

华北寒旱区不同品种马铃薯的氮效率评价

任冬雪¹,张立峰^{1,2},刘玉华^{1,2},田再民³,龚学臣³

(1. 河北农业大学农学院, 河北 保定 071000; 2.农业部张北农业资源与生态环境重点野外科学观测试验站,河北 张家口 076450;
3.河北北方学院农林科技学院, 河北 张家口 075000)

摘要:采用裂区试验设计,以华北坝上及其周边寒旱区 15 个常规栽培品种为供试材料,设置不施氮与施氮两个水平,从块茎产量、氮吸收量、氮生物学效率、肥料氮农学效率、偏生产力、表观利用率等方面进行不同品种氮效率评价;在此基础上,采用隶属函数法对各品种进行综合氮效率鉴评与分类。结果表明:品种、施氮水平、品种×施氮水平等对马铃薯产量具有极显著的影响,在不施氮肥的条件下北方 002 的产量最高,为 5 863 kg·hm⁻²,冀张薯 12 号的氮素生物学效率最高,为 92.10 kg·kg⁻¹;在施氮肥的条件下荷十五的产量最高,为 8 284 kg·hm⁻²,V7 的氮素生物学效率最高,为 59.05 kg·kg⁻¹。15 个品种在氮效率性状如地力产量、施氮肥后产量、块茎氮吸收量、肥料氮农学效率、肥料氮偏生产力、肥料氮表观利用率等方面存在宽幅变异,变幅范围为 21%~58%。在未施氮肥条件下,马铃薯不同品种产量(Y)与块茎含氮量(X)呈极显著负相关, $Y=-0.0019X+22.045(R^2=0.6269^{**})$;在施氮条件下,产量与块茎含氮量无显著相关,而肥料氮表观利用率(Y)与肥料氮偏生产力(X)之间呈极显著正相关, $Y=1.617X-21.784(R^2=0.7465^{**})$ 。隶属函数分析表明,荷十五、希森 6 号与斯凡特(F8)具有较高的综合氮效率,可作为氮高效品种应用于生产或作为氮高效种质材料。

关键词:马铃薯;品种;氮效率评价;隶属函数;华北寒旱区
中图分类号:S512;N143.1 **文献标志码:**A

Evaluation of nitrogen efficiency on potatoes with different genotypes in cold and arid regions of Northern China

REN Dongxue¹, ZHANG Lifeng^{1,2}, LIU Yuhua^{1,2}, Tian Zaimin³, GONG Xuechen³

(1.Agronomy College, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China;
2.Zhangbei Agricultural Resources and Ecological Environment Key Field Research Station, Ministry of Agriculture of China, Zhangjiakou, Hebei 076450, China;
3. College of Agriculture and Forestry, HeBei North University, Zhangjiakou, Hebei 075000, China)

Abstract: In order to screen nitrogen (N) efficient varieties for production or breeding new variety as germplasm resource that is an important and cost-effective way to improve the effectiveness of fertilizer inputs in potato fields, adopting the split-plot designs using 15 conventional varieties as test materials cultivated around Bashang and circumambient cold and arid regions, with two N levels were conducted to evaluate the N efficiency of different varieties in terms of yield, N absorption, biological efficiency of N, agronomic efficiency of fertilizer N, partial productivity efficiency, and apparent utilization rate. On the basis of this, the subordinate function method was used to evaluate and classify the comprehensive N efficiency of each variety. The results showed that variety, N level and variety × N level had very significant effect on potato yield. Under the condition of no N, the highest yield of variety was Beifang 002 with a yield of 5 863 kg·hm⁻² and the highest N biological efficiency of variety was Jinzhangshu 12 at 92.10 kg·kg⁻¹. Under the condition of N, the highest yield of variety was Heshiwu with a yield of 8 284 kg·hm⁻², the highest N biological efficiency of variety was V7 at 59.05 kg·kg⁻¹. The N efficiency of variety varied

widely in terms of ground force yield, yield after N, N absorption, biological efficiency of N, agronomic efficiency of fertilizer N, partial productivity efficiency, and apparent utilization rate, CV was between 21%~58%. The yield (Y) of different potato varieties was negatively correlated with the N content (X) of tubers under the condition of no N application, $Y=-0.0019X+22.045$ ($R^2=0.6269^{**}$); the yield (Y) was not significantly correlated with the N content of tubers under the condition of N, while the apparent utilization of tuber N was positively correlated with the P artial productivity efficiency (X), $Y=1.617X-21.784$ ($R^2=0.7465^{**}$). The subordinate function analysis showed that Heshiwu, Xisen 6, and Sifante(F8) had high comprehensive N efficiency and could be used in production as N efficient varieties or as N efficient germplasm material.

Keywords: potato; variety; nitrogen efficiency evaluation; subordinate function method; cold and arid regions of Northern China

马铃薯为茄科茄属一年生草本植物,是我国继小麦、水稻、玉米之后的第四大粮食作物。随着人口增长与消费质量的提高,我国粮食供求依然处于“紧平衡”态势^[1-2]。2015 年国家及时启动了马铃薯主粮化战略,以提高马铃薯产量与质量,为确保粮食充足供应开创了新的路径。据统计,2010—2015 年全国马铃薯年均总产量为 8 852.4 万 t,较 2005—2009 年增加了 22.9%^[3]。然而,近年来马铃薯产量的增长是以消耗大量的肥料为代价的^[4-6],秦永林等^[7]对内蒙古地区马铃薯施肥状况调查时发现,氮肥施用量较推荐用量高了 26%,合理施肥的农户仅占 32.7%。过量施肥不仅提高了生产成本,降低了农田收益,而且残留在土壤中的氮素一方面会使土壤酸化和次生盐渍化^[8],另一方面随水的淋溶和地表径流作用造成地下水硝酸盐含量超标和地表水源富营养化^[9]。因此,筛选氮高效品种用于生产或作为种质资源培育新品种,是提高马铃薯田肥料投入效果的重要途径。目前关于作物氮效率的评价尚无统一的标准,一般认为氮效率是植物对氮吸收、利用、转化以及再利用等多个生理过程的综合结果。Ladha 等^[10]将同一氮水平下的作物产量看作氮效率;Moll 等^[11]将氮效率定义为单位供氮量所生产的小麦籽粒产量;Hirose 等^[12]用作物干物重与吸氮量的比值评价氮效率。目前研究者主要从氮吸收效率即植株氮总积累量与供氮量的比值,以及氮利用效率即作物产量与植株氮总积累量的比值两方面进行评价;也有研究者根据施肥对作物产量及氮吸收利用效率的影响,结合肥料农学利用率、肥料偏生产力、肥料表观利用率及肥料生理效率等指标进行综合评价^[13-17]。程红等^[14]在筛选马铃薯氮高效品种时选择变异系数较大的指标,如含氮量、氮吸收量及产量等作为评价的主要指标。陈二影等^[16]选用茎叶干物重、含氮量、氮吸收量、氮吸收效率、氮利用效率等指标筛选苗期谷子

氮高效品种,发现无论在高氮还是低氮条件下,干物重与氮利用效率呈极显著正相关,氮利用效率与含氮量呈极显著负相关,得出氮高效品种应该具有较高的氮吸收量和较低的含氮量。吴红春等^[17]研究了肥料用量对不同品种紫甘薯的产量及氮效率的影响,表明鲜薯产量及氮吸收量与氮吸收效率、氮利用效率、氮肥贡献率、氮肥农学效率、氮肥偏生产力等指标呈显著正相关。牛海燕等^[18]研究表明,在施氮条件下,玉米氮高效品种不仅能获取较高产量,还能对土壤中的氮高效吸收,在缺氮条件下氮高效品种可以充分利用生长季中的土壤矿化氮获得较高的产量。华北寒旱区作为短季马铃薯的特异产区以及毗邻京津市场的主要供应地,鉴评与筛选鲜食型氮高效马铃薯品种直接应用于生产,或作为种质资源以改良利用,成为降低马铃薯田氮肥施用成本、提高经济收益的重要物质基础。

本研究以华北坝上及周边寒旱区栽培与新选育的 15 份马铃薯品种为材料,以低氮水平为对照,比较、分析正常供氮水平下各品种马铃薯的产量、含氮量、氮生物学效率及肥料利用效果等方面差异,采用隶属函数分析方法对其鉴评与分类,筛选出产量及氮效率均较高的品种,为马铃薯节氮栽培以及氮高效育种提供优良的种质资源。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2019 年在农业部张北农业资源与生态环境重点野外科学观测试验站进行。试验站位于张家口市坝上的张北县(114°42'E,41°09'N),海拔 1 420 m,年均降水量 382.5 mm,年均气温 3.9℃,无霜期 135 d,≥10℃积温 2 426.3℃。

试验地土壤类型为砂质栗钙土,0~20 cm 土层土壤理化性质分别为:容重 1.54 g·cm⁻³,全氮、全磷、全钾含量分别为 0.70、0.23、15.12 g·kg⁻¹,碱解

氮、速效磷、速效钾含量分别为 58.37、19.87、57.06 mg · kg⁻¹,有机质含量为 10.79 g · kg⁻¹。

1.2 供试材料

选取鲜食型马铃薯品种 9 个,鲜食-加工兼用型品种 2 个,薯片(条)加工型品种 4 个。15 个品种均由河北北方学院马铃薯研究中心提供,品种名称及来源见表 1。

1.3 试验设计

田间试验采用裂区设计,主区因素为马铃薯田供氮水平,设不施氮(No N)、施氮(N)两个水平,副区因素为马铃薯品种,随机排列,3 次重复,共计 90 个小区。每小区长 8 m,宽 3 m,面积 24 m²。不施氮区域无任何肥料,施氮区施用尿素,折合纯氮量 172.5 kg · hm⁻²,不施磷、钾及有机肥。肥料于种植前撒施旋

耕翻入土中。种植方式为平作,密度为 40 020 株 · hm⁻²,4 月 30 日播种,9 月 8 日收获,田间管理同大田,雨养旱作。2019 年马铃薯生育期降水 236.93 mm,较常年同期降水量(273 mm)偏低。降水分布如图 1。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 产量测定 每个处理按小区面积实收,测定马铃薯块茎鲜重;取鲜薯块茎样本切片后烘干,计算出干率,按实收面积折算每公顷块茎产量。

1.4.2 含氮量测定 收获前每个小区先挖取 3 株代表小区整体长势的植株,称量块茎的鲜重后切片,放入 105℃ 的烘箱内杀青 1 h,在 80℃ 的条件下烘干至恒重。将烘干称重后的块茎切片粉碎,混匀后装入自封袋内,送至河北省农林科学院资源环境研究所测定样品的全含氮量。

表 1 供试马铃薯品种、类型及来源
Table 1 The name, type and origin of potato variety

类型 Type	品种 Variety	来源 Origin
鲜食型 Fresh	荷十五 Heshiwu	引自荷兰 Introduced from Holland
	冀张薯 12 号 Jizhangshu 12,冀张薯 8 号 Jizhangshu 8	河北省高寒作物研究所 High Latitude Area Crops Institute of Hebei Province
	斯凡特(F8) Sifante (F8)	多伦县薯你旺薯业有限公司 Duolun County SNWNY Company
	V6,V7,V8	雪川集团 Snow Valley Group
	北方 001 Beifang 001,北方 002 Beifang 002	河北北方学院马铃薯研究中心 HeBei North University Potato Research Center
鲜食-淀粉加工兼用型 Fresh-starch processing	兴佳 2 号 Xingjia 2	广西农科院经济作物研究所 Cash Crops Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences
	希森 6 号 Xisen 6	乐陵希森马铃薯产业集团 Xisen Potato Industiy Group
薯片加工型 Potato chip processing	大西洋 Daxiyang	引自美国 Introduced from America
	布尔班克 Buerbanke	凌志马铃薯科技股份有限公司 Linkrge Potato Technology Co. Ltd.
	陇薯 7 号 Longshu 7	甘肃省农业科学院马铃薯研究所 Potato Research Institute of Gansu Academy of Agricultural Sciences
	麦肯 1 号 Maiken 1	麦肯食品有限公司 McKee Foods Limited Company

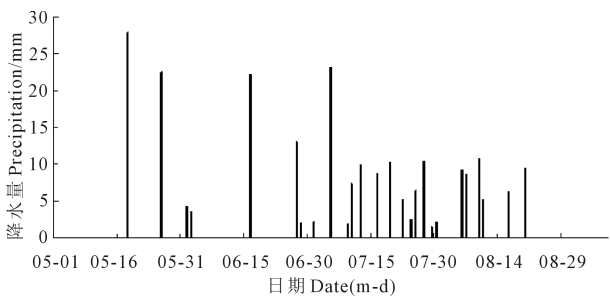


图 1 2019 年马铃薯生育期降水量分布
Fig.1 Distribution of precipitation in growth period of 2019

1.4.3 氮效率相关参数的计算^[14-15,19]
马铃薯块茎氮吸收量(kg · hm⁻²) = 块茎产量(kg · hm⁻²) × 块茎含氮量(g · kg⁻¹) × 10⁻³
氮生物学效率(氮利用效率)(kg · kg⁻¹) = 马铃薯块茎产量(kg · hm⁻²) / 块茎氮吸收量(kg · hm⁻²)
基础地力产量贡献率(%) = 不施肥区块茎产量(kg · hm⁻²) / 施肥区块茎产量(kg · hm⁻²) × 100
肥料产量贡献率(%) = (施肥区块茎产量 - 不施肥区块茎产量)(kg · hm⁻²) / 施肥区块茎产量(kg · hm⁻²) × 100

肥料氮农学效率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = (施氮肥区块茎产量 - 不施氮肥区块茎产量) ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) / 肥料氮施用量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

肥料氮偏生产力 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = 施氮肥区块茎产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) / 肥料氮施用量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

肥料氮表观利用率 (%) = (施氮肥区块茎氮吸收量 - 不施肥区块茎氮吸收量) ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) / 肥料氮施用量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times 100$

1.4.4 综合氮效率分析 采取隶属函数^[20]对马铃薯各氮效率指标进行综合氮效率评价,计算不同品种马铃薯各指标的隶属函数值(X_{ij}'),如某一指标与综合氮效率呈正相关,则隶属函数值(X_{ij}')用下式计算:

$$X_{ij}' = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

如某一指标与综合氮效率呈负相关,则隶属函数值(X_{ij}')用下式计算:

$$X_{ij}' = 1 - (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中, X_{ij} 为马铃薯某品种($i = 1, 2, 3, \dots, m$)的某指标($j = 1, 2, 3, \dots, n$)的测定值; $X_{\max}$ 为所有品种中 j 指标最大值, $X_{\min}$ 为所有品种中 j 指标最小值。

再用单一指标变异系数(V_j)与各指标变异系数之和($\sum V_j$)的比值表示该指标的权重^[21],最后依式求得不同品种马铃薯的综合隶属函数值(D_i),用以表征某品种马铃薯的综合氮效率。

$$D_i = \Sigma(X_{ij}' \times V_j / \sum V_j)$$

D 值越高,说明该品种综合氮效率越好。

1.5 数据处理

采用 Microsoft office 2013 进行数据整理和作图

(表),用 SPSS 18.0 软件对产量进行裂区设计差异显著性分析,不同处理之间多重比较及其显著性水平 ($P<0.05$)通过最小显著差数法 LSD 进行检测。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平下不同品种马铃薯产量效应

不同品种马铃薯在施氮、不施氮条件下的块茎(干重)产量见表 2。方差分析表明,品种、施氮水平、品种 $\times$ 施氮水平等对马铃薯产量具有极显著的影响。在不施氮肥条件下,各品种产量从高到低依次为北方 002、V8、冀张薯 12 号、陇薯 7 号、希森 6 号、V6、大西洋、冀张薯 8 号、荷十五、北方 001、兴佳 2 号、布尔斑克、V7、斯凡特(F8)、麦肯 1 号。在施氮肥的条件下,各品种产量从高到低依次为荷十五、希森 6 号、V8、冀张薯 12 号、北方 002、冀张薯 8 号、兴佳 2 号、斯凡特(F8)、V7、北方 001、布尔斑克、V6、大西洋、陇薯 7 号、麦肯 1 号。结果表明,荷十五、希森 6 号、V8、冀张薯 12 号、北方 002 等 5 个品种对氮肥反应敏感,施氮利于获得较高产量。

结果表明,除陇薯 7 号外,其余各品种均表现为施氮肥增产,增幅在 17.62%~136.07%。陇薯 7 号施氮肥减产 0.63%,说明陇薯 7 号的氮肥耐受性很差。以产量为目标分析,北方 002、V8、冀张薯 12 号、希森 6 号等 4 个品种在施氮和不施氮的条件下均表现高产,荷十五在施氮条件下高产,这 5 个品种具有氮高效的种质基础。

表 2 两种氮水平下不同品种产量(干重)及增产幅度

Table 2 The yield (dry weight) and increase range of different varieties under two nitrogen levels

品种 Variety	未施氮 No N fertilizer		施氮 N fertilizer		施氮较未施氮肥增产幅度/% Increased yield range from N over no N fertilizer
	产量 Yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	差异显著性 Sig.	产量 Yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	差异显著性 Sig.	
北方 002 Beifang 002	5863	efg	6897	bcd	17.62
V8	5342	ghi	7277	bc	36.22
冀张薯 12 号 Jizhangshu 12	4928	ghij	6919	bcd	40.40
陇薯 7 号 Longshu 7	4807	hijk	4777	hijk	-0.63
希森 6 号 Xisen 6	4472	ijkl	7552	ab	68.87
V6	4395	jkl	5444	fgh	23.85
大西洋 Daxiyang	3992	klm	5207	ghij	30.42
冀张薯 8 号 Jizhangshu 8	3829	lmn	6556	cde	71.22
荷十五 Heshiwu	3816	lmn	8284	a	117.09
北方 001 Beifang 001	3649	lmno	5792	efg	58.72
兴佳 2 号 Xingjia 2	3575	lmno	6666	bcde	86.42
布尔斑克 Buerbanke	3156	mnp	5603	fgh	77.52
V7	2798	op	6292	def	124.92
斯凡特(F8) Sifante (F8)	2762	op	6520	cde	136.07
麦肯 1 号 Maiken 1	2538	p	2978	nop	17.34
品种 Variety			*	*	
ANOVA 氮水平 N level			*	*	
氮水平 $\times$ 品种 N $\times$ Variety			*	*	

注:同列不同小写字母表示差异达到显著水平 ($P<0.05$); * * 表示达 0.01 显著水平。
Note: Lowercase letters indicate statistical significance at 0.05 levels within the same column; * * represented significance at 0.01 probability level.

2.2 不同品种马铃薯的氮响应特征

以施氮肥和不施氮肥条件下的平均产量(干重)为基准,对不同品种马铃薯的氮响应特征定性分析见图 2。依各品种在施氮、不施氮肥条件下的产量平均值为原点(3 994.87,6 184.14),将图 2 的二维图分为四个象限,分别代表对氮响应的四种类型^[19]。第一象限代表在施氮和不施氮肥条件下均能获得高于供试品种平均产量的双高效型,包括北方 002、希森 6 号、冀张薯 12 号、V8;第二象限代表在不施氮条件下产量低于供试品种的平均值,在施氮条件下产量高于供试品种平均产量的高氮施氮高效型,包括 V7、斯凡特(F8)、荷十五、冀张薯 8 号、兴佳 2 号;第三象限代表在施氮和不施氮肥条件下产量均低于供试品种平均值的双低效型,包括麦肯 1 号、布尔斑克、北方 001;第四象限代表在不施氮条件下产量高于供试品种平均值,在施氮肥条件下产量低于供试品种平均值的低氮(不施氮)高效型,包括大西洋、V6、陇薯 7 号。通过比较两种施氮水平下各品种的产量得出,施肥高效型和双高效型品种对增施氮反应更为敏感。

2.3 不同品种马铃薯含氮量、氮吸收量及氮生物学效率

马铃薯各品种块茎含氮量、氮吸收量、氮生物学效率见表 3。在不施氮条件下,各品种马铃薯含氮量变幅在 10.86~19.59 g·kg⁻¹,含氮量最高的品种为麦肯 1 号,最低的种类为冀张薯 8 号。氮吸收

量最高的品种为北方 002,为 83.86 kg·hm⁻²,最低的种类为布尔斑克,为 44.91 kg·hm⁻²。氮生物学效率变幅在 51.04~92.10 kg·kg⁻¹,最高的为冀张薯 12 号,最低的为麦肯 1 号。在施氮条件下,含氮量变幅在 15.93~21.47 g·kg⁻¹,较不施氮条件下含氮量升高 0.97~1.93 倍,斯凡特(F8)最高,V7 最低。氮吸收量最高的品种为荷十五,为 154.15 kg·hm⁻²,最低的为麦肯 1 号,为 62.77 kg·hm⁻²。氮生物学效率变幅在 46.57~59.05 kg·kg⁻¹之间,各品种(除 V7)施氮肥处理的氮生物学效率较不施氮处理明显降低,下降幅度为 5.41%~48.14%。结果表明,施氮较不施氮条件下马铃薯块茎干物质增长速率低于块茎氮积累速率。

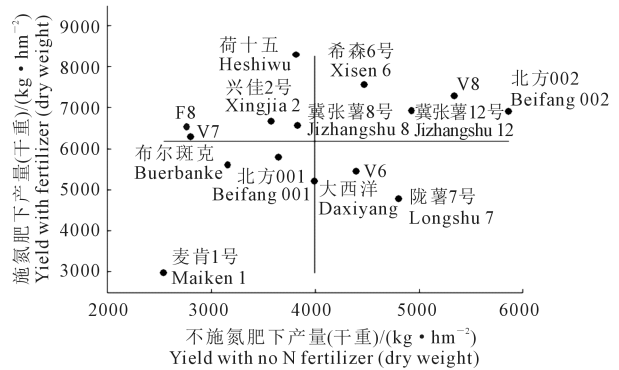


图 2 不同品种马铃薯氮响应特征
Fig.2 Distribution of potatoes response to nitrogen with different varieties

表 3 两种供氮水平下各品种马铃薯含氮量、氮吸收量及氮生物学效率
Table 3 Nitrogen content,absorption and nitrogen biological efficiency of varieties at two nitrogen levels

品种 Variety	未施氮 No N fertilizer			施氮 N fertilizer		
	含氮量 Nitrogen content /(g·kg ⁻¹)	氮吸收量 Nitrogen absorption /(kg·hm ⁻²)	氮生物学效率 Nitrogen biological efficiency/(kg·kg ⁻¹)	含氮量 Nitrogen content /(g·kg ⁻¹)	氮吸收量 Nitrogen absorption /(kg·hm ⁻²)	氮生物学效率 Nitrogen biological efficiency/(kg·kg ⁻¹)
大西洋 Daxiyang	14.03	56.02	71.27	19.76	102.87	50.62
北方 001 Beifang 001	14.73	53.75	67.90	18.52	107.27	54.00
V6	12.94	56.88	77.28	18.98	103.33	52.68
斯凡特(F8) Sifante (F8)	17.14	47.35	58.33	21.47	140.02	46.57
冀张薯 12 号 Jizhangshu 12	10.86	53.51	92.10	20.94	144.87	47.76
布尔斑克 Buerbanke	14.23	44.91	70.28	20.26	113.51	49.36
V7	17.49	48.94	57.17	15.93	106.55	59.05
V8	11.57	61.82	86.42	18.53	134.84	53.97
希森 6 号 Xisen 6	13.41	59.98	74.55	17.88	135.05	55.92
兴佳 2 号 Xingjia 2	14.34	51.26	69.75	19.12	125.23	52.29
北方 002 Beifang 002	14.30	83.86	69.92	20.28	139.89	49.30
冀张薯 8 号 Jizhangshu 8	15.65	59.92	63.90	19.85	130.10	50.39
麦肯 1 号 Maiken 1	19.59	49.72	51.04	20.71	62.77	48.28
陇薯 7 号 Longshu 7	12.31	59.18	81.23	17.01	81.23	58.80
荷十五 Heshiwu	15.63	59.64	63.98	18.61	154.15	53.73

不施氮条件下各品种马铃薯块茎产量与块茎含氮量的关系如图 3。统计分析表明,马铃薯产量(Y)与块茎含氮量(X)间呈极显著的负相关, $Y=-0.0019X+22.045$ ($R^2=0.6269^{**}$),说明马铃薯块茎产量越高,其含氮量越低,此为筛选与培育产量较高且氮生物学效率高的马铃薯品种提供了理论依据。在施氮肥的条件下(图 4),由于品种与施氮水平的交互作用,且施氮水平对马铃薯产量的作用远大于品种,致使各品种间马铃薯产量与块茎含氮量无显著的相关关系($R^2=0.0192$)。

从氮生物学效率分析,无论在施氮还是不施氮条件下,陇薯 7 号、希森 6 号和 V8 均高于其余品种,V7 施肥后氮生物学效率较高,均可作为氮高效品种或作为氮高效的种质资源。

2.4 不同品种马铃薯的肥料氮利用效果

各品种在施氮和不施氮肥条件下的基础地力贡献率与肥料氮利用效果见表 4。15 个品种的基础地力贡献率变化在 42.36%~100.00%,最高的为陇薯 7 号,其次为北方 002、麦肯 1 号、V6,基础地力贡献率在 80% 以上。肥料氮贡献率的变化幅度在 -0.63%~57.64%,最高的为斯凡特 F8,其次为 V7、荷十五,肥料氮贡献率在 50% 以上。各品种的肥料氮农学效率在 -0.18~25.90 kg·kg⁻¹,肥料氮农学效率较高的品种有 5 个,从高到低分别为荷十五、斯凡特(F8)、V7、希森 6 号、兴佳 2 号。各品种肥料氮农学效率相比,最高的为高氮高效型品种,其次为双高效型品种。

肥料氮偏生产力的变化幅度在 17.57~48.02 kg·kg⁻¹,较高的品种有 5 个,分别为荷十五、希森 6 号、V8、冀张薯 12 号、北方 002,最高的为高氮高效型品种,其次为双高效型品种。肥料氮表观(块茎)

利用率在 7.57%~54.79%之间,较高的有 5 个,分别为荷十五、斯凡特 F8、冀张薯 12 号、希森 6 号、兴佳 2 号,最高的为高氮高效型品种,其次为双高效型品种。

统计分析表明,肥料氮偏生产力(Y)与肥料氮农学效率(X)间呈极显著正相关, $R^2=0.4986^{**}$ (图 5);肥料表观(块茎)利用率(Y)与农学效率(X)间呈极显著正相关, $R^2=0.664^{**}$ (图 6);肥料氮(块茎)表观利用率(Y)与肥料氮偏生产力(X)间呈极显著正相关, $R^2=0.7465^{**}$ (图 7)。结果表明,随着肥料氮农学效率的提升,肥料氮偏生产力增加,块茎氮表观利用率也随之增加,此为筛选与培育肥料氮高效的马铃薯品种提供了理论基础。从肥料氮利用角度分析得出,荷十五和希森 6 号两个品种在肥料氮农学效率、肥料氮偏生产力及块茎表观氮利用率方面均有极好表现,可作为氮高效的种质资源。

2.5 不同品种马铃薯隶属函数分析

对包括基础地力产量贡献率与肥料氮利用效果的 8 个指标进行隶属函数分析(表 5),其中含氮量与综合氮效率呈负相关,其他 7 个指标与综合氮效率呈正相关。权重分析表明,8 个指标中肥料氮农学效率对马铃薯的综合氮效率贡献率最大,为 29%,块茎含氮量及氮生物学效率贡献率最小,二者合计仅为 8%。由隶属函数分析可知,不同品种马铃薯的隶属函数综合值(D)在 0.14~0.85,各品种从高到低依次为荷十五、希森 6 号、斯凡特(F8)、冀张薯 12 号、V8、兴佳 2 号、冀张薯 8 号、V7、北方 002、布尔斑克、北方 001、V6、大西洋、陇薯 7 号、麦肯 1 号。荷十五 D 值达 0.85,希森 6 号为 0.71,斯凡特 F8 为 0.67,这三个品种作为综合氮高效品种可应用于生产或作为氮高效种质材料。

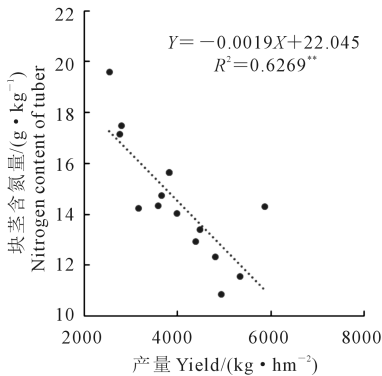


图 3 不施肥条件下马铃薯产量与块茎含氮量回归关系
Fig.3 Regression relationship between potato yield and tuber N content with no N fertilizer

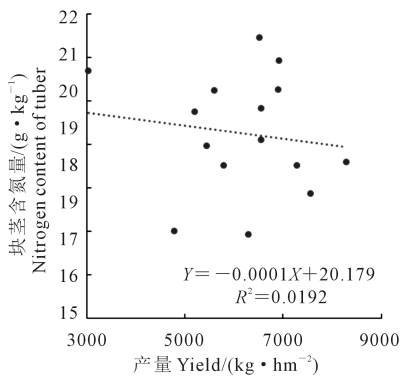


图 4 施氮肥条件下马铃薯产量与块茎含氮量回归关系
Fig.4 Regression relationship between potato yield and tuber N content with N fertilizer

表 4 不同品种基础地力与肥料产量贡献率,肥料农学效率、偏生产力及表观利用率比较
Table 4 Comparison of basic strength and fertilizer yield contribution ratio, agronomy efficiency, partial productivity and apparent utilization ratio of different varieties

品种 Variety	基础地力产量贡献率 Basic ground forces production contribution rate/%	肥料氮 Fertilizer N			
		产量贡献率 Production contribution rate/%	农学效率 Agronomy efficiency /(kg·kg ⁻¹)	偏生产力 Partial productivity efficiency/(kg·kg ⁻¹)	表观(块茎)利用率 Apparent utilization ratio/%
大西洋 Daxiyang	76.68	23.32	7.04	30.18	27.16
布尔班克 Buerbanke	56.33	43.67	14.18	32.48	39.77
麦肯 1 号 Maiken 1	83.73	16.27	2.86	17.57	7.57
陇薯 7 号 Longshu 7	100.00	-0.63	-0.18	27.69	12.78
希森 6 号 Xisen 6	59.22	40.78	17.85	43.78	43.52
兴佳 2 号 Xingjia 2	54.60	45.40	17.24	37.97	42.88
北方 001 Beifang 001	63.00	37.00	12.42	33.58	31.03
V6	80.74	19.26	6.08	31.56	26.93
斯凡特(F8) Sifante (F8)	42.36	57.64	21.79	37.80	53.72
冀张薯 12 号 Jizhangshu 12	71.22	28.78	11.54	40.11	52.96
V7	44.46	55.54	20.26	36.48	33.40
V8	73.41	26.59	11.22	42.19	42.33
北方 002 Beifang 002	85.02	14.98	5.99	39.98	32.48
冀张薯 8 号 Jizhangshu 8	58.40	41.60	15.81	38.00	40.68
荷十五 Heshiwu	46.06	53.94	25.90	48.02	54.79

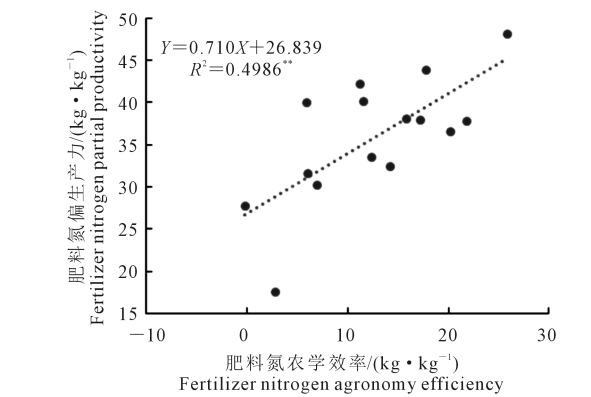


图 5 肥料氮农学效率与偏生产力的关系
Fig.5 Relationship between fertilizer N agronomy efficiency and partial productivity

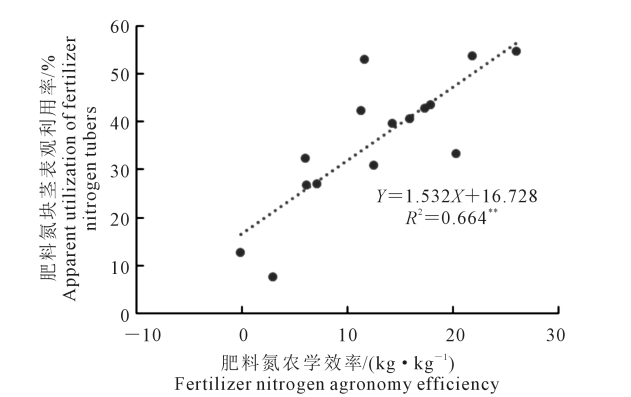


图 6 肥料氮农学效率与块茎表观利用率的关系
Fig.6 Relationship between fertilizer N agronomy efficiency and tuber apparent utilization ratio

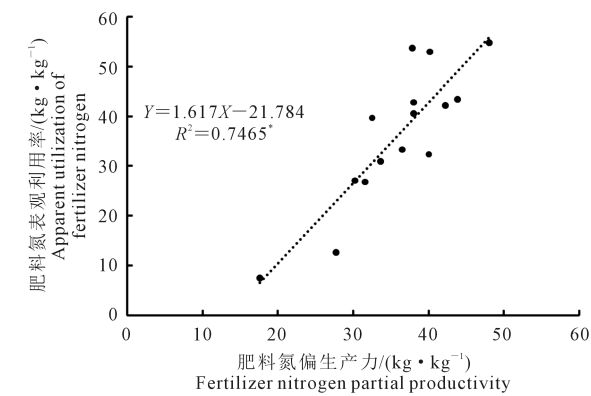


图 7 肥料氮偏生产力与块茎氮表观利用率的关系
Fig.7 Relationship between N partial productivity of fertilizer and apparent utilization ratio of tuber N

3 讨 论

目前,学术界对作物氮效率的评价时期尚无统一结论。部分研究者^[16,22-26]认为,作物苗期对养分的反应较成熟期敏感,选择苗期指标评价氮效率有利于解决成熟期评价误差较大的问题。Moll 等^[11]、何丹丹等^[15]认为,氮效率是单位氮转化为产量的潜力,氮高效品种氮转化为产量的能力应高于氮低效品种,即吸收较少的氮形成较高的产量。本文以不施氮与施氮肥下马铃薯收获期的块茎产量指标为基础,结合施氮肥下的含氮量、肥料氮农学效率、肥料氮表观利用率等多指标进行综合氮效率评价,得出马铃薯氮高效品种如荷十五,在不施氮和施氮肥

表 5 不同品种马铃薯各指标的隶属函数值及综合值
Table 5 Membership function values and combined values of potato of different varieties

项目 Item	基础地力 产量贡献率 Basic ground forces production contribution rate	肥料氮利用效果的各指标隶属函数值 Nitrogen utilization effect of fertilizer							综合隶属 函数值 <i>D</i>
		产量 Yield	含氮量 Nitrogen content	氮吸收量 Nitrogen absorption	氮生物学 Nitrogen biological efficiency	肥料农 学效率 Agronomy efficiency	肥料偏 生产力 Partial productivity efficiency	肥料表观 利用率 Apparent utilization ratio	
大西洋 Daxiyang	0.59	0.41	0.38	0.44	0.43	0.28	0.41	0.41	0.40
北方 001 Beifang 001	0.35	0.53	0.65	0.49	0.66	0.48	0.53	0.50	0.49
V6	0.66	0.46	0.55	0.44	0.57	0.24	0.46	0.41	0.42
斯凡特(F8) Sifante (F8)	0.00	0.66	0.00	0.85	0.16	0.84	0.66	0.98	0.67
冀张薯 12 号 Jizhangshu 12	0.50	0.74	0.12	0.90	0.24	0.45	0.74	0.96	0.64
布尔斑克 Buerbanke	0.24	0.49	0.27	0.56	0.35	0.55	0.49	0.68	0.51
V7	0.04	0.62	1.00	0.48	1.00	0.78	0.62	0.55	0.59
V8	0.53	0.81	0.65	0.79	0.66	0.44	0.81	0.74	0.64
希森 6 号 Xisen 6	0.29	0.86	0.79	0.79	0.79	0.69	0.86	0.76	0.71
兴佳 2 号 Xingjia 2	0.21	0.67	0.52	0.68	0.55	0.67	0.67	0.75	0.62
北方 002 Beifang 002	0.73	0.74	0.26	0.84	0.35	0.24	0.74	0.53	0.53
冀张薯 8 号 Jizhangshu 8	0.28	0.67	0.36	0.74	0.42	0.61	0.67	0.70	0.60
麦肯 1 号 Maiken 1	0.71	0.00	0.17	0.00	0.28	0.12	0.00	0.00	0.14
陇薯 7 号 Longshu 7	1.00	0.33	0.98	0.20	0.98	0.00	0.33	0.11	0.31
荷十五 Heshiwu	0.06	1.00	0.63	1.00	0.64	1.00	1.00	1.00	0.85
标准差 SD	16.99	1277.17	1.37	25.17	3.8	7.37	7.40	13.85	
变异系数 CV	0.26	0.21	0.07	0.21	0.07	0.58	0.21	0.38	
权重 Weight	0.13	0.10	0.04	0.11	0.04	0.29	0.10	0.19	

条件下的产量表现并不一致,其在不施氮条件下的产量优势并不明显,而在施氮条件下表现明显的优势,由此了解马铃薯品种的氮高效类型十分必要。这与何丹丹等^[15]认为氮高效品种在低氮和高氮条件均能获得较高产量的研究结果不同。

同种作物的不同品种氮利用效率存在明显差异^[27-28]。马铃薯氮高效型品种的氮素含量相对较低,能以较低的氮素浓度进行正常的生长代谢,形成一定的干物质^[15],这与在低氮胁迫条件下,氮高效型品种较氮低效型品种具有较强的吸收、积累和利用氮素的能力^[29],因而能有效地利用土壤中的矿化氮提高产量等有关。本研究表明,在不施氮肥条件下,华北寒旱区不同品种马铃薯的产量与块茎含氮量间呈极显著的负相关($R^2=0.6269^{**}$),这与资源约束下作物以求得“五率最高”的自身生产禀赋有关^[30];而在施氮肥条件下,马铃薯产量与块茎含氮量无显著相关($R^2=0.0192$),这与施氮肥后土壤中充足的含氮量会降低马铃薯的经济系数^[31],以及激发作物的氮奢侈吸收等有关^[32]。本研究得出在施氮肥条件下,马铃薯产量与块茎含氮量无显著相关,而肥料氮偏生产力与块茎氮表观利用率之间呈极显著正相关($R^2=0.7465^{**}$)的特征,为鉴评与选育兼顾产量高、氮效率高的马铃薯品种提供了理论依据。

作物体内的氮素浓度反映了作物的生产能力^[33-34]。叶片是进行光合作用的主要场所,叶片光合产物的累积决定着马铃薯的产量。何丹丹^[15]、程红^[35]、王月福等^[36]研究表明,氮高效型品种的叶片氮素与 SPAD 值高于低效型品种,由此为其保持较高的净光合速率提供了物质基础;氮高效型品种的叶片光合氮利用效率高于氮低效型品种,认为光合氮素利用率的差异是氮高效型品种较氮低效型品种增产的原因。本研究对于马铃薯氮效率的评价,主要考虑了块茎含氮量与块茎产量的相关性,并未详细研究不同氮效率类型品种叶茎等器官的含氮量与光合性能的关系,难以深度揭示马铃薯氮利用效率差异的生理机制,而叶茎作为“源”的干物质生产与块茎作为“库”的干物质贮存,两过程对器官含氮量的生理反应可能存在差异,此有待深入研究。

4 结 论

华北坝上及其周边寒旱区栽培与新选育的 15 份马铃薯品种,在地力产量、施氮肥产量、块茎氮吸收量、肥料氮农学效率、肥料氮偏生产力、肥料氮表观利用率等氮效率性状方面存在宽幅变异($CV=21\% \sim 58\%$)。在未施氮肥条件下,马铃薯不同品种的产量与块茎含氮量呈极显著负相关, $R^2=0.6269^{**}$;在施氮条件下,马铃薯产量与块茎含氮

量无显著相关,而肥料氮偏生产力与块茎氮表观利用率之间呈极显著正相关, $R^2 = 0.7465^{**}$ 。分析表明,荷十五作为肥料氮高效型、希森 6 号与斯凡特(F8)作为肥料氮中效型品种,具有较高的综合氮效率,可作为氮高效品种应用于生产或作为氮高效种质材料。

参 考 文 献:

[1] 王瑞峰. 粮食进口对中国粮食安全的影响及保障效率研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.

[2] 鲍国良,姚蔚.我国粮食生产现状及面临的主要风险[J].华南农业大学学报(社会科学版),2019,18(6):111-120.

[3] 逢学思,曲峻岭,郭燕枝.中国马铃薯主食产业化现状及未来展望[J].农业展望,2018,14(4):28-31.

[4] 刘润梅,范茂攀,付云章,等.云南省马铃薯施肥量与化肥偏生产力的关系研究[J].土壤学报,2014,51(4):753-760.

[5] 孙志梅,武志杰,陈利军,等.农业生产中的氮肥施用现状及其环境效应研究进展[J].土壤通报,2006,37(4):782-786.

[6] 胡春胜,张玉铭,秦树平,等.华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J].中国生态农业学报,2018,26(10):1501-1514.

[7] 秦永林,于静,陈杨,等.内蒙古灌溉马铃薯施肥现状及肥料利用效率[J].中国蔬菜,2019,(11):75-79.

[8] 王艳群,彭正萍,薛世川,等.过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J].农业环境科学学报,2005,24(S1):81-84.

[9] 郭智,刘红江,陈留根,等.有机肥施用对菜地磷素径流流失及磷素表观利用率的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):181-186.

[10] Ladha J K, Kirk G J D, Bennett J, et al. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved lowland rice germplasm [J]. Field Crop Research,1998,56(1):41-71.

[11] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization[J].Agronomy Journal,1982,74(3):562-564.

[12] Tadaki Hirose. Nitrogen use efficiency revisited[J]. Oecologia,2011,166(4):863-867.

[13] 孙永健,孙园园,蒋明金,等.施肥水平对不同氮效率水稻氮素利用特征及产量的影响[J].中国农业科学,2016,49(24):4745-4756.

[14] 程红,郑顺林,马海艳,等.马铃薯氮高效基因型品种筛选及指标评价[J].西南农业学报,2019,32(10):2292-2298.

[15] 何丹丹.马铃薯氮素吸收和利用效率的基因型差异[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.

[16] 陈二影,杨延兵,秦岭,等.谷子苗期氮高效品种筛选及相关特性

分析[J].中国农业科学,2016,49(17):3287-3297.

[17] 吴春红,刘庆,孔凡美,等.氮肥施用量对不同紫甘薯品种产量和氮素效率的影响[J].作物学报,2016,42(1):113-122.

[18] 牛海燕,马凤鸣,杨德光,等.玉米品种氮高效评价指标及生理机理研究进展[J].东北农业大学学报,2008,39(9):125-129.

[19] 钟思荣,龚丝雨,张世川,等.作物不同基因型耐低氮性和氮效率研究进展[J].核农学报,2018,32(8):1656-1663.

[20] 李守强,田世龙,李梅,等.主成分分析和隶属函数法综合评价 15 个马铃薯品种(系)的营养品质[J].食品工业科技,2020,41(6):272-276,291.

[21] 任广跃,刘亚男,乔小全,等.基于变异系数权重法对怀山药干燥全粉品质的评价[J].食品科学,2017,38(1):53-59.

[22] 赵春波,宋述尧,赵靖,等.北方地区不同黄瓜品种氮素吸收与利用效率的差异[J].中国农业科学,2015,48(8):1569-1578.

[23] 赵静,郭勇祥,林志豪,等.黄瓜磷效率评价及其基因型差异[J].广东农业科学,2015,42(19):27-35+2.

[24] 顾炽明,韩配配,胡琼,等.甘蓝型油菜苗期氮效率评价[J].中国油料作物学报,2018,40(6):851-860.

[25] 葛军勇,田长叶,曾昭海,等.不同基因型裸燕麦氮素利用效率与氮素营养特性[J].干旱地区农业研究,2015,33(4):82-87.

[26] 许育彬,沈玉芳,李世清.不同氮效率小麦品种氮素吸收利用对CO₂ 浓度升高的响应[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):12-18.

[27] 温涛,赵春波,孙凯.浅谈影响氮素利用率的原因及解决途径[J].吉林农业,2012,(4):83.

[28] 毕珍,翟丙年,张敏敏,等.不同氮效率冬小麦品种生长发育特征比较研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):91-96.

[29] 王改丽.新型甘蓝型油菜氮高效种质的筛选及其氮高效机制的研究[D].武汉:华中农业大学,2014.

[30] 杨士尧.系统学的三个基本定律[J].石河子农学院学报,1985,(1):33-38.

[31] 孙虎,李尚霞,王月福,等.施氮量对花生叶片蔗糖代谢及产量的影响[J].中国油料作物学报,2007,29(4):456-459.

[32] 杜雄,左启华,冯丽肖,等.华北农牧交错区两种土壤类型下青饲玉米的施氮效应[J].作物学报,2008,34(6):1051-1059.

[33] 邢瑶,马兴华.氮素形态对植物生长影响的研究进展[J].中国农业科技导报,2015,17(2):109-117.

[34] 王新,马富裕,刁明,等.滴灌番茄临界氮浓度、氮素吸收和氮营养指数模拟[J].农业工程学报,2013,29(18):99-108.

[35] 程红.马铃薯氮营养高效利用品种的筛选及其生理机制的研究[D].成都:四川农业大学,2010.

[36] 王月福,于振文,李尚霞,等.氮素营养水平对小麦开花后碳素同化、运转和产量的影响[J].麦类作物学报,2002,22(2):55-59.