

土壤水分下限调控灌溉对春青稞生长、 产量和水分利用的影响

蒙强,刘静霞,李玉庆,张文贤,潘苏向,李敏杰,尼玛次仁

(西藏农牧学院水利土木工程学院,西藏 林芝 860000)

摘要:为探究林芝河谷地区利于春青稞生长发育和产量提高的大田调控灌溉模式,以喜马拉雅 22 号为试材,在全生育期分别设置了 80%~85% $\theta_f(W_1)$ 、75%~80% $\theta_f(W_2)$ 、65%~70% $\theta_f(W_3)$ 、55%~60% $\theta_f(W_4)$ 和 45%~50% $\theta_f(W_5)$ 5 个土壤水分下限调控水平和 1 个旱作处理(CK),研究了不同土壤水分调控下限对春青稞生长、耗水、干物质积累及产量的影响。结果表明:灌水处理对春青稞中后期株高生长影响显著,抽穗期、乳熟期株高较 CK 分别提高了 37.28% 和 44.33%; W_1 、 W_2 及 CK 处理的春青稞单株叶面积在抽穗期后率先降低,平均衰减速率为 $-0.20 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,且乳熟期后各处理的叶面积相对生长率呈显著负增长;春青稞生育期总耗水量随水分调控下限的降低直线下降,耗水强度基本在 $5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右;灌水处理较 CK 提高了春青稞干物质积累量,平均增幅 13.95%,以抽穗期最大。不同处理的春青稞产量及水分利用效率均随水分调控下限的降低呈先升高后降低的趋势,其中 W_4 的水分利用效率和作物收获指数分别为 $1.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 0.40,明显高于 $W_1(0.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, 0.28)$ 、 $W_2(0.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, 0.30)$,且该处理在较低的灌水量(252.52 mm)下获得最高的产量($6\ 237.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。综合认为,基于本试验条件下的春青稞全生育期土壤水分调控下限为 55%~60% θ_f 时,节水增产效应显著。

关键词:春青稞;调控灌溉;生长;土壤水分;产量;水分利用效率

中图分类号:S274.1;S512.3 **文献标志码:**A

Effects of regulated irrigation of lower limits of soil moisture on growth, yield and water use efficiency of spring highland barley

MENG Qiang, LIU Jingxia, LI Yuqing, ZHANG Wenxian, PAN Suxiang, LI Minjie, NIMA Ciren

(Water Conservancy Project and Civil Engineering College, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi, Tibet 860000, China)

Abstract: To explore the regulated irrigation mode benefits to the growth and yield of spring highland barley in Nyingchi valley areas, a field plot experiment was carried out with the spring highland barley species "Himala 22". Five lower soil water limits, including 80%~85% $\theta_f(W_1)$, 75%~80% $\theta_f(W_2)$, 65%~70% $\theta_f(W_3)$, 55%~60% $\theta_f(W_4)$, and 45%~50% $\theta_f(W_5)$, and one control treatment (rain-fed irrigation, CK) in the whole growing season to study the effects of soil water regulation on spring highland barley growth, water consumption, dry matter accumulation, and yield. Results showed that the irrigation treatment had significant effects on plant height of the spring highland barley in the middle and late stages. Comparing with CK treatment, the plant height at heading stage and milk stage increased by 37.28% and 44.33% respectively. After heading stage, the leaf area per plant of W_1 , W_2 , and CK treatment decreased, and the average decay rate was $0.20 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. The relative growth rate of leaf area was significantly negative after milky stage. The total water consumption during the growth period of spring barley decreased sharply with the decrease of the lower soil water limits, and the water consumption intensity basically floated around $5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$. Comparing with CK treatment, the irrigation treatment increased the drymatter accumulation of the spring green by 13.95%, and a big rate of increase amplitude appeared in heading stage. With

收稿日期:2019-04-12

修回日期:2019-06-28

基金项目:大学生创新性实验训练计划项目“基于有限灌溉模式下的林芝春青稞需耗水特征分析”;西藏土木水利电力工程技术研究中心
区级重点实验室项目(ZTJS-04);西藏农牧学院人才引进科研启动项目(RC201601,RC201602)

作者简介:蒙强(1990-),男,甘肃兰州人,硕士,讲师,主要从事农田水利高效利用研究。E-mail:mengqiang0303@126.com

通信作者:李玉庆(1975-),男,甘肃武威人,副教授,主要从事水利及灌溉排水研究。E-mail:xzlyyq666@163.com

the decrease in lower soil water limits, the yield and water use efficiency in all treatments increased first and then decreased. The water use efficiency and crop harvest index of W_4 treatment were $1.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ and 0.40, respectively, significantly higher than that of W_1 ($0.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 0.28) and W_2 ($0.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 0.30). Meanwhile, the treatment W_4 obtained the maximum yield ($6\ 237.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) under lower irrigation volume (252.52 mm). Comprehensively considering the water saving and high field, the lower soil water limit of 55%~60% θ_f is optimal to agriculture of the Nyingchi valley under the present experimental conditions.

Keywords: spring highland barley; regulated irrigation; growth; soil water; yield; water use efficiency

青稞是青藏高原地区传统灌溉类农作物之一,营养丰富、种植面积大,是牧民主要食物来源,同时也是高原牲畜冬季重要的饲草料^[1-8]。其中,春青稞由于生长期较短,被广泛种植于藏区干旱及半干旱地区。然而,与同纬度其他地区相比,藏区耕作土层浅薄贫瘠,气候干湿季分明、水热资源时空分布不均等自然条件严重制约着青稞产量提高与品质的提升。受全球气候变化影响,旱作农业受旱频率呈增加趋势,已成为影响西藏地区青稞稳产、高产的主要因素之一^[9-11]。就旱田而言,开展以保护生态、提高水资源利用率为宗旨的农田水利灌溉是十分必要及迫切的。但特殊的地理环境、气候条件以及经济问题使得藏区农田水利灌溉基础设施建设相对落后,灌溉水利用率低于 30%^[9]。因此,如何有效解决水资源供需矛盾,提高作物水分利用效率是当地农业研究的重点。

田德龙等^[12-13]开展的相关灌溉试验研究为西藏旱作农业提供了基础理论依据。一些学者根据气象资料利用 FAO-56 Penman 法对参考作物需水量(ET_0)进行了分析。例如,罗红英等^[14-15]通过研究藏区 ET_0 分布变化,认为作物灌溉定额随海拔的上升而增加,林芝地区青稞灌溉定额介于 130~475 mm 之间。张娜等^[16]通过趋势分析认为从西藏西部到东部地区,年际 ET_0 逐渐减小。目前,对青稞需水规律的研究多为模型的对比分析,同时关于作物耗水规律的研究也较为普遍,尹志芳等^[17]基于 SHAW 模型模拟分析得出拉萨河谷地区春青稞耗水约 450 mm。徐冰等^[9]通过试验分析了西藏高寒牧区青稞需水耗水规律,认为全生育期青稞需水量为 445 mm,且出苗前、抽雄期、灌浆期干旱均会导致青稞减产。而时学双等^[18]认为青稞苗期、拔节期、分蘖期和灌浆期实施水分轻度胁迫、成熟期实施重度胁迫可获得较高的产量。Piotr Ogradowicz 等^[19]认为旗叶阶段干旱对青稞产量会产生不利影响,而 Calvo O C 等^[20]研究大麦发现水分利用效率的提高能部分补偿干旱的负面影响。

整体上,前人尽管对青稞需水规律的研究较

多,但大多研究集中于模型和单一耗水规律的研究。而关于不同水分胁迫程度对青稞产量、水分利用效率的影响研究较少,成熟的灌溉制度尚未确定。灌溉试验是得到作物灌水参数最直接的方法,但林芝地区目前尚未完整地开展过青稞灌溉试验,相关研究也未见报道。为此,本研究以春青稞生长、耗水及产量为主要研究内容,探究调控灌溉对林芝河谷地区农田生产力的影响,旨在掌握春青稞耗水、产量及水分生产率对不同水分调控下限的响应能力,以期为最大限度提高有限水资源承载力下藏区高原农田生产力提供科学依据,同时为该区域春青稞地面灌溉参数的确定及节水灌溉制度建立提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验地概况

试验于 2018 年 4—7 月在西藏农牧学院农水综合试验场($29^\circ 40' \text{N}$, $94^\circ 20' \text{E}$)进行。试验区位于尼洋河下游河谷,地势平坦,土壤肥力均匀,海拔 2 980 m,全年无霜期 172 d,年平均温度 8.8°C ,年日照时数 2 000 h, $\geq 10^\circ \text{C}$ 的有效积温 $2\ 150^\circ \text{C} \sim 2\ 200^\circ \text{C}$,年平均降雨量 650~750 mm,主要集中在 6—9 月。试验区土壤类型为沙质壤土,土质分布均匀,平均土层深度为 40 cm(以下为砂砾石层)。其中,0~40 cm 土层田间持水量为 27.6%(重量含水率),平均土壤容重为 $1.37 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。试验区前茬为春青稞,具备灌溉条件。试验年度降水、气温和相对湿度见图 1。

试验前茬作物为春青稞,采用等行距条播种植模式,行距为 25 cm。试材“喜马拉雅 22 号”由林芝市农牧局提供,为西藏农区主栽春青稞品种。试验小区播前灌水,待足墒后翻耕播种,人工除草,并及时防治病虫害。播前底肥施磷酸二氢铵($18\% \text{ N}$, $46\% \text{ P}_2\text{O}_5$) $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、尿素($46\% \text{ N}$) $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,拔节期追施 40%氮肥和磷肥,其他田间管理措施按常规方法进行。

1.2 试验设计

采用等行距条播种植模式,行距为 25 cm,人工

播种量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 试验小区面积 72 m^2 ($12 \text{ m} \times 6 \text{ m}$), 四周设保护行, 各小区间用混凝土筑埂相互隔离, 混凝土埂埋深 55 cm 。试验设 5 个土壤水分调控下限和 1 个雨养灌溉(旱作)处理, 分别记为 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 、 W_5 、CK, 采用随机区组布置, 每个处理重复 3 次。春青稞全生育期内, 当试验小区土壤含水率达到或接近表 1 中所示土壤含水率下限时进行灌水, 灌水上限均为田间持水率, 依据土壤容重、计划湿润层深度(0.4 m)和土壤含水量计算每次灌水量。灌水方式为畦灌, 用水表进行精量控制。

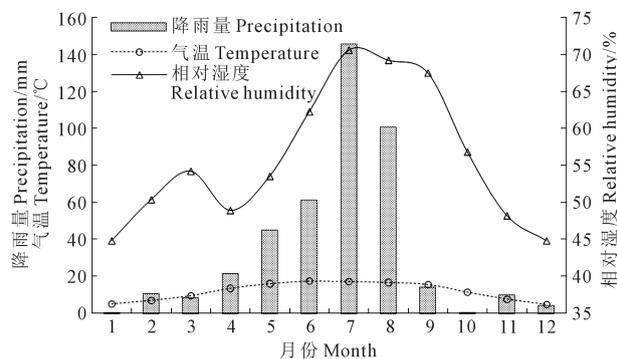


图 1 试验年度试验地降水量、相对湿度和气温

Fig.1 The precipitation, relative humidity and surface temperature

表 1 全生育期不同灌溉处理土壤水分下限

Table 1 Lower limit of soil moisture at the whole growth stages for various treatments

项目 Item	处理 Treatment					
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	CK
土壤含水率下限 Lower limit of soil moisture	80%~ 85% θ_f	75%~ 80% θ_f	65%~ 70% θ_f	55%~ 60% θ_f	45%~ 50% θ_f	不灌水 Rain-fed irrigation

注: θ_f 为田间持水率。

Note: θ_f is the field capacity.

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤水分 土钻法取 0~40 cm 土层土样, 分 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 4 个土层, 播前 1 d 及播后全生育期内每隔 7 d 取土, 采用烘干法测土壤水分, 最后取各土层含水量的加权平均值为 0~40 cm 土层土壤含水率。

1.3.2 耗水量、日耗水强度及耗水模系数

(1) 耗水量采用水量平衡法计算, 计算公式为:

$$ET_{I-II} = 10 \sum_{i=1}^n r_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P + K - D$$

(1)

式中, ET_{I-II} 为春青稞阶段耗水量 (mm); i 为土层

序号; n 为土层总数; r_i 为第 i 层土壤干容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); H_i 为第 i 层土壤厚度 (cm); W_{i1} 、 W_{i2} 分别为第 i 层土壤在阶段始、末的质量含水量 (%); M 、 P 分别为阶段内灌水量和降雨量 (mm); K 为阶段内地下水补给量 (mm), 试验区地下水埋深大于 10 m , 故 $K = 0$; D 为阶段内排水量 (mm), 本试验灌水量小, 灌水后经测算土壤贮水量, 发现无渗漏产生, 故 $D = 0$ 。

(2) 日耗水强度是表征植株群体在单位时间内的耗水量, 反映生育阶段灌水、气象对作物生长发育的综合影响。日耗水强度为某一阶段耗水量除以该阶段持续的天数 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)。

(3) 耗水模系数为某一生育阶段耗水量占全生育期总耗水量的比重, 与生育阶段持续时间的长度及日耗水强度大小有关。

1.3.3 产量 收获期在每小区选择长势均匀的 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 样方, 单独脱粒测产; 每小区采样 20 株, 统计穗长、单穗重、百粒重等产量构成因素。

1.3.4 生长指标 在苗期、分蘖期、拔节期、抽穗期、乳熟期、成熟期于每小区选取 10 株春青稞, 利用直尺分别测定株高、叶面积 (长 \times 宽 $\times 0.72$), 其中叶面积相对增长率为单位时间内叶片面积的增长速度 ($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

1.3.5 地上干物重 在苗期、分蘖期、拔节期、抽穗期、乳熟期、成熟期, 每小区选取 15 株春青稞地上部分, 并装入牛皮袋于 105°C 的烘箱中杀青 30 min, 后调至 80°C 烘 8 h 后 (干物质量恒定后) 测定干物重。

1.3.6 水分利用效率 水分利用效率是表征作物对水分利用程度的指标, 计算公式为:

$$WUE = Y_a / ET_a \quad (2)$$

式中, WUE 表示作物水分利用效率 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); Y_a 为籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET_a 为生育期耗水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.7 收获指数 作物收获指数是作物收获时籽粒产量与生物产量的比值, 能反映出作物品种产量水平和栽培成效, 计算公式为:

$$HI = Y_a / S_a \quad (3)$$

式中, HI 表示作物收获指数; Y_a 为籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); S_a 为地上干物重 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

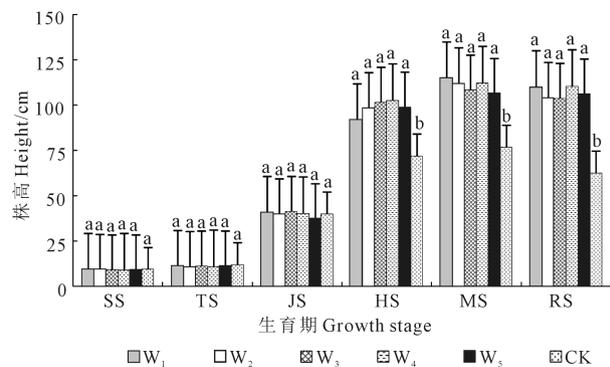
1.4 数据分析

采用 Microsoft Office Excel 2010 处理数据并作图; 用软件 SPSS 19.0 进行相关性分析, 并用 LSD 法进行差异显著性分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同土壤水分下限调控灌溉对春青稞生长特性的影响

2.1.1 株高 由图 2 可知,不同水分调控下限处理的春青稞株高变化趋势一致,均表现为前期缓慢增长、中期快速生长、后期缓慢降低的趋势。拔节期前各处理株高差异不显著,之后迅速增长;抽穗期 W_3 、 W_4 、 W_5 处理的株高明显大于 W_1 、 W_2 ,说明抽穗期低水分调控下限对株高的促进作用更显著。至乳熟期,各处理株高达到峰值,以 W_1 最大、CK 最小,其他处理介于 76.8~115.1 cm 之间。成熟期,作物植株衰老,营养器官生殖生长加快,引起各处理的株高较乳熟期均有所降低,降幅分别为 4.25% (W_1)、7.05% (W_2)、4.29% (W_3)、1.77% (W_4)、0.49% (W_5) 和 18.49% (CK)。整体上,灌水处理促进了春青稞株高生长,其中抽穗期、乳熟期的株高较



注:SS:苗期;TS:分蘖期;JS:拔节期;HS:抽穗期;MS:乳熟期;RS:成熟期。误差线表示平均值的标准误($n=3$)。不同字母表示同一生育期各处理在 $P<0.05$ 水平上差异显著,下同。

Note: SS: seedling stage; TS: tillering stage; JS: jointing stage; HS: heading stage; MS: milky stage; RS: ripening stage. Error bars indicate the standard error for each date point ($n=3$). Different letters indicate significant difference in the same growth period among different treatments at $P<0.05$ level, the same below.

图 2 不同水分处理对春青稞株高的影响

Fig.2 Effects of water treatments on plant height of spring highland barley

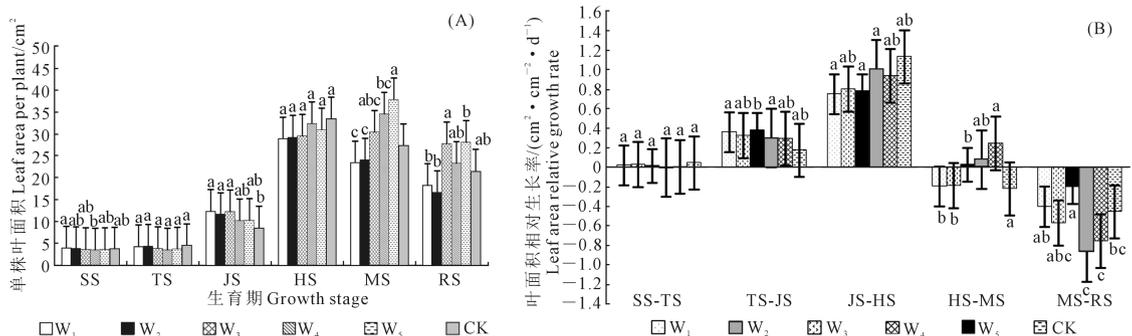


图 3 不同水分处理对春青稞叶面积及其相对生长率的影响

Fig.3 Effects of water treatments on leaf area and leaf area relative growth rate of spring highland barley

CK 平均提高了 37.28% 和 44.33%。此外,分析不同生育时期株高变化对水分下限的响应发现,抽穗期、乳熟期较其他生育时期对水分变化响应敏感。

2.1.2 单株叶面积 由图 3 可知,各处理的单株叶面积变化为先升高再降低。拔节期前各处理单株叶面积差异不显著;抽穗期 W_1 、 W_2 及 CK 的叶面积达到生育期峰值,而 W_3 、 W_4 、 W_5 叶面积峰值出现在乳熟期,但该时期 W_1 、 W_2 叶面积呈降低趋势;乳熟期各处理叶面积变化表现出明显的层次性,即随着灌水下限的降低,单株叶面积逐渐增大。在抽穗~成熟期阶段, W_3 处理的单株叶面积变化较为稳定,且较其他处理叶面积衰减缓慢,利于光合产物积累。此外,该阶段各处理的单株叶面积由大到小排序为: $W_3 > W_4 > W_3 > CK > W_2 > W_1$,说明低水分调控下限能使春青稞叶片在生长后期保持较高的发展水平,利于提高春青稞群体生产力。春青稞叶面积相对增长变化如图 3 所示。苗期~抽穗期各处理的叶面积相对增长率逐渐增大,至抽穗期达到最大,其峰值介于 $0.75 \sim 1.13 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间,说明该阶段春青稞营养生长旺盛,各营养器官增长较快;抽穗期后 W_1 、 W_2 及 CK 叶面积相对生长率率先出现负值,为 $-0.20 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,而 W_3 、 W_4 、 W_5 的叶片仍保持相对正增长,其中以 W_4 的相对生长率最高。与拔节~抽穗阶段相比,叶片相对生长率显著降低,以 W_3 降幅最为明显,为 96.21%, W_4 次之 (92.07%)。乳熟~成熟期所有处理的叶面积相对生长率均为负值且负增长显著,表明抽穗期以后各灌水处理及对照 (CK) 的春青稞叶面积开始衰减,致使光合同化作用减弱。

2.2 不同土壤水分下限调控灌溉对春青稞耗水规律的影响

阶段耗水量、耗水模系数和日耗水强度是分别从不同视角对春青稞耗水规律的表达^[21]。从表 2、

3和表4可看出,春青稞全生育期耗水量总体变化呈现先升高后降低再回升的变化趋势。各处理间全生育期 W_1 的耗水量最大,为 572.25 mm;旱作处理 CK 最小,较其他处理平均降低了 52.5%,差异显著;其他处理全生育期耗水量介于 534.26~559.15 mm 之间。 W_3 、 W_4 、 W_5 处理下的耗水量则随土壤水分调控下限的降低而减小,这与时学双等^[18]的研究结论一致。此外, W_3 、 W_4 、 W_5 较 W_1 和 W_2 均降低了全生育期耗水量,但差异不显著。

总体上,全生育期各处理下的春青稞耗水强度、耗水模系数与耗水量变化趋势一致,均在拔节期或抽穗期达到峰值,最大耗水强度为 $7.18 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。 W_3 、 W_4 、 W_5 较 W_1 和 W_2 春青稞耗水强度降低,但差异不显著,全生育期耗水强度基本在 $5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右浮动,但较 CK

差异显著。 W_1 处理下的春青稞全生育期耗水强度最大 ($4.93 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$),CK 最低 ($2.26 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$); W_3 、 W_4 、 W_5 处理下的春青稞全生育期耗水强度变化趋势与耗水量一致,即随水分调控下限的降低而降低,但降幅不明显。

2.3 不同土壤水分下限调控灌溉对春青稞干物质积累的影响

由图4可知,全生育内各处理春青稞干物质积累呈“S”型增长模式,即生育前期和后期积累缓慢、中期较快。整体上,各生育阶段不同处理间干物质积累无显著差异。但各处理对干物质积累的影响不同,处理 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 、 W_5 较 CK 提高了干物质积累量,平均增幅 13.95%,以抽穗期增幅最大,说明灌溉提高了春青稞干物质积累量。抽穗至成熟期, W_3 处理下的春青稞

表2 不同水分处理下春青稞各生育期耗水量/mm

Table 2 Water consumption at different growth stages of spring highland barley under different water treatments

处理 Treatment	出苗期(14 d) Seedling stage	分蘖期(17 d) Tillering stage	拔节期(28 d) Jointing stage	抽穗期(19 d) Heading stage	乳熟期(22 d) Milky stage	成熟期(16 d) Ripening stage	全生育期(116 d) Whole growthstage
W_1	53.13±2.12a	83.13±2.69a	172.33±32.22a	125.32±34.29a	46.03±4.27a	92.30±2.52b	572.25±60.77a
W_2	52.22±2.31a	68.58±10.22b	179.77±17.03a	120.29±35.37a	45.97±2.66a	92.34±1.80b	559.15±27.53a
W_3	52.46±1.54a	75.11±6.98ab	147.39±26.77ab	128.60±20.38a	43.03±0.77a	99.63±6.76a	546.23±8.95a
W_4	53.10±0.63a	82.93±4.82a	122.35±16.19b	136.40±10.85a	56.06±22.62a	94.33±2.46ab	545.18±32.99a
W_5	52.97±0.68a	79.68±1.53a	118.36±8.49b	127.61±33.90a	62.03±20.13a	93.61±1.02ab	534.26±24.20a
CK	25.88±22.88b	9.42±2.82c	44.34±3.67c	50.75±1.94b	41.43±0.09a	90.68±1.22b	262.50±20.74b

注:同列不同字母表示各处理的均值($n=3$)在 $P<0.05$ 水平上差异显著,下同。

Note: Different letters in same column indicate the mean value ($n=3$) significant different at the $P<0.05$ level, the same below.

表3 不同水分处理下春青稞各生育期耗水模系数/%

Table 3 Water consumption model coefficient of spring highland barley at different growth stages under water treatment

处理 Treatment	出苗期(14 d) Seedling stage	分蘖期(17 d) Tillering stage	拔节期(28 d) Jointing stage	抽穗期(19 d) Heading stage	乳熟期(22 d) Milky stage	成熟期(16 d) Ripening stage
W_1	9.35	14.62	29.99	21.67	8.15	16.22
W_2	9.69	12.77	33.42	21.51	8.56	17.15
W_3	9.46	3.66	16.89	19.45	15.84	34.70
W_4	9.60	13.77	26.93	23.58	7.88	18.23
W_5	9.77	15.24	22.38	25.11	10.17	17.33
CK	9.93	14.93	22.15	23.74	11.71	17.55

表4 不同水分处理下春青稞各生育期耗水强度/($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

Table 4 Water consumption intensity of spring highland barley at different growth stages under water treatment

处理 Treatment	出苗期(14 d) Seedling stage	分蘖期(17 d) Tillering stage	拔节期(28 d) Jointing stage	抽穗期(19 d) Heading stage	乳熟期(22 d) Milky stage	成熟期(16 d) Ripening stage	全生育期(116 d) Whole growthstage
W_1	3.80±0.15a	4.89±0.16a	6.15±1.15a	6.60±1.81a	2.09±0.19a	5.77±0.16b	4.93±0.52a
W_2	3.73±0.17a	4.04±0.60b	6.42±0.61a	6.33±1.86a	2.09±0.12a	5.77±0.11b	4.82±0.24a
W_3	3.75±0.11a	4.42±0.41ab	5.26±0.96ab	6.77±1.07a	1.96±0.04a	6.23±0.42a	4.71±0.08a
W_4	3.79±0.04a	4.88±0.28a	4.37±0.58b	7.18±0.57a	2.55±1.03a	5.90±0.16ab	4.70±0.28a
W_5	3.78±0.05a	4.69±0.09a	4.23±0.30b	6.71±1.78a	2.82±0.92a	5.85±0.07ab	4.61±0.21a
CK	1.85±1.64b	0.56±0.16c	1.58±0.13c	2.67±0.10b	1.88±0.01a	5.67±0.08b	2.26±0.18b

物质积累量始终最大,较 CK 平均提高了 37.47%。与 W_1 、 W_2 相比, W_3 、 W_4 、 W_5 均不同程度地降低了各生育期干物质积累量,但降幅较小。此外,随着水分调控下限的降低,春青稞生长后期的干物质积累量也逐渐降低。至成熟期,各处理的干物质积累量表现为: $W_3 > W_2 > W_4 > W_5 > W_1 > CK$, 表明适宜的水分调控下限利于春青稞地上干物质的积累。

2.4 不同土壤水分下限调控灌溉对春青稞产量及其构成因素的影响

不同处理下的春青稞产量及其构成因素如表 5 所示。由表 5 可知, W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 、 W_5 处理下的百

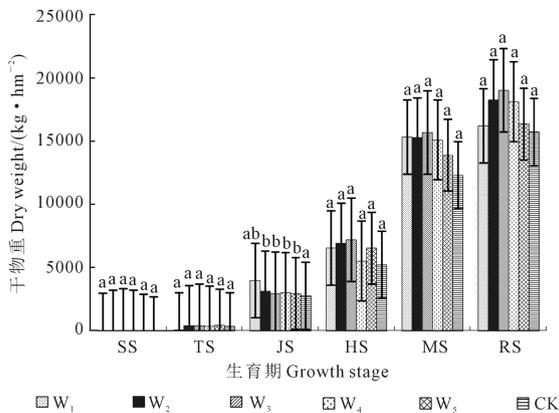


图 4 不同水分处理对春青稞干物质积累的影响

Fig.4 Effects of water treatment on weight of dry matter of spring highland barley

表 5 不同水分处理下春青稞产量及其构成因素

Table 5 Yield and components of spring highland barley under different water treatments

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield/ (kg · hm ⁻²)	百粒重 100-seed weight/g	穗长 Ear length/cm	穗粒数/粒 Grains per spike/kernel	单穗重 Panicle weight/g
W_1	4631.05±650.65bc	3.83 ±0.35a	7.04 ±3.15a	52.55±7.66a	2.49±0.19a
W_2	5112.03±1120.14abc	4.13±0.18a	5.94±0.43a	53.37±3.35a	3.01±0.33a
W_3	5961.27±1369.62ab	3.77±0.41a	5.98±0.73a	47.06±9.45a	2.56±0.28a
W_4	6237.05±174.46a	4.08±0.42a	6.13±0.63a	53.07±6.47a	2.99±0.18a
W_5	4541.44±579.96bc	3.98±0.19a	5.68±0.26a	52.53±0.70a	2.53±0.27a
CK	4064.27±476.76c	4.14±0.29a	5.80±0.29a	49.77±3.09a	2.44 ±0.52a

2.5 不同土壤水分下限调控灌溉对春青稞收获指数和水分利用效率的影响

作物收获指数是作物收获时籽粒产量与生物产量的比值,能反映出作物品种特性和栽培成效。不同水分处理下的春青稞水分利用效率和收获指数如表 6 所示。 W_1 、 W_2 处理下的水分利用效率较 CK 差异性极显著,而收获指数无差异。 W_2 较 W_1 提高了水分利用效率和收获指数,但增幅不明显。当土壤水分调控下限由 80%~85% θ_f 降至 45%~50% θ_f 时,水分利用效率和收获指数随水分调控下限的降低而表现出先升高后降低的变化趋势。其中,处理 W_4 的水分利用效率最高,为 1.15 kg · m⁻³, 较

粒重、穗长、穗粒数、单穗重较 CK 差异不显著,说明本试验中灌水量并非是影响春青稞产量构成的主导因素。处理 CK 的春青稞籽粒产量最低,为 4 064.27 kg · hm⁻²,其他处理的产量随着水分调控下限的变化而变化。其中, W_2 较 W_1 增产 10.39%,初步认为百粒重、穗粒数、单穗重增加是 W_2 产量提高的原因, W_1 、 W_2 的产量与 CK 相比差异不显著。

当土壤水分调控下限介于 45%~70% θ_f 之间时,春青稞籽粒产量随水分调控下限的降低表现出先增加后减少的趋势,且产量差异性由极显著向无差异变化,说明水分调控下限降至 70% θ_f 以下时,灌溉水量逐渐成为影响产量及其构成因素的主导因素之一^[22]。 W_3 、 W_4 、 W_5 分别较 CK 增产 46.68%、53.46%、11.74%,平均增产率为 37.29%。在 W_3 、 W_4 、 W_5 三种处理中, W_4 的百粒重、穗长、穗粒数、单穗重最高,且较 W_1 、 W_2 籽粒产量分别提高了 34.68%、22.01%,说明全生育期 55%~60% θ_f 水分调控下限并未给产量及其构成因素产生负面影响。但当水分调控下限降至 45%~50% θ_f 时,产量及其构成因素逐渐降低,这是由于土壤水分过度亏缺致使青稞生殖生长出现不可逆危害,从而影响了籽粒产量。

W_2 、 W_1 平均提高了 32.95%。综合试验数据表明,若灌水时期安排适当,较低的灌水量条件下水分利用效率也会大幅提高^[23]。

由表 6 可知,不同处理间的春青稞全生育期总灌水量差异不显著。当水分调控下限降至 75% θ_f 以下时,全生育期总灌水量逐渐降低,但降幅不明显。其中, W_5 的全生育期总灌水量最低,为 238.57 mm,较 W_1 降低了 47 mm。整体上, W_3 、 W_4 、 W_5 处理下的春青稞全生育期平均总灌水量为 248.46 mm,较 W_1 、 W_2 平均降低了 21 mm。试验表明,林芝河谷地区春青稞全生育期总灌水量约在 238~285 mm 之间,平均总灌水量为 256.7 mm。

表 6 不同水分处理条件下春青稞收获指数及水分利用效率

Table 6 Harvest index and water use efficiency of spring highland barley under different water treatments

处理 Treatment	水分利用效率 Water use efficiency /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	收获指数 Harvest index	全生育期总灌水量 Irrigation quantity of the whole growth period/mm
W ₁	0.82±0.16b	0.28±0.02bc	285.65±60.74a
W ₂	0.91±0.19b	0.30±0.01bc	252.33±25.18a
W ₃	1.09±0.24b	0.28±0.04bc	254.29±5.57a
W ₄	1.15±0.08b	0.40±0.02a	252.52±25.68a
W ₅	0.85±0.07b	0.22±0.05c	238.57±30.67a
CK	1.56±0.23a	0.34±0.09ab	-

3 讨 论

3.1 春青稞生长变化对土壤水分下限调控的响应

作物株高、叶片生长与土壤水分含量及生育阶段相关,适宜的土壤水分对作物正常生长及发育至关重要。作物对水分变化的长期自我调控,将影响植株高度、叶面积、茎粗等^[24]。本试验结果表明,不同水分调控下限对春青稞株高、叶面积形成均有影响,尤其对中后期的生长影响尤为显著。各灌水处理较雨养灌溉显著促进了春青稞株高的生长,其中抽穗期、乳熟期的株高较雨养灌溉平均提高了 37.28% 和 44.33%。当土壤水分胁迫下限由 65%~70% θ_f 降至 45%~50% θ_f 时,春青稞株高、叶面积未明显表现出随水分调控下限的降低而出现升高或减小的规律。时学双等^[18]研究认为全生育期水分胁迫处理下的春青稞株高较充分灌溉处理的低,然而本试验抽穗期水分胁迫处理 W₃、W₄、W₅ 株高反而大于充分灌水处理 W₁、W₂,并以 W₄ 处理最高(102.7 cm),且较 W₁、W₂ 分别提高了 11.56% 和 4.31%,说明抽穗期土壤水分含量过高并不利于试验区春青稞株高增长,同时也进一步证明了春青稞株高变化除受水分影响外,还与生育阶段有关。乳熟~成熟阶段,各处理株高均呈下降趋势,降幅以 CK 最大(18.49%)。其中,水分胁迫处理 W₄、W₅ 降幅较充分灌水处理 W₁、W₂ 小,说明 45%~60% θ_f 的灌水下限处理的春青稞在生长后期仍能保持较高的植株高度。

全生育期各处理的春青稞单株叶面积变化与株高类似,总体均呈现出先升高后降低的趋势,且峰值均出现在抽穗~乳熟阶段。然而,单株叶面积变化对不同水分处理的响应存在差异,W₁、W₂ 及

CK 的叶面积峰值出现在抽穗期,水分胁迫处理 W₃、W₄、W₅ 出现在乳熟期。在抽穗~乳熟阶段,W₁、W₂ 的单株叶面积显著降低,且叶面积相对增长率出现负值,为 $-0.20 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;而 W₃、W₄、W₅ 总体呈上升趋势,即叶片仍保持相对正增长,表明水分胁迫处理 W₃、W₄、W₅ 较充分灌水处理 W₁、W₂ 保持了较高的灌浆水平,光合同化作用较强,这与黄彩霞等^[25]研究结论一致;乳熟期所有处理的叶片均表现出衰减迹象,叶面积相对增长率呈显著负增长。总体上,生长后期 W₃、W₄、W₅ 处理的单株叶面积大于 W₁、W₂,表明水分胁迫在一定程度上能延缓叶片衰老,使春青稞叶面积在生长后期仍保持较高的水平,利于积累光合产物。

3.2 春青稞耗水变化对土壤水分下限调控的响应

作物生长与水密切相关,其耗水途径主要包括植株蒸腾、棵间蒸发。受作物种类、生长发育阶段、气候条件及农田水分状况等影响,不同作物或同一作物不同阶段的耗水规律存在差异。苗期春青稞株体小、地面覆盖度低,空气温度不高、降水少(图 1),故耗水量、耗水强度低;至拔节~抽穗阶段,春青稞株高、叶片生长活动旺盛,同时气温升高、叶片气孔开度大,加之降水增加,使春青稞蒸腾耗水增大;抽穗期后,春青稞生殖发育逐渐取代生长发育,其生长速率减缓,光合作用降低,进而蒸腾耗水减少;成熟期,降雨量急剧增加使土壤长期湿润,且空气温度升至生育期峰值,加之试验区土壤耕作层浅薄,致使土面蒸发强烈,进而引起春青稞耗水量及耗水强度再次升高,这是引起本试验春青稞全生育期耗水量、耗水强度总体均呈现“先升高后降低再回升”的变化趋势的主要原因。此外,田德龙等^[12]、徐冰^[13]也得出相似结论。

有研究认为,在作物及其种植方式、气候因素相同的条件下,灌水充分,则作物耗水量增加^[17]。本试验结果表明:与旱作相比,灌溉条件下春青稞耗水量及耗水强度受灌水量影响较大,即随着灌水量增大,作物耗水量增加。受阶段性干旱影响,土壤相对干燥,棵间蒸发强度减弱,土壤毛管传导度降低,致使雨养灌溉下春青稞根系吸水受阻^[26]。此外,干旱加速了叶片衰老,引起叶片持绿性下降及叶面捕光能力降低,且使气孔水分扩散阻力增加,导致光合速率^[11,27-28]减弱,进而降低了作物蒸腾耗水,使 CK 处理的春青稞生育期耗水量、耗水强度最

低,分别为 262.50 mm、2.26 mm·d⁻¹。W₁处理的春青稞生育期总耗水量最大,主要因为该处理较其他处理灌水频繁,田面时常湿润,受温度和太阳辐射影响,土壤无效蒸发相对增加,且该处理下的青稞株体较其他处理生长旺盛,致使作物耗水量及耗水强度增大。当土壤水分调控下限降至 65%~70% θ_f 以下时^[18],作物微观表现为水分胁迫抑制了细胞伸长;宏观表现为减缓了叶片伸展速率,致使叶片受光面积减小,光合势下降,影响叶片蒸腾强度。同时,水分胁迫降低了植株群体蒸腾面积^[22,29-31]。这些因素共同作用势必会引起 W₃、W₄、W₅ 处理下的春青稞耗水量较 W₁ 的低。本研究发现,春青稞全生育期耗水量、耗水强度均随水分调控下限的降低而降低,其中处理 W₅ 的耗水量、耗水强度最低。此外,不同生育期水分胁迫对春青稞生长及产量会产生影响,但就试验区春青稞生长对水分胁迫敏感的生育时期及其需水规律还需进一步研究。

3.3 春青稞干物质积累及产量对土壤水分下限调控的响应

有研究认为,水分是影响作物干物质积累的重要因子^[32]。宋霄君等^[33]研究表明,水分胁迫下春小麦收获期的营养器官干物重较大。张步翀^[34]研究得出,适度适期的水分胁迫利于春小麦地上干物质的积累。本研究结果表明,灌水处理较早作处理显著提高了春青稞干物质积累量。抽穗至成熟期, W₃ 处理下的春青稞干物质积累量始终最大,其干物质生长速率分别较充分灌水(W₁与 W₂的均值)处理及 CK 提高了 14.83% 和 35.53%。因全生育期土壤水分变化的累积效应影响,成熟期各处理的干物质积累量为 W₃>W₂>W₄>W₅>W₁>CK,表明水分胁迫处理的干物质积累量及积累速率随水分胁迫程度的加重而降低,这与张殿忠等^[35]研究结论一致。而李玉庆等^[36]利用青稞生长动力学模型模拟认为土壤水分胁迫下的春青稞干物质积累变化呈非线性,这可能与作物品种特性及生态条件的差异有关,而关于不同品种或不同生境下的春青稞干物质积累动态及其对水分胁迫的响应,需进一步定量研究。

适宜的水分调控下限能改善土壤水分生境,为青稞生长发育及产量形成创造良好的条件。本试验发现,CK 处理的春青稞籽粒产量最低,仅为 4 064.27 kg·hm⁻²;比较 W₁与 W₂,发现当灌水下限降至 75%~80% θ_f 时,全生育期耗水量、灌溉量分别

降低了 13.10 mm 和 33.32 mm,而春青稞籽粒产量显著增加,增幅为 10.39%。从产量构成角度分析,灌水下限由 80%~85% θ_f 降至 75%~80% θ_f 时,青稞穗长稍有缩短,但百粒重、穗粒数、单穗重均提高,这是处理 W₂ 籽粒产量提高的主要原因。

有研究表明,水分胁迫在一定程度上能增强作物的抗逆性^[37-39],诱发反冲机制,发挥增益作用,促进群体生长率和光合净同化率,增加籽粒干物质积累,从而提高作物籽粒产量^[30-31]。本试验研究表明,W₃、W₄、W₅ 较 CK 具有增产作用,且随着土壤水分下限的降低,籽粒产量、百粒重、穗长、穗粒数、单穗重均表现为先增加再降低的趋势,但只有籽粒产量差异性显著,说明灌水量是影响产量的主导因素之一,而非影响产量构成的唯一主导因素。此外,水分胁迫处理减少了春青稞全生育期耗水和灌水量(表 1、表 6)以及灌水次数,这进一步说明林芝河谷春青稞生产具有节水的潜力。其中,当土壤水分调控下限降至 55%~60% θ_f 时,春青稞籽粒产量最高,为 6 237.05 kg·hm⁻²,较 CK 增产 2 172.78 kg·hm⁻²,增产率达 53.46%,主要因为试材品种“喜马拉雅 22 号”抗逆性及耐旱性强^[40-44],水分胁迫下的气孔开度和光合速率能保持较高水平^[22],适当水分胁迫后及时复水能促进春青稞的生长发育,并增强作物的抗逆性^[18]及提高作物群体生长率和光合净同化率^[21],从而提高作物籽粒产量,说明作物补偿生长效应显著。当土壤水分调控下限降至 50% θ_f 以下时,春青稞产量及其构成因素受水分亏缺影响开始下降。

3.4 春青稞水分利用效率、收获指数对土壤水分下限调控的响应

青稞具有一定抗旱性和节水潜力,而水分利用效率更是具有较大的提升空间^[45]。研究发现,75%~80% θ_f 的水分调控下限较 80%~85% θ_f 水分调控下限,春青稞节水率和水分利用效率分别提高了 12%、11%。旱作处理下的春青稞收获指数和水分利用效率要比 80%~85% θ_f 、75%~80% θ_f 水分下限的高,但籽粒产量明显降低,减产率分别为 12.24% 和 20.50%,说明经济产量与水分利用效率不具有同步性,较高的产量往往需要消耗更多的水分,而干旱可获得较高的水分利用效率,但对产量提高不利。

当灌水下限的降低使春青稞生长因缺水而受不同程度的胁迫时,水分利用效率和收获指数均随

土壤水分调控下限的降低表现出先升高后降低的变化特征。其中,当土壤水分调控下限降至 $55\% \sim 60\% \theta_f$ 时,春青稞水分利用效率和作物收获指数分别为 $1.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 0.40 ,明显高于灌水下限为 $75\% \sim 85\% \theta_f$ 时的 $0.82 \sim 0.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.28 \sim 0.30$;当土壤水分调控下限降至 $50\% \theta_f$ 以下时,春青稞收获指数显著降低,但水分利用效率降幅不明显。

本研究中,土壤水分调控水平的变化对春青稞全生育期总灌水量和耗水量影响不显著,但水分利用效率对水分调控下限的响应表现出一定的规律性:即随土壤水分调控下限的降低,水分利用效率先缓慢升高后逐渐降低,主要因为在耗水量差异不显著的情况下,春青稞籽粒产量随土壤水分调控下限的降低而逐渐上升,至 $55\% \sim 60\% \theta_f$ 水分调控下限时达到最大,此后又随着水分调控下限的降低而降低。而时学双等^[18]在日喀则地区研究发现同样的水分胁迫水平在重度水分胁迫向极度水分胁迫变化时,水分利用效率下降。综上认为,处理 W_4 在较少的灌溉水量下,春青稞籽粒产量和水分利用效率最优。从节水增产的角度出发,基于本试验环境下林芝河谷地区春青稞稳产或增产的亏缺灌溉下限不应低于 $55\% \sim 60\% \theta_f$ 。

4 结 论

本研究以林芝河谷春青稞为研究对象,主要探究了高原生境下全生育期不同土壤水分调控下限对春青稞生长、耗水及产量的影响,主要结论如下:

1) 全生育期土壤水分调控灌溉对林芝河谷春青稞中后期的株高、叶面积影响显著。抽穗期水分胁迫处理的株高大于充分灌水处理,以处理 W_4 最大,为 102.7 cm 。乳熟期春青稞单株叶面积随灌水下限的降低而逐渐增大,即水分胁迫延缓了叶面积衰减速率。

2) 春青稞生育期总耗水量随土壤水分调控下限的降低直线下降,耗水强度在 $5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右浮动。与 W_1 、 W_2 处理相比, W_3 、 W_4 、 W_5 处理降低了春青稞耗水量和耗水强度。

3) 成熟期各处理的春青稞干物质积累量排序为: $W_3 > W_2 > W_4 > W_5 > W_1 > \text{CK}$,表明水分胁迫条件下的干物质积累量随水分胁迫程度的加重而减少。水分利用效率和收获指数均随土壤水分调控下限的降低而先升高后降低。综合发现, $55\% \sim 60\% \theta_f$ 的水分调控下限能在较小的灌水量下获得最大的产

量($6\,237.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和较高的水分利用效率($1.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。基于此,本试验条件下林芝河谷春青稞全生育期土壤水分调控下限为 $55\% \sim 60\% \theta_f$ 时节水增产效益显著。

参 考 文 献:

- [1] 谭海运.西藏青稞产业发展现状及优化对策阐述[J].农业与技术,2019,39(5):23-24.
- [2] 单增卓玛.青稞高产栽培技术及其推广措施[J].河南农业,2019(5):25-26.
- [3] 刘小娇,王姗姗,白婷,等.青稞营养及其制品研究进展[J].粮食与食品工业,2019,26(1):43-47.
- [4] 陈玉芬.青稞栽培技术要点[J].吉林农业,2019(3):41.
- [5] 包雪梅,谢惠春.青稞主要成分及其应用的研究进展[J].现代食品,2019(2):43-47.
- [6] 白婷,靳玉龙,朱明霞,等.海拔差异对青稞品质影响的研究[J].中国粮油学报,2019,34(2):34-39.
- [7] 朱明霞,白婷,强小林,等.青藏高原区域青稞品种区域适应性研究[J].作物杂志,2018(6):43-47.
- [8] 顿珠.林芝市提高青稞产量面临的困难及对策[J].乡村科技,2018,(30):46-47.
- [9] 徐冰,汤鹏程,田德龙,等.西藏典型地区燕麦、饲草青稞需耗水规律与灌溉制度[M].北京:科学出版社,2018.
- [10] 卓嘎,次仁央金,韦泽秀,等.西藏林芝高产春青稞品种冠层形态结构特性分析[J].中国农业大学学报,2017,22(6):21-31.
- [11] 侯维海,王建林,胡单,等.花后干旱对西藏青稞叶片水势、光合生理、籽粒表型和产量的影响[J].中国农业科学,2018,51(14):2675-2688.
- [12] 田德龙,徐冰,郭克贞,等.西藏高寒牧区(燕麦、青稞)作物-水模型确定[J].中国农村水利水电,2012,(7):9-12.
- [13] 徐冰.西藏典型地区燕麦、饲草青稞需耗水规律与灌溉制度[M].北京:科学出版社,2018.
- [14] 罗红英,崔远来,赵树君.西藏青稞灌溉定额的空间分布规律[J].农业工程学报,2013,29(10):116-122.
- [15] 罗红英,崔远来.西藏主要农区青稞作物系数的计算分析[J].灌溉排水学报,2014,33(1):116-119.
- [16] 张娜,金建新,佟长福,等.西藏参考作物蒸散量时空变化特征与影响因素[J].干旱区研究,2017,34(5):1027-1034.
- [17] 尹志芳,欧阳华,张宪州.西藏地区春青稞耗水特征及适宜灌溉制度探讨[J].自然资源学报,2010,25(10):1666-1675.
- [18] 时学双,李法虎,闫宝莹,等.不同生育期水分亏缺对春青稞水分利用和产量的影响[J].农业机械学报,2015,46(10):144-151,265.
- [19] Piotr Ogradowicz, Tadeusz Adamski, Krzysztof Mikołajczak, et al. QTLs for earliness and yield-forming traits in the LubuskiCamB barley RIL population under various water regimes[J]. Journal of Applied Genetics,2017,58(1):49-65.
- [20] Calvo O C, Franzaring J, Schmid I, et al. Atmospheric CO₂ enrichment and drought stress modify root exudation of barley[J]. Global Change Biology,2017,23(3):1292-1304.
- [21] 时学双.高海拔寒区春青稞水分高效利用研究[D].北京:中国农业大学,2015.
- [22] 侯亚红,强小林.水分胁迫对西藏不同类型青稞品种光合特性及产量的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(9):83-87.

- [23] 申孝军,孙景生,张奇阳,等.水分调控对麦茬棉产量和水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2014,45(6):150-160.
- [24] 张雨新,张富仓,邹海洋,等.生育期水分调控对河西地区滴灌春小麦生长和水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):171-177.
- [25] 黄彩霞,张恒嘉.不同灌水量对绿洲玉米叶面积动态及产量的影响[J].水资源与水工程学报,2016,27(4):229-232,240.
- [26] Doorenbos J, Pruitl W. Crop Water Requirements[M]. 2nd ed.Rome: FAO, 1977.
- [27] Lang Ying, Wang Ming, Xia Jiangbao, et al. Effects of soil drought stress on photosynthetic gas exchange traits and chlorophyll fluorescence in Forsythia suspense [J]. Journal of Forestry Research,2017(4):1-9.
- [28] Shanmugas S, Kjaer K H, Ottosen C O, et al.The alleviating effect of elevated CO₂ on heat stress susceptibility of two wheat (*Triticum aestivum* L) cultivars [J]. Journal of Agronomy and Science,2013,199(5):340-350.
- [29] 谢永春,侯亚红,李雪.水分胁迫对西藏青稞生育性状及产量的影响[J].西藏农业科技,2017,39(2):28-31.
- [30] 李彪,孟兆江,申孝军,等.隔沟调亏灌溉对冬小麦-夏玉米光合特性和产量的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(11):8-14.
- [31] 高阳,申孝军,杨林林,等.不同水氮处理对玉米-大豆间作群体内作物光能截获、竞争和利用的影响[J].生态学报,2015,35(3):815-822.
- [32] 闫永奎,郝卫平,梅旭荣,等.拔节期水分胁迫-复水对冬小麦干物质积累和水分利用效率的影响[J].中国农业气象,2011,32(2):190.
- [33] 宋霄君,张敏,李秉昌,等.干旱胁迫对小麦营养器官物质转运和籽粒灌浆特性的影响[J].中国农学通报,2016,32(15):25-31.
- [34] 张步翀.河西绿洲灌区春小麦调亏灌溉试验研究[J].中国生态农业学报,2008,16(1):35-40.
- [35] 张殿忠,汪沛洪,席连喜.干物质累积和脯氨酸累积的水势闭值与小麦抗旱性的关系[J].干旱地区农业研究,1990,8(2):66-71.
- [36] 李玉庆,蒙强,刘静霞,等.多因子胁迫下的青藏高原青稞生长动力学模拟[J].灌溉排水学报,2019,38(2):1-8.
- [37] 王景燕,龚伟,李伦刚,等.水肥对汉源花椒幼苗抗逆生理的影响[J].西北植物学报,2015,35(3):530-539.
- [38] 高玉红,闫生辉,邓黎黎.逆境胁迫对甜瓜幼苗生长的影响及综合抗逆鉴定指标的筛选[J].江苏农业科学,2018,46(15):116-118.
- [39] 罗永忠,李广,闫丽娟,等.水分胁迫下新疆大叶苜蓿水分代谢指标变化及相互关系研究[J].草地学报,2016,24(5):981-987.
- [40] 何东.“喜马拉雅 22 号”种植技术要点[J].西藏农业科技,2018,40(4):40-42.
- [41] 李萍.西藏青稞优良新品种推广模式研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [42] 闫宝莹,杨晓初,扎西次仁,等.春青稞喜马拉雅 22 号选育与推广应用[J].西藏农业科技,2017,39(4):31-32.
- [43] 普布顿珠.广适春青稞品种喜马拉雅 22 号优质高产栽培技术[J].农业科技通讯,2016(9):212-213.
- [44] 普布顿珠,刘磊.春青稞“喜马拉雅 22 号”高产栽培技术[J].西藏科技,2016(4):6-7.
- [45] 时学双,李法虎,闫宝莹,等.秸秆覆盖条件下水分亏缺对春青稞水分利用和产量的影响[J].农业工程学报,2016,32(S1):105-111.

(上接第 154 页)

- [23] Pasda G, Hahndel R, Zerulla W. The new nitrification inhibitor Dmpp (Entec[®])-effects on yield and quality of agricultural and horticultural crops[C]//Horst W J. Plant Nutrition. Netherlands: Springer,2001.
- [24] 杜学初,谭德水,江丽华,等.缓/控释氮肥对主要粮食作物及环境影响研究进展[J].农学学报,2014,4(6):27-31.
- [25] 常凤,王海标,陶静静,等.减氮配施控释尿素对冬小麦产量及氮肥效率的影响[J].中国农学通报,2018,34(25):1-6.
- [26] 孙云保,张民,郑文魁,等.控释氮肥对小麦-玉米轮作产量和土壤养分状况的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):115-121.
- [27] 汪强,李双凌,韩燕来,等.缓/控释肥对小麦增产与提高氮肥利用率的效果研究[J].土壤通报,2007,38(1):47-50.
- [28] Trinh T H, Kussaari K, Shuib A S, et al. Modeling the release of nitrogen from controlled release fertilizer; constant and decay release. Biosystems Engineering, 2015, 130:34-42.
- [29] 卢艳丽,自由路,王磊,等.华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):209-215.
- [30] Ji Y, Liu G, Ma J, et al. Effect of controlled-release fertilizer on nitrous oxide emission from a winter wheat field[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2012,94(1):111-122.
- [31] Wang Y Y, Hu C S, Ming H, et al. Methane, carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in soil profile under a winter wheat-summer maize rotation in the North China plain[J]. Plos One,2014,9(6):e98445.
- [32] Liang B C, Mackenzie A F. Changes of soil nitrate-nitrogen and denitrification as affected by nitrogen fertilizer on two Quebec soils[J]. Journal of Environmental Quality,1994,23(3):521-525.