网络出版时间:2017-06-06 13:46 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.07.003
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170606.1346.006.html

密度对不同生态区马铃薯产量及块茎空间分布的影响

郑顺林[1],王良俊[2],万年鑫[1],胡建军[3],何 卫[3],袁继超[1]

(1 四川农业大学 农学院,四川 成都 611130;2 眉山东坡区农业局,四川 眉山 620000;
3 四川省农业科学院 作物研究所,四川 成都 610066)

[摘 要] 【目的】探究群体密度对四川不同生态区马铃薯产量及空间分布的影响,为马铃薯机械化采收提供依据。【方法】以"川芋 117"为试验材料,采用随机区组设计,分别在平原生态区(四川成都温江)和盆周山地生态区(四川雅安汉源)研究 5 个密度(分别为 6,9,12,15,18 万株/hm^2)对马铃薯产量及其构成因素、块茎横向和纵向分布距离、不同质量块茎空间分布的影响。【结果】1)在试验密度范围内,平原生态区马铃薯产量与密度呈凸二次函数关系,在密度为 15.75 万株/hm^2 时产量最高;山地生态区马铃薯产量与密度呈递增的线性关系,在密度为 18 万株/hm^2 时产量最高。2)密度对两个生态区单薯质量影响较大,但提高产量的主攻方向不同,平原生态区以提高单株产量为核心,山地生态区则以提高群体产量为目标。3)随密度的增加,两个生态区马铃薯块茎在纵向分布距离的集中度降低,横向分布距离上的集中度增加,块茎平均纵向分布距离与密度呈正向递增的双曲线函数关系,平原生态区和山地生态区纵向分布距离的最大值分别为 8.415 2 和 8.413 0 cm,差异不大;平均横向分布距离与密度呈正向递减的双曲线函数关系,平原生态区和山地生态区横向分布距离的最小值分别为 8.766 6 和 8.544 1 cm。4)通过建立的单薯质量空间分布的人工神经网络模型(ANN)发现,密度主要影响 80 g 以上块茎的数量和空间分布情况;80 g 以上块茎主要分布于纵向 6~10 cm 和横向 12~20 cm 的空间,且高密度下,80 g 以上块茎的数量和横向分布范围显著降低。当横向分布距离大于 20 cm 时,平原生态区以 40 g 及以下块茎为主,山地生态区则以 40~80 g 块茎为主。【结论】改变密度能影响单位面积结薯数,从而有效控制块茎大小,最终影响块茎在纵向和横向分布距离上的集中程度。

[关键词] 马铃薯;生态区;种植密度;空间分布;产量构成;人工神经网络

[中图分类号] S532 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2017)07-0015-09

Effects of plant density on tuber yield and spatial distribution response of potato from different ecological regions in Sichuan

ZHENG Shunlin[1], WANG Liangjun[2], WAN Nianxin[1],
HU Jianjun[3], HE Wei[3], YUAN Jichao[1]

(1 *College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan* 611130, *China*; 2 *Agriculture Bureau of Dongpo County, Meishan, Sichuan* 620000, *China*; 3 *Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan* 610066, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study explored the effects of density on potato spatial distribution and yield in different ecological regions to provide basis for mechanized harvesting of potato. 【Method】 "Chuanyu 117" was planted in Wenjiang plain eco-region and Hanyuan mountainous eco-region with five plant densities (6, 9, 12, 15, and 18×10^4 tubers/hm^2) based on a randomized block design with three replicates each. 【Result】 1) Within tested densities, a convex quadratic curve relationship was found between potato tuber yield and density in plain eco-region. The highest yield was obtained when the density was 15.75×10^4 tu-

[收稿日期] 2016-06-10
[基金项目] 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS20);四川省"十三·五"育种攻关及配套项目(2016NYZ0032,2016NYZ0051-5)
[作者简介] 郑顺林(1974-),男,重庆奉节人,副教授,主要从事马铃薯高产栽培技术研究。E-mail:24897731@qq.com
[通信作者] 袁继超(1963-),男,重庆江津人,教授,主要从事作物高产栽培技术研究。E-mail:yuanjichao5@163.com

bers per hectare. The yield in mountainous eco-region was linearly related with plant density with the maximum at the density of 18×10^4 tubers per hectare. 2) Density had great influences on tuber weight at both regions. In the plain region, improvement of tuber weight per plant should be focused while improvement of population yield should be targeted in the mountainous region. 3) With the increase of density, the concentration in longitudinal direction reduced while that in horizontal direction increased. The average vertical distribution distance of tubers exhibited a positive incremental hyperbolic relationship with density, and the maximum distances were 8.415 2 and 8.413 0 cm for plain and mountainous regions, respectively. The transverse distribution distance exhibited a positive hyperbolic declining relationship with density, and the minimum distances were 8.766 6 and 8.544 1 cm, respectively. 4) The artificial neural network (ANN) model of the spatial distribution of tuber weight indicated that density mainly affected the numbers and spatial distribution of tubers over 80 g. Tubers over 80 g were mainly distributed longitudinally (6—10 cm) and transversely (12—20 cm) within the high density treatment, and the transverse distribution and number of tubers over 80 g reduced significantly with the increase of density. When the transverse distribution distance was greater than 20 cm, potato tubers in plain region were mainly under 40 g while that in mountainous region were between 40 and 80 g.【Conclusion】Density change could effectively control tuber size through the number of tubers per unit area, and eventually affect the concentration in longitudinal and transverse directions.

Key words: potato; ecological regions; plant density; spatial distribution; yield component; artificial neural network

马铃薯广泛分布于中国的山地、丘陵和平原等各种生态区,随着2015年中国马铃薯主食化战略的实施,其在解决粮食安全问题上将发挥更重要的作用,发展潜力巨大[1]。四川垂直气候特征明显,是典型的立体农业生态区,以盆周山区和川西平原为代表的典型生态区是四川马铃薯的主产区,承担着粮食增产增收的重要任务,但目前受制于机械化程度及研究水平,平原生态区和山地生态区马铃薯增产的主攻途径一直不明确。

增加群体密度是提高马铃薯单产的有效途径之一,但不同地区的高产密度存在一定差异,余文畅等[2]指出,湖南秋马铃薯产量与密度呈线性正相关,在密度为1.5万株/hm^2下产量最高;而赵沛义等[3]的研究表明,马铃薯产量与密度呈开口向下的抛物线关系,且随播期的推迟获得最高产量的密度增大。前人研究表明,增加密度能显著增加群体叶面积,但密度过高会导致叶面积和净光合速率降低,且棉花单株冠幅[4]、大豆节数[5]及马铃薯单株匍匐茎数和平均单薯质量[6]都随密度的增加而显著下降。马铃薯群体数量的增加必然引起个体竞争加剧,个体生长受抑制,最终可能导致块茎的空间分布存在差异。随着中国城镇化进程推进,农业劳动力不足成为农业持续发展的重要障碍,因此机械化是马铃薯高产高效发展的必然途径。但马铃薯在收获中伤薯率较高,机械损伤中的70%由收获造成,而收获中的伤薯率最高可达总产量的30%[7-8],严重影响马铃薯产量和商品价值,因此设计适宜的收获机具是减少块茎损失的最有效途径。马铃薯收获机通常以块茎横向和纵向分布范围以及播种深度作为设计依据[9]。匍匐茎对块茎的大小和分布起着决定性作用,较大的叶面积和叶片干物质积累量有利于匍匐茎的形成[10-11],而较大的冠层也能显著促进块茎的膨大[12]。但目前未见到种植密度对块茎空间分布影响的有关报道。本试验分别在四川平原和山地两个典型生态区设置大田试验,主要探究不同密度群体对这两个生态区马铃薯产量构成和块茎空间分布的影响,揭示密度与块茎空间分布的关系,探讨两个典型生态区马铃薯增产的主攻方向,为不同生态区马铃薯收获机械设计提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验点

试验以四川主推马铃薯新品种“川芋117”为材料,由四川省农业科学院作物研究所提供。试验分别在四川平原生态区成都市温江区(海拔500 m左右)和盆周山地生态区(以下简称山地生态区)雅安市汉源县(海拔1 300 m左右)进行。各生态区马铃薯不同生育阶段气象因素见表1。

表 1　不同生态区马铃薯各生育阶段的气象因素

Table 1　Meteorological factors during growth stages of potato in different ecological regions

生态区 Ecological region	生育阶段 Growth stage	降雨量/mL Rains	积温(≥5 ℃)/℃ Accumulated temperature	日照时数/h Sunshine duration	日平均温度/℃ Daily mean temperature
平原生态区 Plain eco-region	苗期－成熟期 Seeding stage－Maturity stage	139.0	1 381.5	332.9	17.3
	苗期－块茎膨大期 Seeding stage－Tuber bulking stage	7.9	513.0	149.9	15.5
	块茎膨大期－成熟期 Tuber bulking stage－Maturity stage	131.1	868.5	183.0	18.5
山地生态区 Mountainous eco-region	苗期－成熟期 Seeding stage－Maturity stage	130.7	1 477.1	322.4	17.2
	苗期－块茎膨大期 Seeding stage－Tuber bulking stage	56.2	633.1	170.8	15.4
	块茎膨大期－成熟期 Tuber bulking stage－Maturity stage	74.5	844.0	151.6	18.8

1.2　试验设计

试验设 D1(6 万株/hm^2)、D2(9 万株/hm^2)、D3(12 万株/hm^2)、D4(15 万株/hm^2)、D5(18 万株/hm^2) 5 个密度，采用随机区组设计，3 个重复。分别在温江和汉源两个典型生态区进行，小区面积均为 14 m^2(2 m×7 m)，采用 60 cm＋40 cm 的宽窄行配置，起垄栽培，一垄双行。用 30～40 g 的整薯播种，深度在 10 cm 左右。平原生态区(温江)播种时间为 2013-12-27，收获时间为 2014-05-14；盆周山地生态区(汉源)播种时间为 2014-01-14，收获时间为 2014-05-25。施肥统一按高产用量进行，施肥量为：纯 N 112.5 kg/hm^2，P_2O_5 127.5 kg/hm^2，KO_2 112.5 kg/hm^2，腐熟有机肥 15×10^3 kg/hm^2。其他田间管理与当地生产相同。

1.3　测定项目及方法

有效株数：在出苗后 14 d 统计各处理实际苗数，通过出苗率计算单位面积有效株数。块茎分布范围：成熟期，在小区中行连续选取有代表性植株 5 株，将地上茎齐垄面水平割除，以茎作为中心，垄面作为水平面，用自制可移动垂直水平尺(专利号：ZL201520316103.9)，测量块茎的横向分布距离(茎到块茎最远端的距离)和纵向分布距离(水平垄面到块茎最底端的距离)，将块茎编号取回，用电子天平称质量，建立不同密度下块茎质量的空间分布模型。产量及其构成：在成熟期，于小区中行连续选取 10 株代表性植株，统计单株结薯数和单薯质量。最终小区产量按实收面积进行计产，换算成单位面积产量。

1.4　数据处理

试验数据用 Excel 2010 和 DPS 7.05 进行统计分析，采用 LSD 法进行多重比较，用 Sigmaplot 12.5和 JMP 10 制图及建模。

2　结果与分析

2.1　密度对不同生态区马铃薯产量及其构成的影响

不同密度下各生态区马铃薯产量及其构成因素的测定结果见表 2。

表 2　不同密度下各生态区马铃薯的产量及其构成因素

Table 2　Yield and yield components under different density treatments

生态区 Ecological region	密度/(万株·hm^{-2}) Density	产量/(t·hm^{-2}) Yield	有效株数/(万株·hm^{-2}) Effective plants	单株结薯数 Tubers per plant	单薯质量/g A single tuber weight
平原生态区 Plain eco-region	6	42.05 c	5.52 e	7.82 a	103.22 a
	9	44.27 b	8.20 d	7.75 ab	73.87 b
	12	47.71 a	11.00 c	7.00 b	65.60 c
	15	48.05 a	13.94 b	5.87 c	62.18 d
	18	47.63 a	16.41 a	6.08 c	49.53 e
平均值 Average		45.94	11.01	6.90	70.88
山地生态区 Mountainous eco-region	6	45.24 c	5.50 e	7.78 a	112.15 a
	9	47.09 bc	8.39 d	7.22 ab	80.98 b
	12	48.03 bc	10.24 c	7.11 ab	71.01 b
	15	48.81 b	13.30 b	6.89 b	56.74 c
	18	54.92 a	14.96 a	7.11 ab	54.99 c
平均值 Average		48.82	10.48	7.22	75.17

注：同列数据后标不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。表 4 同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at $P<0.05$. The same for Table 4.

由表2可见,增加密度后,在增加有效株数的同时,单株结薯数和单薯质量都明显降低。不同生态区马铃薯植株生长情况存在差异,密度对产量及其构成因素的影响程度也不尽一致。5种密度处理下,平原生态区的有效株数、单株结薯数和单薯质量的变异系数分别为5.80%,13.18%和28.34%,而山地生态区则分别为7.50%,4.63%和30.95%。可见,密度对各生态区单薯质量影响较大,且对山地生态区的影响大于平原生态区;而对单株结薯数的影响,平原生态区大于山地生态区;对有效株数的影响,山地生态区大于平原生态区。

在试验密度范围内,平原生态区的产量(y)与密度(x)呈凸二次函数关系,回归方程为 $y_{平原}=-0.066\ 5x^2+2.094\ 2x+31.586\ 0$ ($R^2=0.963\ 8^*$),在密度为15.75万株/hm^{2}时产量最高;而山地生态区的产量则与密度呈线性正相关,回归方程为 $y_{山区}=0.702\ 7x+40.386\ 0$ ($R^2=0.828\ 4^*$),密度最高时产量最高,密度每增加1.00万株/hm^2,产量提高0.702 7 t/hm^2。

由相关分析结果(表3)可知,两个生态区的有效株数与产量都呈极显著正相关;除山地生态区的单株结薯数与产量的相关性不显著外,单株结薯数和单薯质量与产量均呈负相关,且均达极显著水平。通径分析发现,有效株数对山地生态区产量的直接作用最大,单薯质量对平原生态区的直接作用最大。两个生态区各因素对产量的贡献率存在差异,平原生态区为单薯质量>单株结薯数>有效株数,山地生态区为有效株数>单薯质量>单株结薯数。表明平原生态区要以发挥单株生产潜力,提高单株产量为主攻方向;而山地生态区要以提高群体产量为目标。

表3 不同生态区马铃薯产量构成因素对产量的作用

Table 3 Contribution of yield components to yield in different ecological regions

生态区 Ecological region	产量构成因素 Yield components	与产量相关系数 Correlation coefficient with yield	直接作用 Direct effect	贡献率/% Contribution rate
平原生态区 Plain eco-region	有效株数 Effective plants	0.848 4**	−0.179 1	14.15
	单株结薯数 Tuber number per plant	−0.756 7**	−0.340 8	24.02
	单薯质量 A single tuber weight	−0.860 2**	−0.771 7	61.83
山地生态区 Mountainous eco-region	有效株数 Effective plants	0.818 8**	1.646 6	61.19
	单株结薯数 Tuber number per plant	−0.176 1	0.276 0	10.26
	单薯质量 A single tuber weight	−0.697 9**	0.768 5	28.56

注:**代表在$P=0.01$水平极显著相关。表5同。

Note: ** indicates significant difference at $P=0.01$. The same for Table 5.

2.2 密度与马铃薯块茎平均分布距离的关系

由表4可知,不论是在平原生态区还是在山地生态区,随着密度的增大,平均纵向分布距离呈增加趋势,平均横向分布距离总体呈减小趋势。5种种植密度下,平原生态区和山地生态区马铃薯块茎平均纵向分布距离的变异系数分别为6.38%和3.51%,平均横向分布距离的变异系数分别为11.45%和10.12%。表明在不同生态区,密度对马铃薯块茎平均横向分布距离的影响大于对纵向分布距离的影响,但对平均纵向分布距离的影响程度差异较大,对平均横向分布距离的影响程度差异较小。

表4 不同密度下各生态区马铃薯块茎的平均纵向和横向分布距离

Table 4 Average longitudinal and transverse distances under different density treatments cm

密度/(万株·hm^{-2}) Density	平均纵向分布距离 Average longitudinal distance		平均横向分布距离 Average transverse distance	
	平原生态区 Plain eco-region	山地生态区 Mountainous eco-region	平原生态区 Plain eco-region	山地生态区 Mountainous eco-region
6	6.90 c	7.37 c	13.63 a	12.30 a
9	7.20 b	7.76 b	12.09 b	10.92 b
12	7.32 b	7.92 ab	11.41 c	10.96 b
15	7.86 a	7.97 ab	10.31 d	10.31 b
18	8.05 a	8.07 a	10.60 d	9.31 c
平均值 Average	7.47	7.82	11.61	10.76

拟合发现,块茎平均纵向分布距离(Z)与密度(x)呈正向递增的双曲线函数($Z=a/x+b$)关系,两个生态区的拟合方程分别为 $Z_{平原}=-9.819\ 6/x+8.415\ 2$($R^2=0.835\ 8^*$)和 $Z_{山区}=-6.154\ 7/x+$

8.413 0(R^2=0.991 0**)。由以上 2 个方程可知，平原生态区和山地生态区马铃薯块茎平均纵向分布距离的最大值分别为 8.415 2 和 8.413 0 cm，差异不大。块茎平均横向分布距离(H)与密度(x)呈正向递减的双曲线函数($H=a/x+b$)关系，两个生态区的拟合方程分别为 $H_{平原}=29.393\ 9/x+8.766\ 6$ (R^2=0.963 8**)和 $H_{山区}=22.923\ 2/x+8.544\ 1$ (R^2=0.872 8*)。由以上 2 个方程可知，平原生态区和山地生态区马铃薯块茎平均横向分布距离的最小值分别为8.766 6和 8.544 1 cm。

2.3　不同密度下马铃薯块茎个数分布范围的累积频率

不同密度下各生态区马铃薯块茎个数累积百分率的分布情况见图 1。

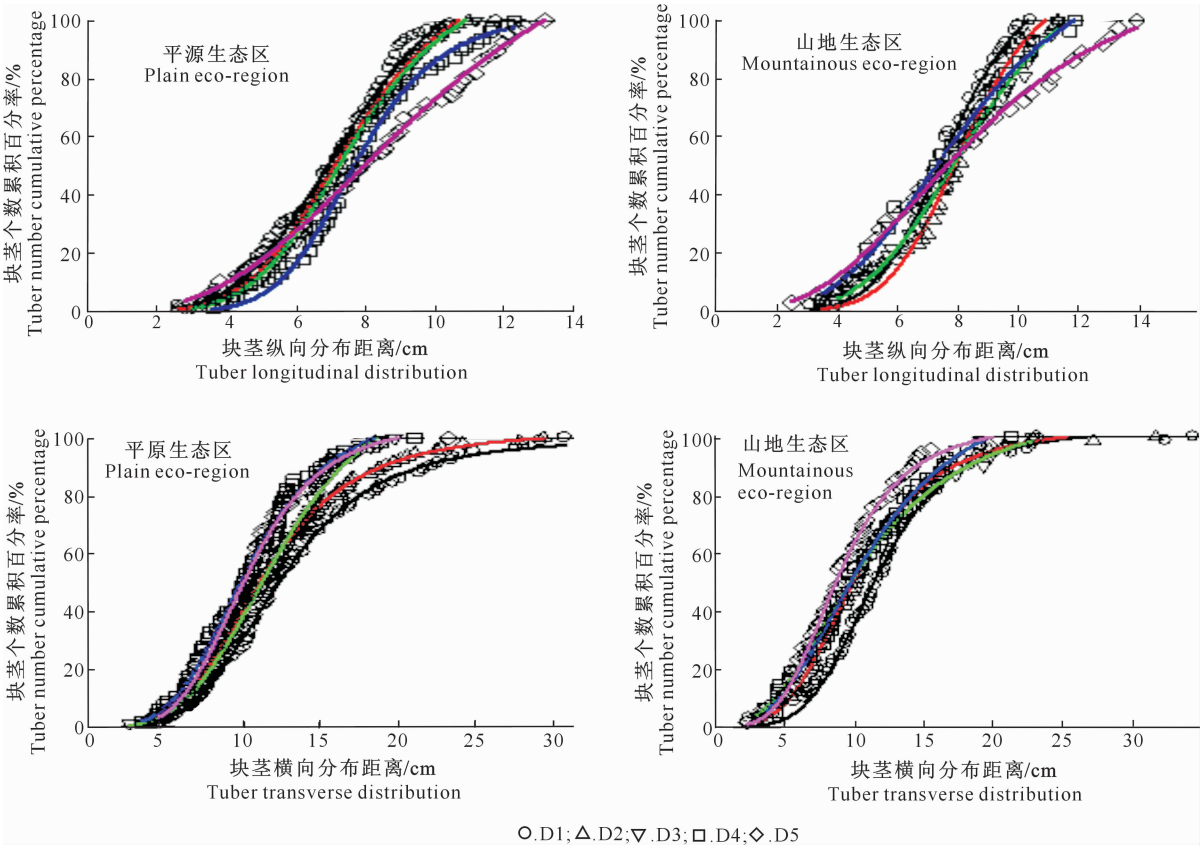

图 1　不同密度下各生态区马铃薯块茎个数累积百分率的分布情况

Fig. 1　Cumulative tuber number under different density treatments

由图 1 可知，两个生态区，在试验密度范围内，随着密度的增加，块茎纵向分布距离有增加的趋势，块茎的集中度降低；横向分布距离则明显变小，块茎的集中度增加。通过拟合发现，两个生态区各密度下马铃薯块茎纵向和横向块茎个数累积百分率(F)随分布距离(μ)的变化趋势均符合 logistic 方程 $F=a/[(\mu/c)^b+1]$的变化趋势，方程参数和决定系数(R^2)见表 5。

表 5　不同密度下各生态区马铃薯块茎个数累积百分率分布方程的参数及决定系数(R^2)

Table 5　Cumulative equation parameters associated with potato tuber number and determine coefficients (R^2) under different density treatments

生态区 Ecological region	密度/(万株·hm^{-2}) Density	块茎纵向分布方程 Longitudinal distribution equation of tuber				块茎横向分布方程 Transverse distribution equation of tuber			
		a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
平原生态区 Plain eco-region	6	128.04	−4.32	7.67	0.989 4**	100.10	−3.93	12.34	0.997 5**
	9	121.23	−4.67	7.69	0.997 7**	102.49	−3.78	11.24	0.998 7**
	12	118.49	−4.90	7.73	0.997 2**	124.03	−3.62	12.53	0.993 6**
	15	102.72	−6.41	7.75	0.995 9**	111.87	−3.75	10.46	0.992 8**
	18	146.33	−2.84	10.04	0.996 0**	106.27	−4.22	10.34	0.993 3**

表5(续) Continued table 5

生态区 Ecological region	密度/(万株·hm^{-2}) Density	块茎纵向分布方程 Longitudinal distribution equation of tuber				块茎横向分布方程 Transverse distribution equation of tuber			
		a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
山地生态区 Mountainous eco-region	6	118.89	−5.93	7.80	0.992 6**	102.26	−4.38	11.46	0.993 0**
	9	119.89	−6.03	8.32	0.984 0**	104.06	−3.52	10.16	0.996 8**
	12	127.19	−4.35	8.64	0.994 4**	111.94	−2.60	10.58	0.996 5**
	15	128.76	−3.51	8.30	0.994 3**	119.40	−2.79	10.97	0.991 9**
	18	122.64	−2.87	8.69	0.994 5**	105.36	−3.63	8.92	0.996 3**

由表6可知,在平原生态区和山地生态区,50%块茎纵向分布距离的变异系数分别为5.80%和3.44%,90%块茎纵向分布距离的变异系数分别为9.74%和10.38%;50%块茎横向分布距离的变异系数分别为9.11%和9.64%,90%块茎横向分布距离的变异系数分别为15.26%和8.95%。可见,密度对块茎横向分布距离的影响更大。随密度的增加,两个生态区50%和90%块茎的横向分布距离都随密度的增加而总体减小,其中平原生态区和山地生态区马铃薯最低密度下90%块茎的横向分布距离分别较最高密度下高出38.81%和24.45%。

表6 不同密度下各生态区马铃薯50%和90%块茎纵向、横向分布距离

Table 6 Potato tuber 50% and 90% distribution distances cm

生态区 Ecological region	密度/(万株·hm^{-2}) Density	50%块茎分布距离 Potato tuber distribution distance at 50%		90%块茎分布距离 Potato tuber distribution distance at 90%	
		纵向 Longitudinal	横向 Transverse	纵向 Longitudinal	横向 Transverse
平原生态区 Plain eco-region	6	6.92	12.33	9.36	21.53
	9	7.13	11.10	9.65	18.95
	12	7.25	11.24	9.78	16.39
	15	7.69	9.88	10.52	15.25
	18	7.97	10.05	11.84	15.51
山地生态区 Mountainous eco-region	6	7.39	11.34	9.45	18.07
	9	7.89	9.94	9.99	17.22
	12	7.82	9.74	10.59	18.21
	15	7.29	9.75	10.55	16.38
	18	7.63	8.67	12.37	14.52

2.4 马铃薯单薯质量空间分布的人工神经网络(ANN)模型的建立

由于平原生态区和山地生态区的生态因子差异较大,使得平均单薯质量差异显著,因此分别将两个生态区的密度(x)、块茎纵向分布距离(z)和块茎横向分布距离(h)作为变量,建立单薯质量(Y)空间分布的人工神经网络(ANN)模型。经过若干次训练后,得到了能较好地反映两个生态区不同密度下单薯质量的空间分布模型,两个生态区模型训练和验证时的决定系数(R^2)都在0.89以上,均方根误差和绝对值偏差均值都在10 g左右(表7)。

表7 各生态区马铃薯单薯质量空间分布的人工神经网络模型的参数

Table 7 Artificial neural network model for spatial distribution of potato tuber weight parameters

生态区 Ecological region	决定系数(R^2) Determinant coefficients		均方根误差/g Root mean square error		绝对偏差均值/g Mean absolute deviation		频数总和 Sum frequency	
	训练 Train	验证 Validation	训练 Train	验证 Validation	训练 Train	验证 Validation	训练 Train	验证 Validation
平原生态区 Plain eco-region	0.891 1	0.893 3	11.788 5	12.363 7	9.691 7	10.625 6	100	51
山地生态区 Mountainous eco-region	0.914 9	0.917 7	10.772 9	10.869 7	8.970 3	8.985 2	85	43

平原生态区不同密度下单薯质量($Y_{平原}$)的空间分布模型为:

$$Y_{平原} = -45.93H_1 - 58.65H_2 + 81.25H_3 - 25.92;$$

$$H_1 = \tan h[0.5 \times (0.105\ 1x + 0.291\ 2z + 0.113\ 1h - 6.792\ 7)];$$

$$H_2 = \tan h[0.5 \times (0.095\ 5x - 1.044\ 2z + 0.487\ 5h - 2.180\ 8)];$$

$$H_3 = \tan h[0.5 \times (0.049\ 2x + 0.058\ 0z + 0.500\ 1h - 5.161\ 5)]。$$

山地生态区不同密度下单薯质量($Y_{山区}$)的空间分布模型为：

$$Y_{山区}=-165.98H_1+136.65H_2+35.02H_3+15.65;$$

$$H_1=\tan h[0.5\times(-0.024\ 4x+0.229\ 1z-0.244\ 6h+0.670\ 1)];$$

$$H_2=\tan h[0.5\times(-0.034\ 5x+0.363\ 1z-0.148\ 7h-0.399\ 7)];$$

$$H_3=\tan h[0.5\times(-0.025\ 1x-0.030\ 2z-0.009\ 6h+0.605\ 8)]。$$

其中，H_1、H_2 和 H_3 代表 ANN 中 3 个不同隐含层的权值。通过该模型可预测不同种植密度下不同空间位置上的单薯质量和不同质量级薯块的分布范围。

将模型预测的单薯质量做成等高线图，结果见图 2。由图 2 可见，当纵向分布距离为 0～4 cm 时，平原生态区以 40 g 及以下的块茎为主，山地生态区以 60 g 及以下的块茎为主；当纵向分布距离为 4～6 cm 时，两个生态区都以 40～80 g 的块茎为主；而 80 g 以上块茎主要集中在 6 cm 深度以下；当纵向距离超过 10 cm 时，随密度的增加块茎质量明显降低。两个生态区各密度下单薯质量都随横向分布距离的增加而先增大后降低。当横向分布距离为 0～5 cm 时，以 20 g 及以下的块茎为主；当横向分布距离为 5～10 cm 时，以 20～80 g 的块茎为主，且各密度间无显著差异；80 g 以上块茎的横向分布距离随密度的增加而变小，在两个生态区最低密度下，80 g 以上块茎横向分布距离在 12～20 cm，最高密度下 80 g 以上块茎横向分布距离主要在 10～15 cm；当横向分布距离大于 20 cm 时，平原生态区以 40 g 及以下块茎为主，山地生态区则以 40～80 g 块茎为主。

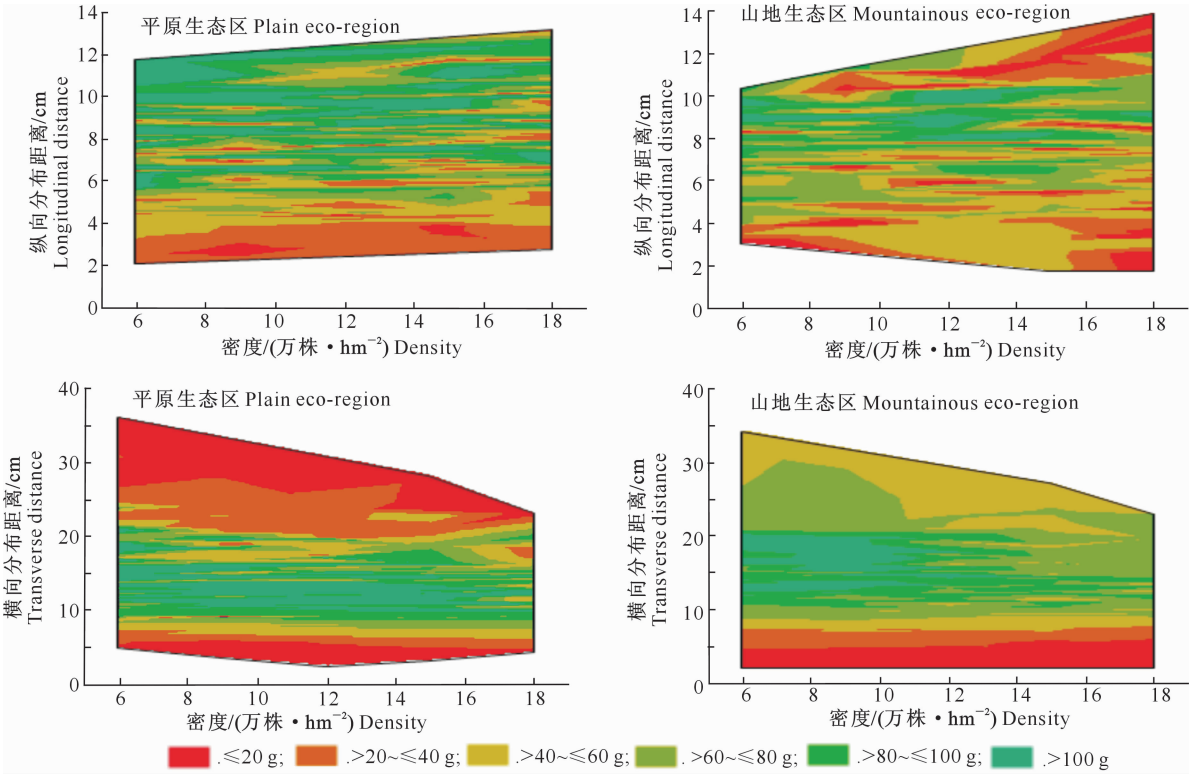

图 2　不同密度下各生态区马铃薯单薯质量空间分布模型预测值的等高线图

Fig. 2　Predicted potato tuber weight distribution under different density treatments

3　结论与讨论

适当提高马铃薯种植密度有利于改善群体结构，显著提高马铃薯群体产量[13-14]。但不同生态区差异较大，马铃薯植株生长和产量形成情况不尽一致，因而密度对产量及其构成的影响程度会存在一定差异[15-16]。本研究结果显示，在试验密度范围内，平原生态区产量与密度呈凸二次函数关系，在密度为 15.75 万株/hm² 时产量最高；山地生态区产量与密度呈线性递增关系，均在最高密度下获得最高产量。虽然密度对两个生态区平均单薯质量的影响大于其他产量构成因素，但影响强度在各生态区存在

一定差异。说明增加密度的同时,在山地生态区应在注重提高单薯质量的前提下提高有效株数,从而协调各产量构成因素,以获得群体产量最大化;而在平原生态区,则应主攻单薯质量和单株结薯数,从而获得单株产量的最大化。

谢从华等[17-18]研究指出,密度主要通过对单位面积上块茎数量的调控来影响块茎获得的光合产物的产量和块茎的生长发育,而单位面积的块茎数量和平均块茎质量对块茎的大小、分布起着主要作用。本研究也发现,增加密度能显著增加有效株数,降低单薯质量;密度与块茎平均纵向分布距离总体呈正相关关系,而与块茎平均横向分布距离总体呈负相关关系。

密度过大会显著降低大中薯率,增加小薯率[19-20]。本研究通过建立不同密度下块茎质量的空间分布ANN模型发现,增加密度显著降低了80 g以上块茎的数量和分布范围。其中各密度下,纵向0~6 cm和横向0~12 cm内都以80 g及以下块茎为主,块茎质量随纵向、横向分布距离的增加而增大,且密度的影响不明显;80 g以上块茎则主要分布于纵向6~10 cm和横向12~20 cm的空间内,高密度(15万株/hm^2 及以上)下,其块茎数量和横向分布距离明显降低;当纵向距离大于10 cm、横向距离大于20 cm时,80 g以上块茎显著减少,同时随纵向和横向分布距离的加大,块茎质量变小。说明密度主要影响80 g以上块茎的数量和空间分布。

综上所述,在本研究范围内,增加密度能显著增加马铃薯产量,但不同生态区下密度对产量的影响程度存在一定差异,提高产量的途径不同,在平原生态区以适当降低密度、提高单株产量为目标;而山地生态区则以适当增加密度、提高群体产量为方向。密度除能通过改变单位面积结薯数有效控制块茎大小以外,还能影响块茎在纵向和横向分布距离上的集中程度,降低80 g以上块茎的数量和空间分布范围。因此,在一定范围内改变密度可调控马铃薯块茎空间分布,为收获机械设计提供了必要的参考。

[参考文献]

[1] 屈冬玉,谢开云,金黎平,等.中国马铃薯产业发展与食物安全[J].中国农业科学,2005,38(2):358-362.
Qu D Y,Xie K Y,Jin L P,et al. Development of potato industry and food security in China [J]. Scientia Agricultura Sinica,2005,38(2):358-362.

[2] 余文畅,陈振华,刘克荣,等.秋马铃薯不同栽培密度对产量和效益的影响[J].湖北农业科学,2009,48(9):2082-2083.
Yu W C,Chen Z H,Liu K R,et al. Effect of density on the yield and efficiency of autumn potato [J]. Hubei Agricultural Sciences,2009,48(9):2082-2083.

[3] 赵沛义,妥德宝,段 玉,等.内蒙古后山旱农区马铃薯适宜播种密度和播期研究[J].华北农学报,2005,20(S1):10-14.
Zhao P Y,Tuo D B,Duan Y,et al. Studies on suitable planting density and time of sowing of potato on dry land in Houshan Area,Inner Mongolia [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2005,20(S1):10-14.

[4] 吕 新,张 伟,曹连莆.不同密度对新疆高产棉花冠层结构光合特性和产量形成的影响[J].西北农业学报,2005,14(1):142-148.
Lü X,Zhang W,Cao L P. Effect of different density on cotton canopy structure,photosynthesis and yield formation in high-yield cotton of Xinjiang [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica,2005,14(1):142-148.

[5] 张晓艳,杜吉到,郑殿峰.密度对大豆群体冠层结构及光合特性的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(4):75-80.
Zhang X Y,Du J D,Zheng D F. Effect of density on canopy structure and photosynthetic characteristics in soybean population [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2011,29(4):75-80.

[6] 付一程.原原种种薯大小与种植密度对马铃薯生长发育和产量形成的影响[D].四川雅安:四川农业大学,2012:21-23.
Fu Y C. Effects of different sizes of pre-elite seed and densityon the growth and yield formation of potato [D]. Ya'an,Sichuan:Sichuan Agriculture University,2012:21-23.

[7] 王咏梅,孙 伟,王关平.关于马铃薯收获中机械损伤的研究[J].安徽农业科学,2014,42(9):2837-2840.
Wang Y M,Sun W,Wang G P. Research on mechanical damage to potato in harvesting [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2014,42(9):2837-2840.

[8] Peters R. Damage of potato tubers,a review [J]. Potato Research,1996,39(4):479-484.

[9] 张德学.新型马铃薯收获机的设计[D].山东泰安:山东农业大学,2014:9-10.
Zhang D X. Design of a new type of potato harveste [D]. Tai'an,Shandong:Shandong Agricultural University,2014:9-10.

[10] 刘克礼,高聚林,张宝林.马铃薯匍匐茎与块茎建成规律的研究[J].中国马铃薯,2003,17(3):151-156.
Liu K L,Gao J L,Zhang B L. The regular pattern of stolon and tuber formation in potato [J]. Chinese Potato Journal,2003,17(3):151-156.

[11] 刘克礼,高聚林,张宝林,等.马铃薯器官生长发育与产量形成的研究[J].中国马铃薯,2003,17(3):141-145.
Liu K L,Gao J L,Zhang B L,et al. Organ development and yield formation in potato [J]. Chinese Potato Journal,2003,17(3):141-145.

[12] 杨明君,樊民夫,李久昌.旱作马铃薯冠层对块茎膨大速度及其产量的影响[J].干旱地区农业研究,1994,12(2):105-110.
Yang M J,Fan M F,Li J C. The effects of potato canopies un-

der dryland tillage upon expansion speed and yields of tubers [J]. Agricultural Research in the Arid Areas，1994，12(2)：105-110.

[13] 李惠贤，刘永贤，李文宝，等. 5 个青薯系列马铃薯品种不同种植密度对生长性状及产量的影响试验 [J]. 广西农业科学，2010，41(9)：910-913.

Li H X，Liu Y X，Li W B，et al. Effects of different planting densities on agronomic traits and yield of five Qingshu series potato varieties [J]. Guangxi Agricultural Sciences，2010，41(9)：910-913.

[14] 李　阳，刘世海，丁世成，等. 整薯大小与栽培密度对马铃薯生长发育及产量的影响 [J]. 湖南农业科学，2011(11)：49-52，55.

Li Y，Liu S H，Ding S C，et al. Impacts of entire potato size and planting density on growth and yield of potato [J]. Hunan Agricultural Sciences，2011(11)：49-52，55.

[15] 肖　特. 温光对马铃薯植株生长及块茎形成发育影响的研究 [D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2013：18-27.

Xiao T. Effects of temperature and light on plant growth，tuber formation and development of potato cultivars (*Solatium tuberosum* L.) [D]. Hohhot：Inner Mongolia Agricultural University，2013：18-27.

[16] 姚玉璧，王润元，邓振镛，等. 黄土高原半干旱区气候变化及其对马铃薯生长发育的影响 [J]. 应用生态学报，2010，21(2)：379-385.

Yao Y B，Wang R Y，Deng Z Y，et al. Effects of climate change on potato grow in semi-arid region of Loess Plateau，China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2010，21(2)：379-385.

[17] 谢从华，陈耀华，田恒林. 种植密度与马铃薯块茎大小的分布：Ⅰ. 密度与块茎生长的关系 [J]. 中国马铃薯，1991，5(2)：70-78.

Xie C H，Chen Y H，Tian H L. Plant density and tuber size distribution in potatoes：Ⅰ. relationship between plant density and tuber growth [J]. Chinese Potato Journal，1991，5(2)：70-78.

[18] 谢从华，田恒林，陈耀华. 种植密度与马铃薯块茎大小的分布：Ⅱ. 块茎大小分布的数学模型及其应用 [J]. 中国马铃薯，1991，5(8)：141-147.

Xie C H，Tian H L，Chen Y H. Plant density and tuber size distribution in potatoes：Ⅱ. a mathematical model of tuber size distribution and its application [J]. Chinese Potato Journal，1991，5(8)：141-147.

[19] 罗维禄. 不同栽培方式与密度对冬种马铃薯中薯 3 号的影响 [J]. 福建农业学报，2011，26(6)：961-965.

Luo W L. Effects of cultivation modes and planting density on potato Zhongshu 3 (*Solanum tubersum* L.) in winter season [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences，2011，26(6)：961-965.

[20] 雷昌云，张艳霞，羿国香，等. 江汉平原马铃薯秋播密度对农艺性状及产量的影响 [J]. 长江流域资源与环境，2013，22(2)：1653-1656.

Lei C Y，Zhang Y X，Yi G X，et al. Effects of density on main agronomic traits and yield of autumn sowing potato in Jianghan plain [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2013，22(2)：1653-1656.