

陇中旱农区不同品种马铃薯 水氮利用效率研究

蒲宁¹, 罗珠珠^{1,2}, 张耀全³

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:以12个马铃薯品种为研究对象,连续2 a(2022—2023年)设置不施氮(0 kg·hm⁻²)和施氮(180 kg·hm⁻²)2个施氮水平,分析不同品种马铃薯产量和水氮效率特征,并采用隶属函数法对各马铃薯品种进行综合评价。结果表明:品种、氮水平和品种×氮水平都对晚熟马铃薯产量均具有极显著影响,而氮水平×品种对中熟品种无显著影响。连续2 a供氮条件下中熟品种产量变幅为8 289.39~22 011.61 kg·hm⁻²,晚熟品种产量变幅为8 192.57~20 308.58 kg·hm⁻²。基于2 a施氮和不施氮条件下各品种块茎产量,将不同马铃薯品种按照不同氮效率划分为4种类型,即双高型(‘京张薯1号’、‘陇薯20号’、‘青薯9号’、‘陇薯15号’、‘陇薯16号’)、低氮高效型(‘V7’、‘陇薯14号’)、高氮高效型(‘陇薯10号’)和双低型(‘冀张薯12号’、‘希森6号’、‘定薯3号’、‘陇薯22号’)。相关性分析结果表明:氮素吸收效率、氮肥表观利用率与产量呈极显著正相关关系($R^2=0.4438^{**}$, $R^2=0.4211^{**}$),马铃薯产量与块茎含氮量间呈极显著正相关关系($R^2=0.5302^{**}$, $R^2=0.4357^{**}$),说明在施氮和不施氮条件下,马铃薯块茎含氮量越高则其产量越高。隶属函数分析结果表明:中熟品种‘京张薯1号’($D_i=0.90$)、晚熟品种‘青薯9号’($D_i=0.90$)和‘陇薯10号’($D_i=0.87$)具有较高的综合水氮效率和产量表现,可作为水氮高效品种在陇中旱作区进行推广。

关键词:马铃薯;水分利用效率;氮肥偏生产力;氮肥农学效率;隶属函数

中图分类号:S532; S365 **文献标志码:**A

Study on water and nitrogen use efficiency of different potato varieties in the dry farmlands of Longzhong

PU Ning¹, LUO Zhuzhu^{1,2}, ZHANG Yaoquan³

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Key Laboratory of Arid Habitat Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In this study, 12 potato varieties were used in 2 consecutive years in 2022 and 2023, and two levels of no nitrogen application (0 kg·hm⁻²) and nitrogen application (180 kg·hm⁻²) were set to study the characteristics of potato yield and water-nitrogen efficiency of different varieties. The method of affiliation function for a comprehensive evaluation was adopted. The results showed that variety, nitrogen level, and variety × nitrogen level all had highly significant effects on late-maturing potato yield, while variety × nitrogen level had no significant effect on medium-maturing varieties. Yield variations ranged from 8 289.39 kg·hm⁻² to 22 011.61 kg·hm⁻² for medium-maturing varieties and 8 192.57 kg·hm⁻² to 20 308.58 kg·hm⁻² for late-maturing varieties under 2 consecutive years of N supply. Based on the average yields of each variety of potato under 2 years of nitrogen application and no nitrogen application conditions, different nitrogen-efficient varieties of the potato were classified into double high-efficiency type (‘Jingzhangshu 1’, ‘Longshu 20’, ‘Qingshu 9’, ‘Longshu 15’, ‘Longshu 16’), low-nitrogen high-efficiency type (‘V7’, ‘Longshu 14’), high-nitrogen high-efficiency type (‘Longshu 10’),

and double-low-efficiency type (‘Jizhangshu 12’, ‘Xisen 6’, ‘Dingshu 3’, ‘Longshu 22’). Correlation analysis showed that nitrogen uptake efficiency, apparent utilization rate of nitrogen fertilizer and yield had highly significant positive correlation ($R^2=0.4438^{**}$, $R^2=0.4211^{**}$), and there was a highly significant positive correlation between potato yield and nitrogen content of tubers ($R^2=0.5302^{**}$, $R^2=0.4357^{**}$), indicating that the higher the nitrogen content of potato tubers under the conditions of nitrogen application and no nitrogen application, the higher its yield. The analysis of the affiliation function showed that the medium-maturity variety ‘Jingzhangshu 1’ ($D_i=0.90$), the late-maturity variety ‘Qingshu 9’ ($D_i=0.90$) and ‘Longshu 10’ ($D_i=0.87$) had higher comprehensive water and nitrogen utilization efficiency and yield performance, which can be recommended as water- and nitrogen-efficient varieties in the Longzhong dry farmlands.

Keywords: potato; water use efficiency; partial productivity of N fertilizer; N agronomic efficiency; subordinate function

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是一年生茄科作物,具有营养丰富、经济效益高、适应性强等特点^[1-3]。我国农业部于2015年正式提出“马铃薯主粮化战略”,使得马铃薯成为继水稻、小麦和玉米之后的第四大主粮作物^[4],2020年其全国种植面积和产量分别达465.61万hm²和8991.5万t^[5]。随着我国人口增长和社会发展需要,未来20年粮食产量需增加1亿t,其中50%的粮食产能需要通过马铃薯增产来实现^[6]。因此,提高马铃薯生产能力对保障我国乃至世界粮食安全具有重要意义^[7]。甘肃省是我国重要的马铃薯商品薯和种薯生产基地,2020年全省马铃薯播种面积为70万hm²,产量达1550万t,播种面积和产量均位列全国第3位^[8-9]。马铃薯产业也已成为带动甘肃省农业和农村经济发展、促进农业增效、农民增收、保证粮食安全的战略产业^[10]。

干旱缺水是影响马铃薯品质和产量的重要因素,不同品种间抗旱性有所不同^[11],且不同气候条件下马铃薯品种间耗水量差异较大。研究表明,东南湿润地区中熟马铃薯全生育期耗水量仅为171.3~182.9mm^[12],而西北半干旱地区中晚熟马铃薯全生育期耗水量则高达354~500mm^[13]。同时,马铃薯属于氮敏感作物,每形成1000kg块茎产量所需纯氮量仅为3~4kg^[14]。然而受经济利益等诸多因素的影响,在马铃薯种植过程中,氮肥往往过量施入土壤,降低马铃薯块茎品质的同时也导致氮肥利用效率过低,土壤剖面硝态氮富集,造成严重的环境污染^[15-17]。Ankumah等^[18]研究发现马铃薯晚熟品种比早熟品种往往有更高的氮素利用率和氮素生理效率,并且栽培马铃薯品种和野生种质马铃薯的氮肥利用率也存在显著差异。程红^[19]在四川筛选出‘费乌瑞它’、‘坝薯10号’、‘高原7号’、‘云薯301’为氮高效型品种;矫娇娇等^[20]发现东北地

区‘东农310’和‘克新22号’等品种对氮素的响应度较高;何丹丹等^[21]在内蒙古的研究认为‘克新1号’和‘青薯9号’在不同施氮量下均有较高的产量表现。

陇中黄土丘陵区的甘肃省定西市是我国马铃薯的重要产区之一,其马铃薯品种繁多,马铃薯各品种间的水氮效率的差异性还缺乏系统研究,挖掘高水氮效率品种对促进该区域农业绿色生产具有重要意义。因此,本研究通过在甘肃省定西市安定区李家堡镇设置田间定位试验,分析不同马铃薯品种的产量和水氮效率特征,并基于隶属函数分析方法来筛选水氮高效和产量表现优异的马铃薯品种,以为该区域马铃薯绿色生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究于2022—2023年在甘肃农业大学旱作农业综合试验站进行。试验站位于甘肃省定西市安定区李家堡镇(104°44'E,35°28'N),平均海拔2000m,多年平均降水量为390.9mm,年均气温6.4℃,年均日照时数2476.6h,年均太阳辐射592.9kJ·cm⁻²,≥0℃年均积温2933.5℃,≥10℃年均积温2239.1℃,无霜期为140d,试验期间降水量如图1所示。土壤耕层有机碳6.25g·kg⁻¹,全氮0.77g·kg⁻¹,全磷0.68g·kg⁻¹,速效磷12.59mg·kg⁻¹,速效钾100.40mg·kg⁻¹,pH值为8.28。

1.2 试验设计

供试马铃薯品种共12个,其中‘京张薯1号’、‘冀张薯12号’、‘V7’、‘希森6号’和‘陇薯20号’为5个中熟品种,7个晚熟品种分别为‘陇薯10号’、‘陇薯14号’、‘陇薯15号’、‘陇薯16号’、‘陇薯22号’、‘青薯9号’和‘定薯3号’,所有品种均由甘肃省农业科学院提供。

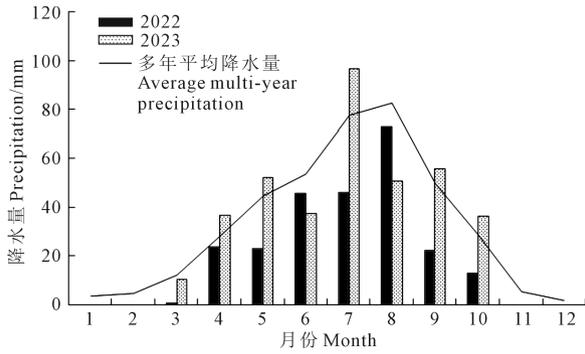


图 1 试验区 2022—2023 年每月降水量及各月多年平均降水量变化

Fig.1 Changes in monthly precipitation and multi-year average precipitation by month in the test area in 2022–2023

田间试验采用裂区设计,氮素处理为主区,设不施氮(N 0 kg · hm⁻², P₂O₅ 150 kg · hm⁻², N-)和施氮(N 180 kg · hm⁻², P₂O₅ 150 kg · hm⁻², N+) 2 个水平;马铃薯品种为副区,随机区组排列,3 次重复,共计 36 个小区。小区面积为 56 m²(7 m×8 m),每小区 6 垄 12 行,种植模式为黑膜覆盖高垄栽培(膜宽 110 cm、厚 0.01 mm),垄宽 0.7 m,垄高 0.3 m,行距 0.5 m,株距 0.3 m,播种密度 57 750 株 · hm⁻²。供试氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%),于种植前撒施旋耕翻入土壤。马铃薯分别于 2022 年 5 月上旬和 2023 年 4 月下旬播种,其中中熟品种每年 9 月中旬收获,晚熟品种每年 10 月下旬收获。根据当地高产栽培措施实行田间管理,试验期间无人为灌水,人工除草,并在盛花期喷洒沃丰素防治马铃薯晚疫病。

1.3 测定指标及方法

土壤容重:在马铃薯播种前采用环刀法测定 0~200 cm 土层土壤容重。

土壤水分含量:采用烘干法测定马铃薯播种前和收获后 0~200 cm 土层土壤含水量^[13]。

马铃薯块茎产量:成熟期各处理按小区面积实收计产,并折算为每公顷块茎产量。

植株含氮量:收获前在各小区随机选择 10 株能代表整体平均长势的正常植株,称量地上部、地下部以及块茎鲜质量后,放入 105℃ 的烘箱内杀青 1 h,80℃ 条件下烘干至恒重,将烘干后的植株和块茎分别粉碎,用全自动氮/形态碳分析仪测定各部位含氮量。

1.4 马铃薯水氮效率的相关参数计算

土壤储水量(mm) = 土壤质量含水量 × 土层深度 × 土壤容重 × 10

耗水量(mm) = 播前 0~200 cm 土层土壤储水

量 - 收后 0~200 cm 土层土壤储水量 + 马铃薯生育期降水量

马铃薯块茎氮吸收量(kg · hm⁻²) = 块茎产量 × 块茎含氮量 × 10⁻³^[22]

氮素吸收效率(%) = (块茎氮素吸收量 + 植株氮素吸收量) / 氮肥施用量 × 100%^[23]

氮生物学效率(氮利用效率)(kg · kg⁻¹) = 块茎产量 / 块茎氮吸收量^[24-25]

氮收获指数(%) = 块茎氮吸收量 / (块茎氮素吸收量 + 植株氮素吸收量) × 100%^[25]

氮肥表观利用率(%) = (施氮区块茎氮吸收量 - 不施氮区块茎氮吸收量) / 氮肥施用量 × 100%^[22]

氮肥农学效率(kg · kg⁻¹) = (施氮区块茎产量 - 不施氮区块茎产量) / 氮肥施用量^[22]

氮肥偏生产力(kg · kg⁻¹) = 施氮区块茎产量 / 氮肥施用量^[22]

水分利用效率(WUE, kg · hm⁻² · mm⁻¹) = 马铃薯块茎产量 / 耗水量^[13]

降水利用率(%) = 耗水量 / 全年降水量^[26]

1.5 水氮效率的综合评价

采取隶属函数对马铃薯各水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})。如某一指标与综合水氮效率呈正相关关系,则隶属函数值(X_{ij})用下式计算:

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

如某一指标与综合水氮效率呈负相关,则隶属函数值(X_{ij})用下式计算:

$$X_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中, X_{ij} 为马铃薯*i*品种($i = 1, 2, 3, \dots, m$)*j*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。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,最后计算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水氮效率。 D_i 值越高,说明该品种综合水氮效率越好。 D_i 计算公式如下:

$$D_i = \sum (X_{ij} \times V_j / \sum V_j) \quad (3)$$

1.6 数据处理

使用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理,并用 SPSS 25 软件进行统计分析,利用单因素方差分析(ANOVA)和多重比较法(Duncan)进行差异显著性分析。

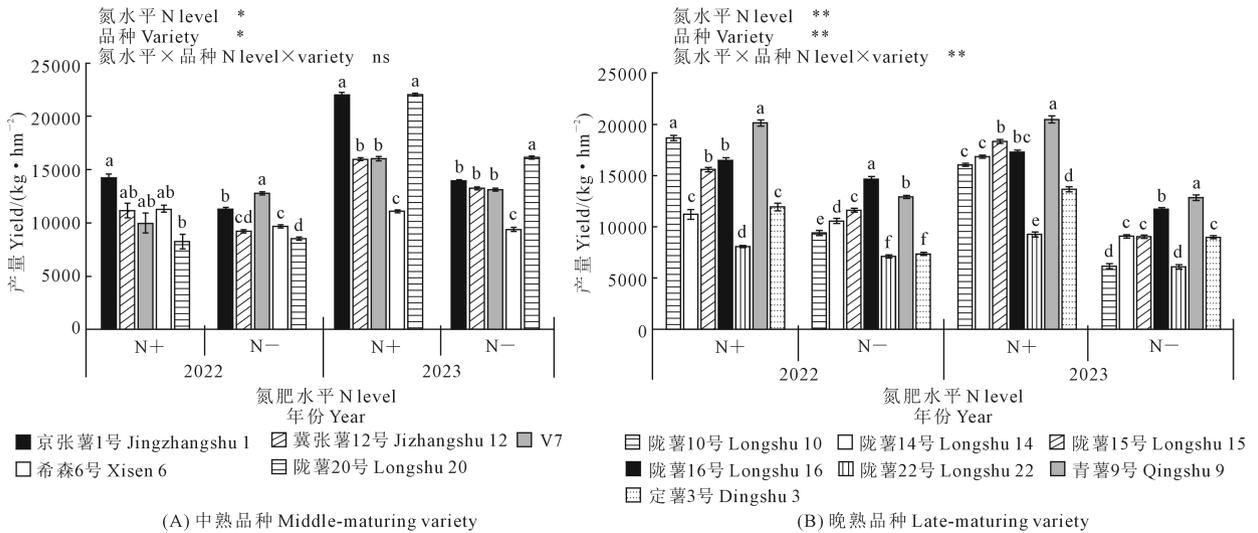
2 结果与分析

2.1 不同品种马铃薯产量效应及其氮素响应特征

不同品种马铃薯块茎产量如图2所示。结果表明,品种、氮水平、品种×氮水平均对晚熟马铃薯产量具有极显著影响($P<0.01$),而品种×氮水平对马铃薯中熟品种的产量无显著影响。2022年和2023年供氮条件下中熟品种产量变幅为8 289.39~22 011.61 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,不供氮条件下产量变幅为8 500.41~16 119.49 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;供氮条件下晚熟品种产量变幅为8 192.57~20 308.58 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,不供

氮条件下产量变幅为6 568.69~14 671.88 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中中熟品种‘京张薯1号’以及晚熟品种‘陇薯10号’和‘青薯9号’连续2 a在施氮肥条件下均表现出增产,说明这3个品种对氮肥反应敏感,施氮利于获得高产。

综合2022—2023年2 a产量,进一步对不同马铃薯品种的氮响应特征定性分析(图3)发现,中熟品种‘京张薯1号’和‘陇薯20号’均在第一象限,为双高效型(图3A, I区),该类品种在不施氮和施氮处理下的块茎产量均高于供试品种的平均值;‘希森6号’和‘冀张薯12号’均在第三象限,为双低型

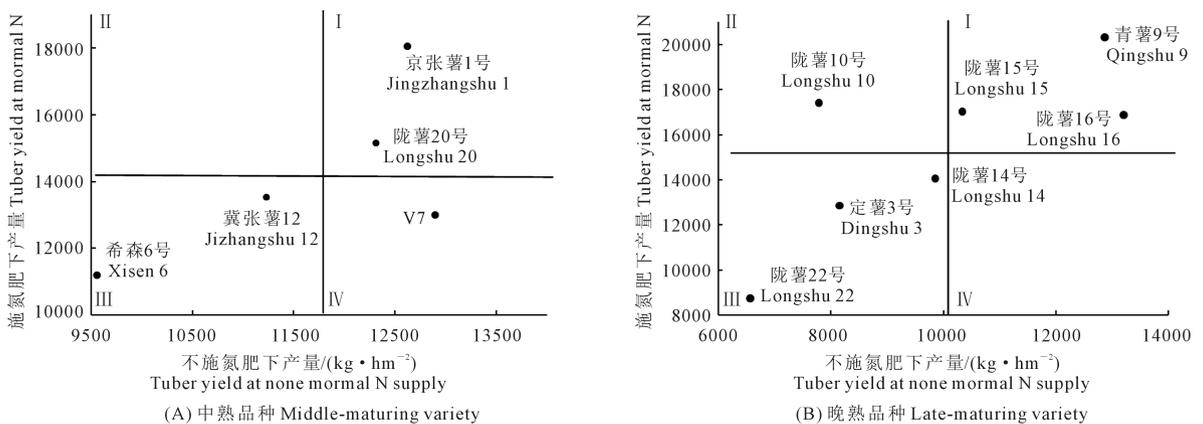


注:不同小写字母表示同一施氮水平不同品种间产量差异显著($P<0.05$),“**”表示极显著相关($P<0.01$),“*”表示显著相关($P<0.05$),“ns”表示相关性不显著($P>0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among varieties ($P<0.05$), “**” indicates $P<0.01$, “*” indicates $P<0.05$, and “ns” indicates $P>0.05$.

图2 不同熟性品种马铃薯块茎产量

Fig.2 Potato tuber yield of different maturity varieties



注: I: 双高效型,施氮和不施氮条件下均表现出高产; II: 高氮高效型,仅在施氮条件下表现出高产; III: 双低型,施氮和不施氮条件下均表现出低产; IV: 低氮高效型,不施氮条件下表现出高产。

Note: I: Double efficient type, both nitrogen application and no nitrogen application conditions showed high yielding; II: High nitrogen efficient type, nitrogen-only conditions showed high yields; III: Double inefficient type, both nitrogen application and no nitrogen application conditions showed low yielding; IV: Low nitrogen efficiency type, no nitrogen conditions showed high yields.

图3 不同品种马铃薯产量分布和氮素响应

Fig.3 Yield distribution of potato varieties with different N efficiencies

(图 3A, III 区), 该类品种在不施氮和施氮处理下产量均低于供试品种平均值; ‘V7’ 在第四象限, 为低氮高效型(图 3A, IV 区), 该类品种在不施氮条件下产量高于供试品种平均值, 施氮条件下产量低于供试品种平均值。对晚熟品种马铃薯的氮响应特征分析表明, ‘青薯 9 号’、‘陇薯 15 号’和‘陇薯 16 号’均为双高型(图 3B, I 区), ‘陇薯 10 号’为高氮高效型(图 3B, II 区), ‘陇薯 22 号’和‘定薯 3 号’为双低型(图 3B, III 区), ‘陇薯 14 号’为低氮高效型(图 3B, IV 区)。

2.2 不同品种马铃薯的水氮利用效率

2022—2023 年 2 a 不同品种马铃薯氮素利用效率如表 1 所示。对 5 个中熟品种的研究结果表明, 在 2022 年, ‘京张薯 1 号’块茎氮吸收量较‘陇薯 20 号’显著提高 61.48% ($P < 0.05$); 氮肥表观利用率和氮肥农学效率均表现为‘京张薯 1 号’、‘冀张薯 12 号’和‘希森 6 号’显著高于‘V7’ ($P < 0.05$), ‘V7’和‘陇薯 20 号’几乎没有表现出氮肥的增产潜力; ‘京张薯 1 号’的氮肥偏生产力较‘陇薯 20 号’显著提高 71.07% ($P < 0.05$)。2023 年结果与 2022 年相似, ‘京张薯 1 号’的块茎氮吸收量显著高于‘V7’和‘希森 6 号’ ($P < 0.05$); ‘京张薯 1 号’的氮肥表观利用率和氮肥农学效率均显著高于其他 4 个中熟品种 ($P < 0.05$); 氮素吸收效率表现为‘京张薯 1 号’和‘陇薯 20 号’显著高于其他 3 个品种 ($P < 0.05$); ‘V7’较‘陇薯 20 号’的氮收获指数显著提高 54.25% ($P < 0.05$); 氮肥偏生产力表现为‘京张薯 1 号’和‘陇薯 20 号’显著高于其他 3 个品种; 各品种之间的氮生物学效率在两年试验期内差异均不显著。

对 7 个晚熟品种的研究结果表明, 2022 年‘陇薯 22 号’的块茎氮吸收量显著低于其他 6 个品种 ($P < 0.05$); ‘青薯 9 号’、‘陇薯 16 号’、‘陇薯 10 号’和‘陇薯 15 号’的氮素吸收效率显著高于‘陇薯 22 号’ ($P < 0.05$); ‘陇薯 15 号’和‘陇薯 10 号’的氮生物学效率显著高于‘陇薯 16 号’ ($P < 0.05$); 氮收获指数表现为‘陇薯 10 号’、‘陇薯 16 号’和‘青薯 9 号’显著高于其他品种 ($P < 0.05$); ‘青薯 9 号’和‘陇薯 10 号’的氮肥表观利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力均显著高于其他品种 ($P < 0.05$)。2023 年试验结果与 2022 年基本一致, ‘陇薯 22 号’的块茎氮吸收量较‘陇薯 10 号’、‘陇薯 16 号’和‘青薯 9 号’分别显著降低 59.08%、51.04% 和 53.70% ($P < 0.05$); 除了‘陇薯 14 号’, ‘陇薯 22 号’的氮素吸收效率显著低于其他 5 个品种 ($P < 0.05$); ‘陇薯 15 号’的氮生物学效率较‘陇薯 10 号’显著

提高 67.67% ($P < 0.05$); 氮肥表观利用率表现为‘陇薯 22 号’显著低于‘定薯 3 号’以外的其他 5 个品种 ($P < 0.05$); ‘陇薯 10 号’和‘陇薯 15 号’的氮肥农学效率显著高于其他 5 个品种 ($P < 0.05$); ‘青薯 9 号’的氮肥偏生产力显著高于其他品种 ($P < 0.05$); 各品种之间的氮收获指数差异不显著。

2 a 不同品种马铃薯的水分利用效率和降水利用效率如表 1 所示。中熟品种在 2022 年水分利用效率表现为‘京张薯 1 号’显著高于‘V7’和‘陇薯 20 号’ ($P < 0.05$), 分别提高 49.66% 和 62.89%; 降水利用效率表现为‘京张薯 1 号’显著高于其他 4 个品种 ($P < 0.05$), 增幅达 8.16%~9.00%; 在 2023 年, ‘陇薯 20 号’的水分利用效率显著高于‘冀张薯 12 号’、‘V7’和‘希森 6 号’ ($P < 0.05$), 分别提高 74.80%、46.62% 和 119.88%; 各品种的降水利用率差异均不显著。晚熟品种在 2022 年的水分利用效率表现为‘青薯 9 号’、‘陇薯 10 号’和‘陇薯 16 号’显著高于其他品种 ($P < 0.05$); 降水利用效率则表现为‘陇薯 22 号’显著低于其他品种 ($P < 0.05$), 降幅达 1.32%~2.97%; 在 2023 年, ‘青薯 9 号’的水分利用效率显著高于‘陇薯 14 号’、‘陇薯 16 号’、‘陇薯 22 号’和‘定薯 3 号’ ($P < 0.05$), 分别提高了 17.68%、18.04%、133.37% 和 23.05%; 各品种之间的降水利用率差异不显著。

综合 2 a 数据进行的相关分析结果表明(图 4~6), 氮素吸收效率和氮肥表观利用率均与产量呈极显著正相关关系 ($R^2 = 0.4438^{**}$, $R^2 = 0.4211^{**}$), 降水利用率和产量的相关性不显著。在施氮和不施氮条件下, 各品种马铃薯产量 (Y) 与块茎含氮量 (X) 间均呈极显著正相关关系 ($R^2 = 0.5302^{**}$, $R^2 = 0.4357^{**}$) (图 7~8), 表明马铃薯块茎含氮量越高则其产量越高, 结果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。

2.3 不同品种马铃薯水氮效率综合评价

基于 2022—2023 年 2 a 试验, 对马铃薯产量、块茎氮吸收量、氮效率及水分利用效率、降水利用效率等 10 个单项指标进行隶属函数分析的结果表明(图 9), 不同中熟品种马铃薯的隶属函数综合值 (D_i) 介于 0.14~0.90 之间, 其中以双高型品种‘京张薯 1 号’表现最优; 不同晚熟品种马铃薯的隶属函数值介于 0.04~0.90 之间, 其中双高型品种‘青薯 9 号’和高氮高效型品种‘陇薯 10 号’表现较优。因此, 中熟品种‘京张薯 1 号’、晚熟品种‘青薯 9 号’和‘陇薯 10 号’可作为水氮高效品种在试区进行推广种植。

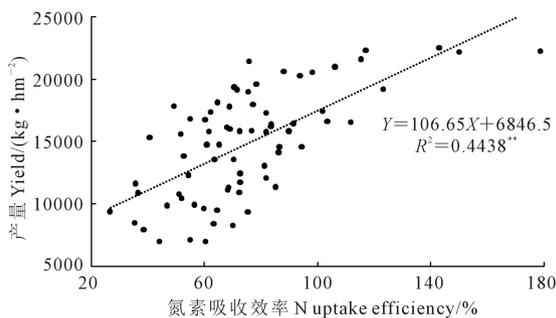


图4 氮素吸收效率与产量的关系
Fig.4 Relationship between N uptake efficiency and yield

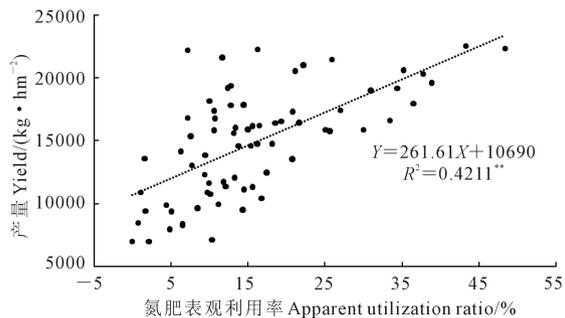


图5 氮肥表观利用率与产量的关系
Fig.5 Relationship between nitrogen apparent efficiency and yield

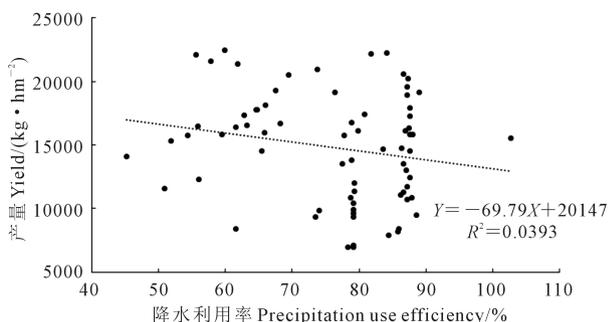


图6 降水利用率与产量的关系
Fig.6 Relationship between precipitation use efficiency and yield

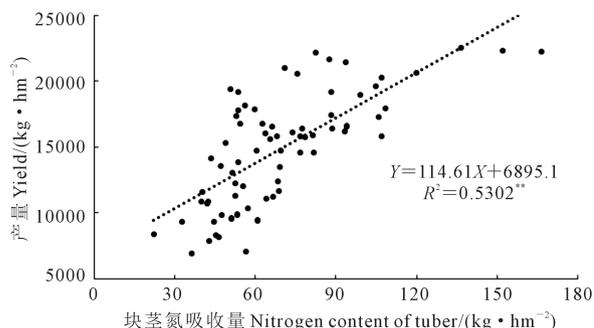


图7 施氮条件下马铃薯产量与块茎含氮量关系
Fig.7 Relationship between potato yield and tuber N content with N fertilizer

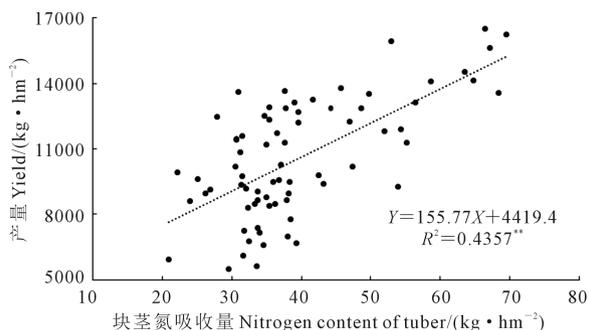


图8 不施氮条件下马铃薯产量与块茎含氮量关系
Fig.8 Relationship between potato yield and tuber N content with no N fertilizer

3 讨论

氮高效育种是提高作物氮素利用效率的重要手段^[26-28]。多数作物由于品种不同而存在氮素效率差异,氮高效品种对氮素的吸收利用并转化为产量的能力远高于氮低效品种^[29],氮高效品种可以降低过量施氮导致的氮素污染。本研究以不施氮与施氮条件下马铃薯块茎产量为基础,将不同品种马铃薯划分为4个类型,中熟品种‘京张薯1号’和‘陇薯20号’属于双高型,‘V7’属于低氮高效型,‘希森6号’和‘冀张薯12号’属于双低型。晚熟品

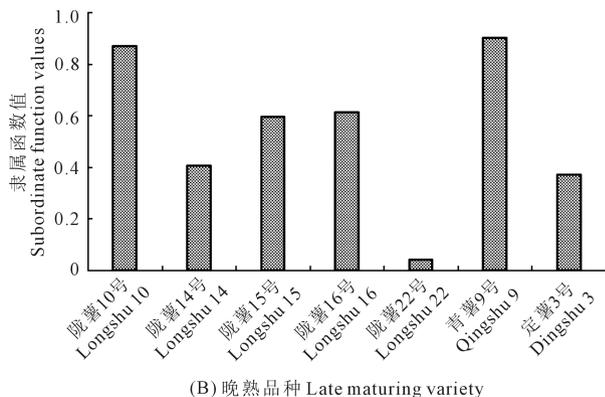
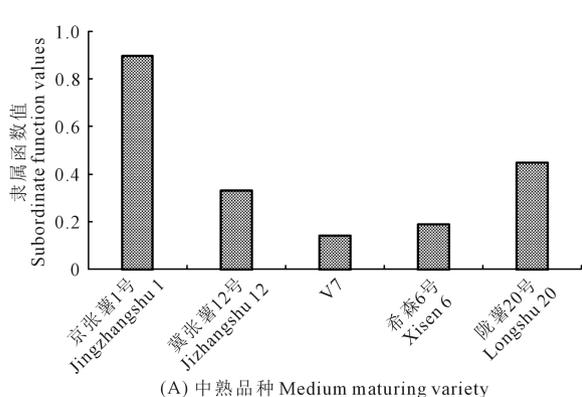


图9 不同品种马铃薯的隶属函数值
Fig.9 Membership function values of potato of different varieties

表 1 不同品种马铃薯氮吸收量及水氮效率

Table 1 Nitrogen accumulation and water nitrogen efficiency of different potato varieties

年份 Year	处理 Treatment	块茎氮吸收量 N absorption of tubers (kg · hm ⁻²)	氮素吸收效率 N uptake efficiency/%	氮生物学效率 N biological efficiency (kg · kg ⁻¹)	氮收获指数 N harvest index/%	氮肥表观 利用率 Apparent utilization ratio/%	氮肥农学效率 Agronomy efficiency (kg · kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 Partial productivity efficiency (kg · kg ⁻¹)	水分利用效率 Water use efficiency (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)	降水利用率 Precipitation use efficiency/%	
2022	京张薯 1 号	60.38±5.15a	69.06±6.21a	236.83±12.36a	49.83±7.41a	14.04±3.21a	16.02±3.47a	78.78±3.14a	56.54±3.21a	85.64±1.05a	
	冀张薯 12 号	52.70±0.83ab	56.18±2.06a	210.79±23.47a	52.31±2.68a	9.68±0.80ab	10.72±6.74a	61.85±7.54ab	46.15±4.22ab	79.04±0.10b	
	中熟 Middle- ripening	V7	49.28±3.63b	66.84±6.12a	208.24±46.92a	42.33±7.45a	5.64±2.55bc	-14.94±10.52ab	55.58±10.52ab	37.78±6.57b	78.57±0.58b
		希森 6 号	54.94±1.39ab	72.97±10.57a	205.73±11.67a	44.28±8.48a	14.05±1.41a	8.72±1.96a	62.65±2.62ab	42.87±2.06ab	79.18±0.06b
	陇薯 20 号	37.39±1.23c	58.78±8.20a	219.93±26.71a	36.59±4.65a	1.07±0.61c	-1.17±6.82ab	46.05±7.24b	34.71±7.38b	78.71±2.38b	
	陇薯 10 号	98.45±5.81b	74.64±1.64abc	191.72±14.87a	73.16±2.77a	33.96±1.63a	51.71±3.38a	103.90±2.09a	58.44±1.81a	87.89±0.54a	
	陇薯 14 号	65.97±2.62d	69.86±2.71bcd	169.53±7.43ab	52.45±0.08b	14.54±1.62c	3.53±6.63d	62.32±4.94c	36.56±3.67c	87.73±0.40a	
	陇薯 15 号	82.26±3.46c	82.18±2.93ab	189.98±2.94a	55.78±3.25b	15.78±1.43c	21.89±3.73bc	86.75±2.98b	48.23±2.71b	87.54±0.03ab	
	陇薯 16 号	102.02±4.45ab	79.19±3.44abc	161.71±7.43b	72.04±5.78a	22.43±3.99b	9.83±6.07cd	91.34±2.43b	58.07±3.89a	87.45±0.31ab	
	晚熟 Late-ripening	陇薯 22 号	44.78±1.85e	57.18±9.58d	183.03±2.39ab	46.14±7.86b	5.94±0.54d	6.29±1.44d	45.51±0.75d	38.84±2.33c	85.28±0.49c
青薯 9 号		110.59±4.72a	86.68±4.50a	182.84±5.54ab	71.17±3.87a	37.32±1.08a	40.16±0.66a	112.02±1.64a	65.12±3.33a	87.00±0.23ab	
定薯 3 号		66.60±1.45d	66.73±1.60cd	179.73±3.36ab	55.56±2.49b	16.95±1.94bc	25.74±4.65b	66.60±21.32c	40.74±1.32bc	86.42±0.14b	
2023	京张薯 1 号	119.79±24.90a	122.02±10.94a	202.77±47.24a	51.11±10.14ab	37.98±8.04a	44.44±1.74a	121.91±2.64a	81.10±8.94ab	72.54±7.02a	
	冀张薯 12 号	67.60±3.15abc	62.77±5.61b	236.42±9.59a	60.73±5.52ab	14.06±0.79b	14.82±1.81cd	88.46±0.93b	52.34±6.94c	82.73±10.74a	
	中熟 Middle- ripening	V7	59.82±5.61bc	52.31±6.24b	271.58±23.12a	63.95±1.79a	8.44±1.09b	16.05±1.44c	88.83±2.41b	62.40±7.70bc	69.45±8.82a
		希森 6 号	41.59±0.75c	40.97±5.01b	266.88±11.36a	57.84±5.99ab	9.92±0.12b	9.36±1.39d	61.56±1.49c	41.61±9.14c	75.29±12.18a
	陇薯 20 号	112.12±27.21ab	148.04±18.31a	216.56±41.93a	41.46±6.13b	11.70±2.63b	32.73±2.42b	122.29±1.13a	91.49±10.17a	65.03±8.36a	
	陇薯 10 号	83.02±5.41a	91.66±6.31a	194.72±9.03b	50.40±1.68a	28.06±2.70a	54.86±3.22a	89.27±1.47c	71.72±2.27ab	59.00±2.59a	
	陇薯 14 号	61.44±7.93ab	71.24±10.13ab	283.54±35.83ab	48.08±0.95a	14.32±3.66b	42.88±2.31b	93.64±1.50c	69.17±2.40b	64.12±2.05a	
	陇薯 15 号	56.51±1.77ab	78.96±22.52a	326.49±17.11a	46.66±12.52a	12.26±1.29b	52.12±1.24a	102.17±2.25b	70.23±2.13ab	69.00±3.70a	
	陇薯 16 号	69.38±10.09a	94.01±12.95a	259.63±39.05ab	41.52±1.48a	19.72±4.12ab	30.62±2.37c	95.87±2.06bc	68.96±6.35b	67.05±7.29a	
	晚熟 Late-ripening	陇薯 22 号	33.97±7.29b	36.15±5.87b	292.96±50.02ab	53.07±9.67a	2.26±1.10c	17.51±2.21d	51.27±2.28e	34.88±0.74c	69.63±4.09a
青薯 9 号		73.37±12.41a	81.43±8.50a	293.83±45.30ab	50.54±9.11a	19.95±3.84ab	42.49±4.31b	113.60±3.35a	81.40±4.89a	66.22±2.27a	
定薯 3 号	59.11±11.56ab	78.19±12.23a	246.60±42.93ab	43.24±7.79a	10.36±2.67bc	26.18±2.39c	75.97±3.88d	66.15±3.34b	55.52±5.85a		

注: 同列不同小写字母表示同一年份同一指标类型下不同品种间差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different varieties under the same type in the same year (P<0.05).

种‘青薯9号’、‘陇薯15号’和‘陇薯16号’属于双高型,‘陇薯14号’属于低氮高效型,‘定薯3号’和‘陇薯22号’属于双低型,‘陇薯10号’属于高氮高效型。本研究发现,氮素吸收效率、氮肥表观利用率和产量之间均呈极显著正相关关系,说明随着氮肥表观利用率的提升,氮素吸收效率增加,氮肥利用能力提高进而影响到马铃薯产量的提高,此外,2022年结果显示‘V7’和‘陇薯20号’的氮肥农学效率为 $-14.94 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $-1.17 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分析认为2022年的降水较少而导致该品种氮耐受性差,而在2023年降水量增加,氮肥农学效率也随之增加,这也为区域氮效率和产量双高的优良马铃薯选育推广提供了理论依据。

马铃薯氮含量和氮吸收量对于高产至关重要,能够合理分配氮素的品种有利于提高马铃薯块茎氮的总吸收量,同时适度增施氮肥也能提高马铃薯氮吸收量,且不同品种间的氮效率存在显著差异^[30-32]。程红等^[33]研究发现,与氮低效品种马铃薯相比,氮高效品种马铃薯的氮素吸收量更高,且不同基因型马铃薯随着供氮水平的提高氮素吸收量和含氮量逐渐增加^[20]。本研究发现,所有品种马铃薯含氮量均随着施氮量的增加明显提高,而且在同一施氮水平下,氮低效品种马铃薯有着相对高的植株氮吸收量,但其块茎的含氮量相对较低,氮高效品种马铃薯则完全相反,其块茎中氮含量更高,表明提高氮素向块茎的分配更有利于提高马铃薯的氮效率;此外,各部位氮素分配对马铃薯氮效率的影响大于吸收。本研究还发现,施氮和不施氮条件下,各品种马铃薯块茎产量与块茎含氮量均呈极显著正相关关系,说明在一定范围内,施氮可明显提高各品种马铃薯的块茎氮积累量,单株结薯产量也随之增加^[34]。

叶片是植物光合作用的主要器官,光合产物的积累直接决定着作物产量的高低。大量研究表明^[19,21,35],氮高效型品种的叶片氮素与SPAD值高于低效型品种,为其保持较高的净光合速率提供了物质基础,从而导致氮高效型品种叶片光合氮利用效率高于氮低效型品种,这也是氮高效型品种增产的主要机制。本研究基于马铃薯水氮效率进行了综合评价,筛选出双高型中熟品种‘京张薯1号’、双高型晚熟品种‘青薯9号’和高氮高效型晚熟品种‘陇薯10号’这三个具有较高的水氮利用率和产量表现的马铃薯品种,适宜在黄土高原半干旱区进行推广。然而本研究主要考虑了马铃薯氮效率与块茎产量的相关性,并未涉及不同品种的光合生理性能,后续将深入开展马铃薯

含氮量与光合性能关系的相关研究,以便进一步揭示不同品种马铃薯氮利用效率差异的生理机制。

4 结 论

供试的12个马铃薯品种中,中熟品种‘京张薯1号’和‘陇薯20号’为双高型,‘V7’为低氮高效型,‘希森6号’和‘冀张薯12号’为双低型;晚熟品种‘青薯9号’、‘陇薯15号’和‘陇薯16号’为双高型,‘陇薯14号’为低氮高效型,‘定薯3号’和‘陇薯22号’为双低型,‘陇薯10号’为高氮高效型。中熟品种‘京张薯1号’、‘冀张薯12号’、‘希森6号’以及晚熟品种‘陇薯10号’和‘青薯9号’在施氮肥条件下均表现出明显增产效应,说明这5个品种对氮肥反应敏感,施氮利于获得高产。总体而言,马铃薯中熟品种‘京张薯1号’(双高型)和晚熟品种‘青薯9号’(双高型)‘陇薯10号’(高氮高效型)具有较高的水氮利用效率和产量,可作为水氮高效品种在陇中旱农区进行推广。

参 考 文 献:

- [1] CAMIRE M E, KUBOW S, DONNELLY D J. Potatoes and human health[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2009, 49(10): 823-840.
- [2] 张森昱, 冯雨露, 马建涛, 等. 不同降水年型下秸秆带状覆盖对西北旱地马铃薯品质和产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(5): 207-216.
ZHANG S Y, FENG Y L, MA J T, et al. Effects of straw strip mulching on potato tuber quality and yield in the northwestern dryland region under different hydrological year[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(5): 207-216.
- [3] 丁凯鑫, 王立春, 田国奎, 等. 干旱胁迫下不同品种马铃薯块茎膨大期叶片对烯效唑的生理响应[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(7): 1067-1080.
DING K X, WANG L C, TIAN G K, et al. Physiological responses of leaves of different potato varieties to uniconazole during tuber expansion stage under drought stress[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(7): 1067-1080.
- [4] 李文丽, 袁剑龙, 段惠敏, 等. 马铃薯块茎质地品质的综合评价[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(12): 2278-2293.
LI W L, YUAN J L, DUAN H M, et al. Comprehensive evaluation of potato tuber texture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(12): 2278-2293.
- [5] 雷俊, 蔡迪花, 齐月, 等. 水分胁迫对半干旱区马铃薯产量形成的影响研究[J]. *干旱气象*, 2023, 41(2): 233-240.
LEI J, CAI D H, QI Y, et al. Effects of water stress on potato yield formation in semi-arid region[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2023, 41(2): 233-240.
- [6] KOCH M, NAUMANN M, PAWELZIK E, et al. The importance of nutrient management for potato production part I: plant nutrition and yield[J]. *Potato Research*, 2020, 63(1): 97-119.

- [7] 陈洋, 赵红怡, 闫俊杰, 等. 马铃薯块茎雌性信息素化学合成研究现状[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 556-572.
CHEN Y, ZHAO H Y, YAN J J, et al. Chemical synthesis view on sex pheromones of potato tuberworm (*phthorimaea operculella*) [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 556-572.
- [8] 王娟, 陈小丽, 谭伟军, 等. 甘肃中部地区抗病优质专用马铃薯新品种引进筛选试验[J]. 中国马铃薯, 2022, 36(3): 206-214.
WANG J, CHEN X L, TAN W J, et al. Introduction and screening test of new potato varieties with features of disease resistance, good quality and special purpose in central Gansu province[J]. Chinese Potato Journal, 2022, 36(3): 206-214.
- [9] 魏进堂, 李旭华, 邹金秋. 甘肃定西马铃薯及其脱毒种薯产业发展现状、存在问题与思路建议[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(6): 16-21.
WEI J T, LI X H, ZOU J Q. Development status, problems and suggestions of potato industry of Dingxi potato and its virus-free seeds in Gansu province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(6): 16-21.
- [10] 白贺兰, 乔德华. 甘肃省马铃薯产业发展现状及持续健康发展对策[J]. 中国马铃薯, 2018, 32(2): 118-123.
BAI H L, QIAO D H. Status and countermeasures for sustained and healthy development of potato industry in Gansu province[J]. Chinese Potato Journal, 2018, 32(2): 118-123.
- [11] 李丹, 王翻龙, 张龙, 等. 不同降水年型下耕作结合秸秆覆盖对马铃薯耗水特征及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2): 275-286.
LI D, WANG F L, ZHANG L, et al. Effect of tillage combined with straw mulching on water consumption characteristics and yield of potato under different precipitation years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 275-286.
- [12] 郑雅超. 不同覆盖方式对秋马铃薯产量与土壤水分的影响[J]. 福建农业科技, 2023, 54(5): 64-69.
ZHENG Y C. Effects of different mulching methods on the yield of potatoes planted in autumn and soil moisture[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2023, 54(5): 64-69.
- [13] 刘青, 马建涛, 韩凡香, 等. 不同覆盖材料对旱地马铃薯土壤水分和耗水的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 197-205.
LIU Q, MA J T, HAN F X, et al. Effects of different mulching materials on soil moisture and water consumption of potato in dryland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 197-205.
- [14] 刘可心, 王克秀, 唐铭霞, 等. 施钾量对马铃薯生长发育及氮磷钾积累分配的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(2): 51-56.
LIU K X, WANG K X, TANG M X, et al. Effect of potassium application rates on potato growth and NPK accumulation and distribution [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(2): 51-56.
- [15] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 783-795.
- [16] ZHAO W X, SHAN Z J, LI J S, et al. Effects of fertigation splits through center pivot on the nitrogen uptake, yield, and nitrogen use efficiency of winter wheat grown in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2020, 240: 106291.
- [17] 蔡明, 刘吉利, 杨亚亚, 等. 施氮量对间作马铃薯植株氮素累积及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 142-149.
CAI M, LIU J L, YANG Y Y, et al. Effects of nitrogen application rate on nitrogen accumulation and yield of intercropping potato plants [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(2): 142-149.
- [18] ANKUMAH R O, KHAN V, MWAMBA K, et al. The influence of source and timing of nitrogen fertilizers on yield and nitrogen use efficiency of four sweet potato cultivars [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 100(2/3): 201-207.
- [19] 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]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
CHENG H. Screening of potato varieties for efficient nitrogen nutrient utilization and research on their physiological mechanisms[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2010.
- [20] 矫娇娇, 魏峭嵘, 裴佳宁, 等. 不同基因型马铃薯对氮素响应的差异[J]. 华北农学报, 2018, 33(5): 203-208.
JIAO J J, WEI Q R, PEI J N, et al. Difference of nitrogen response in different genotypes of potato[J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2018, 33(5): 203-208.
- [21] 何丹丹, 贾立国, 秦永林, 等. 不同马铃薯品种的氮利用效率及其分类研究[J]. 作物学报, 2019, 45(1): 153-159.
HE D D, JIA L G, QIN Y L, et al. Classification of potato cultivars by their nitrogen use efficiency[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(1): 153-159.
- [22] 杨慧敏, 王涛, 窦璇霞, 等. 不同降水年型地膜覆盖及秸秆覆盖提高小麦产量和氮素利用的效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(11): 1905-1914.
YANG H M, WANG T, DOU Y X, et al. Effects of plastic film mulching and straw mulching on wheat yield and nitrogen utilization during different precipitation years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2021, 27(11): 1905-1914.
- [23] BOHMAN B J, ROSEN C J, MULLA D J. Relating nitrogen use efficiency to nitrogen nutrition index for evaluation of agronomic and environmental outcomes in potato [J]. Field Crops Research, 2021, 262: 108041.
- [24] LI C, FENG H, LUO X Q, et al. Limited irrigation and fertilization in sand-layered soil increases nitrogen use efficiency and economic benefits under film mulched ridge-furrow irrigation in arid areas[J]. Agricultural Water Management, 2022, 262: 107406.
- [25] JAHANGIR M M R, RAHMAN S, UDDIN S, et al. Crop residue interactions with fertilizer rate enhances volatilization loss and reduces nitrogen use efficiency in irrigated maize and potato[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2023, 69(10): 1833-1845.
- [26] 李玥瑶, 吴梦洋, 操信春, 等. 稻田水资源利用效用的灌排模式响应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 213-219, 227.
LI Y Y, WU M Y, CAO X C, et al. Experimental study on effect of irrigation mode on generalized water resources utility in paddy rice field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 213-219, 227.