

番茄红素的研究现状及应用前景

陈文静,张欢,董旭,宋建军* (河北科技大学生物科学与工程学院,河北石家庄 050018)

摘要 对番茄红素的分子结构、理化性质、生理功能、生物合成途径及提取方法等进行了介绍,简述了番茄红素在国内外的生产研究现状,并对番茄红素的应用前景进行了展望。
关键词 番茄红素;理化性质;生理功能
中图分类号 S188;TS202.1 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)27-029-04

Research Status and Application Prospect of Lycopene
CHEN Wen-jing, ZHANG Huan, DONG Xu, SONG Jian-jun* (College of Bioscience and Bioengineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018)
Abstract The molecular structure of the lycopene, physical and chemical properties, physiological function, the biosynthetic pathway and extraction method is presented. This article briefly describes the production of lycopene in the domestic and foreign research situation, and looks forward to the application prospect of lycopene.
Key words Lycopene; Physical and chemical features; Physiological function

番茄红素是成熟番茄果实中的主要色素,属于类胡萝卜素的一种,1903年由 Schunck^[1]发现并命名。一直以来,因为番茄红素没有β-胡萝卜素的β-苎香环结构,而不具有V_A源活性,所以很少受到人们的重视。近年来,随着人们对番茄红素生理功能了解的深入,发现其在防癌抗癌、增强机体免疫力、延缓衰老等方面有着极其重要的作用。目前番茄红素在功能性保健食品中的研究与应用已成为一个新的热点。

1 番茄红素的分子结构及理化性质

1.1 番茄红素的分子结构 番茄红素分子式为C₄₀H₅₆,是一种具有11个共轭及2个非共轭的碳-碳双键组成的非环状平面脂溶性不饱和碳氢化合物,具有淬灭单线态氧和清除自由基的作用^[2]。番茄红素的分子量为536.85 Da,分子结构见图1,与β-胡萝卜素是同分异构体,到目前为止发现番茄红素的异构体多达72种。天然存在的番茄红素90%以上都是全反式构型,只有一小部分为顺式构型,以5-顺、9-顺和13-顺为主。而在人体组织中则大部分为顺式构型。

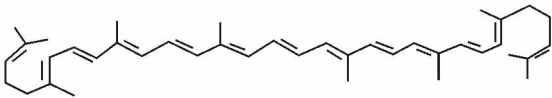


图1 番茄红素结构式

1.2 番茄红素的理化性质 番茄红素有2种存在状态,一种为红色长针状晶体,另一种以油状液体形式呈现。它是一种脂溶性色素,在不同溶剂中会呈现不同的颜色,熔点为172~175℃^[3]。番茄红素有顺式结构和反式结构的差异,导致其在化学和物理特性方面有很大不同,顺式结构颜色弱,熔点低,消光系数小,极性强,更容易溶解,在紫外-可见光区的350~365 nm短波长处容易被吸收,全反式结构在此波段无吸收,在472 nm处有一强吸收峰^[4]。番茄红素不溶于水,难溶于甲醇、乙醇,可溶于乙醚、石油醚、己烷、丙酮,易溶于

氯仿、二硫化碳、苯等有机溶剂。番茄红素是一种不饱和脂肪族烯烃,很容易在外界条件的影响下发生构型转变,如在长时间的加热或紫外线照射下可导致其异构化,使反式构型部分转化为顺式构型,日光下番茄红素纯品12 h基本损失殆尽,紫外光下3 d损失40%,且温度越高降解越快^[5]。另外,一些因素如氧气、pH、活性表面等均能影响番茄红素的稳定性,在进行有关番茄红素的试验时特别要注意番茄红素的保存。孙庆杰等^[6]进行了有关番茄红素稳定性的研究,发现番茄红素对某些金属离子较敏感,K⁺、Na⁺、Mg²⁺、Zn²⁺对番茄红素的影响不大,Fe²⁺、Cu²⁺易引起番茄红素较大的损失,Fe³⁺和Al³⁺引起的损失较少,在酸性环境有CO₂存在且温度低于50℃的条件下,番茄红素的稳定性较好。碱性条件对番茄红素的稳定性影响较大,在此条件下其吸光度显著下降。

2 番茄红素的生理功能及作用机理

2.1 生理功能 近年来国内外加大了对番茄红素生理功能研究的力度,发现番茄红素在防癌、抗癌方面具有不容忽视的作用^[7-8]。番茄红素还具有淬灭单线态氧、清除自由基、阻断亚硝胺形成、抑制细胞增殖、诱导细胞分化的功能,所以在预防心血管疾病、控制脉粥样硬化、提高免疫功能和延缓衰老等方面具有重要生理功能。番茄红素作为一种天然的营养与着色双重作用的添加剂,在食品、化妆品行业中也发挥着重要作用,已被50多个国家和地区所认可^[9]。

防癌抗癌的功能:Mills等^[10]经过6年对14 000名男性的随访研究,发现番茄摄入量越多的人发病率越低。番茄红素能够抑制宫颈癌HeLa细胞的生长,促进其凋亡,进而抑制宫颈癌的发生。张为国等^[11]研究表明,番茄红素能明显抑制端粒酶的活性,进而减弱胃癌细胞的增殖能力,把癌细胞阻滞在G0/G1期,最终诱导凋亡,进一步证明了番茄红素的抗癌性。

预防心血管疾病的功能:Agarwals等^[12]对欧洲10个国家的1 400名男子进行研究发现,急性心梗死亡的死亡率随着番茄红素水平的增高而降低。Rissanen等^[13]研究证明血浆中番茄红素的含量越高,人们患动脉粥样硬化和冠心病的

基金项目 河北省科技支撑计划项目(14226310D)。
作者简介 陈文静(1989-),女,河北邯郸人,硕士研究生,研究方向:植物种质创新与遗传育种。*通讯作者,教授,博士,从事植物遗传育种研究。
收稿日期 2015-08-05

概率越低。郑育等^[14]对番茄红素的调脂作用进行了研究,发现番茄红素可升高血液透析患者的高密度脂蛋白(HDL)水平,降低LDL水平,减小了冠心病的发生概率。

增强机体免疫力的功能:白介素2(IL-2)和白介素4(IL-4)是免疫应答因子,可以促进T、B细胞的活化与增殖,进而增强人体的免疫力。Watzl等^[15]研究发现,番茄红素有促进白介素2(IL-2)、白介素4(IL-4)分泌的功能。另外,最新研究证实,番茄红素还具有降低巨噬细胞炎症介质NO和促炎因子白介素6(IL-6)的分泌,抑制炎症反应的功能。

其他功能:番茄红素能有效地保护皮肤免受紫外光的损伤,对老年功能障碍性疾病的预防有一定的效果。另外,在抗血凝等方面也发挥着重要作用。

2.2 作用机理 细胞正常代谢所产生的活性氧类物质和自由基是诱发癌症的重要原因。低浓度的自由基可刺激细胞的生长繁殖与分化,防止细胞损伤和感染。高浓度的活性氧和自由基会使细胞发生脂质氧化,在正常细胞中如果自由基的生成与清除达不到平衡,致使自由基过多地存在于细胞中,导致蛋白质结构变异,酶变性,甚至引起DNA的突变,诱发癌症。番茄红素具有预防和抑制肿瘤的作用,是由于它具有很强的抗氧化生物活性,能淬灭单线态氧清除自由基,有效抑制氧化物对DNA和脂蛋白的破坏,减小细胞在诱变剂的作用下发生基因突变的概率。低密度脂蛋白(LDL)可直接导致冠心病和动脉粥样硬化,番茄红素能防止中低密度脂蛋白氧化,抑制LDL-胆固醇氧化物的形成,从而防止冠心病的发生^[16]。番茄红素有活化和增强免疫细胞活性的作用,分泌的细胞活化因子可以活化细胞,能促进吞噬细胞向淋巴细胞的转化,进而保护吞噬细胞免受自身氧化损伤。同时促进T、B淋巴细胞增殖,刺激效应T细胞发挥功能,减少淋巴细胞对DNA的氧化损伤,因而它能增强人体免疫力。

3 番茄红素在自然界的分布及生物合成途径

3.1 番茄红素在自然界的分布 番茄红素广泛地存在于自然界,其中在植物中分布最多,蔬菜和成熟的红色水果如番茄、西瓜、李柿、柑桔、红肉脐橙和红色葡萄柚中含量较高。番茄的外表层是番茄红素含量最高的部位^[17],果蔬中番茄红素的含量见表1。另外,在人体的一些器官如血液、肾上腺、肝脏、睾丸、前列腺、消化道等中也检测到了番茄红素,其中肾上腺和睾丸中番茄红素含量较高。此外,藻类、真菌、细菌中番茄红素也普遍存在,迄今发现红细菌和红酵母中番茄红素含量最高。

表1 果蔬中番茄红素的含量

种类	含量//mg/kg	种类	含量//mg/kg
番茄	30.0~200.0	胡萝卜	6.5~7.8
西瓜	23.0~72.0	南瓜	3.8~4.6
番石榴	52.3~55.0	红薯	0.2~1.1
番木瓜	1.1~53.0	杏	0.1~0.5
葡萄柚	3.5~3.6		

3.2 番茄红素的生物合成途径 番茄红素在植物细胞中的合成是在质体和叶绿体中进行的,它是类胡萝卜素生物合成

途径中的一个中间产物,属于类胡萝卜素的一种,环化后能形成其他类胡萝卜素。近年来,番茄红素生物合成方式已逐渐被人们认识并取得了很大的进展^[18]。异戊二烯焦磷酸(IPP)是番茄红素生物合成的前体物质,IPP可由两条途径来获得,一种是存在于细菌和植物质体中的MEP(1-脱氧木酮糖-5-磷酸合成酶)途径;另一种是存在于真菌、植物的线粒体和细胞质中的MVA(3,5-二羟-3-甲基戊酸)途径。植物细胞内色素的合成主要依赖于质体中的MEP途径。首先IPP在IPP异构酶(PIPI)的作用下异构化形成二甲基丙烯焦磷酸酯(DMAPP),DMAPP生成后在牦牛儿基焦磷酸合成酶(GPS)的作用下,再与3分子的IPP发生缩和反应依次生成牦牛儿基焦磷酸(GPP)、法尼基焦磷酸(FPP)、牦牛儿基牦牛儿基焦磷酸(GGPP),2分子的GGPP在八氢番茄红素合成酶(PSY)的催化下头对头发生二聚化作用生成八氢番茄红素,随后八氢番茄红素在八氢番茄红素脱氢酶(PDS)和 ζ -胡萝卜素脱氢酶(ZDS)的连续催化作用下逐步发生脱氢反应,形成原番茄红素(多顺式番茄红素),之后多顺式番茄红素在类胡萝卜素异构酶(CRTISO)的作用下异构化形成全反式番茄红素,全反式番茄红素最终在 ϵ -环化酶(LCY-E)和 β -环化酶(LCY-B)的作用下,形成 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素, α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素继续降解为叶黄素、玉米黄素等其他类胡萝卜素^[19]。番茄红素合成途径见图2。

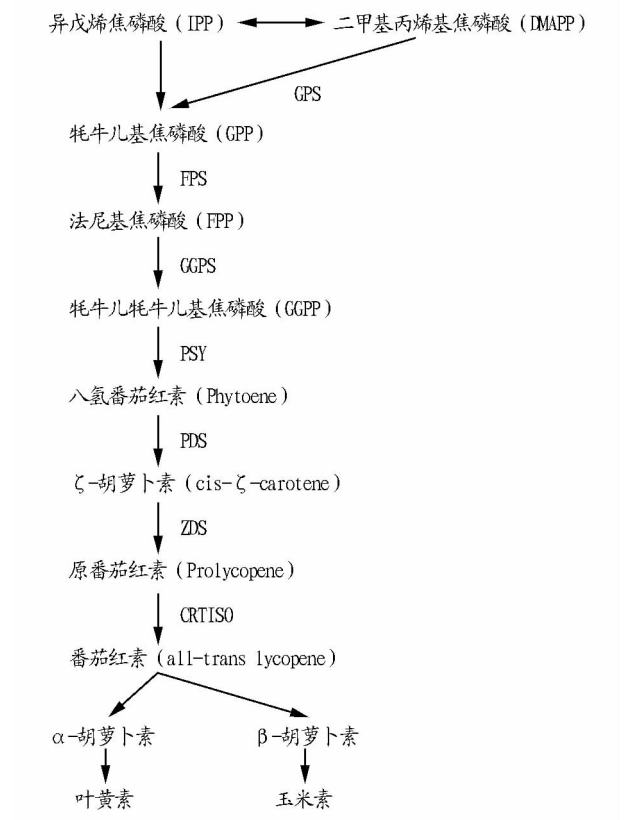


图2 番茄红素合成途径

4 番茄红素的提取方法

4.1 直接粉碎法 直接粉碎法是将番茄皮晾干后进行粉碎,作为着色粉直接添加于食品中。此种工艺方法虽然操作

简单,但得到产品的质地非常粗糙,应用范围很有限^[20]。工艺过程见图3。

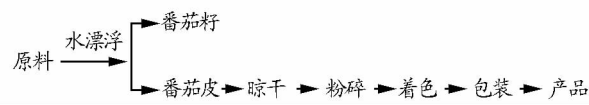


图3 直接粉碎法工艺过程

4.2 有机溶剂浸提法 根据番茄红素可溶于脂肪烃和芳香烃类化合物这一特性,可采用亲脂性有机溶剂来浸提的方法进行提取,工艺过程见图4。刘殿锋等^[21]用氯仿提取番茄渣中的番茄红素,结果表明,料液比1:4(g:ml),浸提时间5 h,浸提温度50℃,pH 5是最佳提取条件。但由于有机溶剂渗透穿过物质细胞壁和细胞膜的能力较差,不能很好地将提取物从细胞壁中溶出,所以该方法存在提取时间过长的问题。另外,该方法还存在有机溶剂残留的缺点,加之番茄中还含有其他成分,所以单采用溶剂萃取法提取的番茄红素是一种呈油状的番茄红素油树脂,含量为5%~15%,且产品纯度不高。夏萍等^[22]优化了传统的提取番茄红素的方法,进化了如下改进,在提取之前首先运用皂化法来破坏番茄的组织细胞,使番茄红素能完全地释放出来,然后再用混合溶剂作为浸提剂来提取,这种在提取之前使用弱碱 Na_2CO_3 对番茄糊进行皂化的方法,不仅缩短了提取时间,而且提取的番茄红素含量比普通方法高出4倍,又能消除 β -胡萝卜素对番茄红素测定的影响,具有很强的操作性,发展前景广阔。

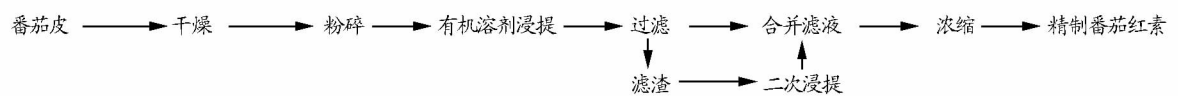


图4 有机溶剂提取法工艺过程

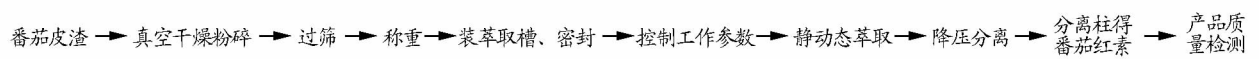


图5 超临界 CO_2 萃取法工艺过程

件影响的分析,得到最佳的酶浓度和酶提取时间:果胶酶:纤维素酶为4:1,酶添加量为0.5%,酶作用温度为40℃,pH为4,在无水乙醇浸提4 h的前处理下能显著提高番茄红素的提取率。赵功玲等^[25]将新鲜番茄捣成浆状后加入0.1%的纤维素酶作用2.5 h,35℃条件下,氯仿避光浸提3 h,70℃浓

4.3 超临界 CO_2 萃取法 超临界 CO_2 萃取法主要应用于食品工业的提取和分离。它是以临界状态(温度31.3℃,压力7.15 MPa)下 CO_2 的高渗透性和高溶解力为基础,根据不同物质极性大小的不同、沸点高低的不同、相对分子质量大小的不同,而进行的提取分离混合物的过程。此方法工艺简单、提取温度低,且使用的是超临界状态下的 CO_2 对物料进行萃取,无毒无害、天然绿色,既无溶剂残留又能避免活性物质在高温下发生氧化降解,适于番茄红素这类热敏性物质的提取。工艺过程见图5。孙庆杰等^[23]采用该方法确定了最佳提取条件为压力15~20 MPa,温度40~50℃,流量20 kg/h,时间1~2 h,该条件下90%以上的番茄红素被提取出来。王宪青等^[24]利用超临界 CO_2 萃取法提取番茄粉中的番茄红素,用100 g番茄粉为原料获取了47.986 g纯度为0.803%的番茄红素提取物,最佳提取工艺参数为:30 MPa,60℃,2 h, CO_2 流量为20 kg/h,无水乙醇作夹带剂。虽然回收率高,但超临界流体萃取技术也面临很多问题,如对设备要求高,投资成本高,难以实现工业化生产,原料要经过复杂的预处理等,这些问题都制约了超临界流体萃取技术的应用。

4.4 酶反应法 酶反应法是利用番茄皮自身所含有的酶或人为添加酶的方法,将番茄红素释放出来加以提取的方法。酶法提取番茄红素可缩短浸提时间、提高产品得率,所得色素为水分散性色素。其工艺过程见图6。李淑梅等^[24]用酶反应法改进提取条件来提取番茄红素,通过进一步对试验条

缩,明显提高番茄红素的提取速度和提取量。酶反应法虽然有无溶剂残留的优点,但提取过程中需要的辅助萃取步骤较多,且提取时间长,番茄红素含量一般小于1%,有的产品含有一些不溶性物质和可溶性物质,这些问题都在一定程度上限制了其应用。

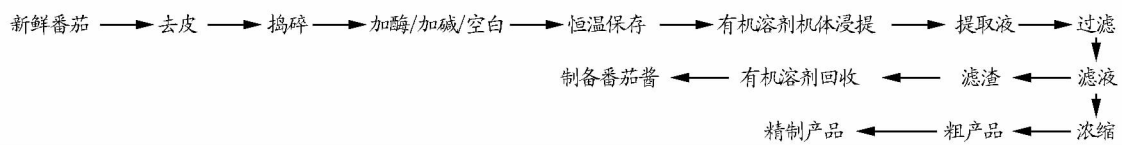


图6 酶反应法工艺过程

4.5 微波辐射萃取法 微波辐射萃取技术是将微波和传统的溶剂萃取法相结合而形成的一种新的萃取方法。邓宇等^[26]在国内首次运用微波提取法进行了番茄红素提取研究,与溶剂法比较,该方法有提取时间短、提取率高、溶剂用量少、成本低、重现性好、质地纯无环境污染等优点。综合考

察微波功率、提取时间、固液比、提取级数4个因素对提取率的影响,正交试验结果表明,最佳提取工艺:微波功率为360 W,提取时间为20 s,固液比为1:3,提取级数为3。

4.6 微生物发酵法 近年来,研究人员也在不断地探索新的生产番茄红素的方法,经过大量研究发现微生物发酵法可

以得到高产率的番茄红素,发现以下几种微生物适用于番茄红素的生:红色细菌、霉菌、基因改造过的酵母菌、藻类。Gavrilov 等^[27]在霉菌的发酵液中添加了 1% 的烟草废弃物,经过 110 h 发酵后,得到产率为 600 ~ 800 mg/ml 的番茄红素。Shimada 等^[28]将外源基因插入到产蛋白假丝酵母中,利用转基因的技术方法,发酵生产番茄红素,得到含量可达 7.8 mg/g 的细胞干重。

5 番茄红素的研究现状

5.1 国内研究现状 目前国内对番茄红素的生产和研究开始深入化、专业化。近年来有关番茄红素的性质、提取方法、保健功能、在生产应用上的研究、生产工艺上的研究、番茄红素分离与分析的研究进展等方面的文献资料逐年增多,这些都为番茄红素以后的研究提供了理论依据和基础。国内番茄红素生产研究基地主要是无锡轻工大学食品学院。早在 1998 年,无锡轻工大学的孙庆杰以新疆番茄皮和番茄籽为原料,结合超临界 CO₂ 萃取的方法,使番茄红素的提取率达到 90% 以上。2000 年新疆石河子开发区鸿博有限责任公司生产出了番茄红素胶囊、亚油酸番茄红素胶囊等功能营养保健性产品。2001 年 6 月,“天然番茄红素提取技术”获得了国家专利,番茄红素的开发被纳入“国家 863 计划”。到 2003 年,我国番茄红素产品的年生产能力还远落后于国外,市场需求量高达 20 ~ 30 t/年,而我国年生产率还不够 5 t。近年来我国开始逐渐重视番茄红素产品的开发和研究,最近国内高校科技集团生物工程中心采用玉米淀粉进行发酵得到了产率在 1 000 mg/L 以上的番茄红素,但还未实现工业化生产。目前番茄红素的一个研究热点是利用转基因技术培育高含量番茄红素的番茄品种以及开发高产番茄红素的微生物菌株。

5.2 国外研究现状 国外充分利用番茄红素的保健、防病、治病和美容功能,应用领域已延伸到医药、食品、动物饲料和化妆品行业等方面。在杂交育种方面,以色列种苗公司通过育种率先选育出比普通番茄品种番茄红素含量高 4 ~ 5 倍的杂交番茄品种 Lycopene Rich Tomato,并利用这种高番茄红素的杂交品种开发出了多种番茄红素产品,如其中一种产品的商标为 LYC-D-MATO 的番茄红素产品。在医药原料和高级化妆品方面,如用于防止紫外线灼伤、保护皮肤的典型产品防晒霜,用于美容和延缓衰老的霜类产品。在保健食品行业方面,如用于防癌、抗癌、抗氧化延缓衰老、增强免疫力的保健食品,用于降低血压、治疗高胆固醇高血脂的保健药品。另外,国外在用微生物生产番茄红素方面也比我国先进很多。目前利用微生物菌株结合基因工程的方法工业化生产番茄红素正在其他国家如火如荼地开展。

6 应用前景与展望

我国每年大量出产番茄,应充分利用番茄高产量的优势,结合现代提取分析检测技术,将番茄红素应用到农业、食品加工业、医药美容业等行业。

农业方面,作为一种天然性色素,番茄红素有资源丰富、安全无毒、品质良好、色泽自然等优点,可用于家禽饲养、水产养殖、改善肉类色泽等方面。在饲料中添加番茄红素,由

于降低了化学合成色素带来的危害,因而可大大提高肉类与蛋白质类产品的品质。日本经过大量的试验已经开发出了含番茄红素的饲料,此种饲料喂养的鸡产出的鸡肉和鸡蛋都富含番茄红素。因此,可以将番茄红素应用在农业生产上。在水产养殖中有研究表明,把番茄红素添加在鲫鱼配合饲料的油脂中,可使鲫鱼内源性抗氧化物的水平提高,从而增强抗氧化作用。

食品加工业方面,我国已批准番茄红素作为着色剂、食品添加剂应用到食品加工等方面。2006 年联合专家委员会认为可把番茄红素作为色素和营养素补充剂使用。番茄红素目前也被用于增强人体免疫力、防癌抗癌、延缓衰老等功能保健型食品中。在肉制品中,由于其强抗氧化性,可作为肉制品的保鲜剂、着色剂,提高肉类色泽。另外,番茄红素的酸性还有降低肉品的 pH,抑制腐败微生物滋生的作用。所以,可以把番茄红素添加到肉类食品中,既起到了防腐、保鲜的作用又对人体有益而无害,只是成本较高。

医药美容业方面,番茄红素作为一种功能性天然色素,因其独特的结构和化学特征及较强的抗氧化、抗增殖和抗肿瘤等多种生物活性,在预防心血管疾病、前列腺癌、胃癌和胰腺癌等方面发挥着不可替代的作用。目前该领域已成为科学家、内科医生、营养学家及新闻媒体关注的热点。番茄红素能抵挡 UV 对皮肤的伤害,同时能降低机体发生的炎症反应的机会,使正常的细胞增殖得以进行,大大减少了对 DNA 的损伤。番茄红素的抗氧化作用使其具有防止和延缓皮肤衰老、减少皱纹及雀斑美白的作用。番茄红素也可作为化妆品的着色剂,不仅能起到保色、保味、保质的作用,还可作为着色剂,应用于唇膏、口红生产中。综上所述,番茄红素产品大规模工业化生产很快将会有较大突破,在未来的经济发展中其必将具有广阔的市场前景。

参考文献

- [1] SCHUNCK C A. Different processing of lycopene and carotenoid [J]. Proc Roy Soc (London), 1903, 72: 165 - 168.
- [2] 张连富, 固态(膏状)番茄红素产品稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2003, 29(9): 6 - 8.
- [3] 凌关庭. 天然食品添加剂手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 303.
- [4] 张连富. 番茄红素开发及生理研究[D]. 无锡: 江南大学, 1999.
- [5] 王岩, 周义新. 番茄红素的研究进展[J]. 国外医学(卫生学分册), 2000, 27(4): 197 - 199.
- [6] 孙庆杰, 丁霄霖. 番茄红素稳定性的初步研究[J]. 食品与发酵工业, 1998, 24(2): 47 - 49.
- [7] 米志宽. 番茄红素对前列腺癌细胞 PC-3 增殖的影响[J]. 陕西医学杂志, 2009, 38(7): 778 - 782.
- [8] YEUM K J, AHN S H, RUPPDE PAIVA S A, et al. Correlation between carotenoid concentrations in serum and normal breast adipose tissue of women with benign breast tumor or breast cancer [J]. J Nutr, 1998, 128 (11): 1920 - 1926.
- [9] 龚平, 阙建全. 番茄红素的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(5): 143 - 147.
- [10] MILLS P K, LAWRENCE-BEESON W, ROLAND L, et al. Cohort study of diet lifestyle and prostate cancer in adventistmen [J]. Cancer, 1989, 64: 598 - 604.
- [11] 张为国, 谢国建, 刘先军, 等. 番茄红素对胃癌细胞 SGC-7901 生长的抑制作用[J]. 中国药理学通报, 2005, 21(3): 292 - 296.
- [12] AGARWAL S, RAN A V. Tomato lycopene and its role in human health and chronic diseases [J]. Association medical canadienne, 2000, 163(6): 739 - 744.

(下转第 99 页)

大,最大达 42.52%。从 0~20 到 80~100 cm 土层砂砾所占比例依次为 67.18%、66.67%、63.85%、54.25、55.42%。因此,除 80~100 cm 土层外,砂砾所占比例随着土层深度的增加逐渐减小。0~20 cm 土层砂砾所占比例和 60~80 cm 土层砂砾所占比例相差 12.93%。

2.2 不同林分土层中土壤机械组成分析 由图 5 可知,4 个林分土壤中黏粒所占比例从小到大顺序为小叶杨<山杏<沙棘<油松。油松林分土壤中黏粒所占比例比小叶杨林分土壤中黏粒所占比例高很多,达 1.23%。4 个林分土壤中粉粒所占比例从小到大顺序为小叶杨<山杏<油松<沙棘。可知,在 40~60 cm 土层中,沙棘和油松中粉粒所占比例大致相同,而小叶杨中粉粒所占比例远远小于沙棘中粉粒所占的比例。4 个林分土壤中砂砾所占比例从小到大顺序为油松<沙棘<山杏<小叶杨。小叶杨林分土壤中砂砾所占比例比油松林分土壤中砂砾所占比例高 13.54%。

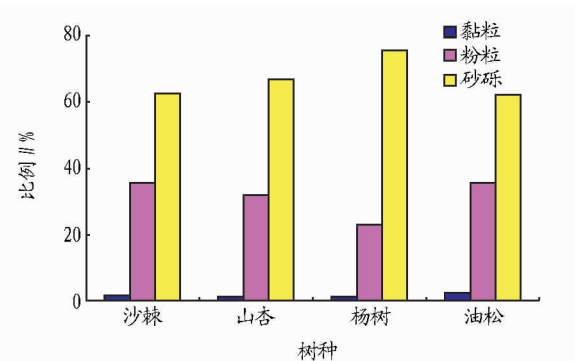


图 5 不同林分土层中各粒径土壤所占比例

3 结论

通过研究赤峰市敖汉旗 4 种主要林分土壤机械的组成,

发现对于同种林分,不同土层中黏粒、粉粒、砂砾所占比例不同,但都是黏粒所占比例最小,粉粒居中,砂砾最多,且砂砾所占比例远远大于黏粒所占比例。在 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 5 个土层中,各粒径土壤所占比例没有固定规律,不呈递增或递减规律变化。对于不同林分,0~100 cm 土层中黏粒、粉粒、砂砾所占比例不同,但都是黏粒所占比例最小,粉粒居中,砂砾最多,且砂砾所占比例远远大于黏粒所占比例。小叶杨林分土壤中黏粒和粉粒所占的比例都是 4 个林分中最低的,而砂砾所占的比例则是 4 个林分中最高的。山杏林分土壤中黏粒和粉粒所占比例在 4 个树种中只比小叶杨林分土壤多,而砂砾所占比例只比小叶杨林分土壤低。通过分析 4 种主要林分类型的土壤机械组成,可知油松林分更有利于地力的恢复。

参考文献

[1] 刘连杰,白红英,母国宏,等. 土壤质地及环境因子对农田 NO₂ 排放的影响[J]. 安徽农业科学,2008,36(14):6075-6077.

[2] 刘玉,李林立,赵柯. 岩溶山地石漠化地区不同土地利用方式下的土壤物理性状分析[J]. 水土保持学报,2004,18(5):142-145.

[3] 曾庆猛,孙宇瑞,严红宾. 土壤质地分类的近红外光谱分析方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(7):1759-1763.

[4] 左小安,赵学勇,赵哈林,等. 科尔沁沙质草地群落物种多样性、生产力与土壤特性[J]. 环境科学,2007,28(5):945-951.

[5] 李卓. 土壤机械组成及容重对水分特征参数影响模拟试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.

[6] 隋跃宇,焦晓光,程守全,等. 海门市农田黑土机械组成与土壤全量养分相关关系研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2007,23(4):456-458.

[7] ROYALL D. Particle-size and analytical considerations in the mineral-magnetic interpretation of soil loss from cultivated landscapes [J]. Catena, 2004,57(2):189-207.

[8] EGASHIRA K,ARAMAKI K,YASHIMASA M. Rare earth elements and clay minerals of soils of the floodplains of three major rivers in Bangla-desh [J]. Geoderma,2004,120(5):7-15.

[9] 郝薇,田孝华. 优质烟区土壤物理性状分析与研究[J]. 烟草科技,1996,29(5):34-35.

(上接第 32 页)

[13] RISSANEN T,VOUTILAINEN S,NYYSSONEN K,et al. Lycopene,atherosclerosis, and coronary heart disease [J]. Exp Biol Med (Maywood), 2002,227(10):900-907.

[14] 郑育,李宝青,叶茵洋,等. 番茄红素在血液透析患者中的抗氧化及调脂作用[J]. 营养学报,2009,31(1):51-54.

[15] WATZL B,BUB A,BRIVIBA K,et al. Supplementation of a low-carotenoid diet with tomato or carrot juice modulates immune functions in heall-thymen[J]. Ann Nutr Metab,2003,47(6):255-261.

[16] RISO P,PINDER A,SANTANGELO A,et al. Dose tomato consumption effectively increase the resistance of lymphocyte DNA to oxidative damage [J]. American journal of clinical nutrition,1999,69(4):712-718.

[17] 龚平,阙建全. 番茄红素的研究进展[J]. 食品与发酵工业,2008,34(5):143-148.

[18] HIRSEHBERG J. Carotenoid biosynthesis in flowering plants[J]. Current opinion in plant biology,2001,4:210-218.

[19] SANDMANN G. Genetic manipulation of carotenoid biosynthesis;Strat egies,problems and achievements[J]. Trends Plant Sci,2001,6(1):14-17.

[20] 王燕燕,邱进申,郑辉杰. 番茄红素分离与分析的研究进展[J]. 中国

食品添加剂,2002(4):16-20.

[21] 刘殿锋,吴春昊,王建军. 番茄渣中番茄红素的提取工艺研究[J]. 中国食品添加剂,2010(1):100-102.

[22] 夏萍,盛建军. 番茄红素的提取工艺研究[J]. 应用化工,2007,36(10):975-979.

[23] 孙庆杰,丁霄霖. 超临界 CO₂ 萃取番茄红素的初步研究[J]. 食品与发酵工业,2004(1):3-6.

[24] 李淑梅,杨帆,黄建华. 酶法提取番茄红素[J]. 光谱实验室,2008,25(4):599-601.

[25] 赵功玲,娄天军. 提高粗制品番茄红素提取率的工艺[J]. 食品工业, 2003,24(3):32-33.

[26] 邓宇,张卫强. 番茄红素提取方法的研究[J]. 现代化工,2002,22(2):25.

[27] GAVIRLOV A S. Industrial production of a microbiological method[J]. Applied biochemistry and microbiology,1996,32(5):492-494.

[28] SHIMADA H,KONDO K,FRASER P D,et al. Increased carotenoid production by the food yeast Candida utilis through metabolic engineering of the isoprenoid pathway[J]. Applied and environment microbiology,1998, 64(7):2676-2680.