

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.019

不同生育期水分亏缺对春青稞水分利用和产量的影响*

时学双^{1,2} 李法虎¹ 闫宝莹³ 何东³ 普布多吉³ 曲珍³

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 西藏拉孜县水利水电局, 拉孜 858100;

3. 西藏自治区日喀则地区农业科学研究所, 日喀则 857000)

摘要: 对不同生育期水分亏缺程度对春青稞 (*Hordeum vulgare*) 水分利用效率和产量的影响进行了桶栽试验研究。试验处理设充分灌溉处理(2个水分控制下限和秸秆覆盖)以及在全生育期和5个不同生育期的4个水分亏缺程度(轻度、中度、重度和极度)处理,共27个处理。结果表明,在充分灌溉条件下,75%田间持水率水分下限控制处理的春青稞收获指数、籽粒产量和作物水分利用效率大于80%水分处理;秸秆覆盖处理的籽粒产量和水分利用效率在所有试验处理中最大。在全生育期水分亏缺条件下,春青稞籽粒产量均小于充分灌溉处理,且随着水分亏缺程度的增大而显著减小;轻度至重度水分亏缺处理可获得更大的作物收获指数和水分利用效率,但极度水分亏缺却导致最低的籽粒产量、收获指数和水分利用效率。除成熟期水分亏缺处理外,不同生育期水分亏缺处理条件下,春青稞籽粒产量和作物水分利用效率基本随着水分亏缺程度的增大而减小;拔节期、分蘖期和灌浆期水分亏缺对籽粒产量的不利影响较大。地表秸秆覆盖或全生育期轻度至重度水分亏缺处理可提高春青稞水分利用效率。

关键词: 春青稞 作物耗水量 水分亏缺程度 作物产量 作物水分利用效率

中图分类号: S274.1; S512.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0144-08

Effects of Water Deficit at Different Growth Stages on Water Use and Yield of Spring Highland Barley

Shi Xueshuang^{1,2} Li Fahu¹ Yan Baoying³ He Dong³ Pubu Duoji³ Qu Zhen³

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Lazi Water Authority, Tibet Autonomous Region, Lazi 858100, China

3. Institute of Agricultural Sciences of Rikaze District, Tibet Autonomous Region, Rikaze 857000, China)

Abstract: Highland barley is the main food crop in high altitude cold region of Tibet. Effects of water deficit levels at different growth stages on the water use efficiency and yield of spring highland barley (*Hordeum vulgare*) were studied by barrel cultivated experiments. Experimental treatments included full irrigation treatment (two controlled lower limits on soil moisture content and straw mulching) as well as four water deficit levels (mild, moderate, severe and extreme deficits) in the whole growth period and five different growth stages, respectively, and the total treatments were 27. Experimental results showed that the harvest index, grain yield and water use efficiency of spring highland barley in the treatment with the water controlled lower limit of 75% of field capacity (FC) were greater than those of 80% FC treatment, and straw mulching treatment resulted in the largest grain yield and crop water use efficiency in all experimental treatments under full irrigation condition. Under the condition of various water deficit levels in the whole growth period, the grain yield of spring highland barley was smaller than that of full irrigation treatment, and it was decreased significantly with the increase of water deficit level. Water deficit from mild to severe levels obtained larger harvest index and crop water use efficiency, but extreme

收稿日期: 2014-12-30 修回日期: 2015-02-11

* 公益性行业(农业)科研专项资助项目(201203077-03-04)

作者简介: 时学双, 博士生, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: 645278900@qq.com

通讯作者: 李法虎, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: lifahu@cau.edu.cn

deficiency on water supply resulted in the lowest grain yield, harvest index and crop water use efficiency under various water deficit treatments in the whole growth period. The grain yield and crop water use efficiency under water deficit treatments at different growth stages of spring highland barley were basically decreased with the increase of water deficit level except the treatment with water deficit at ripening stage, and the effect of water deficit at jointing, tillering and filling stages on grain yield was greater than that at other growth stages. Straw mulching or water deficit with mild to severe levels in the whole growth period of spring highland barley can improve crop water use efficiency, and their effects in practice are deserved to be paid more attentions.

Key words: Spring highland barley Crop water consumption Water deficit level Crop yield Crop water use efficiency

引言

青稞 (*Hordeum vulgare*) 系禾本科大麦属一年生或越年生草本植物, 是西藏高海拔寒区的主要粮食作物^[1]。日喀则地区位于“一江两河”(雅鲁藏布江、拉萨河和年楚河)流域, 是西藏自治区的主要粮食产区和商品粮基地, 其粮食产量约占西藏自治区的 40%^[2-3], 青稞播种面积占该地区粮食种植面积的 69.3%^[3]。日喀则地区光热资源充足, 具有很高的青稞理论生产潜力 (14 280 kg/hm²) 和高产纪录 (12 028.5 kg/hm²)^[4-5]。该地区多年平均降水量和蒸发量分别为 431.2、2 353.2 mm^[5-6]。在 4—6 月份春青稞播种期以及苗期, 其降水量分别为 1.9、14.7、70.5 mm, 5、6 月份以及 7、8 月份出现旱灾的频率分别为 41.0% 和 36.0%^[7]。占西藏自治区总耕地面积 80% 的“一江两河”地区, 其低产田面积占总耕地面积的 71.3%^[8], 农田干旱是其主要成因之一^[9]。农田灌溉是提高作物产量、保障西藏地区粮食自给自足的重要措施。

平均气温、日最高和日最低气温对青藏高原参考作物蒸发蒸腾量 (ET_c) 的影响最大^[10]。而 Garcia 等认为影响高海拔地区 ET_c 的主要因素是太阳辐射、空气湿度、气温和风速, FAO 推荐的 Penman - Monteith 公式在 3 000 m 以上高海拔地区低估了 30% 的 ET_c^[11]。根据 SHAW (Simultaneous heat and water) 模型, 尹志芳等认为春青稞耗水量为 450 mm^[12]。日喀则地区春青稞最大实际蒸发蒸腾量约 6.9 mm/d^[12], 全生育期需水量 428.5 mm^[13]; 春青稞从苗期到拔节期共缺水 105 mm^[14], 灌溉定额为 578 mm^[15]。罗红英等认为灌溉定额随海拔高度的增加而增大, 日喀则地区青稞灌溉定额为 200 ~ 350 mm^[16]。根据大田调查, 春青稞灌溉定额为 337 ~ 375 mm^[17] 或 450 ~ 540 mm^[18]。这些研究结论主要根据气象资料计算得到^[12-16] 或为当地灌溉农田调查的经验性总结^[17-18], 缺乏坚实的试验数据

支撑, 且仅考虑充分灌溉条件。田德龙等认为青稞对水分敏感程度的生育期顺序为分蘖-拔节、拔节-抽穗、抽穗-刈割和出苗-分蘖期^[19], 但对试验条件和青稞品种并未明确报道。

西藏高海拔温带半干旱寒区生态环境脆弱, 发展节水农业对保护当地环境、维持区域粮食安全与社会稳定尤其重要。虽然国内外对低海拔地区农作物的节水灌溉机理及其非充分灌溉制度进行了较充分的研究, 但不同作物和品种以及地区气候条件对作物水分亏缺的反应存在明显的差异^[20-21]。由于高海拔寒区独特的气候条件和地理位置, 目前国内外对其主要农作物春青稞耗水规律以及春青稞产量对水分亏缺程度的反应尚缺乏足够的试验数据支撑和充分了解, 适宜的春青稞 (充分) 灌溉制度尚未建立^[11, 16], 而对春青稞非充分灌溉制度的研究更是鲜见报道。本文针对春青稞对不同生育期水分亏缺的反应进行试验研究, 旨在了解和掌握不同生育期水分亏缺程度对春青稞生长、籽粒产量以及作物水分利用效率的影响, 为在高海拔寒区建立合理的春青稞节水灌溉制度提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验在日喀则地区农业科学研究所灌溉试验站 (88°53'E, 29°15'N, 海拔高度 3 836 m) 进行。灌溉试验站多年平均气温为 6.3℃, 无霜期 103 d, 日照时数 3 200 h, 全年太阳总辐射为 7 796.2 MJ/m²。供试土壤取自灌溉试验站农田表层 0 ~ 20 cm, 土壤质地为粉砂壤土, 土壤全氮、全磷和全钾质量比分别为 0.76、1.54、18.15 g/kg, 水解性氮、有效磷和速效钾质量比分别为 49、30、92 mg/kg, 有机质质量比为 25.05 g/kg。土壤经自然风干、过 5 mm 筛后备用。试验在上口内径 29 cm、桶底内径 24 cm、高 65 cm 的桶内进行。在桶底均匀打孔以提供良好的通气条

件。将风干土壤按容重 1.35 g/cm^3 分层均匀装入测桶中。每桶施磷酸二氢铵($\text{N}、\text{P}_2\text{O}_5$ 质量分数分别为18%、46%) 4 g (约 600 kg/hm^2)、尿素(N 质量分数46%) 4 g (约 600 kg/hm^2) 作为底肥。按当地生产习惯,全生育期内未追肥。土壤田间持水率为18.4% (质量含水率)。将桶内土壤提前灌水至田间持水率,待蒸发至适宜含水率后疏松表层土壤,然后播种。供试春青稞品种为03014号。春青稞于2014年5月11日播种,于二叶时每桶定苗10株。2014年9月15日收获,持续时间127 d。

1.2 试验设计

试验处理设充分灌溉处理(对照)、充分灌溉条件下的秸秆覆盖处理、全生育期以及5个不同生育期即苗期、分蘖期、拔节期、灌浆期和成熟期的4个水分亏缺程度处理,共27个处理(表1)。充分灌溉处理的土壤含水率下限在春青稞全生育期内分别控制为田间持水率的80%~85%和75%~80%,秸秆覆盖处理的土壤含水率下限控制为田间持水率的75%~80%。地表秸秆覆盖采用2~3 cm的碎青稞秸秆,每桶覆盖量为 0.05 kg (约 7570 kg/hm^2)。4个水分亏缺程度处理的土壤含水率下限依次为田间持水率的65%~70% (轻度亏缺)、55%~60% (中度亏缺)、45%~50% (重度亏缺)和35%~40% (极度亏缺)。在全生育期水分亏缺处理中,土壤含水率下限在不同生育期内均保持相同;在不同生育期水分亏缺处理中,除指定的作物生育期内实施水分控制外,其他生育期的土壤含水率下限均为田间持水率的75%~80%。每个试验处理3次重复。采用称量法监控土壤水分。每2 d定时(17:00)用电子台秤称桶质量(精度1 g),计算土壤含水率。当土壤含水率降至设定的土壤含水率控制下限时进行灌水。根据土壤含水率的控制上限即土壤田间持水率,计算每次所需的灌水量,用量筒量取。降雨时采用遮雨棚遮盖。

1.3 测定项目与数据处理

在试验过程中,记录每次灌水量。在春青稞不同生育期,每处理选10株测定其株高和叶面积等生长特征值。在春青稞收获时,每个重复试验测定5株春青稞的穗长、不孕穗数、有效穗数、穗粒数以及千粒质量、地上干物质质量和籽粒产量。每个重复试验单打单收。

各处理平均值之间的差异显著性采用SPSS 16.0软件进行单因素方差分析。当ANOVA的 F 值统计显著时,采用LSD检验法区分其平均值($P < 0.05$)。

表1 土壤水分处理

Tab.1 Experimental treatment of soil moisture content

处理	生育阶段	土壤含水率
		下限/%
充分灌溉	80%控制(CK1)	80~85
	75%控制(CK2)	75~80
	75%+覆盖(JG)	75~80
全生育期水分亏缺	轻度亏缺(Q1)	65~70
	中度亏缺(Q2)	55~60
	重度亏缺(Q3)	45~50
	极度亏缺(Q4)	35~40
苗期水分亏缺	轻度亏缺(M1)	65~70
	中度亏缺(M2)	55~60
	重度亏缺(M3)	45~50
	极度亏缺(M4)	35~40
分蘖期水分亏缺	轻度亏缺(F1)	65~70
	中度亏缺(F2)	55~60
	重度亏缺(F3)	45~50
	极度亏缺(F4)	35~40
拔节期水分亏缺	轻度亏缺(B1)	65~70
	中度亏缺(B2)	55~60
	重度亏缺(B3)	45~50
	极度亏缺(B4)	35~40
灌浆期水分亏缺	轻度亏缺(G1)	65~70
	中度亏缺(G2)	55~60
	重度亏缺(G3)	45~50
	极度亏缺(G4)	35~40
成熟期水分亏缺	轻度亏缺(C1)	65~70
	中度亏缺(C2)	55~60
	重度亏缺(C3)	45~50
	极度亏缺(C4)	35~40

注:以田间持水率百分比表示土壤含水率下限控制范围。除控制生育期外,其他生育期均采用土壤含水率下限为75%~80%。

2 结果与讨论

2.1 耗水量

在整个生育期内,春青稞日耗水强度随着生长时间的增加而逐渐增大(表2)。日耗水强度一般在拔节后期至灌浆初期(出苗后75~100 d)达到最大,而后以较快的速度减小。

在充分灌溉处理条件下,80%水分控制的春青稞在各生育期以及全生育期内的耗水量显著大于75%水分控制的无覆盖处理以及秸秆覆盖处理,而地表秸秆覆盖处理的耗水量小于无覆盖处理(表2)。在地表无覆盖处理时,75%水分控制的春青稞在整个生长期内的耗水量比80%水分控制处理降低了13.0%,而秸秆覆盖处理比未覆盖处理降低了4.2%。由于拔节期和灌浆期较高的日耗水强度和较长的生育期(分别为38、28 d),这两个生育期的耗水量占春青稞整个生长期内总耗水量的72.6%,这一结果与尹志芳等^[12]的结论一致。

表 2 不同水分亏缺处理条件下各生育期以及全生育期的春青稞耗水量

Tab.2 Water consumption amounts at various growth stages and the whole growth period of spring highland barley under different water deficit level treatments

L/桶

处理		苗期 (05-20— 06-11)	分蘖期 (06-12— 06-23)	拔节期 (06-24— 07-31)	灌浆期 (08-01— 08-28)	成熟期 (08-29— 09-15)	全生育期 (05-20— 09-15)
充分灌溉	CK1	5.7 ± 0.2 ^a	6.7 ± 0.1 ^a	28.4 ± 0.1 ^a	24.2 ± 1.2 ^a	8.0 ± 0.4 ^a	73.1 ± 1.5 ^a
	CK2	4.8 ± 0.1 ^b	5.8 ± 0.1 ^b	22.9 ± 1.1 ^b	22.4 ± 0.8 ^a	7.7 ± 0.4 ^{ab}	63.6 ± 2.3 ^b
	JG	4.0 ± 0.1 ^c	4.4 ± 0.3 ^c	22.7 ± 1.7 ^b	22.6 ± 1.6 ^a	7.1 ± 0.4 ^b	60.9 ± 3.2 ^b
全生育期水分亏缺	Q1	4.2 ± 0.1 ^a	4.4 ± 0.3 ^a	20.0 ± 0.4 ^a	23.3 ± 0.7 ^a	9.8 ± 0.3 ^a	61.7 ± 1.6 ^a
	Q2	2.9 ± 0.3 ^b	3.7 ± 0.1 ^b	14.5 ± 0.3 ^b	18.3 ± 0.1 ^b	7.8 ± 0.3 ^b	47.2 ± 0.3 ^b
	Q3	2.4 ± 0.3 ^c	2.9 ± 0.2 ^c	10.5 ± 1.2 ^c	14.9 ± 1.6 ^c	7.1 ± 0.5 ^b	37.8 ± 3.6 ^c
	Q4	1.8 ± 0.1 ^d	2.2 ± 0.1 ^d	7.3 ± 0.4 ^d	9.8 ± 1.1 ^d	5.4 ± 1.0 ^c	26.5 ± 2.1 ^d
苗期水分亏缺	M1	3.3 ± 0.2 ^a	5.2 ± 0.1 ^a	21.9 ± 0.5 ^a	25.2 ± 0.5 ^a	9.2 ± 0.5 ^a	64.7 ± 0.4 ^a
	M2	2.9 ± 0.1 ^b	5.2 ± 0.1 ^a	20.6 ± 0.5 ^b	23.9 ± 0.5 ^{ab}	8.0 ± 0.3 ^a	60.6 ± 1.3 ^b
	M3	2.0 ± 0.3 ^c	5.2 ± 0.1 ^a	19.6 ± 0.4 ^c	23.0 ± 1.0 ^b	8.8 ± 0.4 ^a	58.6 ± 1.6 ^b
	M4	1.6 ± 0.1 ^d	5.2 ± 0.1 ^a	20.7 ± 0.6 ^b	21.8 ± 1.5 ^{bc}	8.8 ± 1.4 ^a	58.1 ± 3.5 ^b
分蘖期水分亏缺	F1	4.0 ± 0.2 ^a	4.5 ± 0.1 ^a	22.0 ± 0.8 ^a	20.0 ± 1.3 ^a	5.8 ± 1.7 ^a	56.3 ± 2.9 ^a
	F2	4.2 ± 0.4 ^a	3.7 ± 0.5 ^b	21.2 ± 0.8 ^a	20.6 ± 1.6 ^a	6.4 ± 1.5 ^a	56.1 ± 4.3 ^a
	F3	4.1 ± 0.1 ^a	3.2 ± 0.1 ^b	20.9 ± 1.1 ^a	21.2 ± 2.1 ^a	8.4 ± 0.6 ^a	57.8 ± 2.7 ^a
	F4	4.1 ± 0.1 ^a	2.5 ± 0.1 ^c	21.9 ± 0.8 ^a	21.6 ± 3.1 ^a	8.1 ± 1.8 ^a	58.2 ± 5.4 ^a
拔节期水分亏缺	B1	4.1 ± 0.1 ^a	5.7 ± 0.1 ^a	19.6 ± 0.7 ^a	20.7 ± 2.6 ^a	8.3 ± 1.8 ^a	58.5 ± 4.3 ^a
	B2	4.2 ± 0.1 ^a	5.7 ± 0.2 ^a	16.2 ± 0.7 ^b	16.4 ± 2.3 ^b	6.2 ± 0.7 ^a	48.8 ± 3.9 ^b
	B3	4.1 ± 0.1 ^a	5.7 ± 0.1 ^a	13.0 ± 1.2 ^c	16.9 ± 1.1 ^b	7.4 ± 2.4 ^a	47.1 ± 3.2 ^b
	B4	4.0 ± 0.1 ^a	5.6 ± 0.1 ^a	10.7 ± 0.3 ^d	15.2 ± 1.1 ^b	8.4 ± 0.6 ^a	43.8 ± 1.2 ^b
灌浆期水分亏缺	G1	4.1 ± 0.2 ^a	6.0 ± 0.2 ^a	22.7 ± 0.8 ^a	20.5 ± 1.5 ^a	6.5 ± 1.2 ^a	59.8 ± 2.8 ^a
	G2	4.0 ± 0.1 ^a	5.8 ± 0.1 ^a	20.9 ± 1.2 ^b	16.0 ± 2.0 ^b	5.8 ± 0.7 ^a	52.5 ± 3.3 ^b
	G3	4.1 ± 0.1 ^a	5.7 ± 0.1 ^a	20.9 ± 0.3 ^b	14.5 ± 0.6 ^{bc}	5.5 ± 0.7 ^a	50.7 ± 1.0 ^b
	G4	3.9 ± 0.1 ^a	5.7 ± 0.2 ^a	22.2 ± 0.2 ^{ab}	13.2 ± 0.5 ^c	5.1 ± 1.1 ^a	50.2 ± 1.2 ^b
成熟期水分亏缺	C1	4.1 ± 0.1 ^a	5.8 ± 0.2 ^a	21.8 ± 1.1 ^a	18.9 ± 5.1 ^a	5.6 ± 1.9 ^a	56.2 ± 8.1 ^a
	C2	4.1 ± 0.2 ^a	5.7 ± 0.1 ^a	20.8 ± 0.5 ^{ab}	20.1 ± 2.6 ^a	6.9 ± 1.1 ^a	57.6 ± 4.0 ^a
	C3	4.0 ± 0.1 ^a	5.6 ± 0.1 ^a	21.8 ± 0.1 ^a	21.5 ± 1.1 ^a	6.8 ± 0.4 ^a	59.8 ± 1.3 ^a
	C4	4.1 ± 0.1 ^a	5.6 ± 0.2 ^a	22.6 ± 0.2 ^{ac}	22.6 ± 1.3 ^a	5.7 ± 0.1 ^a	60.6 ± 0.9 ^a

注:数据为平均值 ± 标准偏差;同一列中不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

在全生育期水分亏缺处理条件下,春青稞在各生育期以及全生育期内的耗水量均小于充分灌溉处理,且各生育期以及全生育期耗水量随着土壤水分亏缺程度的增加而显著减小(表 2)。在轻度、中度、重度和极度水分亏缺时,春青稞全生育期耗水量分别比充分灌溉处理(CK1 和 CK2 平均)降低了 9.7%、30.9%、44.7% 和 61.2%。

在不同生育期水分亏缺处理条件下,除苗期水分亏缺处理导致灌浆期和成熟期较大的耗水量外,其他生育期的水分亏缺处理均导致本生育期和后续生育期的耗水量低于充分灌溉处理(表 2)。苗期水分亏缺处理增大了灌浆期和成熟期的耗水量,表明苗期水分亏缺对春青稞后期生长发育具有积极的影响。在苗期、分蘖期、拔节期、灌浆期和成熟期水分亏缺处理的春青稞,其全生育期的耗水量分别比充分灌溉处理(CK1 和 CK2 平均)降低了 5.3% ~

15.0%、14.9% ~ 19.9%、14.4% ~ 35.8%、12.5% ~ 26.5% 和 11.3% ~ 17.7%。除成熟期外,春青稞在不同生育期以及全生育期内的耗水量均随着土壤水分亏缺程度的增大而显著减小(表 2)。

2.2 株高和产量

穗长、穗粒数和千粒质量是春青稞产量的重要构成因子。不同水分亏缺处理对春青稞株高和产量构成因子的影响见表 3。在充分灌溉处理条件下,75% 水分处理的春青稞株高大于 80% 水分处理以及秸秆覆盖处理,但 3 个处理的产量构成因子穗长、穗粒数和千粒质量无显著差异(表 3)。

全生育期水分亏缺处理条件下春青稞株高以及穗长、穗粒数和千粒质量基本上均小于充分灌溉处理(表 3)。其中,轻度、中度、重度和极度水分亏缺处理时的春青稞穗粒数和千粒质量分别比充分灌溉处理(CK1 和 CK2 平均)减小了 11.9%、11.9%、

表3 不同水分亏缺处理对春青稞株高和产量构成因子的影响

Tab.3 Effects of water deficit levels at various growth stages on plant height and yield components of spring highland barley

处理		株高/cm	穗长/cm	穗粒数/粒	千粒质量/g
充分灌溉	CK1	79.9 ± 6.8 ^a	6.3 ± 1.4 ^a	68.7 ± 8.9 ^a	57.4 ± 0.3 ^a
	CK2	83.7 ± 8.2 ^{ab}	6.3 ± 1.4 ^a	64.4 ± 5.2 ^a	56.8 ± 0.5 ^a
	JG	74.8 ± 7.2 ^{ac}	6.4 ± 1.3 ^a	69.0 ± 4.5 ^a	56.9 ± 0.1 ^a
全生育期水分亏缺	Q1	68.9 ± 4.7 ^a	6.1 ± 1.6 ^{ab}	58.6 ± 5.8 ^a	57.6 ± 0.3 ^a
	Q2	71.4 ± 7.8 ^a	6.2 ± 1.3 ^a	58.6 ± 6.7 ^a	54.1 ± 1.5 ^b
	Q3	63.5 ± 4.9 ^b	5.7 ± 1.0 ^b	53.1 ± 5.7 ^b	51.4 ± 0.3 ^c
	Q4	58.2 ± 8.6 ^c	4.7 ± 1.2 ^c	41.5 ± 8.4 ^c	49.3 ± 0.1 ^c
苗期水分亏缺	M1	71.3 ± 6.6 ^a	6.1 ± 1.4 ^a	65.4 ± 5.8 ^a	52.8 ± 0.5 ^a
	M2	83.0 ± 4.9 ^b	6.2 ± 1.1 ^{ab}	63.0 ± 6.1 ^a	54.8 ± 0.5 ^{ab}
	M3	88.1 ± 5.2 ^b	6.1 ± 1.2 ^a	58.2 ± 5.3 ^b	51.5 ± 1.2 ^{ac}
	M4	88.1 ± 10.1 ^b	6.6 ± 1.2 ^b	58.1 ± 6.4 ^b	55.3 ± 0.7 ^b
分蘖期水分亏缺	F1	78.3 ± 6.7 ^{ab}	6.0 ± 1.8 ^a	63.6 ± 6.3 ^a	53.7 ± 0.6 ^a
	F2	80.6 ± 5.6 ^a	6.2 ± 1.2 ^{ab}	67.2 ± 8.8 ^{ab}	53.5 ± 0.4 ^a
	F3	82.5 ± 7.8 ^a	5.9 ± 1.1 ^a	60.8 ± 5.0 ^{ac}	52.1 ± 0.1 ^b
	F4	74.7 ± 8.2 ^b	6.5 ± 1.3 ^b	62.8 ± 6.4 ^a	53.7 ± 0.5 ^a
拔节期水分亏缺	B1	64.3 ± 2.8 ^a	6.1 ± 1.2 ^a	67.8 ± 3.4 ^a	53.0 ± 1.5 ^a
	B2	67.4 ± 8.5 ^a	6.1 ± 1.1 ^a	61.8 ± 7.2 ^b	50.5 ± 1.2 ^{ab}
	B3	74.5 ± 8.6 ^b	5.6 ± 1.1 ^b	55.8 ± 9.1 ^c	48.0 ± 1.3 ^b
	B4	81.7 ± 6.4 ^c	6.4 ± 1.5 ^{ac}	57.2 ± 7.7 ^{bc}	45.0 ± 0.2 ^{bc}
灌浆期水分亏缺	G1	75.7 ± 7.6 ^a	5.7 ± 1.4 ^a	62.0 ± 8.8 ^a	56.7 ± 0.4 ^a
	G2	76.9 ± 4.9 ^a	5.7 ± 1.3 ^a	63.0 ± 5.7 ^a	55.5 ± 0.4 ^{ab}
	G3	78.5 ± 6.1 ^{ab}	6.0 ± 1.1 ^a	64.0 ± 6.0 ^a	55.3 ± 0.3 ^b
	G4	72.3 ± 6.5 ^{ac}	6.1 ± 1.3 ^a	63.6 ± 4.4 ^a	53.3 ± 0.6 ^c
成熟期水分亏缺	C1	74.8 ± 5.2 ^a	5.8 ± 1.3 ^a	64.7 ± 8.3 ^a	51.0 ± 1.2 ^a
	C2	75.0 ± 5.9 ^a	5.8 ± 1.7 ^a	68.0 ± 5.0 ^a	55.2 ± 0.2 ^b
	C3	81.1 ± 9.2 ^b	5.4 ± 1.4 ^a	62.6 ± 7.2 ^a	54.5 ± 0.1 ^{bc}
	C4	70.7 ± 3.9 ^a	5.4 ± 1.4 ^a	65.6 ± 8.6 ^a	56.7 ± 0.1 ^{bd}

20.2%、37.6%和-0.9%、5.2%、10.0%、13.7%。全生育期水分亏缺处理条件下春青稞株高以及穗长、穗粒数和千粒质量基本上随着水分亏缺程度的增加而减小(表3)。

与充分灌溉处理相比,除苗期水分亏缺处理外,不同生育期水分亏缺处理基本上均降低了春青稞的株高(表3)。在苗期实施中度至极度水分亏缺的处理株高较大,这可能是此处理下春青稞在灌浆期和成熟期具有较大耗水量的主要原因(表2)。与充分灌溉处理相比,不同生育期水分亏缺处理在一定程度上降低了春青稞的穗长、穗粒数和千粒质量(表3)。在拔节期和灌浆期实施水分亏缺处理时,春青稞千粒质量随着水分亏缺程度的增加而逐渐减小。拔节期轻度、中度、重度和极度水分亏缺处理时的春青稞千粒质量分别比充分灌溉处理(CK1和CK2平均)减小了7.2%、11.6%、15.0%和21.2%,这表明拔节期水分严重亏缺对春青稞籽粒的正常生长发育产生了较大的不利影响。而在成熟期实施水分亏缺处理时,春青稞千粒质量随着水分亏缺程度的增加而增大,这意味着在春青稞成熟期控制水分

供应有助于作物籽粒的形成。

在充分灌溉处理条件下,75%水分处理时的春青稞籽粒产量比80%水分处理的高9.1%,而秸秆覆盖处理比75%水分处理的增大了4.4%(图1)。80%水分处理时的不孕穗数量多于75%水分处理,这可能是其籽粒产量较低的主要原因。作物耗水量包括植株正常生长发育所需的水分消耗(生物质积累和蒸腾等生理消耗)以及地表蒸发引起的无效消耗^[22]。作物正常生长发育需要适量的水分供给。过多的水分供给影响春青稞的生长环境,不仅不能获得最大的籽粒产量(图1)^[23],而且增大了水分的无效消耗。

与充分灌溉处理相比,全生育期水分亏缺处理明显降低了春青稞的籽粒产量,且籽粒产量随着水分亏缺程度的增大而显著降低(图1)。全生育期轻度、中度、重度和极度水分亏缺处理时的春青稞籽粒产量分别比充分灌溉处理(CK1和CK2平均)降低了9.1%、26.4%、30.8%和71.5%。

与充分灌溉处理相比,不同生育期的水分亏缺处理均不同程度地降低了春青稞籽粒产量(图1)。

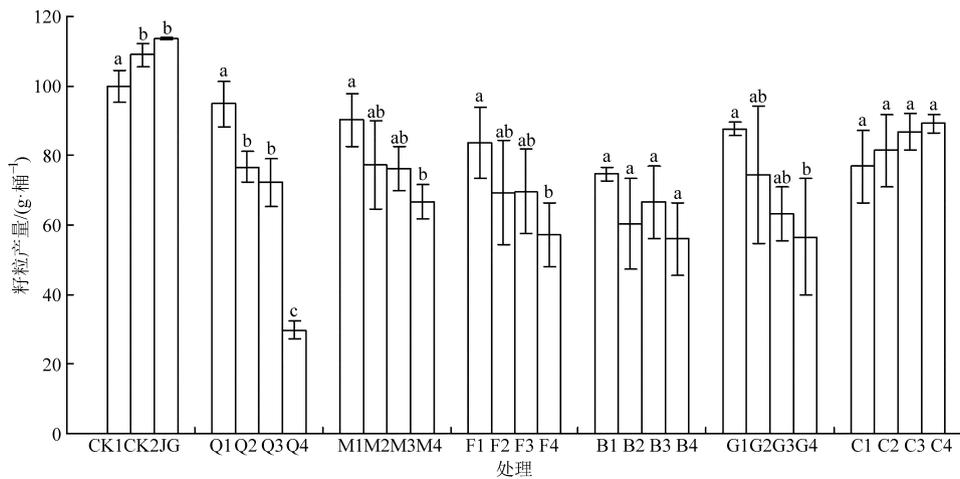


图 1 不同生育期土壤水分亏缺程度对春青稞籽粒产量的影响

Fig. 1 Effects of water deficit levels at various growth stages on grain yield of spring highland barley

春青稞籽粒产量随着苗期、分蘖期、拔节期以及灌浆期水分亏缺程度的增大而降低,但随着成熟期水分亏缺程度的增大而增大(图 1)。整体而言,苗期实施水分亏缺处理对春青稞籽粒产量的不利影响相对较小,分蘖期、拔节期和灌浆期水分亏缺的不利影响较大,这与 Liu 等^[13]、田德龙等^[19]以及 Geerts 等^[24]的结论相似。不同生育期水分亏缺对光合作用和叶片老化的不同反应,可能是其主要原因^[25]。因此,当水分供应受限时,可在春青稞的苗期或成熟期实施水分亏缺处理^[21]。

作物的生物质生产需要消耗水分。作物水分消耗量与作物种类、品质、作物生长阶段、气候条件以及土壤水分状况密切相关。当土壤水分亏缺时,作物气孔开度减小甚至闭合,从而降低作物蒸腾速率、光合作用和作物产量^[26]。农作物对于干旱具有一定的抗逆性,在后续生育期如果恢复水分供给可部分弥补本生育期水分亏缺对作物生殖生长造成的不良影响,但过大的水分亏缺程度(大于作物需水量的 55%)将会导致作物籽粒产量不可弥补的降低^[27]。全生育期极度水分亏缺处理时的春青稞籽粒产量显

著低于其他水分处理,即是水分过度亏缺导致作物生殖生长不可逆危害的结果(图 1)。

2.3 收获指数

农作物籽粒产量是粮食作物生产的根本目的。不同生育期水分亏缺程度对作物籽粒产量与地上总干物质量的比值称作为作物收获指数。在充分灌溉处理条件下,75% 水分处理的春青稞收获指数(0.34)显著大于 80% 水分处理(0.31),而秸秆覆盖处理对收获指数的影响不明显(图 2)。与 75% 水分处理相比,80% 水分处理时过多的水分消耗主要增加了秸秆生物量(数据未给出)而非作物籽粒产量。

在全生育期水分亏缺处理条件下,轻度至重度水分亏缺处理的收获指数与充分灌溉处理相当,且收获指数随着水分亏缺程度的增大而增大,但极度水分亏缺处理的收获指数显著降低(图 2),表明极度水分亏缺已严重影响春青稞的生殖生长,导致籽粒产量的下降程度大于生物质量的下降程度。

在分蘖期和灌浆期实施水分亏缺处理时,春青稞收获指数随着水分亏缺程度的增大而减小,但在

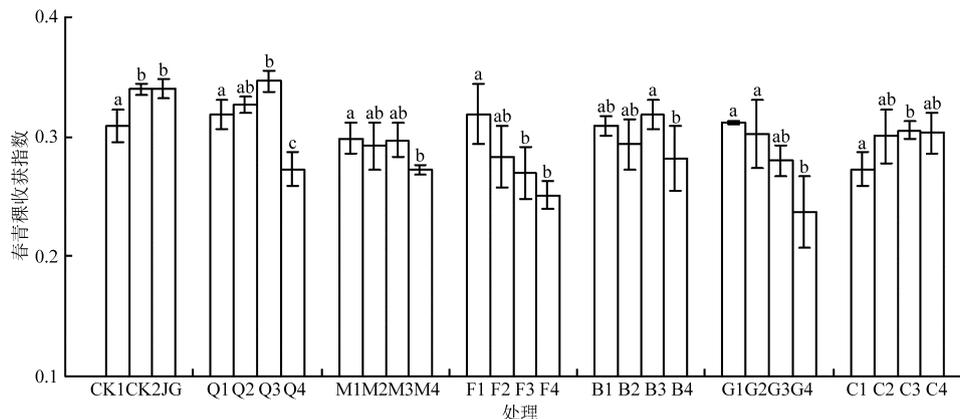


图 2 不同生育期土壤水分亏缺程度对春青稞收获指数的影响

Fig. 2 Effects of water deficit levels at various growth stages on harvest index of spring highland barley

成熟期水分亏缺处理时收获指数则随着水分亏缺程度的增大而呈增加趋势(图2)。除极度水分亏缺处理外,苗期和拔节期的不同水分亏缺处理对春青稞收获指数的影响不显著(图2)。整体而言,实施水分亏缺处理的生育期对春青稞收获指数的影响程度并不太大,这与 Geerts 等和 Xue 等对高原藜麦和小麦的研究结论相似^[21,25-26]。在苗期、分蘖期、拔节期、灌浆期和成熟期实施水分亏缺处理时,所有水分亏缺处理条件下的平均春青稞收获指数分别为 0.29、0.28、0.30、0.28 和 0.29。

2.4 作物水分利用效率

作物水分利用效率(作物水分生产率)是指作物单位耗水量所生产的籽粒质量,是表征雨养或灌溉农业水分利用水平的重要指标。在充分灌溉处理条件下,75%水分处理的作物水分利用效率显著大于80%水分处理,而秸秆覆盖处理的作物水分利用

效率大于未覆盖处理(图3)。80%和75%水分处理以及秸秆覆盖处理时的作物水分利用效率分别为 1.37、1.71、1.92 kg/m³。由于受孕穗数量的增加、无效蒸发的减少,75%水分处理以及秸秆覆盖处理比80%水分处理或未覆盖处理更有利于提高水分的生产能力^[21,28]。

在全生育水分亏缺处理条件下,除极度亏缺处理外,春青稞作物水分利用效率随着水分亏缺程度的增加而增大(图3)。轻度和中度水分亏缺处理时的作物水分利用效率(1.54、1.62 kg/m³)小于75%水分处理而大于80%水分处理,重度水分亏缺处理时的水分利用效率(1.91 kg/m³)大于充分灌溉处理。极度水分亏缺处理时的作物水分利用效率(1.12 kg/m³)显著小于全生育期轻度至重度水分亏缺处理。这些数据显示,对于耐旱作物青稞,适度的干旱胁迫可以提高其水分利用效率^[26,29]。

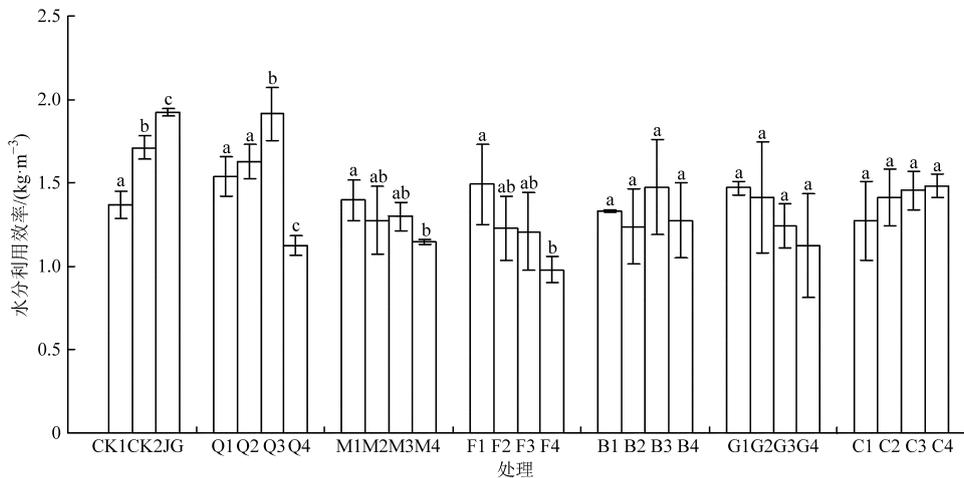


图3 不同生育阶段土壤水分亏缺程度对春青稞水分利用效率的影响

Fig. 3 Effects of water deficit levels at various growth stages on water use efficiency of spring highland barley

在不同生育期实施不同程度的水分亏缺处理均导致春青稞水分利用效率小于75%水分处理,但在苗期、分蘖期、拔节期以及灌浆期的轻度水分亏缺,其作物水分利用效率与80%水分处理时的相当或稍微更大些(图3)。整体而言,作物水分利用效率随着苗期、分蘖期以及灌浆期水分亏缺程度的增加而减小,但随着成熟期水分亏缺程度的增大而呈增大趋势,拔节期水分亏缺程度对作物水分利用效率没有明显的影响(图3)。其中,分蘖期极度水分亏缺处理时的作物水分利用效率在所有试验处理中最低(0.98 kg/m³)。苗期、分蘖期、拔节期、灌浆期及成熟期在不同水分亏缺处理条件下的平均作物水分利用效率分别为 1.28、1.23、1.33、1.31、1.40 kg/m³。这些数据再次表明,成熟期应严格控制作物水分的供应。

所有试验处理的统计结果显示,春青稞作物水

分利用效率(WUE)与作物收获指数(HI)之间呈显著的指数相关关系($WUE = 0.20e^{6.38HI}$, $R^2 = 0.90$, $P < 0.01$),这可为春青稞水分利用效率的估算提供一条新途径。

3 结论

(1)在充分灌溉处理条件下,75%水分处理的春青稞比80%水分处理具有更小的耗水量和更大的收获指数、籽粒产量以及作物水分利用效率。地表秸秆覆盖降低了春青稞耗水量却增大了籽粒产量和作物水分利用效率。在所有的试验处理中,秸秆覆盖处理的春青稞籽粒产量(113.63 g/桶)和作物水分利用效率(1.92 kg/m³)最大。

(2)在全生育期水分亏缺处理条件下,春青稞耗水量、株高以及穗长、穗粒数、千粒质量和籽粒产量均小于充分灌溉处理,且随着水分亏缺程度的增

加而显著减小。除极度水分亏缺处理外,作物收获指数和水分利用效率随着水分亏缺程度的增大而增大。重度水分亏缺处理时的作物收获指数和水分利用效率分别达到 0.35 和 1.91 kg/m³,明显大于充分灌溉处理时的 0.31~0.34 和 1.37~1.71 kg/m³。

(3)与 75% 水分处理相比,不同生育期水分亏缺处理均不同程度地降低了春青稞本生育期的耗水量以及穗长、穗粒数、千粒质量、籽粒产量、收获指数和作物水分利用效率。除成熟期水分亏缺处理外,

不同生育期水分亏缺处理时的春青稞耗水量、春青稞籽粒产量和作物水分利用效率基本上均随着水分亏缺程度的增大而减小。成熟期水分亏缺处理有助于提高春青稞籽粒产量。整体而言,在苗期、拔节期、分蘖期和灌浆期实施水分轻度亏缺处理,而在成熟期实施水分重度亏缺处理可以获得相对较高的春青稞籽粒产量、收获指数和水分利用效率,但不同生育期水分亏缺程度的这一组合方案尚需进一步的试验证实。

参 考 文 献

- 1 卢良恕. 中国大麦学[M]. 北京:中国农业大学出版社,1996.
- 2 次仁央金,李军,金涛. 试论西藏农业资源状况与种植制度发展[J]. 中国农学通报,2007,23(5):371-380.
Tseren Yangjin, Li Jun, Jin Tao. Discussion of agricultural resources status and cropping system of Tibet[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(5):371-380. (in Chinese)
- 3 西藏自治区统计局,国家统计局西藏调查总队. 西藏统计年鉴 2012[M]. 北京:中国统计出版社,2012.
- 4 杨改河. 西藏“一江两河”农业开发几个战略问题的研究[J]. 西北农业大学学报,1995,23(4):11-15.
Yang Gaihe. Strategic measures for agricultural development in the area along the Yaluzangbu River and its tributaries in Tibet[J]. Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis, 1995, 23(4):11-15. (in Chinese)
- 5 闫宝莹. 日喀则地区青稞生产现状与发展思考[J]. 西藏农业科技,2011,33(1):10-13.
- 6 Paltridge N, Jin T, Unkovich M, et al. Agriculture in central Tibet: an assessment of climate, farming systems, and strategies to boost production[J]. Crop & Pasture Science, 2009, 60(7): 627-639.
- 7 黄晓清,胡初阳. 雅鲁藏布江中游地区的旱涝气候特征分析[J]. 高原气象,2001,21(1):108-112.
Huang Xiaqing, Hu Chuyang. Analyses on climatic features of drought/flood in middle reaches of Yarlung River[J]. Plateau Meteorology, 2001, 21(1):108-112. (in Chinese)
- 8 王玄德,贾小燕,刘秀华,等. 西藏一江两河地区耕地资源及其开发前景研究[J]. 西南农业大学学报,1999,21(2):126-129.
Wang Xuande, Jia Xiaoyan, Liu Xiuhua, et al. An investigation of the arable land resources in the yln area in Tibet and the prospect of their exploitation[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 1999, 21(2):126-129. (in Chinese)
- 9 王建林,邓小军. 西藏一江两河地区中低产田的类型、成因及改良利用[J]. 土壤肥料,1995(5):21-23.
- 10 杨永红,张展羽,阮新建. 西藏参考作物蒸发蒸腾量的时空变异规律[J]. 水科学进展,2009,20(6):775-781.
Yang Yonghong, Zhang Zhanyu, Ruan Xinjian. Temporal and spatial variation law of reference crop evapotranspiration in Tibet [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6):775-781. (in Chinese)
- 11 Garcia M, Raes D, Jacobsen S E. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands[J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(2):119-134.
- 12 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.
Yin Zhifang, Ouyang Hua, Zhang Xianzhou. Study on water consumption of spring naked barley land and suitable irrigation system in Tibet[J]. Journal of Natural Resources, 2010,25(10):1666-1675. (in Chinese)
- 13 Liu Zhaofei, Yao Zhijun, Yu Chengqun, et al. Assessing crop water demand and deficit for the growth of spring highland barley in Tibet, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(3):541-551.
- 14 杨勤业,吕昌河. 西藏自治区主要粮食作物水分盈亏分析[J]. 自然资源,1990(1):33-38.
- 15 李春,许燕. 拉萨地区麦类作物需水状况及适宜灌溉问题探讨[J]. 西藏科技,1999(4):28-34.
- 16 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.
Luo Hongying, Cui Yuanlai, Zhao Shujun. Spatial distribution of irrigation water quota of highland barley in Tibet region[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10):116-122. (in Chinese)
- 17 扎西普顿,普珍. 西藏高原地区灌溉制度(畦灌法)制定方法的研究[J]. 西藏科技,2012(10):3-5.
- 18 陈传友. 西藏发展农田灌溉的途径与措施[J]. 自然资源,1981(4):45-51.
- 19 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.
Tian Delong, Xu Bing, Guo Kezhen, et al. Tibet alpine pastoral area (oats and barley) crop water model sure[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(7): 9-12. (in Chinese)
- 20 张恒嘉,李晶. 绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用[J]. 农业机械学报,2013,44(10):143-151.
Zhang Hengjia, Li Jing. Photosynthetic physiological characteristics and water use of potato with mulched drip irrigation under water deficit in oasis region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):143-151. (in Chinese)

- temperature processing in apple juices made from six different varieties[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(9): 2342 – 2352.
- 35 刘建华. 瞬时高压作用对多酚氧化酶活性与构象影响的研究[D]. 南昌:南昌大学, 2007.
Liu Jianhua. Study on effect of instantaneous high pressure treatment on conformation of polyphenol oxidase [D]. Nanchang: Nanchang University, 2007. (in Chinese)
- 36 Hendrickx M, Ludikhuyze L, Van den Broeck I, et al. Effects of high pressure on enzymes related to food quality[J]. Trends in Food Science & Technology, 1998, 9(5): 197 – 203.
- 37 Weemaes C A, De Cordt S V, Ludikhuyze L R, et al. Influence of pH, benzoic acid, EDTA, and glutathione on the pressure and/or temperature inactivation kinetics of mushroom polyphenol oxidase[J]. Biotechnology Progress, 1997, 13(1): 25 – 32.
- 38 Mújica-Paz H, Valdez-Fragoso A, Samson C T, et al. High-pressure processing technologies for the pasteurization and sterilization of foods[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(6): 969 – 985.
- 39 Keenan D F, Röbke C, Gormley R, et al. Effect of high hydrostatic pressure and thermal processing on the nutritional quality and enzyme activity of fruit smoothies[J]. LWT—Food Science and Technology, 2012, 45(1): 50 – 57.
- 40 胡菲菲, 朱瑞, 杨楠, 等. 胡萝卜汁中大肠杆菌脉冲式超高压杀菌动力学研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 178 – 183, 190.
Hu Feifei, Zhu Rui, Yang Nan, et al. Pulse mode high-pressure destruction kinetics of *E. coli* in carrot juice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 178 – 183, 190. (in Chinese)
- 41 朱松明, 苏光明, 王春芳, 等. 水产品超高压加工技术研究与应用[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 168 – 177.
Zhu Songming, Su Guangming, Wang Chunfang, et al. Research and application on high-pressure processing of aquatic products [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 168 – 177. (in Chinese)
- 42 刘芳, 甘芝霖, 赵金红, 等. 富士苹果中膜结合态多酚氧化酶分离纯化方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 193 – 197, 246.
Liu Fang, Gan Zhilin, Zhao Jinhong, et al. Isolation and purification method of membrane-bound polyphenol oxidase in fuji apple [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 193 – 197, 246. (in Chinese)
- 43 罗磊, 周燕燕, 朱文学, 等. 金银花多酚氧化酶特异性与抑制剂动力学研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 202 – 208.
Luo Lei, Zhou Yanyan, Zhu Wenxue, et al. Specificity and inhibition kinetics of polyphenol oxidase from honeysuckle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 202 – 208. (in Chinese)

(上接第 151 页)

- 21 周罕觅, 张富仓, 李志军, 等. 桃树需水信号及产量和果实品质对水分的响应研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 171 – 180.
Zhou Hanmi, Zhang Fucang, Li Zhijun, et al. Response of water demand signal, yield and fruit quality of peach tree to soil moisture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 171 – 180. (in Chinese)
- 22 Qin W, Chi B, Oenema O. Long-term monitoring of rainfed wheat yield and soil water at the Loess Plateau reveals low water use efficiency[J]. PLoS ONE, 2013, 8(11): e78828.
- 23 Kang S Z, Zhang L, Liang Y L, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2002, 55(3): 203 – 216.
- 24 Geerts S, Raes D, Garcia M, et al. Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(3): 427 – 436.
- 25 Xue Q, Zhu X, Musick J T, et al. Physiological mechanisms contributing to the increased water-use efficiency in winter wheat under deficit irrigation[J]. Journal of Plant Physiology, 2006, 163(2): 154 – 164.
- 26 Fereres E, Soriano M A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(2): 147 – 159.
- 27 Geerts S, Raes D, Garcia M, et al. Could deficit irrigation be a sustainable practice for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the Southern Bolivian Altiplano? [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(8): 909 – 917.
- 28 Molden D, Oweis T, Steduto P, et al. Improving agricultural water productivity: between optimism and caution[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(4): 528 – 535.
- 29 申孝军, 孙景生, 张寄阳, 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.
Shen Xiaojun, Sun Jingsheng, Zhang Jiyang, et al. Effects of different water treatment on yield and water use of transplanted cotton following wheat harvest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 150 – 160. (in Chinese)