

# 不同施肥模式对马铃薯光合特性及产量品质的影响

徐玉坤 薛龙飞\*

(山西农业大学 高寒区作物研究所,山西 大同 037008)

**摘要** 为解决晋北地区马铃薯生产化肥施用过量的问题,基于3年定位施肥试验,设置无施肥对照处理(CK)、常规施肥处理(CF)和等氮30%有机替代处理(CM)3种不同施肥模式对马铃薯光合特性、产量构成和薯块品质影响进行了研究。结果表明:1)各处理马铃薯相对叶绿素含量(SPAD)和净光合速率(Pn)均随马铃薯生育进程的推进而降低,SPAD和Pn在各个阶段均表现为 $CM > CF > CK$ ;气孔导度(Gs)、胞间 $CO_2$ 浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)各阶段表现不同,但在生长后期CM处理各项光合指标均优于CF和CK处理;2)相比CK处理,CF和CM处理折合产量分别增产13.4%和16.6%,CF和CM处理商品薯率分别提高2.32%和1.46%;3)相比CK处理,CF和CM处理均可增加薯块中淀粉含量,降低还原糖和水分含量,CM处理对蛋白质含量有显著提升作用。综上,等氮30%有机替代施肥模式能够增加马铃薯叶片叶绿素含量,提高叶片净光合速率,改善马铃薯生长后期光合特性,有效延长叶片光合功能期,促进马铃薯产量提升并增加薯块蛋白质含量,相比常规施肥模式更适合晋北地区马铃薯种植。

**关键词** 马铃薯; 有机替代; 光合特性; 产量构成; 品质

中图分类号 S532

文章编号 1007-4333(2022)06-0083-08

文献标志码 A

## Effects of different fertilization models on the photosynthetic characteristics, yield and quality of potato

XU Yukun, XUE Longfei\*

(High Latitude Crops Institute, Shanxi Agricultural University, Datong 037008, China)

**Abstract** Aiming at the problem of excessive chemical fertilizer application for potato production in northern Shanxi, based on a 3-year positioning fertilization experiment, the effects of three different fertilization models on photosynthesis characteristics, yield formation and quality of potato, including no nitrogen fertilization (CK), farmers' conventional fertilization (CF), equal nitrogen 30% organic substitution treatment (CM) were studied. The results showed that: 1) With the development of potato growth, both the relative chlorophyll content (SPAD) and net photosynthetic rate (Pn) decreased. The descending order of SPAD and Pn of three treatments was  $CM > CF > CK$  at each stage. The changes in stomatal conductance (Gs), transpiration rate (Tr) and intercellular  $CO_2$  concentration (Ci) were different at each stage. The photosynthetic indexes of CM treatment were better than those of CF and CK treatments at the late growth period. 2) Compared with CK treatment, the yield of CF and CM treatment increased by 13.4% and 16.6%, respectively, and the commercial potato rate of CF and CM treatment increased by 2.32% and 1.46%, respectively. 3) Compared with CK treatment, both CF and CM treatments could increase starch content, reduce sugar content and water content. CM treatment had a significant effect on protein content. In conclusion, the equal nitrogen 30% organic substitution treatment could increase the chlorophyll content and net photosynthetic rate of leaves, effectively prolong the photosynthetic function period of leaves, improve the photosynthetic characteristics of potato in the late growth period, promote the increase of potato yield and increase the protein content of potato tubers. The equal nitrogen 30% organic substitution is more suitable for potato planting in northern Shanxi than conventional fertilization.

**Keywords** potato; organic substitution; photosynthetic characteristics; yield formation; quality

收稿日期: 2021-06-15

基金项目: 大同市重点研发计划项目(2019041)

第一作者: 徐玉坤, 助理研究员, 主要从事土壤专业研究, E-mail: 125767168@qq.com

通讯作者: 薛龙飞, 副研究员, 主要从事杂粮抗逆育种研究, E-mail: 420861081@qq.com

马铃薯是山西省主要粮食作物和经济作物。近年来,山西马铃薯生产存在化肥使用量过大和偏施氮肥等施肥不合理现象,引起马铃薯生产成本增加、块茎品质下降、肥料利用率低和环境污染等一系列问题<sup>[1]</sup>。改变施肥模式,减少化肥施用量并配合有机替代是扭转上述不利局面的重要措施。光合作用是决定作物产量的关键因素,马铃薯块茎干物质的95%以上来自光合产物,具有物质转化的直接性<sup>[2-3]</sup>。探索马铃薯光合特性在不同施肥模式下的响应规律对研究马铃薯产量和品质形成具有重要意义。

田间定位施肥试验是研究农田长期生态过程及其环境效应和调控措施的重要手段。施肥不仅为作物生长提供养分,而且随着氮、磷和钾等矿质元素的输入影响叶绿素含量和酶活性,间接影响植物的光合作用<sup>[4]</sup>。作物光合作用与产量受肥料种类、施肥水平和肥料形态调控影响<sup>[5-6]</sup>。已有研究表明,长期配施有机无机肥不仅可以显著提升农田有机质,改善土壤性质<sup>[7]</sup>,还能提高作物光合能力和光合产物转运能力,获得较高的产量<sup>[8-9]</sup>。目前作物光合作用对施肥模式响应的相关研究多见于水稻和小麦等主要粮食作物,针对马铃薯的相关研究报道较少。有机肥替代无机肥对马铃薯产量影响的作用机制目前尚不明确。张亮等<sup>[10]</sup>研究发现全部和部分有机肥替代无机肥的马铃薯产量均处于中等水平,但有机肥能通过延长茎叶光合功能期显著提高薯块平均薯重。伊旺等<sup>[11]</sup>认为用农家肥配施复合肥和微生物

菌肥能提高马铃薯净光合速率,提高马铃薯产量。韩悌倩等<sup>[12]</sup>认为高比例有机肥替代处理促进马铃薯根系生长和分化,增加结薯数是增产的主要原因。本研究探讨了田间定位施肥试验下不同施肥模式对马铃薯叶片光合性能、产量构成以及营养品质的影响,以期为本地区马铃薯生产化肥减施和有机肥科学配施提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况及供试材料

试验地位于山西省大同市小南头村(113°20'30.5" N, 40°0'11.0" E),海拔为1 032.7 m;一年一作区,年降雨量449 mm,年蒸发量1 657 mm;年均温度7 °C,无霜期159 d;土壤类型为栗钙土。本研究是在3年定位施肥(2017—2019年)基础上进行的,定位试验前(2017年)0~20 cm土壤基础理化性质如下:有机质质量分数为31.50 g/kg,碱解氮质量分数为147.68 mg/kg,速效磷质量分数为69.89 mg/kg,速效钾质量分数为233.00 mg/kg,容重1.28 g/cm<sup>3</sup>,pH 8.47。供试马铃薯品种为‘晋薯16号’,由山西农业大学高寒区作物研究所提供,是山西省马铃薯主要推广品种。本研究采用定位试验第3年(2019年)数据进行分析,马铃薯于2019年5月7日种植,2019年10月8日收获,大田常规管理。测定2019年马铃薯播种前各处理0~20 cm土壤理化性质见表1。

表1 播种前土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of experiment field before sowing

处理 Treatment	有机质质量 分数/(g/kg) Organic matter mass fraction	碱解氮质量 分数/(mg/kg) Available N mass fraction	速效磷质量 分数/(mg/kg) Available P mass fraction	速效钾质量 分数/(mg/kg) Available K mass fraction	容重/ (g/cm <sup>3</sup> ) Volume- weight	pH
不施肥处理(CK) No nitrogen fertilization	26.98	102.80	57.40	190.50	1.30	8.66
常规施肥(CF) Farmers' conventional fertilization	28.08	240.50	74.97	225.00	1.42	8.50
等氮30%有机替代(CM) Equal nitrogen 30% organic substitution treatment	31.73	196.50	99.23	285.00	1.32	8.34

### 1.2 试验设计

田间定位施肥试验采用单因素随机区组设计，设 3 个处理：不施肥处理(CK)，常规施肥处理(CF，参考当地农户经验施肥)，等氮 30% 有机替代处理(CM，有机氮替代 30% 化肥氮，有机肥用量按当季养分氮含量折算，以达到与 CF 处理施氮量相近)。

具体施肥量见表 2。施肥处理实行定氮，磷钾素不统一量。每个处理重复 3 次，共计 9 个小区，小区面积为 100 m<sup>2</sup>。所用化肥为复合肥(N: 18%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 18%和 K<sub>2</sub>O: 18%)、尿素(N: 46%)和硝酸钾(N: 13%、K<sub>2</sub>O: 46%)。有机肥为腐熟牛粪(N: 0.4%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 0.18%和 K<sub>2</sub>O: 0.19%)。

表 2 各处理肥料施用量

Table 2 Applied fertilizer amount under different treatments

处理 Treatment	有机肥/(kg/hm <sup>2</sup> ) Organic fertilizer	化肥 Chemical fertilizer		
		N/(kg/hm <sup>2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /(kg/hm <sup>2</sup> )	K <sub>2</sub> O/(kg/hm <sup>2</sup> )
CK	0	0.0	0.0	0.0
CF	30 000	265.5	108.0	177.0
CM	52 500	177.0	72.0	118.0

### 1.3 测定项目及方法

#### 1.3.1 光合特性测定

用 Li-6400 便携式光合仪测定马铃薯块茎形成期(2019 年 7 月 2 日)、块茎膨大期(2019 年 8 月 16 日)和淀粉累积期(2019 年 9 月 18 日)3 个时期叶片光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和蒸腾速率，每处理测定 5 片叶，取平均值。

#### 1.3.2 叶绿素含量测定

用叶绿素测定仪 (SPAD-502)测定马铃薯块茎形成期、块茎膨大期和淀粉累积期 3 个时期马铃薯叶片相对叶绿素含量，每处理测定 5 片叶，取平均值。

#### 1.3.3 产量与品质测定

在马铃薯收获期(2019 年 10 月 8 日)测定小区产量，分别记载其大薯、中薯和小薯的重量与个数。采用 FOSS DS2500 近红外分析仪测定马铃薯薯块品质，每处理选 3 个样品，取平均值。

### 1.4 统计分析

采用 SPSS 22.0 软件 Duncan's 进行多重比较 ( $\alpha=0.05$ )，运用 Microsoft Excel 2010 软件作图。

## 2 结果和分析

### 2.1 土壤施肥模式对马铃薯光合特性的影响

比较马铃薯不同生长阶段相对叶绿素含量 (SPAD) 差异(图 1)，各处理 SPAD 均随马铃薯生育进程推进而降低，表现为块茎形成期 > 块茎膨大期 > 淀粉累积期。对比同一生长阶段不同处理，在块茎形成期、块茎膨大期和淀粉累积期均表现为

CM > CF > CK 处理。CM 和 CF 处理的 SPAD 在 3 个阶段均显著高于 CK 处理，分别比 CK 增加了 22.07%、15.43%、33.31%、32.49%、52.13% 和 40.06%。CM 与 CF 处理 SPAD 在块茎形成期和淀粉累积期差异显著。说明 2 种施肥模式在各个生长阶段均能够显著提升叶片 SPAD 值，促进叶绿素合成，有机替代处理效果优于常规施肥。

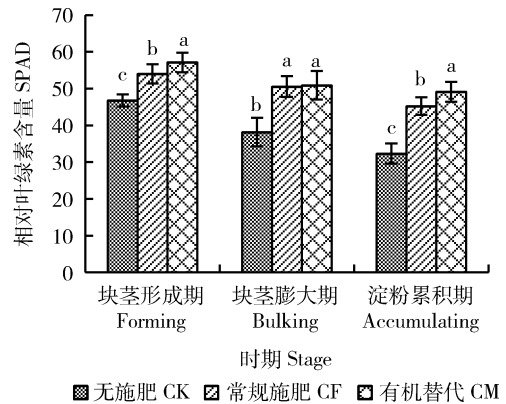


图 1 不同土壤施肥模式下马铃薯的 SPAD

Fig. 1 SPAD of potato under different soil fertilization models

各处理净光合速率 (P<sub>n</sub>) 均随马铃薯生育进程的推进而降低，说明从块茎形成期起叶片光合功能不断衰减(图 2(a))。不同处理间马铃薯净光合速

率在各阶段均表现为  $CM > CF > CK$ , 与 SPAD 表现趋势一致。CF 与 CK 处理各阶段  $P_n$  均无显著差异, CM 与 CK 处理相比显著提高块茎形成期和块茎膨大期  $P_n$ 。图 2(b) 表明, 各处理气孔导度 ( $G_s$ ) 均随马铃薯生育进程的推进而降低。不同处理间马铃薯气孔导度在块茎形成期和块茎膨大期无显著差异, 在淀粉累积期表现为  $CM > CF > CK$ , 其中 CM 与 CK 处理差异显著。由图 2(c) 可知, 各处理胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ) 均随生育进程推进而降低。 $C_i$  在块茎形成期不同处理间差异不显著, 在块茎膨大期  $C_i$  表现为  $CK > CM > CF$ , CF 与 CK 间差异显著。在淀粉累积期  $C_i$  表现为  $CM > CK > CF$ , CM 和 CK 处

理显著高于 CF 处理。由图 2(d) 可知, CK 与 CF 处理下蒸腾速率 ( $T_r$ ) 随马铃薯生育进程的推进降低, 而 CM 处理在块茎膨大期不降反升, 表现优于块茎形成期。比较同一阶段各处理  $T_r$ , 在块茎形成期 CK 和 CF 处理显著高于 CM 处理, 在块茎膨大期 CM 处理显著高于 CF 处理, 在淀粉累积期 CM 处理显著高于 CF 和 CK 处理。综合比较各项光合指标可知, 有机替代处理不仅有助于马铃薯叶片一直保持较高的净光合速率, 增强马铃薯叶片光合功能, 还能综合提高淀粉累积期马铃薯气孔导度、胞间  $CO_2$  浓度和蒸腾速率, 改善马铃薯生长后期叶片光合特性。

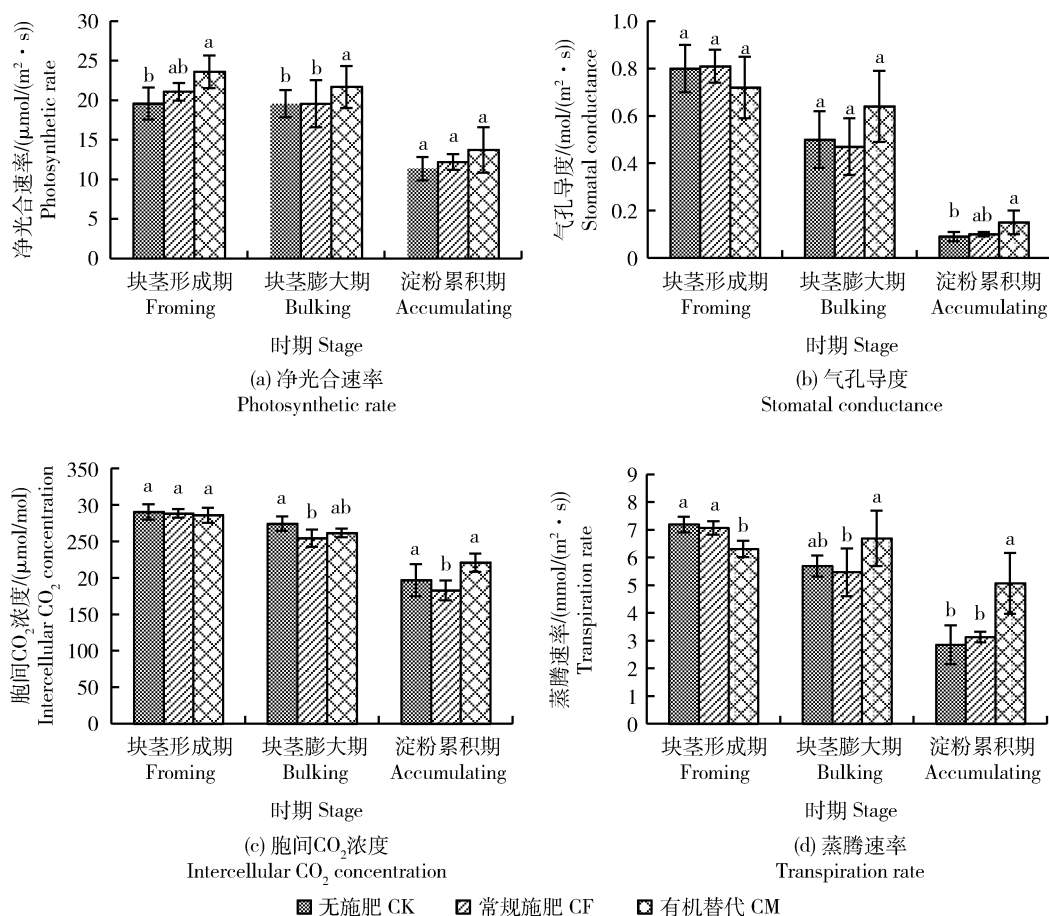


图 2 不同土壤培肥模式下马铃薯光合特性

Fig. 2 Photosynthetic characteristics of potato under different soil fertilization models

## 2.2 土壤培肥模式对马铃薯产量及构成的影响

根据表 3 可知, 所有处理中 CK 处理折合产量与商品薯率均是最低, 其中 CF 和 CM 处理相比 CK 处理分别增产 13.4% 和 16.6%, 商品薯率分别提高 2.32% 和 1.46%, 但不同处理间差异不显著。分析马铃薯产

量构成, CM 和 CF 处理相比 CK 处理单株结薯数和单株产量均有所增加, 其中 CM 和 CF 处理单株结薯数增幅分别达到 20.00% 和 3.19%, 单株产量增幅分别达到 16.39% 和 14.75%。单块茎重 CF 相比 CK 增加了 10.00%, CM 略低于 CK, 不同处理间差异不显著。

表 3 不同处理对马铃薯产量和产量构成因素的影响

Table 3 Effect of different treatments on yield and yield component factors of potato

处理 Treatment	单株结薯数/个 Number of tubers per plant	单株产量/ (kg/株) Yield per plant	单块茎重/ (kg/个) Single tuber weight	折合产量/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Equivalent yield	商品薯率/% Commercial rate
CK	3.45±0.13 a	0.61±0.12 a	0.18±0.02 a	43 013.35±4 817.64 a	94.15±1.50 a
CF	3.56±0.40 a	0.70±0.03 a	0.20±0.02 a	48 796.86±1 196.46 a	96.47±1.06 a
CM	4.14±0.13 a	0.71±0.11 a	0.17±0.03 a	50 143.22±4 220.56 a	95.61±1.52 a

注:同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ ),相同字母表示差异不显著( $P>0.05$ )。下表同。

Note: Within the same column, different letters represent significant differences ( $P<0.05$ ), while the same letters represent no significant differences ( $P>0.05$ ). The same below.

### 2.3 不同施肥方式对马铃薯块茎品质的影响

马铃薯品质主要取决于块茎成分及其含量,其中淀粉、蛋白质、糖类和维生素等营养物质是衡量马铃薯块茎品质的主要指标<sup>[13]</sup>。根据表 4 可知,各处理中,CK 处理下薯块水分质量分数最高,与 CF 处理差异显著,说明常规施肥能有效降低薯块水分含

量,提高薯块干物质比例。比较不同处理间薯块蛋白质质量分数,CM 处理显著高于 CF 处理,说明有机质施用有利于增加薯块蛋白质累积。相比 CK 处理,CF 和 CM 处理均能提高马铃薯薯块淀粉质量分数、降低还原糖质量分数,但不同处理间差异不显著。

表 4 不同处理对马铃薯块茎品质的影响

Table 4 Effect of different treatments on qualities of potato

处理 Treatment	水分质量分数/% Water mass fraction	蛋白质质量分数/% Protein mass fraction	淀粉质量分数/% Starch mass fraction	还原糖质量分数/% Reducing sugar mass fraction	维生素 C 质量分数/ (mg/hg) Vitamin C mass fraction
CK	79.26±0.34 a	1.59±0.13 ab	13.88±0.25 a	0.76±0.07 a	15.13±0.40 a
CF	78.08±0.54 b	1.49±0.14 b	15.11±0.83 a	0.74±0.10 a	15.25±0.64 a
CM	78.81±0.25 ab	1.80±0.09 a	14.09±0.64 a	0.69±0.03 a	13.80±1.00 a

## 3 讨论

叶片的光合作用是马铃薯产量形成的物质基础,施用不同类型肥料影响马铃薯植株叶片的化学组成,进而影响其光合作用,对马铃薯产量和品质造成影响<sup>[14]</sup>。叶绿素含量是衡量叶片衰老和光合功能的关键指标,直接影响光合速率和光合产物的形成<sup>[15]</sup>。本研究结果表明有机替代施肥能够增加叶片 SPAD 值,延缓叶片衰老,这与于显枫等<sup>[16]</sup>研究结果一致,较高的叶片 SPAD 值为光合作用奠定基础,有利于物质同化和块茎的形成。施肥方式对作物光合速率具有较大的影响,张瑞等<sup>[17]</sup>研究小麦旗叶净光合速率得出,同一氮素水平下有机无机肥混

施较单施无机肥好。谭伟军等<sup>[18]</sup>研究认为 30% 有机氮替代是最佳有机无机配施方式,能显著提高马铃薯 SPAD 值,同时也提高了 Pn、Gs、Ci 和 Tr 各项光合指标。本研究中 Pn 在各个时期均表现为 CM 处理高于 CF 和 CK 处理,在淀粉累积阶段,CM 处理 Pn、Gs、Ci 和 Tr 各项光合指标均表现优于 CF 与 CK 处理,与前人研究结果一致。说明有机替代施肥能延缓生育后期叶片光合速率的下降并维持在较高水平,促进了光合产物的积累,为马铃薯高产奠定了物质基础。张向前等<sup>[19]</sup>研究发现长期有机肥替代施肥处理能提高叶片 Pn、Gs 和 Tr,而降低 Ci。本研究中 Ci 与 Pn 并不存在负相关关系,在不同的阶段 Ci 表现不同,与前人研究结果不同。这可能因

为  $C_i$  大小取决于叶片周围空气的  $CO_2$  浓度、气孔导度、叶肉导度和叶肉细胞的光合活性等多个影响因素,相互作用错综复杂<sup>[20]</sup>。在不同情况下决定叶片光合速率高低的主要因子不同,不能一概而论。

本研究表明有机替代施肥处理相比常规施肥对马铃薯增产效果更加明显,这与张君等<sup>[21]</sup>研究结果相似。前人<sup>[21-22]</sup>对不同施肥模式下马铃薯产量构成进行分析,认为长期配施化肥和有机肥可以增加马铃薯单株结薯数,但对马铃薯商品薯率影响的结论并不一致。本研究表明经过3年定位施肥试验,有机替代施肥处理能提高单株结薯数和单株产量,但块茎重量和商品薯率相比常规施肥有所下降,与方玉川等<sup>[22]</sup>研究结果相一致,这可能与本试验选用的马铃薯品种有关。本研究采用的品种‘晋薯16号’中大薯率高、丰产性好,在生长后期对氮肥需求量大。中后期充足的氮肥追施保证了马铃薯块茎膨大期物质需求,是提高商品薯率的关键<sup>[12]</sup>。有机肥养分释放速率较慢,在定位试验初始阶段减少化肥追施量可能导致CM处理‘晋薯16号’中后期氮素供应不足,本身较高的商品薯率下降,需要进一步验证。为实现作物光能高效利用,不仅要通过高光合效率形成较多的光合产物,更要合理分配光合产物,才能使源(光合)-流(光合产物运转)-库(籽粒)协调而实现增益作用<sup>[23]</sup>。本研究重点分析了不同施肥模式对马铃薯“源”与“库”的影响,缺乏对马铃薯光合产物分配与转运规律的研究,未来长期施肥定位试验仍需要进一步探究。

营养供给影响块茎发育期各种激素的合理需求和平衡,进而影响后期薯块淀粉和还原糖的形成<sup>[24]</sup>。方玉川等<sup>[22]</sup>研究表明底肥增施有机肥能增加薯块中干物质累积、蛋白质含量和淀粉含量,降低还原糖含量,对维生素C含量影响不大。王耀<sup>[25]</sup>研究表明复合肥减量施用和配施生物有机肥后均提高了马铃薯产量、淀粉和干物质含量。本研究中比较CM和CF处理,CM处理蛋白质含量显著高于CF处理,而淀粉含量略低于CF处理,这可能是由于块茎中淀粉和蛋白质累积彼此消长导致<sup>[26]</sup>。

## 4 结 论

本研究得出,有机替代施肥模式增加了马铃薯叶片的SPAD值和Pn值,改善了马铃薯生长后期叶片光合特性,有效延长叶片光合功能期,促进马铃薯产量提升并增加马铃薯薯块蛋白质含量,实现作

物增产与肥力资源高效利用协调发展,是更适宜晋北地区农业可持续发展的施肥模式。

## 参考文献 References

- [1] 范向斌,白小东,杜培兵,王宏庭. 氮肥施用量对马铃薯养分吸收、产量和品质的影响[J]. 耕作与栽培, 2020, 40(5): 9-13  
Fan X B, Bai X D, Du P B, Wang H T. Effects of nitrogen fertilizer application on potato nutrient absorption, yield and quality[J]. *Tillage and Cultivation*, 2020, 40(5): 9-13 (in Chinese)
- [2] 郑顺林,杨世民,李世林,袁继超. 氮肥水平对马铃薯光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2013, 35(1): 1-9  
Zheng S L, Yang S M, Li S L, Yuan J C. Effects of nitrogen rate on the characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence in potato (*Solanum tuberosum* L)[J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2013, 35(1): 1-9 (in Chinese)
- [3] 张宝林,高聚林,刘克礼. 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, 2003, 17(3): 137-140  
Zhang B L, Gao J L, Liu K L. Chlorophyll content in leaves of potatoes treated with different density and fertilizer rate[J]. *Chinese Potato*, 2003, 17(3): 137-140 (in Chinese)
- [4] 赵黎明,李明,郑殿峰,顾春梅,那永光,解保胜. 水稻光合作用研究进展及其影响因素分析[J]. 北方水稻, 2014, 44(5): 66-71  
Zhao L M, Li M, Zheng D F, Gu C M, Na Y G, Xie B S. Analysis of the factors and their effect on the photosynthesis of rice[J]. *North Rice*, 2014, 44(5): 66-71 (in Chinese)
- [5] 张黛静,宗洁静,马建辉,杨雪倩,杨逗逗,胡晓. 测墒滴灌下不同氮肥水平对冬小麦光合特性及氮素转运的影响[J]. 河南师范大学学报:自然科学版, 2020, 48(3): 83-89  
Zhang D J, Zong J J, Ma J H, Yang X Q, Yang D D, Hu X. Effects of different nitrogen on photosynthetic characteristics and nitrogen transport in winter wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition*, 2020, 48(3): 83-89 (in Chinese)
- [6] 乔建磊,于海业,宋述尧,肖英奎,张蕾,张艳平. 氮素形态对马铃薯叶片光合色素及其荧光特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(3): 39-44  
Qiao J L, Yu H Y, Song S Y, Xiao Y K, Zhang L, Zhang Y P. Effects of nitrogen forms on photosynthetic pigment and chlorophyll fluorescence characteristics of potato leaves[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(3): 39-44 (in Chinese)
- [7] 徐明岗,周世伟,张文菊,卢昌艾. 我国长期定位施肥试验与农业可持续生产[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(Z1): 141-149  
Xu M G, Zhou S W, Zhang W J, Lu C A. Long-term soil

- fertilizer experiments and sustainable agriculture in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(Z1): 141-149 (in Chinese)
- [8] 袁颖红, 樊后保, 黄欠如, 廖迎春, 黄荣珍. 长期施肥对水稻光合特性及水分利用效率的影响[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(11): 2239-2244
- Yuan Y H, Fan H B, Huang Q R, Liao Y C, Huang R Z. Effects of long-term fertilization on rice photosynthetic traits and water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11): 2239-2244 (in Chinese)
- [9] 赵隽, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺, 赵斌. 有机无机肥长期定位配施对冬小麦群体光合特性及籽粒产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2362-2370
- Zhao J, Dong S T, Liu P, Zhang J W, Zhao B. Effects of long-term mixed application of organic and inorganic fertilizers on canopy apparent photosynthesis and yield of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8): 2362-2370 (in Chinese)
- [10] 张亮, 孙磊, 苏航, 于洪涛, 符强, 范书华, 程瑶. 有机肥和无机肥对马铃薯生长发育及块茎产量的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 862-866
- Zhang L, Sun L, Su H, Yu H T, Fu Q, Fan S H, Cheng Y. Effects of organic and inorganic fertilizers on growth and tuber yield of potato[J]. *Soils*, 2020, 52(4): 862-866 (in Chinese)
- [11] 尹旺, 邓仁菊, 曾宪浩, 孔令元, 陈明俊, 卢扬, 王洪亮, 李飞, 雷尊国. 不同肥料对晚熟马铃薯光合特性及产量形成的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(2): 58-62
- Yin W, Deng R J, Zeng X H, Kong L Y, Chen M J, Lu Y, Wang H L, Li F, Lei Z G. Impacts of different fertilizers on photosynthetic characteristics and yield formation of late-maturing potato[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(2): 58-62 (in Chinese)
- [12] 韩梯倩, 刘震, 刘玉汇, 张小静, 王丽, 张俊莲. 减氮及有机替代对马铃薯根系形态和产量的影响[J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(12): 2111-2118
- Han T Q, Liu Z, Liu Y H, Zhang X J, Wang L, Zhang J L. Effects of reduced chemical nitrogen and organic manure substitution on potato root morphology and yield[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2020, 32(12): 2111-2118 (in Chinese)
- [13] 张小静, 李雄, 陈富, 袁安明, 杨俊丰, 蒲育林, 王静. 影响马铃薯块茎品质性状的环境因子分析[J]. *中国马铃薯*, 2010, 24(6): 366-369
- Zhang X J, Li X, Chen F, Yuan A M, Yang J F, Pu Y L, Wang J. Environmental factors influencing quality traits of potato tubers[J]. *Chinese Potato Journal*, 2010, 24(6): 366-369 (in Chinese)
- [14] 何天久, 李其义, 吴巧玉, 吕树明, 雷尊国, 夏锦慧. 氮磷钾对马铃薯产量和品质影响的研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2014(9): 140-144
- He T J, Li Q Y, Wu Q Y, Lv S M, Lei Z G, Xia J H. Research progress on impact of nitrogen, phosphorus and kalium on yield and quality of potatoes [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2014(9): 140-144 (in Chinese)
- [15] 余凯凯, 宋喜娥, 高虹, 黄蕾, 宋惠洁, 刘阳, 李艳星, 郭平毅, 原向阳. 不同施肥水平下多效唑对马铃薯光合及叶绿素荧光参数的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(1): 154-163
- Yu K K, Song X E, Gao H, Huang L, Song H J, Liu Y, Li Y X, Guo P Y, Yuan X Y. Effect of paclobutrazol on photosynthesis and chlorophyll fluorescence under different fertilization rates in potatoes [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(1): 154-163 (in Chinese)
- [16] 于显枫, 张绪成, 方彦杰, 陈光荣, 王红丽, 侯慧芝, 马一凡, 赵记军. 减氮追施和增密对全膜覆盖垄上微沟马铃薯水分利用及生长的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45(5): 764-776
- Yu X F, Zhang X C, Fang Y J, Chen G R, Wang H L, Hou H Z, Ma Y F, Zhao J J. Effects of top dressing with reduced nitrogen fertilizer and density enhancement on water use efficiency and growth of potatoes planted in mini-ditch on ridges with plastic mulching [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(5): 764-776 (in Chinese)
- [17] 张瑞, 董琦, 王爱萍, 杨绣娟, 赵杰, 范晋波, 王颂宇. 等氮条件下有机无机肥配施对小麦光合特性和群体结构的影响[J]. *激光生物学报*, 2017, 26(3): 281-288
- Zhang R, Dong Q, Wang A P, Yang X J, Zhao J, Fan J B, Wang S Y. Effects of partially replacement of inorganic N with organic materials on photosynthetic characteristic of wheat and population structure under the same N input[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2017, 26(3): 281-288 (in Chinese)
- [18] 谭伟军, 王娟, 黄凯, 杨荣洲, 张娟宁, 何万春. 有机氮替代化肥氮对马铃薯光合特性的影响[J]. *中国种业*, 2021(1): 73-75
- Tan W J, Wang J, Huang K, Yang R Z, Zhang J N, He W C. Effects of organic fertilizer nitrogen instead of chemical fertilizer nitrogen on photosynthetic characteristics of potato [J]. *China Seed Industry*, 2021(1): 73-75 (in Chinese)
- [19] 张向前, 曹富富, 张存岭, 陈欢, 乔玉强, 杜世州, 李玮, 赵竹. 小麦光合特性及产量构成对长期不同土壤培肥模式的响应[J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(5): 615-622
- Zhang X Q, Cao C F, Zhang C L, Chen H, Qiao Y Q, Du S Z, Li W, Zhao Z. Response of photosynthetic characteristics and yield components of winter wheat to different long-term soil fertilizer application model [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(5): 615-622 (in Chinese)
- [20] 陈根云, 陈娟, 许大全. 关于净光合速率和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度关系的思考[J]. *植物生理学通讯*, 2010, 46(1): 64-66
- Chen G Y, Chen J, Xu D Q. Thinking about the relationship between net photosynthetic rate and intercellular CO<sub>2</sub> concentration [J]. *Plant Physiology Communications*, 2010, 46(1): 64-66 (in Chinese)
- [21] 张君, 潘志华, 段玉, 赵沛义, 王博, 李焕春, 连海飞. 长期定位轮作施肥对马铃薯产量和水肥利用效率的影响[J]. *中国农*

- 学通报, 2020, 36(4): 36-43
- Zhang J, Pan Z H, Duan Y, Zhao P Y, Wang B, Li H C, Lian H F. The effects of long-term positioning fertilizer on yield, water and fertilizer use efficiency of rotation potato[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(4): 36-43 (in Chinese)
- [22] 方玉川, 吕军, 张圆, 汪奎. 生物有机肥对马铃薯产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2019, 32(9): 50-53
- Fang Y C, Lv J, Zhang Y, Wang K. Effect of bio-organic fertilizer on potato yield and quality[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2019, 32(9): 50-53 (in Chinese)
- [23] 程建峰, 沈允钢. 作物高光效之管见[J]. 作物学报, 2010, 36(8): 1235-1247
- Cheng J F, Shen Y G. My humble opinions on high photosynthetic efficiency of crop[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(8): 1235-1247 (in Chinese)
- [24] 郑顺林, 王西瑶, 马均, 袁继超, 李首成. 营养水平对马铃薯块茎发育中激素、产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 515-519
- Zheng S L, Wang X Y, Ma J, Yuan J C, Li S C. Effects of nutritional level on hormones, yield and quality in the process of tuber formation in potato [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(3): 515-519 (in Chinese)
- [25] 王耀. 复合肥配施不同生物有机肥对土壤肥力及马铃薯产量和品质的影响[J]. 中国马铃薯, 2018, 32(2): 96-100
- Wang Y. Impact of combined application of compound fertilizer and different bioorganic fertilizers on soil fertility and potato yield and quality[J]. *Chinese Potato Journal*, 2018, 32(2): 96-100 (in Chinese)
- [26] 李勇, 吕文河, 吕典秋, 宿飞飞, 李辉, 胡林双, 杨焕春, 刘振宇, 王绍鹏, 刘尚武. 施氮水平对不同淀粉型马铃薯块茎产量和淀粉品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(3): 27-38
- Li Y, Lv W H, Lv D Q, Su F F, Li H, Hu L S, Yang H C, Liu Z Y, Wang S P, Liu S W. Effects of nitrogen fertilizer application rate on the tuber yield and starch quality of potato varieties with different starch contents[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(3): 27-38 (in Chinese)

责任编辑: 董金波