

## 绿茶汤呈色物质研究进展

戴前颖, 夏涛\*, 高丽萍, 李钊, 吴平

(安徽农业大学茶与食品科技学院, 合肥 230036)

**摘要:** 绿茶汤色的碧绿稳定是茶饮料品质好坏的重要指标。作者综述了有关对绿茶饮料的色泽有贡献的化合物的研究现状, 主要包括黄酮醇及苷、儿茶素的氧化产物, 花青素和叶绿素; 并结合作者的研究结果, 探讨了茶汤存放过程中, 呈色物质的转化规律, 旨在为茶饮料护色方案的选择提供理论支持和新思路。

**关键词:** 茶; 色泽; 黄酮醇; 儿茶素; 叶绿素

**中图分类号:** TS275.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-352X (2011)06-0887-05

### A review on the compounds contributing to the color of green tea infusion

DAI Qian-ying, XIA Tao, GAO Li-ping, LI Zhao, WU Ping

(School of Tea & Food Science and Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** The color of green tea infusion, clear, greenish-yellow, without any trace of red or brown color, is an important appearance quality index to be considered. The article is aimed at summarizing the progress of the researches on the mechanism of compounds contributing to green tea infusion in recent years. Flavonols, catechins and oxidation products, anthocyanins and chlorophylls were proved to be the influential compounds for the color of green tea infusion, and the variation law of those compounds in green tea infusion was discussed combining our study, so as to provide a way for further study.

**Key words:** tea; color; flavonols ; catechins ; chlorophylls

优质的绿茶饮料应当汤色黄绿, 清澈明亮。然而, 绿茶饮料受光照、氧气、温度影响较大, 极易发生色泽劣变现象, 逐渐变黄、变红、甚至变褐, 造成了“绿茶饮料不绿”的问题, 严重影响了茶叶感官品质。国内外茶叶工作者围绕着绿茶饮料的护色问题开展了诸多的研究, 如: 研究温度<sup>[1]</sup>、金属离子<sup>[2]</sup>、pH 值<sup>[3]</sup>等因素对汤色的影响等, 并根据相关研究结果提出了一些护色方案, 如: 调茶汤的 pH 值<sup>[4]</sup>, 采用低温工序<sup>[5]</sup>等等。虽然这些手段的使用可以起到一定程度的护色作用, 但其效果存在明显的不稳定性。

因此, 研究绿茶汤色呈色物质的组份, 探讨其与绿茶汤色劣变的相关性, 揭示茶汤色泽的变化规律, 为茶饮料生产中选择合理的护色方案提供了理论参考, 为保证货架期内饮料品质提供必要的保证。

目前研究的重点主要集中在黄酮醇及其苷类、叶绿素、儿茶素氧化产物的转化对色泽的影响上。作者就该研究现状做一阐述。

### 1 黄酮醇及苷类

虽然黄酮醇及其苷类在茶叶中的含量很少, 只占到茶叶干重的 3%~4%, 但普遍认为黄酮醇及其苷类是绿茶汤色的主要构成之一<sup>[6]</sup>。绿茶干茶中的黄酮醇多以糖苷形态存在, 主要包括槲皮素、山柰素和杨梅素的苷类物质, 黄酮醇很少以游离态存在, 大部分与糖结合成苷类或以碳糖基的形式存在。黄酮苷元与苷类存在形式的不同, 其性质就会发生改变, 正是因为黄酮醇苷存在形式的多样性, 导致了黄酮定性定量的难度较大, 给研究带来了一定的影响。

收稿日期: 2011-04-29

基金项目: 高校省级优秀青年人才基金重点项目 (2011SQRL052), 张一元科技创新基金和国家自然科学基金(31101355)共同资助。

作者简介: 戴前颖, 女, 博士, 讲师。E-mail: daiqianying117@163.com

\* 通讯作者: 夏涛, 男, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: xiatao62@126.com

Susanne<sup>[7]</sup>曾利用聚酰胺层析柱、半制备 HPLC、LC/MS 对茶水中的黄酮类物质进行纯化鉴定,分离出山萘酚、杨梅素、芹菜素、槲皮素等 14 种黄酮类及苷类物质。Wang<sup>[8]</sup>研究了茶汤中常见的 3 种黄酮醇类化合物杨梅素、槲皮素、山萘素对绿茶汤色泽的影响,其中,槲皮素对茶汤绿度的贡献最大。

作者的课题组<sup>[9]</sup>用系统溶剂分离法,依次用有机溶剂石油醚、无水乙醚、乙酸乙酯和正丁醇萃取茶汤,发现黄酮醇类物质主要分布在正丁醇相中,与绿茶汤储存期色泽的变化密切相关;并利用正交实验方法优化黄酮醇苷的水解条件,通过计算水解率,建立了黄酮醇的 HPLC 检测方法<sup>[10]</sup>。而组通过对贮藏期间中绿茶茶汤的这 3 类主要黄酮醇(杨梅素、槲皮素、山萘素)进行检测,发现都与色泽有一定的相关性,并且杨梅素苷类与贮藏期间的绿茶茶汤色泽的劣变关系最密切。

分析原因,认为黄酮醇的颜色深浅、强弱以及颜色的改变主要与分子中 C<sub>2</sub> 位引入苯环形成交叉共轭体系、助色团(-OH、-OCH<sub>3</sub>等)的种类、以及取代位置有关<sup>[11]</sup>。如:不同酸碱环境中,呈现的颜色不同;与金属离子 Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>络合,加深黄酮类物质的黄色<sup>[12]</sup>。茶汤中的所发现的杨梅素苷主要是由杨梅素 C 环上 C<sub>3</sub> 结合糖苷键构成, B 环上还有 3 个邻苯羟基,而槲皮素只具有二个邻苯羟基,山萘素仅具有一个羟基,故性质较槲皮素苷和山萘素苷活泼,而导致发色基团遭到破坏。在随着贮藏时间的延长,杨梅素苷 B 环上的邻苯三羟基最易被氧化<sup>[11]</sup>,发色基团不断减少,导致了绿茶茶汤的绿色逐步淡去而黄色急速上升。推测,杨梅素苷的氧化可能是茶汤褐变的直接原因。也许对茶汤中黄酮醇研究将成为解决茶汤褐变问题的重要途径。

有趣的是,黄酮醇的氧化可能会受到儿茶素的影响。作者的试验发现,脱除儿茶素类物质的茶汤其色泽变化很显著,同时伴随着黄酮醇类物质的明显下降,推测可能是儿茶素的性质较黄酮醇更为活泼,先期氧化,从而保护了茶汤呈色物质黄酮醇类。同样,Ujihara<sup>[13]</sup>的研究也表明茶汤中黄酮醇苷水溶液色泽受其共同存在的儿茶素的影响,但他认为儿茶素可能与黄酮苷(如芦丁单糖苷)以 1:1 的比例形成复合物,从而削弱了芦丁单糖苷溶液的色度,且结合的量越大,色泽越浅;且酯型儿茶素的结合常数远大于非酯型儿茶素。黄酮醇和儿茶素之间的相互关系有待进一步研究。

作者的试验中还发现当茶汤同时去除儿茶素及黄酮后,茶汤色泽没有随储存时间的增加而发生较

大变化,推测除了儿茶素和黄酮物质外,其它物质对绿茶汤色的劣变起到的影响很小。

## 2 儿茶素及其氧化产物

虽然儿茶素本身无色,不是茶汤的呈色物质,但儿茶素的转化产物可能会对茶汤色泽劣变产生影响。

在绿茶饮料加工和贮藏过程中,儿茶素类可能出现几种变化。一是儿茶素类的异构化<sup>[14]</sup>。绿茶茶汤在杀菌工序中,随着温度的升高,儿茶素类不断从外界环境吸收热能,使自身分子空间结构发生差向异构化,即 EGCG、EGC、EC 等表型儿茶素差向异构化成为 GCG、GC、+C 等非表型儿茶素;二是儿茶素的脱没食子化<sup>[15]</sup>。在呈现弱酸性的茶汤的环境中,带有没食子酰基或没食子基的儿茶素如 EGCG,受到氧、光照的影响,没食子酰基断裂,没食子从儿茶素的分子结构中脱离;三是儿茶素类的聚合氧化<sup>[16]</sup>。儿茶素在高温、湿热、有氧的条件下,发生自身的氧化聚合反应生成橙黄色的氧化产物,在茶汤贮藏过程,儿茶素发生聚合反应时还会随机聚合茶汤中氨基酸、蛋白质等形成大分子量的有色物质,主要途径为“儿茶素-邻醌-大分子聚合物”。

研究认为,儿茶素分子中酚性羟基在空气中很容易氧化,尤其在碱性溶液中。儿茶素在非酶情况下的自动氧化过程较为复杂,目前也没有得出较清楚的反应历程,更没有分离、检测到相应的自动氧化产物。一般认为它大致经历两个较为明显的阶段<sup>[17]</sup>:儿茶素邻位和连位羟基比较容易氧化,先形成邻醌,邻醌非常不稳定,一旦形成便进行缩合反应。在缩合早期,其缩合物是水溶性的,具浅黄色和苦涩味;随着反应的进行,并在含有氨基成分情况下,可进一步缩合形成含氮褐色高聚物。

Ye<sup>[18]</sup>研究温度、光照对绿茶汤色泽褐变的影响时发现,未被氧化的儿茶素越多,其汤色参数越好;并且加入抗坏血酸钠后可以通过抑制氧化而起到护色作用,延长货架期。

作者的课题组系统分离法研究茶汤的呈色物质<sup>[9]</sup>,发现 40℃ 条件下储存 6 d 后的茶汤,乙酸乙酯相萃取所得的儿茶素量显著下降,说明其除了发生了非异构、脱没食子的转化,还发生了其它反应,且转化产物的极性发生了转变,不再进入乙酸乙酯层。通过对比其它萃取相物质含量的变化,推测儿茶素的转化产物极性增大后,进入水相,从而会对茶汤色泽劣变产生影响。

作者的课题组还利用 Arrhenius 动力学方程, 研究了不同热处理 (4~100℃) 条件下, 表没食子儿茶素没食子酸酯 (EGCG) 发生降解、异构化和脱没食子化反应的变化规律, 并建立了相关的动力学预测模型。结果显示虽然 EGCG 的降解、异构化和脱没食子化反应, 随着处理温度的升高, 各反应速率增大, 但不同反应对温度的敏感程度有差异, EGCG 降解最易发生, 而异构最难。由此推测, 茶叶生产加工贮藏过程中, 避免过高温度即可降低异构化。由于 EGCG 的氧化产物比较复杂, 无法进行定量分析, 故本研究无法计算 EGCG 氧化反应的动力学模型。如何判断氧化反应的发生, 选择氧化反应发生的指标, 是我们今后研究工作的重点, 可能也是探明儿茶素氧化与茶汤色泽劣变关系的必经途径。

### 3 花青素

花青素也被认为是茶叶水溶性黄色素的主体物质, 是构成绿茶汤色的主要部分。茶叶中主要含天竺葵素 (pelargonidin)、矢车菊素或芙蓉花色素 (cyanidin)、飞燕草色素 (delphinidin) 3 种花青素, 另外茶叶中还有花白素及由儿茶素聚合形成的原花色素, 酸性条件下两类物质可部分转化为花青素。在自然条件下, 游离的花青素主要以糖苷形式存在, 其颜色随 pH 值变化而变化, 酸性条件下呈红色, 中性时呈紫色, 碱性时呈蓝色。茶叶细胞液呈弱酸性, 故当茶芽叶花青素含量较高时则芽叶呈紫红色。由于花青素含量高的紫色芽叶制成的茶叶滋味苦涩、汤色发暗、叶底靛青, 花青素含量高低与茶叶品质负相关, 对其研究相对较少, 远不如其它饮料, 如葡萄酒。

共着色作用 (Co-pigmentation) 是近年来研究花青素的热点之一。共着色现象最初是由 Robinson 于 1931 年提出的。在蓝色花朵中, 此作用可分为两种: 一种是分子内共着色, 即花色素苷与一个和其相连的芳香酰基间的相互作用; 另一种是分子间共着色, 即辅色素与花色素苷分子非共价结合<sup>[19]</sup>。共色素主要是本身几乎无色的黄酮或类黄酮醇物质, 其与花色素苷连接后, 不仅增加了花色素苷的稳定性, 而且使其颜色加深。例如含有  $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  花青素 3,5-二糖苷和  $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  5-羟黄酮的溶液, 其吸收值要比仅含花青素的溶液高出 8 倍<sup>[20]</sup>。

有研究表明, 多酚还是一类辅色素, 对天然色素有着辅色作用。与花色素之间因疏水键-氢键共同作用形成分子复合物, 在一定程度上排除了水分子

对色素的进攻, 从而提高了色素的稳定性和吸光系数<sup>[21]</sup>。如: 花瓣多酚的存在可以显著提高草莓花色苷的稳定性, 减缓其分解造成的色泽消失<sup>[22]</sup>。而且, 花青素和黄酮醇中的配基不同 (甲基化或糖基不同), 表现出明显的增色效应<sup>[23]</sup>, 如在葡萄酒的色泽研究中就发现, 没食子酸是无色, 却表现出了强烈的辅色作用, 增强了酒色泽的强度<sup>[24]</sup>。

### 4 叶绿素

茶汤除了含有上述水溶性色素外, 还能检测到少量的脂溶性色素, 如叶绿素类、胡萝卜素类等, 在绿茶中含量较少 (<0.5%干物), 一般认为该类物质对茶叶干茶色泽及叶底色泽起着重要作用, 而对茶汤的色泽影响存在着分歧<sup>[25]</sup>。

由于叶绿素是一种不稳定的色素, 在水溶液中含有较少, 极容易在光、热的作用下迅速分解而产生种类繁多的衍生物<sup>[26]</sup>。因此, 目前对绿茶汤中叶绿素的分离鉴定, 以及在判断其对茶汤的影响作用的研究中, 所采用的方法比较粗糙, 停留在推测和排除阶段, 结论的由来也多采用推导法。随着科技的发展, HPLC 和 PDA 检测器的结合使用, 很大程度上弥补了这一缺憾。可以同时实现多元素快速、准确的分离, 并可以对照光谱图比较, 进行谱库检索, 同时实现成分的分离、鉴定<sup>[27-28]</sup>。Yasuyo 等<sup>[29]</sup>运用 HPLC-PDA 技术, 在  $\text{C}_8$  柱子上实现了茶汤中众多叶绿素和胡萝卜素的分离和检测。为叶绿素的研究提供了一个良好的平台。本研究小组在此基础上, 建立了叶绿素及其衍生物的 HPLC-PDA 分离鉴定方法, 实现了直接分离鉴定茶汤中的微量的 7 种叶绿素及其衍生物。

Wang 等<sup>[30]</sup>研究表明, 虽然理论上, 叶绿素是水不溶性的, 但是在浸提的过程中, 相当一部分会从茶叶中释放出来, 以乳浊液小颗粒的形式悬浮于茶汤中, 低温下会形成沉淀, 与茶汤色泽的相关性比较密切, 达 0.606 1。并且还指出, 不同加工方式对细胞破坏程度不同, 对叶绿素的溶出有很大影响, 炒青的溶出少于蒸青。

潘顺顺<sup>[31]</sup>在对绿茶茶汤汤色构成方面研究也发现, 对绿茶汤色“绿度”的构成起作用的是叶绿素 a、b 和脱镁叶绿素 a, 对绿茶汤色“黄度”的构成起作用的是叶黄素及  $\beta$ -胡萝卜素, 但是现实中在绿茶饮料高温杀菌过程中叶绿素已经大部分被降解, 而叶黄素和  $\beta$ -胡萝卜素的性质则比较稳定。

作者的课题组研究也发现<sup>[32]</sup>, 决定绿茶茶汤色泽的不仅限于水溶性色素。在低温避光贮存下, 用

有机溶剂从茶汤中分离出的脂溶性色素,呈现出鲜活、黄绿的颜色,主要组分为少量的叶绿素;但这部分色素极其不稳定,保存数天内基本消退;而去除了脂溶性色素的茶汤的储存试验显示,茶汤脂溶性色素的劣变速度较水溶性色素快,脱除脂溶性色素可以使茶汤的色泽稳定性得到一定程度的增强。通径分析表明,茶汤中含量微小的叶绿素对茶汤绿度呈正相关,及对茶汤色泽稳定的影响较大;并且茶汤在储存过程中叶绿素 a、b 的含量有所下降(且叶绿素 a 下降的幅度比叶绿素 b 大),而相应的衍生物含量有上升趋势。一般认为叶绿素本身呈绿色,对绿茶汤的色泽有正面影响,但是其衍生物多呈现出黄褐、黑褐色、蓝褐发暗的颜色,不利于茶汤色泽的稳定。但因为缺少标准样品及样品的热不稳定性,难以实现精确定量,因此制约了进一步研究确定该类物质的存在形式和含量与绿茶茶汤色泽的相关性。这有待在今后的工作中寻求解决方案。

另外,通过检测茶汤水溶液中叶绿素的荧光强度和叶绿素的淬灭时间,发现添加  $\beta$ -CD 的茶汤中叶绿素的发射光谱强度显著高于对照,并且随着  $\beta$ -CD 添加浓度增加,荧光强度越强,当  $\beta$ -CD 添加量为 0.05% 的叶绿素荧光强度是对照的 2 倍,表现出明显的  $\beta$ -CD 增溶效应,且溶解量与  $\beta$ -CD 的浓度成正相关。有关研究表明<sup>[33]</sup>,叶绿素的物化性质被  $\beta$ -CD 修饰后,其抗氧化能力和对光、热等的稳定性也相应地提高,减少因氧化、钝化光敏性及热敏性而发生的不良反应。推测  $\beta$ -CD 对茶汤的护色抗沉淀的作用机理,可能是  $\beta$ -CD 与叶绿素的作用,而非通常认为的  $\beta$ -CD 与儿茶素发生包埋。这也正好也回答了  $\beta$ -CD 效果的不稳定性,因为只有茶汤中存在叶绿素才能起到相应的护色作用。

Lu 等<sup>[34]</sup>研究表明,55℃下,茶汤色变伴随着叶绿素、叶黄素、新叶黄素的下降和脱镁叶绿素、b-胡萝卜素的上升。在 95℃ 的高温下,茶汤色泽的褐变与脂溶性色素的相关性更密切,尤其与叶绿素/脱镁叶绿素比值更相关。结果表明,加入  $1.6 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{Zn}^{2+}$  可以显著抑制热处理过程中绿茶汤绿度的下降。

综上所述,国内外茶叶工作者围绕着如何绿茶饮料的色泽问题开展了诸多的研究。只有探明绿茶汤色的呈色物质及致汤色劣变成分,才能摸清该类物质在茶汤存放过程中的转化规律,才能为茶饮料生产中选择合理的护色方案提供理论参考,从而为货架期内饮料品质提供必要的保证。但是目前该问题尚未得到圆满地解决,仍然需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1] Aoshima H, Ayabe S. Prevention of the deterioration of polyphenol-rich beverages [J]. *Food Chemistry*, 2007, 100(1):350-355.
- [2] 张景强. 六种金属元素与绿茶色泽相关性的研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2001.
- [3] Kim E S, Liang Y R, Jin J, et al. Impact of heating on chemical compositions of green tea liquor[J]. *Food Chemistry*, 2007, 103(4): 1263-1267.
- [4] 罗龙新. 茶饮料发展前景与生产技术[J]. *中国食品工业*, 2001, 22(1): 46-49.
- [5] Wang H, Helliwell K. Epimerisation of catechins in green tea infusions [J]. *Food Chemistry*, 2000, 70(3): 337-344.
- [6] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [7] Scharbert S, Holzmann N and Hofmann T. Identification of the astringent taste compounds in black tea infusions by combining instrumental analysis and human bio-response [J]. *Agric Food Chem*, 2004, 52(11): 3498-3508.
- [8] Wang L F, Park S C, Chung J O, et al. The compounds contributing to the greenness of green tea [J]. *Journal of Food Science*, 2004, 69(8): S301-S305.
- [9] 李钊. 绿茶茶汤色泽的变化规律及其调控研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2010.
- [10] 朱博, 夏涛, 高丽萍, 等. 绿茶茶汤中黄酮醇及其苷类的测定方法以及对茶汤色度的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2009, 35(2): 146-150.
- [11] 姚新生. 天然药物化学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2001: 190-194.
- [12] Yoshida K, Kitahara S, Ito D, et al. Ferric ions involved in the flower color development of the Himalayan blue poppy, *Meconopsis grandis*[J]. *Phytochemistry*, 2006, 67(10): 992-998.
- [13] Ujihara T, Hayashi N. Hypochromic effect of an aqueous monoglucosyl Rutin solution caused by green tea catechin[J]. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 2009, 73(12): 2773-2776.
- [14] Xu J Z, Leung L K, Huang Y, et al. Epimerisation of tea polyphenols in tea drinks[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2003, 83: 1617-1621.
- [15] Chen Z Y, Zhu Q Y, Tsang D, et al. Degradation of green tea catechins in tea drinks[J]. *Agric Food Chem*, 2001, 49(1): 477-482.
- [16] Zhu N, Huang T C, Yu Y, et al. Identification of oxidation products of (-)-epigallocatechin gallate and (-)-epigallocatechin with  $\text{H}_2\text{O}_2$  [J]. *Agric Food Chem*, 2000, 48(4): 979-981.
- [17] 董翠月, 梁颖. 植物显色物质研究进展[J]. *中国农学通报*, 2004, 20(5): 68-71.
- [18] Ye Q, Chen H, Zhang L B, et al. Effects of temperature, illumination, and sodium ascorbate on browning of green tea infusion[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2009, 18(4): 932-938.
- [19] 赵昶灵, 郭维明, 陈俊愉. 植物花色形成及其调控机理[J]. *植物学通报*, 2005, 22(1): 70-81.

- [20] Bloor S J, Falshaw R. Covalently linked anthocyanin-flavonol pigments from blue *Agapanthus* flowers[J]. *Phytochemistry*, 2000, 53(3): 575-579.
- [21] Maier T, Fromm M, Schieber A, et al. Process and storage stability of anthocyanins and non-anthocyanin phenolics in pectin and gelatin gels enriched with grape pomace extracts[J]. *European Food Research and Technology*, 2009, 229(2): 949-960.
- [22] Shikov V, Kammerer D R, Mihalev K, et al. Heat stability of strawberry anthocyanins in model solutions containing natural copigments extracted from rose (*Rosa damascena* Mill.) petals [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56 (18): 8521-8526.
- [23] Bloor S J. Blue flower colour derived from flavonol-anthocyanin co-pigmentation in *Ceanothus papillosus*[J]. *Phytochemistry*, 1997, 45(7): 1399-1405.
- [24] Boselli E, Giomo A, Minardi M, et al. Characterization of phenolics in *Lacrima di Morro d'Alba* wine and role on its sensory attributes[J]. *European Food Research and Technology*, 2008, 227(3): 709-720.
- [25] 钟萝. 茶叶品质理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989: 85-89.
- [26] 徐步城, 朱旗, 黄静. 绿茶中脂溶性色素研究进展[J]. *茶叶通讯*, 2006, 33(2): 21-24.
- [27] Schoefs B, Bertrand M, Lemoine Y. Separation of photo-synthetic pigments and their precursors by reversed-phase high-performance liquid chromatography using a photodiode-array detector[J]. *Journal of Chromatography A*, 1995, 692(1): 239-245.
- [28] Suzuki Y, Shioi Y. Chlorophyll and carotenoid analysis of tea by high-performance liquid chromatography and its application for quality control[C]//Proceedings of the 2001 international conference on O-CHA (tea) culture and science. 2001, Session II, 284-287.
- [29] Suzuki Y, Shioi Y. Identification of chlorophylls and carotenoids in major teas by high-performance liquid chromatography with photodiode array detection [J]. *Agric Food Chem*, 2003, 51(18): 5307-5314.
- [30] Wang L F, Park S C, Chung J O, et al. The compounds contributing to the greenness of green tea[J]. *Journal of Food Science*, 69(8): 301-305.
- [31] 潘顺顺. 绿茶鲜汁饮料色素物质组成及其护绿措施研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [32] 戴前颖. 绿茶提取液沉淀形成和色泽劣变机理及调控技术研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2007.
- [33] Teng S S, Chen B H. Formation of pyrochlorophylls and their derivatives in spinach leaves during heating [J]. *Food Chem*, 1999, 65(1): 367-373.
- [34] Lu J L, Dong Z B, Pan S S, et al. Effect of heat treatment on the lipophilic pigments of fresh green tea liquor[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2009, 18(3): 682-688.