

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2014.01274

连作对甘肃中部沿黄灌区马铃薯干物质积累和分配的影响

刘 星¹ 张书乐¹ 刘国锋¹ 邱慧珍^{1,*} 王 蒂^{2,3,*} 张俊莲^{2,3} 沈其荣⁴

¹甘肃农业大学资源与环境学院 / 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃兰州 730070; ² 甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃兰州 730070; ³ 甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州 730070; ⁴ 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏南京 210095

摘 要: 甘肃省中部沿黄灌区是全国重要的加工型马铃薯生产基地, 因集约化种植带来连作障碍问题已严重影响到农业产业的健康发展, 所以探索连作对马铃薯块茎产量形成的影响与机制十分必要。根据田间定位试验, 以前茬为玉米的地块作对照, 设连作 1~5 年处理, 采用常规方法, 调查连作对马铃薯产量、干物质积累和分配以及花后干物质积累和转运的影响。结果表明, 与对照相比, 短期(1~2 年)连作未表现连作障碍现象, 连作第 3 年, 块茎产量显著下降, 降幅达 21.68%~75.67%, 单薯重量变化是产量下降的直接原因; 马铃薯整株和块茎的干物质积累均表现出明显的“S”型曲线特征, 连作缩短干物质快速增长长期时间和减少干物质平均积累速度; 也影响马铃薯植株干物质在不同器官间的分配比例, 特别是明显增加根系干物质分配比例。在块茎产量的形成过程中, 长期连作导致营养器官花前贮藏干物质向块茎转运的贡献增加, 而花后同化产物向块茎直接输入的贡献降低。长期连作条件下马铃薯植株库源关系的失衡是导致块茎产量降低的主要原因。

关键词: 马铃薯; 连作; 干物质; 积累; 分配

Effects of Continuous Cropping on Dry Matter Accumulation and Distribution of Potato Plants in the Yellow River Irrigation Areas of Middle Gansu Province

LIU Xing¹, ZHANG Shu-Le¹, LIU Guo-Feng¹, QIU Hui-Zhen^{1,*}, WANG Di^{2,3,*}, ZHANG Jun-Lian^{2,3}, and SHEN Qi-Rong⁴

¹ College of Resources and Environmental Sciences / Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; ² Gansu Key Laboratory of Crop Genetic and Germplasm Enhancement, Lanzhou 730070, China; ³ College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; ⁴ College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: The Yellow River irrigation areas of middle Gansu Province is one of the major growing regions of processing potato in China and potato is often planted continuously by farmers eager to maximize profit, this practice results in the severe decline in tuber yield and also affects the healthy development of the potato industry locally. It is necessary to explore effects of continuous cropping on potato yield formation. The long-term field experiment contained five potato cropping treatments, corresponding to continuously plant potato crop over 1–5 years respectively, in addition, maize-potato rotation plot was used as the control, namely, non continuous potato cropping. We made an attempt to understand the effects of continuous cropping on potato tuber yield, dry matter accumulation and distribution, and accumulation and translocation of dry matter during post-anthesis. There were no statistical differences in tuber yield under the short-term continuous cropping compared with control, however, significant decline in tuber yield by 21.68%–75.67% occurred after three years of continuous cropping, which was mainly derived from the decline in the average fresh-weight of individual tuber. Dynamics of dry matter accumulation in the whole plant and tuber both showed the “S” curve feature, and the continuous cropping decreased the average rate and the duration in dry matter accumulation during quickly accumulative period of potato compared with control. The continuous cropping also affected dry matter distribution, especially increased dry matter distribution ratio in root compared with control. For tuber yield formation, the long-term continuous cropping increased the contribution of translocation of dry matter stored in vegetative organs during pre-anthesis, whereas de-

本研究由国家公益性行业(农业)科研专项(201103004), 国家科技支撑计划项目(2012BAD06B03), 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-10-P18)和甘肃省科技重大专项(1102NKDA025)资助。

* 通讯作者(Corresponding authors): 邱慧珍, E-mail: hzqiu@gsau.edu.cn; 王蒂, E-mail: wangd@gsau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: liuxing2528360@126.com

Received(收稿日期): 2013-10-27; Accepted(接受日期): 2014-03-04; Published online(网络出版日期): 2014-04-08.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20140408.0854.011.html>

creased the contribution of direct assimilate accumulation in tuber during post-anthesis. In conclusion, the long-term continuous cropping leads to an imbalance of sink-source relationship of potato plants, which is the main cause of tuber yield decline.

Keywords: Potato; Continuous cropping; Dry matter; Accumulation; Distribution

甘肃省中部沿黄灌区是西北地区乃至全国重要的加工型马铃薯生产基地, 当地马铃薯种植具规模化、机械化和集约化的特点。随着近年来农产品价格的不断上升和马铃薯消费逐步向高附加值产品转变, 当地农垦企业虽然满足了订单需求, 但造成种植结构相对单一、倒茬困难和马铃薯多年连作。导致植株生长发育受阻, 病虫害猖獗, 块茎产量和品质大幅度下降等一系列的问题, 严重影响企业的种植效益^[1-5]。因而探明马铃薯种植的连作障碍机制, 寻求缓解和克服马铃薯连作障碍的有效途径已成为该地区马铃薯生产环节中亟需解决的问题, 这对于促进该地区马铃薯产业的可持续发展具有重要的理论意义和实践价值。

连续种植某一种或近缘作物, 即使在正常的栽培管理条件下, 也会出现生长发育不良、产量和品质严重下降等连作障碍现象, 这对于马铃薯等茄科作物表现尤为明显, 连作障碍的形成机制已成为国内外研究的热点^[6]。目前, 多数的研究报道均从连作土壤的理化和生物学性质变化、土传病害的产生与致病机制、根际分泌物甚至土壤基因组学等作物根际微生态环境的角度试图对上述问题进行理解和阐释, 也取得了大量的研究成果。但在作物自身对连作的生理生态响应机制及其与经济产量损失的关系, 特别是连作系统下作物产量的形成过程上的认知仍然有限, 而这些科学问题在马铃薯上更是鲜见报道。干物质生产是作物产量形成的基础, 而干物质的积累及其在营养器官和经济器官间合理分配是提高作物产量和增加经济收益的关键, 马铃薯块茎的形成和膨大过程也取决于生育期内同化产物足量积累和再分配^[7-8]。在烤烟^[9-10]、大豆^[11-12]和花生^[13-17]等作物上的研究业已证实, 连作能够显著影响植株的干物质生产和积累过程, 同时也显著影响开花后同化产物向经济器官的分配量和分配速率, 而这可能是导致连作系统下作物经济产量严重下降的重要原因。纵观国内外关于马铃薯干物质积累和分配规律的研究则更多地聚焦在基因型差异^[18-21]、施肥^[22-24]、环境条件^[25-26]、耕作栽培^[27-28]等产量形成的调控因子上, 而对于连作如何影响马铃薯产量形成过程尚无具体的研究报道。结合本课题组早前在甘肃省中部沿黄灌区设置的马铃薯田间定位试验, 我们选择

不同连作年限的马铃薯种植处理, 采用常规方法并结合经典的生态模型来研究连作对马铃薯植株干物质积累的影响以及连作系统下马铃薯干物质向块茎的分配规律等科学问题, 旨在初步探明和揭示西北主栽区马铃薯连作种植与其块茎产量形成间的直接关系, 以期从植株生理生态特性角度来解析马铃薯连作障碍的产生机制, 为克服和消除该地区马铃薯连作障碍进而促进产业的可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验设置在甘肃省中部沿黄灌区的白银市景泰县条山农场, 有充足的水源和良好的农业灌溉条件。地理坐标, 北纬 36°43′~37°38′, 东经 103°33′~104°43′之间, 海拔 1274~3321 m, 属温带大陆性干旱气候, 年平均气温为 9.1℃, 无霜期在 141 d 左右。年平均降水量为 185.6 mm, 年平均蒸发量为 1722.8 mm。年平均日照时数 2713 h, 全县光热资源丰富, 日照百分率 62%, 太阳年平均辐射量 618.1 kJ m⁻², 0℃的年活动积温 3614.8℃, 10℃的有效积温 3038℃, 是我国除青藏高原外光热资源最丰富的地区之一。

1.2 试验设计与方法

试验地前茬为制种玉米、地势平坦整齐且土壤肥力均匀。2005 年开始种植马铃薯, 此后逐年增加马铃薯的种植小区, 即同一地块上形成不同连作年限的马铃薯种植处理, 马铃薯当年种植为连作 0 年处理。2012 年选择连作 0 年处理, 前茬为玉米的地块为对照(CK), 连作 1~5 年(CP1~CP5)田间试验, 每处理 3 次重复, 小区面积为 9.0 m×6.1 m。供试土壤为灰钙土, 质地为沙壤(表 1)。采用统一的马铃薯栽培种植模式和施肥量, 宽垄双行覆膜种植, 在播种前一天切种薯, 并用 1.5%的高锰酸钾溶液浸泡消毒, 垄宽和行距分别为 1.35 m 和 0.70 m, 株距 0.17 m, 种植密度为 8.25×10⁴株 hm⁻²。氮肥用量为 210 kg N hm⁻², N P₂O₅ K₂O 质量比为 1.4 1.0 2.0, 化肥分别是养分含量为 15-15-15 的复合肥、含 N 46%的尿素和含 K₂O 51%的硫酸钾, 无有机肥施用。播种和施肥采用机械化一次进行, 而后人工覆膜。不追肥, 其余栽培、灌溉和田间管理措施均按农场统一方法进行。5 月 13 日播种, 9 月 14 日收获。供试

表 1 供试土壤耕层农化性质
Table 1 0–20 cm soil agro-chemical properties before sowing potato in 2012

处理 Treatment	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	碱解氮 Available N (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	pH 值 pH value
CK	12.31	0.39	53.38	7.12	196.07	8.90
CP1	14.22	0.35	60.38	2.49	153.17	8.77
CP2	12.27	0.32	51.63	6.96	174.62	8.67
CP3	9.29	0.28	56.00	4.96	196.07	8.78
CP4	10.17	0.28	44.63	2.19	188.03	9.05
CP5	13.82	0.35	51.63	14.80	281.88	8.94

pH 值在水土比 5:1 (质量比)条件下测定。Soil pH value was determined in a ratio of 5 (water):1 (soil).

材料为当地主栽的加工型马铃薯品种大西洋, 由甘肃省景泰县条山农工商集团下属的条山农场提供。

1.3 样品采集与分析

分别于苗期(6月20日, 即马铃薯出苗后 10 d)、初花期(7月4日, 马铃薯出苗后 24 d)、末花期(7月24日, 马铃薯出苗后 44 d)、块茎膨大期(8月18日, 马铃薯出苗后 69 d)、淀粉积累期(8月31日, 马铃薯出苗后 82 d)和成熟期(9月14日, 马铃薯出苗后 96 d)共取样 6 次, 于每处理小区随机采集健壮和长势一致的无病害马铃薯植株 5 株, 调查株高和茎粗等农艺性状后, 将植株整株挖出, 分根、茎、叶和块茎 4 部分在 105℃ 下杀青 30 min, 80℃ 烘至恒重称量。在马铃薯收获时考种, 并对每小区的其余植株实测记产。

1.4 干物质增长模型和相关计算公式

采用生态学研究经典的 Logistic 模型来模拟马铃薯整个生育期内的干物质积累过程, 以作物出苗后的天数 t 为自变量, 其实质是一个干物质累积增长曲线, 方程的表达式为 $y = c/[1 + e^{(a-bt)}]$, 其中 c 为干物质最大积累量上限, a 和 b 为常数。解出该方程的一阶导数, 可以得到 Logistic 增长方程的速度函数, 即 $v(t) = dy/dt = cbe^{(a-bt)}/[1 + e^{(a-bt)}]^2$, 用来描述马铃薯干物质增长的速度, 其函数图像在坐标轴内为单峰曲线。令 $v(t) = 0$, 求解得到 $t = a/b$, 即当马铃薯出苗后 a/b 天左右, 植株的干物质增长速度最快, 为马铃薯生长高峰期。同时求 Logistic 增长方程的二阶导数, 令其等于 0, 即 $d^2y/dt^2 = cb^3e^{a-bt}(1 - 4be^{a-bt} + e^{2a-2bt})/[1 + e^{(a-bt)}]^4 = 0$, 简化可得到 $1 - 4e^{a-bt} + e^{2a-2bt} = 0$, 对方程求解得到 $t_1 = a - 1.317/b$, $t_2 = a + 1.317/b$, 这是 Logistic 增长方程的 2 个拐点, 即为干物质快速增长期的起点和终点。

参考小麦^[29-30]、绿豆^[31]和玉米^[32]上的相关工作并结合作物生长的库源关系理论, 营养器官花前贮

藏干物质转运量=开花期干重-成熟期干重; 营养器官花前贮藏干物质转运率=(开花期干重-成熟期干重)/开花期干重×100%; 花后光合作用同化量(输入块茎部分)=成熟期块茎干重-营养器官花前贮藏干物质转运量-开花期块茎干重; 对块茎干重的贡献率=花前贮藏干物质转运量(花后同化产物量)/成熟期块茎干重-开花期块茎干重。

1.5 数据处理

用 SPSS 19.0 软件分析试验数据, 采用 Duncan's 新复极差法检测差异; 采用 Microsoft Excel 2007 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 马铃薯田间农艺性状和块茎产量及其产量构成因素

马铃薯收获时, 调查各处理的块茎产量和产量构成因素以及植株的农艺性状, 从表 2 可见, 连作较对照降低了块茎产量, CP1 和 CP2 较 CK 相比块茎产量均无显著差异, 而 CP3、CP4 和 CP5 的块茎产量较 RP 分别显著下降了 21.68%、75.67%和 71.86%, 表明短期的马铃薯连作种植对块茎产量并无显著影响。在株高上, CP1、CP2 和 CP3 较 CK 相比均无显著变化, 但 CP4 和 CP5 较 CK 显著下降 27.86%和 27.23%, 表明长期马铃薯连作显著抑制植株的生长发育。不同处理的植株茎围呈现与株高相同的变化趋势。单株结薯数、单株结薯重量和平均单薯重量是表征马铃薯块茎产量的重要指标。不同处理间单株结薯数并无显著差异; 单株结薯重量的变化趋势与块茎产量相同; 在平均单薯重量上, CK 与 CP1、CP2 和 CP3 间均无显著差异, 而 CP4 和 CP5 较 RP 显著降低 71.68%和 66.02%。统计分析表明, 平均单薯重量与单株结薯重量之间具有极显著的线性相关,

表 2 马铃薯田间农艺性状及产量构成要素的比较
Table 2 Comparison of agronomic traits of potato plants as well as its yield component factors

处理 Treatment	块茎产量 Tuber yield (kg hm ⁻²)	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	单株结薯数 Tuber number per plant	单株结薯重量 Tuber yield per plant (g)	平均单薯重量 Average fresh-weight of individual tuber (g)
RP	38839±2434 a	55.5±3.3 a	11.5±1.2 a	5.3±0.4 a	1009.55±76.52 a	212.66±22.03 ab
CP1	37703±739 a	53.1±1.3 a	11.0±0.5 a	5.1±1.4 a	1087.20±91.17 a	242.21±70.12 a
CP2	36513±1284 a	51.3±1.4 a	11.7±0.9 a	6.3±1.7 a	960.04±78.73 a	165.64±50.13 b
CP3	30419±2796 b	54.4±0.8 a	11.9±0.1 a	4.4±0.7 a	747.74±49.46 b	186.48±5.01 ab
CP4	9448±3191 c	40.0±5.6 b	8.9±1.6 b	5.7±1.5 a	343.65±71.81 c	60.23±14.89 c
CP5	10930±3752 c	40.4±1.2 b	8.8±1.4 b	5.4±0.9 a	352.67±105.75 c	72.26±5.67 c

线性相关分析 Linear correlation analysis ($n=18$)

块茎产量 Tuber yield	$R^2=1.0000$ $P=0.0000$	$R^2=0.8114$ $P<0.0001$	$R^2=0.5284$ $P=0.0006$	$R^2=-0.0097$ $P=0.6973$	$R^2=0.8736$ $P<0.0001$	$R^2=0.7262$ $P<0.0001$
单株结薯重量 Tuber yield per plant	$R^2=0.8736$ $P<0.0001$	$R^2=0.7425$ $P<0.0001$	$R^2=0.6050$ $P=0.0001$	$R^2=0.0021$ $P=0.8566$	$R^2=1.0000$ $P=0.0000$	$R^2=0.7231$ $P<0.0001$

表中数据为 3 次重复的平均值±标准差, 同列的不同字母表示差异达 5% 显著水平。

Data in this Table are means±SD ($n=3$), and values within the same column followed by different letters are significantly different at 5% probability level.

而单株结薯数与单株结薯重量间则无显著线性相关, 表明平均单薯重量的显著下降是造成连作马铃薯块茎产量下降的原因, 也反映了马铃薯块茎产量的增加更依赖于单薯重量的形成。

2.2 收获时马铃薯植株不同器官的干物质质量

表 3 显示, 不同处理马铃薯整株干物质质量变化趋势与块茎产量相同, CP1 和 CP2 与 CK 相比均无显著变化, 而 CP3、CP4 和 CP5 较 CK 分别显著下降 31.80%、69.85%和 74.99%。而就不同器官的干物质

量而言, 均整体表现出随着连作年限延长而逐渐降低的趋势, 特别是在块茎干重上, CP3~CP5 较 RP 相比显著下降 31.72%~76.10%, 表明长期的连作种植严重抑制马铃薯的经济生产力。相关分析的结果证明, 马铃薯整株以及各器官的干物质质量与块茎产量和单株结薯重量间均有着极显著的线性相关, 说明块茎产量的增加有赖于马铃薯植株干物质的足量积累。

马铃薯植株根冠比对连作响应明显, 随着连作年限的延长, 根冠比呈逐渐增加的趋势, 至 CP5 其

表 3 收获后马铃薯植株不同器官干物质质量比较
Table 3 Comparison of dry matter of different organs at potato harvest time

处理 Treatment	整株 Whole plant (g plant ⁻¹)	根 Root (g plant ⁻¹)	茎 Stem (g plant ⁻¹)	叶 Leaf (g plant ⁻¹)	块茎 Tuber (g plant ⁻¹)	根冠比 Ratio of root to shoot	收获指数 Harvest index
CK	297.44±62.97 a	2.90±0.31 a	12.71±3.51 a	20.09±2.48 bc	261.73±59.52 a	0.0894±0.0230 c	0.8822±0.0151 a
CP1	297.77±21.00 a	3.07±0.25 a	9.67±0.63 ab	26.31±2.22 a	258.72±22.07 a	0.0941±0.0165 bc	0.8677±0.0149 a
CP2	264.73±16.48 a	3.09±0.73 a	9.39±1.44 b	23.29±5.07 ab	228.96±11.09 a	0.0958±0.0229 bc	0.8629±0.0159 a
CP3	202.85±27.02 b	2.20±0.36 b	7.04±1.19 b	14.72±3.28 c	178.72±22.50 b	0.1027±0.0141 bc	0.8460±0.0638 a
CP4	89.43±6.69 c	1.59±0.12 b	3.59±1.13 c	8.71±2.55 d	75.54±4.38 c	0.1718±0.0773 ab	0.8330±0.0308 a
CP5	74.06±6.84 c	1.99±0.07 b	3.67±0.71 c	6.15±2.12 d	62.25±5.24 c	0.2181±0.0563 a	0.8259±0.0228 a

线性相关分析 Linear correlation analysis ($n=18$)

块茎产量 Tuber yield	$R^2=0.8755$ $P<0.0001$	$R^2=0.6694$ $P<0.0001$	$R^2=0.7635$ $P<0.0001$	$R^2=0.7463$ $P<0.0001$	$R^2=0.8694$ $P<0.0001$	$R^2=-0.5622$ $P=0.0003$	$R^2=0.2366$ $P=0.0407$
单株结薯重量 Tuber yield per plant	$R^2=0.9187$ $P<0.0001$	$R^2=0.8210$ $P<0.0001$	$R^2=0.8637$ $P<0.0001$	$R^2=0.8890$ $P<0.0001$	$R^2=0.9167$ $P<0.0001$	$R^2=-0.6260$ $P<0.0001$	$R^2=0.3258$ $P=0.0134$

根冠比为根系干重与地上部茎和叶片的干重之和的比值, 收获指数为块茎干重与植株整株干重的比值。

Root dry matter amount divided by the aboveground dry matter amount is the ratio of root to shoot (RS); the harvest index is the ratio of dry matter amount of tuber to the whole plant (HI).

根冠比较CK已经显著增加143.96%，表明连作种植显著影响马铃薯植株地上和根系的干物质分配，统计分析结果也证明根冠比与块茎产量和单株结薯重量间均有着极显著的负线性相关，反映出这种连作条件下植株地上和根系干物质分配的变化与块茎产量的下降有关。然而在植株的收获指数上，连作同未连作相比均无显著变化。

2.3 不同连作年限下马铃薯植株的干物质积累

由图1可知，从马铃薯出苗至成熟，整株的干物质积累过程可分3个阶段，从苗期到末花期，整株的干物质积累比较缓慢；而从块茎膨大期开始，整株的干物质积累量迅速增加，近似直线增长的趋势，到淀粉积累前期干物质积累量达到最大值，马铃薯全生育期内一半以上的干物质积累在块茎膨大期内完成；而从淀粉积累后期开始至成熟收获，整株的干物质积累量较为平稳，甚至略有下降。就整株的干物质积累量而言，在不同的生育时期内，均整体表现出随着连作年限延长而逐渐下降的趋势。在长期马铃薯连作种植下(CP4和CP5)，整株干物质积累量的下降则表现得更为明显。

采用 Logistic 方程来对田间数据拟合表明，马铃薯整株的干物质积累呈现明显的“S”型增长规律，均达极显著水平(表4)，说明连作能够显著影响生育期内马铃薯的干物质积累过程。CP1~CP5的 V_{\max} 较CK下降8.48%~69.86%，而 V_{mean} 也较CK下降8.06%~69.89%，并且 V_{\max} 和 V_{mean} 均表现出随着连作年限的延长而逐渐降低的趋势。就 t_0 而言，CK与CP1~CP3相比变化较小，但CP4和CP5较CK早出现10~15 d，

这表明长期的连作种植导致了马铃薯植株的早衰。同样，CP4和CP5也缩短了马铃薯整株干物质快速积累期的持续时间，与CK相比参数 Δt 平均缩短约15 d。统计分析结果也表明， V_{mean} ($R^2=0.8916$, $P=0.0046$, $n=6$)和 Δt ($R^2=0.7874$, $P=0.0183$, $n=6$)与块茎产量均具有显著或极显著的正相关，表明 V_{mean} 和 Δt 的降低是导致连作条件下块茎产量下降的一个重要原因。

2.4 不同连作年限下马铃薯块茎和根茎叶的干物质积累

图2表明，对于块茎，生育期内干物质的积累动态与整株的趋势相似，也呈明显的“S”型曲线，块茎是马铃薯干物质积累的主要器官。整体来看，块茎干物质积累量表现随连作年限延长而逐渐下降的趋势。而就根+茎+叶而言，其干物质积累量较小，块

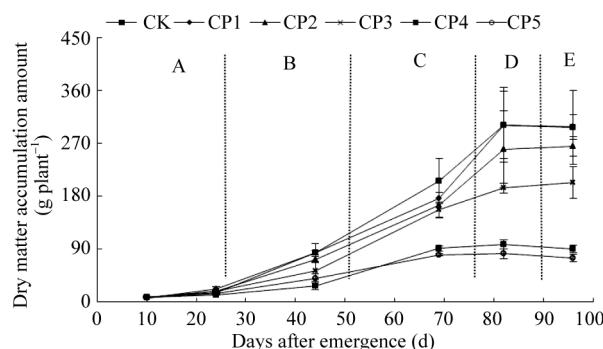


图1 连作条件下马铃薯植株干物质积累动态
Fig. 1 Dynamic changes of dry matter accumulation of potato plants subjected to continuous cropping
A: 苗期; B: 花期; C: 块茎膨大期; D: 淀粉积累期; E: 成熟期。
A: seedling stage; B: anthesis stage; C: tuber bulking stage; D: starch accumulation stage; E: maturity stage.

表4 不同连作年限对马铃薯整株干物质积累方程及其相关参数的影响

Table 4 Effects of continuous potato cropping on Logistic equations and their parameters of dry matter accumulation

处理 Treatment	方程 Equation	t_0	t_1	t_2	V_{\max}	V_{mean}	Δt	R^2	P -value
CK	$y = 326.92 / (1 + e^{4.61 - 0.078t})$	59	42	76	6.37	5.58	34	0.9892	0.0011
CP1	$y = 348.39 / (1 + e^{4.31 - 0.067t})$	64	45	84	5.83	5.13	39	0.9755	0.0038
CP2	$y = 304.02 / (1 + e^{4.30 - 0.068t})$	63	44	83	5.17	4.52	39	0.9859	0.0017
CP3	$y = 213.57 / (1 + e^{4.70 - 0.083t})$	57	41	72	4.43	3.91	31	0.9988	0.0001
CP4	$y = 95.41 / (1 + e^{6.52 - 0.130t})$	50	40	60	3.10	2.73	20	0.9817	0.0025
CP5	$y = 80.91 / (1 + e^{4.08 - 0.095t})$	43	29	57	1.92	1.68	28	0.9813	0.0026

t : 马铃薯出苗后的时间(d); y : 马铃薯整株的干物质积累量(g plant^{-1}); t_0 : 马铃薯生育期内干物质积累最大速率出现的时间, t_1 和 t_2 : Logistic 生长曲线的2个拐点, 即干物质快速积累期的起点和终点时间; V_{\max} : 马铃薯生育期内其干物质的最大增长速率($\text{g plant}^{-1} \text{d}^{-1}$); V_{mean} : 马铃薯干物质快速积累期的干物质平均增长速度($\text{g plant}^{-1} \text{d}^{-1}$); Δt : 干物质快速积累期的持续时间。

t : time after emergence of potato plants (d); y : dry matter accumulation amount of whole plant (g plant^{-1}); t_0 : time to the maximum rate of dry matter accumulation in potato growth period; t_1 and t_2 : two inflexion points of Logistic equation, namely, the start point and end point of quickly accumulative period of dry matter in potato growth period, respectively; V_{\max} : the maximum increasing rate of dry matter accumulation ($\text{g plant}^{-1} \text{d}^{-1}$); V_{mean} : average increasing rate of dry matter accumulation in quickly accumulative period ($\text{g plant}^{-1} \text{d}^{-1}$); Δt : the duration of quickly accumulative period of dry matter.

茎膨大期和淀粉积累期内干物质积累较为平稳,而在成熟期出现轻微的下降。而值得注意的是,块茎和根+茎+叶干物质积累量达到平衡的时间同样明显受连作影响,CK 和 CP1 的干物质积累量达到平衡的时间都大约出现在马铃薯出苗后 35 d 左右,而 CP2~CP5 处理均出现在马铃薯出苗后 45 d 左右,整体上

看,随着连作年限的延长,这一时间也愈加后移。同时在干物质积累量达到平衡以后直至马铃薯收获,块茎干物质积累量大于根+茎+叶干物质积累量,块茎和根+茎+叶之间形成了干物质积累的“剪刀差”(图 2),可以看出这一“剪刀差”也呈随着连作年限延长而逐渐降低的趋势。

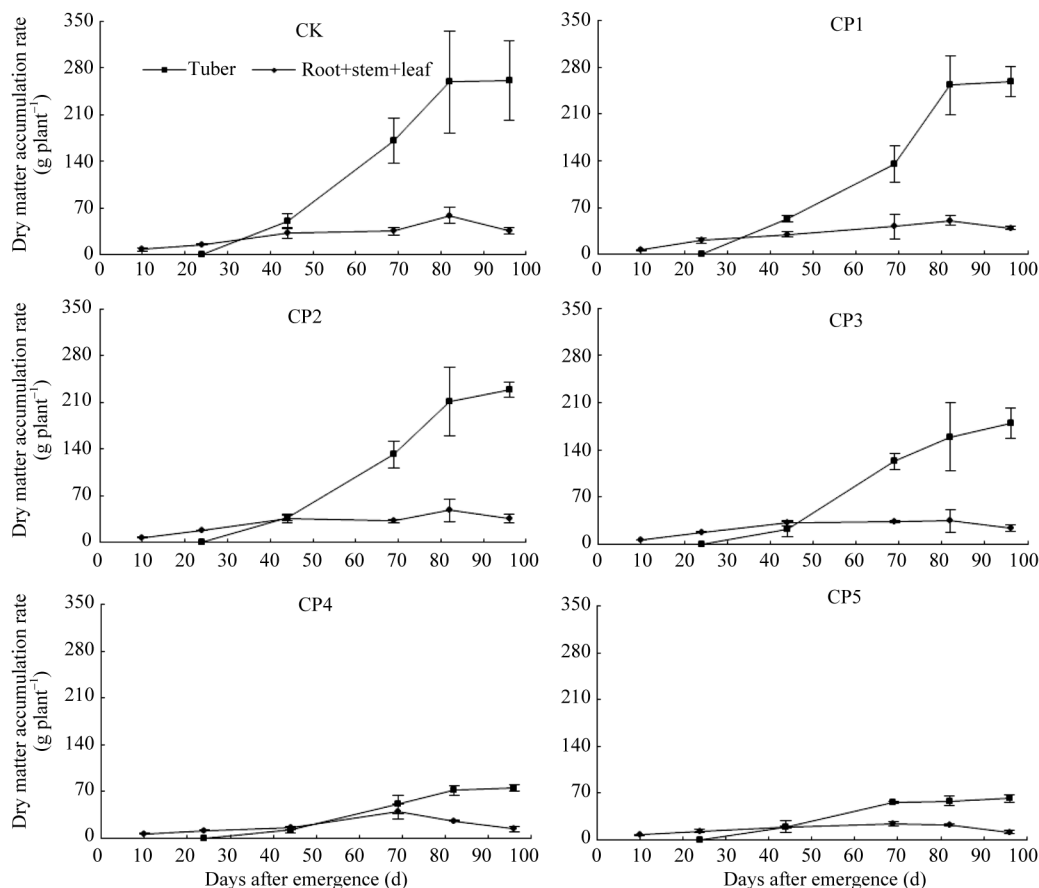


图 2 连作条件下马铃薯块茎和根茎叶的干物质积累动态

Fig. 2 Dynamic changes in dry matter accumulation of tuber and root+stem+leaf in potato under continuous cropping

由表 5 可知,块茎干物质积累最大速率出现的时间 t_0 较整株推迟大约 4~12 d (表 4 和表 5),该时间段正处于马铃薯库源关系的转换阶段。CP1~CP5 的 V_{\max} 较 RP 下降 8.29%~69.12%,而 V_{mean} 也较 CK 下降 7.09%~68.51%,并且 V_{\max} 和 V_{mean} 同样都表现出随连作年限延长而逐渐降低的趋势。另外,在收获时马铃薯块茎产量并未表现出显著差异的 CK、CP1 和 CP2 处理, Δt 均维持在 30~32 d,而块茎产量出现显著下降的 CP3~CP5 处理 Δt 只有 19~25 d。统计分析结果也证明, V_{mean} ($R^2 = 0.9867$, $P < 0.0001$, $n = 6$) 和 Δt ($R^2 = 0.7123$, $P = 0.0346$, $n = 6$) 与块茎产量具有显著或极显著的正相关,表明连作条件下马铃薯块茎产量的下降与 V_{mean} 和 Δt 相应的降低有关,而这 2 个参

数受马铃薯连作影响明显,也反映了块茎产量的增加有赖于块茎部位干物质的足量积累。总之,连作能够显著影响马铃薯块茎部位的干物质积累过程。

2.5 不同连作年限下马铃薯各器官间的干物质分配规律

由表 6 可知,马铃薯干物质在不同器官之间的分配比例随着生育时期的推进而变化明显,并且以末花期为转折点,此时也正是块茎和根+茎+叶的干物质积累量达到平衡的时期(图 1 和图 2)。在苗期和初花期,植株干物质的分配比例均以叶片最高,扩大源的强度以生产更多的光合产物,从而为库的建成及扩大奠定基础;末花期开始至成熟期,植株干物质分配比例均以块茎最大,干物质分配比例为块茎

表 5 连作对马铃薯块茎干物质积累方程及其相关参数的影响

Table 5 Effects of continuous cropping on Logistic equations of dry matter accumulation of tuber and their parameters

处理 Treatment	方程 Equation	t_0	t_1	t_2	V_{\max}	V_{mean}	Δt	R^2	P -value
CK	$y = 282.61/(1+e^{5.85-0.093t})$	63	48	78	6.51	5.78	30	0.9895	0.0105
CP1	$y = 296.04/(1+e^{5.61-0.083t})$	68	52	84	5.97	5.37	32	0.9695	0.0305
CP2	$y = 250.49/(1+e^{5.92-0.089t})$	67	52	82	5.41	4.87	30	0.9931	0.0069
CP3	$y = 181.79/(1+e^{6.72-0.108t})$	62	50	75	5.04	4.28	25	0.9992	0.0008
CP4	$y = 79.41/(1+e^{6.23-0.100t})$	62	50	75	1.99	1.76	25	0.9975	0.0025
CP5	$y = 60.57/(1+e^{6.78-0.137t})$	50	40	59	2.01	1.82	19	0.9971	0.0029

t : 马铃薯出苗后的天数(d); y : 马铃薯块茎的干物质积累量(g plant^{-1}); t_0 : 马铃薯生育期内块茎干物质积累最大速率出现的时间; t_1 和 t_2 : Logistic 生长曲线的 2 个拐点, 即块茎干物质在快速积累期的起点和终点时间; V_{\max} : 马铃薯生育期内块茎干物质的最大增长速率($\text{g plant}^{-1} \text{d}^{-1}$); V_{mean} : 马铃薯块茎干物质快速积累期的干物质平均增长速度($\text{g plant}^{-1} \text{d}^{-1}$); Δt 为块茎干物质快速积累期的持续时间。

t : days after emergence of potato plants (d); y : dry matter accumulation amount of potato tuber (g plant^{-1}); t_0 : time to the maximum rate of tuber dry matter accumulation in potato growth period; t_1 and t_2 : two inflexion points of Logistic equation, namely, the start point and end point of quickly accumulative period of tuber dry matter in potato growth period, respectively; V_{\max} : the maximum increasing rate of dry matter accumulation within potato tuber; V_{mean} : average increasing rate of tuber dry matter accumulation in quickly accumulative period ($\text{g plant}^{-1} \text{d}^{-1}$); Δt : the duration of quickly accumulative period of tuber dry matter.

>叶>茎>根, 表明马铃薯植株的干物质分配方向已改变, 同化产物更多地流向块茎, 以增加库容量, 到成熟期已经有 80%以上的干物质积累在块茎中。马铃薯同水稻和小麦等籽粒作物相比具有不同的生物学特性, 其以块茎这一无性器官作为收获对象, 因而在经济产量形成和干物质的分配规律上有差异。在块茎和根+茎+叶的干物质积累量达到平衡之前, 马铃薯以根茎叶为生长中心, 光合产物主要用于根茎叶的形态建成和生长, 以扩大群体光合面积; 而在平衡之后, 同化产物更多地分配到块茎以促进块茎快速充实膨大和淀粉积累, 使块茎的干物质积累量呈直线上升的趋势, 而根、茎、叶的干物质分配比例则缓慢下降。

不同连作年限比较, 马铃薯植株不同器官干物质分配比例差异因生育时期的不同而有所变化。在苗期和初花期, 连作同未连作相比, 植株根、茎、叶的干物质分配比例均未变化; 从末花期开始至成熟期, 连作与未连作间的各器官干物质分配比例开始改变, 其中以根系最明显, 根系的干物质分配比例整体表现出随连作年限延长而逐渐增加的趋势, 以 CP4 和 CP5 的增幅最大, 且同 CK 相比差异均达到显著水平; 而茎、叶和块茎的干物质分配比例在不同处理上的表现则因生育时期不同而异, 但总体来看并无特定的变化规律。

2.6 连作对马铃薯花前和花后干物质再分配的影响

由表 7 可知, 连作明显影响了马铃薯植株营养

器官花前贮藏干物质向块茎中的转运量和转运率。在田间试验数据的计算过程中, 我们发现 CK、CP1 和 CP2 处理出现植株营养器官花前贮藏干物质转运量为负值的情况, 因而我们认为其植株在生长发育过程中营养器官并未出现花前贮藏干物质向块茎中的转运, 转运量为零, 而其对应的转运率也为零。CK 植株的根、茎、叶器官均未出现花前贮藏干物质向块茎部位的转运, 但 CP1 和 CP2 则分别出现茎、根+茎的花前贮藏干物质向块茎的转运, 但总体来看, CK、CP1 和 CP2 根茎叶总的花前贮藏干物质转运量均为零, 而这 3 个处理在收获时块茎产量并无显著差异。块茎产量同 CK 相比显著下降的 CP3~CP5 处理, 根、茎、叶器官均出现花前贮藏干物质向块茎的转运, 根+茎+叶的转运量为 7.0~7.6 g 株^{-1} 左右。结果表明, 马铃薯的长期连作种植导致营养器官花前贮藏干物质向块茎中的转运。

在花后块茎干物质积累量上, CK、CP1 和 CP2 间均无显著差异, CP3~CP5 较 CK 均显著降低 22.45%~79.75%, 花后光合同化产物向块茎的输入量也表现出与此相同的变化趋势, CP3~CP5 较 CK 也显著降低 25.95%~83.545%, 说明长期马铃薯连作能够显著降低花后块茎的干物质积累和同化产物向块茎的输入。

就对块茎干物质积累的贡献率而言, 从表 7 也可以看出, 马铃薯在生长发育过程中花后同化产物向块茎的输入量起着主要作用, 但同化产物输入块茎的贡献率受连作种植的影响而逐渐下降, 特别是

表 6 连作对马铃薯各器官间的干物质分配比例的影响

Table 6 Effects of continuous potato cropping on dry matter distribution in different organs at the whole growing stage (%)

生育时期 Growing stage	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	块茎 Tuber
苗期 Seedling	CK	16.28±3.75 a	8.79±1.23 a	76.45±10.24 a	—
	CP1	17.06±0.89 a	9.13±1.57 a	74.67±8.75 a	—
	CP2	16.03±2.75 a	9.78±1.14 a	75.42±11.24 a	—
	CP3	16.86±3.03 a	9.84±0.45 a	75.88±5.83 a	—
	CP4	18.13±2.67 a	9.78±1.12 a	73.76±7.34 a	—
初花期 Early flowering	CP5	18.73±4.60 a	9.35±0.50 a	73.42±8.65 a	—
	CK	14.26±7.75 a	17.19±4.23 a	68.55±5.83 a	—
	CP1	14.38±6.51 a	17.15±3.02 a	68.47±6.01 a	—
	CP2	11.93±5.16 a	17.92±2.42 a	70.16±5.42 a	—
	CP3	10.88±2.54 a	19.75±3.11 a	69.37±2.96 a	—
末花期 Late flowering	CP4	14.04±3.61 a	19.90±11.05 a	66.05±10.37 a	—
	CP5	13.78±5.54 a	16.34±2.71 a	69.88±4.03 a	—
	CK	3.87±1.24 b	10.85±3.86 a	24.19±12.98 a	61.09±7.30 a
	CP1	3.49±0.96 b	13.50±3.82 a	18.57±6.99 a	64.44±9.54 a
	CP2	5.76±2.23 ab	17.54±6.39 a	29.05±11.11 a	47.64±15.41 ab
块茎膨大期 Tuber bulking	CP3	5.41±1.61 ab	23.83±7.17 a	32.95±12.60 a	37.82±11.71 b
	CP4	8.40±3.96 a	19.83±6.65 a	30.30±10.44 a	41.47±15.35 ab
	CP5	7.22±3.21 a	16.90±7.32 a	31.76±20.78 a	44.13±12.36 ab
	RP	1.29±0.03 b	3.82±0.08 b	12.28±2.51 a	82.60±3.11 a
	CP1	1.94±0.62 ab	4.50±1.37 ab	16.12±4.70 a	77.44±6.28 a
淀粉积累期 Starch accumulation	CP2	1.80±0.72 ab	5.45±2.73 a	13.11±3.65 a	79.64±6.37 a
	CP3	1.84±0.40 ab	6.49±2.82 a	14.20±6.36 a	77.46±9.75 a
	CP4	2.62±0.80 a	6.09±1.26 a	13.29±2.35 a	78.00±3.87 a
	CP5	2.58±0.12 a	8.63±4.10 a	13.90±7.78 a	74.89±12.58 a
	CK	1.31±0.20 b	4.15±0.68 a	14.14±1.54 b	85.07±7.81 a
成熟期 Maturity	CP1	1.26±0.13 b	4.22±0.46 a	11.49±0.16 c	84.41±1.97 a
	CP2	1.31±0.45 b	4.52±0.96 a	12.61±1.94 b	81.55±3.07 a
	CP3	1.38±0.23 b	4.96±0.61 a	11.33±0.83 c	78.19±0.95 b
	CP4	2.62±0.18 a	5.77±0.04 a	18.43±1.03 a	73.18±1.01 c
	CP5	3.17±0.69 a	5.94±0.58 a	19.46±1.51 a	71.43±2.18 c
	CK	0.98±0.50 b	4.14±2.01 a	6.63±2.26 a	88.22±1.51 a
	CP1	1.06±0.28 b	3.31±1.46 a	8.86±3.36 a	86.77±1.49 a
	CP2	1.19±0.42 ab	3.58±1.15 a	8.94±2.32 a	86.29±1.59 a
	CP3	1.38±0.95 ab	4.73±3.93 a	9.73±8.54 a	84.60±6.38 a
	CP4	2.17±1.36 a	4.40±2.72 a	10.14±5.22 a	83.30±3.08 a
	CP5	3.03±1.53 a	5.25±2.92 a	9.13±4.18 a	82.59±2.28 a

表中数据为 3 次重复的平均值±标准差, 同列的不同字母表示在相同生育时期内不同连作年限间差异达 5%显著水平。

Data in this Table are means±SD ($n = 3$), and values within the same column followed by different letters are significantly different at 5% probability level among different years of continuous potato cropping in the same growing stage.

表 7 连作对马铃薯花前贮藏干物质转运和花后光合同化产物积累的影响
Table 7 Effects of continuous cropping on translocation of dry matter stored before anthesis and accumulation of photosynthate after anthesis in potato plants

处理 Treatment	花前营养器官贮藏干物质 Dry matter stored in vegetative organs before anthesis							
	根 Root		茎 Stem		叶 Leaf		总计 Total	
	TA (g plant ⁻¹)	TP (%)	TA (g plant ⁻¹)	TP (%)	TA (g plant ⁻¹)	TP (%)	TA (g plant ⁻¹)	TP (%)
CK	—	0	—	0	—	0	—	0
CP1	—	0	1.55±1.38	13.32±10.61	—	0	—	0
CP2	1.09±0.13	12.01±2.67	2.61±0.21	19.78±6.43	—	0	—	0
CP3	0.44±0.07	9.23±1.13	4.92±0.76	34.63±7.23	1.64±0.51	8.96±5.23	7.00±0.18	20.23±10.67
CP4	0.85±0.15	34.86±3.91	1.70±0.49	23.86±2.71	4.89±1.03	33.62±8.27	7.43±0.87	22.84±6.21
CP5	0.36±0.75	14.18±3.42	2.61±0.62	36.69±6.59	4.61±0.97	43.41±6.34	7.57±1.73	39.27±9.79

处理 Treatment	花后干物质积累量 Accumulation of dry matter after anthesis		贡献率 Contribution of dry matter translocation to tuber	
	块茎 Tuber (g plant ⁻¹)	光合同化 Assimilate (g plant ⁻¹)	花前贮藏干物质转运 Translocation of dry matter stored before anthesis (%)	花后同化产物输入 Accumulation of assimilate after anthesis (%)
CK	199.66±19.50 a	199.66±19.50 a	0	100.00
CP1	205.35±27.36 a	205.35±27.36 a	0	100.00
CP2	191.74±12.02 a	191.74±12.02 a	0	100.00
CP3	154.84±33.24 b	147.84±4.23 b	4.52	95.48
CP4	63.52±7.88 c	56.09±7.37 c	11.74	88.26
CP5	40.43±11.98 c	32.86±13.45 c	20.37	79.63

表中数据为 3 次重复的平均值±标准差, 同列的不同字母表示差异达 5% 显著水平。TA: 转运量; TP: 转运率。

Data in this Table are means±SD ($n = 3$), and values within the same column followed by different letters are significantly different at 5% probability level. TA: translocation amount; TP: translocation proportion.

对于长期连作种植的情况下的 CP4 和 CP5, 而营养器官花前贮藏干物质的转运在连作条件下的变化趋势正好与此相反。

3 讨论

3.1 连作对马铃薯植株干物质积累和分配的影响

同未连作相比, 短期的马铃薯连作并不会导致块茎产量的显著下降, 而自连作 3 年开始, 块茎产量出现大幅度下降, 我们认为连作两年可能是在当地生态环境和栽培及品种条件下马铃薯连作的阈值年限, 对于马铃薯种植企业而言, 在满足生产需求和兼顾经济效益的同时, 连作 2 年后是马铃薯连作过程的最佳终止时间, 而这将会对企业合理安排种植计划提供实际依据。测定结果表明, 连作对土壤理化性质具显著的影响, 但与连作马铃薯最终的块茎产量并不直接相关, 也表明在本试验的条件下土壤养分的供应状况差异并不是导致连作马铃薯块茎产量出现大幅度下降的直接原因。长期连作条件下,

植株农艺性状显著降低, 表现出明显的连作障碍, 同时也显著影响马铃薯整株和块茎的干物质积累过程, 使植株干物质快速积累过程所维持的时间和平均积累速度均大幅度降低, 而这应是导致块茎产量下降的直接原因。光合生产是作物干物质积累的基础, 我们早前的研究^[2]已经证实长期的连作种植导致马铃薯净光合速率显著下降, 同时叶片光合系统 PSII 反应中心对光能的转化和利用效率显著下降, 光合电子链正常的电子传递也受到抑制。不仅如此, 长期连作后株高的降低也会导致马铃薯生育期内冠层群体光合源面积的下降, 光合强度不足, 这些都导致连作马铃薯干物质积累量的下降。

长期连作也导致马铃薯在干物质分配上的变化, 其突出的特点是增加根系在各器官中的干物质分配比例, 并且自末花期至成熟期均呈现这种变化趋势, 带来了植株在根冠比上的显著变化, 这也与前人的研究结果一致^[2,11]。在大豆上的研究认为, 因长期连作引起的根系病虫害加重, 养分和水分的胁迫以及

内源激素的失衡导致冠部降低幅度大于根系,使根冠比增大^[11]。试验数据的计算表明,连作条件下马铃薯植株冠层干物质下降的速度相对快于根系是根冠比增大的直接原因。根冠比的调整被认为是植物应对生物或非生物胁迫的主要策略,它能反映作物的生长发育状况及环境条件对根系与地上部分生长的不同影响,而形成单位产量的干物质,根系需要的同化产物是地上部的两倍,故而较小的根系有利于更多的同化产物转移到地上部^[33-34]。田间取样观察和试验数据尽管均证实根系的体积和干重都在降低,但是由于马铃薯花后的生长中心在块茎,这也从侧面解释了长期连作条件下(CP3~CP5)根系干物质在花后向块茎部位的转运。

在马铃薯的末花期,块茎和根+茎+叶干物质积累量达到平衡,而在此后块茎干物质积累量大于根+茎+叶干物质积累量,二者形成“剪刀差”,这种“剪刀差”的大小可以反映出马铃薯产量的高低^[7,35],在本试验中其大小随着连作年限的延长而逐渐降低,与块茎产量变化趋势吻合。营养器官和经济器官干物质积累量平衡期以前,光合产物主要用于茎叶的形成和生长,建造地上部植株有机体;而此后,根茎叶干物质质量的积累逐渐平缓,高达80%以上的同化产物直接输入无性器官,形成“剪刀差”,其实质反映了马铃薯随生育进程不同于其他禾谷类作物的库源关系转换过程。

3.2 连作对马铃薯花前和花后干物质分配的影响

在禾谷类作物上的相关研究认为,籽粒灌浆物质的来源可分为两部分,一部分是开花后的同化产物,包括直接输入籽粒的光合产物和开花后形成的暂贮藏性干物质的再转移;一部分是开花前生产的暂贮藏于营养器官中、在灌浆期间再转移到籽粒中的同化产物^[32,36]。由于目前在马铃薯作物上植株花前和花后干物质分配和转运规律尚无研究报道,因而我们以禾谷类作物的相关研究作为参考。田间试验的结果表明,长期的连作能够明显改变马铃薯花前和花后的干物质再分配特征。在对照(CK)和短期连作(CP1和CP2)条件下马铃薯植株未出现花前营养器官(根+茎+叶)贮藏性干物质向块茎中的转运,而从连作3年(CP3)开始这种贮藏性干物质转运的现象出现,并且随着连作年限的延长,贮藏性干物质对块茎干物质积累的贡献率也逐渐增加,CP5处理营养器官花前贮藏干物质转运的贡献率已经超过20%。相反,受连作种植的影响,马铃薯植株花后同

化产物向块茎直接输入的比重越来越小,贡献率也越来越低,其原因是花后植株生长发育因连作受到严重抑制,自身的光合产物生产降低,其向块茎中光合产物的输入量也随之减少^[2]。研究表明,籽粒作物的产量在很大程度上决定于后期的光合生产能力,其贡献率为80%左右,生育后期同化产物积累是产量增加的主要来源^[37-39],田间试验结果证实了马铃薯块茎产量的增加也与此同理。CK、CP1和CP2处理下块茎产量的形成完全依赖于花后同化产物的直接输入,而营养器官的花前贮藏有机物用于自身的形态建成以在生育后期继续维持较高的光合强度,如良好根系形态和构型可更高效地吸收土壤水分和养分^[2];冠层结构的优化可提高单位面积上对光能的截获^[40]。但在长期连作条件下,光合强度的下降导致块茎库对有机物质的竞争能力增强,马铃薯植株营养器官贮藏性干物质对块茎产量的贡献率逐渐增加,从而影响库源关系的协调,最终表现为营养器官作为源过度地向块茎库中转移光合产物,自身的形态建成受到影响,花后光合生产效率进一步降低,形成恶性循环^[7]。因而,我们认为在长期的马铃薯连作种植的条件下植株生产库源关系的失调是块茎产量下降的主要原因。

4 结论

同未连作相比,在短期连作条件下马铃薯块茎产量并未出现显著变化,但自连作3年后,块茎产量显著下降,降幅达21.68%~75.67%,其直接原因是单薯重量下降。连作降低马铃薯植株的干物质积累量,同时植株干物质的积累动态也受连作影响显著,主要表现为随连作年限延长,整株和块茎干物质快速积累期的平均增长速度(V_{mean})和持续的时间(Δt)逐渐降低。另外,连作增加马铃薯花后根系干物质分配比例,而其他器官干物质分配比例在不同连作年限下的变化随生育进程而异。长期连作还影响花前和花后马铃薯植株干物质的分配,导致花前营养器官贮藏干物质转运对块茎产量形成的贡献率逐渐加大,而花后同化产物向块茎部位的输入份额减少。

References

- [1] 沈宝云,余斌,王文,张俊莲,王蒂.腐植酸铵、有机肥、微生物肥配施在克服甘肃干旱地区马铃薯连作障碍上的应用研究.中国土壤与肥料,2011,(2):68-70
Shen B Y, Yu B, Wang W, Zhang J L, Wang D. Study on the application of humic ammonia, organic fertilizer, microbial fertilizer to eliminate continuous cropping obstacles of potato in the

- arid regions of Gansu. *Soils Fert Sci China*, 2011, (2): 68–70 (in Chinese with English abstract)
- [2] 沈宝云, 刘星, 王蒂, 孟品品, 张俊莲, 邱慧珍. 甘肃省中部沿黄灌区连作对马铃薯植株生理生态特性的影响. *中国生态农业学报*, 2013, 21: 689–699
Shen B Y, Liu X, Wang D, Meng P P, Zhang J L, Qiu H Z. Effects of continuous cropping on potato eco-physiological characteristics in the Yellow River irrigation area of the central Gansu Province. *Chin J Eco-Agric*, 2013, 21: 689–699 (in Chinese with English abstract)
- [3] 余斌, 沈宝云, 王文, 邱慧珍, 刘鑫, 李朝周, 张俊莲, 王蒂. 连作障碍对干旱地区不同马铃薯品种的影响. *甘肃农业大学学报*, 2012, 47(4): 43–47
Yu B, Shen B Y, Wang W, Qiu H Z, Liu X, Li C Z, Zhang J L, Wang D. Effects of different potato varieties on preventing continuous cropping obstacle in the arid regions. *J Gansu Agric Univ*, 2012, 47(4): 43–47 (in Chinese with English abstract)
- [4] 孟品品, 刘星, 邱慧珍, 张文明, 张春红, 王蒂, 张俊莲, 沈其荣. 连作马铃薯根际土壤真菌种群结构及其生物效应. *应用生态学报*, 2012, 23: 3079–3086
Meng P P, Liu X, Qiu H Z, Zhang W M, Zhang C H, Wang D, Zhang J L, Shen Q R. Fungal population structure and its biological effect in rhizosphere soil of continuously cropped potato. *Chinese J Appl Ecol*, 2012, 23: 3079–3086 (in Chinese with English abstract)
- [5] 牛秀群, 李金花, 张俊莲, 沈宝云, 柴兆祥, 王蒂. 甘肃省干旱灌区连作马铃薯根际土壤中镰刀菌的变化. *草业学报*, 2011, 20: 236–243
Niu X C, Li J H, Zhang J L, Shen B Y, Chai Z X, Wang D. Changes of *Fusarium* in rhizosphere soil under potato continuous cropping systems in arid-irrigated area of Gansu Province. *Acta Pratac Sin*, 2011, 20: 236–243 (in Chinese with English abstract)
- [6] 凌宁, 王秋君, 杨兴明, 徐阳春, 黄启为, 沈其荣. 根际施用微生物有机肥防止连作西瓜枯萎病研究. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15: 1136–1141
Ling N, Wang Q J, Yang X M, Xu Y C, Huang Q W, Shen Q R. Control of *Fusarium* wilt of watermelon by nursery application of bio-organic fertilizer. *Plant Nutr Fert Sci*, 2009, 15: 1136–1141 (in Chinese with English abstract)
- [7] 卢建武, 邱慧珍, 张文明, 王蒂, 张俊莲, 张春红, 侯叔音. 半干旱雨农业区马铃薯干物质和钾素积累与分配特性. *应用生态学报*, 2013, 24: 423–430
Lu J W, Qiu H Z, Zhang W M, Wang D, Zhang J L, Zhang C H, Hou S Y. Characteristics of dry matter and potassium accumulation and distribution in potato plant in semi-arid rainfed areas. *Chin J Appl Ecol*, 2013, 24: 423–430 (in Chinese with English abstract)
- [8] 王爱华, 张文芳, 黄冲平. 马铃薯干物质分配与器官建成的动态模拟研究. *生物数学学报*, 2005, 20: 356–362
Wang A H, Zhang W F, Huang C P. Study on the simulation of potato dry-matter distribution and its apparatuses formation. *J Biomathematics*, 2005, 20: 356–362 (in Chinese with English abstract)
- [9] 叶义, 张吉立, 王宁, 刘振平, 王鹏. 常规施肥条件下重茬烤烟干物质积累及其产值分析. *山东农业科学*, 2011, (12): 77–79
Ye Y, Zhang J L, Wang N, Liu Z P, Wang P. Analysis of dry matter accumulation and production value of flue-cured tobacco by continuous cropping under conventional fertilization. *Shandong Agric Sci*, 2011, (12): 77–79 (in Chinese with English abstract)
- [10] 顾怀胜, 郭亮, 曾中林, 王邦, 邱萍, 曹廷茂, 陈朝应. 烤烟连作障碍的形成机制及调控技术研究进展. *湖南农业科学*, 2013, (1): 25–28
Gu H S, Guo L, Zeng Z L, Wang B, Qiu P, Cao T M, Chen Y C. Advances in formation mechanism of continuous cropping obstacles for tobacco planting and its regulation technology. *Hunan Agric Sci*, 2013, (1): 25–28 (in Chinese with English abstract)
- [11] 王晶英, 郑桂萍, 张红燕, 李国兰. 连作大豆根冠比增大原因的研究. *大豆科学*, 1997, 16: 136–142
Wang J Y, Zheng G P, Zhang H Y, Li G L. Study on the reason of root-shoot ratio increasing of soybean on continuous cropping. *Soybean Sci*, 1997, 16: 136–142 (in Chinese with English abstract)
- [12] 许艳丽, 刘晓冰, 韩晓增, 李兆林, 王守宇, 何喜云, 于莉. 大豆连作对生长发育动态及产量的影响. *中国农业科学*, 1999, 32(suppl): 64–68
Xu Y L, Liu X B, Han X Z, Li Z L, Wang S Y, He X Y, Yu L. Effect of continuous-cropping on yield and growth development of soybean. *Sci Agric Sin*, 1999, 32(suppl): 64–68 (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴正锋, 成波, 王才斌, 郑亚萍, 刘俊华, 陈殿绪, 高新华. 连作对花生幼苗生理特性及荚果产量的影响. *花生学报*, 2006, 35(1): 29–33
Wu Z F, Cheng B, Wang C B, Zheng Y P, Liu J H, Chen D X, Gao X H. Effect of continuous cropping on peanut seedling physiological characteristics and pod yield. *J Peanut Sci*, 2006, 35(1): 29–33 (in Chinese with English abstract)
- [14] 万书波, 王才斌, 卢俊玲, 李光敏, 伦伟志, 吴正峰, 成波. 连作花生的生育特性研究. *山东农业科学*, 2007, (2): 32–36
Wan S B, Wang C B, Lu J L, Li G M, Lun W Z, Wu Z F, Cheng B. Study on the growth and development characters of continuous-cropping peanut. *Shandong Agric Sci*, 2007, (2): 32–36 (in Chinese with English abstract)
- [15] 樊堂群, 王树兵, 姜淑庆, 成波, 李晔, 初长江, 王才斌. 连作对花生光合作用和干物质积累的影响. *花生学报*, 2007, 36(2): 35–37
Fan T Q, Wang S B, Jiang S Q, Cheng B, Li Y, Chu C J, Wang C B. Effect of continuous cropping on photosynthesis and accumulation of dry matter in peanut. *J Peanut Sci*, 2007, 36(2): 35–37 (in Chinese with English abstract)
- [16] 王小兵, 骆永明, 李振高, 刘五星, 何园球. 长期定位施肥对红壤地区连作花生生物学性状和土传病害发生率的影响. *土壤学报*, 2011, 48: 725–730
Wang X B, Luo Y M, Li Z G, Liu W X, He Y Q. Effects of long-term stationary fertilization experiment on incidence of soil-borne diseases and biological characteristics of peanut in continuous monocropping system in red soil area. *Acta Pedol Sin*, 2011, 48: 725–730 (in Chinese with English abstract)
- [17] 黄玉茜, 韩立思, 韩晓日, 战秀梅, 杨劲峰, 蒋增. 辽宁风沙土区连作年限对花生光合特性和产量的影响. *沈阳农业大学学报*, 2011, 42: 438–442
Huang Y Q, Han L S, Han X R, Zhan X M, Yang J F, Jiang Z. Effects of continuous cropping on yields and photosynthetic

- characteristics of peanuts in sandy soil region of Liaoning. *J Shenyang Agric Uni*, 2011, 42: 438–442 (in Chinese with English abstract)
- [18] Soltanpour P N. Accumulation of dry matter and N, P, K, by Russet Burbank, Oromonte and Red McClure potatoes. *Am Potato J*, 1969, 46: 111–119
- [19] Kleinkopf G E, Westermann D T, Dweller R B. Dry matter production and nitrogen utilization by six potato cultivars. *Agron J*, 1981, 73: 799–802
- [20] Van Heemst H D J. The distribution of dry matter during growth of a potato crop. *Potato Res*, 1986, 29: 55–66
- [21] Alva A K, Hodges T, Boydston R A, Collins H P. Dry matter and nitrogen accumulations and partitioning in two potato cultivars. *J Plant Nutr*, 2002, 25: 1621–1630
- [22] Sharifi M, Zebbarth B J, Hajabbasi M A, Kalbasi M. Dry matter and nitrogen accumulation and root morphological characteristics of two clonal selections of Russet Norkotah potato as affected by nitrogen fertilization. *J Plant Nutr*, 2005, 28: 2243–2253
- [23] Sun L, Gu L L, Peng X L, Liu Y Y, Li X Z, Yan X F, Yang X M. Effects of nitrogen fertilizer application time on dry matter accumulation and yield of Chinese potato variety KX13. *Potato Res*, 2012, 55: 303–313
- [24] Vos J. Split nitrogen application in potato: effects on accumulation of nitrogen and dry matter in the crop and on the soil nitrogen budget. *J Agric Sci (Cambridge)*, 1999, 133: 263–274
- [25] Malik N J, Dweller R B, Thornton M K, Pavsek J J. Dry matter accumulation in potato clones under seasonal high temperature conditions in Pakistan. *Am Potato J*, 1992, 69: 667–676
- [26] Levy D. Varietal differences in the response of potatoes to repeated short periods of water stress in hot climates: 2. Tuber yield and dry matter accumulation and other tuber properties. *Potato Res*, 1983, 26: 315–321
- [27] Ifenkwe O P, Allen E J. Effect of row width and planting density on growth and yield of two maincrop potato varieties 1. plant morphology and dry-matter accumulation. *J Agric Sci (Cambridge)*, 1978, 91: 265–278
- [28] Gray D. Some effects of variety, harvest date and plant spacing on tuber breakdown on canning, tuber dry matter content and cell surface area in the potato. *Potato Res*, 1972, 15: 317–334
- [29] 屈会娟, 李金才, 沈学善, 魏凤珍, 王成雨, 鄧胜军. 种植密度和播期对冬小麦品种兰考矮早八干物质和氮素积累与转运的影响. *作物学报*, 2009, 35: 124–131
Qu H J, Li J C, Shen X S, Wei F Z, Wang C Y, Zhi S J. Effects of plant density and seeding date on accumulation and translocation of dry matter and nitrogen in winter cultivar Lankao Aizao 8. *Acta Agron Sin*, 2009, 35: 124–131 (in Chinese with English abstract)
- [30] 马迎辉, 王玲敏, 叶优良, 朱云集. 栽培管理模式对冬小麦干物质积累、氮素吸收及产量的影响. *中国生态农业学报*, 2012, 20: 1282–1288
Ma Y H, Wang L M, Ye Y L, Zhu Y J. Effects of different cultivation management modes on dry matter accumulation, nitrogen uptake and yield of winter wheat. *Chin J Eco-Agric*, 2012, 20: 1282–1288 (in Chinese with English abstract)
- [31] 高小丽, 孙健敏, 高金锋, 冯佰利, 王鹏科, 柴岩. 不同绿豆品种花后干物质积累与转运特性. *作物学报*, 2009, 35: 1715–1721
Gao X L, Sun J M, Gao J F, Feng B L, Wang P K, Chai Y. Accumulation and transportation characteristics of dry matter after anthesis in different mung bean cultivars. *Acta Agron Sin*, 2009, 35: 1715–1721 (in Chinese with English abstract)
- [32] 杨恒山, 张玉芹, 徐寿军, 李国红, 高聚林, 王志刚. 超高产春玉米干物质及养分积累与转运特征. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18: 315–323
Yang H S, Zhang Y Q, Xu S J, Li G H, Gao J L, Wang Z G. Characteristics of dry matter and nutrient accumulation and translocation of super-high-yield spring maize. *Plant Nutr Fert Sci*, 2012, 18: 315–323 (in Chinese with English abstract)
- [33] 王艳哲, 刘秀位, 孙宏勇, 张喜英, 张连蕊. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究. *中国生态农业学报*, 2013, 21: 282–289
Wang Y Z, Liu X W, Sun H Y, Zhang X Y, Zhang L R. Effects of water and nitrogen on root/shoot ratio and water use efficiency of winter wheat. *Chin J Eco-Agric*, 2013, 21: 282–289 (in Chinese with English abstract)
- [34] Passioura J B. Roots and drought resistance. *Agric Water Manag*, 1983, 7: 265–280
- [35] 门福义, 刘梦芸, 张志林. 马铃薯的产量形成与生育阶段. *内蒙古农牧学院学报*, 1980, (1): 72–81
Men F Y, Liu M Y, Zhang Z L. Potato yield formation and its growing stages. *J Inner Mongolia Inst Agric Anim Hus*, 1980, (1): 72–81 (in Chinese with English abstract)
- [36] Mackown C T, Van Sanford D A, Zhang N. Wheat vegetative nitrogen compositional changes in response to reduced reproductive sink strength. *Plant Physiol*, 1992, 99: 1469–1474
- [37] 黄智鸿, 王思远, 包岩, 梁焯赫, 孙刚, 申林, 曹洋, 吴春胜. 超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究. *玉米科学*, 2007, 15(3): 95–98
Huang Z H, Wang S Y, Bao Y, Liang H X, Sun G, Sheng L, Cao Y, Wu C S. Studies on dry matter accumulation and distribution characteristic in super high-yield maize. *J Maize Sci*, 2007, 15(3): 95–98 (in Chinese with English abstract)
- [38] Cassman K G. Ecological intensification of cereal production system: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1999, 96: 5952–5959
- [39] Ye Y L, Wang G L, Huang Y F, Zhu Y J, Meng Q F, Chen X P, Zhang F S, Cui Z L. Understanding of physiological processes associated with yield-trait relationships in modern wheat varieties. *Field Crops Res*, 2011, 124: 316–322
- [40] 杨建昌, 杜永, 吴长付, 刘立军, 王志琴, 朱庆森. 超高产粳型水稻生长发育特性的研究. *中国农业科学*, 2006, 39: 1336–1345
Yang J C, Du Y, Wu C F, Liu L J, Wang Z Q, Zhu Q S. Growth and development characteristics of super-high-yielding mid-season japonica rice. *Sci Agric Sin*, 2006, 39: 1336–1345 (in Chinese with English abstract)