

三湖河灌域富水岩层顶板及含水层底板 高程的估值研究

丁雪华 , 朝伦巴根

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

[摘 要] **【目的】**运用地质统计学理论,对三湖河灌域的富水岩层顶板及含水层底板高程进行空间变异性分析。**【方法】**在实测 36 个已知信息点的基础上,运用普通克里格法(OK 法)对未知点处的富水岩层顶板及含水层底板高程进行估值。**【结果】**在已知信息值和估计值的基础上,绘制了研究区富水岩层顶板与含水层底板高程空间三维分布图。**【结论】**将地质统计学理论运用到水文地质领域,对三湖河灌域未知点处的富水岩层顶板及含水层底板高程进行估值,可以弥补由于采样困难而引起的实测数据不足的弊端。

[关键词] 三湖河灌域;富水岩层顶板;含水层底板;普通克里格法;空间变异性
[中图分类号] P641.72 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2008)05-0201-05

Estimation of plentiful water aquifer elevation in Sanhuhe irrigation field

DING Xue-hua, Chaolunbagen

(The College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agriculture University,
Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: **【Objective】** The spatial variability of plentiful water aquifer top layer and aquifer floor elevation in Sanhuhe irrigation field is researched using the Geostatistics. **【Method】** On the basis of 36 known information points, plentiful water aquifer top layer and aquifer floor elevation of unknown points are estimated using Ordinary Kriging (OK) method. **【Result】** Based on the known and unknown information points, three-dimensional space distribution maps of plentiful water aquifer top layer and aquifer floor elevation are drawn. **【Conclusion】** Geostatistics is used to simulate and predict the stratigraphic data, and absent data can be covered.

Key words: Sanhuhe irrigation field; plentiful water aquifer top layer elevation; aquifer floor elevation; ordinary Kriging; spatial variability

地质统计学是诞生于矿山地质领域的一门边缘学科,现已被广泛地应用于地质学^[1-2]、水文学^[3]、土壤科学^[4]、气象学^[5]、农业^[6]、遥感^[7]、石油工程^[8]、生态^[9]、海洋^[10]、资源与环境^[11]以及其他研究“时空变量”的领域,但是真正将地质统计学应用于地质领域,对地层进行模拟预测,还鲜见报道。文中主要运用地质统计学的基本方法——普通克里格法,在已知信息点的基础上,对研究区三湖河灌域的富水岩

* [收稿日期] 2007-05-21
[作者简介] 丁雪华(1963—),男,内蒙古呼和浩特人,副教授,在职博士,主要从事水资源评价与优化利用研究。
E-mail: dingxuehua591@163.com
[通讯作者] 朝伦巴根(1940—),男,内蒙古乌兰浩特人,教授,博士生导师,主要从事水资源评价与优化利用研究。
E-mail: Chaolunbagen@cast.org.cn

层顶板及含水层底板高程进行估值,从而可以在一定程度上弥补该灌域地层资料不足的弊端。

1 地质统计学的基本理论

1.1 变差函数

变差函数不仅是 Kriging 估值、条件模拟等计算的基础,更重要的是其反映和刻划了区域化变量的许多性质,是分析区域化变量空间变异性的重要工具。

当区域化变量满足(准)二阶平稳假设或(准)本征假设时,其一维实验变差函数的计算公式为^[12]:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2, \quad (1)$$

式中: $N(h)$ 为 x 轴上相隔 h 的点的对数, $Z(x_i)$ 为观测值 $Z(x)$ 的 $N(h)$ 对实现, $Z(x_i+h)$ 为观测值 $Z(x+h)$ 的 $N(h)$ 对实现。

如果 $Z(x)$ 是定义在二维、三维空间的区域化变量,则 x 是二维、三维空间中的点, h 是二维、三维空间中的向量。式(1)即为 Matheron 推荐的传统计算公式(MAT),是计算实验变差函数的基本公式,但是在具体计算时,有赖于数据的空间构型,根据计算方法的不同可分为以下 2 类^[13]:

(1)列线且等间距的数据构形。这种构形又分为一维、二维和三维空间 3 类。在这种情况下,数据在某方向上的点距等于基本滞后距,计算实验变差函数时只需要逐点对取值计算即可。

(2)非等间距数据构形。此种构形包括列线而不等间距和非列线又不等间距 2 种。计算实验变差函数时在给定的滞后距下,按一定的角度容差和距离容差组合数据点对。

设 α 方向上的角度容差为 d ,距离容差为 ϵ ,则落在角度范围 $(\alpha \pm d)$ 及距离范围 $(kh \pm \epsilon)$ 内的数据点,均认为其与 x_0 点组成沿 α 方向且滞后距为 kh 的数据点对。具体计算公式如式(2)所示^[14]:

$$\gamma_\alpha(h) = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} [Z(x_i) - Z(x_i+h_i)]^2}{2 \sum_{i=1}^{N_h} h_i}, \quad (2)$$

式中: N_h 为 α 方向以 h 为分割距离时最多能使用的数据对个数, $Z(x_i)$ 为观测值 $Z(x)$ 的 N_h 对实现, $Z(x_i+h)$ 为观测值 $Z(x+h)$ 的 N_h 对实现, h_i 为落在范围 $(kh \pm \epsilon)$ 和 $(\alpha \pm d)$ 内的数据点 $Z(x_i+h_i)$ 与 $Z(x_i)$ 之间的距离。

1.2 普通克立格法

从数学角度抽象来说,普通克立格法是一种对

空间分布数据求最优、线性、无偏内差估计量(Best Linear Unbiased Estimation, 简写 BLUE)的方法。

普通克立格方程组可表示为^[15]:

$$[\mathbf{K}][\boldsymbol{\lambda}] = [\mathbf{C}_0], \quad (3)$$

式中: $[\mathbf{K}]$ 为普通克立格矩阵,是一对称矩阵,其中各元素为已知信息点间的协方差函数,具体构成见(4)式; $[\boldsymbol{\lambda}]$ 为由 n 个克立格权系数和 1 个拉格朗日乘子所组成的矩阵,具体构成见(5)式; $[\mathbf{C}_0]$ 矩阵中各元素是由待估点和各已知信息点之间的协方差函数和常数 1 组成的,具体构成见(6)式。

其中:

$$[\mathbf{K}] = \begin{bmatrix} C(x_1, x_1) & \cdots & C(x_1, x_n) & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ C(x_n, x_1) & \cdots & C(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

式中: $C(x_i, x_j)$ 为已知信息点间的协方差函数。

$$[\boldsymbol{\lambda}] = [\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n, -\mu]^T; \quad (5)$$

式中: λ_i 为克立格权系数, μ 为拉格朗日乘子。

$$[\mathbf{C}_0] = [C(x_1, x_0), C(x_2, x_0), \cdots, C(x_n, x_0), 1]^T. \quad (6)$$

式中: $C(x_i, x_0)$ 为待估点和已知信息点间的协方差函数。

克立格估计方差为:

$$\sigma_{ok}^2 = C(0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i C(x_i, x_0) + \mu, \quad (7)$$

式中: λ_i 为克立格权系数, $C(x_i, x_0)$ 为待估点和已知点间的协方差函数, μ 为拉格朗日乘子。

1.3 约束条件

为了检测估值结果的可靠性,可运用交叉证实法对估值结果进行检验,即应使估值结果尽可能多地满足下列各项指标,各项指标的具体含义参见文献^[14]:

(1)平均误差:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)], \quad (8)$$

应该比较小,绝对值应该接近于 0。

(2)均方差:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]^2, \quad (9)$$

尽可能小,均方差应该接近于平均克立格的方差:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{k,j}^2, \quad (10)$$

式中: $\sigma_{k,j}^2$ 是 $Z^*(x_i)$ 的克立格方差。

(3)标准化的克立格方差:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{Z(x_i) - Z^*(x_i)}{\sigma_{k,j}} \right]^2, \quad (11)$$

应该接近于 1。

2 数据采集及处理

在实际的地质工作中,通过钻孔来获取地质资料的成本很高,因此,钻孔资料的有限性限制了生产和科研工作地开展。有鉴于此,本文在已知的实测数据基础上,运用普通克立格法对预测点的数值进行估值研究。在三湖河灌域中有 15 个实测钻孔资料,有 21 个观察井资料,即共有已知信息点 36 个。在对实测数据进行分析后发现,研究区内富水岩层顶板和含水层底板在各个方向上的坡度变化较为相近,故将研究区富水岩层顶板和含水层底板高程认为是各向同性进行分析。

分别计算出各实测点两两之间的距离值,由于 36 个实测点间高程差距较小,在计算中忽略高程对

滞后距的影响,以两点间的平面距离值作为两两之间的距离值。36 个点两两间进行随机组合,总共得到 630 个距离值,然后对计算出来的距离值进行分组,计算研究对象的实验变差函数值。由于研究对象可近似为各向同性,所以在研究区内,研究对象的数据构形属于列线而不等间距类型,采用本文所述方法及公式(2)进行计算,并拟合出其对应的理论球状模型,采用交叉证实法对理论模型进行验证,最终选用验证效果最好的那组变差函数值及其理论模型进行估值研究。对于富水岩层顶板选用基本滞后距 $h=4\ 500\text{ m}$,含水层底板选用基本滞后距 $h=4\ 000\text{ m}$ 。在计算出实验变差函数的基础上,利用加权多项式回归法拟合出其理论球状模型,具体计算结果如图 1 和图 2 所示。图中 γ 为富水岩层顶板及含水层底板高程的变差函数值, h 为滞后距。

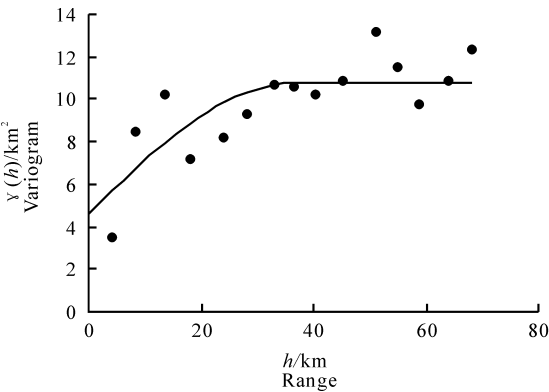


图 1 富水岩层顶板高程变差函数图

● 变差函数点;——. 拟合曲线

Fig. 1 Varigoram of aquifer top layer elevation

● Variogram point;——. Fitted curve

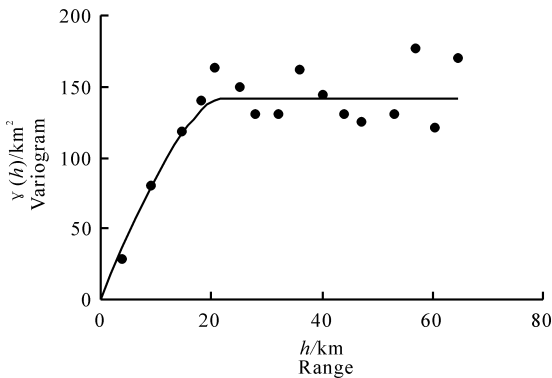


图 2 含水层底板高程变差函数图

● 变差函数点;——. 拟合曲线

Fig. 2 Varigoram of aquifer floor elevation

● Variogram point;——. Fitted curve

3 富水岩层顶板及含水层底板高程估值

3.1 采用普通克立格法的估计值与实测值

对三湖河灌域采用间距为 1 000 m 的网格进行分割,在 E-W 方向共有 66 个点,N-S 方向共有 23 个点,整个研究区共计 1 518 个预测点,实测点与估值点均匀涵盖了整个研究区。在拟合出的理论球状模型参数及已知信息基础上,运用普通克立格法对预测点位置处的富水岩层顶板及含水层底板高程进行估值,运用交叉证实法对估值结果进行检验。对于富水岩层顶板的检验结果为:平均误差 2. 91,均方差 6. 16,标准化的克立格方差 0. 94;含水层底板的检验结果为:平均误差 6. 13,均方差 41. 27,标准化的克立格方差 1. 27。为了从不同角度验证估值

结果的可靠性,在计算出估值点估计方差的同时,运用 OK 法对实测钻孔位置处的富水岩层顶板和含水层底板高程也进行了估值,并将估计值与实测值进行对比分析,其结果如图 3 和图 4 所示。由图 3 和图 4 可知,估值曲线较实测曲线平缓。这是由于 OK 法本身具有一定的平滑效应,但各钻孔位置处的估计值基本上是在实测值的上下波动,且实测曲线与估值曲线两者的波动趋势较为一致。

3.2 富水岩层顶板及含水层底板高程的三维分布

实测点和估值点基本上能够均匀地覆盖整个研究区域,运用 Surfer 软件,绘制了该研究区中一个矩形区域内的富水岩层顶板及含水层底板高程的三维分布图,具体结果如图 5 和图 6 所示。由图 5 和图 6 可见,本文模拟结果基本与研究区已有的地质构造及含水层分布资料相吻合。

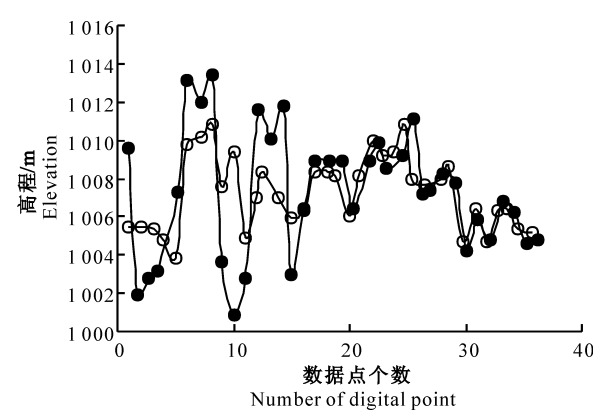


图 3 富水岩层顶板高程实测值与估计值的比较
—●—, 实测值; -○-, 估计值

Fig. 3 Comparison between the measured values and estimated values of aquifer top layer elevation
—●—, Measurement value; -○-, Estimated value

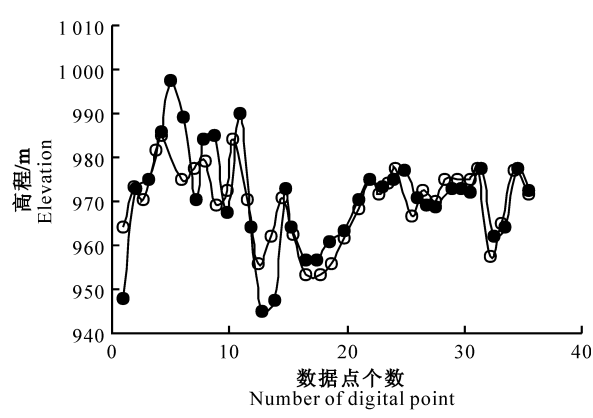


图 4 含水层底板高程实测值与估计值的比较
—●—, 实测值; -○-, 估计值

Fig. 4 Comparison between the measured values and estimated values of aquifer floor elevation
—●—, Measurement value; -○-, Estimated value

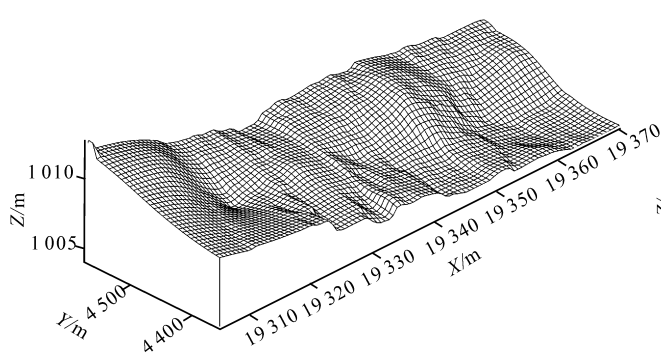


图 5 含水层顶板空间三维分布图
Fig. 5 Spatial three dimensional distribution of aquifer top layer

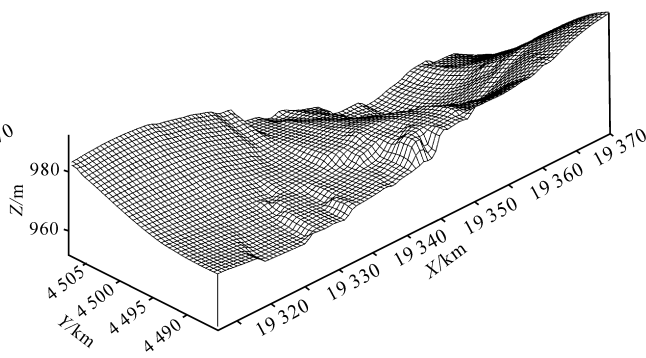


图 6 含水层底板空间三维分布图
Fig. 6 Spatial three dimensional distribution of aquifer floor

4 结 论

由于探测地层资料资金耗费较大,所以在实际工作中,往往遇到地层资料短缺的问题。本文将地质统计学理论用于对地层的模拟预测中,运用普通克立格法对研究区——三湖河灌域的未知点富水岩层顶板及含水层底板高程进行估值,并运用 Surfer8.0 软件绘制了富水岩层顶板及含水层底板高程的三维分布图。表明在有少量地质资料的情况下,运用地质统计学的理论,可以将未知区域的地层情况估值推求,从而获得较多的信息,为进一步研究提供较为详细的基础资料。

[参考文献]

[1] 李金荣,李云峰,郭勇军. 含水层底板标高的空间最优估计[J]. 地下水,2001,23(1):33-35.

Li J R , Li Y F, Guo Y J. Spatial optimun estimation of aquifer floor elevation [J]. Ground Water,2001,23(1):33-35. (in Chinese)

[2] 肖 斌,赵鹏大,周龙茂. 归来庄金矿床 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 异常的地质统计学研究 [J]. 地球科学:中国地质大学学报,2000,25(2):79-82.

Xiao B,Zhao P D,Zhou L M. Geostatistical study of $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ anomaly in Gui Lai Zhuang gold deposit [J]. Earth science,Journal of China University of Geosciences,2000,25(2):79-82. (in Chinese)

[3] 刘瑞民,王学军,郑 一,等. 地统计学在太湖水质研究中的应用 [J]. 环境科学学报,2002,22(2):209-212.

Liu R M,Wang X J,Zheng Y,et al. the application of geostatistics in the study of water quality of Taihu Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2002,22(2):209-212. (in Chinese)

[4] 郑袁明,陈同斌,陈 煌,等. 北京市近郊区土壤镍的空间结构及分布特征 [J]. 地理学报,2003,58(3):470-476.

Zheng Y M,Chen T B,Chen H,et al. The spatial structure and distribution of Ni contends in soils of suburbs of Beijing [J].

- Acta Geographica Sinica, 2003, 58(3): 470-476. (in Chinese)
- [5] 庄立伟, 王石立. 东北地区逐日气象要素的空间插值方法应用研究 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 605-615.
- Zhuang L W, Wang S L. Spatial interpolation methods of daily weather data innortheast China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(5): 605-615. (in Chinese)
- [6] 张展羽, 郭相平, 詹红丽, 等. 微咸水灌溉条件下土壤和地下水含盐量空间变异分析 [J]. 灌溉排水, 2001, 20(3): 6-9.
- Zhang Z Y, Guo X P, Yan H L. Study on the spatial variability of salt content in farmlands and groundwater under saline water irrigation [J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(3): 6-9. (in Chinese)
- [7] 张 征, 刘淑春, 鞠硕华. GIS 与水文地质空间分布变量的变异性分析 [J]. 勘察科学技术, 1996(3): 30-34.
- Zhang Z, Liu S C, Ju S H. GIS and variance analysis of the hydrogeological spatial distributed variables [J]. Science Technology, 1996(3): 30-34. (in Chinese)
- [8] 郭黔杰, 康永尚, 朱 强, 等. 支持石油勘探开发决策的新方法——分形几何与地质统计学 [J]. 石油学报, 1998, 19(2): 36-39.
- Guo Q J, Kang Y S, Zhu Q, et al. A new methods for support in gdecision making in petrol eum exploration and development fractal geometry and geo-statistics [J]. Petroleum Transaction, 1998, 19(2): 36-39. (in Chinese)
- [9] 王晓春, 韩士杰, 邹春静, 等. 长白山岳桦种群格局的地统计学分析 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 781-784.
- Wang X C, Han S J, Zou C J, et al. Geostatistical analysis of the pattern of *Betulaermanii* population in Chanbai Mountain [J]. Chinese Journal of Appliedecology, 2002, 13(7): 781-784. (in Chinese)
- [10] 周怀阳, 武光海, 杨树锋. 关于对我国大洋富钴结壳进行地质经济评价工作的讨论 [J]. 地质与勘探, 2001, 37(2): 2-5.
- Zhou H Y, Wu G H, Yang S F. On Chinese exploration about the cobalt-rich manganese crust by means of both geological and economical evaluation [J]. Geology and Prospecting, 2001, 37(2): 2-5. (in Chinese)
- [11] 李丽娟, 王 娟, 李海滨. 无定河流域降雨量空间变异性研究 [J]. 地理研究, 2002, 21(4): 434-440.
- Li L J, Wang J, Li H B. Analysis of the spatial variability of rainfall in wuding river basin [J]. Geographical Research, 2002, 21(4): 434-440. (in Chinese)
- [12] 侯景儒, 黄竟先. 地质统计学及其在矿产储量计算中的应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1982.
- Hou J R, Huang J X. Geostatistics and apply in the minerals storage calculation [M]. Beijing: Geology Press, 1982. (in Chinese)
- [13] 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学 [M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- Wang R D, Hu G D. Linear geostatistics [M]. Beijing: Geology Press, 1987. (in Chinese)
- [14] 张仁铎. 空间变异理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- Zhang R D. Theory and apply of spatial variability [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [15] 侯景儒, 郭光裕. 矿床统计预测及地质统计学的理论与应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- Hou J R, Guo G Y. Theory and apply of statistical prediction of deposits and geostatistics [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993. (in Chinese)

(上接第 200 页)

- [5] Juan C E, Monica F G, Juan U, et al. Identification of wine yeasts by PCR-RFLP without previous isolation on plate [J]. Food Technol Biotechnol, 2002, 40(2): 157-160.
- [6] Hierro N, González á, Mas A, et al. New PCR-based methods for yeast identification [J]. Journal of Applied Microbiology, 2004, 97: 792-801.
- [7] Mareikewenning, Herbert S, Siegfried S. Fourier-transform infrared microspectroscopy, a novel and rapid tool for identification of yeasts [J]. Appl Environ Microbiol, 2002, 10: 4717-4721.
- [8] Christina L P, James A B, Tammi L O, et al. Use of WL medium to profile native flora fermentations [J]. AM J Enol Vitic, 2001, 52(3): 198-203.
- [9] 周小玲, 沈 微, 饶志明, 等. 一种快速提取真菌染色体 DNA 的方法 [J]. 微生物学通报, 2004, 31(4): 89-92.
- Zhou X L, Shen W, Rao Z M, et al. A rapid method for preparation of fungal chromosome DNA [J]. Microbiology, 2004, 31(4): 89-92. (in Chinese)
- [10] Teresa Fernández-Espinar M, Esteve-Zarzoso B, Querol A, et al. RFLP analysis of the ribosomal internal transcribed spacers and the 5.8S rRNA gene region of the genus *Saccharomyces*; a fast method for species identification and the differentiation of flor yeasts [J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2000, 78(1): 87-97.
- [11] Guillamón J M, Sabaté J, Barrio E, et al. Rapid identification of wine yeast species based on RFLP analysis of the ribosomal internal transcribed spacer (ITS) region [J]. Arch Microbiol, 1998, 169(5): 387-392.
- [12] Torija M J, Rozès N, Poblet M, et al. Yeast population dynamics in spontaneous fermentations: Comparison between two different wine-producing areas over a period of three years [J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2001, 79: 345-352.
- [13] Querol A, Barrio E, Ramón D. A comparative study of different methods of yeast strain characterization [J]. Systematic and Applied Microbiology, 1992(15): 439-446.
- [14] Martini A, Vaughan-Martini A. Grape must fermentation: past and present in Spencer [C]//Yeast technology. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1990: 105-123.
- [15] Fleet G H, Heard G M. Yeasts: growth during fermentation. Wine microbiology and biotechnology [M]. Australia: Harwood Academic Publishers, 1993.
- [16] Covadonga R, Arias, Jacqueline K, et al. Yeast species associated with orange juice: Evaluation of different identification methods [J]. Appl Environ Microbiol, 2002(4): 1955-1961.