

基于降水距平的内蒙古地区马铃薯干旱指标研究

王永利¹, 侯琼¹, 云文丽¹, 苗百岭², 贾成朕¹

(1. 内蒙古生态与农业气象中心, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古气象科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:为建立内蒙古地区马铃薯干旱灾害的监测与评估指标,以中西部和东部地区全生育期、苗期和花期的降水负距平百分率与相对气象产量二者建立回归方程,结合农业干旱等级和降水距平百分率气象干旱等级国家标准,得出了三个时段轻旱、中旱和重旱的等级指标。即全生育期中西部和东部降水距平等级指标分别为 $-5\% \sim -25\%$ 、 $-25\% \sim -40\%$ 、 $< -40\%$ 和 $-10\% \sim -30\%$ 、 $-30\% \sim -45\%$ 、 $< -45\%$;苗期中西部和东部等级指标为 $-10\% \sim -35\%$ 、 $-35\% \sim -50\%$ 、 $< -50\%$ 和 $-20\% \sim -45\%$ 、 $-45\% \sim -60\%$ 、 $< -60\%$;花期中西部和东部地区指标相同,即 $-5\% \sim -30\%$ 、 $-30\% \sim -50\%$ 、 $< -50\%$ 。利用2014和2015年马铃薯主要种植区发生重旱的灾情进行指标验证,计算结果与实际发生基本吻合。

关键词:干旱指标;马铃薯;降水距平;相对气象产量;内蒙古

中图分类号:S421;S513 **文献标志码:**A

Research on the drought index of potato based on precipitation anomaly in Inner Mongolia

WANG Yong-li¹, HOU Qiong¹, YUN Wen-li¹, MIAO Bai-ling², JIA Cheng-zhen¹

(1. Ecological and Agricultural Meteorological Center of Inner Mongolia, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China;

2. Meteorological Research Institute of Inner Mongolia, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China)

Abstract: In order to set up the monitoring and evaluation index for potato drought disaster in Inner Mongolia, established the regression equation between the negative precipitation anomaly percentage with the relative meteorological yield in whole growing period, seedling stage and flowering stage in the middle western and eastern regions, combined with the agricultural drought grade and the national standard as precipitation anomaly percentage and the meteorological drought grade, obtained the grade indexes as light drought, medium drought and heavy drought in three stages, such as in whole growing period, grade index of precipitation anomaly in middle western and eastern regions were $-5\% \sim -25\%$, $-25\% \sim -40\%$, $< -40\%$ and $-10\% \sim -30\%$, $-30\% \sim -45\%$, $< -45\%$ respectively; in the seedling stage, the grade index were $-10\% \sim -35\%$, $-35\% \sim -50\%$, $< -50\%$ and $-20\% \sim -45\%$, $-45\% \sim -60\%$, $< -60\%$ respectively; in the flowering stage, the drought index were same both western and eastern regions, the grade index was $-5\% \sim -30\%$, $-30\% \sim -50\%$, $< -50\%$ respectively. The drought indexes were tested and verified by using the occurred heavy drought disaster in main planting areas of potato in 2014 and 2015, and the calculated results were in good agreement with the actual occurrence.

Keywords: drought index; potato; precipitation anomaly; relative meteorological yield; Inner Mongolia

内蒙古是我国马铃薯的主产区,主要种植在东部的呼伦贝尔市东南部、兴安盟、赤峰和中部的锡林郭勒盟南部、乌兰察布市、呼和浩特市和包头市,种植区域相对集中,且已经形成很好的产业化格局。

马铃薯主要选种在灌溉条件较差的雨养农业区,受天气气候条件的影响最为明显,特别是经常受到干旱的困扰。旱灾也是内蒙古地区最主要的自然灾害,其发生的特点是范围广、频率高、程度

重、时间久^[1]。其中降水分布不均匀是该区最主要的干旱致灾因子,直接影响着干旱灾害的分布格局和发展趋势^[2]。

干旱指标是确定干旱是否发生及其严重程度的标准,是干旱研究分析的基础,也是干旱监测预警和评价的重要环节^[3-6]。国内外就干旱指标已经开展了大量研究,从不同的评价对象出发,得出一系列干旱指标,其中降水指标应用最为广泛^[7-12]。围绕马铃薯干旱指标的研究多侧重于干旱胁迫对生理生化 and 品质方面的影响^[13-15],对区域干旱灾害监测及评估的指标较少,郑丽娟^[16]基于 GIS 分析了乌兰察布市马铃薯干旱风险,苗百岭等^[17]以生长季平均温差、降雨量为指标制作了阴山旱作区马铃薯气候区划图,田志会等^[18]通过降水量就内蒙古武川的马铃薯干旱制定了指标并进行了评价,但制定的指标适用范围较小,因此有必要通过降水距平建立区域干旱指标。本文从降水和产量资料出发,运用统计学方法研究二者之间的关系,确定马铃薯全生育期、苗期和花期的农业气象干旱指标,以期为全区马铃薯干旱灾害监测及评估提供依据,同时对粮食稳产和农业防灾减灾有一定参考价值。

1 资料来源与研究方法

1.1 资料来源

马铃薯单产资料主要来自各县(市)统计年鉴等,73 个站点的产量资料较完善且连续,其中 35 个站点产量资料序列样本数为 35a(1979-2013 年),其余均为 27a(1987-2013 年)。同期地面气象观测资料来源于各旗县观测站点(图 1)。

干旱发生情况参照内蒙古灾情数据库和《内蒙古灾害大典》。

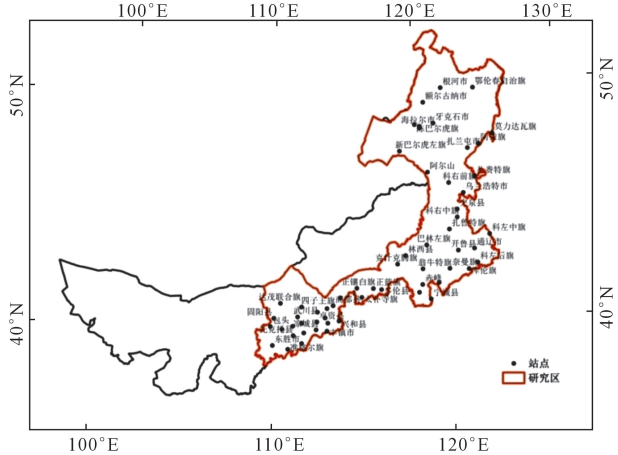


图 1 内蒙古马铃薯种植站点分布图

Fig.1 The distribution map of potato planting areas in Inner Mongolia

1.2 马铃薯发育期的确定

根据内蒙古地区各农业气象站实际观测的马铃薯发育期均值,并结合农业部门品种试验的观测资料,马铃薯生育期可划分为:播种~出苗期,出苗~分枝期,分枝~开花期,开花~可收期。内蒙古地区从西到东马铃薯在 5 月上旬~5 月下旬播种,出苗期在 6 月上旬~6 月下旬,分枝期在 7 月上旬~7 月中旬,开花期在 7 月中旬~8 月中旬,可收期在 8 月下旬~9 月下旬。依据内蒙古地区马铃薯生长发育时段的分布,本文将 5~9 月划分为马铃薯全生育期,5~6 月为苗期,7~8 月为开花期。从降水和产量资料出发,运用统计学方法建立二者之间的回归方程,结合农业干旱等级和降水距平百分率气象干旱等级国家标准,确定马铃薯苗期、花期和全生育期的轻、中、重旱的干旱指标体系。

1.3 产量分解和模拟方法

作物的产量一般分为三部分,即趋势产量、气象产量和随机噪声^[19,20],用下式表示:

$$Y = y_t + y_v + e$$

其中, Y 为作物历年单产; y_t 为反映历史时期生产力发展水平的长周期产量分量,称为趋势产量; y_v 是受以气象要素为主的短周期变化因子影响的产量分量,称为气象产量; e 为随机噪声,由于所占比例很小,一般不作考虑,即上式简化为:

$$Y = y_t + y_v$$

本文采用直线滑动平均(滑动步长为 10)模拟和建立回归模型的方法,求取马铃薯趋势产量。为了消除地区间生产水平差异和历史时期不同农业技术水平差异的影响,用波动产量除以趋势产量,得到相对气象产量 $y_r(y_r = y_v/y_t)$ 。

以下降水距平和产量的分析中,使用的都是相对气象产量资料。

2 结果与分析

2.1 干旱指标的选取

影响马铃薯生长、发育和产量形成的主要气象因子是降水,分别统计 73 个站点的历年降水距平百分率,并分析其与相对气象产量的相关关系,其中 53.4% 的站点二者存在显著和较显著的正相关;37% 的站点主要受灌溉影响,产量资料和降水关系不明显;分布在东部区 9.5% 的站点因降水太多导致减产,二者呈现显著的负相关,可以看出内蒙古大部分地区马铃薯是雨养种植,故本文选择降水距平百分率来评价马铃薯干旱是可行的。由于单一降水距平指标不能满足不同时空干旱评价的需要,文

中依据农业气候相似原理,采取聚类分析方法,对内蒙古马铃薯雨养农业种植分为中西部和东部两个区域进行干旱指标的建立与评价。

2.2 干旱指标的建立

参照内蒙古灾情数据库和《内蒙古灾害大典》,选取由于干旱引起减产率大于 5% 的年份,建立与对应三个时期的降水负距平百分率的全部数据序列

表 1 减产率 (5%) 和对应降水负距平百分率的回归方程

Table 1 Regression equations of yield reduction with precipitation negative anomaly percentage				
时段 Growth stages	区域 Region	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	<i>n</i>
全生育期 (5-9 月) Whole growth stage (5-9 month)	中西部 Midwest region	$Y=0.5538x-18.393$	0.412 **	267
	东部 Eastern region	$Y=0.3306X-18.662$	0.311 **	205
苗期 (5-6 月) Seedling stage (5,6 month)	中西部 Midwest region	$Y=0.2724x-9.05$	0.41 *	30
	东部 Eastern region	$Y=0.4209X+0.9523$	0.5928 **	30
花期 (7-8 月) Flowering stage (7,8 month)	中西部 Midwest region	$Y=0.5362x-19.054$	0.598 **	67
	东部 Eastern region	$Y=0.541X-12.58$	0.572 **	41

注:(1)*X* 为降水负距平百分率,*Y* 为减产率。(2)“***”和“*”代表 0.01 和 0.05 的显著水平。
Note:(1)*X* is the precipitation negative anomaly percentage, *Y* is the yield reducing rate. (2)“***”and“*”means the significant level of 0.01 and 0.05.

根据表 2 的方程,求得与不同降水距平百分率相对应的减产率。最终建立以降水距平百分率为主要划分因子,结合农业干旱等级^[21]和降水距平百分率气象干旱等级国家标准^[22],确定马铃薯苗期、花期和全生育期适合于内蒙古东部和中西部地区的轻、中、重旱的干旱指标体系(表 2),包括降水距平百分率和减产率指标。

从表 2 中可以看出,中西部较东部降水量少,马铃薯对水分的亏缺更为敏感,对于全生育期和苗期所建立的降水距平百分率指标梯度较小,而减产率指标则相反。在同一区域内,由于苗期需水较少,降水对其影响较小,所以降水量变化对产量的影响也较低。例如中西部地区同样导致减产率降低 5%,花期和全生育期降水距平-5%就可能发生,而苗期降水距平达到-10%才可能发生。开花时期的降水对产量的高低起到了决定性作用,不仅二者相关性最好,且指标值也较高。内蒙古地区降水量主要集中在 7、8 月份,中西部和东部的降水在这两个月的差异较小,所以干旱对马铃薯花期的影响相差不明显,最终建立的干旱指标也是相同的。

对建立降水距平干旱指标所用的降水距平百分率数据进行概率分布统计,其中轻旱比例为 46%~50.2%,中旱比例为 28%~39.7%,重旱比例为 12.5%~17.9%;对建立减产率指标所用的旱灾年减

之间的回归方程,确定二者的定量关系(表 1)。所建立的 6 个方程中相关系数都通过了显著性检验,中西部苗期的相关性较低,只通过了 0.05 水平的检验,其它时段都通过了 0.01 水平的显著性检验,特别是花期减产率和降水负距平百分率的相关性最高,可见该时期的降水对最终产量高低起决定性作用。

产率率数据进行概率分布统计,其中轻旱比例为 46%~59%,中旱比例为 27.5%~38.1%,重旱比例为 14%~21%;二者概率分布都较合理。同时按照降水距平干旱指标对研究区全部非灌溉站点三个时期三个干旱等级的降水距平百分率进行概率统计,其中轻旱比例为 47%~60%,中旱比例为 25.5%~36.6%,重旱比例为 11.3%~19.4%,分布也较合理,可见在不同区域不同发育时段建立的马铃薯干旱指标具有很好的适用性。

2.3 干旱指标的验证

利用 2014 和 2015 年内蒙古灾情数据库关于干旱发生的上报资料,主要以 7-8 月份发生严重干旱为主,此时正值马铃薯花期,因而我们主要统计花期降水距平干旱指标进行验证(表 2)。从验证表中可以看出,2014 年的严重干旱主要发生在通辽的西部、赤峰的大部、锡林郭勒盟的西南部和乌兰察布市的东北部。通过降水距平计算的干旱等级中 66.7%的站点达到重旱,26.6%的站点达到中旱,只有通辽市的奈曼旗是无旱。2015 年的干旱主要发生在通辽的西南部、赤峰的大部、乌兰察布市北部、呼和浩特市南部和包头大部。统计马铃薯种植站点的降水距平,得到 93.3%的站点干旱等级是重旱,只有 1 个站点是中旱。通过对近两年的重旱验证可见,计算结果与实际发生基本吻合。

3 结论与讨论

气候条件是决定马铃薯生长的关键因子,通过分析内蒙古地区历年降水距平百分率与相对气象产量的关系,二者相关性较好,说明降水是本区马铃薯产量的主要影响因子,这与姚玉璧等研究得到的半干旱区马铃薯产量的主要影响因子是一致的^[23-25]。马铃薯生长发育过程中对水的需求量在300~450mm,需水关键期是分枝期~开花期,即我区的7月上旬到8月中旬,该时段缺水或降水量过多,产量将大幅度下降。

通过内蒙古中西部和东部地区马铃薯全生育期、苗期和花期的降水负距平百分率与相对气象产量的回归方程,结合农业干旱等级和降水距平百分率气象干旱等级(GB/T20481-2006)国家标准,得出了三个时段基于降水距平的马铃薯轻旱、中旱和

重旱干旱等级指标。即全生育期中西部降水距平-5%~-25%、-25%~-40%、<-40%时,相对气象产量减产率分别为-5%~-25%、-25%~-45%、<-45%;东部降水距平-10%~-30%、-30%~-45%、<-45%时,相对气象产量减产率分别为-5%~-20%、-20%~-40%、<-40%。苗期中西部降水距平-10%~-35%、-35%~-50%、<-50%时,相对气象产量减产率分别为-5%~-20%、-20%~-35%、<-35%;东部降水距平-20%~-45%、-45%~-60%、<-60%时,相对气象产量减产率分别为-5%~-15%、-15%~-30%、<-30%。内蒙古地区降水集中在7、8月,所以花期中西部和东部地区干旱指标相同,即降水距平-5%~-30%、-30%~-50%、<-50%时,相对气象产量减产率分别为-5%~-25%、-25%~-45%、<-45%。

表 2 基于降水距平百分率确定的干旱指标
Table 2 The drought index based on the precipitation anomaly

区域 Region	时段 Growth stages	干旱等级 Drought grade	降水负距平 Negative precipitation anomaly/%	Pa 概率分布 Paprobability distribution of Pa/%	减产率 Yd Yield reducing rate/%	Yr 概率分布 Probability distribution of Yr/%	全部站点 Pa 概率分布 Probability distribution for all stations/%
中西部 Midwest region	全生育期 (5~9月) Whole growth period (5~9 month)	轻旱 Light drought	-25<Pa≤-5	50.2	-25<Yd≤-5	54.4	47.0
		中旱 Middle drought	-40<Pa≤-25	32.8	-45<Yd≤-25	27.5	36.6
		重旱 Heavy drought	Pa≤-40	17.0	Yd≤-45	18.1	16.4
	苗期 (5~6月) Seedling stage (5~6 month)	轻旱 Light drought	-35<Pa≤-10	46.4	-20<Yd≤-5	53.6	55.1
		中旱 Middle drought	-50<Pa≤-35	35.7	-35<Yd≤-20	28.6	25.5
		重旱 Heavy drought	Pa≤-50	17.9	Yd≤-35	17.9	19.4
	花期 (7~8月) Flowering stage (7~8 month)	轻旱 Light drought	-30<Pa≤-5	46.0	-25<Yd≤-5	46.0	51.3
		中旱 Middle drought	-50<Pa≤-30	39.7	-45<Yd≤-25	38.1	32.0
		重旱 Heavy drought	Pa≤-50	14.3	Yd≤-45	15.9	16.7
东部 Eastern region	全生育期 (5~9月) Whole growth stage (5~9 month)	轻旱 Light drought	-30<Pa≤-10	49	-20<Yd≤-5	49	60
		中旱 Middle drought	-45<Pa≤-30	35	-40<Yd≤-20	30	28.7
		重旱 Heavy drought	Pa≤-45	16	Yd≤-40	21	11.3
	苗期 (5~6月) Seedling stage (5~6 month)	轻旱 Light drought	-45<Pa≤-20	55	-15<Yd≤-5	59	58.3
		中旱 Middledrought	-60<Pa≤-45	28	-30<Yd≤-15	28	26.4
		重旱 Heavy drought	Pa≤-60	17	Yd≤-30	14	15.2
	花期 (7~8月) Flowering stage (7~8 month)	轻旱 Light drought	-30<Pa≤-5	50.0	-25<Yd≤-5	50.0	52.2
		中旱 Middle drought	-50<Pa≤-30	37.5	-45<Yd≤-25	32.5	33.5
		重旱 Heavy drought	Pa≤-50	12.5	Yd≤-45	17.5	14.3

表 3 降水距平干旱指标对花期干旱的验证

Table 3 The verification of the drought index of precipitation anomaly to flowering stage drought

种植站点 Planting site	2014 年		种植站点 Planting site	2015 年	
	降水距平 Precipitation anomaly	干旱等级 Drought grade		降水距平 Precipitation anomaly	干旱等级 Drought grade
赤峰市 Chifeng City	-65.2	重旱 Heavy drought	巴林左旗 Baarin left Banner	-56.3	重旱 Heavy drought
林西县 Linxi County	-57.9	重旱 Heavy drought	宁城县 Ningcheng County	-71.7	重旱 Heavy drought
克什克腾旗 Hexigten Banner	-57.5	重旱 Heavy drought	敖汉旗 Aohan Banner	-54.7	重旱 Heavy drought
翁牛特旗 Ongniud Banner	-75.3	重旱 Heavy drought	科左后旗 Kezuohou Banner	-36.4	中旱 Middle drought
喀喇沁旗 Harqin Banner	-47.3	中旱 Middle drought	奈曼旗 Naiman County	-72.4	重旱 Heavy drought
宁城县 Ningcheng County	-43.0	中旱 Middle drought	托克托县 Togtoh County	-59.6	重旱 Heavy drought
敖汉旗 Aohan Banner	-72.7	重旱 Heavy drought	和林格尔县 Horinger County	-50.1	重旱 Heavy drought
科左后旗 Kezuohou Banner	-49.7	中旱 Middle drought	清水河县 Qingshuihe County	-71.4	重旱 Heavy drought
库伦旗 Hure Banner	-67.3	重旱 Heavy drought	包头市 Baotou	-91.0	重旱 Heavy drought
奈曼旗 Naiman Banner	31.4	无旱 No drought	土默特右旗 Tumd right Banner	-74.1	重旱 Heavy drought
扎鲁特旗 Jarud Banner	-56.1	重旱 Heavy drought	固阳县 Guyang County	-54.0	重旱 Heavy drought
太仆寺旗 Taipusi Banner	-45.8	中旱 Middle drought	达茂旗 Damao County	-70.9	重旱 Heavy drought
化德县 Huade County	-59.6	重旱 Heavy drought	察右中旗 Chahaeryouyizhong County	-51.7	重旱 Heavy drought
察右中旗 Chahaeryouzhong Banner	-58.1	重旱 Heavy drought	察右后旗 Chahaeryouyihou County	-57.8	重旱 Heavy drought
察右后旗 Chahaeryouhou Banner	-65.9	重旱 Heavy drought	四子王旗 Siziwang Banner	-74.9	重旱 Heavy drought

影响马铃薯生长、发育、产量的形成主要气象因子除了降水还有各生育期的平均温度^[26-27]。另外,马铃薯晚疫病也是制约内蒙古马铃薯生产的主要因素之一,而蚜虫是传播病毒的最普遍的昆虫媒介,以往的研究表明,温度和 7 月平均风速对马铃薯蚜虫的生长发育、存活、繁殖及种群增长有显著的影响^[28]。利用 2014 和 2015 年马铃薯主要种植区正值花期发生重旱的灾情进行降水距平和减产率干旱指标验证,降水距平计算结果与实际发生基本吻合,但是产量资料与实际灾情发生不很一致,导致减产率指标的验证结果不好,这可能和各县(市)统计年鉴数据的可信度、温度、病虫害以及其它时段的降水情况有关,所以建立的减产率只能作为干旱判定的辅助指标,指标的合理性还需要用其它方式进行验证。内蒙古大部分地区的马铃薯种植属于雨养农业区,利用历史产量资料建立的减产率指标较农业干旱等级国家标准的指标值较大,这是符合当地实情的。

参 考 文 献:

[1] 侯琼,陈素华,乌兰巴特尔. 基于 SPAC 原理建立内蒙古草原干旱指标[J]. 中国沙漠,2008,28(2):326-331.

[2] 李树岩,刘荣花,马志红.基于降水距平的黄淮平原夏玉米干旱评估指标研究[J]. 干旱地区农业研究.2012,30(3):252-256.

[3] 姚玉璧,张存杰,邓振庸,等.气象、农业干旱指标综述[J]. 干旱地区农业研究.2007,25(1):185-190.

[4] 刘荣花,朱自玺,方文松,等.华北平原冬小麦干旱灾损风险区划[J].生态学杂志.2006,25(9):1068-1072.

[5] 商彦蕊.农业旱灾研究进展[J]. 地理与地理信息科学,2007,20(4):101-105.

[6] 侯琼,苗百岭,张晓雯.基于气象因子驱动的阴山地区马铃薯产量预测模型[J]. 干旱地区农业研究.2012,30(6):247-253.

[7] 王密侠,马成军,蔡焕杰.农业干旱指标研究与进展[J].干旱地区农业研究,1998,16(3):119-124.

[8] Zhang J Q, Seiji Hayakawa, Zhou D W, et al. Risk assessment and regionalization of ro-meteorological hazards in Jilin Province, China [J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2005,60(5):921-924.

[9] Wu H, Wilhite D A. An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska, USA [J]. Natural Hazard, 2004, 33(1):1-21.

- (上接第 193 页)

- [8] Shah K, Kumar R G, Verma S. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings [J]. Plant Science, 2001, 161: 1135-1144.
- [9] 李晶, 张丽芳, 焦健, 等. 低温胁迫下外源 ABA 对玉米幼苗生长影响[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(11): 1-7.
- [10] 李炜君, 王远皓, 张雪芬, 等. 东北地区玉米低温冷害规律研究[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 74-80.
- [11] 高灿红, 胡晋, 郑昀晔, 等. 玉米幼苗抗氧化酶活性、脯氨酸含量变化及与其耐旱性的关系[J]. 应用生态学报, 2006, 17(6): 1045-1050.
- [12] 罗丹, 张喜春, 田硕. 低温胁迫对番茄幼苗脯氨酸积累及其代谢关键酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(16): 90-95.
- [13] Hasanuzzaman M, Alam M M, Rahman A, et al. Exogenous proline and glycine betaine mediated upregulation of antioxidant defense and glyoxalase systems provides better protection against salt-induced oxidative stress in two rice (*Oryza sativa* L.) varieties [J]. Bio Med Research International, 2014: 757219.
- [14] 马延华, 王庆祥, 孙德全, 等. 玉米自交系芽期耐寒性的鉴定与评价[J]. 玉米科学, 2013, 21(2): 88-92.
- [15] 谷端银, 王秀峰, 杨凤娟, 等. 施用外源物质对园艺作物抗逆性影响研究进展[J]. 北方园艺, 2016, (3): 195-198.
- [16] 马文广, 崔华威, 李永平, 等. 不同药剂处理对低温逆境下烟草种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 科技通报, 2011, 27(6): 873-880.
- [17] 梁小红, 安颖颖, 宋峥, 等. 外源甜菜碱对低温胁迫下结缕草生理特性的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(9): 181-188.
- [18] 彭云玲, 王亚昕, 赵小强, 等. 不同玉米自交系耐寒性评价及差异分析[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(3): 267-280.
- [19] 彭云玲, 李伟丽, 王坤泽, 等. NaCl 胁迫对玉米耐盐系与盐敏感系萌发和幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(4): 62-71.
- [20] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 267-269.
- [21] 彭云玲, 赵小强, 闫慧萍, 等. 不同玉米自交系耐深播性评价及其遗传多样性分析[J]. 草业学报, 2016, 25(7): 73-86.
- [22] 陈银萍, 王晓梅, 杨宗娟, 等. NO 对低温胁迫下玉米种子萌发及幼苗生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 270-277.
- [23] Lyons J M. Chilling injury in plant[J]. Ann Rew Plant Physiol, 1973(24): 445-466.
- [24] 徐田军, 董志强, 兰宏亮, 等. 低温胁迫下聚糖素合剂对玉米幼苗光合作和抗氧化酶活性的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(2): 352-359.
- [25] 陈晓云, 杨洪兵. 外源脯氨酸对荞麦幼苗耐盐性的效应[J]. 中国农学通报, 2012, 28(36): 92-95.
- [26] 李永华, 邹琦. 植物体内甜菜碱合成相关酶的基因工程[J]. 植物生理学通讯, 2002, 38(5): 500-504.
- [26] Li Y H, Zou Q. Genetic engineering of enzymes related to glycine betaine synthesis in plants [J]. Plant Physiology Communications, 2002, 38(5): 500-504.
- [27] 韩冬芳, 李雪萍, 李军, 等. 甜菜碱提高植物抗寒性的几率及其应用[J]. 热带亚热带植物学报, 2010, 18(2): 210-216.
- [28] 刘俊英. 脯氨酸和甜菜碱对盐胁迫下加工番茄幼苗生长和生理特性的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2009.
- [29] Coughlan S J, Heber U. The role of glycine betaine in the protection of spinach thylakoids against freezing stress [J]. Planta, 1982, 156(1): 62-69.
- [30] 沙汉景. 外源脯氨酸对盐胁迫下水稻耐盐性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.