

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.015

# 叶轮进口边位置对深井离心泵水力性能的影响\*

周 岭 施卫东 陆伟刚 黄 萍 裴 冰

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

**【摘要】** 针对一典型的150QJ20型深井离心泵,设计了3种进口边位置的叶轮,基于Fluent软件,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型、SIMPLEC算法对其进行了全流场数值计算,对不同进口边位置的叶轮出口断面的压力场、湍流场和速度场进行了比较,并结合试验分析了进口边位置对深井离心泵水力性能的影响。结果表明,适当延伸叶轮进口边,增加后流线的长度,可以减小叶轮出口的湍流强度,改善流场分布;可以相对减小叶轮进口直径和叶轮进口的冲击损失,提高深井离心泵的水力性能。

**关键词:** 深井离心泵 叶轮 流场 水力性能 数值模拟

**中图分类号:** TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0078-05

## Hydraulic Performance Effect of Impeller Inlet Edge Position on Deep-well Centrifugal Pump

Zhou Ling Shi Weidong Lu Weigang Huang Ping Pei Bing

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

For a typical 150QJ20 type deep-well centrifugal pump, three positions of the impeller inlet edge were designed. The whole flow field of the deep-well centrifugal pump was simulated with Fluent code based on standard  $k-\varepsilon$  turbulence model and the SIMPLEC arithmetic. The static pressure and turbulent flow field were compared, the impact of the position of impeller inlet edge on the hydraulic performance was analyzed. The results showed that appropriate extend the impeller inlet edge could reduce the turbulence intensity of impeller exports and improve the flow field, also could reduce the impeller inlet diameter and increase the hydraulic performance of deep-well centrifugal pump.

**Key words** Deep-well centrifugal pump, Impeller, Flow field, Hydraulic performance, Numerical simulation

### 引言

深井离心泵是抽取地下水的主要设备,在众多领域都有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。陆伟刚等<sup>[3]</sup>提出了深井离心泵叶轮极大直径设计法,取叶轮前盖板的直径略小于泵体内壁直径,叶轮出口斜切,从而大幅提高了单级扬程。但叶片出口斜切后,叶片前后流线长度不一致,可能会在叶轮出口出现二次流。因此,

有必要对深井离心泵叶轮进口边位置进行研究,为完善深井离心泵叶轮极大直径设计法提供依据。

叶轮进口边的位置对离心泵性能的影响已经引起了相关学者的重视<sup>[4-6]</sup>。研究结果表明进口边位置的改变对流场内的压力分布影响并不明显,但延伸进口边会提高叶轮的水力效率<sup>[4]</sup>;适当延伸叶轮叶片的进口位置可以较明显地改善离心泵的空化性能<sup>[5]</sup>。

收稿日期:2011-03-31 修回日期:2011-05-08

\* 浙江省重大科技专项重大工业项目(2010C01032)、江苏高校优势学科建设工程资助项目和江苏省2011年度普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ11-0566)

作者简介:周岭,博士生,主要从事泵优化设计研究,E-mail:zhouling6617@163.com

通讯作者:施卫东,研究员,博士生导师,主要从事流体机械及工程研究,E-mail:wds@ujs.edu.cn

本文针对一典型的 150QJ20 型深井离心泵, 设计 3 种进口边位置的叶轮, 基于 Fluent 软件, 采用标准  $k-\varepsilon$  模型、SIMPLEC 算法对其进行全流场数值计算, 对深井离心泵叶轮出口断面的压力场和湍流场进行比较, 并分析进口边位置对深井离心泵水力性能的影响。

## 1 水力模型与数值模拟

### 1.1 基本参数

选用 150QJ20 型深井离心泵, 其基本设计参数: 流量  $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ 、单级扬程  $H_s = 11 \text{ m}$  (共 6 级)、转速  $n = 2850 \text{ r/min}$ 、比转数  $n_s = 128$ 。

### 1.2 水力设计

叶轮的设计是采用深井离心泵叶轮极大直径设计法, 在其他水力参数均相同的情况下, 设计了 a、b、c 3 种进口边位置, 与轴面的夹角  $\theta$  依次为  $0^\circ$ 、 $12.5^\circ$ 、 $25^\circ$ , 叶轮的轴面图如图 1a 所示, 通过 Pro/E 建模, 得到的叶轮实体模型如图 1b 所示。导叶的水力设计采用了三维曲面导叶设计法, 工作面分 3 条流线计算, 最后拟合成光滑的空间曲面, 其实体模型如图 2 所示。

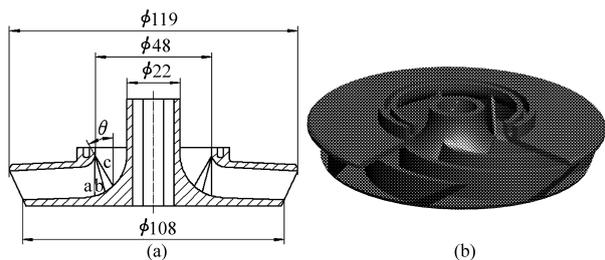


图 1 叶轮

Fig. 1 Impeller

(a) 叶轮轴面设计图 (b) 实体模型

### 1.3 计算区域

深井离心泵相对单级泵而言结构较复杂, 若按照 150QJ20 型深井离心泵 6 级模型来进行数值模拟, 将产生大量的计算网格, 耗费大量的计算时间。以两级全流场数值模拟为研究手段, 计算区域由进口段、两级叶轮、两级导叶和出口段组成, 其装配关系的三维模型如图 3 所示。

### 1.4 网格划分与数值模拟

网格生成在前处理软件 Gambit 中完成, 在全流场内采用非结构化四面体网格划分, 随后导入 Fluent 软件进行数值模拟。设定整个流道内部的流

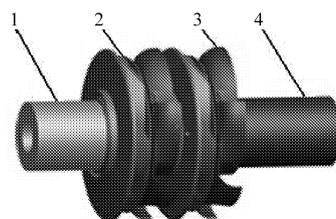


图 3 装配模型

Fig. 3 Assembly drawing

1. 进口段 2. 叶轮 3. 导叶 4. 出口段

场为三维不可压稳态粘性湍流场, 建立相对坐标系下时均连续方程、动量方程, 并采用标准  $k-\varepsilon$  模型、SIMPLEC 算法、二阶迎风格式离散差分方程进行求解。代数方程迭代计算采取亚松驰, 设定收敛精度为  $10^{-4}$ 。

## 2 计算结果与分析

一般来说, 离心泵在小流量工况时, 在叶轮进口和出口会出现回流现象。随着流量从设计流量慢慢减少, 叶片进口的液流角逐渐减小, 由离心力作用而产生的径向二次流逐渐增强, 使液体从叶轮出口前盖板附近流出, 产生了出口后盖板侧的回流<sup>[7]</sup>。但对于采用叶轮极大直径设计法的深井离心泵, 还存在一种产生叶轮出口回流的情况, 即叶轮叶片出口斜切, 前后流线长度不一致, 靠近前盖板侧压力较高, 靠近后盖板侧压力较低, 可能会在叶轮出口附近产生回流。

通过数值计算, 获取了 150QJ20 型深井离心泵的内部流场分布。为了研究叶轮进口位置对叶轮出口流场分布的影响, 截取了  $\theta$  为  $0^\circ$ 、 $12.5^\circ$ 、 $25^\circ$  时的叶轮单个流道出口断面的静压、湍流强度、速度流线、轴向速度等进行对比分析。

湍流强度<sup>[8]</sup>定义为

$$T_u = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{v_x'^2 + v_y'^2 + v_z'^2}{v_\infty^2}} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $v_\infty$  ——来流流速

$v_x'$ 、 $v_y'$ 、 $v_z'$  ——势流中的脉动速度分量

### 2.1 0.6 倍额定工况下的流场分布

如图 4 所示, 在小流量工况下, 叶轮进口处流速较低, 叶轮出口处压力较高。从静压分布中可以看出, 在叶轮出口断面上, 靠近前盖板侧和叶片工作面处的静压值较高, 靠近后盖板侧和叶片背面处出现较为明显的低压区。随着  $\theta$  的增加, 叶片进口边向前延伸, 低压区的面积逐渐减小, 静压值有所增加, 对应的湍流强度也逐渐减小。在叶轮出口断面, 随着液流脱离叶片, 液流的圆周速度达到最大值, 此处的轴向速度较小。从图 4c 中的轴向速度云图中可

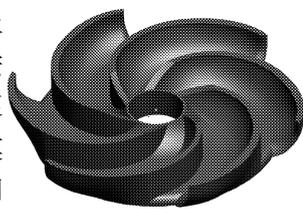


图 2 三维曲面导叶

Fig. 2 3D surface type guide vane

以看出,在叶片后盖板侧靠近叶片背面的轴向速度较大,存在产生从前盖板侧到后盖板侧回流的可能。同时随着 $\theta$ 的增加,轴向速度逐渐减小。

## 2.2 额定工况下的流场分布

如图5所示,在额定工况下,叶轮出口断面上的高压区向前盖板扩散。对比于小流量,低压区的面积有所增加。随着流量的增加,由于叶轮出口边呈倾斜状,速度流轴向轴向倾斜。随着 $\theta$ 的增加,叶轮出口断面的低压区面积逐渐减小,湍流强度和轴向

速度有所减小,速度流线向轴向倾斜的程度有较为明显的改善。

## 2.3 1.4倍额定工况下的流场分布

在大流量工况下,叶轮进口流速较高,叶轮出口处压力值较低。如图6所示,叶轮出口断面上的高压区集中在靠近前盖板侧,低压区的面积较小。叶轮出口断面中部靠近后盖板侧的湍流强度较大。随着 $\theta$ 的增加,湍流强度和轴向速度表现出较为明显的衰减。速度流线向轴向倾斜的程度也有所改善。

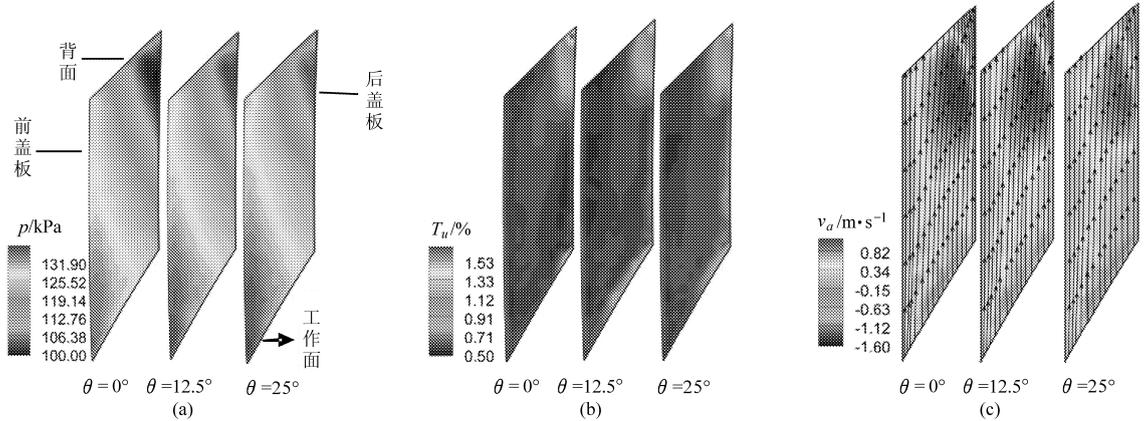


图4 0.6倍额定工况下的流场分布

Fig. 4 Flow field distribution under 0.6 times rated flow

(a) 静压云图 (b) 湍流强度云图 (c) 速度流线与轴向速度云图

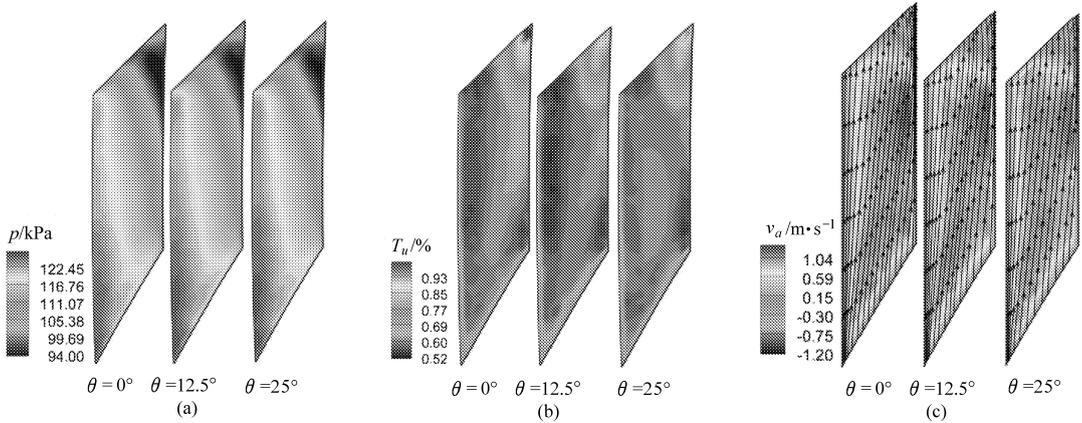


图5 额定工况下的流场分布

Fig. 5 Flow field distribution under rated flow

(a) 静压云图 (b) 湍流强度云图 (c) 速度流线与轴向速度云图

## 3 性能分析与试验

对两级全流场模型进行了0.4~1.6倍额定工况下的数值模拟,得到了150QJ20型深井离心泵在多工况下的性能预测结果。其单级扬程和泵效率随流量的变化曲线如图7所示。

可以看出,随着 $\theta$ 的增加,各个工况下的单级扬程和泵效率都略有增加,但两者随流量的变化趋势基本一致。在额定工况下, $\theta$ 为25°时的单级扬程为11.94 m,较 $\theta$ 为12.5°增加了1.1%,较 $\theta$ 为0°时增

加了3%; $\theta$ 为25°时的泵效率为67.31%,较 $\theta$ 为12.5°时增加了0.6%,较 $\theta$ 为0°时增加了1.4%。

究其原因,随着 $\theta$ 的增加,叶轮进口边向吸入口延伸,使液体提早接触叶片;同时减少了叶片进口的相对速度,从而减小进口的冲击损失。

从欧拉方程式  $H = \frac{u_2 C_{u2}}{g} - \frac{u_1 C_{u1}}{g}$  可知,扬程  $H$  与  $u_1$ 、 $u_2$  有关,而  $u = \frac{\pi D n}{60}$ ,由此可知扬程  $H$  与  $D_1$ 、 $D_2$  有关。叶片进口边向前延伸相对而言使  $D_1$  减小, $u_1$  也随之减小,从而使泵的扬程提高。

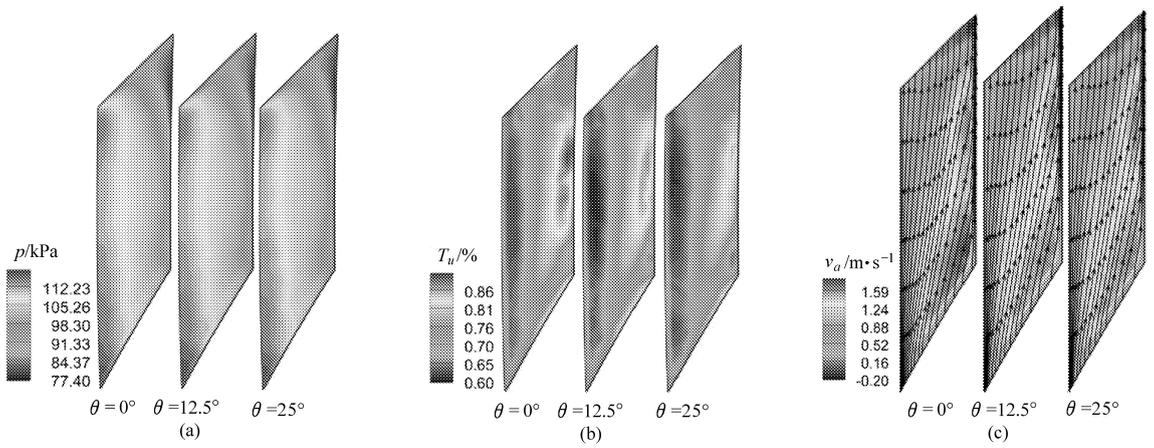


图 6 1.4 倍额定工况下的流场分布

Fig. 6 Flow field distribution under 1.4 times rated flow

(a) 静压云图 (b) 湍流强度云图 (c) 速度流线与轴向速度云图

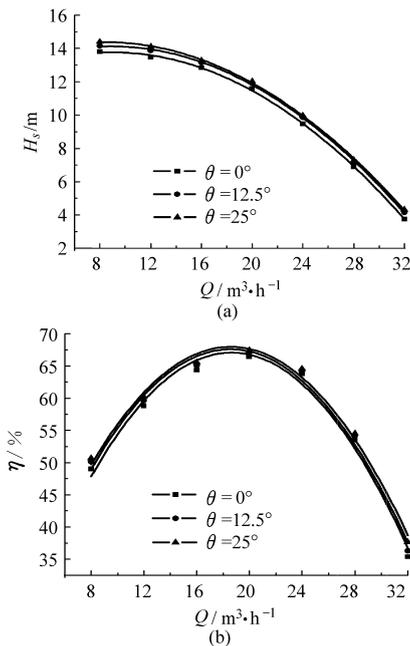


图 7 数值模拟预测结果

Fig. 7 Numerical simulations predict results

(a) 单级扬程 (b) 泵效率

为了进一步分析数值模拟的准确性,采用性能较优的  $\theta$  为  $25^\circ$  的叶轮,将 150QJ20 型深离心泵 6 级模型采用精密铸造进行了加工制造,并进行了外特性试验,试验结果如图 8 所示。可以看出其高效区较宽,全扬程无过载,最高效率点、最大功率点与额定流量点 3 点基本重合,设计合理,性能较优。文献[9]指出,用两级深井泵模型的次级数值模拟结果来预测泵性能更为准确。在额定工况下,试验得到了单级扬程为 10.9 m,与数值模拟得到的第 2 级的单级扬程 11.37 m 相差 4.3%;试验得到的泵效率

为 66.59%,与数值模拟得到的泵效率 67.31% 相差 1.1%。但两种方法得到的结果随流量变化的趋势基本吻合,尤其是在泵工作流量区间内(0.8 ~ 1.2 倍额定流量),数值模拟得到的效率与试验值的偏差为 1% 左右,这也证实了利用数值模拟的方法来预测深井泵性能的可行性。

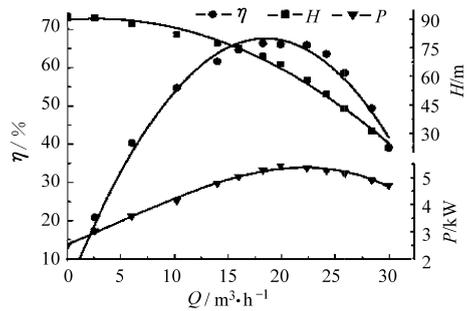


图 8 泵性能试验结果

Fig. 8 Pump performance test results

### 4 结论

(1)对于采用叶轮极大直径设计法的深井离心泵,叶轮出口斜切面的压力梯度明显,存在产生二次流的可能。适当延伸叶轮进口边,增加后流线的长度,可以减小叶轮出口的湍流强度,改善流场分布。

(2)适当延伸叶轮进口边,可以相对减小叶轮进口直径,减小叶轮进口的冲击损失,从而提高深井离心泵的水力性能。

(3)采用数值模拟的方法可以获取深井离心泵内部的流场分布,可以较为准确地预测深井离心泵的水力性能。

### 参 考 文 献

1 施卫东,袁寿其,李世英,等. 泵行业存在的主要问题及急需解决的关键技术[J]. 排灌机械,2001,19(6):7~9.

Shi Weidong, Yuan Shouqi, Li Shiyong, et al. Main existing problem and key technology to be solved of pump industry in

- China [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2001, 19(6): 7~9. (in Chinese)
- 2 施卫东,王洪亮,余学军. 深井泵的研究现状与发展趋势[J]. 排灌机械,2009,27(1):64~68.  
Shi Weidong, Wang Hongliang, Yu Xuejun. Development and prospect of deep well pump in China [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(1):64~68. (in Chinese)
- 3 Shi W D, Lu W G, Wang H L, et al. Research on the theory and design methods of the new type submersible pump for deep well [C]//ASME Conference Proceedings, FEDSM2009, 2009, 1: 91~97.
- 4 杨志伟,曹树良,王国玉,等. 离心泵叶轮进口边位置的研究[J]. 水泵技术,2002(6):8~11.  
Yang Zhiwei, Cao Shuliang, Wang Guoyu, et al. Position research on impeller inlet edge of centrifugal pump [J]. Pump Technology, 2002(6): 8~11. (in Chinese)
- 5 罗先武,张瑶,彭俊奇,等. 叶轮进口几何参数对离心泵空化性能的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版,2008,48(5):836~839.  
Luo Xianwu, Zhang Yao, Peng Junqi, et al. Effect of impeller inlet geometry on centrifugal pump cavitation performance [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(5):836~839. (in Chinese)
- 6 张人会,张学静,杨军虎. 非设计工况下叶轮进口附近的流动及其控制[J]. 甘肃工业大学学报,2003,29(4):64~66.  
Zhang Renhui, Zhang Xuejing, Yang Junhu. Flow field around intake of impeller under off-design conditions and its control [J]. Journal of Gansu University of Technology, 2003, 29(4): 64~66. (in Chinese)
- 7 袁建平,袁寿其,何志霞,等. 离心泵内部流动测试研究进展[J]. 农业机械学报,2004,35(4):188~191.  
Yuan Jianping, Yuan Shouqi, He Zhixia, et al. Research advance in flow of centrifugal pumps [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4):188~191. (in Chinese)
- 8 罗惕乾. 流体力学[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- 9 周岭,施卫东,陆伟刚,等. 深井离心泵数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(3):69~73.  
Zhou Ling, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Numerical simulation and experiment on deep-well centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3):69~73. (in Chinese)
- 10 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京:宇航出版社,1995.
- 11 Feng J J, Benra F K, Dohmen H J. Investigation of periodically unsteady flow in a radial pump by CFD simulations and LDV measurements[J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(1):011004-1~011004-11.

(上接第61页)

- 4 Zhong W H, Cai Z C. Long-term effects of inorganic fertilizers on microbial biomass and community in a paddy soil derived from quaternary red clay [J]. Applied Soil Ecology, 2007, 36(2~3): 84~91.
- 5 Wang Y Q, Zhang X C, Zhang J L, et al. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the Loess Plateau [J]. Pedosphere, 2009, 19(4): 486~495.
- 6 Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macro-aggregate turnover and micro-aggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(14):2009~2103.
- 7 中国科学院棕土高原综合科学考察队. 棕土高原地区土壤资源及合理利用[M]. 北京:中国科学技术出版社,1991:155~204.
- 8 郭胜利,高会议,党廷辉. 施氮水平对棕土旱塬区小麦产量和土壤有机碳/氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(4):808~814.  
Guo Shengli, Gao Huiyi, Dang Tinghui. Effects of nitrogen application rates on grain yield, soil organic carbon and nitrogen under a rainfed cropping system in the loess tablelands of China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009,15(4): 808~814. (in Chinese)
- 9 裴雪霞. 典型种植制度下长期施肥对土壤微生物群落多样性的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2010.
- 10 Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. SSSAJ, 1993, 57(4):1071~1076.
- 11 Manna M C, Swarup A, Wanjari R H. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(2):397~409.
- 12 李凯,窦森,韩晓增,等. 长期施肥对黑土团聚体中腐殖物质组成的影响[J]. 土壤学报,2010,47(3):578~583.  
Li Kai, Dou Sen, Han Xiaozeng, et al. Effects of long-term fertilization on composition of humic substances in black soil aggregates [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,47(3):578~583. (in Chinese)