根系分配的资源增加,从而影响地上生物量的形成,根冠比增大(图3)。10 cm处理下除MLS和XY的茎叶生物量等

表4 不同留茬高度处理下的关联度及其排名

Table 4 Correlation degree and ranking of different stubble height treatments

处理 Treatment	等权 Equal weight		加权 Weighted	
	关联度 Correlation degree	排名 Ranking	关联度 Correlation degree	排名 Ranking
TZZ-CK	0.7054	6	0.7235	6
TY-CK	0.7199	5	0.7456	4
MLS-CK	0.8214	1	0.8283	1
XY-CK	0.6463	9	0.6606	9
BY-CK	0.7269	4	0.7548	3
TZZ-5 cm	0.5550	20	0.5603	20
TY-5 cm	0.5866	15	0.5937	15
MLS-5 cm	0.5656	18	0.5726	19
XY-5 cm	0.5627	19	0.5739	18
BY-5 cm	0.5830	16	0.5934	16
TZZ-10 cm	0.6339	10	0.6411	11
TY-10 cm	0.6472	8	0.6723	8
MLS-10 cm	0.6128	12	0.6244	12
XY-10 cm	0.5727	17	0.5860	17
BY-10 cm	0.5967	14	0.6086	14
TZZ-15 cm	0.7341	3	0.7443	5
TY-15 cm	0.6997	7	0.7133	7
MLS-15 cm	0.7586	2	0.7747	2
XY-15 cm	0.6079	13	0.6150	13
BY-15 cm	0.6322	11	0.6440	10

补偿生长外,其余品种呈超补偿生长。15 cm 处理下,TZZ 茎叶生物量超补偿生长最大,XY 最小,TZZ、TY 和 MLS 的茎叶生物量显著高于 XY 和 BY,此时燕麦解除顶端优势,刺激茎叶生长,从而使生物量增加,根冠比减小,有利于燕麦的补偿生长。

3.3 不同留茬高度对燕麦生理生化指标的影响

SPAD(soil and plant analyzer development)值是衡量植物叶片叶绿素相对含量的指标,是评估植物营养状况、生长状态及光合能力的重要参数^[33]。SPAD 值越高,则叶绿素含量越高,叶片光合作用能力越强,氮素营养充足。吴建慧等^[34]研究发现,重度刈割使植物光合叶片过度损失,SPAD 值降低,植物净光合速率被削弱,进而使植物再生生长受阻并导致物质积累骤降。本研究中,燕麦的 SPAD 值随留茬高度的增大而增大。各品种燕麦 SPAD 值均在 15 cm 处理下恢复至 CK 水平,表明高留茬高度通过维持叶绿素含量,保障了光合效率,对叶片光合能力具有保护作用。刈割留茬过低会使燕麦有效光合面积大量减少,叶绿素含量下降,导致植物出现碳饥饿现象,进一步影响非结构性碳水化合物化合物的合成和积累,并干扰植物的再生^[35]。

非结构性碳水化合物是植物生长代谢等生理活动的营养物质和信号物质,其变化不仅能反映植物的生理活动状况,还很大程度反映了植物对环境变化的响应和适应^[36]。刈割能引起牧草茎基和根部贮藏的碳水化合物含量下降^[37],还会干扰非结构性碳水化合物的合成与转移,进而影响植物生长代谢机能。宋雪梅等^[38]对两种全株玉米(*Zea mays*)在不同留茬高度下的营养成分测定表明,留茬高度增加后,2 个品种的淀粉含量均有所增加。Donaghy 等^[39]的研究表明,留茬 5 cm 的多年生黑麦草中可溶性碳水化合物含量是留茬 2 cm 的 3.1 倍。Drake 等^[40]对比研究了鸭茅(*Dactylis glomerata*)的两个留茬高度,结果表明,在 3.8 cm 留茬高度下非结构性碳水化合物含量比 7.6 cm 留茬高度下减少 23%。本研究中,10 和 15 cm 处理下的淀粉含量均高于 5 cm,叶片和根中可溶性糖含量均随留茬高度的增加而增加。MLS 在 15 cm 处理下的叶片淀粉含量比 5 cm 处理下高 17.9%,15 cm 处理下的叶片可溶性糖含量比 5 cm 处理高 154.8%,15 cm 处理下各品种叶片和根系中可溶性糖含量恢复至 CK 水平,这表明高留茬刈割通过减少光合组织的损失,维持碳代谢的平衡,促进了地下器官中碳水化合物的积累,为地上茎叶再生提供能量支持。TY、MLS 和 BY 在 5 cm 处理下叶片和根系中可溶性糖含量均未恢复至 CK 水平且差异显著,说明 TY 和 MLS 在 5 cm 的高强度刈割下,根系贮藏的营养物质不足以支撑地上茎叶的再生,地上生物量的积累减少,因此 TY 和 MLS 表现为欠补偿生长。由此可见,根系贮藏营养物质向茎叶的转移可能是补偿生长的机制之一。

可溶性蛋白含量的变化同样与留茬高度密切相关。刈割后燕麦残茬中蛋白质和可溶性碳水化合物分解成有利于再调运的小分子有机物,提供再生初期所需的碳氮骨架,重新合成新的蛋白质和结构性碳水化合物^[41]。玉米素(zeatin, ZT)能够刺激植物细胞的分化,促进愈伤组织发芽,阻止蛋白质和叶绿素的降解^[42]。卢强等^[43]在研究不同刈割留茬高度对苜蓿(*Medicago sativa*)产量及品质的影响时指出,蛋白质含量随着留茬高度的下降而下降。在本研究中,TZZ、TY、MLS 的可溶性蛋白含量随留茬高度的增加而增加,而 XY 和 BY 则相反,高留茬刈割有助于维持蛋白质代谢的稳定性。除 XY 外,其他品种在 5 cm 处理下叶片和根中的可溶性蛋白含量均显著低于 CK, TZZ 和 MLS 在 15 cm 处理下叶片和根系中的可溶性蛋白均恢复至 CK 水平,均呈超补偿生长,而 TY 和 MLS 在 5 cm 处理下表现为欠补偿生长。由此可见,可溶性蛋白含量越高,越容易发生补偿生长,可溶性蛋白含量过低不足以维持植物正常生理功能,容易导致欠补偿生长。根中可溶性蛋白含量在刈割后普遍降低,可能与再生过程中蛋白质分解为氨基酸以支持地上部生长有关。

3.4 不同留茬高度对燕麦饲草品质的影响

牧草的产量和品质是评价刈割效果的重要指标,饲草的营养价值在很大程度上取决于粗蛋白、粗纤维等成分含量。刈割打断了燕麦的正常生长节律,各器官之间通过内在协调机制来调控植物的代谢活动及营养物质分配^[44]。赵雪娇等^[45]研究表明,3 个品种的全株青贮玉米的干物质和粗蛋白含量随留茬高度增加而显著提高,NDF 和 ADF 含量随之显著降低。在张吉明等^[46]有关燕麦刈割的研究中,留茬高度越高,‘蒙饲燕 1 号’的 NDF 和 ADF 含量越低,‘蒙饲燕 2 号’的留茬高度越高,CP 含量越高,表明留茬高度低会降低燕麦的营养品质。本研究中,随

留茬高度的增加,燕麦各品种粗蛋白含量均增加,而NDF和ADF含量随之减少,5个品种燕麦的RFQ均随留茬高度的增加而增加,5 cm处理下各品种燕麦的RFQ最低,这与以上及景美玲等^[47]的研究结果一致。

4 结论

本研究通过室内盆栽试验,探究了不同的留茬高度对TZZ、TY、MLS、XY、BY这5个燕麦品种的再生生长性能及产量、饲草品质的影响。高留茬刈割刺激植株分蘖和叶片的生长,加快叶绿素、淀粉、可溶性糖、可溶性蛋白等的合成,发生补偿性生长,其中,15 cm处理下5种燕麦的茎叶生物量均发生超补偿生长的现象。随着留茬高度减小至5 cm,TY和MLS呈欠补偿生长,无法在短期内恢复至CK水平,其余品种呈等补偿生长。总的来说,TZZ和MLS适合高留茬15 cm刈割,能更好地使其发生超补偿生长,刈割过低抑制其生长发育且植株受影响最大,但在实际农业生产中,高留茬刈割会造成产量降低,10 cm时TZZ呈超补偿生长,MLS呈等补偿生长,因此在生产中,这两个品种10 cm刈割更能效益最大化;TY较适合高留茬高度,在10 cm处理下其能量物质积累较高,15 cm处理下茎叶生物量较高;XY在所有品种中表现出对高强度刈割的耐受性,在该情况下存活率最高,但其茎叶生物量和叶面积受抑制,未形成明显的补偿性生长,有待于进一步研究;BY较适合高留茬刈割,在该高度下营养价值较高。

参考文献 References:

- [1] Zhang Q Q, Liang Q W, Narisu, *et al.* Effects of clipping on native grassland: A review. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2018, 39(1): 33—42.
张晴晴, 梁庆伟, 娜日苏, 等. 刈割对天然草地影响的研究进展. *畜牧与饲料科学*, 2018, 39(1): 33—42.
- [2] Zheng C C, Wang Y J, Sun H, *et al.* Effects of clipping on nitrogen allocation strategy and compensatory growth of *Leymus chinensis* under saline-alkali conditions. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2222—2230.
郑聪聪, 王永静, 孙昊, 等. 盐碱条件下刈割干扰对羊草的氮素分配策略及补偿生长的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2222—2230.
- [3] Wang L H, Liu W, Wang J N, *et al.* The compensatory growth of plant community, synusia and varieties under different clipping intensity. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(6): 35—42.
王丽华, 刘尉, 王金牛, 等. 不同刈割强度下草地群落、层片及物种的补偿性生长. *草业学报*, 2015, 24(6): 35—42.
- [4] Ma H B, Xie Y Z. Plant compensatory growth under different grazing intensities in desert steppe. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008(11): 3645—3650.
马红彬, 谢应忠. 不同放牧强度下荒漠草原植物的补偿性生长. *中国农业科学*, 2008(11): 3645—3650.
- [5] Yang C X. Effects of fertilization and clipping on compensatory growth of *Carex brevicuspis*. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019.
杨灿鑫. 施肥、刈割对短尖苔草补偿性生长影响的研究. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [6] Guo A Q, Zhou R L, Song Y, *et al.* Relationship between physiological protection mechanisms and the compensatory growth of *Lolium perenne* L. at different cutting treatment levels. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10): 3495—3503.
郭安琪, 周瑞莲, 宋玉, 等. 刈割后黑麦草生理保护作用对其补偿性生长的影响. *生态学报*, 2018, 38(10): 3495—3503.
- [7] Chen H, Wang H Y, Du G Z. Impacts of clipping time, clipping intensity and fertilization on plant compensation of *Avena sativa*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003(6): 969—975.
陈红, 王海洋, 杜国桢. 刈割时间、刈割强度与施肥处理对燕麦补偿的影响. *西北植物学报*, 2003(6): 969—975.
- [8] Zhang Y K. Effect of mowing frequency on yield and quality of forage bermuda grass. Yantai: Ludong University, 2020.
张寅坤. 刈割频率对牧草狗牙根产量和品质的影响. 烟台: 鲁东大学, 2020.
- [9] Nowak R S, Caldwell M. A test of compensatory photosynthesis in the field Implications for herbivory tolerance. *Oecologia*, 1984, 61(3): 311—318.
- [10] Rong Y P, Han J G, Wang P, *et al.* Effects of cutting rate on carbohydrate reserves and nitrogen content of russian wildryegrass (*Psathyrostachys perennis* Keng). *Chinese Journal of Grassland*, 2000(2): 29—35.
戎郁萍, 韩建国, 王培, 等. 刈割强度对新麦草产草量和贮藏碳水化合物及含氮化合物影响的研究. *中国草地学报*, 2000(2): 29—35.
- [11] Pan Q M, Han X G, Bai Y F, *et al.* Advances in physiology and ecology studies on stored non-structure carbohydrates in

- plants. Chinese Bulletin of Botany, 2002(1): 30—38.
- 潘庆民, 韩兴国, 白永飞, 等. 植物非结构性贮藏碳水化合物的生理生态学研究进展. 植物学通报, 2002(1): 30—38.
- [12] Zhang P, Li X X, Yan F N, *et al.* Regeneration and carbohydrate distribution in sweet sorghum after cutting. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(5): 69—79.
- 张盼, 李霄霄, 严发能, 等. 甜高粱刈割后再生及碳水化合物的分配规律. 草业学报, 2024, 33(5): 69—79.
- [13] Yang H M, Wang Z N, Ji C R. Research progress in the dynamics of carbon and nitrogen in forages after cutting and grazing. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(4): 102—109, 120.
- 杨惠敏, 王振南, 吉春荣. 刈割和放牧后牧草碳氮动态研究进展. 中国草地学报, 2013, 35(4): 102—109, 120.
- [14] Qi Z Q, Yu Y X, Zeng Z H, *et al.* Yield, hay quality and regrowth of establishing *Medicago sativa* under four harvest schedules. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(1): 134—142.
- 戚志强, 王永雄, 曾昭海, 等. 紫花苜蓿建植期四种刈割频次下的产量、品质及再生性研究. 草业学报, 2010, 19(1): 134—142.
- [15] Wang X L, Wang J, Li Z Q. Correlation of continuous ryegrass regrowth with cytokinin induced by root nitrate absorption. Journal of Plant Research, 2013, 126(5): 685—697.
- [16] Zhao M. Comparative transcriptome analysis of regeneration after mowing the dual-purpose wheat Xinong 9106. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- 赵梅. 粮饲兼用型小麦西农 9106 刈割后再生的比较转录组学分析. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [17] Zhang L. Screening of oat varieties with strong regeneration ability and its influencing factor. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- 张璐. 燕麦强再生力品种筛选及其影响因素研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [18] Bao G S, Zhou Q P, Han Z L, *et al.* Effects of N and K fertilizer on oat growth performance and fresh grass yield. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2008(4): 4—7.
- 鲍根生, 周青平, 韩志林, 等. N、K 配施对燕麦生长特性和鲜草产量影响的研究. 青海畜牧兽医杂志, 2008(4): 4—7.
- [19] Yang C, Wang G G, Wang M L. Production and trade of wild oat forage in China. Pratacultural Science, 2017, 34(5): 1129—1135.
- 杨春, 王国刚, 王明利. 我国的燕麦草生产和贸易. 草业科学, 2017, 34(5): 1129—1135.
- [20] Fulkerson W, Slack K. Leaf number as a criterion for determining defoliation time for *Lolium perenne*: 2. Effect of defoliation frequency and height. Grass and Forage Science, 1995, 50(1): 16—20.
- [21] Zhang S W, Zong Y J, Fang C Y, *et al.* Optimization of anthrone colorimetric method for rapid determination of soluble sugar in barley leaves. Food Research and Development, 2020, 41(7): 196—200.
- 张述伟, 宗营杰, 方春燕, 等. 蒽酮比色法快速测定大麦叶片中可溶性糖含量的优化. 食品研究与开发, 2020, 41(7): 196—200.
- [22] Luo Q. Rapid determination of soluble protein content in rapeseed meal by coomassie brilliant blue method. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2014, 33(2): 125—126, 129.
- 罗群. 考马斯亮蓝法快速测定菜籽粕中可溶性蛋白质的含量. 成都大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 125—126, 129.
- [23] Li W L, Li F, Zhang Z J, *et al.* A performance evaluation of two crops of forage oats per year in the northern Ordos Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(1): 159—168.
- 李文龙, 李峰, 张仲鹏, 等. 鄂尔多斯高原北部一年两季燕麦种植模式生产性能评价. 草业学报, 2024, 33(1): 159—168.
- [24] Wang X, Yang T, Sun L P, *et al.* Effects of different stubble heights on photosynthetic characteristics and non-structural carbohydrates of rape leaves. Northern Horticulture, 2022(13): 43—48.
- 王祥, 杨涛, 孙鲁鹏, 等. 不同留茬高度对油菜叶片光合特性及非结构性碳水化合物的影响. 北方园艺, 2022(13): 43—48.
- [25] Herbert D B, Ekschmitt K, Wissemann V, *et al.* Cutting reduces variation in biomass production of forage crops and allows low-performers to catch up: A case study of *Trifolium pratense* L. (red clover). Plant Biology, 2018, 20(3): 465—473.
- [26] Wang J S. Effects of cutting height on growth dynamics and yield of American sorghum-sudangrass hybrid. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2023, 29(2): 46—48, 58.
- 王竞绍. 刈割高度对美国高丹草生长动态及产量的影响研究. 安徽农学通报, 2023, 29(2): 46—48, 58.
- [27] Zhu Y, Zhang B, Tan Z L, *et al.* Research progress of clipping effect on quality and biomass of grazing. Pratacultural Science, 2009, 26(2): 80—85.
- 朱珏, 张彬, 谭支良, 等. 刈割对牧草生物量和品质影响的研究进展. 草业科学, 2009, 26(2): 80—85.

- [28] Liu J L, Tang F L, Zhang Y X, *et al.* Effect of different stubble heights on regeneration and yield of annual forages. *Grassland and Turf*, 2009(6): 47–49.
刘杰淋, 唐凤兰, 张月学, 等. 刈割高度对一年生牧草再生性能及产量的影响. *草原与草坪*, 2009(6): 47–49.
- [29] Sun M, Tian K, Zhang Y, *et al.* Research on leaf functional traits and their environmental adaptation. *Plant Science Journal*, 2017, 35(6): 940–949.
孙梅, 田昆, 张赞, 等. 植物叶片功能性状及其环境适应研究. *植物科学学报*, 2017, 35(6): 940–949.
- [30] Skinner R H, Nelson C J. Effect of tiller trimming on phyllochron and tillering regulation during tall fescue development. *Crop Science*, 1994, 34(5): 1267–1273.
- [31] Yuan F R, Zhu Z H, Li Y N, *et al.* Research on compensatory growth of *Stipa aliena* and impact factors under different habitats. *Pratacultural Science*, 2011, 28(11): 1972–1981.
袁芙蓉, 朱志红, 李英年, 等. 异针茅在不同生境下补偿生长特性及其影响因素的研究. *草业科学*, 2011, 28(11): 1972–1981.
- [32] Wang Q, Yang L Q, Lei J Y, *et al.* Regrowth and biomass allocation of dual-purpose winter wheat under two clipping heights. *Pratacultural Science*, 2017, 34(10): 2109–2116.
王茜, 杨丽群, 雷家运, 等. 刈割高度对冬小麦再生及生物量分配的影响. *草业科学*, 2017, 34(10): 2109–2116.
- [33] Shi S H. Effects of different leaf age leaf-cutting treatment on growth and yield of maize. *Shenyang: Shenyang Agricultural University*, 2020.
石生辉. 不同叶龄期剪叶对玉米生长发育及产量的影响. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [34] Wu J H, Cui Y T, Zhao Q Z, *et al.* Effects of drought stress on anatomical structure of leaves and physiological indexes of *Potentilla* varieties. *Pratacultural Science*, 2013, 30(9): 1369–1373.
吴建慧, 崔艳桃, 赵倩竹, 等. 干旱胁迫下委陵菜和翻白委陵菜叶片结构和生理指标的变化. *草业科学*, 2013, 30(9): 1369–1373.
- [35] Chen L, Huang J G, Dawson A. Contributions of insects and droughts to growth decline of trembling aspen mixed boreal forest of western Canada. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): 655–667.
- [36] Zheng Y P, Wang H X, Lou X, *et al.* Changes of non-structural carbohydrates and its impact factors in trees: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4): 1188–1196.
郑云普, 王贺新, 娄鑫, 等. 木本植物非结构性碳水化合物变化及其影响因子研究进展. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 1188–1196.
- [37] Bai K Y, Zhao M L, Wei Z J, *et al.* Effects of cutting on carbohydrate reserves of plant in the desert steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 1996, 4(2): 126–133.
白可喻, 赵萌莉, 卫智军, 等. 刈割对荒漠草原几种牧草贮藏碳水化合物的影响. *草地学报*, 1996, 4(2): 126–133.
- [38] Song X M, Chen X J. Effects of stubble height on the quality of whole plant maize. *Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2024, 43(3): 104–105.
宋雪梅, 陈孝军. 不同留茬高度对全株玉米品质的影响. *畜牧兽医杂志*, 2024, 43(3): 104–105.
- [39] Donaghy D J, Fulkerson W J. Priority for allocation of water-soluble carbohydrate reserves during regrowth of *Lolium perenne*. *Grass and Forage Science*, 1998, 53(3): 211–218.
- [40] Drake M, Colby W G, Bredakis E. Yield of orchard grass as influenced by rates of nitrogen and harvest management. *Agronomy Journal*, 1963, 55(4): 361–362.
- [41] Li J, Yang M, Zhuang W F, *et al.* Effects of mowing and density on yield and nutrition for regeneration of a triticale variety “Dongnong 5305”. *Crops*, 2009, 21(1): 73–77.
李晶, 杨猛, 庄文峰, 等. 刈割对不同密度小黑麦东农 5305 产量及再生营养的影响. *作物杂志*, 2009, 21(1): 73–77.
- [42] Ding Z F, Liu J, Dai D M, *et al.* Effects of stubble heights on chromium accumulation in *Leersia hexandra* Swartz and its physiological mechanism. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023, 29(1): 96–101.
丁志凡, 刘杰, 代德敏, 等. 留茬高度对李氏禾累积铬能力的影响及生理机制. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(1): 96–101.
- [43] Lu Q, Cheng Q M, Bao J, *et al.* Different alfalfa stubble height influence on the yield and quality. *Grassland and Prataculture*, 2017, 29(2): 39–43.
卢强, 成启明, 包健, 等. 不同刈割留茬高度对苜蓿产量及品质的影响. *草原与草业*, 2017, 29(2): 39–43.
- [44] Wang D D, Tian L H, Shen Y Y, *et al.* Regrowth responses to cutting of different cultivars of winter wheat. *Chinese Journal of*

Eco-Agriculture, 2014, 22(6): 642—647.

王丹丹, 田莉华, 沈禹颖, 等. 不同品种冬小麦再生生长对刈割干扰的响应. 中国生态农业学报, 2014, 22(6): 642—647.

- [45] Zhao X J, Zhang L Y, Liu S, *et al.* Effects of cutting height on quality of different varieties of whole plant corn silage. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(8): 3239—3246.

赵雪娇, 张立阳, 刘帅, 等. 留茬高度对不同品种全株玉米青贮品质的影响. 动物营养学报, 2018, 30(8): 3239—3246.

- [46] Zhang J M, Zhang C X, Hao Z Q, *et al.* Effect of different growth period and stubble height on quality of forage oat hay. Feed Research, 2022, 45(3): 114—118.

张吉明, 张彩霞, 郝智强, 等. 不同生长期和留茬高度对饲用燕麦干草品质的影响. 饲料研究, 2022, 45(3): 114—118.

- [47] Jing M L, Ma Y S, Chu R P, *et al.* Effects of stubble height on grass biomass and quality in *Poa Pratensis* L. cv. Qinghai artificial grassland. China Feed, 2022(18): 77—82.

景美玲, 马玉寿, 褚荣鹏, 等. 留茬高度对青海草地早熟禾人工草地禾草生物量和品质的影响. 中国饲料, 2022(18): 77—82.