

## 基于 $\zeta$ 电位的甘草水提液絮凝澄清效果研究

张建伟, 全浩宇, 冯颖, 丁晓光

沈阳化工大学能源与动力工程学院, 辽宁 沈阳 110142

**摘要:** 目的 研究 $\zeta$ 电位对于甘草水提液絮凝效果的影响, 优选甘草水提液的最佳絮凝工艺。方法 采用天然高分子絮凝剂壳聚糖对甘草水提液进行絮凝除杂处理。通过单因素试验、正交试验及粒度试验, 证明 $\zeta$ 电位与药液絮凝率之间存在的深层关系。结果 在单因素条件影响下, 药液的絮凝率均是在体系的 $\zeta$ 电位绝对值最低、最接近等电点时达到最高。通过正交试验确定甘草水提液絮凝的最佳工艺条件为壳聚糖投加量 0.347 g/L, pH 值为 6, 温度 30 °C, 此条件下体系的 $\zeta$ 电位为-1.67 mV, 在所有试验组中最接近等电点, 药液的絮凝率高达 95.29%。絮凝前原液的 $\zeta$ 电位为-14.78 mV, 药液中颗粒的平均粒径为 17.12  $\mu\text{m}$ ; 絮凝后上清液的 $\zeta$ 电位为-1.67 mV, 颗粒平均粒径为 6.77  $\mu\text{m}$ 。 $\zeta$ 电位的变化改变着溶胶体系中的颗粒行为, 并最终影响药液的絮凝率。结论 在甘草水提液絮凝的过程中,  $\zeta$ 电位对药液的絮凝率有着重要的影响:  $\zeta$ 电位的绝对值越低, 越接近等电点, 药液的絮凝率越高。同时由于 $\zeta$ 电位更能反映絮凝过程的本质, 因此可为絮凝条件的选择提供强有力的依据。

**关键词:** 壳聚糖; 甘草水提液;  $\zeta$ 电位; 絮凝率; 絮凝剂; 正交试验

中图分类号: TQ208 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2015)10-1464-06

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2015.10.011

## Experimental study on flocculating effect of Chinese herbs licorice water-extract liquid based on $\zeta$ potential

ZHANG Jian-wei, QUAN Hao-yu, FENG Ying, DING Xiao-guang

School of Energy and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China

**Abstract: Objective** Study on the influence of  $\zeta$  potential on flocculating rate of Chinese herbs water-extract liquid. **Methods** Chitosan of natural macromolecule flocculant was adopted to remove the flocculation impurity of the herb licorice (*Glycyrrhizae Radix*) extract, and the deep connection between  $\zeta$  potential and liquid flocculating rate was proved by single factor experiment, orthogonal experiment, and granularity. **Results** Under the influence of single factor conditions, absolute value of  $\zeta$  potential of the system is lower, while the flocculation rate is higher. Based on orthogonal experiment, the optimum process condition of flocculating licorice extract is determined to be the flocculant dosage quantity of 0.347 g/L, pH value of 6, temperature of 30 °C, and the system  $\zeta$  potential of -1.67 mV, which is close to the isoelectric point among all the experiment. Whereas the flocculating rate was as high as 95.29%. The  $\zeta$  potential of solution before flocculation is -14.78 mV, the average particle size is 17.12  $\mu\text{m}$ ; After the flocculation the  $\zeta$  potential of clear liquid is -1.67 mV, the average particle size is 6.77  $\mu\text{m}$ . The change of  $\zeta$  potential affected the particle behavior of sol system and ultimately affected the liquid flocculating rate. **Conclusion** In the process of flocculating herb licorice extract, the  $\zeta$  potential has the important influence on the flocculation of herb extract. Absolute value of  $\zeta$  potential of the system is lower, closer to the isoelectric point, the flocculation rate is higher. The  $\zeta$  potential that reflects the flocculation essence provides a strong justification for the selection of flocculation conditions.

**Key words:** chitosan; licorice extract;  $\zeta$  potential; flocculation rate; flocculant; orthogonal experiment

随着中药分离纯化技术的发展以及中药产业对药液的要求日益增高, 絮凝澄清法以其特有的优势在中药净化除杂中得到了广泛的应用。该方法不仅澄清效果好, 而且具有生产周期短、设备简单、工

收稿日期: 2014-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“壳聚糖絮凝-螯合法去除中药液中重金属离子及胶体杂质的研究”(21406142); 国家自然科学基金资助项目“基于激光测量技术的双多组浸没撞击流流场特性的非线性研究”(21476141)

作者简介: 张建伟(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 沈阳化工大学学科研处处长, 主要从事固液分离和高效节能过程装备的研究。

Tel: 14702418031 E-mail: zhangjianwei@syuct.edu.cn

艺简单、投资低等优点,因此在中药制备中有着巨大的发展潜力与空间<sup>[1]</sup>。絮凝澄清法通过向中药水提液中加入1种或多种絮凝剂,利用压缩双电层、电中和、吸附架桥及卷扫网捕等机制去除中药液中一些无效成分及杂质,使药液的澄清度得到提高<sup>[2]</sup>。絮凝反应是一个复杂的物理化学变化过程,其影响因素有很多,例如pH值、絮凝剂的种类及投加量、温度、搅拌条件等<sup>[3]</sup>。这些工艺条件的选择对絮凝的最终效果有着直接的影响。

在经典双电层理论中,滑动面至溶液本体间的电位差称为 $\zeta$ 电位,它的大小随着双电层厚度的增加而增加<sup>[4]</sup>。研究表明, $\zeta$ 电位是表征溶胶体系稳定性的重要标志。 $\zeta$ 电位的绝对值越小,溶液中颗粒的排斥力越小,体系的稳定性越差,越容易发生聚沉<sup>[5-7]</sup>。当中药水提液中加入絮凝剂之后,絮凝剂高分子会在水中形成许多带电的水解聚合离子,通过压缩双电层、吸附电中和等作用,降低体系的 $\zeta$ 电位,破坏体系的稳定性,从而使药液发生絮凝。故可以通过改变中药水提液中 $\zeta$ 电位的方法来提高药液的絮凝率。 $\zeta$ 电位作为无机混凝剂水处理性能评价指标已有多篇文献报道,但是中药絮凝澄清这一领域还未进行详尽的叙述及研究<sup>[8-10]</sup>。本实验将基于 $\zeta$ 电位进行研究,考察壳聚糖絮凝剂对甘草水提液絮凝效果的影响,探究絮凝剂投加量、温度以及pH值对药液的 $\zeta$ 电位和絮凝率的影响及这两者之间的深层关系,设计正交试验,得到最佳絮凝条件及其工艺条件下的 $\zeta$ 电位,并最终测定絮凝前原液及絮凝后上清液的 $\zeta$ 电位和颗粒粒度,为 $\zeta$ 电位与中药水提液絮凝率存在紧密联系提供有力依据。

## 1 仪器与材料

U-2800 紫外-可见分光光度计,日本日立公司;HJ-6 型磁力搅拌器,巩义予华实验仪器有限公司;YFY13B 型电煎密闭煎药机,北京东华原医疗设备有限公司;JS94-H 型微电泳仪,上海中晨科技有限公司;S3500 型激光粒度分析仪,美国麦奇克公司,分析范围:0.25~1 500  $\mu\text{m}$ ;BS224S 精密电子天平,德国赛多利斯公司;PHS-3C 型 pH 计,上海精密科学仪器有限公司;HH-1 型数显恒温水浴锅,江苏荣华仪器有限公司。

甘草 *Glycyrrhizae Radix* 饮片,购自沈阳东北大药房,经沈阳化工大学制药与生物工程学院孟艳秋教授鉴定,为豆科蝶形花亚科山羊豆族甘草属乌拉尔甘草 *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. 的干燥根和根茎

的加工品;壳聚糖,上海伯奥生物科技有限公司,脱乙酰度 $\geq 90.0\%$ ,黏度 $< 100$  cps;其余试剂均为分析纯。

## 2 方法与结果

### 2.1 甘草水提液的制备

用精密天平称取中药甘草饮片 200 g,放入专用药袋内加入足量水浸泡 30 min。之后将药袋放入密闭煎药机中,各加入 2 216 mL 蒸馏水。加热温度设定至 110  $^{\circ}\text{C}$ ,加热时间设定为 60 min<sup>[11]</sup>。结束后倒出药液,生药质量浓度为 0.1 g/mL。

### 2.2 絮凝剂的选择及制备

絮凝剂的合理选用是絮凝技术应用的关键因素。目前应用于中药领域的絮凝剂主要有壳聚糖、ZTC1+1 溶液、101 澄清剂、鞣质等。其中壳聚糖作为纯天然絮凝剂,具有良好的生物相容性、安全性和多种生物活性,且制备简单,无毒无害,价格低廉。将壳聚糖的絮凝特性用于中药水提液絮凝澄清中,其在中药液中易成为带阳离子的聚电解质,能够有效地去除中药液中的无效成分及杂质。因此选用壳聚糖作为实验絮凝剂。用精密电子天平称取 1 g 壳聚糖放入 100 mL 量瓶中后,用体积分数 1% 的乙酸溶液进行定容。配制后的壳聚糖溶液质量分数为 1%。充分膨胀后作为絮凝剂立即使用,以免在稀酸中时间过长导致水解而影响絮凝效果。

### 2.3 $\zeta$ 电位的测定

$\zeta$ 电位的测定在微电泳仪上进行。用去离子水冲洗电泳杯和十字标后,取 0.5 mL 待测样品注入到电泳杯,倾斜电泳杯,缓缓插入十字标。将电泳杯放入样品槽中,调节焦距使十字标清晰地显示在操作界面后可对样品液进行 $\zeta$ 电位的测量。将十字标从电泳杯中取出,插入铂电极对,放入样品槽,连接电极线。通过带 CCD 摄像头的显微系统观测颗粒在电场中的运动轨迹,计算颗粒运动的方向与速率从而得到颗粒的 $\zeta$ 电位,3次测量取平均值。实验进行前以此方法对甘草水提液原液的 $\zeta$ 电位进行测定,结果为-14.78 mV。

### 2.4 絮凝率的测定

将絮凝后的上清液吸取至比色皿中,并以蒸馏水作为参比,使用紫外-可见光分光光度计,在 900 nm 波长下测量透光值,作为混浊度的指标,计算药液的絮凝率。

絮凝率 = (絮凝前的透光值 - 絮凝后的透光值) / 絮凝前的透光值

## 2.5 絮凝剂投加量对絮凝效果的影响

实验首先经多次絮凝剂投加,获得甘草水提液的有效絮凝剂投加范围。使用烧杯在室温下进行絮凝实验,在有效范围之内分别向6份25 mL的甘草水提液中投加0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1 mL的絮凝剂,之后进行搅拌,搅拌速率为60 r/min,搅拌时间2 min<sup>[12]</sup>。搅拌结束后放置于实验台静置,待药液中澄清层与沉积层完全分离,分界面位置不再发生变化时,絮凝沉降过程结束。提取各组药液的上清液至比色皿中,观测絮凝率及 $\zeta$ 电位的变化,实验结果见表1。

表1 絮凝剂投加量对絮凝效果的影响

Table 1 Effect of coagulant dosage on flocculation

絮凝剂投加量/mL	絮凝率/%	$\zeta$ 电位/mV
0.6	80.31	-7.82
0.7	90.53	-5.62
0.8	91.81	-4.15
0.9	93.58	-2.94
1.0	81.03	2.15
1.1	62.43	6.96

由表1可知,甘草水提液的 $\zeta$ 电位及絮凝率随着絮凝剂投加量的不同而发生了变化。而在有效投加量范围之内,药液的絮凝率随着体系 $\zeta$ 电位的变化呈先升后降的趋势,可见体系的 $\zeta$ 电位与药液的絮凝率之间存在着密切的联系。当絮凝剂投加量在0.6 mL时,投加量较少,药液中的 $\zeta$ 电位为-7.82 mV,絮凝率仅达到80.31%。这是因为少量的壳聚糖高分子不足以电离出足够的阳离子,与药液中原有的带阴离子的杂质(主要为鞣质)电中和效果不明显,另外电离出的少量阳离子也无法对原有的双电层起到压缩作用,双电层仍然较厚,因此此时体系中的 $\zeta$ 电位仍旧较高,体系仍处于稳定状态,颗粒间的聚沉现象不明显,而在絮凝中的宏观表象就是絮凝率低。

随着絮凝剂投加量加大,药液的絮凝率逐渐提高。当絮凝剂投加量在0.9 mL时,体系的 $\zeta$ 电位为-2.94 mV,最接近等电点,且未发生电性反转,此时药液的絮凝率高达93.58%。这是因为药液中的反离子(阳离子)的浓度随着壳聚糖投加量的加大而不断增加,双电层中扩散层中原有的阳离子与新加入的阳离子发生电性排斥作用而被压缩至双电层中的斯特恩层中,使得原有双电层变薄, $\zeta$ 电位的绝

对值减小。当其数值足够小时,体系中的胶粒几乎是不带电的,电泳、电渗现象也很少发生,这时体系是非常容易发生絮凝而聚沉的,药液的絮凝率也达到了最佳效果。

而当絮凝剂投加量继续增加时,过量的壳聚糖高分子电离出的阳离子使得体系的 $\zeta$ 电位转为正值,药液中的部分胶体粒子表面转为带正电,并与同样带正电的絮凝剂高分子发生电性排斥作用,压缩双电层及电中和作用难以发挥,药液絮凝率开始不断下降。当絮凝剂投加量在1.1 mL时,体系 $\zeta$ 电位为6.96 mV,药液的絮凝率仅为62.43%。综上所述,壳聚糖絮凝甘草水提液的最佳絮凝剂投加量为0.9 mL(0.347 g/L),此时体系的 $\zeta$ 电位为-2.94 mV,未发生电性反转且最接近等电点,絮凝率达到93.58%。

## 2.6 pH值对絮凝效果的影响

为研究pH值对絮凝率及 $\zeta$ 电位的影响,取6份甘草水提液,每份25 mL。用2 mol/L的NaOH或1 mol/L的HCl溶液将其pH值分别调节至3、4、5、6、7、8(误差 $\pm 0.1$ )。絮凝剂投加量为0.9 mL。其他操作条件同“2.5”项。絮凝结束后提取各组药液的上清液至比色皿中,观测絮凝率及 $\zeta$ 电位的变化,结果见表2。

表2 pH值对絮凝效果的影响

Table 2 Effect of pH value on flocculation

pH 值	絮凝率/%	$\zeta$ 电位/mV
3	76.08	3.64
4	80.75	2.75
5	94.53	-2.05
6	93.58	-2.94
7	88.34	-7.96
8	85.15	-9.16

由表2可知,pH值对中药水提液的絮凝效果有较为显著的影响。这是因为pH值的变化会引起药液内胶粒表面的电荷密度和 $\zeta$ 电位的改变<sup>[13]</sup>。壳聚糖高分子投加到中药水提液中后,其高分子链上的-NH<sub>2</sub>会在弱酸环境中结合1个H<sup>+</sup>离子成为带阳离子的聚电解质,从而作为絮凝剂对中药水提液进行絮凝。而调节pH值时所加的酸和碱等于在溶液中加入H<sup>+</sup>和OH<sup>-</sup>离子,过高或过低的pH值均会对絮凝效果造成影响。

当药液的pH值在3~4变化时,体系内H<sup>+</sup>浓

度过大,  $\zeta$  电位为正值, 此时药液内部分胶粒表面转为带正电, 并与同样带正电的絮凝剂高分子发生电性排斥作用, 压缩双电层及电中和作用无法进行, 导致药液絮凝率偏低。由表 2 可知当 pH 值为 3 时, 体系的  $\zeta$  电位为 3.64 mV, 药液絮凝率仅有 76.08%。而当药液的 pH 值偏高时, 溶液内的 OH<sup>-</sup> 离子浓度过大导致溶液内胶粒表面电荷浓度的增大, 削弱了絮凝剂的电中和能力。此时体系的  $\zeta$  电位为负值且绝对值较高, 也不利于双电层的压缩, 药液的絮凝率较低。由表 2 可知当 pH 值为 8 时, 药液絮凝率仅有 85.15%。因此只有当 pH 值适宜时, 体系的  $\zeta$  电位才会趋于等电点并不发生电性反转, 药液的絮凝率才会最高。由实验结果可知, 当药液的 pH 值为 5 时, 体系的  $\zeta$  电位为 -2.05 mV, 药液的絮凝率高达 94.53%。因此确定壳聚糖絮凝甘草水提液的 pH 值为 5。

### 2.7 温度对絮凝效果的影响

温度是影响絮凝效果的重要因素, 属于絮凝过程的控制指标之一。为研究温度对絮凝效果的影响, 取 5 份甘草水提液, 用恒温水浴锅将其温度分别调至 20、30、40、50、60 °C, 每份投加壳聚糖 0.9 mL, 调 pH 值为 5。其他操作条件同“2.5”项, 絮凝过程中每份水提液在絮凝过程中均置于恒温水浴锅中。絮凝结束后提取各组药液的上清液至比色皿中, 观测絮凝率及  $\zeta$  电位的变化, 实验结果见表 3。

表 3 温度对絮凝效果的影响

Table 3 Effect of temperature on flocculation

温度/°C	絮凝率/%	$\zeta$ 电位/mV
20	87.61	-2.85
30	95.17	-1.73
40	93.23	-2.45
50	88.35	-2.93
60	85.43	-2.67

由表 3 可知, 随着温度的升高,  $\zeta$  电位在一定区域内发生了改变, 絮凝率也发生了显著的变化。需要说明的是, 絮凝率随着温度的改变主要原因是温度影响着絮凝剂在药液中的水解平衡以及化学反应速率等因素, 但是  $\zeta$  电位对絮凝率的影响仍然不可忽视。

当药液温度在 20 °C 时, 温度较低, 药液的黏度增加导致絮团的剪切程度大, 部分絮团变的细小松散无法沉降, 导致絮凝率并不高。另外, 此时絮

凝剂的水解平衡受到了影响, 此时壳聚糖高分子无法电离出足够的阳离子, 溶液中的反离子浓度不足, 电中和及压缩双电层作用亦不明显, 此时体系  $\zeta$  电位为 -2.85 mV, 絮凝率在 87.61% 左右。当溶液温度升高时, 化学反应速率加快, 颗粒间碰撞的机会增多, 为电中和及压缩双电层提供了良好的环境,  $\zeta$  电位绝对值逐渐降低, 絮凝率逐渐升高。当温度在 30 °C 时, 体系的  $\zeta$  电位为 -1.73 mV, 絮凝率高达 95.17%。而随着溶液温度的继续升高, 化学反应速率急剧加快, 体系变的不稳定,  $\zeta$  电位的变化呈现出不确定性。尽管此时絮凝剂分子与胶体颗粒间的频繁碰撞使得絮体聚沉加快, 但是絮体的快速沉降导致网捕及卷扫行为难以进行, 因此絮凝率反而开始下降。另外, 高温使得絮凝剂高分子链收缩, 缩短了架桥长度, 同样削弱了絮凝作用<sup>[14]</sup>。综上所述, 壳聚糖絮凝甘草水提液的最适宜温度为 30 °C。

### 2.8 最佳工艺的确定

为了寻找出实验药材的最佳絮凝工艺, 设计正交试验。选用絮凝剂投加量 (A)、温度 (B)、pH 值 (C) 3 个因素, 每个因素选用 3 个水平, 选取 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 正交表进行试验。因素与水平表见表 4。按照以下因素与水平, 将壳聚糖投入到各组药液中, 其他条件同“2.5”项。絮凝结束后观测各组药液的絮凝率, 结果见表 4。

由方差分析结果 (表 5) 可知, 各因素对絮凝率的影响均无显著性。由表 4 可知, 3 个因素对絮

表 4 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 正交实验设计与结果

Table 4 Design and results of L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) orthogonal experiment

试验号	A/mL	B/°C	C	D (误差)	絮凝率/%
1	0.8 (1)	20 (1)	4 (1)	(1)	90.75
2	0.8 (1)	30 (2)	5 (2)	(2)	92.23
3	0.8 (1)	40 (3)	6 (3)	(3)	88.56
4	0.9 (2)	20 (1)	5 (2)	(3)	94.81
5	0.9 (2)	30 (2)	6 (3)	(1)	95.29
6	0.9 (2)	40 (3)	4 (1)	(2)	90.41
7	1.0 (3)	20 (1)	6 (3)	(2)	83.98
8	1.0 (3)	30 (2)	4 (1)	(3)	89.21
9	1.0 (3)	40 (3)	5 (2)	(1)	86.21
K <sub>1</sub>	271.54	269.54	270.37	272.25	
K <sub>2</sub>	280.51	276.73	273.25	266.62	
K <sub>3</sub>	259.40	265.18	267.83	272.58	
R	21.11	11.55	5.42	5.96	

表 5 方差分析  
Table 5 Analysis of variance

误差来源	偏差平方和	自由度	F 值	显著性
A	74.830	2	10.003	无
B	22.679	2	3.032	无
C	4.902	2	0.655	无
D(误差)	7.481	2		

凝效果的影响强弱顺序为 A>B>C, 即絮凝剂投加量>温度>pH 值; 壳聚糖絮凝甘草水提液的最优水平为 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>, 即絮凝剂投加量 0.9 mL (0.347 g/L)、温度 30 °C、pH 5。制取生药质量浓度为 0.1 g/mL 的甘草水提液对最优工艺进行验证, 在 30 °C, pH 5, 壳聚糖投加质量浓度为 0.347 g/L 的条件下, 3 批壳聚糖絮凝甘草水提液的絮凝率分别为 95.76%、95.82%、95.73%, 平均为 95.77%。

使用微电泳仪测定在此工艺条件下甘草水提液体系的 ζ 电位, 为 -1.67 mV, 靠近等电点且未发生电性反转。无论是通过单因素分析还是正交试验分析均可证明, 在不发生电性反转条件下, 体系的 ζ 电位接近等电点有利于药液的絮凝, 两者之间存在紧密联系。同时, 由于 ζ 电位更能反映絮凝过程的本质, 因此可为絮凝条件的选择提供有力的依据。

### 2.9 粒度分析试验

甘草水提液是由胶体颗粒与大粒径的悬浮颗粒共同组成的, 在热力学角度来讲, 处于不稳定状态, 絮凝前后体系中的颗粒粒径会发生显著变化。颗粒粒径大小可在一定程度上反映出中药水提液的絮凝效果。根据实验所得的甘草水提液最佳工艺, 采用激光粒度分析仪, 对原药液及絮凝后的上清液进行粒度观测实验, 结果见图 1。在之前的实验中得到絮凝前后体系的 ζ 电位值, 通过甘草水提液絮凝前

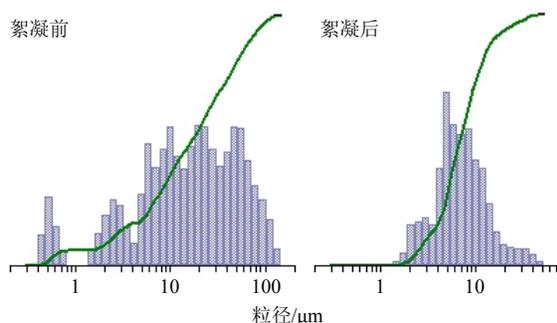


图 1 絮凝前后粒径对比

Fig. 1 Comparison on particle size before and after flocculation

后 ζ 电位及粒度变化的综合分析, 进一步说明 ζ 电位对药液絮凝效果的影响。

从实验结果可知, 絮凝前药液的 ζ 电位为 -14.78 mV, 甘草水提液原液颗粒粒子的平均粒径为 17.12 μm; 而絮凝后药液的 ζ 电位为 -1.67 mV, 上清液颗粒粒子的平均粒径为 6.77 μm。絮凝前后药液 ζ 电位的绝对值及颗粒的粒径明显减小。ζ 电位是反映溶胶体系稳定性的重要标志, ζ 电位绝对值越大, 体系中颗粒的斥力越大, 颗粒间越不容易聚沉, 体系越稳定。而在进行絮凝之后, 体系的 ζ 电位绝对值明显降低, 稳定性被破坏, 颗粒之间发生了凝聚而最终沉降至药液底部, 因此絮凝后的上清液颗粒粒度明显减小, 药液澄清度提高, 絮凝率增加。由此可知, ζ 电位的改变改变着溶胶体系中的颗粒行为, 并最终影响药液的絮凝率。这也进一步验证了 ζ 电位对中药水提液絮凝效果有着重要的影响。

### 3 讨论

本实验采用天然高分子絮凝剂壳聚糖对中药甘草水提液进行絮凝除杂处理, 考察了絮凝剂投加量、pH 值、温度对体系 ζ 电位及药液絮凝率的影响, 并进行正交试验, 通过单因素及正交试验的综合分析, 探究了 ζ 电位与药液絮凝率的关系。最后进行粒度实验, 来进一步说明 ζ 电位对于中药水提液絮凝过程的重要影响。

(1) 体系 ζ 电位的绝对值随着絮凝剂投加量的增加先减后增, 而药液的絮凝率先升高后降低。当絮凝剂的投加量在 0.9 mL (0.347 g/L) 时, 体系的 ζ 电位为 -2.94 mV, 接近等电点, 药液絮凝率达到最大值 93.58%, 为投加量因素影响下的最高水平; 体系 ζ 电位的绝对值随着 pH 值的增大先降低后升高, 而药液的絮凝率先升高后降低。当 pH 值为 5 时, 体系的 ζ 电位为 -2.05 mV, 接近等电点, 药液絮凝率达到最大值 94.53%, 为 pH 值因素影响下的最高水平; 体系的 ζ 电位在 30 °C 时, 绝对值达到最低, 为 -1.73 mV, 接近等电点, 此时药液絮凝率达到 95.17%, 为温度因素影响下的最高水平。

(2) 以絮凝剂投加量、pH 值、温度为影响因素, 絮凝率为实验因素进行正交试验, 得出甘草水提液的最佳操作条件以及此条件下的 ζ 电位值。最佳工艺条件为絮凝剂投加量 0.9 mL (0.347 g/L), pH 值为 6, 温度 30 °C, 此时体系的 ζ 电位为 -1.67 mV, 靠近等电点且未发生电性反转, 药液的絮凝高达 95.29%。无论是单因素试验还是正交试验, 均可表

明在进行中药水提液絮凝时,在不发生电性反转的情况下,体系的 $\zeta$ 电位绝对值越低,越接近等电点,药液的絮凝率越高,两者之间存在着紧密联系。

(3) 通过粒度分析实验及絮凝前后药液的 $\zeta$ 电位对比,可知絮凝前体系的 $\zeta$ 电位为 $-14.78\text{ mV}$ ,甘草水提液原液中颗粒平均粒径为 $17.12\ \mu\text{m}$ 。絮凝后体系的 $\zeta$ 电位为 $-1.67\text{ mV}$ ,上清液中颗粒平均粒径为 $6.77\ \mu\text{m}$ 。 $\zeta$ 电位的变化影响着溶胶体系中颗粒的行为,并最终影响药液絮凝率。

#### 参考文献

- [1] 张建伟, 范红伟. 壳聚糖对银杏水提液的絮凝工艺研究 [J]. 化学工程, 2008, 36(2): 71-74.
- [2] 张建伟, 袁园, 王春雨. 壳聚糖对桑白皮水提液净化除杂的研究 [J]. 高校化学工程学报, 2010, 24(2): 346-349.
- [3] 张建伟, 王中原, 范红伟. 中药水提液的絮凝和选择性絮凝 [J]. 中草药, 2006, 37(8): 1271-1275.
- [4] 陈立亚, 于宝珠, 赵慧芳. Zeta 电位及其在药学分散体系研究中的应用 [J]. 药物分析杂志, 2006, 26(2): 281-285.
- [5] 崔越, 李利军, 李青松, 等. Zeta 电位法优化赤砂糖回溶糖浆絮凝澄清工艺的研究 [J]. 食品工业科技, 2013, 34(14): 273-277.
- [6] Tantra R, Schulze P, Quincey P. Effect of nanoparticle concentration on zeta-potential measurement results and reproducibility [J]. *China Particuol*, 2010, 8(3): 279-285.
- [7] 林泽, 孙梅宇, 彭洋, 等.  $\zeta$ 电位对麻渣胶体体系相分离的影响 [J]. 食品科学, 2012, 33(15): 75-78.
- [8] 曹广胜, 佟乐, 胡仪, 等. 基于污水悬浮颗粒 Zeta 电位的絮凝剂用量优化 [J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33(1): 17-20.
- [9] Yu Y X, Wu J Z, Gao G H. Ionic distribution, electrostatic potential and zeta potential at electrochemical interfaces [J]. *Chin J Chem Eng*, 2004, 12(5): 688-695.
- [10] 虞丽俊.  $\zeta$  电位在印染废水混凝土处理中的应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [11] 张建伟, 于婧超, 冯颖. 2 种天然絮凝剂对薄荷水提液的絮凝研究和比较 [J]. 浙江大学学报: 理学版, 2012, 39(4): 428-433.
- [12] 张建伟, 刘函, 于婧超, 等. 荷叶水提液的絮凝优化工艺及其失活动力学研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(3): 432-438.
- [13] 赵静, 李波, 蒋刚. pH 值对硅油乳液 Zeta 电位及其制备的影响 [J]. 化学研究与应用, 2005, 17(3): 386-388.
- [14] Zhang X L, Zhao X, Zhang L M. Effect of ZTC+1-II clarifying agent on flocculation process of alcohol-extract solution from *Ginkgo biloba* Linn. leaves [J]. *Med Plant*, 2010, 1(7): 73-75.