

氟磺胺草醚与植物蛋白相互作用的研究

徐玲莉¹, 祖永平¹, 郭顺堂², 陶波¹

(1. 东北农业大学 农学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 中国农业大学 食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要:在模拟动物体生理条件下,利用荧光光谱方法,以牛血清蛋白(BSA)为对照,对除草剂氟磺胺草醚与植物蛋白(11S蛋白、酶解后11S蛋白)的互作效应进行研究。分析蛋白发生变性反应后,氟磺胺草醚与牛血清白蛋白、植物蛋白结合常数和结合位点数的变化情况。结果表明:氟磺胺草醚对蛋白有较强的荧光猝灭作用,氟磺胺草醚与牛血清、11S蛋白、酶解后11S蛋白发生结合反应生成了新的复合物,属于静态荧光猝灭。根据不同温度下的热力学参数可以推断:氟磺胺草醚与牛血清白蛋白之间的作用力主要是疏水作用力;与11S蛋白及酶解后的11S蛋白之间的作用力均为氢键和范德华力。将3种蛋白分别进行热处理、超声振荡、金属盐离子和酸性处理后,氟磺胺草醚与蛋白的结合反应发生了不同程度的变化。结果为阐明氟磺胺草醚的毒理学提供一定的理论依据。

关键词:氟磺胺草醚;牛血清白蛋白;植物蛋白;荧光;热力学参数

中图分类号:S451.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-9841(2013)06-0763-05

Interaction between Fomesafen and Vegetable Protein

XU Ling-li¹, ZU Yong-ping¹, GUO Shun-tang², TAO Bo¹

(1. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. College of Food Science & Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking the bovine serum albumin (BSA) as control, the interaction between fomesafen and vegetable protein was studied by fluorescence spectrum under the imitated physiological condition of animal body. Changes of the binding constant and the number of binding site of the fomesafen with BSA and vegetable protein after the protein denaturalization reaction were analyzed. Fomesafen had a strong ability to quench the fluorescence launching from BSA and vegetable protein. The BSA and vegetable protein had reacted with fomesafen and they formed a certain new compound, and its belonged to static fluorescence quenching reaction. The thermodynamic parameters obtained at different temperature suggested that the binding power between the BSA and fomesafen was mainly the hydrophobic interaction, between the vegetable protein and fomesafen was mainly hydrogen bonding/van der Waals. When the three proteins were subjected to heat, ultrasonic, metal salts/sonic and acidity treatment, their binding reaction with fomesafen varied to some extent. This essay will supply a theory base for the poisoning mechanism of fomesafen.

Key words: Fomesafen; Bovine serum albumin (BSA); Vegetable protein; Fluorescence; Thermodynamic parameter

农药在保障农作物丰产丰收的过程中起着十分重要的作用。但长期重复应用往往会引起一系列生态健康、环境污染和农副产品质量安全等方面的问题^[1]。近几年除草剂在农业上的应用已经占农药总用量的50%,并且用量逐年增加,除草剂在促进农业发展的同时,对生态安全构成了严重威胁^[2]。氟磺胺草醚是一种具有高度选择性的苗后除草剂,由于杀草谱广、选择性强、活性高等优点,广泛应用于大豆、花生田。但因其稳定性高,不易分解,导致残留现象严重,大量农产品被污染,严重影响人类的生活和健康^[3]。如何降低氟磺胺草醚残留的危害,成为亟待解决的问题。

荧光光谱法以其干扰较少、灵敏度高等优点,

引起了生命科学、化学、药学及临床医学科研工作者的普遍关注,主要用于研究某些药物小分子等与蛋白分子的相互作用,获取大分子构象及小分子药理效应等^[4]。目前对于医药和蛋白结合等方面的研究已有大量报道,刘永明等^[5]研究发现秋水仙碱和牛血清蛋白的相互作用为单一的荧光静态猝灭过程;陈震华^[6]等研究结果表明随着四环素药物浓度的增加,蛋白的荧光被不同程度的猝灭;商志才^[7]等通过荧光技术发现环丙沙星分子与牛血清蛋白间有较强的结合作用,且牛血清蛋白构象发生变化。但是,目前关于农药分子与植物蛋白分子作用特征的荧光光谱研究鲜有报道。

本文主要研究了氟磺胺草醚与牛血清蛋白、植

收稿日期:2013-05-05

基金项目:国家自然科学基金(30971834)。

第一作者简介:徐玲莉(1988-),女,在读硕士,主要从事除草剂应用技术研究。E-mail:linglixu1011@163.com。

通讯作者:陶波(1963-),男,博士,教授,主要从事农药应用技术及新型助剂研究与开发。E-mail:botaol@163.com。

物蛋白之间的相互作用,通过分析农药与蛋白反应的结合常数、结合位点数及反应等热力学参数,推断他们之间的作用机理和主要作用力,为农药在生物体内的毒理性研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 仪器和试剂

荧光分光光度计(Perkin Elmer LS-55);水浴锅(日本AS ONE EDK-200);酸度计(上海虹宜仪器厂90-1型);万分之一电子天平(日本SHIMADZU AY220);数控超声波清洗器(苏州江东精密仪器有限公司)。

BSA(上海生物化学试剂厂提供);11S蛋白(实验室提取);酶解后11S蛋白(实验室酶解);98%氟磺胺草醚原药(江苏常青农药有限公司);磷酸缓冲液(pH7.0); $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CuSO}_4$ 溶液。

BSA、11S、11S酶解蛋白及氟磺胺草醚均以pH7.0的磷酸缓冲液配成一定浓度;所用试剂为分析纯,实验用水为二次石英蒸馏水,经检验均无荧光杂质。

1.2 试验方法

在10 mL试管中,加入一定体积的氟磺胺草醚溶液,然后分别加入一定体积的BSA、11S蛋白、11S酶解蛋白溶液,用pH7.0的磷酸缓冲液稀释至刻度。蛋白浓度固定为10,20,40,60,80 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别与不同浓度氟磺胺草醚混合,氟磺胺草醚浓度依次为0,20,40,60,80,100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在30℃的水浴

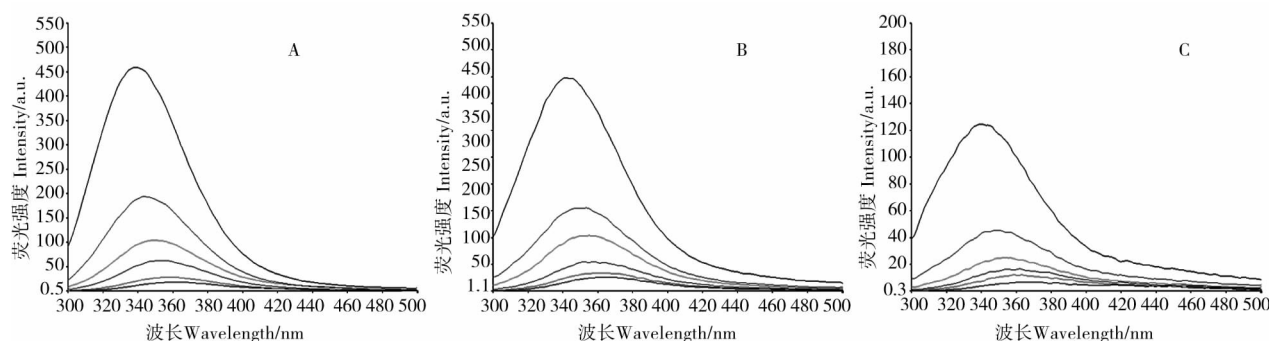
中静置10 min,测定其相应的吸收光谱和荧光光谱。荧光激发波长为280 nm,扫描300~500 nm的荧光光谱,激发和发射光谱通带均为10 nm,进行荧光光谱扫描,记录345 nm波长处的荧光强度,每次读数在5次以上,求平均值,此即每组样品的荧光强度测定值。

取3种蛋白溶液各5份,分别进行热处理(90℃水浴,30 min)、超声振荡处理(400 W,30 min)及酸处理(pH为2~3)、金属离子处理(Cu^{2+} 浓度为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$),然后分别加入相同浓度的氟磺胺草醚,按上述方法测其荧光光谱。研究氟磺胺草醚与蛋白在不同条件下的结合常数(K_0)和结合位点数(n)的变化情况。

2 结果与讨论

2.1 氟磺胺草醚对蛋白的荧光猝灭光谱分析

由于蛋白质中存在色氨酸、酪氨酸和苯丙氨酸,使其具有内源荧光,当固定蛋白的量,不断增加猝灭剂的浓度时,蛋白内源荧光有规律的降低,最大发射峰稍有红移,但蛋白的峰形没有变化^[8-10]。如图1所示,随着氟磺胺草醚浓度的增加,牛血清蛋白与植物蛋白的荧光发射强度均有规律的减少,表明除草剂氟磺胺草醚与蛋白之间发生相互作用,但氟磺胺草醚的加入没有破坏蛋白的发色团,只是使发色团的微环境发生了改变,提示蛋白内部的疏水腔结构有所瓦解,肽链的伸展程度有所增加,从而推断BSA、11S蛋白、11S酶解蛋白的构象发生了一定程度的变化。



A:BSA;B:11S蛋白;C:11S酶解蛋白;从上而下各曲线对应的氟磺胺草醚浓度为0,20,40,60,80,100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

A:BSA;B:11S;C:11S Enzymatic hydrolyzed;The concentration of fomesafen from upper to lower was 0,20,40,60,80,100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively.

图1 氟磺胺草醚对蛋白的荧光猝灭光谱图

Fig.1 Fluorescence quenched spectra of BSA and vegetable protein by fomesafen at different concentration

当某些小分子与蛋白质结合后会导致其荧光强度下降,这种现象称为荧光猝灭作用。荧光猝灭通常可以分为动态猝灭和静态猝灭两类。动态猝灭是猝灭剂和荧光物质的激发态分子之间的作用

过程,遵循 Stern-Volmer 方程^[11-12]:

$$F_0/F = 1 + K_q \tau_0 [Q] = 1 + K_{sv} [Q] \quad (1)$$

式中, F_0 和 F 分别表示猝灭剂不存在和存在时体系的荧光强度; K_q 为双分子猝灭过程的速率常数;

[Q]为猝灭剂即氟磺胺草醚浓度; K_{sv} 为 Stern-Volmer 猝灭常数。各类猝灭剂对生物大分子的最大扩散速率常数为 $2.0 \times 10^{10} \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; τ_0 为无猝灭剂存在下荧光分子的平均寿命,生物大分子的荧光平均寿命一般为 10^{-8} s 。

表 1 猝灭速率常数 K_q

Table 1 Quenching rate constants K_q ($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)			
样品浓度 Sample concentration/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	牛血清蛋白 BSA	植物蛋白 Vegetable protein(11S)	酶解后 植物蛋白 Enzymatic hydrolyzed vegetable protein
10	1.58×10^{13}	9.79×10^{12}	5.51×10^{12}
20	1.00×10^{13}	1.00×10^{13}	8.37×10^{12}
40	1.14×10^{13}	1.77×10^{13}	6.17×10^{12}
60	1.13×10^{13}	1.34×10^{13}	6.43×10^{12}
80	9.81×10^{12}	1.07×10^{13}	4.56×10^{12}

表 2 不同浓度蛋白与氟磺胺草醚的结合常数(K_0)及结合位点数(n)

Table 2 The binding constant (K_0) and the number of binding site (n) for fomesafen binding to protein in the presence of various concentrations of protein						
样品浓度 Sample concentration/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	牛血清蛋白		植物蛋白		酶解后植物蛋白	
	BSA		Vegetable protein(11S)		Enzymatic hydrolyzed vegetable protein	
	$K_0/\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$	n	$K_0/\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$	n	$K_0/\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$	n
10	8.20×10^6	1.5305	5.46×10^6	1.5061	2.73×10^5	1.3452
20	2.03×10^6	1.3812	3.34×10^6	1.4414	1.34×10^6	1.3546
40	4.59×10^6	1.4713	6.09×10^7	1.7259	3.70×10^5	1.2355
60	6.79×10^7	1.7624	1.78×10^7	1.6136	3.79×10^5	1.2467
80	1.11×10^6	1.3190	1.55×10^6	1.3478	3.26×10^5	1.2721

从表 2 可见,牛血清白蛋白和 11S 蛋白与除草剂氟磺胺草醚的结合性随浓度变化先增高后降低,且分别在浓度为 60 和 40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,与氟磺胺草醚的结合性较好。酶解后 11S 蛋白与除草剂氟磺胺草醚的结合程度基本不变,结合能力相对较弱。

2.3 除草剂氟磺胺草醚与蛋白的热力学特征

当温度为 303K、313K 时,按照实验方法测出加入不同浓度氟磺胺草醚后蛋白的荧光强度(表 3)。当温度变化不大时,反应的焓变 ΔH 可看作是常

假设蛋白的荧光猝灭过程为动态猝灭,则由式(1)作出氟磺胺草醚对蛋白荧光猝灭的 Stern-Volmer 曲线,由直线斜率可求得 K_{sv} ,进一步求出 K_q (表 1),这一结果远大于 $10^{10} \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此静态猝灭在整个猝灭过程中起主导作用。除草剂氟磺胺草醚与 BSA、11S 蛋白、11S 酶解蛋白形成不发光配合物,从而导致 BSA、11S 蛋白、11S 酶解蛋白荧光强度降低。

2.2 荧光猝灭作用的描述

在静态猝灭作用中,荧光强度与猝灭剂的关系可由静态猝灭公式表示^[13]:

$$\lg(F_0-F)/F = \lg K_0 + n \lg [Q] \tag{2}$$

由 $\lg[(F_0-F)/F] \sim \lg[Q]$ 作图,通过线性拟合得到该直线的回归方程,通过直线的斜率和截距可求结合位点数(n)和结合常数(K_0)。

数^[14]。根据热力学公式:

$$\ln K_2/K_1 = [1/T_1 - 1/T_2] \Delta H/R$$

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

可求得结合作用的热力学参数(表 4)。Ross 等^[15]根据大量的实验结果,总结出生物大分子与小分子结合力性质的热力学规律,即:当反应的 $\Delta H > 0, \Delta S > 0$ 为疏水作用力; $\Delta H < 0, \Delta S < 0$ 为氢键和范德华力; $\Delta H < 0, \Delta S > 0$ 为静电引力。

表 3 不同温度条件下的结合常数(K_0)及结合位点数(n)

Table 3 Binding constant (K_0) and the number of binding site (n) at different temperature						
温度 Temperature/K	牛血清蛋白		植物蛋白		酶解后植物蛋白	
	BSA		Vegetable protein(11S)		Enzymatic hydrolyzed vegetable protein	
	$K_0/\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$	n	$K_0/\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$	n	$K_0/\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$	n
303	6.79×10^7	1.7624	6.09×10^7	1.7259	1.34×10^6	1.3546
313	7.1×10^7	1.5857	2.6×10^7	1.6282	4.4×10^5	1.2499

表4 不同温度下的热力学参数

Table 4 The thermodynamic parameters at different temperature

温度 Temperature/K	样品 Sample	$\Delta H/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\Delta S/\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\Delta G/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
303	牛血清蛋白 BSA	3.212	160.90	-43.93
	植物蛋白 Vegetable protein(11S)	-61.68	-61.48	-43.66
	酶解后植物蛋白 Enzymatic hydrolyzed vegetable protein	-81.92	-162.30	-34.37
313	牛血清蛋白 BSA	3.212	155.90	-44.03
	植物蛋白 Vegetable protein(11S)	-61.68	-66.17	-41.63
	酶解后植物蛋白 Enzymatic hydrolyzed vegetable protein	-81.92	-165.90	-31.66

由表4可以看出,除草剂氟磺胺草醚与BSA、11S蛋白、11S酶解蛋白反应是自发进行;氟磺胺草醚与牛血清蛋白之间的作用力以疏水作用力为主;氟磺胺草醚与11S蛋白、11S酶解蛋白之间的作用力主要为氢键和范德华力。

温度由303 K升高到313 K时,BSA、11S蛋白、11S酶解蛋白的结合常数和结合位点数随温度升高而减小,这也进一步佐证了氟磺胺草醚与BSA、11S、11S酶解蛋白之间是静态猝灭机制。

2.4 不同条件下氟磺胺草醚与蛋白结合性研究

蛋白质是由多种氨基酸通过肽键构成的高分

子化合物,在某些物理和化学因素作用下其特定的空间构象被改变,从而会导致其理化性质的改变。相关研究表明经热处理后蛋白分子的解离、聚焦现象变化复杂,导致其功能特性变化复杂^[16];超声作用下蛋白更易受损,且受损程度受时间、酸度、金属离子等条件影响^[17-19]。本研究将BSA、11S、11S酶解蛋白分别进行热处理、超声振荡处理、金属离子处理、酸处理后,发现氟磺胺草醚与BSA、11S、11S酶解蛋白结合结合常数和结合位点数均发生了变化(表5)。

表5 不同处理方式对氟磺胺草醚与BSA、11S蛋白、11S酶解蛋白结合性的影响

Table 5 Effect of different conditions on the binding constant of fomesafen with protein

处理方式 Treatment	牛血清蛋白 BSA		植物蛋白 Vegetable protein(11S)		酶解后植物蛋白 Enzymatic hydrolyzed vegetable protein	
	$K_0/\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$	n	$K_0/\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$	n	$K_0/\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$	n
对照 CK	6.79×10^7	1.7624	6.09×10^7	1.7259	1.34×10^6	1.3546
金属铜离子 Metal salts/ Cu^{2+}	3.16×10^7	1.6910	1.38×10^7	1.6049	4.35×10^6	1.4621
热处理 Heat	3.47×10^6	1.4930	6.16×10^7	1.8930	1.44×10^6	1.4079
超声振荡 Ultrasonic	9.26×10^6	1.5615	1.14×10^7	1.5915	2.22×10^6	1.4111
强酸 Acidity	2.44×10^7	1.6542	4.04×10^7	1.4653	1.67×10^6	1.4756

由表5可见, Cu^{2+} 存在的情况下,氟磺胺草醚与11S酶解蛋白的结合常数和结合位点数均增大,结合能力增强;而氟磺胺草醚与BSA、11S蛋白的结合趋势与之相反。经过热处理的11S蛋白和11S酶解蛋白,与氟磺胺草醚的结合常数和结合位点数变大,结合能力增强;而经过热处理的BSA,与氟磺胺草醚的结合趋势与之相反。超声振荡处理后11S酶解蛋白与氟磺胺草醚的结合常数和结合位点数增大,结合能力增强;而超声处理后BSA和11S蛋白与氟磺胺草醚的结合趋势与之相反。在强酸条件下,11S酶解蛋白与氟磺胺草醚的结合常数和结合位点增大,结合能力增强;而BSA和11S蛋白与氟

磺胺草醚的结合趋势与之相反。

3 结论

氟磺胺草醚对BSA、11S蛋白、11S酶解蛋白的作用均为静态猝灭作用,形成新的复合物。氟磺胺草醚与BSA之间的作用力主要为疏水作用力,而与11S蛋白、11S酶解蛋白之间的作用力主要为氢键和范德华力。同时BSA、11S蛋白、11S酶解蛋白经热处理、超声振荡、金属盐离子和酸性处理后,均增加了11S酶解蛋白与氟磺胺草醚的结合常数及结合位点数能力;均降低了BSA与氟磺胺草醚的结合常数及结合位点数;除热处理增加了11S与氟磺胺草醚的结合常

数及结合位点数外,其他 3 种处理均减弱了其于氟磺胺草醚的结合力。结果为阐明氟磺胺草醚的毒理学提供一定的理论依据。

参考文献

- [1] 吴汉东,史雪岩,梁沛. 顺式氰戊菊酯与牛血清白蛋白相互作用的荧光光谱研究[J]. 光谱实验室,2008,25(4):694-698. (Wu H D, Shi X Y, Liang P. Study of the interaction between esfenvalerate and bovine serum albumin by fluorescence spectroscopy[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2008, 25(4): 694-698.)
- [2] 高世杰,韩玉军,蒋凌雪,等. 氟磺胺草醚的生物测定方法研究[J]. 东北农业大学学报,2011,42(7):45-49. (Gao S J, Han Y J, Jiang L X, et al. Study on bioassay method of fomesafe[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(7): 45-49.)
- [3] 陶波,李晓薇,韩玉军,等. 不同吸附剂土壤中氟磺胺草醚吸附/解吸的影响[J]. 土壤通报,2010,41(4):965-969. (Tao B, Li X W, Han Y J, et al. Impact of different adsorbents on the sorption/desorption behavior of fomesafen soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(4): 965-969.)
- [4] 颜承农,张华新,刘义,等. 百草枯与牛血清白蛋白结合作用的荧光光谱[J]. 化学学报,2005,63(18):1727-1732. (Yan C N, Zhang H X, Liu Y, et al. Fluorescence spectra of the binding reaction between paraquat and bovine serum albumin[J]. Acta Chimica Sinica, 2005, 63(18): 1727-1732.)
- [5] 刘永明,李桂芝,孙希芳,等. 荧光法研究秋水仙碱和牛血清白蛋白的相互结合作用[J]. 分析化学研究报告,2004,32(5):615-618. (Liu Y M, Li G Z, Sun X F, et al. Study on the interaction between colchicine and bovine serum albumins by fluorescence method[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2004, 32(5): 615-618.)
- [6] 陈震华,黄祖云,尹权,等. 荧光光谱法研究四环素族化合物与白蛋白的相互作用[J]. 武汉大学学报,1996,42(4):413-418. (Chen Z H, Huang Z Y, Yin Q, et al. Studies on the interaction of tetracyclines with albumin by fluorescence spectroscopy[J]. Journal of Wuhan University, 1996, 42(4): 413-418.)
- [7] 商志才,易平贵,俞庆森,等. 环丙沙星与牛血清白蛋白的结合反应[J]. 物理化学学报,2001,17(1):48-52. (Shang Z C, Yi P G, Yu Q S, et al. Reaction mechanism between ciprofloxacin hydrochloride and bovine serum albumin[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2001, 17(1): 48-52.)
- [8] 张国文,阙青民,潘军辉,等. 葛根素与牛血清白蛋白相互作用的研究[J]. 光谱学与光谱分析,2007,27(9):1784-1787. (Zhang G W, Que Q M, Pan J H, et al. Studies on the interaction between puerarin and bovine serum albumin[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(9): 1784-1787.)
- [9] 李文静,敖登高娃,白桦,等. 米诺环素与牛血清白蛋白相互作用的研究[J]. 军事医学科学院院刊,2008,32(5):452-454. (Li W J, Aodeng G W, Bai H, et al. Interaction of minocycline and bovine serum albumin[J]. Bulletin of the Academy of Military Medical, 2008, 32(5): 452-454.)
- [10] Wang Z Q, Gao J Q, Wang J, et al. Spectroscopic analyses on interaction of Amantadine-Salicylaldehyde, Amantadine-5-Chloro-Salicylaldehyde and Amantadine-o-Vanillin Schiff-Bases with bovine serum albumin (BSA) [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2011, 83: 511-517.
- [11] 张怀斌,李怀祥,马丽英,等. 荧光光谱法研究注射用头孢美唑钠与牛血清白蛋白的相互作用[J]. 分析科学学报,2011,27(3):321-325. (Zhang H B, Li H X, Ma L Y, et al. Study on the interaction between cefmetazole sodium for injection and bovine serum albumin by fluorescence spectroscopy[J]. Journal of Analytical Science, 2011, 27(3): 321-325.)
- [12] Wang Q S, Liu P F, Zhou X L, et al. Thermodynamic and conformational investigation of the influence of CdTe QDs size on the toxic interaction with BSA [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2012, 230: 23-30.
- [13] Gopalaswamy V, Sankaralingam A, Sivanandham V, et al. BSA binding and antimicrobial studies of branched polyethylenimine-copper (II) bipyridine/phenanthroline complexes [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2012, 96: 108-116.
- [14] 丁成荣,高晓茹,范杰,等. 酰胺类除草剂与牛血清白蛋白的相互作用[J]. 农药,2011,50(1):29-34. (Ding C R, Gao X R, Fan J, et al. The interaction between amide herbicide and bovine serum albumin [J]. Agrochemicals, 2011, 50(1): 29-34.)
- [15] Ross D P, Subramanian S. Thermodynamics of protein association reaction: contributing to stability [J]. Biochemistry, 1981, 20: 3096-3099.
- [16] 郭凤仙,熊幼翎,何志勇,等. 热处理对大豆分离蛋白功能特性的影响[J]. 食品与机械,2009,25(6):9-11. (Guo F X, Xiong Y L, He Z Y, et al. Effect of heat treatment on functional properties of soybean protein isolate [J]. Food & Machinery, 2009, 25(6): 9-11.)
- [17] 王晓芳,王君,张朝红,等. 低频超声波照射下卟啉-锰配合物对牛血清白蛋白损伤的研究[J]. 化学学报,2008,66(3):355-361. (Wang X F, Wang J, Zhang C H, et al. Investigation on damage of bovine serum albumin by porphyrin-Mn complex under low frequency ultrasonic irradiation [J]. Acta Chimica Sinica, 2008, 66(3): 355-361.)
- [18] 李东辉,彭兴跃,叶东,等. 荧光各向异性法研究酸度对四磺基铝酞菁与牛血清白蛋白相互作用的影响[J]. 高等学校化学学报,1999,20(8):1218-1220. (Li D H, Peng X Y, Ye D, et al. Investigation of the association between bovine serum albumin and aluminum tetrasulfonated phthalocyanine by fluorescence anisotropy [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 1999, 20(8): 1218-1220.)
- [19] 梁宏,邢本刚,吴庆轩,等. Cu(II), Fe(III) 与人血清白蛋白相互作用的荧光光谱研究[J]. 化学学报,1999,57(2):161-165. (Liang H, Xing B G, Wu Q X, et al. Study on the interaction of human serum albumin with Cu(II), Fe(III) by fluorescence method [J]. Acta Chimica Sinica, 1999, 57(2): 161-165.)