

基于不同密度 LiDAR 数据 DEM 构建研究

尤号田 (桂林理工大学测绘地理信息学院, 广西桂林 541004)

摘要 为了进一步提升数字高程模型构建效率,同时降低数据获取成本,以机载 LiDAR 数据为基础,通过对机载 LiDAR 数据进行处理得到地面点并对地面点进行抽取操作以获得不同密度地面点数据并插值生成 DEM,最终获得不同抽取率下 DEM 数据生成的精度。结果表明,对于城区而言,随着点云密度的下降 DEM 生成精度 RMSE 从 0.109 m 逐渐增大到 0.691 m;对于草地而言, RMSE 则从 0.065 m 逐渐增大到 1.096 m;对于林地而言, RMSE 从 0.088 m 逐渐增大到 2.201 m。对于 3 种地物类型而言, DEM 生成精度均随抽取率的增大而逐渐降低,且不同地物类型 RMSE 的变化范围不同。

关键词 数字高程模型;激光雷达数据;地面点;抽取率;克里金插值算法

中图分类号 S 127; TP 79 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)09-0004-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.09.002



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research on DEM Construction Based on Different Density LiDAR Data

YOU Hao-tian (College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004)

Abstract To further improve the efficiency of building DEM and reduce the cost of data acquisition, the airborne LiDAR data were used and processed in this paper. And the ground points were extracted and different density ground points data were obtained using exacting method. Then the DEMs were generated with kriging interpolation method. Finally, the accuracy of generated DEM under different extraction rates were obtained. It was showed that for urban area, the RMSE increased from 0.109 m to 0.691 m with the decrease of point cloud density. For grass area, the RMSE increased from 0.065 m to 1.096 m. For forest area, the RMSE increased from 0.088 m to 2.201 m. It was concluded that the accuracy of DEM generation decreased with the increase of extraction rate and range of RMSE varies with different terrain types.

Key words Digital elevation model; LiDAR data; Ground points; Extraction rate; Kriging interpolation algorithms

数字高程模型(digital elevation model, DEM)是一种重要的地形产品,能够有效描绘地形信息,是许多空间应用的基础数据^[1-2]。传统 DEM 生成方法虽然精度较高,但多依赖野外人工测量,因而导致 DEM 生成成本较高且耗时费力^[3]。随着科技的进步,DEM 生成逐渐被现代空间信息观测技术所替代^[4]。

机载激光探测与测量(light detection and ranging, LiDAR)系统是一种主动对地观测系统^[5],集成了激光测距技术、全球定位技术、惯性导航技术等高新技术于一体,其作为一种新兴的空间信息观测获取技术,能够实时、高精度获取地物的三维空间信息^[6],因而广泛用于地形测绘、资源调查、灾害监测等^[7-9]方面,且已发展成为地形数据获取的有力手段。

机载 LiDAR 数据 DEM 生成精度不仅与所用插值算法有关,还与数据采样密度密切相关^[10-12]。虽然增加数据密度能够在一定程度上提高 DEM 的生成精度^[13],然而,随着数据密度的提高,数据的获取成本也会逐渐增加。因此,出于数据获取成本、时间效率以及数据存储文件大小等方面综合考虑,有必要根据研究区的地形特征有针对性地选用不同密度 LiDAR 点云数据,在保证 DEM 生成精度的前提下最大程度地节省数据获取成本和时间效率。基于此,笔者以机载 LiDAR 数据为基础,首先对 LiDAR 数据进行处理得到地面点,之后对得到的地面点按不同比例进行抽取操作以得到不同密度地面点数据,然后采用克里金插值算法用于生成 DEM,通过对比研究最终获得 DEM 生成最优点云密度,以期

最大限度地提升数字高程模型构建效率,并降低数据获取成本。

1 材料与方法

1.1 激光雷达数据与处理 研究区位于吉林长春净月潭国家森林公园附近,主要由城区、草地、森林和水体等地物类型组成。2012 年 5 月由搭载在飞机上的 Leica ALS70 激光雷达传感器进行激光雷达数据采集^[14],飞行参数:传感器 Leica ALS70,航高 560 m,波长 1 064 nm,扫描角 $\pm 20^\circ$,扫描频率 40.3 Hz,光斑直径 0.28 m,密度 10 点/m²。

首先,利用 Terrascan 软件对原始激光雷达数据进行滤波处理,之后利用不规则三角网算法对预处理后的激光雷达数据进行分类处理,得到地面点和非地面点,接着利用抽取算法对地面点按 1、1/10、1/50、1/100、1/500 和 1/1 000 倍进行抽取操作,之后利用克里金插值算法对抽取前后的地面点进行插值操作以生成不同点云密度下的 DEM 数据,并将原始数据生成的 DEM 作为参照 DEM。

1.2 克里金插值算法 克里金插值是一种利用变差函数的地质统计学插值方法,它依赖于数据的空间分布而不是实际值。利用数据驱动加权函数生成克里金权重以减少对输入值的偏倚,且当有良好的变差函数模型可用时,克里金插值能够提供最佳的插值。克里金插值是一种局部确定性插值技术,以定义邻域中采样点的距离加权平均来计算该值^[15]。它认为靠近查询位置的点具有更大的影响力,且利用样本点距所需点的距离的倒数对样本点进行加权。

1.3 精度评价 为了对不同密度激光雷达数据生成 DEM 进行对比,通过计算不同点云密度插值生成 DEM 与原始数据插值生成 DEM 对应点的均方根误差(RMSE)以评价数据点的拟合程度, RMSE 的计算公式:

基金项目 广西科技计划项目(2018GXNSFBA281075);桂林理工大学科研启动基金项目(GLUTQD2017094)。

作者简介 尤号田(1985—),男,河北保定人,讲师,博士,从事林业定量遥感研究。

收稿日期 2019-03-11

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Z_{dem} - Z_{ref})^2}{n}} \quad (1)$$

式中, Z_{dem} 是生成 DEM 的高程值, Z_{ref} 是插值点对应的高程值, n 是插值点的数量。

2 结果与分析

2.1 LiDAR 数据不同抽取率 对分类后的地面点按不同抽

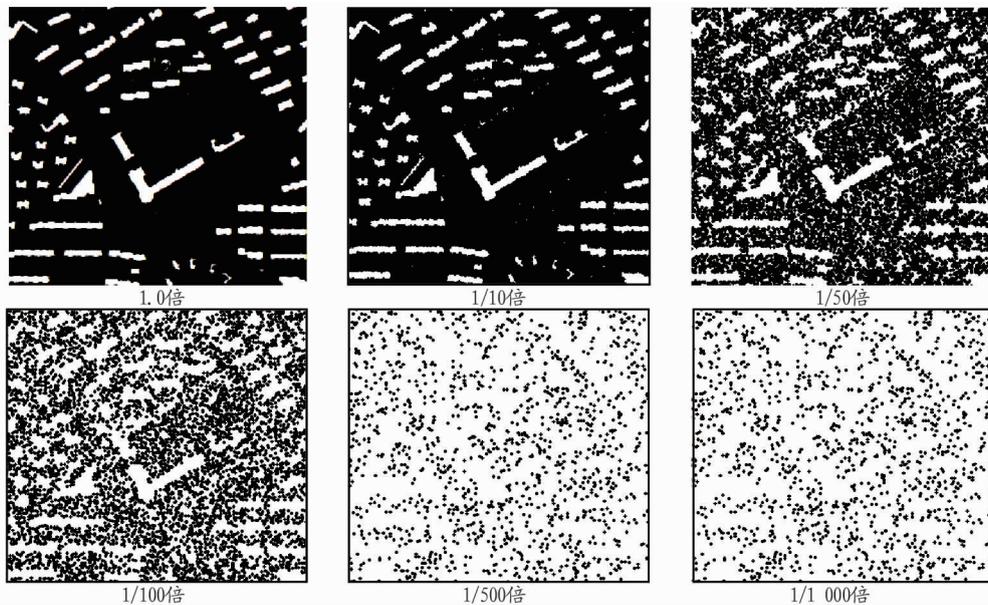


图 1 城区不同抽取率 LiDAR 数据示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LiDAR data with different extraction rates in urban area

2.2 不同抽取率 LiDAR 数据 DEM 插值结果

2.2.1 城区。城区不同抽取率 LiDAR 数据生成 DEM 及精度评价结果见图 2 和表 1。由图 2 和表 1 可知,随着抽取率的不断增大,DEM 结果精度逐渐降低, RMSE 则从 0.109 m 逐渐增大到 0.691 m。当抽取率为 1/500 时, RMSE 为

取率进行数据抽取操作以得到不同密度点云数据,以城区 LiDAR 数据为例,结果见图 1。由图 1 可知,随着抽取率的增加,点云密度逐渐降低,且数据所直观展现出来的地物信息逐渐丧失。如当抽取率为 1/100 时,可以直观地看出建筑物的大致轮廓信息;而当抽取率为 1/1 000 时,从直观上完全不能判断此数据来自于何种地物类型。

0.565 m, 略大于 0.500 m; 当抽取率变为 1/1 000 时, RMSE 仅为 0.691 m, 仍小于 1.000 m。因此,在满足 DEM 精度要求的前提下可以适当采用较低密度的 LiDAR 数据以降低数据的获取成本,同时提高数据的处理效率。

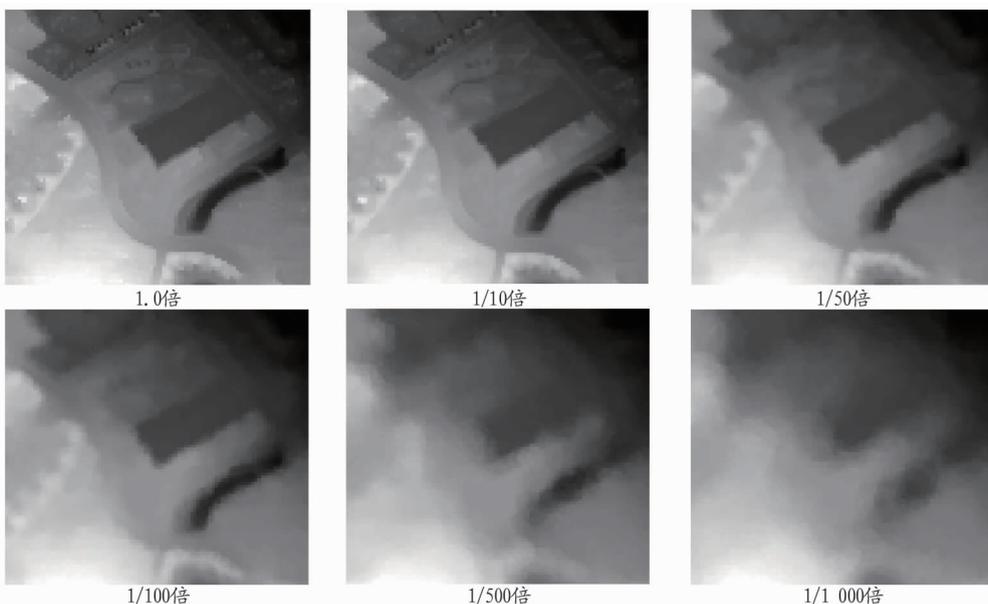


图 2 城区不同抽取率 LiDAR 数据 DEM 生成结果

Fig. 2 Results of DEM generated with LiDAR data of different extraction rates in urban areas

表1 城区不同抽取率 LiDAR 数据生成 DEM 精度评价结果

Table 1 Accuracy evaluation of DEM generated with LiDAR data of different extraction rates in urban areas

编号 No.	不同抽取率 LiDAR 数据 LiDAR data with different extraction rates	RMSE m
1	1/10	0.109
2	1/50	0.283
3	1/100	0.348
4	1/500	0.565
5	1/1 000	0.691

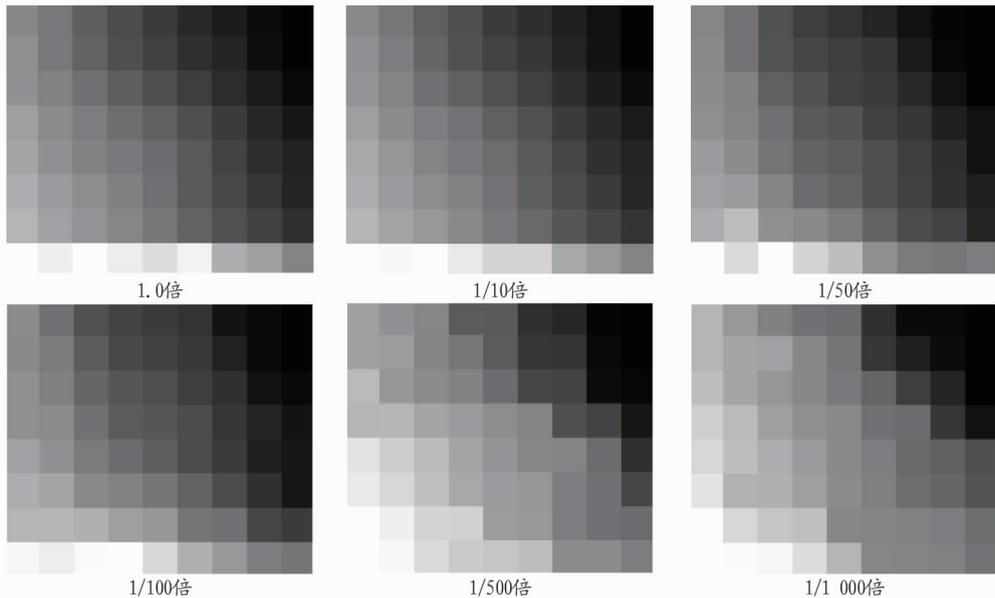


图3 草地不同抽取率 LiDAR 数据 DEM 生成结果

Fig. 3 Results of DEM generated with LiDAR data of different extraction rates in grass area

表2 草地不同抽取率 LiDAR 数据生成 DEM 精度评价结果

Table 2 Accuracy evaluation of DEM generated with LiDAR data of different extraction rates in grass areas

编号 No.	不同抽取率 LiDAR 数据 LiDAR data with different extraction rates	RMSE m
1	1/10	0.065
2	1/50	0.281
3	1/100	0.298
4	1/500	0.686
6	1/1000	1.096

2.2.3 林地。林地不同抽取率 LiDAR 数据生成 DEM 及精度评价结果见图4和表3。由图4和表3可知,DEM 插值精度随抽取率的增大而逐渐降低, RMSE 从 0.088 m 逐渐增大到 2.201 m。当抽取率为 1/50 时, RMSE 为 0.835 m; 当抽取率为 1/100 时, RMSE 为 0.960 m, 接近 1.000 m; 当抽取率增加到 1/1 000 时, RMSE 则增大到 2.201 m。

与城区和草地相比,林地 DEM 精度随抽取率的变化更显著,且抽取率为 1/10~1/50,林地 RMSE 骤增, RMSE 从 0.088 m 增加到 0.835 m,远大于城区和草地同抽取率下 RMSE 值的变化,且在每一种抽取率下林地点云插值 DEM 的 RMSE 值均高于城区和草地的 RMSE 值。

通过对城区、草地和林地 3 种不同地物类型不同抽取率

2.2.2 草地。与上述城区所示结果类似,草地不同抽取率 LiDAR 数据生成 DEM 也随着抽取率的不断增大, DEM 结果精度逐渐降低, RMSE 则从 0.065 m 逐渐增大到 1.096 m, 结果见图3和表2。

由表2可知,当抽取率为 1/500 时, RMSE 为 0.686 m; 当抽取率为 1/1 000 时, RMSE 为 1.096 m, 大于 1.000 m。与城区相比,当数据抽取率小于 1/100 时,草地 RMSE 小于城区 RMSE, 当数据抽取率大于 1/500 时,草地 RMSE 逐渐大于城区 RMSE, 说明草地 DEM 精度受点云密度的影响较城区大。

LiDAR 数据 DEM 生成结果分析可知,3 种地物类型 DEM 生成精度均随抽取率的增大而逐渐降低,所不同的是地物类型不同 RMSE 的变化范围不同。对城区而言, RMSE 从 0.109 m 逐渐增大到 0.691 m; 对草地而言, RMSE 则从 0.065 m 逐渐增大到 1.096 m; 对林地而言, RMSE 从 0.088 m 逐渐增大到 2.201 m。

3 结论

为了降低数据获取成本、提高数据处理效率,该研究选取城区、草地和林地 3 种不同地物类型,以机载 LiDAR 数据为基础,通过对地面点进行抽取操作以获得不同密度地面点数据并插值生成 DEM,最终获得不同抽取率下 DEM 数据生成的精度。

结果表明,DEM 生成精度均随抽取率的增大而逐渐降低。对城区而言, RMSE 从 0.109 m 逐渐增大到 0.691 m; 对草地而言, RMSE 从 0.065 m 逐渐增大到 1.096 m; 对林地而言, RMSE 从 0.088 m 逐渐增大到 2.201 m。不同地物类型生成相同精度的 DEM 所需点云密度不同。如当要求 DEM 生成精度小于 0.500 m 时,对于城区而言,数据密度可以选择约为 0.033 点/m²,对于草地而言,则可以选择约为 0.100 点/m²,对于林地而言,则可以选择约为 1.000 点/m²。

综上所述,DEM 生成精度与机载 LiDAR 数据密度密切

相关,随着密度的降低 DEM 精度逐渐下降,且不同地物类型 DEM 精度下降幅度不同,但该研究所选研究区地形结构及地物类型相对简单,所得结论在其他复杂地形条件下的适用

性有待进一步验证,因而在未来研究中应尽量选取地形结构及地物类型相对复杂的区域以增加结论的适用性。

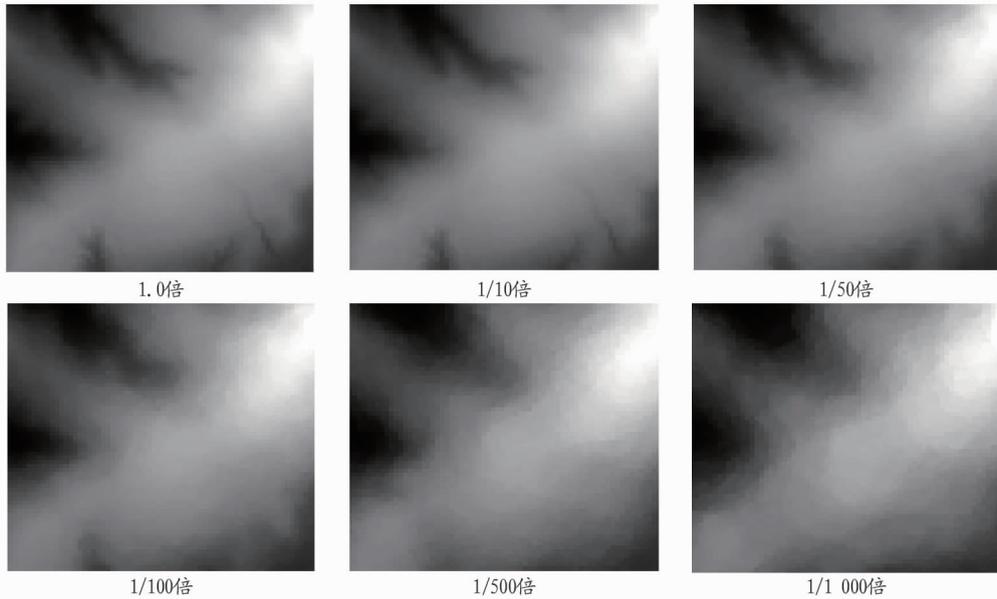


图 4 林地不同抽取率 LiDAR 数据 DEM 生成结果

Fig. 4 Results of DEM generated with LiDAR data of different extraction rates in forest area

表 3 林地不同抽取率 LiDAR 数据生成 DEM 精度评价结果

Table 3 Accuracy evaluation of DEM generated with LiDAR data of different extraction rates in forest areas

编号 No.	不同抽取率 LiDAR 数据 LiDAR data with different extraction rates	RMSE m
1	1/10	0.088
2	1/50	0.835
3	1/100	0.960
4	1/500	1.519
5	1/1000	2.201

参考文献

- [1] MINAR J, EVANS I S. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping[J]. *Geomorphology*, 2008, 95(3/4): 236-259.
- [2] WILSON J P. Digital terrain modeling[J]. *Geomorphology*, 2012, 137(1): 107-121.
- [3] VAN NIEKERK A. A comparison of land unit delineation techniques for land evaluation in the Western Cape, South Africa[J]. *Land use policy*, 2010, 27(3): 937-945.
- [4] 杜敏, 李明会, 颜萍, 等. 全数字摄影测量 DEM 在生产中的质量控制[J]. *测绘与空间地理信息*, 2009, 32(4): 222-224.
- [5] 尤号田, 邢艳秋, 王萌, 等. 小光斑激光雷达数据估测森林生物量研究

进展[J]. *森林工程*, 2014, 30(3): 39-42.

- [6] HODGSON M, BRESNAHAN P. Accuracy of airborne LIDAR-derived elevation: Empirical assessment and error budget[J]. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 2004, 70(3): 331-339.
- [7] 刘征. 基于激光雷达地形测绘建立 DEM 模型[J]. *遥感技术与应用*, 2002, 17(5): 264-268.
- [8] 赵峰, 李增元, 王韵晟, 等. 机载激光雷达(LiDAR)数据在森林资源调查中的应用综述[J]. *遥感信息*, 2008(1): 106-110.
- [9] 冯光胜. LiDAR 在地质灾害调查与监测中的应用研究[J]. *铁道工程学报*, 2014, 31(7): 12-16.
- [10] GONG J Y, LI Z L, ZHU Q, et al. Effects of various factors on the accuracy of DEMs: An intensive experimental investigation [J]. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 2000, 66(9): 1113-1117.
- [11] 靳克强, 龚志辉, 王勃, 等. 机载激光雷达数据提取 DEM 的关键技术分析[J]. *测绘工程*, 2010, 19(6): 39-42.
- [12] POLAT N, UYSAL M, TOPRAK A S. An investigation of DEM generation process based on LiDAR data filtering, decimation, and interpolation methods for an urban area[J]. *Measurement*, 2015, 75: 50-56.
- [13] MACEACHREN A M, DAVIDSON J V. Sampling and isometric mapping of continuous geographic surfaces[J]. *The American cartographer*, 1987, 14(4): 299-320.
- [14] 尤号田, 邢艳秋, 王铮, 等. 点云密度对激光雷达估计森林样方平均树高的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(5): 143-148.
- [15] BURROUGH P A, MCDONELL R A. Principles of geographical information systems[M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [16] 的含量[J]. *食品科技*, 2009, 34(8): 260-263.
- [12] 杜军, 纪晓俊, 黄和, 等. 离子排斥色谱法同时测定 2,3-丁二醇发酵液中的葡萄糖和木糖及各种代谢产物[J]. *分析化学*, 2009, 37(5): 681-684.
- [13] 布坎南 RE, 吉本斯 NE. 伯杰细菌鉴定手册[M]. 8 版. 北京: 科学出版社, 1984: 729-759.
- [14] 沈萍, 范秀容, 李广武. 微生物学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 26-31, 116-120.
- [15] 刘秀花. 芽孢杆菌生物学及其应用[M]. 开封: 河南大学出版社, 2007: 27-57.
- [16] APETROAIE-CONSTANTIN C, MIKKOLA R, ANDERSSON M A, et al. *Bacillus subtilis* and *B. mojavensis* strains connected to food poisoning produce the heat stable toxin amyloisin[J]. *Journal of applied microbiology*, 2009, 106(6): 1976-1985.

(上接第 3 页)

- [7] XIAO Z J, LIU P H, QIN J Y, et al. Statistical optimization of medium components for enhanced acetoin production from molasses and soybean meal hydrolysate[J]. *Applied microbiology and biotechnology*, 2007, 74(1): 61-68.
- [8] XIAO Z J, XU P. Acetoin metabolism in bacteria[J]. *Critical reviews in microbiology*, 2007, 33(2): 127-140.
- [9] WESTERFELD W W. A colorimetric determination of blood acetoin[J]. *The journal of biological chemistry*, 1945, 161(2): 495-502.
- [10] CLARK D, CRONAN J E, JR. *Escherichia coli* mutants with altered control of alcohol dehydrogenase and nitrate reductase[J]. *Journal of bacteriology*, 1980, 141(1): 177-183.
- [11] 任潇, 纪晓俊, 孙世闻, 等. 肌酸比色法快速测定发酵液中 3-羟基丁酮