

低磁场下驻波对螺旋波等离子体均匀性的影响

牛晨 刘忠伟 杨丽珍 陈强

Effect of standing wave on the uniformity of a low magnetic field helicon plasma

Niu Chen Liu Zhong-Wei Yang Li-Zhen Chen Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 045201 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.045201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.045201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分幅变像管动态空间分辨率的标定

Calibration of the dynamic spatial resolution of framing image-converter

物理学报.2016, 65(9): 095202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.095202>

碰撞等离子体中电中性条件对单探针测量的约束

The electrical-neutrality constraint of single Langmuir probe measurement in collisional plasma

物理学报.2015, 64(11): 115201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.115201>

高气压均匀直流辉光放电等离子体的光学特性

Optical properties of direct current glow discharge plasmas at high pressures

物理学报.2015, 64(4): 045206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.045206>

声驻波场中空化泡的动力学特性

Dynamical behaviors of cavitation bubble under acoustic standing wave field

物理学报.2015, 64(12): 124702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124702>

电子在激光驻波场中运动产生的太赫兹及X射线辐射研究

Motion-induced X-ray and terahertz radiation of electrons captured in laser standing wave

物理学报.2015, 64(12): 124104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124104>

低磁场下驻波对螺旋波等离子体均匀性的影响*

牛晨 刘忠伟 杨丽珍 陈强†

(北京印刷学院等离子体物理及材料研究室, 北京 102600)

(2016年10月16日收到; 2016年11月23日收到修改稿)

螺旋波放电具有很高的耦合效率, 作为一种高密度等离子体源在材料表面处理、薄膜沉积、离子推进器等领域具有广阔的应用前景. 不同的波模式下能量耦合的方式直接关系到源区的等离子体分布, 进而影响扩散腔中材料的处理和沉积薄膜的均匀性. 本文通过电特性(功率-电流)曲线、增强型电荷耦合相机和磁探针诊断等方式对螺旋波等离子体源中出现的角向不均匀性进行研究, 认为天线下端出现的驻波螺旋波可能是造成这种现象的关键因素.

关键词: 驻波, 均匀性, 波诊断

PACS: 52.70.-m

DOI: 10.7498/aps.66.045201

1 引言

螺旋波是有界的哨声波, 频率介于离子回旋频率与电子回旋频率之间 ($\omega_{ci} < \omega < \omega_{ce}$)^[1]. 在非磁化等离子体中, 电磁波频率小于等离子体频率 ($\omega < \omega_{pe}$) 时, 不能在等离子体中传播, 只能在表面加热电子. 然而, 当存在一个轴向静磁场 (B_0) 时, 通过激发螺旋波可以传播进入等离子体中, 进行体加热等离子体, 获得高的功率耦合效率. 大量研究表明, 在绝缘边界处存在波模式的另一个组成分支——Trivelpiece-Gould (TG) 波. 然而由于短波长、高阻尼的特性, TG波主要在径向边界处耦合^[2]. 二者的分界面在无碰撞趋肤深度 $\delta = c/\omega_{pe}$ 处^[3].

工业应用中需要高密度、均匀等离子体源. 螺旋波源区中的等离子体均匀性主要由不同模式的波场分布决定^[4]. 体吸收的螺旋波与表面吸收的TG波能量沉积区域在径向上存在明显差异, 且螺旋波的径向电场分布随传播角度改变也会发生变化, 造成螺旋波等离子体径向能量沉积区域的

变化. 角模量 $m = +1$ 的名古屋型天线通过 CCD (charge coupled device) 图像发现存在等离子体角向不均匀分布^[5], 他们认为这是由于存在比较高的静电耦合, 从而产生了不均匀的高密度等离子体区. 在实验中也发现, 采用不同角模式^[6] ($m = +/ - 1, m = +/ - 2$) 的天线, 在角向得到不同数量的轴向高密度等离子体柱的现象. 此外, 对采用静电探针^[7-10]、磁探针^[11-13]、发射光谱强度^[14-15] 径向扫描诊断的实验中出现的电子密度分布、磁场幅值及发射强度不对称性现象目前还缺乏讨论与解释.

本文研究双马鞍型天线 ($m = +/ - 1$) 在低磁场下源区耦合的角向不均匀性问题及其产生的原因. 测量的功率-电流曲线表明低磁场下的放电为高效的波模式放电, ICCD (intensified charge coupled device) 诊断发现, 这种波模式放电存在明显的角向不均匀表面加热现象, 磁探针的轴向测量发现在天线下端激发了驻波螺旋波. 考虑到驻波螺旋波对于强阻尼静电波的转化耦合, 我们认为等离子体的角向不均匀功率吸收是由于驻波螺旋波引发的.

* 国家自然科学基金(批准号: 11375031, 11505013)和北京市自然科学基金(批准号: 4162024, KZ201510015014, KZ04190116009/001, KM201510015009, KM201510015002)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lppmchenqiang@hotmail.com

2 实验及诊断装置

图 1(a) 为实验装置简图, 图 1(b) 为天线处最大磁场强度为 100 G 时静磁场轴向分布图. 如图 1(a) 所示, 45 cm 长石英源管外为直径 0.5 cm 铜管制作的长约 16 cm (图 1(b) 中 $z = 20\text{--}36\text{ cm}$) 双马鞍型天线, 天线通过自动匹配器与 10 kW 射频电源 (13.56 MHz) 连接. 20 sccm ($1\text{ sccm} = 1\text{ mL/min}$) 氩气由放电管上端通入, 形成 0.3 Pa 放电气压. 放电管下端处 ($z = 45\text{ cm}$) 与接地不锈钢扩散腔连接, 基片台通过陶瓷支撑架与腔室保持绝缘. 抽气系统由涡旋分子泵和机械泵组成. 电压 ($V\text{-probe}$)、电流探头 ($I\text{-probe}$) 测量位置如图 1(a) 所示, ICCD 图像是通过基片台上放置的 45° 平面镜得到的等离子体截面轴向积分图. 磁探针使用串联同轴线方法制作 [16], 探头直径为 0.4 cm, 使用 4 匝漆包线缠绕而成. 通过同轴线与变压器连接, 信号通过示波器显示出来. 得到的数字信号经过傅里叶滤波 (10—16 MHz) 得到幅值, 参考电流探头信号得到相位 [17].

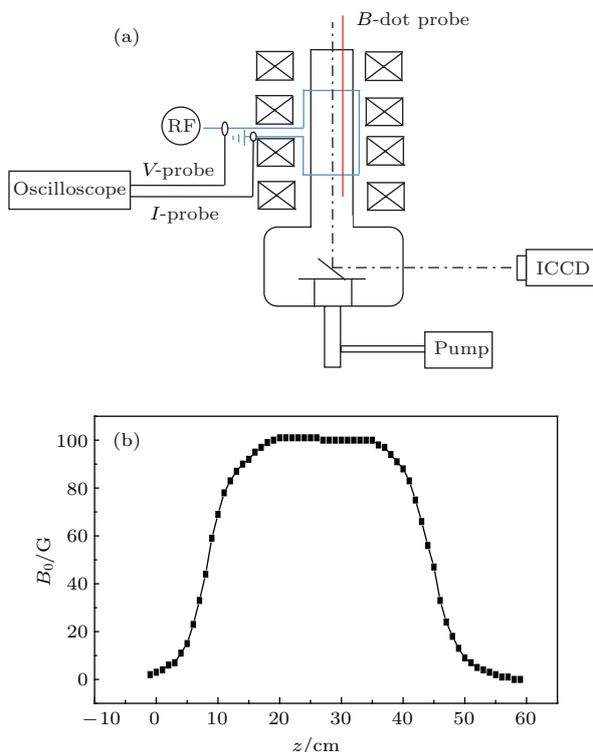


图 1 (a) 实验装置简图; (b) 100 G 静磁场 (B_0) 时的轴向分布
 Fig. 1. (a) The schematic diagram of experimental setup; (b) the axial distribution of 100 G static magnetic field (B_0).

3 结果与讨论

螺旋波等离子体中的波模式激发可以由功率-电流特性曲线测量诊断. 图 2 所示为功率-电流的对数变化曲线图. 其中图 2(a) 为 0 G 条件下的曲线, 放电类似于感性耦合等离子体. 开始几个点处的数值较拟合曲线偏低是因为发生低功率时容性放电, 耦合效率较低. 当外加磁场为 100 G 时, 功率-电流曲线发生如图 2(b) 所示跳变, 放电在高功率模式下发生变化.

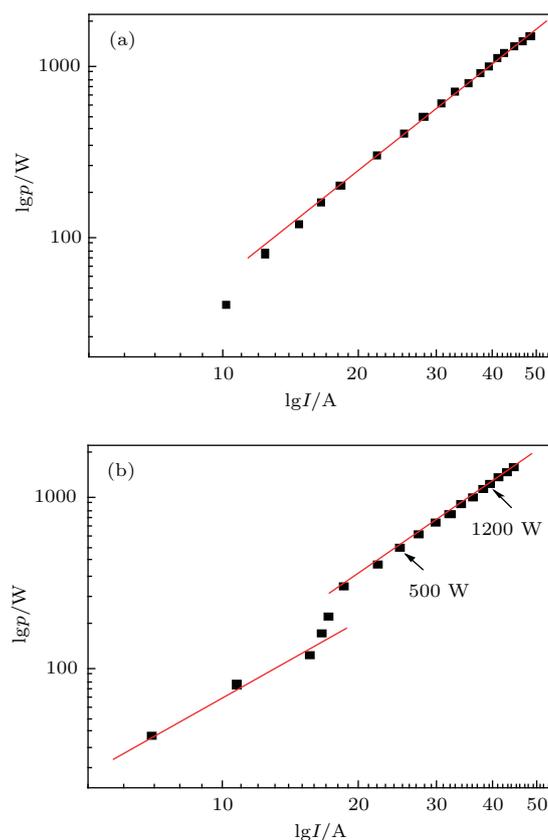


图 2 不同磁场强度下外加电源功率-电流对数变化曲线 (a) 0 G; (b) 100 G
 Fig. 2. The applied power versus current in the static magnetic field: (a) 0 G; (b) 100 G.

我们采用 ICCD 来诊断图 2 中放电模式变化引起的等离子体表面功率吸收现象. 图 3(a) 为放电功率 1200 W、外加磁场为 0 G 时的放电图像. 可以看到在零磁场条件下, 角向分布较为均匀, 为典型的感性放电模式. 而当外加磁场 100 G、放电功率仍为 1200 W 时, 从图 3(b) 中可以看到, 等离子体密度出现明显的角向不均匀性, 等离子体加热主要集中在斜对角的两个天线处 [18].

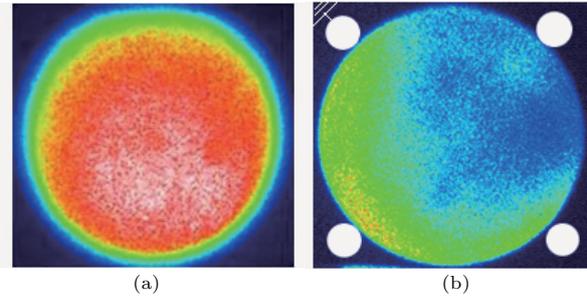


图3 (网刊彩色) ICCD 获得的放电截面图像 (a) 放电功率 1200 W、外加磁场 0 G; (b) 放电功率 1200 W、外加磁场 100 G (图中白点为天线四个腿位置, 图像曝光时间分别是 (a) 1 ms; (b) 2 ns)

Fig. 3. (color online) ICCD cross section image: (a) 1200 W discharge power, 0 G static magnetic field; (b) 1200 W discharge power, 100 G static magnetic field (the white dots in the image denote the four antenna legs, the exposure times: (a) 1 ms; (b) 2 ns).

先前采用朗缪尔探针测量等离子体密度时发现, 在 300 G 高磁场时出现等离子体密度的第二次跳变^[19], 从 ICCD 图像可以清楚看到中心“big-blue”加热现象, 认为“bigblue”的出现及等离子体中心加热是由于螺旋波的体吸收, 在径向密度梯度构成的势阱中会形成一个接近天线频率的径向局域螺旋波本征模式^[20]. 这与 100 G 时从图 3(b) 观察到的一次模式转变存在明显的不同. 我们推测这可能和螺旋波传播方式有关.

为了证实用 ICCD 发现的等离子体角向加热分布不均匀现象可能是由于螺旋波在轴向传播形成驻波引起的, 我们采用磁探针测量方法进一步诊断. 其中, 磁探针通过放电管上端板进入等离子体中, 测量磁场 B_z 轴向分布如图 4 所示, 图中 20 cm 和 36 cm 虚线分别对应天线的上、下两端.

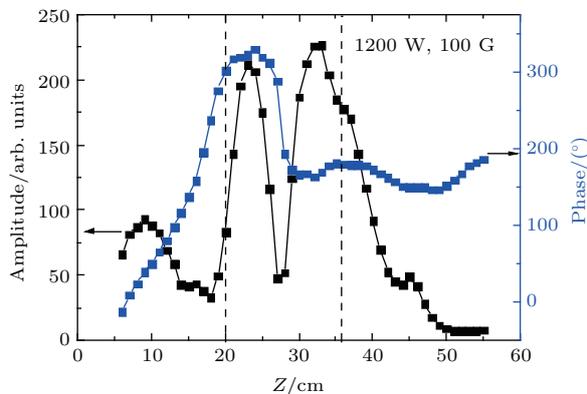


图4 (网刊彩色) 磁探针测量轴向 B_z 分布图 (放电功率 1200 W, 外加磁场 100 G, 图中虚线为天线位置)

Fig. 4. (color online) The B_z distribution in the axial by B-dot probe (1200 W discharge power, 100 G static magnetic field, the inserted dash line is the antenna position).

从图 4 中可以看到, 磁场幅值在天线区域内出现两个大的波峰, 相位在天线中间发生一次翻转, 这是典型驻波的特征. 在天线上端到端板处 ($Z = 5-20$ cm) 有一个小的波峰, 相位迅速线性减小, 为行波的特征. 可见波是从天线位置往源管上端传播.

在天线下端, 波场强度相对上端较弱, 宽度有明显展宽, 相位变化较小, 为驻波特点. 即在天线的上、下两端处, 波具有不同的传播特性: 上端为行波传输, 下端为驻波传输.

对图 2 的结果分析可以根据公式 $P = I^2 \times R$, 对两边取对数后得到:

$$\lg P = 2 \times \lg I + \lg R, \quad (1)$$

其中, P 为放电功率, I 为电流, R 为天线和等离子体等效电阻.

当发生模式转变时由于波模式的高耦合效率, 等离子体密度在模式转变处会有明显的跳跃, 等离子体有效电阻会增加. 图 2(b) 显示等离子体电阻发生明显的跃变, 有效电阻增大, 即证明了放电模式向波模式转变, 与图 2(a) 0 G 条件下容性到感性放电的变化相比, 效率明显增加.

我们进一步分析天线处高电势点和等离子体之间存在的静电场耦合是否是造成等离子体角向加热分布不均匀的因素. 由图 3(b) 的 ICCD 图像, 我们注意到在天线的左上角处接地为电势最低点, 形成一处电子加热点, 其他三处也应当形成类似的加热点. 另外, 在磁场存在的情况下, 电子拉摩半径很小, 天线的四根腿感应加热在等离子体中应该出现四个对称的轴向感应电场驱动电子流, 对应四个加热点. 但是从实验得到的图像中发现, 电子加热普遍集中在斜对角 (图 3(b) 的左上和右下) 天线端, 而不是出现在全部四个点处. 根据 Chen^[21] 计算的径向电场分布图, $m = +1$ 波的电场随时间和轴向距离绕圆心旋转, 当螺旋波在轴向传播形成驻波时, 径向电场的分布不再旋转, 电场分布最强的两处位于直径上相对的两点. 这可以解释在图 3(b) 的 ICCD 图像中斜对角形成的两个高密度区.

螺旋波在共振锥角内与磁场以一定角度传播^[22], 而天线处的波长由天线长度决定, 平行波数 ($k_{//}$) 不变. 螺旋波的色散关系方程为^[23]

$$k = \frac{\omega}{k_{//}} \frac{e\mu_0 n_e}{B_0}, \quad (2)$$

其中, k 为总波数, e 为电子电荷量, μ_0 为真空磁导率, n_e 为电子密度.

石英源管下端 ($Z = 45$ cm) 与不锈钢腔室相连, 边界条件发生变化, 垂直波数 (k_{\perp}) 不再固定不变, 波数 k 随磁场的减小而增大, 传播角 $\theta = \arccos(k_{\parallel}/k)$ 变大, 而共振锥角 $\alpha = \arccos(\omega/\omega_{ce})$ 随磁场的减小而减小. 哨声波在共振锥角处表现为纯静电 TG 波特性的, 在平行磁场时表现为纯的螺旋波特性^[24], 所以波的传播以更加接近共振锥角来传播. 哨声波中有更多的静电特性可以解释图 3 (b) 的 ICCD 图像中所示的放电等离子体表面加热现象.

螺旋波等离子体中的波模式有很多种, 主要为螺旋波和 TG 波两部分组成. 由于螺旋波与 TG 波能量沉积在径向区域的差别, 二者的线性模式转化对等离子体吸收和均匀分布具有很重要的影响. 在高磁场下, 反共振区的 TG 波会被抑制, 螺旋波的体加热可能会成为主要的功率耦合方式, 出现了“bigblue”现象. 而低磁场下, 对于第一纵向螺旋波模式^[22](纵向模数 $\chi = 0$) 来说, 其吸收长度一般远大于设备的长度, 不会有高耦合效率. TG 波作为强阻尼的表面波, 是主要的射频功率耦合通道. 而驻波螺旋波对边界电荷的扰动, 对于静电 TG 波的线性耦合转换具有重要的作用^[3]. 综上所述, 我们认为是驻波螺旋波引发了角向边界的非均匀加热, 造成低磁场下等离子体角向分布不均匀的现象.

4 结 论

螺旋波等离子体在源区波的角向耦合关系到等离子体的角向分布均匀性, 对于扩散性等离子体源具有重要的意义. 采用功率-电流曲线我们证明了波模式的高效耦合, 对于 ICCD 图像中出现的角向等离子体分布不均匀性, 磁探针测量结果表明可能和天线下端形成驻波螺旋波有关, 在放电管边界处转换的表面强阻尼 TG 波, 造成了角向边界的不均匀加热. 因此, 为了得到角向均匀的表面加热, 通过改变天线下端螺旋波的传播特性, 可能会实现对于源区等离子体密度分布的优化.

参考文献

- [1] Chen F F 2015 *Plasma Sources Sci. Technol.* **24** 014001
- [2] Chen F F, Blackwell D D 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 2677
- [3] Shamrai K P, Taranov V B 1996 *Plasma Sources Sci. Technol.* **5** 474
- [4] Wilczek S, Trieschmann J, Eremin D, Brinkmann R P, Schulze J 2015 *Physics* **172** 425
- [5] Blackwell D D, Chen F F 1997 *Plasma Sources Sci. Technol.* **6** 569
- [6] Kim J H, Yun S M, Chang H Y 1996 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **24** 1364
- [7] Degeling A W, Jung C O, Boswell R W, Ellingboe A R 1996 *Phys. Plasmas* **3** 2788
- [8] Franck C M, Grulke O, Klinger T 2003 *Phys. Plasmas* **10** 323
- [9] Kramer M, Lorenz B, Clarenbach B 2002 *Plasma Sources Sci. Technol.* **11** 120
- [10] Perry A J, Vender D, Boswell R W 1991 *J. Vac. Sci. Technol. B* **9** 310
- [11] Shinohara S, Yonekura K 2000 *Plasma Phys. Control. Fusion* **42** 41
- [12] Loewenhardt P K, Blackwell B D, Boswell R W, Conway G D, Hamberger S M 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 2792
- [13] Boswell R W 1984 *Plasma Phys. Control. Fusion* **26** 1147
- [14] Boswell R W, Porteous R, Prytz A, Bouchoule A, Ranson P 1982 *Phys. Lett. A* **91** 163
- [15] Lieberman M A, Lichtenberg A J 2005 *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (New York: John Wiley) p19
- [16] Sun B, Huo W G, Ding Z F 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 085112
- [17] Franck C M, Grulke O, Klinger T 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **73** 3768
- [18] Ma C 2014 *M. S. Thesis* (Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication) (in Chinese) [马超 2014 硕士学位论文 (北京: 北京印刷学院)]
- [19] Zhao G, Xiong Y Q, Ma C, Liu Z W, Chen Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 235202 (in Chinese) [赵高, 熊玉卿, 马超, 刘志伟, 陈强 2014 物理学报 **63** 235202]
- [20] Breizman B N, Arefiev A V 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 3863
- [21] Chen F F 1991 *Plasma Phys. Control. Fusion* **33** 339
- [22] Chabert P, Braithwaite N 2011 *Physics of Radio-Frequency Plasmas* (London: Cambridge University Press and Science Press) p276
- [23] Jane P C, Chen F F 2002 *Lecture Notes on Principles of Plasma Processing* (London: Plenum/Kluwer) p62
- [24] Borg G G, Boswell R W 1998 *Phys. Plasmas* **5** 564

Effect of standing wave on the uniformity of a low magnetic field helicon plasma*

Niu Chen Liu Zhong-Wei Yang Li-Zhen Chen Qiang[†]

(Lab of plasma physics and materials, Beijing Institute of graphic communication, Beijing 102600, China)

(Received 16 October 2016; revised manuscript received 23 November 2016)

Abstract

Helicon wave discharge has higher coupling efficiency than capacitively coupled and inductively coupled discharge in low static magnetic field. In the wave sustained mode, a large volume and large area plasma can be produced at lower pressure by using comparable discharge power, and thus it expands the helicon wave plasma applications in material surface modification, thin film deposition, dry etching and thruster usage. However, the application of helicon wave source still faces challenges, such as the controversial power coupling mechanism, operation stability and the plasma distribution uniformity in the experiment. The wave mode existing in bounded helicon wave plasma column generally consists of helicon and Trivelpiece-Gould (TG) components, and their mode transitions and different transverse wave field distribution regions, and the propagating characteristic of the helicon wave are directly related to the power coupling and plasma density distribution in the source region, then affect the uniformity of material processing and film deposition in the diffusion chamber. In this paper, the plasma azimuthal non-uniformity, with using Double Saddle antenna, 100 G static magnetic field in helicon wave plasma source, is studied by electrical characteristic (power-current) curve, intensified charge coupled device (ICCD) image and magnetic probe measurements. The electrical characteristic curve indicates two discharge stages with different effective resistances. Meanwhile, in the second stage, the higher effective resistance would result in higher coupling efficiency and higher plasma density. But the ICCD image demonstrates the azimuthal non-uniformity of plasma, indicating that the main heating points at the diagonal edge are linked to the stationary transverse electrical field line pattern of azimuthal mode number $m = +1$ helicon wave, and the magnetic probe is used to measure the helicon wave magnetic field B_z component along the quartz source tube axially. The magnetic probe results show that the standing wave appearing below the antenna even though in the upper region of the antenna is characteristic of the traveling wave. Furthermore, at the plasma boundary, the standing wave can be coupled to the TG wave, and not like travelling wave it has no angular rotation of the electric field and may cause the non-uniform coupling between the helicon and TG components. The TG wave then has azimuthal non-uniform electron heating. Therefore, the standing helicon wave below the antenna is the key factor to the plasma non-uniformity problem. Changing the propagating characteristics of the helicon wave further in the plasma column will be of positive significance for optimizing the discharge efficiency of the plasma source and controlling the plasma distribution uniformity, stability and other operations as well.

Keywords: standing wave, uniformity, wave diagnostic

PACS: 52.70.-m

DOI: 10.7498/aps.66.045201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11375031, 11505013) and the Beijing Municipal National Science Foundation, China (Grant Nos. 4162024, KZ201510015014, KZ04190116009/001, KM201510015009, KM201510015002).

[†] Corresponding author. E-mail: lppmchenqiang@hotmail.com