

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0569

王茜,杨丽群,雷家运,杨景宁,王玉平,王丹丹,杨倩,沈禹颖.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.

Wang X, Yang L Q, Lei J Y, Yang J N, Wang Y P, Wang D D, Yang Q, Shen Y Y. Regrowth and biomass allocation of dual-purpose winter wheat under two clipping heights. Pratacultural Science, 2017, 34(10): 2109-2116.

## 刈割高度对冬小麦再生及 生物量分配的影响

王 茜, 杨丽群, 雷家运, 杨景宁, 王玉平, 王丹丹, 杨 倩, 沈禹颖

(草地农业生态系统国家重点实验室 草业科学国家级实验教学示范中心(兰州大学) 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:**为确定刈割留茬高度对冬小麦(*Triticum aestivum*)光合产物累积及分配的影响,在温室盆栽条件下,对冬小麦陇育4号(LY)和运旱2号(YH)于分蘖期进行刈割处理,刈割留茬高度为6 cm( $R_6$ )和3 cm( $R_3$ ),以不刈割为对照(CK)。结果表明,刈割留茬高度影响冬小麦株高增长,刈割后花期植株叶面积指数与CK无差异。在 $R_6$ 和 $R_3$ 处理下,LY的地上部生物量较CK分别下降了23%和3%,根生物量分别下降了12%和13%( $P>0.05$ ),YH的地上部生物量分别降低了22%和15%( $P>0.05$ )、根系生物量分别下降了6%和0.1%( $P>0.05$ )。刈割干扰使植株地上部生物量在全株中占比下降,茎干重在地上生物量占比下降,而叶干重占比上升。留茬6 cm下,冬小麦花期地上、地下生物量分配格局与对照无差异,而留茬3 cm下光合产物向地上部转移比例增加,意味着适度干扰可通过源库协调,释放生长冗余,维护籽粒形成。

**关键词:**粮饲兼用;冬小麦;留茬高度;干物质积累;株高增长;叶面积指数;光合速率

中图分类号:S512.1<sup>+</sup>1;Q945.79

文献标志码:A

文章编号:1001-0629(2017)10-2109-08\*

### Regrowth and biomass allocation of dual-purpose winter wheat under two clipping heights

Wang Xi, Yang Li-qun, Lei Jia-yun, Yang Jing-ning, Wang Yu-ping,

Wang Dan-dan, Yang Qian, Shen Yu-ying

(State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, National Demonstration Center for Experimental  
Grassland Science Education(Lanzhou University), College of Pastoral Agriculture Science and  
Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, Gansu, China)

**Abstract:** A greenhouse experiment was conducted to reveal the response on regrowth and grain yield of winter wheat plants to clipping treatment. Two winter wheat (*Triticum aestivum*) cultivars, Longyu 4 (LY) and Yunhan 2 (YH), were used, and clipping was done at the tillering stage, with cutting treatments to 6 cm in height ( $R_6$ ), to 3 cm in height ( $R_3$ ), and no-cut as control (CK). The results showed that the leaf area index and net photosynthesis rate of the two cultivars at the anthesis stage after clipping recovered to control levels, the aboveground biomass and root biomass of LY under  $R_6$  and  $R_3$  decreased by 23% and 3% ( $P>0.05$ ), and 12% and 13% ( $P>0.05$ ) in comparison with CK, respectively. The aboveground biomass of YH decreased by 22% and 15% ( $P>0.05$ ) compared with its control under  $R_6$  and  $R_3$ , however, root biomass under  $R_3$  was equal to its control. Clipping caused the proportion of aboveground biomass in the whole plant to decline, and ra-

\* 收稿日期:2016-11-15 接受日期:2017-01-03

基金项目:陇东黄土高原冬小麦粮饲兼用的技术体系研究与示范(1504NKCA081);国家级大学生创新创业项目;兰州大学2017年度创新创业教育基地项目

第一作者:王茜(1995-),女,四川广安人,在读本科生,研究方向为草业科学。E-mail:wq13@lzu.edu.cn

通信作者:沈禹颖(1965-),女,上海人,教授,博导,博士,研究方向为草地农业生态。E-mail:yy.shen@lzu.edu.cn

tios of stem to leaf in aboveground parts decreased and increased, respectively. There was no difference in biomass allocation patterns aboveground or below ground between  $R_6$  and CK; However, a higher proportion of dry matter transferred to aboveground under  $R_3$  than that under CK, implying that suitable cutting disturbance may release growth redundancy through the source-sink coordination to maintain grain yield formation.

**Key word:** feed-fwd; winter wheat; stubble height; dry matter accumulation; leaf area index; photosynthesis rate

**Corresponding author:** Shen Yu-ying E-mail: yy.shen@lzu.edu.cn

随着农区草业发展的推进,饲草资源多样性是保障畜产品产量和品质稳定的重要基础。我国牧区的气温和降水季节性变化十分明显,导致了夏秋多草而冬春缺草,而冬春季饲草不足会使家畜的体重下降<sup>[10]</sup>。因此优质饲草资源亟待开发。冬小麦(*Triticum aestivum*)是世界范围内普遍种植的最主要的粮食作物,另外,冬小麦的生命周期长,很适合粮饲两用<sup>[1]</sup>,因此成为了粮饲兼用的最主要作物之一。营养期冬小麦作为饲草利用,再生后收获籽实的粮饲兼用方式是农区新饲草开发的一个途径<sup>[3-10]</sup>,作为传统的粮食作物,粮饲兼用方式下冬小麦籽粒产量保持稳定是其推广应用的关键。前人研究表明作物籽粒产量与光合产物的分配格局相关<sup>[10]</sup>,刈割干扰后植物再生能力取决于受损叶片的光合恢复能力,刈割强度和留茬高度影响光合产物的积累<sup>[11-12]</sup>,大田条件下,齐地面刈割增加小麦青饲草供应量,但籽粒产量下降明显,丰水年冬小麦留茬 3 cm 刈割所获籽粒产量与对照无差异<sup>[5]</sup>,分蘖期刈割时晚熟冬小麦品种产量较早熟品种稳定<sup>[13]</sup>,那么刈割高度是如何影响冬小麦粮饲兼用后再生,生物量分配有何变化呢?为更好地理解刈割对冬小麦再生过程中生物量的分配格局,本研究在温室控制条件下,选取陇东地区普遍适用的两个冬小麦品种,在分蘖期刈割处理,探究不同刈割高度对冬小麦再生生长和光合产物的分配,以期揭示籽粒作物响应刈割的生理生态机制,为推广冬小麦粮草兼用的利用方式提供一定的理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试材料选用陇东地区普遍采用的冬小麦品种陇育 4 号(LY)和运旱 2 号(YH),前者是中晚熟型,返青后生长天数约 115 d,后者是早熟品种,返青后生长天数约 90 d。将小麦种子用蒸馏水浸泡 12 h 后,置于 22 °C 恒温培养箱中催芽 24 h,转入 0~4 °C 冰箱中春化处理 40 d,于室温下放置 2 d 缓苗用于播种。盆栽试验

于 2015 年 11 月 30 日—2016 年 6 月 30 日在兰州大学智能温室中进行,白天温度 25~30 °C,夜间温度 15~20 °C,每天光照时间 12 h。盆栽容器高 30 cm,上内径为 35 cm,下内径为 20 cm,每盆装土 10 kg,播种前每盆施有机肥(含有机碳 6%)30 g,每日用称重法保持田间持水量的 70%,齐苗后每盆留苗 15 株。

### 1.2 设计与处理

在小麦生长至 5~6 个分蘖时进行刈割处理,设置 3 个处理:不刈割,(对照,CK),留茬高度 3 cm( $R_3$ )和 6 cm( $R_6$ )。每个品种每个处理重复 3 次,为满足破坏性取样要求,各处理共 20 盆,完全随机排列。

### 1.3 取样与测定项目及方法

**1.3.1 株高测定** 刈割后两个品种各处理下分别定株 10 株,每天测量自然株高至花期。

**1.3.2 生物量测定** 刈割后于各处理的再生早期和花期取样,3 个重复,齐地面剪下地上生物量后,整盆泡于水中,将小麦根系整株取出过 2 mm 筛网冲洗干净,实验室内分离各构件(茎、叶、根、穗),于 80 °C 烘干 24 h,测定各部分干物质重量。

**1.3.3 叶面积与根面积测定** 与生物量测定同步,每个品种各重复取 5 株的叶片和根,用多用途叶面积仪(Win-FOLIA)扫描测定叶面积、根面积和根体积。

**1.3.4 旗叶净光合速率( $P_n$ )测定** 刈割后 20 d 于 09:30—12:30,各处理下选取 5 株植株,采用 LI-6400 光合仪(Licor, USA)测定。

### 1.4 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件进行统计分析,对不同刈割处理下冬小麦再生至同一生育期的各项指标进行方差分析,用 LSD 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同刈割高度对再生株高和叶面积指数(LAI)的影响

刈割后,株高随着冬小麦生育期的推进呈现增加

的趋势,但不同刈割处理的高度变化不同(图 1)。LY 在刈割 22 d 后,刈割处理的株高与未刈割对照(CK)基本持平;再生 48 d 后,留茬处理的株高低于未刈割对照(CK)。YH 在再生过程中,两个刈割处理下的株高均未超过未刈割,说明刈割对 YH 的株高生长抑制强于 LY。

刈割后,LY 的叶面积指数(LAI)较对照显著降低( $P<0.05$ )。刈割 7 d 后, $R_6$  和  $R_3$  处理下 LAI 较 CK

下降了 80%左右( $P<0.05$ )。随着生长时期的延长,LAI 逐渐恢复,21 d 后,较 CK 分别显著下降了 57%和 65%( $P<0.05$ ),至花期(69 d), $R_3$  处理的 LAI 与 CK 持平( $P>0.05$ )。

刈割后 7 d,YH 的叶面积指数在  $R_6$  和  $R_3$  下较 CK 分别下降了 60%和 84%( $P<0.05$ )。至 40 d,两种处理下 YH 的 LAI 较 CK 无显著差异( $P>0.05$ ) (图 2)。

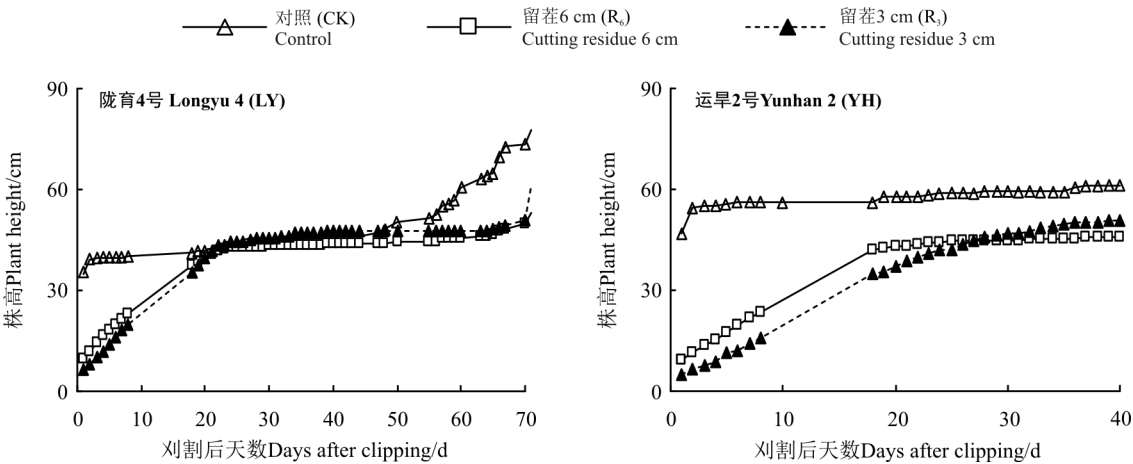


图 1 不同刈割高度下陇育 4 号和运旱 2 号冬小麦再生至花期株高动态  
Fig. 1 Plant height of winter wheat LY and YH under different clipping heights

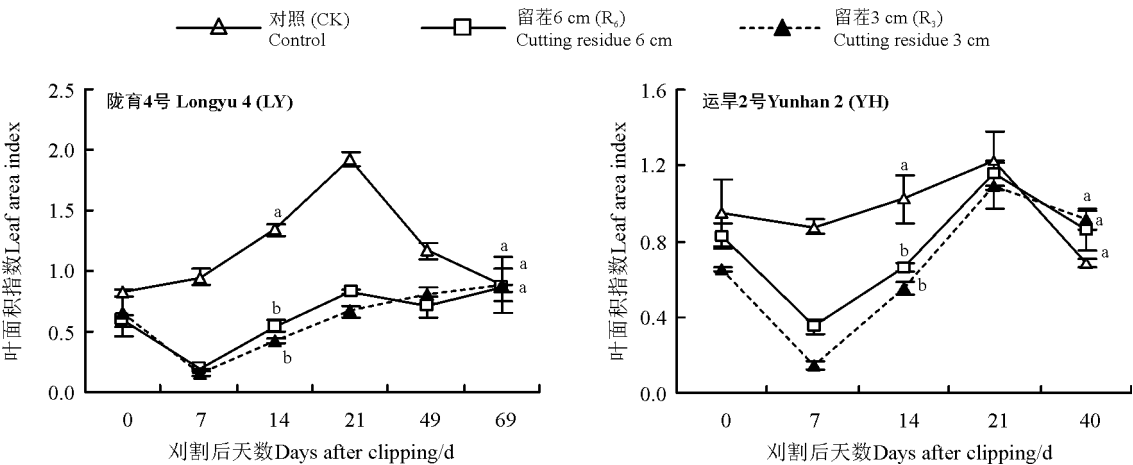


图 2 不同刈割高度下陇育 4 号和运旱 2 号冬小麦再生过程叶面积指数动态  
Fig. 2 LAI dynamics of winter wheat LY and HY under different clipping heights

注:不同小写字母表示同一测定时期不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。图 3、图 4 和图 5 同。  
Note: Different lowercase letters within the same measuring date indicate significant difference among three treatments at the 0.05 level; similarly for the Fig.3, Fig.4, and Fig.5.

2.2 不同刈割高度对再生早期旗叶净光合速率( $P_n$ )的影响

刈割对两个冬小麦品种再生早期旗叶净光合速率( $P_n$ )影响不显著。刈割后 14 d,LY 在  $R_6$ 、 $R_3$  处理下

$P_n$  较 CK 分别下降了 28%和 27%( $P>0.05$ )。刈割 16 d 后,旗叶光合速率仍未超过 CK。而此时,YH 的  $P_n$  在  $R_6$  和  $R_3$  下恢复迅速,较 CK 分别上升了 16%和 17%。可见,刈割抑制了 LY 的  $P_n$ ,而促进了 YH 的

$P_n$  (图 3)。

### 2.3 不同刈割高度对地上生物量动态的影响

刈割后 14 d, 在  $R_6$  和  $R_3$  处理下, LY 地上生物量较 CK 分别下降了 63% 和 75% ( $P < 0.05$ ); 随着恢复生长的推进, 刈割处理与 CK 相比无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 至花期 (69 d), 两个处理下较未刈割分别下降

了 23% 和 3%。对 YH 而言, 两个刈割处理下, 刈割后 14 d 的地上生物量较 CK 分别下降了 65% 和 87% ( $P < 0.05$ ), 至刈割后 40 d 两个刈割处理与 CK 的差异不显著, 较 CK 下降了 22% 和 15% (图 4)。刈割后, 两个品种的地上生物量恢复生长格局相同, 但刈割对 YH 地上生物量的影响比 LY 大。

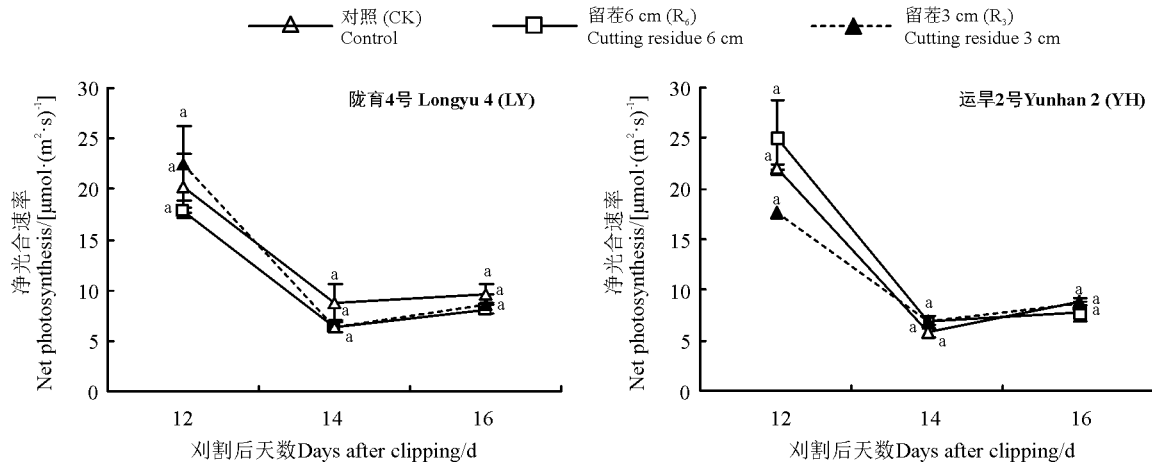


图 3 不同刈割高度对陇育 4 号和运早 2 号冬小麦再生早期光合速率的影响

Fig. 3 Net photosynthesis rate ( $P_n$ ) of winter wheat LY and YH under different clipping heights

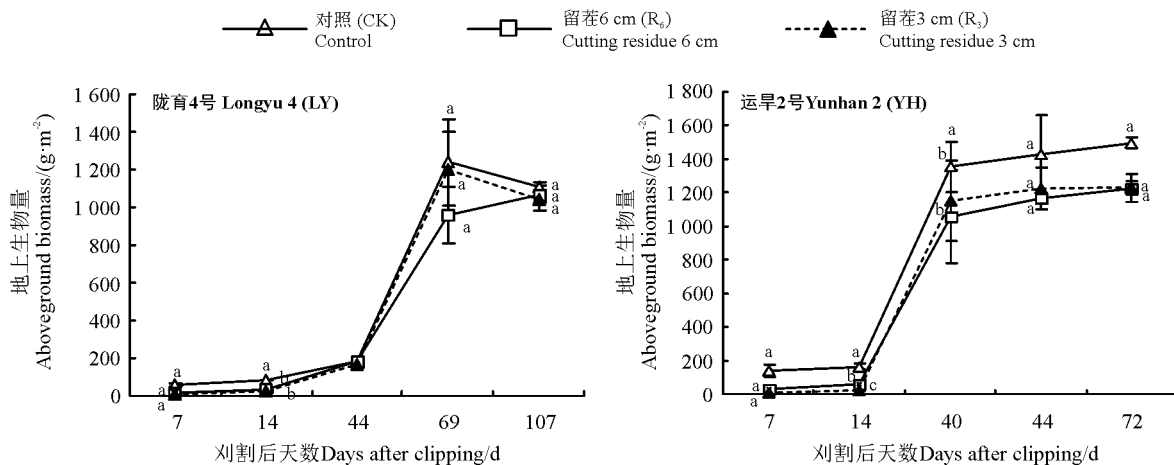


图 4 不同刈割高度对陇育 4 号和运早 2 号冬小麦再生过程地上生物量的影响

Fig. 4 Aboveground biomass of winter wheat LY and YH under different clipping heights

### 2.4 不同刈割高度对根系生长的影响

**2.4.1 根系生物量** 刈割处理后地下生物量明显低于 CK。刈割后 14 d, LY 根系生物量在  $R_6$  和  $R_3$  下较 CK 分别下降了 24% 和 39% ( $P < 0.05$ ); 随着生育期的推进, 至花期, 两个处理下的地下生物量较 CK 分别降低了 12% 和 13% ( $P > 0.05$ ) (图 5)。

刈割后 14 d, 与 CK 相比, YH 根系生物量在  $R_6$  和  $R_3$  处理下分别下降了 41% 和 49% ( $P < 0.05$ )。至

花期, 根系生物量在  $R_6$  下仅降低了 6%, 与 CK 差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 在  $R_3$  下与 CK 持平 (图 5)。

**2.4.2 根长** 刈割导致冬小麦根系伸长受到抑制。刈割后 14 d, 两个刈割处理下根长下降幅度接近, 在  $R_6$  和  $R_3$  处理, LY 分别较 CK 下降了 19% 和 24% ( $P < 0.05$ ), YH 分别下降了 19% 和 21% ( $P < 0.05$ )。随着再生恢复, 刈割对根长的影响逐渐减小, LY 的花期 (刈割后 69 d) 根长在  $R_6$  处理下与 CK 差异不显著 ( $P >$

0.05),仅下降了 6%, $R_3$  处理下则显著下降了 28% ( $P<0.05$ ),YH 则分别下降了 28%和 12%( $P<0.05$ )。

**2.4.3 根表面积** 刈割后 14 d,LY 在  $R_6$ 、 $R_3$  处理下根面积较 CK 分别下降了 36%和 42%( $P>0.05$ );恢复刈割后 69 d,较 CK 分别下降了 17%( $P>0.05$ )和 47%( $P<0.05$ )。刈割后 14 d,YH 在  $R_6$ 、 $R_3$  处理下

根面积较 CK 分别下降了 31%和 46%( $P<0.05$ );至刈割后 40 d,则较 CK 分别下降了 33%和 25%( $P<0.05$ )。刈割后至花期,两个品种根面积仍均不及对照,但 YH 受刈割影响根面积下降程度低于 LY,说明 YH 根系在  $R_3$  处理下有更好的根生长应激适应(图 5)。

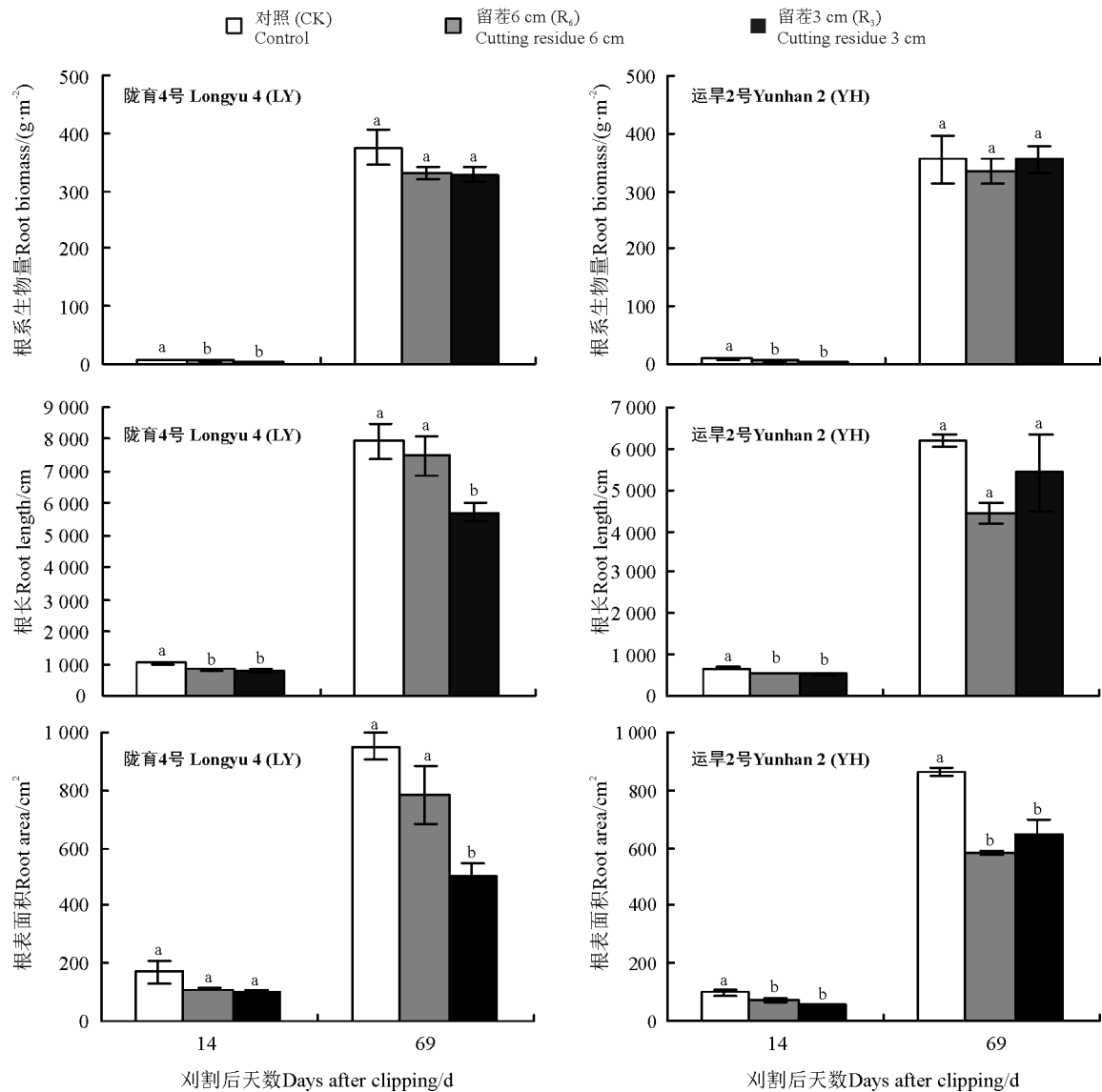


图 5 不同刈割高度下陇育 4 号和运旱 2 号冬小麦再生过程根系生长状况

Fig. 5 Root growth of winter wheat LY and YH under different clipping heights

2.5 不同刈割高度对植株生物量分配格局的影响

再生过程中随着地上地下物质的转移,两种刈割处理下 LY 的地上生物量在整株中的占比与 CK 差异不显著( $P>0.05$ ),花期(刈割后 69 d), $R_6$  处理较 CK 下降了 2%(图 6),其中茎生物量在地上部所占比例较 CK 下降了 9%,而叶和穗占比分别增加了 11%和

1%; $R_3$  与对照无显著差异,与  $R_6$  下趋势一样,其中茎生物量占比下降了 9%,叶生物量占比上升了 4%,穗占比增加明显,上升了 10%(图 7)。

随着植株进入生殖生长阶段,两种处理下,YH 的地上生物量在整株中的占比与 CK 差异不显著( $P>0.05$ ),(刈割后 69 d) $R_6$  处理较 CK 下降了 5%(图 6),



其中茎、叶和穗生物量占比较 CK 分别下降了 4%、增加了 9%和下降了 3%； $R_3$  较 CK 下降了 4%，其中茎生物量占比较 CK 下降了 1%，叶和穗占比较 CK 分别上升了 2%和下降了 0.1%（图 7）。由此看出，刈割后恢复生长至花期，LY 和 YH 的地上、地下物质分配格局相近，但两个品种地上各部位生物量占比表现不同。

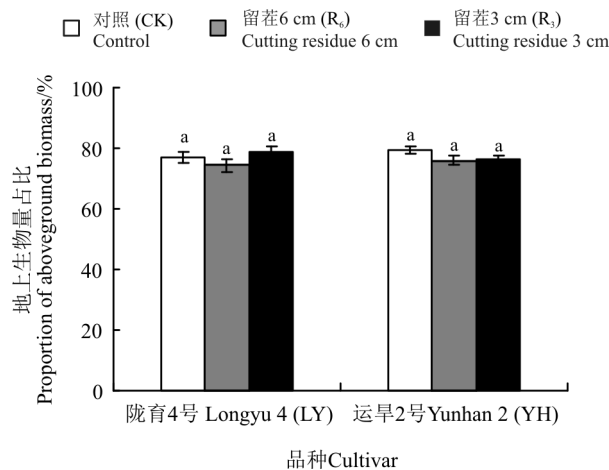


图 6 不同刈割高度下陇育 4 号 (LY) 和运旱 2 号 (YH) 花期植株地上生物量占比

Fig. 6 Biomass proportion of aboveground in whole plant at anthesis under different clipping heights

注：不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。  
Note: Different lowercase letters within the same cultivar indicate significant difference among three treatments at the 0.05 level.

2.6 不同刈割高度对籽粒生产的影响

刈割留茬高度对两个品种的籽粒产量和千粒重有显著影响 ( $P<0.05$ )，对每穗穗粒数无显著影响 ( $P>$

0.05)。在  $R_6$  和  $R_3$  处理下，LY 的籽粒产量较 CK 分别下降了 12% 和 14% ( $P<0.01$ )，千粒重均下降了 8% 左右 ( $P<0.05$ )；YH 的籽粒产量较 CK 分别下降了 7% 和 6% ( $P<0.01$ )，千粒重在  $R_6$  处理下降了 6% ( $P<0.05$ )，而在  $R_3$  处理下则与 CK 无显著差异 ( $P>$

3 讨论

株高作为一种重要的生长指标，反映了植株的生长状态<sup>[14]</sup>。分蘖期刈割迅速降低了冬小麦植株的高度，扰乱了冬小麦正常的生长节律，在短期内两个品种的两个刈割处理的株高较未刈割均明显降低。但再生至灌浆期，3 cm 留茬的刈割对株高有刺激效应。本研究考察的另一个重要指标是叶面积指数，反映植物群体生长状况，其大小与最终产量的高低密切相关<sup>[15]</sup>。刈割处理会降低叶面积指数<sup>[15-16]</sup>，本研究发现，再生早期刈割处理的叶面积指数的确显著下降，但早熟品种运旱 2 号叶片恢复生长能力强于中晚熟品种陇育 4 号，运旱 2 号在刈割 3 cm 处理下表现出补偿生长，这反映了不同熟性品种间光合恢复能力的差异。由于早期叶面积指数的下降，植株总光合能力减弱，光合产物减少，因此，本研究中两个品种地上部生物量在再生早期均受刈割影响，但表现出在 3 cm 刈割留茬下地上部生物量高于 6 cm 留茬。除了植株地上部，冬小麦根系的生长也极大程度地受叶片的光合作用<sup>[17]</sup>的限制，当刈割高度降低时，基部叶大量被除去，总光合作用下降，影响了地下部的营养积累和再生<sup>[18]</sup>。而且刈割高

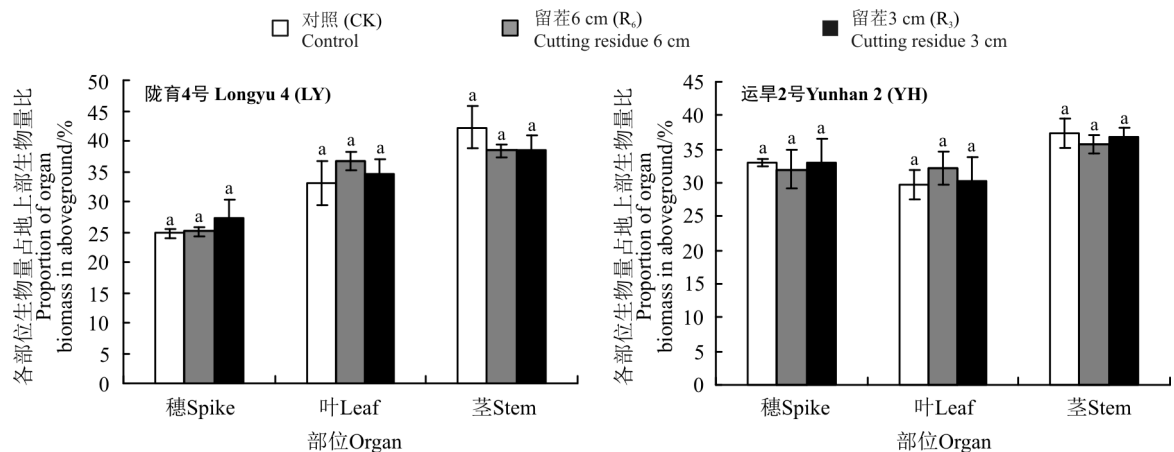


图 7 不同刈割高度下陇育 4 号 (LY) 和运旱 2 号 (YH) 花期植株各部位生物量在天上部占比

Fig. 7 Biomass proportion of every parts in aboveground at anthesis under different clipping heights

注：不同小写字母表示同一器官不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。  
Note: Different lowercase letters within the same plant organ indicate significant difference among three treatments at the 0.05 level.

表 1 不同刈割高度下冬小麦陇育 4 号和  
运旱籽粒产量及产量构成

| Table 1 Comparison of grain yield and yield components of LY and YH under two cutting heights |                |                                  |                    |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------------|--------------------|-------------------------|
| 品种                                                                                            | 刈割处理           | 籽粒产量                             | 每穗粒数               | 千粒重                     |
| Variety                                                                                       | Treatment      | Yield/<br>(g · m <sup>-2</sup> ) | Yield<br>per spike | 1 000 grain<br>weight/g |
| 陇育 4 号<br>LY                                                                                  | CK             | 190.3±4.1                        | 34.4±1.4           | 35.5±0.8                |
|                                                                                               | R <sub>6</sub> | 167.7±1.7 **                     | 32.7±1.2           | 32.8±0.3 *              |
|                                                                                               | R <sub>3</sub> | 163.1±1.3 **                     | 32.1±1.5           | 32.6±0.3 *              |
| 运旱 2 号<br>YH                                                                                  | CK             | 202.8±2.8                        | 33.7±1.6           | 38.6±0.5                |
|                                                                                               | R <sub>6</sub> | 187.9±3.6 **                     | 33.2±1.9           | 36.3±0.7 *              |
|                                                                                               | R <sub>3</sub> | 190.7±2.4 **                     | 31.4±1.8           | 38.9±0.5                |

注: \* 表示刈割处理与 CK 差异差异显著( $P<0.05$ ), \*\* 表示刈割处理与 CK 差异极显著( $P<0.01$ )。  
Note: \* and \*\* indicate significant difference between clipping treatment and CK at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

度越低,植株再生能力越弱<sup>[19]</sup>,牧草向地下分配资源增加<sup>[20]</sup>。

花期是小麦生殖生长的重要时期,叶片和穗部需要大量的营养物质,而茎作为一种库的潜在贮存,开花前小麦将一部分光合产物以碳水化合物的形式暂

时储存于茎中<sup>[21-22]</sup>,刈割促使茎中的干物质分配到叶片<sup>[23]</sup>,刈割后茎贮物在恢复生长中发挥重要作用,从地上部位各器官分配来看,陇育 4 号在刈割 6 cm 下主要将茎中物质转移至叶片,刈割 3 cm 下茎中物质大部分转移至穗,小部分转移至叶片,而运旱在两个刈割高度下地上物质均主要积累在叶片中。从植株生物量占比来看,陇育 4 号和运旱 2 号在刈割 6 cm 时,通过物质在地上地下的转移,使地植株生物量分配格局较未刈割无显著差异,但在刈割 3 cm 下,运旱 2 号的转运应激更积极,通过转移更多物质到地上部,保证了籽粒形成,造成两个品种的恢复生长和产量对刈割的响应不同。

穗粒数和千粒重是产量构成的重要因素。已有的研究发现,当刈割留茬高度小于 5 cm 时,春小麦产量下降<sup>[24]</sup>,是由于刈割造成叶面积缓慢恢复,成熟期延后所致。本研究中,两个品种两种刈割处理下籽粒产量较未刈割均下降,陇育 4 号在两个刈割处理下穗粒数差别不大,千粒重却较未刈割显著降低,推测可能与花期可溶性糖不足,花药和花粉粒发育不良致使籽粒干瘪有关<sup>[24]</sup>。

参考文献 References:

[1] 刘晓倩.冬麦苗儿嫩 可换羊儿肥——专家建议尽快选育“粮草兼用”小麦品种.中国科学报,2017-02-07(第 4 版)

[2] Jadoon S A,Ullah H,Mohammad F,Khalil I H,Alam M,Shahwar D.Impact of forage clipping treatments on performance of winter wheat.Genetics and Molecular Research Gmr,2013,12(4):5283-5288.

[3] Epplin F M,Hossain I,Krenzer E G Jr.Winter wheat fall-winter forage yield and grain yield response to planting date in a dual-purpose system.Agricultural Systems,2000,63(3):161-173.

[4] Moore A D,Price R J,Hacker R B.Opportunities and trade-offs in dual-purpose cereals across the southern Australian mixed-farming zone:A modeling study.Animal Production Science,2009,49(10):759-768.

[5] Tian L H,Bell L,Shen Y Y,Whish J.Dual-purpose use of winter wheat in western China:Cutting time and nitrogen application effects on phenology,forage production,and grain yield.Crop & Pasture Science,2012,63(6):520-528.

[6] Keles G,Ates S,Coskun B,Alatas M S,Isik S.Forage yields and feeding value of small grain winter cereals for lambs.Journal of the Science of Food and Agriculture,2016,96(12):4168-4177.

[7] 田莉华,张清平,蒋海亮,刘渊博,沈禹颖.刈割对冬小麦再生积温需求及其籽粒产量和品质的影响.西北植物学报,2012,32(7):1426-1432.

Tian L H,Zhang Q P,Jiang H L,Liu Y B,Shen Y Y.Effect of cutting timing on winter wheat in the accumulated temperature requirement,grain yield and quality.Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2012,32(7):1426-1432.(in Chinese)

[8] 李飞,张秀珍,高宪儒.越冬期绵羊放牧对冬小麦生长及产量的影响.草业科学,2015,32(8):1317-1322.

Li F,Zhang X Z,Gao X R.Effects of sheep wintering grazing on growth and yield of winter wheat.Pratacultural Science,2015,32(8):1317-1322.(in Chinese)

[9] Harrison M T,Evans J R,Moore A D.Using a mathematical framework to examine physiological changes in winter wheat after livestock grazing:2.Model validation and effects of grazing management.Field Crops Research,2012,136(136):127-137.

[10] 平晓燕,周广胜,孙敬松.植物光合产物分配及其影响因子研究进展,植物生态学报 2010,34(1):100-111.

- Ping X Y, Zhou G S, Sun J S. Advances in the study of photosynthate allocation and its controls. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 100-111. (in Chinese)
- [11] 王志锋, 王多伽, 于洪柱, 金春花, 齐宝林, 郑长月, 张营超. 刈割时间与留茬高度对羊草草甸草产量和品质的影响. *草业科学*, 2016, 33(2): 276-282.
- Wang Z F, Wang D J, Yu H Z, Jin C H, Qi B L, Zheng C Y, Zhang Y C. Effects of cutting time and stubble height on hay yield and quality of *Leymus chinensis* meadow. *Pratacultural Science*, 2016, 33(2): 276-282. (in Chinese)
- [12] 王丹丹, 田莉华, 沈禹颖, 刘渊博. 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(6): 642-647.
- Wang D D, Tian L H, Shen Y Y, Liu Y B. Regrowth responses to cutting of different cultivars of winter wheat. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2014, 22(6): 642-647. (in Chinese)
- [13] 王声锋, 段爱旺, 徐建新. 冬小麦株高和叶面积指数变化动态分析及模拟模型. *灌溉排水学报*, 2010(4): 97-100.
- Wang S F, Duan A W, Xu J X. Dynamic changes and simulation model of plant height and leaf area index of winter wheat. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010(4): 97-100. (in Chinese)
- [14] Yang P, Wen-Bin W U, Tang H J, Zhou Q B, Zhang L. Mapping spatial and temporal variations of leaf area index for winter wheat in north China. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(12): 1437-1443.
- [15] Harrison M T, Kelman W M, Moore A D, Evans J R. Grazing winter wheat relieves plant water stress and transiently enhances photosynthesis. *Functional Plant Biology*, 2010, 37: 726-736.
- [16] Harrison M T, Evans J R, Dove H, Moore A D. Recovery dynamics of rainfed winter wheat after livestock grazing 2. Light interception, radiation-use efficiency and dry-matter partitioning. *Crop & Pasture Science*, 2011, 62(11): 960-971.
- [17] 郭正刚, 刘慧霞, 王彦荣. 刈割对紫花苜蓿根系生长影响的初步分析. *西北植物学报*, 2004, 24(2): 215-220.
- Guo Z G, Liu H X, Wang Y R. Effect of cutting on root growth in lucerne. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(2): 215-220. (in Chinese)
- [18] 朱珏, 张彬, 谭支良, 王敏. 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.
- Zhu J, Zhang B, Tan Z L, Wang M. Research progress of clipping effect on quality and biomass of grazing. *Pratacultural Science*, 2009, 26(2): 80-85. (in Chinese)
- [19] 刘杰淋, 唐凤兰, 张月学, 韩微波, 尚晨, 刘凤岐, 陈极山. 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.
- Liu J L, Tang F L, Zhang Y X, Han W B, Shang C, Liu F Q, Chen J S. Effect of different stubble heights on regeneration and yield of annual forages. *Grassland and Turf*, 2009(6): 47-49. (in Chinese)
- [20] 宋智芳, 安沙舟, 孙宗玖. 刈割和放牧条件下伊犁绢蒿生物量分配特点. *草业科学*, 2009, 26(12): 118-123.
- Song Z F, An S Z, Sun Z J. Biomass allocation patterns of *Seriphidium transiliense* under clipping and grazing conditions. *Pratacultural Science*, 2009, 26(12): 118-123. (in Chinese)
- [21] Blum A, 王国凤. 动用茎储物改善小麦胁迫下的籽粒灌浆. *麦类文摘·种业导报*, 1999(2): 1-3.
- [22] 姜东, 于振文, 李永庚, 韩红岩, 余松烈. 冬小麦开花前后茎和叶鞘中贮存的碳水化合物含量的变化. *植物生理学通讯*, 2000(6): 507-511.
- Jiang D, Yu Z W, Li Y G, Han H Y, Yu S L. Changes of storage carbohydrates content in stems and sheathes of winter wheat during pre- and post-anthesis. *Plant Physiology Communications*, 2000(6): 507-511. (in Chinese)
- [23] Harrison M T, Evans J R, Moore A D. Using a mathematical framework to examine physiological changes in winter wheat after livestock grazing: 1. Model derivation and coefficient calibration. *Field Crops Research*, 2012, 136: 116-126.
- [24] 谷艳芳, 丁圣彦, 高志英, 邢倩. 干旱胁迫下冬小麦光合产物分配格局及其与产量的关系. *生态学报*, 2010, 30(5): 1167-1173.
- Gu Y F, Ding S Y, Gao Z Y, Xing Q. The pattern of photosynthate partitioning in drought-stressed winter wheat and its relationship with yield. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1167-1173. (in Chinese)

(责任编辑 武艳培)