矢量介子及其激发态的讨论*

魏科伟[1)2)†] 陈兵[1)] 王振洋[1)3)] 祁敬娟[1)] 陈新云[1)] 翁铭华[4)]

1) (安阳师范学院物理与电气工程学院, 安阳 455000)

2) (中国科学院高能物理研究所, 大科学装置理论物理研究中心, 北京 100049)

3) (北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875)

4) (闽江学院物理学与电子信息工程系, 福州 350108)

(2013年6月5日收到; 2013年7月1日收到修改稿)

在 Regge 唯象下, 首先研究自旋 - 宇称多重态中六个介子质量间的关系式. 运用验证后的关系式, 重点计算基态矢量介子多重态 (1^3S_1) 中尚未观测到的双重粲 - 底介子 B_c^* 的质量. 还计算了径向激发态 2^3S_1 多重态的介子质量和轨道激发态 1^3G_5 介子九重态的质量. 根据计算结果结合实验数据和其他理论进行讨论, 建议在 6355 MeV 附近寻找和研究 B_c^* 介子, 将 D(2600) 和 $\mathrm{D}_{s1}(2700)$ 分别作为主要成分为 $\bar{\mathrm{n}}\mathrm{c}(2^3S_1)$ 和 $\bar{\mathrm{s}}\mathrm{c}(2^3S_1)$ 的态进行研究; 分别在 5812, 5917, 6896 MeV 附近寻找矢量介子第一径向激发态 $\mathrm{B}^*(2\mathrm{S})$, B_s^* (2S) 和 $\mathrm{B}_c^*(2S)$. 建议将 $\omega_5(2250)$ 安排在 1^3G_5 介子九重态的同位旋标量态, 实验上在 2259 MeV 附近进一步研究 $\rho_5(2350)$ 的性质, 在 2438 MeV 附近寻找和研究 ϕ_5 (1^3G_5). 研究结果对于相关介子的自旋 - 宇称安排和通过实验寻找新的介子激发态具有重要的参考价值.

关键词: Regge 唯象, 矢量介子, 质量谱

PACS: 11.55.Jy, 12.40.Yx, 14.40.−n, 12.10.Kt **DOI:** 10.7498/aps.62.181101

1 引 言

介子的性质是由量子色动力学的非微扰效应支配的, 因此介子是研究强耦合、非微扰区域的量子色动力学 (QCD) 的理想场所, 介子质量谱的研究对于更好的理解量子色动力学的非微扰效应具有重要的科学意义 [1]. 同时, 对介子谱的全面认识也是寻找和确认 QCD 所预言的新强子态 (如胶球、混杂态等) 的一个非常重要的环节. 矢量介子发现较早, 研究较多. 根据最新的 "粒子物理评论"[2], 基态矢量介子多重态 (1^3S_1) 中, 粲 - 底介子 B_c^* 之外的成员都已确立: ρ(770), K*(892), ϕ(1020), ω(782), J/ψ(1S), ϒ(1S), D*(1S), D_s^* (1S), B*(1S) 和 $\mathrm{B}_s(1S)^*$; 对于矢量介子第一径向激发态 2^3S_1 多重态, ρ(1450), ϕ(1680), ω(1420), ψ(2S) 和 ϒ(2S) 已经确立, K* (1410) 的自旋 - 宇称安排存在很大争议 [3], D*(2S), $\mathrm{D}_s^*(2S)$, B*(2S), $\mathrm{B}_s^*(2S)$ 和 $\mathrm{B}_c^*(2S)$ 成员还未出现在介子表的 2^3S_1 多重态中 [2]. 关于轨道激发态, 在介子九重态的安排中, 最新的 PDG (particle data group) 比 2010 年的版本 [4] 新增了对 $\mathrm{K}_5^*(2380)$ 的安排, 将 $\mathrm{K}_5^*(2380)$ 安排为 1^3G_5 介子九重态的同位旋双重态 (isodoublet, $I = 1/2$). 然而, 1^3G_5 介子九重态的两个同位旋标量态 ($I = 0$) 和很多其他轨道激发态仍然空白. 因此, 在实验和理论方面都需要做进一步的研究. 目前将 QCD 应用于长程强相互作用时, 还存在一些尚未解决的禁闭问题, 格点 QCD 在处理激发态时仍然存在较大误差和很多困难 [5], 人们通常利用唯象模型来解决强子性质中涉及到的非微扰效应的计算. Regge 唯象学物理图像清晰, 在研究强子质量谱方面简洁有效, 一直得到重视和广泛应用 [6−23].

Regge 唯象学起源于在复角动量空间分析散射振幅的性质 [24], Regge 理论几乎涉及到强相互作用的各个方面, 包括强子谱、粒子间的作用力和散

* 国家自然科学基金 (批准号: 11147197, U1204115, 11247287, 11275025, 11261130311)、河南省教育厅科学技术研究重点项目 (批准号: 12B140001, 13A140014) 和安阳师范学院大学生创新基金项目 (批准号: ASCX/2013-Z62) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: weikw@hotmail.com

射振幅的高能现象 [7]. 在 Regge 理论中, 分波振幅在复角动量平面上的极点称为 Regge 极点, 所有的介子和重子都对应于 Regge 极点, 当能量改变时, Regge 极点在复角动量平面上移动所描绘出的曲线称为 Regge 轨迹. Regge 轨迹由一系列内部量子数 (重子数 B, 内部宇称 P, 奇异数 S, 粲数 C, 底数 B 等) 和介子的总角动量 J 的奇偶 (对重子, 为总角动量 $J-1/2$ 的奇偶) 来决定 [25]. 对于由 i, j 夸克组成的介子 $i\bar{j}$ 或 $\bar{i}j$, 其自旋 J 和质量 M_{ij} 的 Regge 轨迹通常参数化为

$$J=\alpha_{i\bar{j}}(0)+\alpha'_{i\bar{j}}M^2_{i\bar{j}}, \qquad (1)$$

$\alpha_{i\bar{j}}$ 和 $\alpha'_{i\bar{j}}$ 分别表示介子 $i\bar{j}$ 所在的 Regge 轨迹的截距和斜率. 在同一条 Regge 轨迹上的介子具有相同的内部量子数, 这些介子的总角动量相差 $2n(n=1,2,3,\cdots)$[25], 具有相同的 Regge 斜率和截距. 正如文献 [26] 提到的 Regge 截距和斜率参数对谱学和非谱学的研究有重要的意义 (例如在复合模型 [27] 和碎裂模型 [28] 中的意义). 文献 [29] 指出 Regge 斜率和截距是强子动力学重要的基本参数, 比一般介子的质量更重要. 因而, 确定强子的斜率和截距是非常重要的, 这将提供一个机会去更好地理解强相互作用动力学.

本文首先简要介绍 Regge 唯象中关于 Regge 截距和 Regge 斜率的公式, 利用 (1) 式并结合 Regge 轨迹的截距公式、斜率公式推导同一多重态中的介子质量关系式, 并利用实验数据检验新推导的质量关系式; 然后运用验证后的质量关系式, 计算基态矢量介子多重态 (1^3S_1) 中尚未观测到的双重粲 - 底介子 B_c^* 的质量, 计算 1^3S_1 多重态中各成员的 Regge 斜率和截距; 接着计算径向激发态 2^3S_1 多重态的介子质量和轨道激发态 1^3G_5 介子九重态的质量; 最后对计算结果进行讨论、总结.

2 公式推导

Regge 公式 (1) 中的截距和斜率值确定之后, 可以计算位于这条 Regge 轨迹上任意介子的质量, 公式 (1) 结合不同夸克之间的 Regge 截距关系式和 Regge 斜率关系式, 可以更方便地计算介子质量谱. 对于一个自旋 - 宇称多重态 (更准确地说是一个量子数为 $N^{2S+1}L_J$ 的多重态, 其中 N, L 和 S 分别代表径向激发量子数、轨道量子数和自旋量子数) 中不同夸克组分的介子, 常用的有 1 个 Regge 截距关系式和 2 个 Regge 斜率关系式:

Regge 截距相加性关系式 [23,26,30−33]:

$$\alpha'_{i\bar{i}}(0)+\alpha'_{j\bar{j}}(0)=2\alpha'_{i\bar{j}}(0). \qquad (2)$$

Regge 斜率倒数相加性关系式 [23,26,30]:

$$\frac{1}{\alpha'_{i\bar{i}}}+\frac{1}{\alpha'_{j\bar{j}}}=\frac{2}{\alpha'_{i\bar{j}}}, \qquad (3)$$

Regge 斜率相乘的关系式 [34,35]:

$$\alpha'_{i\bar{i}}\times\alpha'_{j\bar{j}}=(\alpha'_{i\bar{j}})^2, \qquad (4)$$

(2) 和 (3) 式由基于拓扑展开和 $q\bar{q}$- 弦图像的一个模型得到 [30] (后来这个模型被称为夸克 - 胶球 - 弦模型 (quark-gluon string model)), 这个模型提供了一个在夸克层次描述 Regge 唯象的途径 [36]. 事实上, (2) 式首先对轻夸克强子在二重性共振模型中得到 [30], 后来人们发现 (2) 式符合二维 QCD[31]、双分析模型 [32] 和夸克韧致辐射模型 [33]. Regge 斜率相乘的关系式 (4) 从 t- 道极点的留数乘积得到 [34,35].

从方程 (1) 和 (2) 可以得到

$$\alpha'_{i\bar{i}}M^2_{i\bar{i}}+\alpha'_{j\bar{j}}M^2_{j\bar{j}}=2\alpha'_{i\bar{j}}M^2_{i\bar{j}}. \qquad (5)$$

将 (5) 式分别结合 (3), (4) 式计算, 检验 (3) 与 (4) 式哪一个关系式更适于描述介子谱. 当组分夸克的质量 $m_i<m_j$ 时, 由斜率倒数相加关系 (3) 式和 (5) 式可以得到同一 $N^{2S+1}L_J$ 多重态中介子质量和介子 Regge 轨迹斜率之间的关系 [7]:

$$\frac{\alpha'_{j\bar{j}}}{\alpha'_{i\bar{i}}}=\frac{1}{2M^2_{j\bar{j}}}\left[\left(4M^2_{i\bar{j}}-M^2_{j\bar{j}}-M^2_{i\bar{i}}\right)+\sqrt{\left(4M^2_{i\bar{j}}-M^2_{j\bar{j}}-M^2_{i\bar{i}}\right)^2-4M^2_{j\bar{j}}M^2_{i\bar{i}}}\right], \qquad (6)$$

当 $m_i<m_j<m_k$ 时 (k 为组分夸克的味量子数), 由上式和恒等式:

$$\frac{\alpha'_{j\bar{j}}}{\alpha'_{i\bar{i}}}\equiv\frac{\alpha'_{j\bar{j}}}{\alpha'_{k\bar{k}}}\times\frac{\alpha'_{k\bar{k}}}{\alpha'_{i\bar{i}}} \qquad (7)$$

可以得到同一 $N^{2S+1}L_J$ 多重态中 6 个介子质量之间的关系:

$$\begin{aligned}&\frac{1}{2M^2_{j\bar{j}}}\left[\left(4M^2_{i\bar{j}}-M^2_{j\bar{j}}-M^2_{i\bar{i}}\right)+\sqrt{\left(4M^2_{i\bar{j}}-M^2_{j\bar{j}}-M^2_{i\bar{i}}\right)^2-4M^2_{j\bar{j}}M^2_{i\bar{i}}}\right]\\&=\left\{\left[\left(4M^2_{i\bar{k}}-M^2_{k\bar{k}}-M^2_{i\bar{i}}\right)+\sqrt{\left(4M^2_{i\bar{k}}-M^2_{k\bar{k}}-M^2_{i\bar{i}}\right)^2-4M^2_{k\bar{k}}M^2_{i\bar{i}}}\right]\Big/2M^2_{k\bar{k}}\right\}\end{aligned}$$

$$
\times\left\{\left[\left(4M_{j\bar{k}}^2-M_{k\bar{k}}^2-M_{i\bar{i}}^2\right)\right.\right.
$$
$$
\left.\left.+\sqrt{\left(4M_{i\bar{k}}^2-M_{k\bar{k}}^2-M_{i\bar{i}}^2\right)^2-4M_{k\bar{k}}^2M_{i\bar{i}}^2}\right]\Big/2M_{k\bar{k}}^2\right\}^{-1}. \tag{8}
$$

如果在求介子高次幂等式 (8) 的过程中, 将斜率倒数相加关系 (3) 式换成斜率相乘关系 (4) 式, 同样可以得到一个类似于 (8) 式的 6 个介子质量间的高次幂等式:

$$
\left[\left(2M_{i\bar{j}}^4-M_{i\bar{i}}^2M_{j\bar{j}}^2\right)+2M_{i\bar{j}}^2\sqrt{2M_{i\bar{j}}^4-M_{i\bar{i}}^2M_{j\bar{j}}^2}\right]\Big/M_{j\bar{j}}^4
$$
$$
=\frac{\left[\left(2M_{i\bar{k}}^4-M_{i\bar{i}}^2M_{k\bar{k}}^2\right)+2M_{i\bar{k}}^2\sqrt{2M_{i\bar{k}}^4-M_{i\bar{i}}^2M_{k\bar{k}}^2}\right]\Big/M_{k\bar{k}}^4}{\left[\left(2M_{j\bar{k}}^4-M_{j\bar{j}}^2M_{k\bar{k}}^2\right)+2M_{j\bar{k}}^2\sqrt{4M_{j\bar{k}}^4-M_{j\bar{j}}^2M_{k\bar{k}}^2}\right]\Big/M_{k\bar{k}}^4}. \tag{9}
$$

在第 3 部分, 本文将运用 (8) 式和 (9) 式分别计算赝标粲 - 底介子 B_c 的质量, 对比实验数据, 检验 (8) 式和 (9) 式哪一个更好. 然后选取正确的式子计算矢量粲 - 底介子 B_c^* 的质量, 再运用 (6) 式计算介子的 Regge 斜率, 用 (1) 式计算 Regge 截距.

3 计算结果

3.1 验证公式并计算 1^3S_1 中 B_c^* 的质量

由 (8) 式, 当 $i=n$, $j=s$, $k=c$ 时 (其中 n 代表轻夸克 u 或 d), 可得

$$
\frac{1}{2M_{c\bar{c}}^2}\Big[(4M_{n\bar{c}}^2-M_{n\bar{n}}^2-M_{c\bar{c}}^2)
+\sqrt{(4M_{n\bar{c}}^2-M_{n\bar{n}}^2-M_{c\bar{c}}^2)^2-4M_{n\bar{n}}^2M_{c\bar{c}}^2}\Big]
$$
$$
=\Big[(4M_{n\bar{b}}^2-M_{n\bar{n}}^2-M_{b\bar{b}}^2)
+\sqrt{(4M_{n\bar{b}}^2-M_{n\bar{n}}^2-M_{b\bar{b}}^2)^2-4M_{n\bar{n}}^2M_{b\bar{b}}^2}\Big]
$$
$$
\times\Big[(4M_{c\bar{b}}^2-M_{c\bar{c}}^2-M_{b\bar{b}}^2)
+\sqrt{(4M_{c\bar{b}}^2-M_{c\bar{c}}^2-M_{b\bar{b}}^2)^2-4M_{c\bar{c}}^2M_{b\bar{b}}^2}\Big]^{-1}. \tag{10}
$$

将 1^1S_0 多重态相应的介子质量代入上式, 可求得赝标粲 - 底介子 $\mathrm{B_c}$ 的质量为 (6271 ± 4) MeV. 同样, 由 (9) 式算得 B_c 的质量为 6413 MeV. PDG 2012 版[2] 给出的实验平均值为 (6277 ± 6) MeV, 最近 LHCb 测得 B_c^+ (1^1S_0) 的质量为 $(6273.7\pm1.3\pm1.6)$ MeV[37]. 因此 (8) 式合适而 (9) 式不合适. 根据前面的推导, (8) 式基于 (3) 式, (9) 式基于 (4) 式. 也就是说 Regge 斜率相乘性关系 (4) 式不能准确地描述目前的介子谱, 而斜率倒数相加关系 (3) 式适用于描述当前的介子谱.

根据 (8) 式和 PDG 中收录的 1^3S_1 介子质量的实验数据, 可以计算出 1^3S_1 中 $\bar{b}c$ 成员 B_c^* 的质量, 将相应介子的质量代入下式:

$$
\frac{1}{2M_{J/\psi(1S)}^2}\Big[(4M_{\mathrm{D}^*}^2-M_{\rho(770)}^2-M_{J/\psi(1S)}^2)
+\sqrt{(4M_{\mathrm{D}^*}^2-M_{\rho(770)}^2-M_{J/\psi(1S)}^2)^2-4M_{\rho(770)}^2M_{J/\psi(1S)}^2}\Big]
$$
$$
=\Big[(4M_{\mathrm{B}^*}^2-M_{\rho(770)}^2-M_{\Upsilon(1S)}^2)
+\sqrt{(4M_{\mathrm{B}^*}^2-M_{\rho(770)}^2-M_{\Upsilon(1S)}^2)^2-4M_{\rho(770)}^2M_{\Upsilon(1S)}^2}\Big]
$$
$$
\times\Big[(4M_{\mathrm{B}_c^*}^2-M_{J/\psi(1S)}^2-M_{\Upsilon(1S)}^2)
+\sqrt{(4M_{\mathrm{B}_c^*}^2-M_{J/\psi(1S)}^2-M_{\Upsilon(1S)}^2)^2-4M_{J/\psi(1S)}^2M_{\Upsilon(1S)}^2}\Big]^{-1}. \tag{11}
$$

由上式可求得矢量粲 - 底介子 B_c^* 的质量为 (6355.5 ± 3.5) MeV, 结果列在表 1 中.

表 1 矢量介子 B_c^* (1^3S_1) 共振态的质量

	本文结果	[38]	[39]	[40]	[41]	[42]	[43]	[44]
$\mathrm{B}_c^*(1^3S_1)$ 的质量/MeV	6355.5	6353	6355	6341	6373	6340	6338	6337 ± 52

目前实验上还没有观测到矢量介子 B_c^*, 将其他理论方法得到的数值也列在表 1 进行比较. 文献 [38] 运用格点 QCD, 文献 [39—41] 运用势模型, 文献 [42, 43] 运用基于 QCD 的相对论夸克模型, 文献 [44] 运用基于 QCD 求和规则, 结果符合较好.

3.2 1^3S_1 多重态各成员的 Regge 截距和斜率

根据在引言中的叙述, $\rho(770)$ 1^- 和 $\rho_3(1690)$ 3^- 在同一条 Regge 轨迹上, 具有相同的

Regge 斜率和截距, 由 (1) 式可得

$$1=\alpha_{n\bar{n}}(0)+\alpha'_{n\bar{n}}M^2_{\rho(770)}, \tag{12}$$

$$3=\alpha_{n\bar{n}}(0)+\alpha'_{n\bar{n}}M^2_{\rho_3(1690)}. \tag{13}$$

将 PDG 中收录的 ρ(770) 和 $\rho_3(1690)$ 的质量的实验数据代入 (12) 和 (13) 式, 可求得 $\alpha'_{n\bar{n}}=0.8886\ \text{GeV}^{-2}$, $\alpha_{n\bar{n}}(0)=0.4656$.

同样, $K^*(892)$ 和 $K^*_3(1780)$ 在同一条 Regge 轨迹上, 将 PDG 中收录的 $K^*(892)$ 和 $K^*_3(1780)$ 的质量的实验数据代入下式:

$$1=\alpha_{n\bar{s}}(0)+\alpha'_{n\bar{s}}M^2_{K^*(892)}, \tag{14}$$

$$3=\alpha_{n\bar{s}}(0)+\alpha'_{n\bar{s}}M^2_{K^*_3(1780)}, \tag{15}$$

可求得 $\alpha'_{n\bar{s}}=0.8505\ \text{GeV}^{-2}$, $\alpha_{n\bar{s}}(0)=0.3173$. 再由 (2) 式和 (3) 式分别可得 $\alpha_{s\bar{s}}(0)=0.1689$, $\alpha'_{s\bar{s}}=0.8156\ \text{GeV}^{-2}$.

对于 1^3S_1 多重态中的其他介子的 Regge, 可以由其相应的 Regge 斜率比值与同一多重态内其他介子质量之间的关系 (6) 式得到. 由 (6) 式, 可得

$$\alpha'_{c\bar{c}}=\frac{1}{2M^2_{J/\psi(1S)}}\bigg\{\left(4M^2_{D^*}-M^2_{J/\psi(1S)}-M^2_{\rho(770)}\right)+\bigg[\left(4M^2_{D^*}-M^2_{J/\psi(1S)}-M^2_{\rho(770)}\right)^2-4M^2_{J/\psi(1S)}M^2_{\rho(770)}\bigg]^{1/2}\bigg\}\times\alpha'_{n\bar{n}}, \tag{16}$$

$$\alpha'_{b\bar{b}}=\frac{1}{2M^2_{\Upsilon(1S)}}\bigg\{\left(4M^2_{B^*}-M^2_{\Upsilon(1S)}-M^2_{\rho(770)}\right)+\bigg[\left(4M^2_{B^*}-M^2_{\Upsilon(1S)}-M^2_{\rho(770)}\right)^2-4M^2_{\Upsilon(1S)}M^2_{\rho(770)}\bigg]^{1/2}\bigg\}\times\alpha'_{n\bar{n}}, \tag{17}$$

将相应介子的质量代入下式, 然后结合前面得到的 $\alpha'_{n\bar{n}}=0.8886\ \text{GeV}^{-2}$, 可求得, $\alpha'_{c\bar{c}}=0.4378\ \text{GeV}^{-2}$, $\alpha'_{b\bar{b}}=0.2059\ \text{GeV}^{-2}$.

根据 (5) 式, 将 PDG 中相应的 1^3S1 介子质量的实验数据代入下式:

$$\alpha'_{c\bar{c}}M^2_{J/\psi(1S)}+\alpha'_{n\bar{n}}M^2_{\rho(770)}=2\alpha'_{c\bar{n}}M^2_{D^*}, \tag{18}$$

$$\alpha'_{b\bar{b}}M^2_{\Upsilon(1S)}+\alpha'_{n\bar{n}}M^2_{\rho(770)}=2\alpha'_{b\bar{n}}M^2_{B^*}, \tag{19}$$

$$\alpha'_{b\bar{b}}M^2_{\Upsilon(1S)}+\alpha'_{c\bar{c}}M^2_{J/\psi(1S)}=2\alpha'_{b\bar{c}}M^2_{B^*_c}, \tag{20}$$

$$\alpha'_{c\bar{c}}M^2_{J/\psi(1S)}+\alpha'_{s\bar{s}}M^2_{\phi(1020)}=2\alpha'_{c\bar{s}}M^2_{D^*_s}, \tag{21}$$

$$\alpha'_{b\bar{b}}M^2_{\Upsilon(1S)}+\alpha'_{s\bar{s}}M^2_{\phi(1020)}=2\alpha'_{b\bar{s}}M^2_{B^*_s}, \tag{22}$$

可以分别求得 1^3S_1 中不同夸克组分的介子的基态 Regge 轨迹斜率为 $\alpha'_{c\bar{n}}=0.5866\ \text{GeV}^{-2}$, $\alpha'_{b\bar{n}}=0.3343\ \text{GeV}^{-2}$, $\alpha'_{b\bar{c}}=0.2801\ \text{GeV}^{-2}$, $\alpha'_{c\bar{s}}=0.5637\ \text{GeV}^{-2}$, $\alpha'_{b\bar{s}}=0.3283\ \text{GeV}^{-2}$.

由以上不同夸克组分的介子 Regge 轨迹斜率, 将相应介子的质量代入 (1) 式, 可以计算出基态 1^3S_1 的不同夸克组分的 Regge 轨迹的截距, 结果列于表 2 中.

在引言中已提到, Regge 截距和斜率参数是强子动力学重要的基本参数, 对谱学和非谱学的研究有重要的意义 [26,29], 下面将这些参数用于计算 1^3S_1 的径向激发态 (2^3S_1) 和轨道激发态 (1^3G_5) 的质量谱.

表 2 1^3S_1 多重态中各成员 Regge 轨迹斜率 $\alpha'_{i\bar{j}}$ (GeV^{-2}) 和截距 $\alpha_{i\bar{j}}(0)$

	$n\bar{n}$	$s\bar{n}$	$s\bar{s}$	$c\bar{n}$	$c\bar{s}$	$c\bar{c}$	$b\bar{n}$	$b\bar{s}$	$b\bar{c}$	$b\bar{b}$
$\alpha'_{i\bar{j}}$	0.8886	0.8505	0.8156	0.5866	0.5637	0.4378	0.3343	0.3283	0.2801	0.2059
$\alpha_{i\bar{j}}(0)$	0.4656	0.3173	0.1689	−1.3668	−1.5152	−3.1993	−8.4809	−8.6292	−10.313	−17.427

3.3 径向激发 2^3S_1 多重态的质量

1^3S_1 和 2^3S_1 多重态中相同夸克组分介子的 Regge 斜率相同 [12,22,23]. 由 (4) 式, 结合表 2 中求得的 1^3S_1 的 Regge 斜率, 并将 PDG 中收录的 2^3S_1 介子质量的实验数据代入以下方程:

$$\alpha'_{c\bar{c}}M^2_{\psi(2S)}+\alpha'_{n\bar{n}}M^2_{\rho(1450)}=2\alpha'_{c\bar{n}}M^2_{c\bar{n}}, \tag{23}$$

$$\alpha'_{b\bar{b}}M^2_{\Upsilon(2S)}+\alpha'_{n\bar{n}}M^2_{\rho(1450)}=2\alpha'_{b\bar{n}}M^2_{b\bar{n}}, \tag{24}$$

$$\alpha'_{b\bar{b}}M^2_{\gamma(2S)}+\alpha'_{c\bar{c}}M^2_{\psi(2S)}=2\alpha'_{b\bar{c}}M^2_{b\bar{c}}, \tag{25}$$

$$\alpha'_{n\bar{n}}M^2_{\rho(1450)}+\alpha'_{s\bar{s}}M^2_{\phi(1680)}=2\alpha'_{s\bar{n}}M^2_{s\bar{n}}, \tag{26}$$

$$\alpha'_{c\bar{c}}M^2_{\psi(2S)}+\alpha'_{s\bar{s}}M^2_{\phi(1680)}=2\alpha'_{c\bar{s}}M^2_{c\bar{s}(2^3S_1)}, \tag{27}$$

$$\alpha'_{b\bar{b}}M^2_{\gamma(2S)}+\alpha'_{s\bar{s}}M^2_{\phi(1680)}=2\alpha'_{b\bar{s}}M^2_{b\bar{s}}, \tag{28}$$

可以求得 2^3S_1 多重态中相应成员的质量, $M_{b\bar{n}}=5.813\ \text{GeV}$, $M_{c\bar{n}}=2.588\ \text{GeV}$, $M_{b\bar{c}}=6.896\ \text{GeV}$. $M_{c\bar{s}}=2.705\ \text{GeV}$, $M_{b\bar{s}}=5.917\ \text{GeV}$, $M_{s\bar{n}}=1.573\ \text{GeV}$, 结果列于表 3 中.

表 3 径向激发 2^3S_1 多重态介子质量 (GeV)

2^3S_1	$M_{s\bar{n}}$	$M_{c\bar{n}}$	$M_{c\bar{s}}$	$M_{b\bar{n}}$	$M_{b\bar{s}}$	$M_{b\bar{c}}$
本文	1.573	2.588	2.705	5.813	5.917	6.896
[14]	1.58	2.588	2.696	5.812	5.915	6.895
[42]		2.62	2.73	5.87	5.97	6.90
[45]	1.58	2.64	2.73	5.93	6.010	6.89
[46]		2.629	2.716	5.898	5.984	

3.4 轨道激发态 1^3G_5 介子九重态的质量

由于量子数为 $N^{2S+1}L_J$, $N^{2S+1}(L+2)_{J+2}$, $N^{2S+1}(L+4)_{J+4},\cdots$ 的介子位于同一 Regge 轨迹上, 即具有相同的 Regge 斜率和截距 [7]. 利用 1^3S_1 多重态的质量及已求得的 Regge 斜率, 可以计算 1^3S_1 多重态 Regge 轨迹上的其他多重态相应的质量, 如 1^3D_3, 1^3G_5 多重态等. 1^3D_3 九重态的已经安排完好, 由 (1) 式可得 1^3G_5 多重态中介子质量与 1^3S_1 多重态中相应的介子质量关系为

$$M_{i\bar{j}(1^3G_5)}=\sqrt{M^2_{i\bar{j}(1^3S_1)}+\frac{5-1}{\alpha'_{i\bar{j}}}}, \tag{29}$$

代入数据得到 $\rho_5(1^3G_5)$, $K_5(1^3G_5)$, $\phi_5(1^3G_5)$, $\omega_5(1^3G_5)$ 的质量依次为 2.259, 2.347, 2.438, 2.261 GeV.

4 讨 论

本文在 Regge 唯象下, 首先简要介绍了 Regge 唯象学, 根据 Regge 轨迹基本公式和 Regge 截距、斜率关系式, 得到关于 6 介子质量的两个关系式, 然后利用赝标 1^1S_0 多重态的质量数据计算 B_c 的质量, 对比实验数据检验这两个关系式. 结果表明由 Regge 斜率倒数相加关系 (3) 式得到的 6 介子质量关系 (8) 式能较好地描述当前的介子谱, 而 Regge 斜率相乘性关系 (4) 式得到的 6 介子质量关系 (9) 式不能准确地描述目前的介子谱.

运用验证后的关系 (8) 式计算基态矢量介子多重态 (1^3S_1) 中尚未观测到的双重粲 - 底介子 B_c^* 的质量为 (6355.5 ± 3.5) MeV. 与格点 QCD[38]、势模型 [39−41] 以及基于 QCD 的相对论夸克模型 [42,43] 对比 (见表 1), 结果很符合.

在表 2 中, 列出了求得的基态 1^3S_1 多重态中不同夸克组成的介子的 Regge 轨迹斜率和截距. Regge 截距和斜率参数是强子动力学重要的基本参数, 对谱学和非谱学的研究有重要的意义 [23,26,29], 本文用这些参数计算了 1^3S_1 的径向激发态 (2^3S_1) 和轨道激发态 (1^3G_5) 的质量谱.

在表 3 中, 本文计算的 2^3S_1 介子多重态中 $\bar{s}n$ 态的质量为 1.573 GeV, 与 PDG 中收录的 K*(1410) 质量 (1.415 ± 0.015) GeV 进行对比, 存在很大差异. PDG 2002[3] 曾表示应将 K*(1680) 作为 2^3S_1 的成员而不是 K*(1410). 文献 [47] 的作者也认为 K*(1410) 属于 2^3S_1 介子九重态存在很大问题: 一方面, K*(1410) (1.415 ± 0.015 GeV) 的质量与夸克模型的预言 2^3S_1 多重态中 K 介子态的质量不相符, 另一方面, K*(1410) 衰变方式与 $^3P_0$ 衰变模型预言的 2^3S_1 多重态中 K 介子的衰变方式不符. 与此同时 Törnqvist[48] 开始怀疑 K*(1410) 是否存在. 文献 [14, 49] 也都表示将 K*(1410) 安排在 2^3S_1 的多重态中是不合适的. 本文建议在 1573 MeV 附近寻找和研究 K*(892) 的径向激发态 $\bar{s}n(2^3S_1)$.

在表 3 中, 本文计算的 2^3S_1 介子多重态中 $\bar{n}c$ 态的质量为 2.588 GeV, 与 D(2600) 的质量接近, D(2600) 由 BABAR 实验组在 Dπ 衰变道中观测到 [50]; 平均质量为 (2612 ± 6) MeV, 自旋 - 宇称分析倾向于 $J^P=1^-$. 衰变研究表明 D(2600) 很可能是 2^3S_1 和 1^3D_1 $\bar{n}c$ 的混合中以 $\bar{n}c(2^3S_1)$ 为主的态 [51−55].

在表 3 中, 本文计算的 2^3S_1 介子多重态中 $\bar{s}c$ 态的质量为 2.705 GeV, 与 $D^*_{s1}(2700)$ 的质量接近. $D^*_{s1}(2700)$ 由 BABAR 实验组 [56,57] 和 Belle 实验组 [58] 在 DK 衰变道中观测到, 平均质量为 2709^{+9}_{-6} MeV. 近期 LHCb 实验组 [59] 做了新的测量, $D^*_{s1}(2700)$ 的质量为 $(2709.2\pm1.9\pm4.5)$ MeV, 自旋 - 宇称 $J^P=1^-$. 在 PDG 2012[2] 中, $D^*_{s1}(2700)$ 被安排在 2^3S_1 的 $c\bar{s}$ 成员. 根据 PDG 中收录的 1^3D_1 中 ψ(3770), ρ(1770) 的数值, 运用公式 $2M_{i\bar{j}}>M_{i\bar{i}}+M_{j\bar{j}}$[7] 也可以粗略的计算出 1^3D_1 中 $M_{c\bar{u}}>2746.5$ MeV, 因为 s 夸克的质量大于 u 夸克的质量, 这样可以得出 1^3D_1 中 $M_{c\bar{s}}>2746.5$ MeV, 所以此计算结果表明 $D^*_{s1}(2700)$ 安排在 1^3D_1 中是不合适的. 很多文献的研究表明 $D_{s1}(2700)$ 应该安排为基态矢量介子 D^*_s 的第一径向激发态, 也就是 $\bar{s}c(2^3S_1)$: 将 $D_{s1}(2700)$ 安排为基态矢量介子 D^*_s 的第一径向激发态 $\bar{s}c$ (2^3S_1), 可以解释 $D_{s1}(2700)$ 的质量[45,60−62]. 势模型的研究表明 $D_{s1}(2700)$ 质量和衰变都符合安排为 $\bar{s}c(2^3S_1)$[63]. 根据有效拉矢量分析, 将 $D_{s1}(2700)$ 安排为 $\bar{s}c(2^3S_1)$, 计算得衰变分宽度 $\Gamma(D_{s1}(2700)\to D^*K)/\Gamma(D_{s1}(2700)\to DK)=$

0.91 [64], 与实验值 [57] 接近. 流管模型 [65,66] 和 $^3P_0$ 衰变模型 $D_{s1}(2700)$ 衰变的研究表明, 将 $D_{s1}(2700)$ 安排为激发态 $D_s^*(2112)$ 的第一径向激发态 [67], 计算得到的衰变数据与实验符合. 运用 BS 方程研究 $D_{s1}(2700)$ 对 $B^+ \to \bar{D}^0 D^0 K^+$ 衰变的贡献 [68], 根据 $B^+ \to \bar{D}^0 + D_{sJ}^+(2S)$ 和 $B^+ \to \bar{D}^0 + D_{sJ}^+(1D)$ 衰变分支比的大小, 对比 Belle 的实验值 [58], 将 $D_{s1}^*(2700)$ 应该安排为 $D_{sJ}^+(2S)$ 更合适. 也有研究文献讨论 $D_{s1}^*(2700)$ 可能是 2^3S_1 和 1^3D_1 的混合 [69,70]. 综上, 将 $D_{s1}^*(2700)$ 当作纯的 $\bar{s}c(1^3D_1)$ 成员是不合理的, 本文支持 $D_{s1}^*(2700)$ 主要为 2^3S_1 的 $\bar{s}c$ 成分, 可能混合一部分 $\bar{s}c$ (1^3D_1) 成分. 未来需要更多的实验证据和进一步的理论分析.

在表 3 中, 本文计算的 $\bar{b}n(2^3S_1)$, $\bar{b}s(2^3S_1)$, $\bar{b}c(2^3S_1)$ 的质量分别为 5812, 5917, 6896 MeV, 目前实验上还没有发现它们的候选态, 在表 2 中列出了一些其他理论方法得到的结果. 建议实验上分别在 5812, 5917, 6896 MeV 附近寻找 $\bar{b}n(2^3S_1)$, $\bar{b}s(2^3S_1)$, $\bar{b}c(2^3S_1)$ 矢量介子态. 激发态底 - 介子可以在 LHC, BABAR, BELLE 等高能级实验中寻找.

本文计算的轨道激发态 1^3G_5 介子九重态 $\rho_5(1^3G_5)$, $K_5(1^3G_5)$, $\phi_5(1^3G_5)$, ω_5 (1^3G_5) 的质量依次为 2.259, 2.347, 2.438, 2.261 GeV. 其中, 本文计算得出的 $\rho_5(1^3G_5)$ 的质量 (2359 MeV) 与文献 [71] 作者根据实验得到的 ρ_5 的质量 (约等于 2250 MeV) 大致相符, 文中提到 $\bar{p}p \to \pi^-\pi^+$, 并指出 2250 MeV 作为 ρ_5 的质量会更合适. PDG 中收录的各个实验组测量的 ρ_5 (2350) 的质量差别较大, 为 2250—2500 MeV, 因此, 本文建议实验上在 2259 MeV 附近进一步研究 $\rho_5(1^3G_5)$ 的性质. 本文计算得出的 $\omega_5(1^3G_5)$ 的质量为 2261 MeV, 在 PDG 中 Further States 上, 文献 [72] 的作者根据实验得出 $\omega_5(2250)$ 质量为 (2250 ± 70) MeV, 在误差允许范围内数值相符, 量子数完全符合. 本文建议 $\omega_5(2250)$ 可以被安排为 1^3G_5 九重态中的同位旋标量态 $(I = 0)$. 本文计算得出的 $K_5(1^3G_5)$ 的质量为 2347 MeV, 在最新版的 PDG 中增加了对 $K_5^*(2380)$ 的安排, 安排为 $\bar{s}n(1^3G_5)$ 态. $K_5^*(2380)$ 的质量为 $(2382 \pm 14 \pm 19)$ MeV, 量子数完全符合 K_5 (1^3G_5) 的量子数, 本文支持将 K_5^* (2380) 安排为 1^3G_5 介子九重态的同位旋双重态 (isodoublet). 本文计算得出的 $\phi_5(1^3G_5)$ 的质量为 2438 MeV, 目前实验上还没有合适的候选态, 建议在 2438 MeV 附近寻找 $\phi_5(1^3G_5)$.

5 小 结

综上所述, 小结如下: 1) 斜率相乘性关系不能准确地描述当前的介子谱, 同时斜率倒数相加性关系可以很好地描述介子谱; 2) 建议在 6355 MeV 附近寻找和研究 B_c^* 介子; 3) 将 $K^*(1410)$ 安排在 2^3S_1 多重态是需要重新检验的; 建议将 D(2600) 作为主要成分为 $\bar{n}c(2^3S_1)$ 的态进行研究; 将 $D_{s1}(2700)$ 当作纯的 $\bar{s}c(1^3D_1)$ 不合理, 可以作为主要成分为 $\bar{s}c(2^3S_1)$ 的态进行研究; 实验上分别在 5812, 5917, 6896 MeV 附近寻找矢量介子第一径向激发态 $\bar{b}n(2^3S_1)$, $\bar{b}s$ (2^3S_1), $\bar{b}c(2^3S_1)$; 4) 本文支持将 ω_5 (2250) 安排在 1^3G_5 多重态, 建议实验上在 2259 MeV 附近进一步研究 ρ_5 (2350) 的性质, 在 2438 MeV 附近寻找和研究 $\phi_5(1^3G_5)$. 本文研究对于通过实验寻找新的介子激发态和进一步研究其自旋-宇称安排有意义. 在不久的将来可以在 BES-III, LHC 等实验装置中验证.

[1] Godfery S, Napolitano J N 1999 *Rev. Mod. Phys.* **71** 1411
[2] Beringer J (Particle Data Group) 2012 *Phys. Rev.* D **86** 010001
[3] Hagiwara K (Particle Data Group) 2002 *Phys. Rev.* D **66** 1
[4] Nakamura K (Particle Data Group) 2010 *J. Phys.* G **37** 075021
[5] Li B Q, Chao K T 2009 *Phys. Rev.* D **79** 094004
[6] Wei K W, Guo X H 2010 *Phys. Rev.* D **81** 076005
[7] Guo X H, Wei K W, Wu X H 2008 *Phys. Rev.* D **78** 056005
[8] Wei K W, Dong X P, Lü G 2011 *Int. J. Mod. Phys.* A **26** 2065
[9] Feng X C, Wei K W, Wu J, Zhang Y Q, Wu M Y, Jiang F C 2013 *Adv. High Energy Phys.* **2013** 704529
[10] Guo S H 1965 *Acta Phys. Sin.* **21** 1689 (in Chinese) [郭硕鸿 1965 物理学报 **21** 1689]
[11] Ebert D, Faustov R N, Galkin V O 2011 *Eur. Phys. J.* C **71** 1825
[12] Anisovich A V, Anisovich V V, Sarantsev A V 2000 *Phys. Rev.* D **62** 051502(R)
[13] Zhang A 2007 *Phys. Lett.* B **647** 140
[14] Li D M, Wei K W, Yu H 2005 *Eur. Phys. J.* A **25** 263
[15] Feng X C, Wei K W, Zhang G J 2006 *Chin. Phys.* **15** 2906
[16] Liu Y H 2009 *Chin. Phys.* B **18** 1828
[17] Feng X C, Jiang F C, Chang T Q, Feng J L 2008 *Chin. Phys.* B **17** 4472
[18] Feng X C, Li D M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4084 (in Chinese) [冯学超, 李德民 2005 物理学报 **54** 4084]
[19] Feng X C, Wei K W 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 101101
[20] Feng X C, Chang T Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 231401 (in Chinese) [冯学超, 常同钦 2012 物理学报 **61** 231401]
[21] Lü J, Yang G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 101201 (in Chinese) [吕健, 杨光 2011 物理学报 **60** 101201]

[22] Li D M, Ma B, Liu Y H 2007 *Eur. Phys. J.* C **51** 359
[23] Li D M, Ma B, Li Y X, Yao Q K, Yu H 2004 *Eur. Phys. J.* C **37** 323
[24] Regge T 1959 *Nuovo Cim.* **14** 951
[25] Chew G F, Frautschi S C 1962 *Phys. Rev. Lett.* **8** 41
[26] Burakovsky L, Goldman T 1998 *Phys. Lett.* B **434** 251
[27] Tashiro T 1987 *Z. Phys.* C **35** 21
[28] Lykasov G I, Sergeenko M N 1991 *Z. Phys.* C **52** 635
[29] Basdevant J L, Boukraa S 1985 *Z. Phys.* C **28** 413
[30] Kaidalov A B 1982 *Z. Phys.* C **12** 63
[31] Brower R C, Ellis J, Schmidt M G, Weis J H 1977 *Nucl. Phys.* B **128** 175
[32] Kobylinsky N A, Martynov E S, Prognimak A B 1979 *Ukr. Fiz. Zh.* **24** 969
[33] Dixit V V, Balazs L A P 1979 *Phys. Rev.* D **20** 816
[34] Pasupathy J 1976 *Phys. Rev. Lett.* **37** 1336
[35] Igi K 1977 *Phys. Lett.* B **66** 276
[36] Cassing W, Kondratyuk L A, Lykasov G I, Rzjanin M V 2001 *Phys. Lett.* B **513** 1
[37] Aaij R (LHCb Collab.) 2012 *Phys. Rev. Lett*. **109** 232001
[38] Davies C T H, Hornbostel K, Lepage G P, Lidsey A J, Shigemitsu J, Sloan J H 1996 *Phys. Lett.* B **382** 131
[39] Chen Y Q, Kuang Y P 1992 *Phys. Rev.* D **46** 1165
[40] Fulcher L P 1999 *Phys. Rev.* D **60** 074006
[41] Rai A K, Vinodkumar P C 2006 *Pramana* **66** 953
[42] Zeng J, Van Orden J W, Roberts W 1995 *Phys. Rev.* D **52** 5229
[43] Godfrey S 2004 *Phys. Rev.* D **70** 054017
[44] Wang Z G 2012 arXiv:1203.6252 [hep-ph]
[45] Godfrey S, Isgur N 1985 *Phys. Rev.* D **32** 189
[46] Ebert D, Galkin V O, Faustov R N 1998 *Phys. Rev*. D **57** 5663
[47] Li D M, Ma B, Feng X C, Yu H 2005 *Mod. Phys. Lett.* A **20** 2497
[48] Törnqvist N A 1991 *Nucl. Phys.* B **21** (Proc. Suppl.) 196
[49] Burakovsky L, Goldman T 1997 *Nucl. Phys.* A **625** 220
[50] del Amo Sanchez P (BABAR Collab.) 2010 *Phys. Rev*. D **82** 111101
[51] Zhong X H 2010 *Phys. Rev*. D **82** 114014
[52] Sun Z F, Yu J S, Liu X, Matsuki T 2010 *Phys. Rev*. D **82** 111501
[53] Li D M, Ma B 2010 *Phys. Rev.* D **81** 014021
[54] Wang Z G 2011 *Phys. Rev*. D **83** 014009
[55] Zhou Z Y, Xiao Z 2012 *Phys. Rev.* D **84** 034023
[56] Aubert B (BABAR Collab.) 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 222001
[57] Aubert B (BABAR Collab.) 2009 *Phys. Rev.* D **80** 092003
[58] Brodzicka J (Belle Collab.) 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 092001
[59] Aaij R (LHCb Collab.) 2012 *J. High Energy Phys.* **1210** 151
[60] Ebert D, Faustov R N, Galkin V O 2010 *Eur. Phys. J.* C **66** 197
[61] Matsuki T, Morii T, Sudoh K 2007 *Eur. Phys. J.* A **31** 701
[62] Badalian A M, Bakker B L G 2011 *Phys. Rev.* D **84** 034006
[63] Devlani N, Rai A 2011 *Phys. Rev.* D **84** 074030
[64] Colangelo P, De Fazio F, Giannuzzi F, Nicotri S 2012 *Phys. Rev.* D **86** 054024
[65] Chen B, Wang D X, Zhang A 2009 *Phys. Rev.* D **80** 071502
[66] Wang D X, Chen B, Zhang A 2011 *Chin. Phys.* C **35** 525
[67] Segovia J, Entem D R, Fernández F 2012 *Phys. Lett.* B **715** 322
[68] Wang G L, Zhang J M, Wang Z H 2009 *Phys. Lett.* B **681** 326
[69] Close F E, Thomas C E, Lakhina O, Swanson E S 2007 *Phys. Lett*. B **647** 159
[70] Li D M, Ji P F, Ma B 2011 *Eur. Phys. J.* C **71** 1582
[71] Martin A D, Pennington M R 1980 *Nucl. Phys.* B **169** 216
[72] Anisovich A V, Baker C A, Batty C J, Bugg D V, Montanet L, Nikonov V A, Sarantsev A V, Sarantsev V V, Zou B S 2002 *Phys. Lett.* B **542** 19

Study of vector mesons and its excited states*

Wei Ke-Wei[1)2)†] Chen Bing[1)] Wang Zhen-Yang[1)3)] Qi Jing-Juan[1)]
Chen Xin-Yun[1)] Weng Ming-Hua[4)]

1) (*College of Physics and Electrical Engineering, Anyang Normal University, Anyang* 455000, *China*)

2) (*Theoretical Physics Center for Sciences Facilities, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

3) (*College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*)

4) (*Department of Physics and Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou* 350108, *China*)

(Received 5 June 2013; revised manuscript received 1 July 2013)

Abstract

Based on the Regge phenomenology, we first study the mass relations for six mesons involving three flavors in one spin-parity multiplet. Using the examined mass relation, mass of the unobserved vector doubly heavy charm-bottom $\mathrm{B}_c^*(1^3S_1)$ is calculated. Masses of the unobserved radial excited vector (2^3S_1) mesons and the orbital excited 1^3G_5 meson nonet are given. Our predictions are discussed. We suggest searching B_c^* near 6355 MeV. D(2600) and $\mathrm{D}_{s1}(2700)$ can be considered as candidates for $\bar{n}c(2^3S_1)$ and $\bar{s}c(2^3S_1)$ dominated states, respectively. We suggest searching $\mathrm{B}^*(2\mathrm{S})$, $\mathrm{B}_s^*(2\mathrm{S})$ and $\mathrm{B}_c^*(2\mathrm{S})$ near 5812, 5917 and 6896 MeV, respectively. We suggest restudying $\rho_5(2350)$ near 2259 MeV, searching $\phi_5(1^3G_5)$ near 2438 MeV and identifying $\omega_5(2250)$ as isoscalar member of 1^3G_5 nonet. The results may be profoundly useful for the J^P assignment of related states and the discovery of the unobserved excited mesons.

Keywords: Regge phenomenology, vector meson, mass spectrum

PACS: 11.55.Jy, 12.40.Yx, 14.40.−n, 12.10.Kt **DOI:** 10.7498/aps.62.181101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11147197, U1204115, 11247287, 11275025, 11261130311), the Key Program of Scientific and Technological Research of the Education Department of Henan Province, China (Grant Nos. 12B140001, 13A140014) and the Innovation Fund of Undergraduate at Anyang Normal University, China (Grant No. ASCX/2013-Z62).

† Corresponding author. E-mail: weikw@hotmail.com