

DOI: 10.5846/stxb201805151074

朱铁霞, 高阳, 高凯, 李志华. 干旱胁迫下菊芋各器官生物量及物质分配规律研究. 生态学报, 2019, 39(21): - .

Zhu T X, Gao Y, Gao K, Li Z H. Organ biomass and resource allocation in response to drought stress in Jerusalem artichoke. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): - .

干旱胁迫下菊芋各器官生物量及物质分配规律研究

朱铁霞¹, 高 阳¹, 高 凯^{1,*}, 李志华²

¹ 内蒙古民族大学农学院, 通辽 028043

² 扎鲁特旗科学技术信息研究中心, 通辽 028043

摘要:以红皮和白皮菊芋为研究材料,通过设置不同的灌水梯度,研究了干旱胁迫对菊芋各器官生物量及物质分配规律的影响。试验结果表明,干旱胁迫降低了红皮和白皮菊芋各器官的生物量;其中,50%灌水条件下两种菊芋的总生物量、地上生物量和地下生物量显著高于10%、20%、30%和40%;红皮菊芋根冠比随着灌水量的减少呈现逐渐增加的变化趋势,白皮菊芋呈现“升-降-升”的变化趋势,且在相同水分处理条件下红皮菊芋茎叶比和根冠比均高于白皮;红皮菊芋随着灌水量的降低根系贡献率呈现逐渐增加的变化趋势,叶片贡献率、块茎贡献率、花贡献率、叶柄贡献率、茎秆贡献率均呈现逐渐降低的变化趋势,白皮菊芋块茎贡献率、花贡献率随灌水量的降低呈现逐渐降低的变化趋势,其他各器官的贡献率随灌水量降低没有规律可循。

关键词:菊芋;茎叶比;根冠比;生物量;干旱胁迫

Organ biomass and resource allocation in response to drought stress in Jerusalem artichoke

ZHU Tiexia¹, GAO Yang¹, GAO Kai^{1,*}, LI Zhihua²

¹ Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028043, China

² Zalut banner science and technology information research center, Tongliao 028043, China

Abstract: This study aimed to study the effects of drought on biomass and its distribution in a crop of Jerusalem artichoke (JA) under different irrigation gradients and to provide a reference for cultivation and management of the crop in arid area. Drought decreased the organ biomass of both red skin JA and white skin JA. The total biomass, aboveground biomass, and underground biomass under 50% irrigation were significantly greater than those under 10%, 20%, 30%, and 40% irrigation, respectively. The root/shoot ratio of the red skin variety showed a increase tendency with decreases in the irrigation levels, while the white skin variety showed an “up-down-up” pattern. For red skin JA, the root contribution to biomass increased gradually with decreases in irrigation levels, indicating a gradual reduction in leaf, tuber, stem, and petiole contributions. For white skin JA, the contributions of tuber and flower decreased gradually with decreases in irrigation levels, while the contributions of other organs did not display a regular pattern upon changes in irrigation.

Key Words: Jerusalem artichoke; stem/leaf ratio; root/shoot ratio; biomass; drought stress

全球温度不断升高,必然导致更多地方受到干旱胁迫^[1]。干旱胁迫将成为植物生长过程中的主要限制因素之一^[2]。植物对干旱胁迫的适应机制和如何提高植物对干旱的抵御能力也一直是生态学者们研究的热

基金项目:国家自然科学基金(31560672);内蒙古科技英才项目(NJYT15B17);内蒙古自治区青年创新拔尖人才项目(2015QNCXRC02);内蒙古自治区草原英才项目(第七批)

收稿日期:2018-05-15; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaokai555@126.com

点问题,同时也是我国农业和生态文明建设急需解决的难题^[3]。

菊芋(*Helianthus tuberosus* L) 为菊科向日葵属植物,又称鬼子姜或洋姜,主要分布在北美温带地区,以块茎繁殖为主,对生境要求较低,具有喜肥耐贫瘠,喜湿耐旱,喜温耐寒,耐盐碱等优点^[4-6]。我国主要分布于江苏、山东沿海地区和陕西、甘肃、宁夏等干旱和半干旱地区^[7]。近年来,我国菊芋的种植面积逐年增加,尤其在甘肃、宁夏等干旱和半干旱地区。关于菊芋的研究主要集中在耐盐机理^[8-9]和如何通过水肥管理、种植密度、收获时间等农艺措施提高其块茎生物产量等方面^[10-14]。关于菊芋干旱胁迫适应机制方面的研究相对较少,研究内容主要集中在半干旱地区不同生育期菊芋生长特性与气体交换特征、半干旱地区菊芋品系植株表型与光合特性分析、干旱-复水对菊芋苗期根、茎、叶形态特征的影响、干旱胁迫下菊芋叶片光合变化规律、蔗糖磷酸合成酶及转化酶活性、叶片保护酶活性、膜脂过氧化作用和可溶性碳水化合物的积累及分配规律等相关研究^[15-17]。基于上述原因,本研究拟通过对不同干旱胁迫条件下菊芋生物量、茎叶比、根冠比和物质分配规律进行研究,探讨菊芋抗旱生物量机制,为菊芋旱地栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2016 年 5 月至 2016 年 9 月在内蒙古民族大学农学院试验农场(43°36'N, 122°22'E)遮雨棚下进行。采用盆栽方式种植,花盆直径 29cm,高度 32cm。装盆土壤为灰色草甸土,是当地主要土壤类型,装盆前将土壤混合均匀,每盆装入 5.5 kg 土壤。土壤有机质含量 18.23g/kg、碱解氮 62.41mg/kg、速效磷 38.61mg/kg、速效钾 184.56mg/kg、pH 值 8.2。菊芋品种为当地主要种植的红皮菊芋和白皮菊芋,种植时选取重量为 30—40g,无病、无伤的块茎作种,每盆种植 3—4 枚菊芋块茎,最终保证每盆一株菊芋。

出苗 30 天每盆保留一株菊芋,并开始进行干旱处理,根据田间持水量(W)按质量百分比设定 50%W、40%W、30%W、20%W、10%W 共 5 个水分梯度,每天 18:00 时用土壤水分测定仪进行水分测定,通过计算后,补充散失水分量,确保土壤含水量为设定梯度。每个梯度 15 个重复,共计 75 盆。

1.2 生物量测定

9 月 30 日对每盆菊芋进行齐地表刈割,地上部分进行茎、叶、花和叶柄分离,地下部分进行清洗,及根系和块茎分离。将根、茎、叶、叶柄、花和块茎先在 105℃ 条件下杀青 30min,之后在 75℃ 条件下烘干,测定干重。

1.3 相关计算

地上生物量 = 茎秆生物量 + 花生物量 + 叶片生物量 + 叶柄生物量

地下生物量 = 根系生物量 + 块茎生物量

总生物量 = 地上生物量 + 地下生物量

根系贡献率 = 根系生物量 / 总生物量

茎贡献率 = 茎秆生物量 / 总生物量

叶贡献率 = 叶片生物量 / 总生物量

叶柄贡献率 = 叶柄生物量 / 总生物量

块茎贡献率 = 块茎生物量 / 总生物量

花贡献率 = 花生物量 / 总生物量

根冠比 = 地下生物量 / 地上生物量

茎叶比 = 茎生物量 / 叶生物量

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 和 DPS14.50 软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析法检验测定参数之间的差异。

2 结果与分析

2.1 不同灌水处理对菊芋总生物量的影响

图 1 可以看出,随着灌水量的增加,红皮菊芋和白皮菊芋的总生物量、地上生物量和地下生物量均呈现逐渐增加的变化趋势,50%灌水条件下白皮菊芋和红皮菊芋的总生物量、地上生物量和地下生物量均显著高于其他灌水处理($P<0.05$),40%灌水条件下白皮菊芋和红皮菊芋的总生物量、地上生物量和地下生物量均显著高于 30%、20%和 10%($P<0.05$),30%、20%和 10%灌水条件下差异不显著。白皮菊芋地上生物量 30%灌水条件下显著高于 20%和 10%($P<0.05$),20%和 10%之间没有差异;40%条件下红皮菊芋总生物量显著高于白皮($P<0.05$),50%和 30%条件下白皮菊芋地上生物量显著高于红皮($P<0.05$),40%条件下红皮菊芋地上生物量显著高于白皮($P<0.05$),其他相同灌水处理条件下白皮菊芋和红皮菊芋的总生物量、地上生物量和地下生物量之间均无差异。

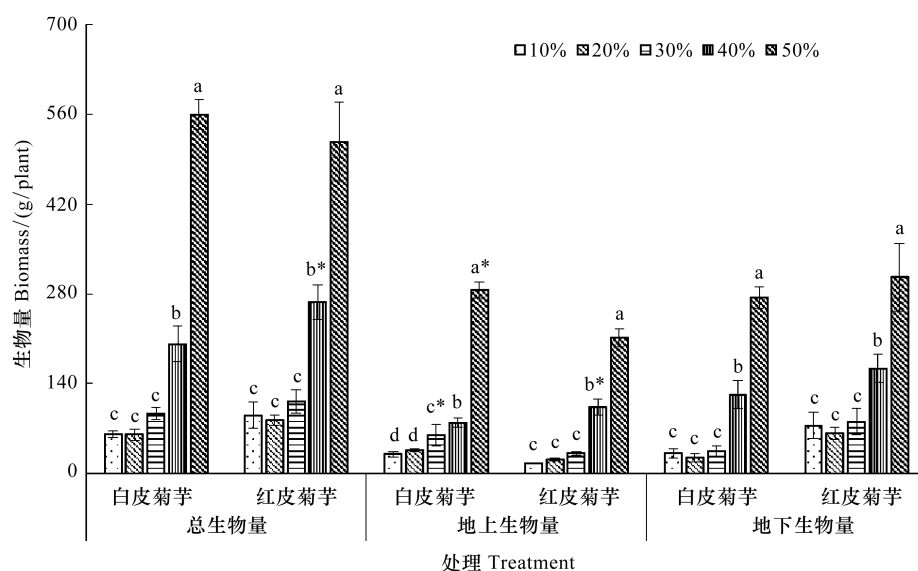


图 1 灌水量对菊芋生物量的影响

Fig.1 Effects of irrigation on biomass of Jerusalem Artichoke

不同小写字母表示相同品种不同灌水量之间在 0.05 水平下差异显著; * 表示相同灌水量不同品种之间在 0.05 水平下差异显著

2.2 不同灌水处理对菊芋各器官生物量的影响

50%灌水条件下白皮和红皮菊芋的根系生物量、茎秆生物量、叶片生物量、叶柄生物量、花生物量和块茎生物量均显著高于 10%、20%、30%和 40%($P<0.05$);10%、20%和 30%三个灌水条件下白皮菊芋的根系生物量、叶片生物量和叶柄生物量之间没有显著差异,且均显著低于 40%灌水条件下根系生物量、叶片生物量和叶柄生物量($P<0.05$);红皮菊芋根系生物量和叶柄生物量在 10%、20%、30%和 40%之间没有显著差异,40%灌水条件下花生物量显著高于 10%、20%和 30%($P<0.05$),而 10%、20%和 30%三者之间没有显著差异;白皮菊芋茎秆生物量 30%条件下显著高于 10%、20%和 40%($P<0.05$),40%显著高于 10%和 20%($P<0.05$);红皮菊芋茎秆生物量 10%和 20%显著低于 40%($P<0.05$)(表 1)。

相同灌水条件下白皮菊芋叶柄生物量均显著高于红皮($P<0.05$),红皮块茎生物量均显著高于白皮($P<0.05$),10%、20%和 30%条件下白皮菊芋根系生物量均显著低于红皮($P<0.05$),40%和 50%条件下白皮菊芋根系生物量均显著高于红皮($P<0.05$),30%条件下白皮茎秆生物量显著高于红皮($P<0.05$),20%、40%和 50%条件下白皮叶片生物量显著高于红皮($P<0.05$),40%和 50%条件下红皮花生物量显著高于白皮($P<0.05$)(表 1)。

表 1 不同灌水处理对菊芋各器官生物量的影响

Table 1 Effects of different irrigation water treatment on the biomass of Jerusalem artichoke

		根系 Root	茎秆 Stem	叶片 Leaf
白皮菊芋	10%	31.19±7.14 c	10.02±2.40 d	15.05±2.41 c
White Jerusalem artichoke	20%	24.17±6.44 c	11.44±1.48 d	20.57±3.57 c *
	30%	30.53±12.81 c	39.63±10.45 b *	14.60±4.73 c
	40%	112.79±24.81 b *	27.32±2.08 c	37.01±6.46 b *
	50%	204.38±25.49 a *	135.65±9.09 a	111.80±6.77 a *
红皮菊芋	10%	74.74±19.96 b *	7.42±1.74 c	5.79±1.22 c
Red Jerusalem artichoke	20%	61.96±9.43 b *	14.62±0.47 c	3.96±1.02 c
	30%	60.82±9.46 b *	21.21±2.14 bc	8.05±0.56 c
	40%	77.62±16.93 b	63.70±13.16 b	25.04±3.10 b
	50%	133.13±8.55 a	105.08±18.90 a	65.61±10.67 a
		叶柄/ Petiole	花/Flower	块茎/Tuber
白皮菊芋	10%	4.69±0.56 c *	—	—
White Jerusalem artichoke	20%	4.09±0.12 c *	—	—
	30%	4.12±1.30 c *	0.67±0.95 b	3.60±5.10 c
	40%	11.40±0.25 b *	2.93±0.82 b	10.16±2.58 b
	50%	14.18±1.33 a *	23.70±4.23 a	69.69±13.30 a
红皮菊芋	10%	0.88±0.10 b	1.60±0.51 c	—
Red Jerusalem artichoke	20%	0.86±0.14 b	1.81±0.62 c	—
	30%	0.74±0.38 b	1.36±1.08 c	19.79±14.07 c *
	40%	2.41±1.03 b	11.90±1.80 b *	86.12±9.73 b *
	50%	11.40±2.05 a	29.44±5.68 a *	172.70±44.69 a *

2.3 不同灌水处理对菊芋物质分配规律的影响

白皮菊芋根系贡献率最小值出现在 30% 灌水条件下, 显著低于 10% 和 40% ($P<0.05$); 茎贡献率最大值出现在 30% 灌水条件下, 显著高于 10%、20%、40% 和 50% ($P<0.05$); 叶贡献率 20% 条件下显著高于 10%、30%、40% 和 50% ($P<0.05$), 10% 显著 30%、40% 和 50% ($P<0.05$); 50% 条件下花贡献率显著高于 30% 和 40% ($P<0.05$)。红皮菊芋根系贡献率随控水梯度的增加呈现逐渐降低的变化趋势, 10% 和 20% 显著高于 30%、40% 和 50% ($P<0.05$); 茎贡献率呈现先增加后降低的变化趋势, 10% 条件下最低, 其值显著低于 20%、30%、40% 和 50% ($P<0.05$); 叶片贡献率和叶柄贡献率呈现先降低后增加的变化趋势, 50% 灌水条件下红皮菊芋叶贡献率最高, 显著高于 10%、20% 和 30% ($P<0.05$); 花贡献率呈现先升-降-升的变化趋势(见表 2); 相同水分处理条件下, 各器官贡献率因品种不同表现出不同的大小关系。如: 10%、20% 和 30% 条件下红皮菊芋根系贡献率显著高于白皮 ($P<0.05$), 40% 条件下白皮根系贡献率显著高于红皮 ($P<0.05$); 30% 条件下白皮菊芋茎贡献率显著高于红皮 ($P<0.05$), 40% 条件下红皮茎贡献率显著高于白皮 ($P<0.05$); 白皮菊芋叶片贡献率在不同灌水条件下均显著高于红皮 ($P<0.05$); 10%、20%、30% 和 40% 条件下白皮菊芋叶柄贡献率显著高于红皮 ($P<0.05$); 30%、40% 和 50% 条件下红皮块茎贡献率显著高于白皮 ($P<0.05$); 40% 条件下红皮菊芋花贡献率显著高于白皮 ($P<0.05$) (表 2)。

2.5 不同水分梯度对不同品种菊芋茎叶比的影响

由图 2 可知, 随着灌水量的增加, 白皮和红皮两种菊芋的茎叶比均呈现先增加后降低的变化趋势, 30% 灌水条件下白皮菊芋茎叶比最大, 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 其他处理之间没有显著差异; 20% 灌水条件下红皮菊芋茎叶比最大, 其中 20%、30% 和 40% 灌水条件下茎叶比显著高于 10% 和 50% ($P<0.05$), 20%、30% 和 40% 之间以及 10% 和 50% 之间没有显著差异。相同灌水条件下, 红皮和白皮菊芋茎叶比仅 20% 和 40% 条件下表现出显著差异 ($P<0.05$), 其他灌水条件下没有表现出显著差异。

表 2 不同灌水处理对菊芋物质分配规律的影响

Table 2 Effects of different irrigation water treatment on material distribution of Jerusalem artichoke

		根系贡献率	茎贡献率	叶贡献率
		Root contribution rate	Stem contribution rate	Leaf contribution rate
白皮菊芋	10%	50.75±9.01 ab	16.80±5.12 bc	24.68±3.42 b *
White Jerusalem artichoke	20%	39.36±5.41 bc	19.69±5.08 bc	34.02±1.74 a *
	30%	34.36±16.02 c	41.89±6.52 a *	15.40±3.70 c *
	40%	55.29±5.42 a *	13.72±1.44 c	18.37±1.88 c *
	50%	36.50±3.88 bc	24.27±1.57 b	19.98±0.56 c *
红皮菊芋	10%	81.71±4.16 a *	8.49±1.96 b	6.70±1.69 b
Red Jerusalem artichoke	20%	74.08±4.07 a *	17.73±1.69 a	4.91±1.59 b
	30%	54.92±6.67 b *	19.69±4.67 a	7.39±1.23 b
	40%	28.75±3.36 c	23.90±4.31 a *	9.52±1.63 ab
	50%	25.89±1.34 c	20.67±5.06 a	12.67±1.47 a
		叶柄贡献率	花贡献率	块茎贡献率
		Petiole contribution rate	Flower contribution rate	Tuber contribution rate
白皮菊芋	10%	7.77±1.25 a *	—	—
White Jerusalem artichoke	20%	6.93±1.00 ab *	—	—
	30%	4.34±0.95 d *	0.63±0.89 b	3.38±4.78 ab
	40%	5.78±0.88 bc *	1.53±0.56 b	5.32±2.03 ab
	50%	2.53±0.18 c	4.25±0.81 a	12.46±2.31 a
红皮菊芋	10%	1.06±0.38 a	2.04±1.21 b	—
Red Jerusalem artichoke	20%	1.04±0.20 a	2.24±0.89 b	—
	30%	0.64±0.26 a	1.43±1.33 b	15.92±11.42 b *
	40%	0.88±0.34 a	4.49±0.71 a *	32.47±3.83 a *
	50%	2.26±0.61 a	5.65±0.61 a	32.86±5.09 a *

2.6 不同水分梯度对不同品种菊芋根冠比影响

由图 3 可知,红皮菊芋根冠比随着灌水量增加呈现逐渐降低的变化趋势,10%条件下根冠比最高,显著高于其他各处理($P<0.05$),20%条件下显著高于 30%、40%和 50% ($P<0.05$),50%显著低于 30%和 40% ($P<0.05$),30%和 40%之间没有显著差异;10%、20%和 30%灌水量条件下红皮菊芋根冠比显著高于白皮($P<0.05$),40%和 50%灌水条件下白皮和红皮根冠比之间没有显著差异。

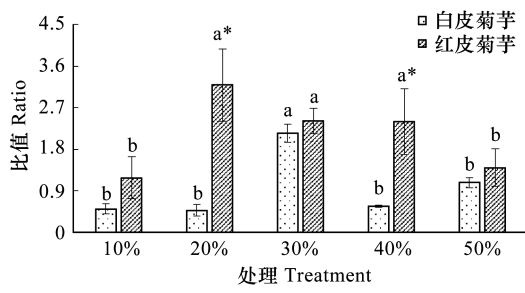


图 2 灌水量对菊芋茎叶比的影响
Fig.2 Effects of irrigation on stem/leaf ratio

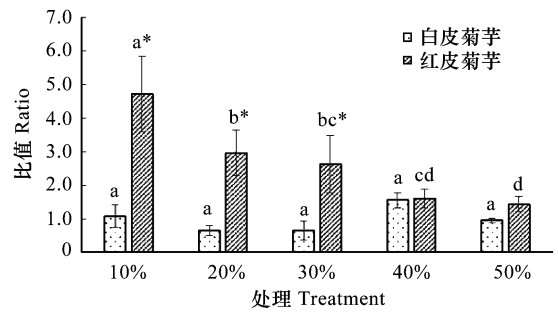


图 3 灌水量对菊芋根冠比的影响
Fig.3 Effects of irrigation on root/shoot ratio

3 讨论

随着灌水数量的增加,红皮和白皮菊芋各器官生物量均呈现逐渐增加的变化趋势,说明尽管菊芋具有一定的耐旱性,但水分仍然是提高菊芋生物量的重要因素^[5,18]。而干旱胁迫对菊芋根系、茎秆、叶片、叶柄、花和块茎生物量降低的原因却有所差异。根系、茎秆、叶片、叶柄生物量随灌水量的降低其减少的原因主要是由于菊芋在生长发育过程中,没有充足的水分供应,影响到光合作用,同化产物合成减少,进而影响了干物质的积累数量和速度,最终表现为各营养器官生物量降低^[19-20]。而花和块茎作为菊芋的生殖器官,其形成要滞后于

营养器官,其物质的来源也主要是由营养器官所积累的物质向生殖器官运输而获得^[21]。因此花和块茎生物量的减少更多原因应该是干旱胁迫通过影响营养器官所导致。

植物干物质分配被认为是植物适应逆境胁迫的重要策略之一^[22]。许多研究证明,干旱胁迫条件下,许多植物通过调整自身的物质分配格局,可以有效地提高自身对于干旱胁迫的适应性^[23-24]。如有的植物通过改变干物质总量及其在根、冠之间的分配比例来提高自身对于干旱胁迫的适应性^[25-26]。本文中红皮菊芋对于干旱的适应性则显示出类似的变化规律,即灌水量从 50%降低到 10%其根冠比呈现逐渐增加的变化趋势,同时根系贡献率也呈现逐渐增加的变化趋势,其目的是增加地下根系,从而提高根系的吸水功能,降低地上茎、叶干物质数量,来减少蒸腾作用,进而减少水分的散失。这种通过增加根系而减少地上部分干物质分配的干旱适应机理是植物普遍的干旱适应策略^[27-28]。而白皮菊芋则表现出不同的干旱适应策略,这种差异可能是由于遗传所决定。

参考文献 (References):

- [1] Breshears D D, Cobb NS, Rich PM, Price K P, Allen C D, Balice R G, Romme W H, Kastens J H, Lisa Floyd M, Belnap J, Anderson J J, Myers O B, Meyer C W. Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102(42): 15144-15148.
- [2] 王晶晶,莫伟平,贾文锁,刘国杰.干旱条件下葡萄叶片气孔导度和水势与节为变化的关系. *中国农业科学*, 2013, 46(10): 2151-2158
- [3] 杨振亚,周本智,陈庆标,葛晓改,王小明,曹永慧,童冉,石洋.干旱对杉木幼苗根系构型及非结构性碳水化合物的影响. *生态学报*, 2018, 38(18): 6729-6740
- [4] 马玉明,龙锋.我国东部沙地菊芋生长的调查研究. *中国草地*, 2001, 23(6): 42-44.
- [5] 孔涛,吴祥云,刘玲玲,闫晗.风沙地菊芋的主要生态学特性. *生态学杂志*, 2009, 28(9): 1763-1766.
- [6] 黄增荣,隆小华,李洪燕,辛本荣,李青,刘玲,刘兆普.江苏北部滨海盐土盐肥耦合对菊芋生长和产量的影响. *土壤学报*, 2010, 47(4): 709-714.
- [7] 乌日娜,朱铁霞,于永奇,高凯.菊芋的研究现状及开发潜力. *草业科学*, 2013, 30(8): 1295-1300.
- [8] 杨君,姜吉禹.海水灌溉条件下菊芋种植密度对土壤无机盐及产量的影响. *吉林师范大学学报:自然科学版*, 2009, 30(2): 17-18, 25-25.
- [9] 赵秀芳,杨劲松,蔡彦明,姚荣江,李冬顺,韩建均.苏北滩涂区施肥对菊芋生长和土壤氮素累积的影响. *农业环境科学学报*, 2010, 29(3): 521-526.
- [10] Soja G, Dersch G, Praznik W. Harvest dates, fertilizer and varietal effects on yield, concentration and molecular distribution of fructan in Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 1990, 165(2/3): 181-189.
- [11] Saengthongpinit W, Sajjaanantakul T. Influence of harvest time and storage temperature on characteristics of inulin from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 37(1): 93-100.
- [12] 高凯,朱铁霞,张永亮.水、氮对不同收获时间菊芋株高和物质分配规律的影响. *中国草地学报*, 2013, 35(1): 49-54.
- [13] 杨斌,张恒嘉,李有先,薛燕翎.不同灌水量对菊芋生长及水分利用效率的影响. *灌溉排水学报*, 2010, 29(4): 140-142.
- [14] 钟启文,刘素英,王丽慧,王怡,李莉.菊芋氮、磷、钾吸收积累与分配特征研究. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 948-952.
- [15] 朱铁霞,王琳,高阳,王伟东,高凯.干旱-复水对菊芋苗期根、茎、叶形态特征的影响. *草业科学*, 2017, 34(11): 2309-2315.
- [16] 杨彬,吕世奇,寇一翮,孙杉,赵长明.半干旱地区不同生育期菊芋生长特性与气体交换特征. *草业学报*, 2016, 25(10): 77-85.
- [17] 张恒嘉,康燕霞.灌水频率对绿洲菊芋耗水特征及水分利用效率的影响. *节水灌溉*, 2017, (1): 1-4, 8-8.
- [18] 张恒嘉,黄高宝,杨斌.灌水频率对河西走廊绿洲菊芋生活史对策及产量形成的影响. *生态学报*, 2011, 31(9): 2401-2406.
- [19] 张依章,张秋英,孙菲菲,董宝娣,陈四龙,刘孟雨.水肥空间耦合对冬小麦光合特性的影响. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(2): 57-60.
- [20] 刘颖,贺康宁,徐特,王辉,刘玉娟.水分胁迫对金露梅叶片水势、光合特性和水分利用效率的影响. *中国水土保持科学*, 2016, 14(1): 106-113.
- [21] 赵孟良,王丽慧,孙雪梅,李屹,李莉.干旱胁迫下菊芋可溶性碳水化合物的积累及分配规律. *江苏农业科学*, 2015, 43(2): 340-343.
- [22] Denoroy P. The crop physiology of *Helianthus tuberosus* L.: a model oriented view. *Biomass and Bioenergy*, 1996, 11(1): 11-32.
- [23] 高小锋,王进鑫,张波,马惠芳,钟楠.不同生长期干旱胁迫对刺槐幼树干物质分配的影响. *生态学杂志*, 2010, 29(6): 1103-1108.
- [24] 李树华,许兴,米海莉,何军,魏玉清,王具宏.水分胁迫对牛心朴子植株生长及渗透调节物质积累的影响. *西北植物学报*, 2003, 23(4): 592-596.
- [25] Toorchi M, Shashidhar H E, Hittalmani S, Gireesha T M. Rice root morphology under contrasting moisture regimes and contribution of molecular marker heterozygosity. *Euphytica*, 2002, 126(2): 251-257.
- [26] 孙宪芝,郑成淑,王秀峰.木本植物抗旱机理研究进展. *西北植物学报*, 2007, 27(3): 629-934.
- [27] 李博,田晓莉,王刚卫,潘飞,李召虎.苗期水分胁迫对玉米根系生长杂种优势的影响. *作物学报*, 2008, 34(4): 662-668.
- [28] 陈明涛,赵忠.干旱对4种苗木根系特征及各部分物质分配的影响. *北京林业大学学报*, 2011, 33(1): 16-22.