

延安新造贫瘠耕地适生农作物及其高产品种筛选

陈怡平¹, 苏翠翠¹, 王祥龙^{1,2}, 王 益¹, 王凯博¹, 张维斌³, 张光红³, 张润生³

1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

2. 西北师范大学 生命科学学院, 兰州 730070

3. 延安惠民农业科技发展有限公司, 延安 716000

摘要: 2013—2017年延安市实施了治沟造地工程, 总投资约50亿, 新造耕地3.33万hm², 但是研究发现新造耕地土壤贫瘠, 改良需要较长时间。因此筛选新造耕地适生农作物及其高产品种, 指导农业生产实践显得尤为重要和迫切。为此, 本研究开展延安新造耕地适生农作物筛选实验, 发现马铃薯为新造耕地适生农作物, 进而从甘肃等地选择有代表性的抗性强、产量高的11个马铃薯品种, 在延安安塞区高桥镇南沟村开展了最适马铃薯品种筛选的大田实验。结果表明: (1) 从产量、产值以及对土壤改良角度综合考虑, 马铃薯为延安新造耕地适生作物, 其产量和产值均显著高于其他农作物, 且马铃薯有利于降低土壤pH值, 改善土壤团粒结构, 提升有机质与氮磷含量, 适宜于新造贫瘠耕地种植。(2) “新大坪”、“青薯168”、“克新1号”产量均显著高于本地马铃薯品种 ($P < 0.01$), 且出苗率、水分利用效率、净光合效率、气孔导度、蒸腾速率和胞间CO₂浓度均高于本地马铃薯品种 ($P < 0.05$); “陇薯7号”出苗率、气孔导度、蒸腾速率和胞间CO₂浓度也高于本地品种 ($P < 0.05$), 其水分利用效率低 ($P > 0.05$), 限制了其光合效率 ($P > 0.05$), 没有表现出高产效果 ($P > 0.05$), 但是个头大、表面光滑、卖相好。(3) 进一步大田验证实验发现, “新大坪”不但产量高, 而且出苗率、株高、净光合速率、气孔导度、淀粉、还原糖、蛋白质均优于本地马铃薯品种; “青薯168”产量也显著高于本地马铃薯品种, 其胞间CO₂浓度、蒸腾速率、PS II实际光化学效率、最大光化学量子产量、PS II潜在活性均优于本地品种; “陇薯7号”与“克新1号”产量也高于本地品种, 但无显著性差异 ($P > 0.05$)。利用模糊数学隶属函数方法综合评价发现, “新大坪”隶属度值最大, 为新造耕地最适宜种植推广的品种, 其次为“陇薯7号”与“青薯168”, 而“克新1号”综合评价劣于本地品种。

关键词: 治沟造地; 适生作物; 土壤改良; 马铃薯品质; 隶属度评价法; 光合作用

Selection of suitable crops and its best cultivar in newly created farmland of Yan'an region

CHEN Yiping¹, SU Cuicui¹, WANG Xianglong^{1,2}, WANG Yi¹, WANG Kaibo¹, ZHANG Weibin³, ZHANG Guanghong³, ZHANG Runsheng³

1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

2. College of Life Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

3. Yan'an Huimin Agricultural Technology Development Co., Ltd, Yan'an 716000, China

收稿日期: 2020-10-10; 录用日期: 2020-12-25; 网络出版: 2021-01-05

Received Date: 2020-10-10; Accepted Date: 2020-12-25; Online first: 2021-01-05

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0800500)

Foundation Item: National Key R & D Program of China (2017YFD0800500)

通信作者: 陈怡平, E-mail: lifesci@ieecas.cn

Corresponding Author: CHEN Yiping, E-mail: lifesci@ieecas.cn

引用格式: 陈怡平, 苏翠翠, 王祥龙, 等. 2021. 延安新造贫瘠耕地适生农作物及其高产品种筛选 [J]. 地球环境学报, 12(2): 202–213.

Citation: Chen Y P, Su C C, Wang X L, et al. 2021. Selection of suitable crops and its best cultivar in newly created farmland of Yan'an region [J]. Journal of Earth Environment, 12(2): 202–213.

Abstract: Background, aim, and scope A project of creation farmland has implemented in Yan'an City from 2013 to 2017, which project invested about 5 billion yuan. However, the newly created farmland is barren and it does not meet plant growth needs. Moreover, it takes a long time to ameliorate new created farmland soil. Therefore, it is urgent to select the suitable crops and its high-yield cultivar to guide agricultural production practice on newly created farmland. **Materials and methods** Several local crops have been selected as experimental materials for higher yield and output value crops selection, and then 11 potato varieties with high resistance and high yield were selected from Gansu and other places, and field experiments were carried out in Nangou Village, Gaoqiao Town, Ansai District, Yan'an from 2016 to 2018. **Results** The results showed: (1) potato is the better suitable crop than other 5 crops in the newly created farmland in Yan'an region, and its output and its value are significantly higher than that of other crops, moreover, planting potatoes is in favor of reducing soil pH value, improving soil aggregate structure and the concentrations of organic matter and nitrogen. (2) The yields of Xindaping, Qingshu 168 and Kexin No.1 were significantly higher than that of local potato cultivar ($P < 0.01$), moreover, their emergence rate, water use efficiency, net photosynthetic efficiency, stomatal conductance, transpiration rate and intercellular CO_2 concentration were also significant higher than that of local cultivar of potato ($P < 0.05$). The emergence rate, stomatal conductance, transpiration rate and intercellular CO_2 concentration of Longshu No.7 were also higher than that of local cultivar ($P < 0.05$), but its water use efficiency was lower than that of the local cultivar ($P > 0.05$), which limited its photosynthetic efficiency ($P > 0.05$), and finally resulted in lower yield ($P > 0.05$). Nevertheless, tuber size was bigger than that of others cultivar, with smooth surface and good looking. (3) Further field experiments showed that Xindaping not only had a high yield, but also had better the emergence rate, net photosynthetic rate, stomatal conductance and high concentrations of the starch, reducing sugar and protein than that of local potato cultivar. For Qingshu 168, the yield, intercellular CO_2 concentration, transpiration rate, PS II actual photochemical efficiency, maximum photochemical quantum yield, and PS II potential activity were better than that of local cultivar. The yields of Longshu No. 7 and Kexin No. 1 were also higher ($P > 0.05$) than that of local cultivar. **Discussion** Comprehensive evaluation by Fuzzy Mathematics Membership Function method indicated that Xindaping has the highest membership value, next is Longshu No.7 and Qingshu 168, and the Kexin No.1 is not suitable for promotion. **Conclusions** The potato cultivar "Xindaping", "Longshu No.7" and "Qingshu 168" have strong growth adaptability and high economic efficiency on newly created farmland. **Recommendations and perspectives** The results indicate that potato varieties "Xindaping", "Longshu No.7" and "Qingshu 168" should be popularized and planted as main crop cultivar in the barren newly created farmland.

Key words: gullies reclamation for farmland; suitable crops; soil ameliorate; potato quality; membership evaluation method; photosynthesis

黄土高原是中华文明的重要发祥地之一, 总面积约 64 万 km^2 。黄土高原位于半湿润与半干旱气候区的过渡带, 生态环境十分脆弱。黄土高原主要为风尘堆积而成, 土壤疏松多孔, 极易渗水侵蚀 (朱显谟和祝一志, 1992), 加之全年降雨集中在 7—9 月, 且以暴雨形式为主, 导致黄土高原成为全球水土流失最为严重的区域之一。长期的严重的水土流失, 严重阻碍该地区社会经济发展 (闫云霞, 2006)。

中华人民共和国成立以来, 党和国家高度重

视黄土高原生态环境治理, 先后经历了坡面治理、小流域治理与退耕还林草工程, 每个阶段均取得较好的成效, 尤其是退耕还林草工程的效果十分显著 (陈怡平, 2019-09-03)。自 1999 年实施退耕还林草工程以来, 黄土高原植被覆盖度从 1999 年的 31.6% 提高至 2013 年的 59.5%, 植被盖度提高了 28%, 入黄泥沙减小至 1.73 亿 t (Chen et al, 2015), 有效遏制了黄土高原水土流失, 改善了当地脆弱的生态环境。

研究表明黄土高原大于 15° 的坡面适于实施

退耕还林草工程,在保障人均耕地 0.1 hm^2 的前提下,黄土高原退耕还林草面积上限为 236 万 hm^2 。但是,至 2008 年已退耕 483 万 hm^2 (Lü et al, 2012)。过度退耕还林草导致黄土高原局部地区出现人-地矛盾突出的现象,尤其是陕西延安市。延安地处黄土高原腹地,1999 年率先实施退耕还林草工程,成为了“全国退耕还林第一市”。截止 2012 年底,全市共计退耕还林还草 60.67 万 hm^2 (魏宏安和王介勇, 2013),占到延安市耕地面积的 50% 以上 (周怀龙, 2012),导致该地区人口-耕地-粮食生产矛盾尤为突出。为保障延安粮食安全、增加延安农业生产潜力、促进延安经济社会可持续发展,2013—2017 年延安市实施治沟造地工程,总投资 51 亿,新造耕地 3.33 万 hm^2 (陈怡平等, 2015; 贺春雄, 2015)。

2014—2015 年对延安新造耕地农业生产进行调查,发现农作物产量不足传统淤地坝和坡耕地的三分之一。科学研究发现新造耕地土壤贫瘠,土壤结构致密,通气透水性差,主要体现在土壤容重大,大粒径的沙粒含量低,新造耕地土壤肥力不足,有机质含量低,土壤酶活性低,土壤细菌、真菌及放线菌等微生物丰度及多样性低,自然熟化难 (Ma et al, 2020)。如何合理利用新造耕地,筛选出新造耕地适生农作物以及高产品种,尽快发挥新造耕地在农业生产中的作用,是亟待解决的生产实践问题。为此,本研究在延安市安塞区高桥镇南沟村选择 2015 年新造耕地,开展连续三年 (2016—2018 年) 的大田实验研究,筛选延安新造贫瘠耕地适生农作物及其高产品种筛选,旨在指导延安新造耕地的科学利用,推动延安经济社会可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于黄土高原丘陵沟壑区的延安市安塞区高桥镇南沟流域 ($107^{\circ}39'—110^{\circ}33'E$, $35^{\circ}20'—37^{\circ}30'N$),属于暖温带半湿润易旱气候区,全年气候变化受制于季风环流,海拔 1000 m 左右,年日照 2418 h ,日照百分率 55%, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温 3878.1°C ,年平均无霜期 162 d,年均降雨量在 $300—600 \text{ mm}$,降水多集中夏季,且多暴雨,强度大,10 月至次年 5 月降水仅占年总量的 29%,为典型的雨养农业区,是具有代表性的黄土高原小流域。

1.2 新造耕地适生农作物筛选

2016 年 4 月,在延安市安塞区高桥镇南沟村新造耕地上种植红薯、马铃薯、白萝卜、白菜、油菜、春小麦 (种子为当地居民提供),每个样方面积约 333 m^2 ,每种作物种植 3 个重复,且每个重复随机排列,共计 18 个试验样方,同时设 3 个空白对照样方。整个生长期没有施加任何肥料,2016 年 9 月,分别采集每种作物试验样方区内土壤样品和空白对照样方土壤,分析不同作物对土壤理化性质的影响;收获农作物,计产量,根据当年市场价格估算产值,筛选适生农作物。

1.3 新造耕地适生马铃薯品质筛选

根据 2016 年筛选结果,马铃薯为新造耕地适生作物。为此,2017 年在甘肃收集 11 种广泛栽培的马铃薯品种 (夏波蒂、新大坪、青薯 168、青薯 9 号、陇薯 3 号、陇薯 6 号、陇薯 7 号、陇薯 10 号、费乌瑞它、克新 18 号和克新 1 号) 在延安市安塞区高桥镇南沟村进行最佳马铃薯品种筛选,同时以本地广泛栽培品种为对照。每个样方面积约为 333 m^2 ,每个品种 3 个重复试验,且每个重复随机排列,共 36 个试验小区。2017 年 9 月收获并筛选适生马铃薯品种。2018 年,根据 2017 年试验表现较好的新大坪、青薯 168、陇薯 7 号和克新 1 号继续进行综合筛选试验 (样方设置同 2017 年)。2018 年 9 月收获,并对其各项参数进行综合评价。

种植方式采用起垄覆膜的方法,垄宽 60 cm ,左右交叉种植,马铃薯的株距在 20 cm 左右,人工点播。在其生长发育期间及时进行田间管理,定期进行中耕除草,并及时施药预防病虫害的发生。

1.4 相关指标测定方法

1.4.1 土壤理化性质测定

2016 年 9 月采集不同作物根际土样,带回实验室风干,然后拣去动植物残体 (如根、茎、叶等),将风干土样倒入陶瓷研钵中进行研磨过筛,然后进行物理化学参数分析。土壤 pH 值采用便携式 pH 计进行测定,土壤含水量采用烘干法进行测定,土壤容重采用环刀法进行测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定,土壤全氮采用凯氏定氮法测定,土壤碱解氮采用碱解扩散法测定,土壤全磷测定采用钼锑抗比色法,速效磷的测定采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法,以上具体测定方法参照《土壤农化分析》(鲍士旦, 2000)。

1.4.2 出苗率与形态测定

在马铃薯播种 45 d 进行统计, 每个样方选取 200 株, 统计出苗率。待马铃薯收获后, 选取 10 窝具有代表性且形状、大小均匀的马铃薯, 用电子天平称量马铃薯个体重量, 用直尺测量每个的长和宽, 计算长宽比。

1.4.3 光合参数的测定

在马铃薯生长较为旺盛的 8 月上旬进行光合参数测定, 每天上午 08:30—11:30 和下午 14:30—17:30 利用 Li-6400 光合仪测定光合作用相关参数。在测量马铃薯光合参数的当天晚上 20:00—22:00 测定叶绿素荧光参数。叶片首先经过 0.5 h 的暗处理, 然后用 MINI-PAM 荧光仪进行叶绿素荧光参数的测定。

1.4.4 干物质含量的测定

待马铃薯收获后, 洗干净马铃薯表面, 晾干后称重 (质量记为 m_1), 然后切成厚度约 0.5 cm 的薄片, 放入烘箱中, 105℃ 杀青 30 min 后, 80℃ 烘干至恒重后称重 (记为 m_2), 干物质含量 (%) = $m_2/m_1 \times 100\%$ 。

1.4.5 生化指标测定方法

淀粉含量的测定参照碘-淀粉比色法 (张永成和田丰, 2007), 还原糖含量的测定参照 3,5-二硝基水杨酸比色法 (赵凯等, 2008), 蛋白质含量的测定参照凯氏定氮法 (中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会和国家食品药品监督管理总局, 2016), 维生素 C 含量的测定参照 2,6-二氯酚滴定法 (朱娟娟等, 2016), 矿质元素含量的测定参照原子吸收光谱法 (刘强, 2015)。

1.4.6 不同品种马铃薯综合评价

不同品种马铃薯综合评价采用模糊数学隶属函数法, 首先计算不同品种马铃薯单个指标的隶属函数值, 再求各品种的平均隶属函数值, 平均隶属函数值越大, 表明马铃薯品种的综合品质越好。用于马铃薯品质综合评价的隶属函数值 $X(\mu_1)$, $X(\mu_2)$ 的计算公式为:

$$X(\mu_1) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$X(\mu_2) = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中: X 为某一马铃薯品种某一指标的测定值; $X_{\max}$ 为所有马铃薯品种中该指标的最大值; $X_{\min}$ 为所有马铃薯品种中该指标的最小值。采用 $X(\mu_1)$ 表示与综合品质呈正相关指标的隶属值; 用 $X(\mu_2)$ 表示与综合品质呈负相关指标的隶属值。

1.5 数据统计分析

采用 SPSS 20.0 统计软件进行分析, 利用单因素方差分析 (ANOVA) 对土壤及作物各项参数的指标进行差异分析, 采用 LSD 进行多重比较分析, 显著性水平为 0.05, 并采用 Origin 9.1 软件绘图。

2 结果分析

2.1 不同农作物对新造耕地土壤理化性质的影响

新造耕地土壤为碱性土, 没有种植任何农作物的土壤 pH 值约为 9.45 (对照组)。与对照相比 (表 1), 种植红薯、马铃薯、油菜、萝卜、白菜与春小麦均显著降低了土壤 pH 值 ($P < 0.05$), 尤其是油菜效果最为显著。种植油菜对土壤含水量没有显著性影响 ($P > 0.05$), 种植白菜土壤水分显著降低 ($P < 0.05$), 种植红薯、马铃薯、春小麦和萝卜土壤含水量显著提升 (红薯 > 马铃薯 > 春小麦 ≈ 萝卜, $P < 0.05$)。与对照相比, 种植六种农作物显著降低了土壤容重 ($P < 0.05$), 具体为: 萝卜 > 马铃薯 > 春小麦 > 红薯 > 油菜 > 白菜 (土壤容重)。除了萝卜之外, 其他五种农作物均显著增加了土壤中性粒径 ($P < 0.05$), 具体为: 白菜 > 油菜 > 红薯 > 马铃薯 > 春小麦 > 萝卜 (土壤中值粒径)。

与对照相比, 种植红薯、马铃薯与油菜, 土壤有机质含量分别提高了 23% ($P < 0.01$)、23% ($P < 0.01$) 和 8.2% ($P < 0.05$); 种植白菜、萝卜和春小麦土壤有机质含量均显著降低 ($P < 0.05$)。种植六种农作物均不同程度提高土壤氮和碱解氮含量 ($P < 0.05$); 但是, 全磷均有不同程度的降低 ($P < 0.05$); 除了红薯之外, 种植其他作物均使土壤速效磷含量显著降低 ($P < 0.05$)。

2.2 不同农作物产量与产值差异分析

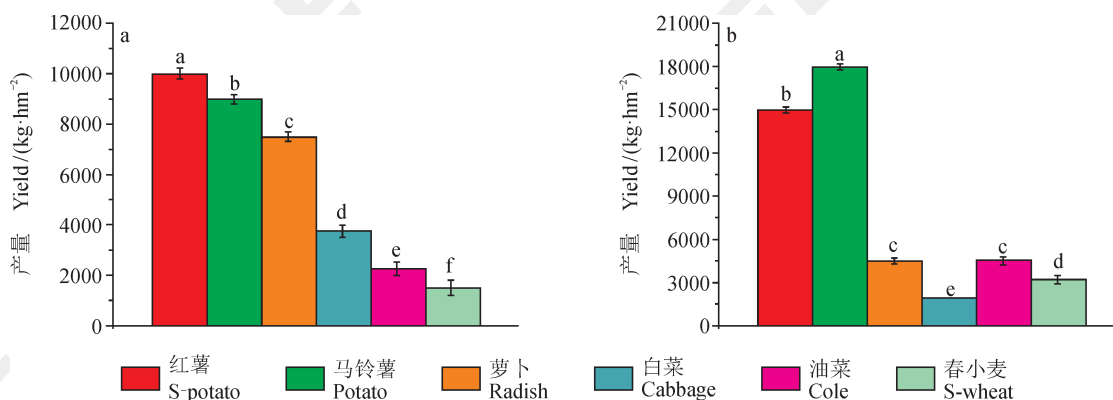
由于不同农作物对土壤养分要求不同, 因此在新造耕地上种植不同农作物其产量必然有差异。在没有添加任何养分的情况下, 在新造耕地上种植六种农作物其产量均相对较低。其中春小麦产量最低, 约为 $1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。油菜、白菜、萝卜、马铃薯、红薯产量均显著高于春小麦, 其产量分别为 $2250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $3750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $7500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $9000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $10005 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 1a)。按照当年市场价格, 每公顷新造耕地种植红薯、马铃薯、萝卜、白菜、油菜和春小麦, 其产值分别为 15000 元、18000 元、4500 元、1950 元、4500 元和 3195 元 (图 1b)。从产值来看, 种植马铃薯经济效益最高。

表 1 不同农作物对新造耕地土壤性质的影响
Tab. 1 Effects of different crops on soil physical and chemical properties on newly created farmland

土壤理化参数 Soil physical and chemical parameters	对照 CK	红薯 S-potato	马铃薯 Potato	萝卜 Radish	白菜 Cabbage	油菜 Cole	春小麦 S-wheat
pH	9.45±0.005a	9.18±0.010b	9.19±0.006b	9.20±0.006b	9.22±0.010b	9.12±0.006c	9.23±0.010b
土壤含水量 Soil water content/%	0.09±0.003d	0.22±0.008a	0.17±0.004b	0.14±0.006c	0.07±0.005e	0.09±0.003d	0.14±0.003c
土壤容重 Soil bulk density/(g·m ⁻³)	1.56±0.003a	1.31±0.023e	1.46±0.023c	1.49±0.021b	1.05±0.020g	1.22±0.025f	1.38±0.025d
土壤中值径粒 Soil median diameter/mm	23.32±0.05d	26.76±0.10b	26.32±0.06b	23.86±0.06d	29.72±0.10a	26.83±0.06b	24.79±0.10c
土壤有机质 Soil organic matter/(g·kg ⁻¹)	3.15±0.34c	3.88±0.33a	3.87±0.93a	2.69±0.58d	2.43±0.72e	3.41±0.79b	1.84±0.76f
全氮 Soil total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	0.01±0.002f	0.03±0.001e	0.07±0.002b	0.10±0.012a	0.054±0.002d	0.027±0.002e	0.063±0.001c
碱解氮 Soil available nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	10.39±0.348e	17.75±0.486a	13.64±0.507d	15.56±1.003c	17.13±0.581b	13.65±0.439d	17.67±1.065a
全磷 Soil total phosphorus/(g·kg ⁻¹)	0.39±0.002a	0.37±0.003b	0.24±0.002c	0.26±0.003c	0.38±0.008b	0.071±0.002d	0.38±0.002
速效磷 Soil available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	5.31±0.056a	5.29±0.023a	1.97±0.088e	2.75±0.011d	4.73±0.062b	1.41±0.024f	2.84±0.130c

同一行相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$)，不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

The same lowercase letters on the same line indicated there were no significant differences ($P>0.05$), while different lowercase letters indicated significant difference ($P<0.05$).



根据 LSD 多重比较，柱形图上不同字母 (平均值±SD, $n=3$) 表示种间差异显著 ($P<0.05$)。实验中有 6 种作物，甘薯 (S-potato)、马铃薯、萝卜、卷心菜、油菜和春小麦 (S-wheat)。

Column (data mean±SD, $n=3$) with different letters were significantly different among different crops at $P<0.05$ according to LSD multiple comparisons. There were six crops in the experiment, sweet potato (S-potato), potato, radish, cabbage, cole and spring wheat (S-wheat).

图 1 新造耕地 6 种不同作物 (红薯、马铃薯、萝卜、白菜、油菜及春小麦) 产量 (a) 及产值 (b)

Fig. 1 Differences response of six crop's yield (a) to newly created farmland on the Loess Plateau and output value (b) accounted according to market value

2.3 不同品种马铃薯出苗率、水分利用效率、主要光合参数与产量分析

与本地品种相比 (表 2)，除了夏波蒂之外，新大坪、青薯 168、青薯 9 号、陇薯 6 号、陇薯 7 号、费乌瑞它、克新 18 号和克新 1 号的出苗率均极显著高于本地品种 ($P<0.01$)，陇薯 3 号和陇薯 10 号显著高于本地品种 ($P<0.05$)。夏波

蒂、青薯 9 号、陇薯 3 号、克新 18 号的水分利用率均显著高于本地品种 ($P<0.05$)，陇薯 6 号、陇薯 7 号、陇薯 10 号和费乌瑞它显著低于本地品种 ($P<0.05$)，新大坪、青薯 168 和克新 1 号没有显著性差异 ($P>0.05$)。夏波蒂、新大坪、青薯 168、青薯 9 号、陇薯 3 号、陇薯 6 号和克新 1 号的净光合速率和气孔导度均极显著高于本地品种

($P<0.01$), 陇薯7号的气孔导度也显著高于本地品种($P<0.01$)。除了克新18号之外, 其余10个品种蒸腾速率显著高于本地品种($P<0.05$), 其中新大坪、青薯168、陇薯6号和陇薯7号与本地品种有极显著性差异($P<0.01$)。夏波蒂、新大坪、青薯168、陇薯3号、陇薯6号、陇薯7号的胞间 CO_2 浓度极显著高于本地品种($P<0.01$),

青薯9号、陇薯10号和克新1号的胞间 CO_2 浓度显著高于本地品种($P<0.05$)。新大坪、青薯168和克新1号产量分别高于本地品种58%($P<0.01$)、100%($P<0.01$)和74%($P<0.01$), 陇薯3号与费乌瑞它分别高于本地品种22.5%($P<0.05$)和24%($P<0.05$), 其他六个品种与本地品种的产量没有统计学意义上的差异($P>0.05$)。

表2 不同品种马铃薯在新造耕地上生长生理参数差异

Tab. 2 Differences in physiological parameters and growth parameters of different potato cultivar on newly created farmland

品种名称 Cultivar	出苗率 Emergence ratio /%	水分利用效率 Water use efficiency /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	光合速率 Net photosynthesis rate /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductance /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate /($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration /($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	产量 Yield /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
夏波蒂 Xiabodi	36.67±3.253	4.40±0.715*	19.60±0.489**	0.53±0.030**	4.46±0.156*	307.32±3.290**	10.52×10 ³ ±915
新大坪 Xindaping	89.50±2.291**	3.55±0.381	20.28±0.513**	0.64±0.053**	5.72±0.205**	293.53±2.461**	26.37×10 ³ ±2430**
青薯168 Qingshu 168	85.83±2.843**	3.43±0.378	20.68±0.621**	0.66±0.052**	6.03±0.191**	287.10±2.461**	33.33×10 ³ ±2415**
青薯9号 Qingshu No.9	88.83±1.258**	3.94±0.296*	19.11±0.533**	0.35±0.025**	4.85±0.166*	253.55±3.786*	14.60×10 ³ ±1650
陇薯3号 Longshu No.3	74.33±2.566*	3.91±0.383*	19.05±0.401**	0.49±0.028**	4.87±0.165*	271.57±2.804**	20.41×10 ³ ±1815*
陇薯6号 Longshu No.6	88.50±1.322**	2.81±0.461*	17.78±0.481**	0.52±0.038**	6.33±0.250**	282.02±4.508**	19.05×10 ³ ±1980
陇薯7号 Longshu No.7	83.33±1.756**	2.08±0.253*	14.66±0.372	0.35±0.036**	7.05±0.330**	268.05±4.683**	14.78×10 ³ ±960
陇薯10号 Longshu No.10	81.00±1.803*	2.71±0.432*	13.38±0.414	0.24±0.018	4.94±0.234*	251.30±4.423*	14.39×10 ³ ±1140
费乌瑞它 Feiwuruita	83.78±2.524**	2.88±0.365*	14.30±0.410	0.22±0.022	4.97±0.262*	226.36±8.587	20.69×10 ³ ±1485*
克新18号 Kexin NO.18	87.17±2.566**	3.78±0.666*	13.33±0.385	0.15±0.011	3.53±0.185	192.24±6.600	16.23×10 ³ ±1305
克新1号 Kexin NO.1	84.83±2.082**	3.39±0.411	17.31±0.344**	0.29±0.024**	5.11±0.188*	238.69±5.262*	28.88×10 ³ ±2175**
本地品种 Local cultivar	62.22±4.338	3.40±0.418	14.31±0.515	0.20±0.016	4.21±0.238	219.88±4.879	16.65×10 ³ ±1350

** : $P<0.01$, * : $P<0.05$

2.4 高产马铃薯品种综合评价

2.4.1 高产马铃薯出苗率与生长

新大坪、青薯168和克新1号在11个品种中产量最高, 从产量来考虑, 是理想的推广品种, 然而陇薯7号虽然产量低, 每株结实数量少, 但是马铃薯个头大, 表面光滑, 卖相好。为了筛选出最佳适生品种, 2018年再次对新大坪、青薯168、克新1号和陇薯7号进行综合评价。与本地品种相比(本

地品种的出苗率为76%), 青薯168和新大坪出苗率均极显著高于本地品种($P<0.01$), 克新1号和陇薯7号的出苗率显著高于本地品种($P<0.05$), 其中新大坪的出苗率最高, 约为88%(图2a)。开花期新大坪、青薯168、陇薯7号株高均显著高于本地品种($P<0.05$), 其中: 新大坪的株高最高, 约为16.25 cm; 克新1号最低, 为10.50 cm(图2b), 且略低于本地品种($P>0.05$)。

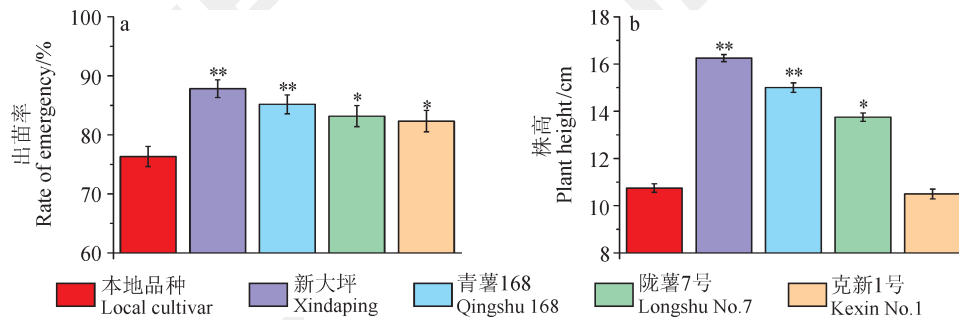


图 2 高产优质马铃薯的出苗率 (a) 及株高 (b)

Fig. 2 The emergence rate (a) and plant height (b) of high-yield potatoes and local cultivar potato

2.4.2 高产马铃薯品光合作用能力评价

为了进一步比较新大坪、青薯 168、克新 1 号和陇薯 7 号产量与品质,精准筛选出适宜延安新造耕地推广的品种,2018 年分析其形态学指标(马铃薯长度、宽度、长宽比、平均重量),光合能力参数(净光合速率、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、气孔导度、PS II 实际光化学效率、最大光化学量子产量、PS II 潜在活性、光化学淬灭系数、非光化学淬灭系数、电子传递速率),产量与品质指标(干重、淀粉含量、还原糖含量、蛋白质含量、维生素含量)。

与本地品种相比(表 3),新大坪的净光合速率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度、PS II 实际光化学效率、PS II 潜在活性、蒸腾速率均显著高于本地品种 ($P < 0.05$),而光化学淬灭系数、电子传递速率均显著小于本地品种 ($P < 0.05$)。最大光化学量子产量和非光化学淬灭系数与本地品种没有显著性差异 ($P > 0.05$)。青薯 168 的净光合速率、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、气孔导度、PS II 实际光化学效率、最大光化学量子产量、PS II 潜在活性、非光化学淬灭系数显著高于本地品种 ($P < 0.05$),光化学淬灭系数显著低于本地品种 ($P < 0.05$),电子传递速率与本地品种没有显著性差异 ($P > 0.05$)。陇薯 7 号的净光合速率、气孔导度、PS II 实际光化学效率均显著低于本地品种 ($P < 0.05$),胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率均高于本地品种 ($P < 0.05$),其他五个参数(最大光化学量子产量、PS II 潜在活性、光化学淬灭系数、非光化学淬灭系数、电子传递速率)与本地品种没有显著性差异 ($P > 0.05$)。克新 1 号的 PS II 潜在活性、光化学淬灭系数、非光化学淬灭系数显著高于本地品种 ($P < 0.05$),电子传递效率显著低于本地品种 ($P < 0.05$),其他参数(净光合速率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度、蒸腾速率、PS II

实际光化学效率、最大光化学量子产量)与本地品种没有显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.4.3 高产马铃薯品种形态指标及品质分析

新大坪的两个形态指标(长度、长宽比)、五个品质参数(干物质、淀粉、还原糖、蛋白质、维生素 C)及其产量与本地品种有显著差异 ($P < 0.05$) (表 3),其中长度、长宽比和干物质显著小于本地品种,产量、淀粉、还原糖、蛋白质和维生素 C 分别高于本地品种 68.0% ($P < 0.01$)、38.0% ($P < 0.01$)、568.0% ($P < 0.01$)、19.8% ($P < 0.01$) 和 12.6% ($P < 0.01$)。青薯 168 的长度、长宽比、干物质、平均重量和维生素 C 含量显著小于本地品种 ($P < 0.05$),产量和还原糖含量分别高于本地品种 70.0% ($P < 0.01$) 和 300.0% ($P < 0.05$)。陇薯 7 号的长度、长宽比和平均重量显著小于本地品种 ($P < 0.05$),维生素 C 含量高于本地品种 26.0% ($P < 0.01$)。克新 1 号的长度、长宽比、干物质、淀粉和蛋白质含量显著低于本地品种 ($P < 0.05$),还原糖和维生素 C 含量分别高于本地品种 175.0% 和 34.0% ($P < 0.01$)。

2.4.4 高产马铃薯品种矿质元素含量分析

与对照相比(表 4),新大坪、青薯 168、陇薯 7 号和克新 1 号马铃薯中钾元素、钙元素、镁元素、铁元素和钴元素含量均显著高于本地品种 ($P < 0.01$)。新大坪与青薯 168 的锰元素含量显著低于本地品种 ($P < 0.01$),陇薯 7 号与克新 1 号的锰元素含量显著高于本地品种 ($P < 0.01$)。新大坪、青薯 168、陇薯 7 号的锌元素含量显著低于本地品种,而铜元素含量显著高于本地品种 ($P < 0.01$)。克新 1 号的锌元素含量显著高于本地品种 ($P < 0.01$),铜元素含量显著低于本地品种 ($P < 0.01$)。除青薯 168 的钼元素含量显著低于本地品种 ($P < 0.01$) 外,新大坪、陇薯 7 号和克新 1 号的钼元素含量均显著高于本地品种 ($P < 0.01$)。

表 3 新造耕地马铃薯品种的生理生长参数差异
Tab. 3 Physiological and growth parameters of different potato cultivar on newly created farmland

参数 Parameters	新大坪 Xindaping	青薯 168 Qingshu168	陇薯 7 号 Longshu No.7	克新 1 号 Kexin No.1	本地品种 Local Cultivar
长度 Length /cm	9.2±0.872**	8.2±0.980**	10.1±1.700**	8.8±1.600**	13.2±1.077
宽度 Width /cm	6.9±0.700	5.7±1.269	6.3±0.781	6.7±0.640	6.0±1.000
长宽比 Length-width ratio	1.34±0.133**	1.49±0.269**	1.63±0.364**	1.32±0.238**	2.25±0.379
平均重量 Average weight /g	200.84±7.613	180.80±13.155**	191.80±4.885*	203.71±5.012	200.79±2.532
产量 Yeild /(t·hm ⁻²)	18.84±1.26**	18.98±1.71**	13.30±0.82	13.12±2.01	11.16±2.01
净光合速率 Net photosynthetic rate /(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	11.472±1.209**	8.587±1.588*	5.707±1.075**	8.212±1.205	8.210±1.121
胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration /(μmol·mol ⁻¹)	222.08±27.92*	263.49±16.69**	219.91±23.42*	180.54±12.87	187.63±15.23
蒸腾速率 Transpiration rate /(g·m ⁻² ·h ⁻¹)	3.779±0.547**	3.801±0.629**	3.389±0.640*	3.059±0.595	3.154±0.399
气孔导度 Stomatal conductance /(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	0.145±0.012**	0.125±0.009**	0.075±0.010*	0.086±0.007	0.085±0.007
PS II 实际光化学效率 (PS II) PS II actual photochemical efficiency	0.175±0.009**	0.185±0.007**	0.134±0.008*	0.164±0.007	0.154±0.007
最大光化学量子产量 (Fv/Fm) Maximum photochemical quantum yield	0.636±0.076	0.682±0.050*	0.538±0.074	0.679±0.030	0.574±0.051
PS II 潜在活性 (Fv/Fo) PS II potential activity	4.817±0.538**	5.68±0.530**	2.680±0.682	3.803±0.750*	2.463±0.469
光化学淬灭系数 (qP) Photochemical quenching coefficient	0.360±0.020**	0.428±0.038*	0.503±0.030	0.644±0.027**	0.531±0.069
非光化学淬灭系数 (NPQ) Non-photochemical quenching coefficient	1.730±0.053	2.245±0.103**	1.738±0.022	2.571±0.108**	1.827±0.045
电子传递速率 Electron transfer rate	86.300±7.511**	118.233±8.696	116.000±6.773	96.100±7.363**	125.733±9.928
干物质 Dry matter /%	19.91±1.17*	17.81±0.95**	20.36±1.37	16.79±0.69**	22.51±1.88
淀粉 Starch /%	14.23±0.86**	10.54±1.01	9.58±0.51	8.16±0.33**	10.30±0.37
还原糖 Reducing sugar /%	1.07±0.07**	0.64±0.03**	0.13±0.02	0.44±0.03**	0.16±0.05
蛋白质 Protein /%	2.60±0.15**	2.14±0.134	2.20±0.08	1.93±0.05*	2.17±0.14
维生素 C Vitamin C /(mg·(100 g) ⁻¹)	16.16±1.07**	12.90±0.21*	18.10±0.42**	19.21±0.32**	14.35±0.42

** : $P < 0.01$, * : $P < 0.05$

3 讨论

3.1 适生农作物筛选

黄土高原地区农耕历史悠久, 以旱作农业为主, 种植的农作物种类主要以春小麦、玉米、小米、高粱、大豆、马铃薯、白菜、萝卜、油菜、红

薯等为主。延安新造耕地土壤贫瘠, 生物酶活性不足, 物理性质不良, 不能满足农业生产需要 (Chen et al, 2019), 治沟造地每公顷国家投入约 15 万元, 仅能满足造地工程费用 (贺春雄, 2015), 人工改良也需要三年时间 (Ma et al, 2020)。要在短时间内提升新造耕地的农业经济效率, 除了对

耕地土壤进行改良之外,筛选适宜当地气候、土壤条件的农作物及其适生品种显得尤为重要。

因为不同物种的遗传基础不同,因此不同物种对生态环境的适应性差别较大。作物的生态适应性是作物在不同生态环境下,通过调节自身功能以适应环境变化,从而实现自我生殖繁育的能力(郭水良和方芳,2003)。六种不同作物在新造耕地上的实验结果表明,马铃薯和红薯的产量和产值均较高。光照强度和光周期是块茎类作物(如马铃薯)生长、形态建成和产量的关键生态因子(Struik and van Heusden, 1989; 刘梦芸等,

1994)。马铃薯作为高产经济作物,对光照要求相对较高,只有充足的光照条件才能满足它的光合作用需求,保证块茎的不断膨大,形成优质高产马铃薯。黄土高原地区日照较多,太阳辐射较强。全年日照时数 2250—3000 h,且由东南向西北递增(韩虹等,2008)。全年接受太阳总辐射量 4993.2—5842.6 MJ·m⁻²,尤其是西北部,白天日照强,昼夜温差大,有利于马铃薯的生长发育和营养成分积累,且马铃薯的投入产出比大,是新造耕地上产量表现较好的作物,适宜在新造耕地上种植。

表 4 不同品种马铃薯矿质元素含量比较

Tab. 4 Comparison of mineral elements of different potato cultivar on newly created farmland

矿质元素 Types of minerals	新大坪 Xindaping	青薯 168 Qingshu168	陇薯 7 号 Longshu No.7	克新 1 号 Kexin No.1	本地品种 Local Cultivar
K/(g·kg ⁻¹)	22.51±0.166**	21.64±0.125**	20.31±0.624**	21.85±0.070**	19.34±0.071
Ca/(g·kg ⁻¹)	1.775±0.021**	0.507±0.003**	0.446±0.007**	0.244±0.012**	0.212±0.006
Mg/(g·kg ⁻¹)	3.074±0.025**	0.915±0.017**	1.084±0.008**	1.108±0.007**	0.806±0.023
Fe/(mg·kg ⁻¹)	65.64±0.221**	55.46±0.191**	109.56±0.172**	65.33±0.091**	35.42±0.140
Mn/(mg·kg ⁻¹)	3.099±0.136**	2.672±0.250**	7.810±0.145**	6.955±0.087**	5.292±0.246
Zn/(mg·kg ⁻¹)	13.95±0.079**	5.73±0.103**	8.72±0.189**	25.19±0.384**	18.02±0.161
Cu/(mg·kg ⁻¹)	20.85±0.092**	9.86±0.070**	6.25±0.202**	2.06±0.083**	6.09±0.139
Mo/(mg·kg ⁻¹)	0.573±0.009**	0.134±0.031**	0.322±0.017**	0.324±0.010**	0.202±0.009
Co/(mg·kg ⁻¹)	0.073±0.005**	0.060±0.004**	0.057±0.005**	0.067±0.004**	0.021±0.002

** : $P < 0.01$, * : $P < 0.05$

3.2 不同作物对新造耕地性质的影响

作物的生长发育状况与土壤肥力有直接关系,土壤肥沃则作物生长发育茂盛,反之则发育不良。同时,作物生长发育也影响土壤肥力,彼此之间相互依存,相互影响。不同农作物在新造耕地的产量表现是受土壤肥力与气候因子综合影响的结果,作物通过利用大气 CO₂ 进行光合作用,合成有机物,向地下运输营养物质满足地下根营养需求,通过根系分泌进入土壤,增加土壤有机成分;同时,大气含氮化合物等也可以通过气孔进入作物体内,参与蛋白质合成,合成的蛋白质同样也可运输根部,供给根系活动,代谢脱落物进入土壤,改善根际土壤营养,从而增加土壤有机质和氮含量。本研究结果表明:种植不同作物对土壤的物理化学性质有显著影响,但是参数变化趋势也不完全相同。主成分分析发现:第一主成分中,全氮、土壤碱解氮、全磷和速效磷对土壤肥力的贡献最大,为 41.10%;第二主成分

中,土壤容重和 pH 对土壤肥力的贡献最大,贡献率为 30.71%;第三主成分中,土壤含水量和有机质对土壤肥力的贡献最大,为 14.83%。三个主成分的累积方差贡献率达 86.64%。经标准化的数据处理,六种不同作物在三个主成分上的得分排序为:马铃薯>红薯>对照>白萝卜>小麦>白菜>油菜。由此可见马铃薯生长发育过程对土壤理化性质的积极影响较大,对土壤改良效果最好(表 1)。究其原因,可能是马铃薯具有发达根系、匍匐茎冠,能有效截留土壤径流水,减少土壤水分流失(田丰和张永成,2004;徐秋良,2006),同时,匍匐茎覆盖在土壤表面又进一步减少了地表水分蒸腾,向地下运输了更多的营养物质,发达根系分泌更多的有机物质,根系的生长活动一定程度上降低了土壤紧实度,改善了新造耕地耕层土壤结构,降低了土壤容重(冯强等,2016)。

3.3 高产适生马铃薯品种评价

品种是人工培育形成的适合一定地区气候、

生态条件、具有一定稳定遗传性状和较好经济价值的农作物类型(潘家驹, 1994)。针对黄土高原丘陵沟壑区新造耕地的土壤及当地气候条件, 选择了11个品种与当地农家种植品种进行比较, 发现新大坪、青薯168、克新1号产量均显著高于本地品种, 陇薯7号个头大、卖相比较好, 因此2018年针对这四个品种做了更为全面的评价。

光合作用是植物主要的生理代谢过程, 它是植物将光能转换为生命过程中的化学能, 将能量储存在合成的有机物中, 光合产物占马铃薯块茎干物质重的95%以上(张宝林等, 2003), 品质变化及作物产量形成取决于光合能力的强弱。而植物光合作用过程中光系统对光能的吸收、传递、耗散、分配等更能直接体现光合作用效果。光系统吸收的光能一般认为有三种消耗途径: 一部分用于光化学反应, 荧光参数 $\Phi PS II$ 可表示其变化趋势; 一部分用于天然热耗散; 一部分以荧光的形式释放(Atsushi et al, 2005)。因此叶绿素荧光产量的高低与强弱可以反映植物光合作用能力(Kruskopf and Flynn, 2006)。但是, 净光合速率(P_n)、实际光化学效率($\Phi PS II$)、最大光化学量子产量(F_v/F_m)、 $PS II$ 潜在活性(F_v/F_o)、光化学淬灭系数(qP)、非光化学淬灭系数(NPQ)、电子传递速率(ETR)等参数与品质参数(干物质、淀粉、还原糖、蛋白质、维生素)和产量变化趋势并不完全一致, 并非线性关系。王绍辉等(2006)利用隶属函数的方法评价了萝卜的综合营养品质; 刘建辉等(2005)利用综合评价指数的方法评价了不同番茄品种的营养品质; 田世龙和袁丽卿(1997)提出利用相对营养值的方法来评价萝卜等蔬菜的综合营养品质。目前尚无一个统一的方法来评价蔬菜综合指标。但是, 利用隶属函数分析方法可以在多指标测定的基础上对其进行综合评价。赵春波等(2011)利用此方法对14种不同品种的马铃薯做了综合评价; 文国宏等(2108)也利用此方法对14种不同陇薯系列马铃薯做了综合评价。

本文测定马铃薯参数指标较多, 光合作用的直接表现是产量和品质, 因此以产量与品质参数为指标, 利用模糊数学隶属函数法对不同品种马铃薯做综合评价。计算不同指标的平均隶属值(图3)发现: 新大坪的平均隶属值为0.756, 陇薯7号隶属度为0.584, 青薯168隶属度为0.487, 这

三个品种隶属度均大于本地品种(0.369), 而克新1号隶属度为0.306, 小于本地品种。因此, 新大坪、陇薯7号、青薯168为适宜在延安新造耕地广泛推广的马铃薯品种。

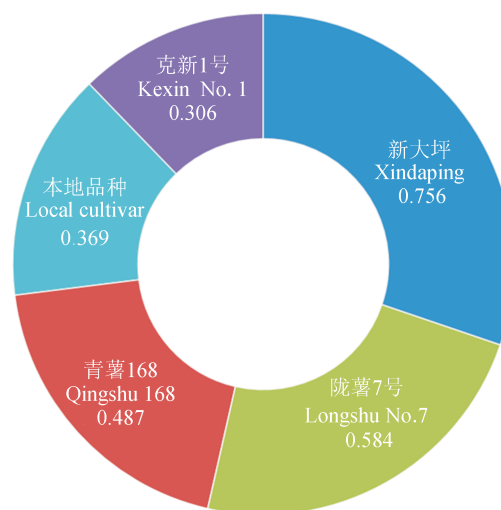


图3 高产优质马铃薯及本地品种马铃薯的隶属度值
Fig. 3 Subordination values of high-quality potatoes and local cultivar potato

4 结论

马铃薯具有适应性广、丰产、加工价值高和用途广泛等特点, 是中国继水稻、小麦、玉米之后的第四大粮食作物。其生长发育与产量很大程度上受制于当地小气候、土壤肥力状况、栽培措施、施肥技术等。经过大田实验发现, 马铃薯不但产量与产值高, 而且有利于降低土壤pH值, 改善土壤团粒结构, 提升有机质与氮磷含量, 适宜于新造贫瘠耕地种植。

通过连续两年大田实验, 马铃薯品种新大坪出苗率、株高、净光合速率、气孔导度、淀粉、蛋白质与维生素C含量以及产量均显著好于本地品种; 利用模糊数学隶属函数分析方法, 发现新大坪的平均隶属值最大, 即各项指标的综合评价最高, 为新造耕地上最适宜种植的马铃薯品种, 可考虑在当地种植推广, 其次为陇薯7号与青薯168品种。

参考文献

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社: 25-149. [Bao S D. 2000. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd edition. Beijing: China

- Agriculture Press: 25–149.]
- 陈怡平, 骆世明, 李凤民, 等. 2015. 对延安黄土沟壑区农业可持续发展的建议 [J]. *地球环境学报*, 6(5): 265–269. [Chen Y P, Luo S M, Li F M, et al. 2015. Proposals on the sustainable development of agriculture in Yan'an gully regions [J]. *Journal of Earth Environment*, 6(5): 265–269.]
- 陈怡平. 2019-09-03 [2020-09-18]. 黄土高原生态环境沧桑巨变七十年 [N]. 中国科学报. [Chen Y P. 2019-09-03 [2020-09-18]. 70 years of vicissitudes in the ecological environment of the Loess Plateau [N]. China Science News.]
- 冯强, 段宝玲, 姜硕. 2016. 小流域尺度土壤容重及其影响因素的空间变异 [J]. *山西农业大学学报 (自然科学版)*, 36(1): 39–45. [Feng Q, Duan B L, Jiang S. 2016. Spatial heterogeneity of bulk density and its influencing factors at small watershed scale [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 36(1): 39–45.]
- 郭水良, 方芳. 2003. 入侵植物加拿大一枝黄花对环境的生理适应性研究 [J]. *植物生态学报*, 27(1): 47–52. [Guo S L, Fang F. 2003. Physiological adaptation of the invasive plant *Solidago canadensis* to environments [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 27(1): 47–52.]
- 韩虹, 任国玉, 王文, 等. 2008. 黄土高原地区太阳辐射时空演变特征 [J]. *气候与环境研究*, 13(1): 61–66. [Han H, Ren G Y, Wang W, et al. 2008. Temporal and spatial variation characteristics of total solar radiation over the Loess Plateau region [J]. *Climatic and Environmental Research*, 13(1): 61–66.]
- 贺春雄. 2015. 延安治沟造地工程的现状、特点及作用 [J]. *地球环境学报*, 6(4): 255–260. [He C X. 2015. The situation, characteristics and effect of the Gully Reclamation Project in Yan'an [J]. *Journal of Earth Environment*, 6(4): 255–260.]
- 刘建辉, 张春莲, 肖永贤, 等. 2005. 番茄不同品种的品质分析 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 33(4): 43–46. [Liu J H, Zhang C L, Xiao Y X, et al. 2005. Quality analysis of different tomato cultivars [J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 33(4): 43–46.]
- 刘梦芸, 蒙美莲, 门福义, 等. 1994. 光周期对马铃薯块茎形成的影响及对激素的调节 [J]. *马铃薯杂志*, 8(4): 193–197. [Liu M Y, Meng M L, Men F Y, et al. 1994. The effect of light period on the formation of potato tubers and the adjustment of hormone [J]. *Chinese Potato Journal*, 8(4): 193–197.]
- 刘强. 2015. 秦岭濒危动物重金属暴露风险评估及源解析 [D]. 北京: 中国科学院大学. [Liu Q. 2015. Risk assessment and source analysis of heavy metal exposure of endangered animals in Qinling Mountains [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 潘家驹. 1994. 作物育种学总论 [M]. 北京: 中国农业出版社: 2. [Pan J J. 1994. Crop breeding pandect [M]. Beijing: China Agriculture Press: 2.]
- 田丰, 张永成. 2004. 马铃薯根系吸收活力与产量相关性研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 22(2): 105–107. [Tian F, Zhang Y C. 2004. Analysis on correlation between root absorption vitality and yield of potato [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 22(2): 105–107.]
- 田世龙, 袁丽卿. 1997. 甘肃省几种主要蔬菜不同品种营养成分分析 [J]. *甘肃农业科技*, (4): 25–27. [Tian S L, Yuan L Q. 1997. Analysis of nutritional components of several main vegetable varieties in Gansu Province [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, (4): 25–27.]
- 王绍辉, 杨瑞, 赵金芳, 等. 2006. 不同萝卜品种几个品质性状的评价分析 [J]. *中国蔬菜*, (4): 22–23. [Wang S H, Yang R, Zhao J F, et al. 2006. Evaluation and analysis on quality of different radish cultivars [J]. *China Vegetables*, (4): 22–23.]
- 魏宏安, 王介勇. 2013. 延安市黄土丘陵沟壑区沟道土地整治适宜性评价研究 [J]. *地域研究与开发*, 32(3): 129–132. [Wei H A, Wang J Y. 2013. Assessment of land consolidation suitability in loess hilly-gully region in Yan'an City [J]. *Areal Research and Development*, 32(3): 129–132.]
- 文国宏, 李高峰, 李建武, 等. 2018. 陇薯系列马铃薯品种营养品质评价及相关性分析 [J]. *核农学报*, 32(11): 2162–2169. [Wen G H, Li G F, Li J W, et al. 2018. Nutrition quality evaluation and correlation analysis of Longshu potato varieties named with series [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 32(11): 2162–2169.]
- 徐秋良. 2006. 温室观赏甘薯水培栽植技术 [J]. *农业科技通讯*, (9): 55. [Xu Q L. 2006. Hydroponic planting technology of ornamental sweet potato in greenhouse [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, (9): 55.]
- 闫云霞. 2006. 黄土高原侵蚀产沙的尺度效应及高含沙水

- 流研究 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所. [Yan Y X. 2006. Study on the scale effect of erosion and sediment yield and high sediment flow on the Loess Plateau [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences.]
- 张宝林, 高聚林, 刘克礼. 2003. 马铃薯在不同密度及施肥处理下叶片叶绿素含量的变化 [J]. *中国马铃薯*, 17(3): 137–140. [Zhang B L, Gao J L, Liu K L. 2003. Chlorophyll content in leaves of potatoes treated with different density and fertilizer rate [J]. *Chinese Potato Journal*, 17(3): 137–140.]
- 张永成, 田 丰. 2007. 马铃薯试验研究方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社. [Zhang Y C, Tian F. 2007. Potato test research method [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press.]
- 赵春波, 宋述尧, 张传伟, 等. 2011. 不同品种马铃薯品质分析与评价 [J]. *吉林农业科学*, 36(4): 58–60. [Zhao C B, Song S Y, Zhang C W, et al. 2011. Analysis and assessment on nutritional quality of potato varieties [J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 36(4): 58–60.]
- 赵 凯, 许鹏举, 谷广烨. 2008. 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定还原糖含量的研究 [J]. *食品科学*, 29(8): 534–536. [Zhao K, Xu P J, Gu G Y. 2008. Study on determination of reducing sugar content using 3, 5-dinitrosalicylic acid method [J]. *Food Science*, 29(8): 534–536.]
- 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 2016. 食品中蛋白质的测定 (GB 5009.5—2016) [S]. 北京: 中国标准出版社. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, China Food and Drug Administration. 2016. Determination of protein in food (GB 5009.5—2016) [S]. Beijing: Standards Press of China.]
- 周怀龙. 2012. 耕地保护“数质并重”正当时——解读《关于提升耕地保护水平全面加强耕地质量建设与管理的通知》[J]. *国土资源*, (8): 37–39. [Zhou H L. 2012. Farmland protection is at the right time—interpret “Notice on improving the level of cultivated land protection and comprehensively strengthening the construction and management of cultivated land quality” [J]. *Land & Resources*, (8): 37–39.]
- 朱娟娟, 何华屿, 刘旺锁, 等. 2016. 密枝枸杞叶营养成分和活性物质研究 [J]. *北方园艺*, (23): 149–152. [Zhu J J, He H Y, Liu W S, et al. 2016. Nutrient components and active substances of *L. barbarum* var. *implicatum* leaves [J]. *Northern Horticulture*, (23): 149–152.]
- 朱显谟, 祝一志. 1992. 试论中国黄土高原土壤与环境 [J]. *土壤学报*, 29(4): 351–357. [Zhu X M, Zhu Y Z. 1992. A preliminary study on soil on Loess Plateau and environment [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 29(4): 351–357.]
- Atsushi I, Takeshi T, Marjenah. 2005. A comparison of *in situ* leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence at top canopies in rainforest mature tree [J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 39(1): 57–67.
- Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. 2015. Balancing green and grain trade [J]. *Nature Geoscience*, 8(10): 739–741.
- Chen Y P, Wu J H, Wang H, et al. 2019. Evaluating the soil quality of newly created farmland in the hilly and gully region on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 29(5): 791–802.
- Kruskopf M, Flynn K J. 2006. Chlorophyll content and fluorescence responses cannot be used to gauge reliably phytoplankton biomass, nutrient status or growth rate [J]. *New Phytologist*, 169(3): 525–536.
- Lü Y H, Fu B J, Feng X M, et al. 2012. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China [J]. *PLoS One*, 7(2): e31782. DOI: 10.1371/journal.pone.0031782.
- Ma J F, Chen Y P, Wang H J, et al. 2020. Newly created farmland should be artificially ameliorated to sustain agricultural production on the Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 31(17): 2565–2576.
- Struik P C, van Heusden E. 1989. 短期长日照处理对马铃薯块茎发育、产量及大小分布的影响 [J]. 王一民, 译. *园艺与种苗*, (2): 21–26. [Struik P C, van Heusden E. 1989. Effects of short-term and long-day treatment on potato tuber development, yield and size distribution [J]. Wang Y M, translated. *Horticulture & Seed*, (2): 21–26.]