第41卷 第3期　　华 中 农 业 大 学 学 报　　Vol.41 No.3
2022年 5月　　Journal of Huazhong Agricultural University　　May 2022,191～199

杨心彪,李兴需,刘睿,等.鲜食番茄成熟过程中果实营养成分的动态变化[J].华中农业大学学报,2022,41(3):191-199.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.03.022

鲜食番茄成熟过程中果实营养成分的动态变化

杨心彪[1],李兴需[2],刘睿[1],周国林[2]

1.华中农业大学食品科学技术学院/环境食品学教育部重点实验室,武汉 430070;
2.武汉市农业科学院,武汉 430072

摘要　为探究鲜食番茄生长期果实品质动态变化规律,指导栽培并确立适宜的采收期,以5个不同品种的鲜食番茄为材料,分析其成熟过程中果实色泽、硬度以及维生素C、可溶性糖、可滴定酸、番茄红素、矿物质含量等品质指标的动态变化。结果显示:果实成熟过程中,硬度由3 000～4 000 g降至1 000～2 000 g,果皮红色逐渐加深,番茄红素增加至0.016 mg/g左右,可溶性固形物、维生素C、葡萄糖、果糖含量都呈现先增加后降低的变化规律,且在坚熟期达到最大值;糖酸比、可溶性糖含量总体呈逐渐上升的趋势;可溶性蛋白、可滴定酸、苹果酸含量则呈现逐渐降低的趋势,同一品种的番茄在不同的生长期某些矿物质的含量也存在显著差异。结果表明,坚熟期为鲜食番茄最适宜的采收时期,坚熟期NT31番茄的糖酸比在7.5左右,果糖含量为15.0 mg/g,可溶性蛋白含量为17.0 mg/g,具备更高的营养价值和商品价值。

关键词　鲜食;番茄;采收期;成熟期;果实品质;品质评价

中图分类号　S641.2　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1000-2421(2022)03-0191-09

番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill),茄科番茄属,距今已有数百年的人工栽培历史,在我国的果蔬消费市场中占居重要地位。近年来,越来越多的种植基地采用高效优质的栽培技术,生产出果实大小适中、果色饱满、果皮较薄、果肉较软、糖酸比合理、成熟度合适、主要用于鲜食的“口感型番茄”,市场上也称“原味番茄”[1]。番茄风味独特,具有较高的营养价值,所含番茄红素具有较强的抗氧化、抗肿瘤、助消化、利尿以及预防心血管疾病的作用[2]。

目前关于番茄的研究主要集中在栽培管理技术[3]、品种培育[4]、土壤改良及平衡施肥[5-6]、风味物质成分及影响因素分析[7]等方面。但是对相同栽培条件下不同生理期的果实品质指标的动态变化以及对不同矿物质元素富集能力的研究鲜见报道。番茄属于典型的呼吸跃变型果实,不同品质指标的合成时期和速率也有所不同[8]。已有研究表明,糖在番茄整个成熟期逐渐积累,完熟期达到最高[9];而维生素C含量则在成熟后期呈S型下降[10]。因此,适宜的番茄采收期需要综合考虑其成熟期感官品质和营养品质,并根据储运条件做出调整。

本研究以5个不同品种的鲜食番茄为原料,对其成熟过程中色泽、硬度、糖、酸、番茄红素以及黄酮类化合物等营养成分的动态变化进行分析,并对相同栽培条件下不同品种番茄在不同生长周期内对矿物质元素的富集能力进行对比分析,以确定适宜的采收期,提高果实采收品质,并为建立鲜食番茄高效的栽培管理体系及番茄品质育种提供一定依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试的5个番茄品种来自武汉市农业科学院蔬菜研究所,分别为:NT30、NT31、QD2101、黔红一号(QH001)、盛世一号(SS001)。其中QD2101为粉红色果,其余都为大红色果;NT30与NT31果为高圆形果,单果质量260 g左右,存在亲缘关系;QD2101为高圆形果,单果质量260～300 g;QH001为圆形果,单果质量160～170 g;SS001为高扁圆形果,单果质量约220～260 g。整体外观及纵切面见图1。

收稿日期:2021-12-05
基金项目:农业农村部国家大宗蔬菜产业技术体系(CARS-23-G27);武汉市应用基础前沿专项(2019020701011492)
杨心彪,E-mail:1826881734@qq.com
通信作者:刘睿,E-mail:liurui89634@163.com;周国林,E-mail:glzhou@126.com

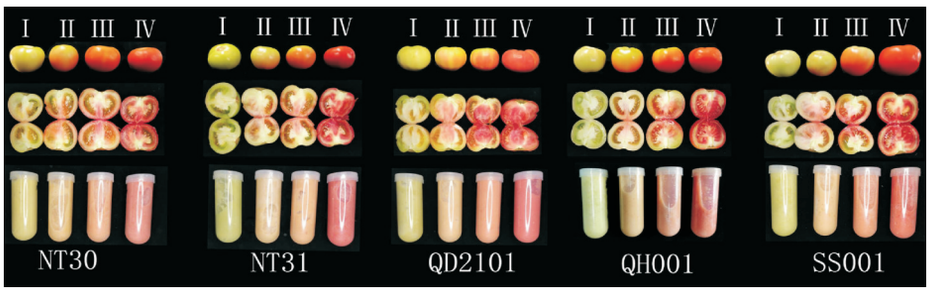


图1 不同品种不同生长期番茄纵切面

Fig.1 Longitudinal section of different tomato varieties at different growth stages

参试品种在武汉市农业科学院北部园区引进示范园内栽培，2020年12月17日播种，2021年3月4日定植。番茄包沟2 m开厢，双行种植，每个种植小区种同一品种番茄36～40株，株距40 cm，行距50 cm。从每个种植小区中一次性随机从第六果穗选取不同成熟期、大小均匀、无机械损伤的6个代表性果实，将其中3个番茄进行匀浆，制成待测样品，分装至不同大小的容器中并置于－80 ℃超低温冰箱冷冻保存备用，剩余3个果实用于色泽及质构的测定。

果实不同生理期标准为：青熟期（Ⅰ）：果实通体呈绿色，质地较坚硬。转色期（Ⅱ）：果实外观开始呈现少许红色，着色比例10%～60%。坚熟期（Ⅲ）：果实整体呈现红色，着色比例60%～90%。完熟期（Ⅳ）：果实整体呈现深红色，质地略微发软。

1.2 主要仪器与设备

ATY-244电子分析天平，日本岛津；色差仪（UltraScan VIS），美国HunterLab；TA.XT.plus质构仪，英国Stablemic rosystems；Multiskan Sky全波长酶标仪，Thermo Fisher Scientific；UltiMate 3000 UHPLC液相色谱（二级管阵列检测器），Thermo Fisher Scientific；e1525液相色谱（示差折光检测器），美国Waters；Aglient7800型电感耦合等离子体质谱仪，美国安捷伦科技有限公司。

1.3 色泽指标测定

采用色差仪进行测定色度。沿番茄表面均匀测定6个点的L^*、a^*、b^*值，结果取3个果实的平均值。L^*表示由黑到白的程度，L^*越大表示果皮越白；a^*表示由绿到红的程度，a^*越大表示越红；b^*表示由蓝到黄的程度，b^*越大表示越黄。

1.4 质构指标测定

果实硬度测定采用质构仪进行测定；选用直径为5 mm的P/100型不锈钢探头，测试前、中、后速度都为1.0 mm/s，穿透距离为10 mm，沿番茄赤道均匀测定4个点，结果取3个果实的平均值。

1.5 营养指标测定

番茄果实中可溶性固形物主要包括糖、酸、维生素、矿物质等，可直接反映果实成熟度和品质状况。果实中可溶性固形物（TSS）含量采用手持折光仪测定。维生素C含量参考王学奎等[11]的方法，采用萃取比色法测定。可溶性蛋白质含量测定用考马斯亮蓝G-250法测定[12]。番茄红素含量测定依据NY/T1614—2008《中华人民共和国农业行业标准蔬菜及制品中番茄红素的测定》采用高效液相色谱法测定。总酚含量的测定采用福林酚法[13]进行测定。

1.6 果实中酸、糖含量和种类测定

采用氢氧化钠滴定法测定可滴定酸含量。准确称取番茄匀浆5.00 g，按照程远等[14]的方法提取有机酸，采用高效液相色谱法进行测定。色谱条件：色谱柱Hypersil Gold aQ（250 mm×4.6 mm，5 μm），流动相0.02 mol/L磷酸二氢铵（磷酸调节pH至2.7），柱温30 ℃，流速0.6 mL/min，进样量10 μL，配有二极管阵列检测器。

采用苯酚硫酸法测定可溶性糖含量。准确称取经研磨的番茄匀浆5.00 g，按齐红岩等[9]的方法提取果实中的可溶性糖，采用高效液相色谱法进行测定。色谱条件为：Agilent zorbax nh2（4.6 mm×250 mm，5 μm），流动相70%乙腈，柱温30 ℃，流速1 mL/min；进样量10 μL，配有示差折光检测器。

1.7 矿质元素含量测定

参照GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》中第一法，分别测定Na、Mg、K、Ca、Cr、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Se、Cd、Pb的含量。

1.8 数据处理及分析

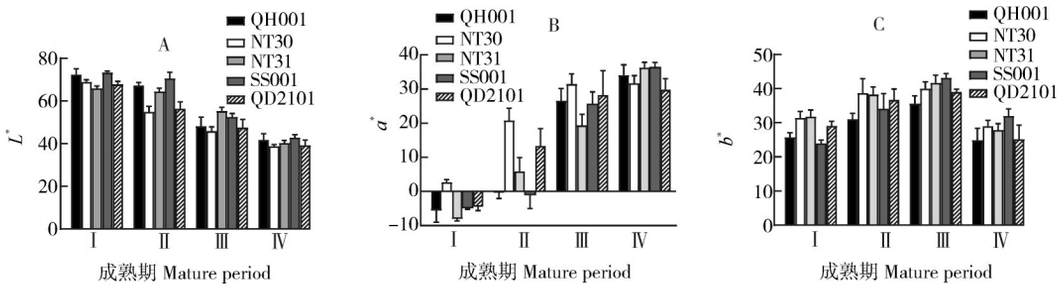
采用Excel 2016、GraphPad prism 8软件对试验数据进行处理及绘图，采用SPSS 16.0进行差异性分析。采用变异系数（CV）评估单一品质指标中不同鲜食番茄材料中的差异。采用隶属函数分析方法对5种番茄坚熟期果实的品质指标综合评价，隶属函数

值$X_{\mu}=(X-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$，式中，$X$为鲜食番茄某品质指标的测定值，$X_{min}$为该材料下该品质的最小值，$X_{max}$为该材料下该品质的最大值[15]。

2　结果与分析

2.1　番茄果实成熟过程中色泽的变化

由图2可知，在番茄的成熟过程中，果皮的亮度(L^*)逐渐降低，红(a^*)、黄色(b^*)逐渐加深，完熟期黄色逐渐变浅。在坚熟期，其亮度适中，具有较深的红色、黄色，其中NT31具有最大的亮度值，NT30红色最深，但亮度值最低，SS001黄色最深，QH001黄色最浅。而到了完熟期，果实红色程度增加不大，但表皮亮度、黄色进一步降低。对色泽而言，番茄果实在坚熟期就具有较好的商品性状，适合采摘上市。



Ⅰ：青熟期 Green ripe period；Ⅱ：转色期 Coloring period；Ⅲ：坚熟期 Firm ripe stage；Ⅳ：完熟期 Full ripe stage.

图2　番茄果实成熟过程中L^*(A)、a^*(B)、b^*(C)的动态变化

Fig.2　Dynamics of L^*(A), a^*(B) and b^*(C) during tomato fruit ripening

2.2　番茄果实成熟过程中硬度及营养成分的变化

由图3A可知，果实的硬度呈下降的趋势，青熟期为果实硬度的最高阶段，最高值达4 500 g，此时不同品种的番茄硬度存在较大差异，差值达到1 500 g，而到了完熟期，番茄的硬度多集中在700～1 500 g，此时果实硬度过低，不利于运输贮藏。在坚熟期，NT31的硬度最大，为2 800 g；SS001、QD2101的硬度最低，在1 400 g左右，此时期果实硬度适中，适合作为商品采摘上市。

由图3B可知，在青熟期至完熟期，5种番茄可溶性固形物含量呈现先上升，后下降的趋势，并在坚熟期达到最大值。在青熟期阶段，5种番茄果实的可溶性固形物含量的差异不大，集中在2.8%～3.7%，在坚熟期和完熟期，品种之间可溶性固形物的差异较大，极差达1.7，在坚熟期，NT30含量最高，达6.6%，QH001含量最低，为4.9%。

由图3C可知，番茄果实维生素C含量的变化趋势表现一致，均为先上升后降低，并在坚熟期达到顶峰。在坚熟期，NT30番茄维生素C含量最高，达19.99 mg/100 g，NT31次之，为19.59 mg/100 g；在完熟期维生素C含量较为接近，都在14 mg/100 g左右NT30与NT31具有较高的Vc含量，且二者存在亲缘关系，这可能与其内在的基因表达有关。

由图3D可知，NT31、NT30、SS001的可溶性蛋白含量变化趋势较为一致，均为逐渐降低，QH001与QD2101在青熟期至转色期变化不明显，在青熟期至完熟期逐渐下降，造成这种差异可能是由于不同种类的番茄对环境的适应能力有所不同，引起不同的生理代谢强度导致的。在坚熟期NT31可溶性蛋白含量最高，为16.22 mg/g，QH001次之，NT30含量最低，为10.85 mg/g。

由图3E可知，在整个成熟期番茄红素含量呈现逐渐上升的趋势，但不同品种的番茄在不同阶段番茄红素含量存在差异。青熟期果实呈现白绿色，几乎不含番茄红素。转色期番茄开始合成少量番茄红素，完熟期达到峰值，与此对应，果实的颜色也从粉红变为深红，在坚熟期，QH001的番茄红素含量最高(22.81 μg/g)，NT30与SS001的含量最低(5.0 μg/g左右)。完熟期QH001的番茄红素达到了最高值60.65 μg/g，而其余4种番茄的番茄红素含量较为接近，均在16.32 μg/g左右。

由图3F可知，在番茄成熟过程中，总酚含量总体呈现先上升后下降的趋势，而QD2101总酚含量变化不明显，在青熟期含量较高，NT30在转色期其总酚含量达到最高，其余品种则在坚熟期总酚含量达到最高，此差异可能与在生长过程中调控多酚类物质合成的关键酶的活性变化有关。

2.3　番茄果实成熟过程中可溶性糖、酸的变化

由图4A可知，果实可滴定酸的变化趋势整体呈现下降趋势，在青熟期含量最高，其中NT31、QH001、SS001可滴定酸含量较为接近，在0.2%左右；NT30含量最高，为0.38%；QD2101其次，为

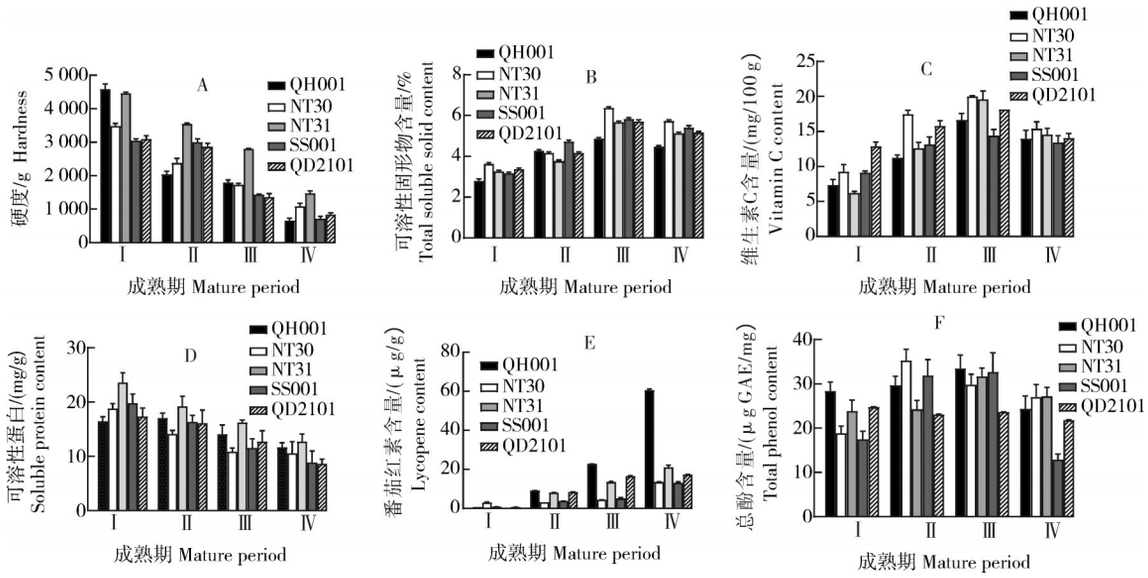


图3 番茄果实成熟过程中硬度(A)及可溶性固形物(B)、维生素C(C)、可溶性蛋白(D)、番茄红素(E)和总酚含量(F)的动态变化

Fig.3 Dynamics of hardness (A) and soluble solids (B), vitamin C (C), soluble protein content (D), lycopene (E) and total phenolic content (F) in tomato fruits during ripening

3.2%;而在完熟期,5种番茄可滴定酸含量都在0.12%左右,差异不大。

由图4B可知,在青熟期至坚熟期,5种番茄的可溶性糖含量都上升了0.4%左右,到达坚熟期后,SS001的可溶性糖含量呈现下降趋势,而QD2101的继续上升,NT31、NT30、QH001的则几乎保持不变。由此可见,在坚熟期,番茄甜度已达到较高水平,商品价值较高。

由图4C可知,在番茄成熟过程中,糖酸比呈现逐渐增大的趋势。在坚熟期,NT30、SS001、QD2101的糖酸比较为接近,在7.0左右;QH001糖酸比最低,为5.39;NT31糖酸比含量最高,为7.78。就口感甜度而言,NT31番茄相比于其他品种具有较高的甜度。

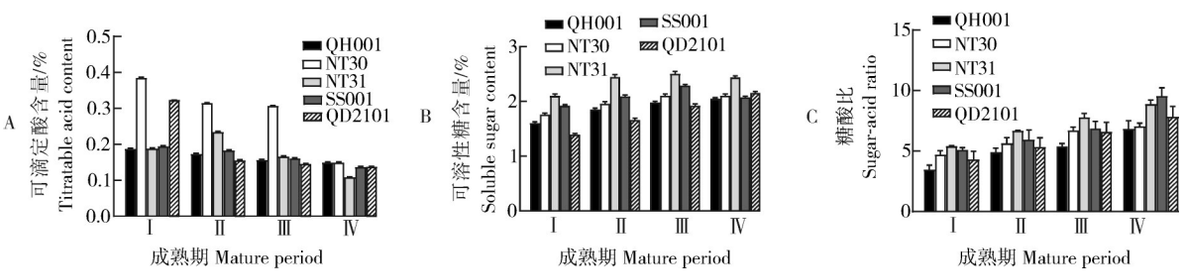


图4 番茄果实成熟过程中可滴定酸(A)、可溶性糖含量(B)及糖酸比(C)的动态变化

Fig.4 Dynamics of titratable acid(A), soluble sugar content(B) and sugar-acid ratio(C) during tomato fruit ripening

2.4 番茄果实成熟过程中单糖及有机酸的变化

由图5A、B可知,在成熟过程中,葡萄糖与果糖总体变化趋势大致相同,在青熟期至坚熟期含量呈现上升趋势,在坚熟期至完熟期则含量下降。在坚熟期,NT30番茄的葡萄糖含量最高,为16.2 mg/g,NT31、QD2101次之,在14.0 mg/g左右,QH001与SS001含量最低,为12.0 mg/g左右;坚熟期NT30与NT31果糖含量最高,为17.3 mg/g,QD2101、SS001果糖含量次之,为15.0 mg/g左右,QH001果糖含量最低,为14.0 mg/g。

不同品种的鲜食番茄果实内有机酸含量的变化如图5C~5E所示,不同品种的果实内有机酸含量的变化存在明显差异。柠檬酸酸味柔和爽口,入口即达到较高酸感,后味延续时间较短,苹果酸则带有令人愉快的酸味,赋予特殊的果香味,而草酸则略带苦涩。

QD2101、NT30果实在生长过程中草酸的变化趋势较为相似,呈现先降低后升高的趋势,在转色期含量最低,分别为0.60、0.47 mg/g,在完熟期含量达到最高,分别为0.74、0.79 mg/g。QH001、SS001果实在生长过程中草酸含量的变化趋势与此相反,在

生长过程中呈现先增加后降低的趋势，在转色期草酸含量最高，分别达到0.78、0.67 mg/g，NT31则呈现逐渐增加的趋势。在果实的生长过程中，柠檬酸呈现出2种变化趋势，QH001、QD2101、SS001在坚熟期至转色期呈现先上升后下降的趋势，在转色期含量达到最高，分别为2.22、1.85、2.18 mg/g。NT30、NT31在生长周期中，柠檬酸含量呈现持续降低的趋势。在番茄果实的整个生长期，苹果酸含量呈逐渐下降的趋势，在青熟期，苹果酸含量在0.7～0.8 mg/g，而在完熟期，含量下降为0.3～0.4 mg/g。

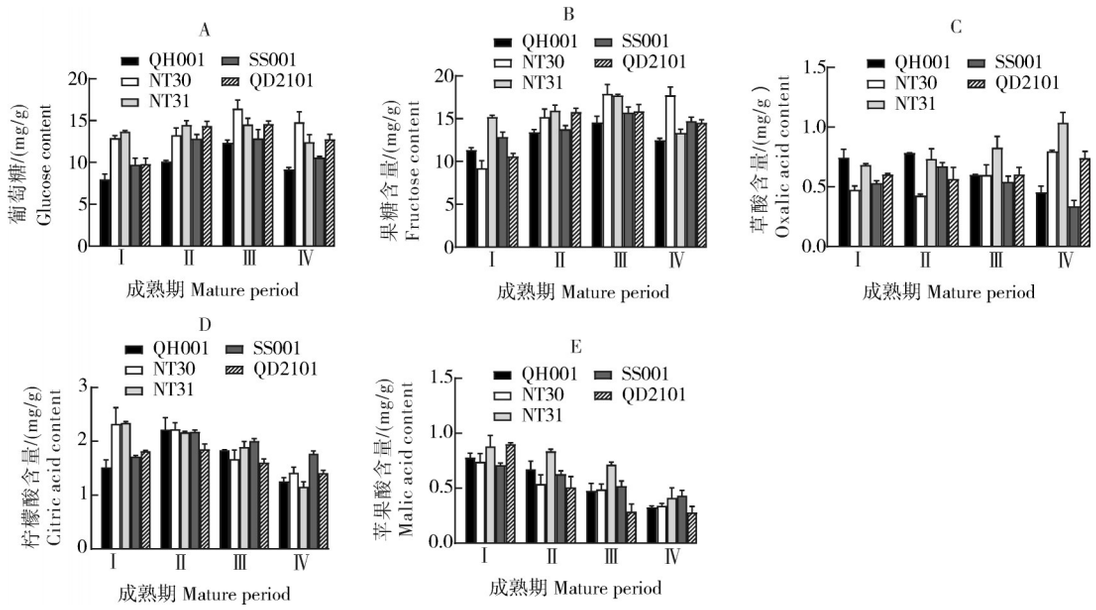


图5　番茄果实成熟过程中葡萄糖(A)、果糖(B)、草酸(C)、柠檬酸(D)、苹果酸(E)含量的动态变化

Fig.5　Dynamics of glucose(A), fructose(B), oxalic acid (C), citric acid (D) and malic acid(E) content in tomato fruits during ripening

2.5　番茄果实成熟过程中矿质元素的变化

由表1可知，不同生长期相同品种的番茄，对不同矿物质元素富集能力有所不同。QD2101在生长过程中，Fe、Se、Na、K等11种矿物质含量存在显著变化($P<0.05$)，而Ca、Zn含量无显著变化。NT30在生长过程中，Fe、Se、Na、K等10种矿物质含量存在显著变化($P<0.05$)，而Ca、Zn、Pb含量无显著变化；NT31果实Fe、Se、Zn、K等13种元素含量都存在显著变化($P<0.05$)；QH001果实生长过程中，K、Mg、Ni、Cu、Zn等10种元素含量上存在显著变化($P<0.05$)，而Na、Pb、Se含量无显著变化；SS001在生长过程中，仅Mn含量无显著变化，其余12种矿物质元素都存在显著变化($P<0.05$)。在坚熟期，NT31与QH001番茄的K含量最高(2.50 mg/g)，QD2101和SS001的K含量最低(1.69 mg/g)，NT31番茄Fe含量最高(4.85 mg/g)，QD2101番茄Fe含量最低(3.27 mg/g)，SS001番茄Zn含量最高(1.60 μg/g)，QD2101番茄Zn含量最低(0.91 μg/g)；NT30番茄Se含量最高(4.07 ng/g)，QD2101番茄Se含量最低(1.57 ng/g)。其中，在番茄整个生长过程中的K、Na含量差异较大，这可能与施用的肥料中的K元素较高占比以及根系的选择性吸收有关。

2.6　5种番茄果实坚熟期品质综合评价

由表2可知，坚熟期番茄果实b^*的平均值为39.88，品种间变异系数最大(15.37%)，b^*最高的为NT31，最低的为QH001；L^*的平均值为49.89，变异系数为13.73%，其中L^*最高的为NT31，最低的为NT30；可溶性糖含量的平均值为2.16%，变异系数为10.01%，含量最高的为NT31，最低的为QD2101；可溶性固形物的平均值为5.62%，变异系数为9.4%，含量最高的为NT30，最低的为QH001。对比发现NT31番茄的糖酸比在7.5左右，不仅有较高的可溶性糖、可溶性蛋白、果糖、苹果酸、维生素C含量，还有较丰富的K、Na、Fe、Zn元素。

对5种番茄果实坚熟期的品质进行评价分析，QH001、NT30、NT31、SS001、QD2101的平均隶属函数值分别为0.44、0.42、0.66、0.43、0.40，最大值和最小值的差值为0.26，综合品质指标排名依次为2、4、1、3、5，即QD2101的综合品质最低，NT31综合品质最高，Cd含量为11.26 ng/g，Pb含量为9.05 ng/g，其均符合我国茄果类蔬菜绿色食品农业行业标准NY/T 655－2020。

表1 番茄果实成熟过程中矿质元素含量的变化

Table 1 Changes in the mineral element content of tomato fruits during ripening

品种 Item	K/(mg/g)	Na/(μg/g)	Mg/(μg/g)	Ca/(μg/g)	Cr/(μg/g)	Mn/(μg/g)	Fe/(μg/g)	Cu/(μg/g)	Zn/(μg/g)	Cd/(ng/g)	Pb/(ng/g)	As/(ng/g)	Se/(ng/g)
QD2101-Ⅰ	1.72±0.02c	7.93±0.33a	56.33±2.24c	93.37±25.45a	0.05±0.01a	0.33±0.04c	4.61±0.25a	0.29±0.06c	0.85±0.34a	4.72±0.25c	9.85±0.63a	0.49±0.03a	0.84±0.06c
QD2101-Ⅱ	1.85±0.02b	7.42±0.09a	74.27±1.73b	114.94±11.21a	0.04±0.00b	0.49±0.02ab	3.26±0.57b	0.85±0.02a	0.84±0.05a	8.89±0.60b	4.22±0.23c	0.16±0.02bc	1.21±0.02b
QD2101-Ⅲ	1.69±0.01c	5.97±0.66b	72.52±1.39b	97.53±10.62a	0.01±0.00c	0.45±0.01b	3.27±0.28b	0.49±0.01b	0.91±0.07a	12.79±0.58a	7.53±0.27b	0.15±0.04c	1.57±0.09a
QD2101-Ⅳ	2.27±0.04a	7.14±0.79ab	92.65±6.53a	118.54±12.55a	0.01±0.00c	0.58±0.11a	2.75±0.21b	0.42±0.02b	1.01±0.08a	9.26±0.76b	2.44±0.34d	0.23±0.03b	0.73±0.05c
NT30-Ⅰ	2.15±0.01a	11.85±1.20ab	95.46±0.84a	100.16±8.23b	0.02±0.00bc	0.65±0.02a	4.22±0.95a	0.46±0.01c	1.05±0.20ab	13.03±0.65ab	5.81±3.69a	0.53±0.20a	2.94±0.53bc
NT30-Ⅱ	1.55±0.02b	6.47±0.43c	71.99±0.58b	109.85±9.17b	0.03±0.00ab	0.61±0.01a	2.50±0.49b	0.63±0.02b	0.62±0.03b	14.41±0.31a	3.14±3.19a	0.35±0.20a	2.48±0.12c
NT30-Ⅲ	2.24±0.06a	9.79±0.57bc	102.66±2.12a	133.47±9.32a	0.01±0.01c	0.61±0.04a	3.34±0.53a	0.59±0.03bc	1.13±0.23a	13.43±0.73ab	12.46±12.09a	0.37±0.03a	4.07±0.42a
NT30-Ⅳ	2.21±0.23a	13.28±2.21a	100.79±11.05a	147.74±34.58a	0.03±0.00a	0.57±0.07a	2.94±1.22a	1.24±0.13a	1.49±0.38a	11.37±1.38b	15.33±10.23a	0.47±0.06a	3.25±0.19b
NT31-Ⅰ	2.43±0.08a	8.29±0.63b	109.65±10.73a	90.85±12.23bc	0.03±0.01b	0.67±0.06ab	6.63±0.88a	0.98±0.12b	1.83±0.33a	18.93±2.60a	8.10±0.49b	0.84±0.06a	1.17±0.13b
NT31-Ⅱ	2.05±0.04b	10.36±3.38ab	83.10±2.51b	88.14±4.38c	0.08±0.03ab	0.53±0.03c	3.58±0.29c	0.69±0.02c	1.08±0.13b	11.09±0.40bc	6.45±0.23c	0.24±0.02d	1.06±0.05b
NT31-Ⅲ	2.50±0.14a	12.28±0.12a	110.65±5.99a	107.24±13.39ab	0.15±0.1a	0.74±0.04a	4.85±0.23b	0.54±0.01d	1.22±0.01b	11.26±0.55b	9.05±0.23a	0.40±0.03c	1.85±0.09a
NT31-Ⅳ	2.38±0.03a	9.33±1.19ab	91.67±2.06b	113.78±5.41a	0.09±0.03ab	0.59±0.02bc	6.27±0.88a	1.55±0.08a	1.15±0.04b	8.60±0.29c	5.96±0.63c	0.66±0.02b	1.12±0.10b
QH001-Ⅰ	2.12±0.12b	10.63±0.95a	76.36±6.75c	51.90±6.33d	0.11±0.01a	0.55±0.04c	10.71±6.55a	0.47±0.02b	0.76±0.09b	11.36±1.74b	8.81±8.72a	0.99±0.58a	5.25±2.98a
QH001-Ⅱ	2.08±0.09b	10.76±2.18a	93.96±4.18b	97.71±7.76c	0.06±0.02b	0.66±0.05b	3.74±1.19b	0.46±0.03b	0.82±0.12b	17.80±1.20a	6.98±6.08a	0.18±0.36ab	3.01±2.04a
QH001-Ⅲ	2.50±0.04a	12.53±0.96a	106.47±2.62a	133.66±3.91b	0.05±0.03bc	0.84±0.03a	4.23±0.68b	0.58±0.02a	1.16±0.02a	20.10±1.35a	11.80±4.09a	0.32±0.25ab	2.62±3.36a
QH001-Ⅳ	2.48±0.03a	11.23±2.50a	106.32±1.28a	182.82±5.37a	0.02±0.01c	0.73±0.02b	2.96±0.47b	0.57±0.01a	1.22±0.05a	18.54±0.84a	5.60±5.08a	0.13±0.42b	2.82±0.94a
SS001-Ⅰ	2.05±0.15a	8.55±1.46bc	86.38±9.91ab	86.60±21.91ab	0.05±0.01ab	0.63±0.09a	3.88±0.83ab	3.88±0.44a	1.12±0.26ab	13.96±2.48b	6.43±0.28a	0.22±0.04b	0.87±0.10c
SS001-Ⅱ	2.18±0.04a	10.30±0.28a	96.76±2.94a	74.26±6.34b	0.05±0.01ab	0.64±0.03a	3.16±0.14ab	3.37±0.12b	0.94±0.03b	18.17±1.63a	2.21±0.16d	0.24±0.02b	3.46±0.05a
SS001-Ⅲ	1.69±0.02b	9.41±0.34ab	78.56±1.28b	98.44±22.55ab	0.07±0.01a	0.67±0.09a	4.32±0.76a	12.32±0.04a	1.60±0.25a	13.43±1.07b	4.50±0.17c	0.56±0.07a	2.88±0.09b
SS001-Ⅳ	1.60±0.05b	7.79±0.61c	77.30±2.41b	127.10±12.09a	0.04±0.01b	0.64±0.03a	2.84±0.34b	0.69±0.03d	0.77±0.15b	15.77±0.24ab	5.56±0.29b	0.22±0.04b	2.74±0.18b

注：同一品种、同一行中标注的不同字母表示该矿物质在同一生长期之间差异显著（$P<0.05$）。下同。Note: For the same variety, the different letters in the same line indicate that the mineral has significant difference（$P<0.05$）.The same as follows.

表2　5种番茄果实坚熟期品质指标的对比

Table 2　Comparison of quality indicators of five types of tomato fruits at firm ripening stage

项目 Item	QH001	NT30	NT31	SS001	QD2101	平均值 Average	标准差 Standard deviation	CV/%
L^*	48.14±4.33bc	45.92±2.00c	55.28±1.76a	52.50±1.68ab	47.59±3.83bc	49.89	3.59	13.73
a^*	26.60±3.55ab	31.47±2.95a	19.34±3.25b	25.48±3.72ab	28.26±7.09a	26.23	3.99	6.57
b^*	35.55±2.35c	39.04±0.82b	43.20±1.18a	41.66±2.31ab	39.97±2.00b	39.88	2.59	15.37
硬度/g Hardness	1 798.58±74.37b	1 735.35±39.35b	2 800.55±7.56a	1 439.12±13.85c	1 362.62±102.46c	1 827.20	514.40	3.55
可溶性固形物/% Soluble solids	4.90±0.05e	6.60±0.05a	5.70±0.05c	5.80±0.05b	5.10±0.05d	5.62	0.60	9.40
维生素C/(mg/100 g)Vc	16.64±0.94c	19.99±0.12a	19.59±1.18ab	14.40±0.88d	18.14±0.61bc	17.75	2.05	8.66
可溶性糖/% Soluble sugar	1.98±0.02d	2.10±0.03c	2.51±0.04a	2.29±0.02b	1.92±0.03e	2.16	0.22	10.01
可滴定酸/% Titratable acid	0.31±0.00a	0.16±0.00c	0.17±0.00b	0.16±0.00c	0.15±0.00d	0.19	0.06	3.15
糖酸比 Glycolic acid ratio	5.39±0.23c	6.72±0.27b	7.78±0.34a	6.87±0.59b	6.60±0.77b	6.67	0.76	8.73
可溶性蛋白/(mg/g) Soluble protein	14.04±1.73ab	10.85±0.69c	16.22±0.46a	11.55±1.67bc	12.74±1.97bc	13.08	1.91	6.85
番茄红素/(μg/g) Lycopene	22.81±0.02a	4.50±0.03e	13.58±0.26c	5.08±0.51d	16.56±0.29b	12.51	6.97	1.79
总酚/(μg GAE/mg) Total phenols	33.52±2.98a	29.84±2.33a	31.71±1.89a	32.73±4.28a	23.64±1.56b	30.29	3.54	8.54

3　讨　论

鲜食番茄的营养价值与成熟过程的环境调控、病虫害防治、水肥管理及采收时期密切相关。高效合理的水肥管理和环境调控是番茄产量以及营养品质的基本保障；适宜的采收时期不仅对果实品质有重大影响，还可以解决异地运输难题，延长货架期，提高经济效益[16]。因此，依据番茄果实在不同生长期品质指标的动态变化规律可以为生产实践中的水肥管理和环境调控以及采收时期的选择提供理论依据。

硬度是衡量果实品质的重要感官指标，同时也是影响采收时间的关键指标，果实过硬则影响口感，果实过软则易在运输中产生机械损伤。本试验中，通过监测生长期果实硬度与可溶性蛋白的动态变化可知，二者都呈下降的趋势，前者可能与原果胶的降解和纤维素的水解有关。在果实坚熟期，其硬度适中，既能保证有较好的咀嚼性，又能减少采收时的机械损伤。可溶性蛋白则是构成果蔬中酶的重要组成部分，参与果蔬代谢过程的调控，与果蔬的生长发育、成熟衰老、抗逆性、抗病性密切相关[17]，在番茄果实成熟过程中，品种NT31始终具有较高的可溶性蛋白含量，相比于其他4个品种，该品种具有较强的抗逆性以及抗病性。结合多指标的变化规律发现，可溶性固形物、维生素C、可溶性糖、葡萄糖、果糖含量都呈现先增加后降低的变化规律，在坚熟期达到最大值，这可能与番茄属于呼吸跃变型果实有关。维生素C参与呼吸作用，在坚熟期前，维生素C合成速率大于呼吸速率，而在坚熟期后，呼吸速率突然增加，维生素C消耗速率大于合成速率，从而导致番茄果实维生素C含量呈先上升后降低的趋势，并在坚熟期时含量达到最高[8]，为了减少维生素C的消耗，可以结合低水中肥管理，并且适当补充光照时间，降低大棚内的环境温度来降低呼吸作用，从而提高维生素C的积累量[18-19]。果实中果糖、葡萄糖的变化不仅与呼吸作用有关，还与蔗糖酶的活性变化有关，在坚熟期蔗糖酶活性达到最大，使蔗糖的水解作用加强[20]。

果蔬中含有多种有机酸，其种类与含量对口味、贮藏性等都有重要影响。可溶性糖是甜味的主要来源，也是果实呼吸的底物，其含量高低与品质、成熟度、口感等密切相关，多数番茄果实中的糖主要是葡萄糖和果糖，果糖的甜度约是葡萄糖的2倍，提高果实的含糖量从而改善风味是提高番茄品质的重要环节。而糖酸比则是果蔬口感的重要评价指标，直接关系到番茄商品价值的高低。相关研究表明，番茄最佳风味的形成需要较高的糖度和相对较高的酸度，低糖导致果实毫无风味，低糖高酸会使果实偏酸，而高糖和低酸则会令果实风味偏淡[21]，通过对营养指标的分析发现，NT31番茄的糖酸比在7.5左右，具有较好的鲜食口感，不仅有较高含量的可溶性糖、

可溶性蛋白、果糖、苹果酸、维生素C，还有较为丰富的K、Ca、Fe、Zn、Se元素，表明NT31具备更高的营养价值和商品价值。其中，在番茄整个生长过程中的K、Na含量差异较大，这可能与施用的肥料中的K元素较高占比以及根系的选择性吸收有关。

综上结果表明，坚熟期的番茄果实具有较好的色泽、硬度、口感和较高的营养价值，是鲜食番茄的最佳采收期；对5个不同品种的坚熟期番茄果实进行品质综合分析，确定NT31为品质最优的鲜食番茄。

参考文献 References

[1] 张忠义，张进文，季希武，等.口感型番茄优质栽培关键技术[J].中国蔬菜，2018(7)：95-97.ZHANG Z Y，ZHANG J W，JI X W，et al.Key technology of high-quality cultivation of taste-type tomato[J].China vegetables，2018(7)：95-97(in Chinese).

[2] FERREIRA A L A，CORRÊA C R.Lycopene bioavailability and its effects on health[J].Food quality，safety and technology，2013(5)：63-76.

[3] 田永强，高丽红.设施番茄高品质栽培理论与技术[J].中国蔬菜，2021(2)：30-40.TIAN Y Q，GAO L H.Theory and technology for facility cultivation of high-quality tomato[J].China vegetables，2021(2)：30-40(in Chinese with English abstract).

[4] 史建磊，宰文珊，陈依凯，等.基于表型的樱桃番茄种质遗传多样性分析[J].热带作物学报，2019，40(6)：1095-1101.SHI J L，ZAI W S，CHEN Y K，et al.Genetic diversity analysis of cherry tomato germplasms based on phenotypic traits[J].Chinese journal of tropical crops，2019，40(6)：1095-1101(in Chinese with English abstract).

[5] 高国震，董治浩，胡承孝，等.土壤酸化对樱桃番茄养分积累和分配的影响[J].华中农业大学学报，2021，40(1)：179-186.GAO G Z，DONG Z H，HU C X，et al.Effects of soil acidification on accumulation and distribution of nutrients in cherry tomato[J].Journal of Huazhong Agricultural University，2021，40(1)：179-186(in Chinese with English abstract).

[6] 庞师婵，王帅帅，张文静，等.氮肥/花生饼肥配施对番茄根际土壤及根系内生细菌群落结构的影响[J].华中农业大学学报，2021，40(3)：141-151.PANG S C，WANG S S，ZHANG W J，et al.Effects of nitrogen/peanut residue compost on rhizosphere soil and endophytic bacterial community structure in root system of tomato[J].Journal of Huazhong Agricultural University，2021，40(3)：141-151(in Chinese with English abstract).

[7] 王同林，叶红霞，郑积荣，等.番茄果实中主要风味物质研究进展[J].浙江农业学报，2020，32(8)：1513-1522.WANG T L，YE H X，ZHENG J R，et al.Research progress of main flavor compounds in tomato fruits[J].Acta agriculturae Zhejiangensis，2020，32(8)：1513-1522(in Chinese with English abstract).

[8] 薛坤，陈海荣，陈火英，等.樱桃番茄成熟期品质指标动态变化的研究[J].上海农业学报，2021，37(3)：52-57.XUE K，CHEN H R，CHEN H Y，et al.Dynamic changes of quality indexes of cherry tomatoes during maturity[J].Acta agriculturae Shanghai，2021，37(3)：52-57(in Chinese with English abstract).

[9] 齐红岩，李天来，张洁，等.番茄果实发育过程中糖的变化与相关酶活性的关系[J].园艺学报，2006，33(2)：294-299.QI H Y，LI T L，ZHANG J，et al.Relationship between carbohydrate change and related enzymes activities during tomato fruit development[J].Acta horticulturae sinica，2006，33(2)：294-299(in Chinese with English abstract).

[10] 陈强，刘世琦，张自坤，等.不同LED光源对番茄果实转色期品质的影响[J].农业工程学报，2009，25(5)：156-161.CHEN Q，LIU S Q，ZHANG Z K，et al.Effect of different light emitting diode sources on tomato fruit quality during color-changed period[J].Transactions of the CSAE，2009，25(5)：156-161(in Chinese with English abstract).

[11] 王学奎，黄见良.植物生理生化实验原理与技术[M].北京：高等教育出版社，2015.WANG X K，HUANG J L.Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M].Beijing：Higher Education Press，2015(in Chinese).

[12] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京：高等教育出版社，2000：182-185.LI H S.Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M].Beijing：Higher Education Press，2000：182-185(in Chinese).

[13] 孔得慧，赵文婷，马越，等.LED光照处理对鲜切番茄冷藏期间品质和抗氧化能力的影响[J].食品科技，2021，46(5)：45-52.KONG D H，ZHAO W T，MA Y，et al.Effects of light-emitting diode (LED) illumination on the quality and antioxidant capacity of fresh-cut tomatoes during refrigerated storage[J].Food science and technology，2021，46(5)：45-52(in Chinese with English abstract).

[14] 程远，万红建，刘超超，等.十六个樱桃番茄品种果实风味品质相关指标比较分析[J].浙江农业学报，2018，30(11)：1859-1869.CHENG Y，WAN H J，LIU C C，et al.Comparative analysis of flavor/nutrient determination parameters in 16 different cherry tomato varieties[J].Acta agriculturae Zhejiangensis，2018，30(11)：1859-1869(in Chinese with English abstract).

[15] 杨海峰，陈微，惠林冲，等.不同品种洋葱营养品质分析与评价[J].中国农学通报，2020，36(10)：145-149.YANG H F，CHEN W，HUI L C，et al.Nutritional quality of *Allium cepa* varieties：analysis and assessment[J].Chinese agricultural science bulletin，2020，36(10)：145-149(in Chinese with English abstract).

[16] 陈劲憬，高丽红.番茄采收时期对其营养品质及贮藏品质的影响[C]//中国园艺学会.第七届青年学术讨论会论文集.泰安：中国园艺学会，2006：462-467.CHEN J J，GAO L H.Effect of tomato harvest period on its nutritional quality and storage quality[C]//Chinese Horticultural Society.Proceedings of the 7th Youth Academic Symposium.Tai'an：Chinese Horticultural Society，2006：462- 467(in Chinese).

[17] 邓丽莉，潘晓倩，生吉萍，等.考马斯亮蓝法测定苹果组织微量可溶性蛋白含量的条件优化[J].食品科学，2012，33(24)：185-189.DENG L L，PAN X Q，SHENG J P，et al.Optimization of experimental conditions for the determination of water soluble protein in apple pulp using Coomassie brilliant blue method[J].Food science，2012，33(24)：185-189(in Chinese with English abstract).

[18] 刘丹.不同水肥供应量对设施番茄生长、产量及品质的影响[D].杨凌：西北农林科技大学，2018.LIU D.Effects of different water and fertilizer supply on plant growth，yield and quality of tomato[D].Yangling：Northwest A & F University，2018(in Chinese with English abstract).

[19] 唐晓伟，刘明池，郝静，等. 调亏灌溉对番茄品质与风味组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(4)：970-977. TANG X W，LIU M C，HAO J，et al. Influences of regulated deficit irrigation on sensory quality and flavor components of tomato [J]. Plant nutrition and fertilizer science，2010，16(4)：970-977 (in Chinese with English abstract).

[20] SHAHIDUL ISLAM M，MATSUI T，YOSHIDA Y. Carbohydrate content and the activities of sucrose synthase，sucrose phosphate synthase and acid invertase in different tomato cultivars during fruit development [J]. Scientia horticulturae，1996，65(2/3)：125-136.

[21] GIERSON D，KADER A A. Fruit ripening and quality [M]// AIHERTON J G，RVODICH J. The tomato crop. Dordrecht：Springer，1986.

Dynamic changes of fruit nutrient components during ripening of fresh tomatoes

YANG Xinbiao[1]，LI Xingxu[2]，LIU Rui[1]，ZHOU Guolin[2]

1. *Key Laboratory of Environment Correlative Dietology*，*Ministry of Education/College of Food Science and Technology*，*Huazhong Agricultural University*，*Wuhan* 430070，*China*；
2. *Wuhan Academy of Agricultural Sciences*，*Wuhan* 430072，*China*

Abstract　Five different varieties of fresh tomatoes planted in the demonstration base of the Institute of Vegetable Research，Wuhan Academy of Agricultural Sciences were used to analyze the dynamic changes of fruit color，hardness，and quality indexes including vitamin C，soluble sugar，titratable acid，lycopene，and minerals during the ripening to explore the dynamic quality changes of fresh tomato during the growing period and to guide cultivation and establish suitable harvest period. The results showed that the hardness decreased from 3 000-4 000 g to 1 000-2 000 g，the peel red color gradually deepened，the lycopene increased to about 0.016 mg/g during the ripening of fruit. The content of soluble solids，vitamin C，glucose and fructose all showed a change pattern of first increase and then decrease，and reached the maximum value at the stage of hard-ripening. The sugar-acid ratio and soluble sugar generally showed a gradual upward trend. The content of soluble protein，titratable acid and malic acid showed a gradually decreasing trend. There were significant differences in the content of certain minerals in the same variety of tomato in different growth periods as well. It is indicated that the hard-ripening stage is the most suitable harvest period for fresh tomatoes. The sugar-acid ratio，the content of fructose and soluble protein of NT31 tomato areabout 7.5，15.0 mg/g，17.0 mg/g，respectively，which has higher nutritional and commercial values.

Keywords　fresh food；tomato；harvest period；maturity period；fruit quality；quality evaluation

（责任编辑：赵琳琳）