

GBInSAR 隔河岩大坝变形监测试验

黄其欢¹, 岳建平¹, 贡建兵²

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098;
2. 湖北清江水电开发有限责任公司库坝中心, 湖北 宜昌 443000)

摘要:为解决传统大坝变形监测方法仅能获取点变形信息,且监测周期长、劳动强度大等问题,将地基合成孔径雷达干涉(GBInSAR)变形监测新技术用于大坝变形监测。分析 GBInSAR 变形监测系统及其成像特点,建立利用稳定参考点进行大气校正的数学模型,并应用于清江隔河岩大坝监测。结果表明:在距离 1 300 m 处大气扰动误差可达 85 mm,雷达视线向大气扰动是影响 GBInSAR 变形监测精度的主要因素;消除大气影响后 GBInSAR 监测的坝体变形速率与垂线监测结果一致;大坝表孔泄水闸变形明显大于坝体变形,且随水位上升变形量增大。

关键词:隔河岩大坝;变形监测;GBInSAR;IBIS-L;大气校正;永久散射体

中图分类号:P237 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)03-0047-05

Monitoring of Geheyan Dam deformation using GBInSAR technology//HUANG Qihuan¹, YUE Jianping¹, GONG Jianbing²(1. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Reservoir and Dam Management Center, Hubei Qingjiang Hydroelectric Development Co., Ltd., Yichang 443000, China)

Abstract: To overcome the disadvantages of conventional dam deformation monitoring methods, which are high labor intensity, long cycle, and acquiring of only pointwise information, a recently developed technology, called ground-based synthetic aperture radar interferometry (GBInSAR), was applied to dam deformation monitoring. Based on an analysis of the GBInSAR system and imaging characteristics, a numerical model for atmospheric phase correction using a stable reference point was established and applied to monitor the deformation of the Geheyan Dam. The results show that at a location of 1 300 m downstream of the dam, atmospheric disturbance caused an error of up to 85 mm. Atmospheric disturbance interfering with the sight of radars was the main factor decreasing the accuracy of dam deformation monitoring with GBInSAR technology. After elimination of the influence of atmospheric disturbance, the results of dam deformation monitoring with GBInSAR technology agreed with plummet observations. The results also show that the deformation of the water release gate at the surface outlet was significantly greater than the dam body deformation, and it increased with the rise of the water level.

Key words: Geheyan Dam; deformation monitoring; GBInSAR; IBIS-L; atmospheric phase correction; permanent scatterer

大坝及边坡稳定性问题是当前我国大型水利工程建设中的一个关键工程技术难题^[1]。传统的精密水准仪、全站仪以及 GPS 等大地测量方法仅能获取单个监测点的变形信息,很难满足水利工程灾害预测的实际需要。基于星载平台的 SAR 干涉技术受雷达视角、失相干和大气延迟的限制,无论是常规 SAR 干涉法还是更为先进的 SAR 影像时间序列探测法^[2-4]都难以胜任,具体原因有:①SAR 影像时空失相干使干涉相位质量差,降低变形监测的可靠性;②卫星重访周期长,变形监测时间分辨率低;③山区坡度大,容易形成图像阴影;④星载 SAR 视角固定,

部分变形体无法监测到;⑤山区高差大,大气延迟误差大。

近十年来,人们将干涉平台从空中移至地面,开发了地基合成孔径雷达干涉(GBInSAR)变形监测新技术,该技术基于微波主动成像方式获取监测区域二维影像,能在几分钟内获取数平方公里高精度、高时空分辨率的变形信息,其关键技术原理见文献[5]。在国外,GBInSAR 技术已经广泛用于滑坡^[6,11]、冰川^[12]和大坝^[13]变形监测中;在国内,GBInSAR 技术的开发与应用还处于起步阶段,相关的文献报道还非常少。

本文在分析 GBInSAR 变形监测系统及其成像特点的基础上,对隔河岩大坝进行 GBInSAR 变形监测试验,并将结果与同期的垂线监测结果进行对比。

1 GBInSAR 成像与变形监测

1.1 GBInSAR 成像

地基 SAR 系统由雷达传感器、滑动轨道、计算机和供电模块组成,图 1 为意大利 IDS 公司与弗洛伦萨大学联合研制的 IBIS-L (image by interferometric survey) 系统,该系统利用安装在滑动轨道上的传感器模块生成、发射和接收雷达信号,用 USB 接口连接计算机,通过传感器在滑动轨道上的滑动产生合成孔径效果,地基 SAR 以固定的视角不断地发射和接收回波信号,经过聚焦处理后形成极坐标形式的二维 SAR 影像。在影像像元内,距离向分辨率是固定的,而方位向分辨率与像元夹角及目标距离有关(图 2),通过距离向和方位向的结合,监测区域被分割成若干个小单元,距离越远,方位向分辨率越低。

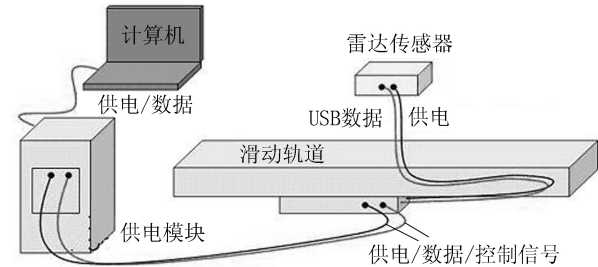


图 1 IBIS-L 变形监测系统

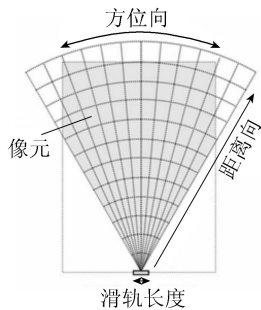


图 2 地基 SAR 影像分辨率示意图

由于地基 SAR 发射雷达波束,并根据地表反射回波的接收顺序记录并处理成 SAR 影像,这样距离近的反射目标就先被记录下来,这种成像模式导致了 SAR 图像中的透视收缩 (foreshortening)、顶底位移 (layover) 和雷达阴影 (shadow) 等几何形变现象,给地基 SAR 影像解译造成困难。图 3 为这几种几何畸变的示例。

1.2 地基 SAR 变形监测

设地基 SAR 两次测量中目标发生视线向变形 d_r ,考虑到大气延迟以及测量噪声的影响,两次测量

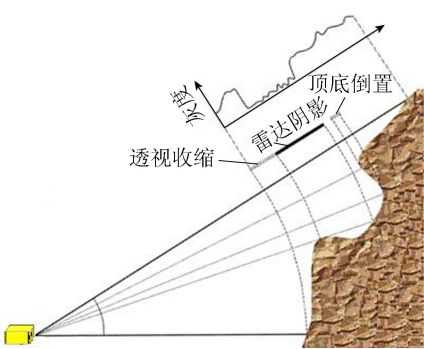


图 3 地基 SAR 成像几何畸变示意图

的相位差表示为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}d_r + \Delta\varphi_a + \varphi_n \tag{1}$$

式中: $\Delta\varphi$ 为两次测量的相位差; λ 为雷达波长; $\Delta\varphi_a$ 为大气延迟相位差; φ_n 为观测噪声。

若在变形体附近选取稳定的参考点,即 $d_r = 0$,对该稳定点有

$$\Delta\varphi_s = \Delta\varphi_{as} + \varphi_{ns} \tag{2}$$

选取相干像元,忽略测量噪声,将式(1)(2)差分即可求出大气相位,被测目标雷达视线向 (line of sight, LOS) 形变为

$$d_r = -\frac{\lambda}{4\pi}(\Delta\varphi - \Delta\varphi_s) \tag{3}$$

2 IBIS-L 变形监测试验与结果分析

2.1 测区概况与数据采集

隔河岩大坝为“上重下拱”重力拱坝,坝顶高程 206 m,最大坝高 151 m,坝顶弧长 648 m;溢流段位于坝的中部,共设 7 个表孔,4 个深孔和 2 个放空兼导流底孔,表孔堰顶高程 181.8 m,尺寸为 12 m×18.2 m;深孔孔底高程 134 m,尺寸为 4.5 m×6.5 m;底孔孔底高程 95 m,尺寸为 4.5 m×6.5 m,各孔口均用弧形闸门控制操作。电站厂房位于右岸河滩阶地上;左岸是 300 t 级垂直升船机,中间错船渠长 400 m,宽 30 m。

IBIS-L 采集点位于大坝下游左岸 1 300 m 处(图 4),采用连续监测模式,从 2013 年 7 月 27 日 20 时到 08 月 2 日 11 时,历时 5 d 14 h 48 min。数据采集



图 4 IBIS-L 数据采集

范围为 $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$,距离 $0 \sim 1\,299.8\text{ m}$,分辨率分别为 0.252° 和 0.50 m ,共获取地基 SAR 影像1330 景。

2.2 数据处理与分析

考虑到方位分辨率与距离有关,将原 SAR 影像用极坐标表示,图 5 为 SAR 能量均值影像(其中 P1 ~ P4 分别对应图 4 中的 A ~ D 区域),图 6 为影像局部放大图(其中 Pt1、Pt6、Pt12 位于坝体上,Pt3、Pt8、Pt14 位于表孔泄洪闸上,R 为高相干像元)。从图中可以清晰地解译出坝体 A 及 7 个表孔、右岸电站及边坡阶梯 B、左岸升船机及错船渠 D,特别地,位于大坝下游的 4 排锚桩 C 反射信号明显。

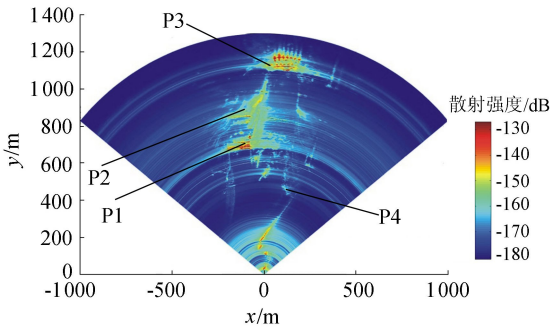


图 5 监测区域地基 SAR 能量均值

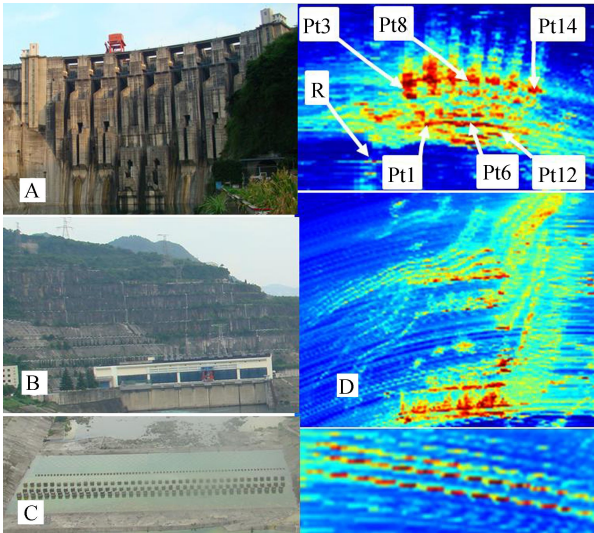


图 6 地基 SAR 影像局部放大图

变形监测干涉处理采用直连组合方式获取干涉图,如图 7 所示。数据处理时像元选择的质量控制标准为:热噪声信噪比大于 15.0 dB ,估计信噪比大于 10.0 dB ,时间相干系数大于 0.50 ,相位稳定系数大于 0.5 。由于影像之间的干涉基线为零,干涉相位包含了监测目标雷达视线向的形变、大气延迟误差以及观测噪声。

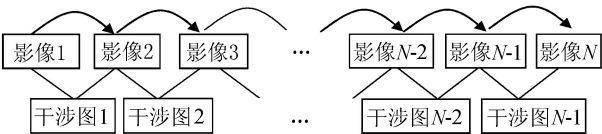


图 7 地基 SAR 影像直连组合干涉方式

图 8 为图 5 中目标 P1 ~ P4 的雷达视线向相位时间序列,从中可以看出:①相位变化非常大,变化范围为 $-35 \sim 50\text{ mm}$;②相位变化在 18 时左右最小,随后逐渐增大,在次日 0 时左右达到最大,并维持到 7 时左右,随即急剧减小,至 18 时达到最小值;③相位变化明显以 1 天为周期;④从相位波动幅度看,距离监测点最远的 P3 波动幅度最大,P1 和 P4 波动幅度最小。

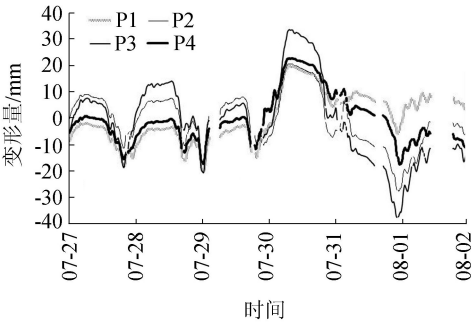


图 8 监测点 P1 ~ P4 相位变化

根据隔河岩大坝监测组提供的大坝中部 15 号坝段 PL15 垂线的监测数据,整个监测过程中坝体变形量很小(图 9),这与 IBIS-L 的变形结果相比存在明显的系统误差,由于在变形分析中采用了高质量的像元,可以忽略相位噪声对结果的影响,根据式(3),这种误差是由雷达视线向的大气延迟随时间的变化引起。相位变化曲线的日周期性反映了雷达视线向大气延迟随气温、气压及相对湿度的变化,这种变化在 $1\,300\text{ m}$ 的距离上最大可达 85 mm 。另外,大气扰动与雷达视线向距离有关,距离越远影响越大。因此,利用 GBSAR 进行水利工程变形监测必须考虑大气扰动的影响。

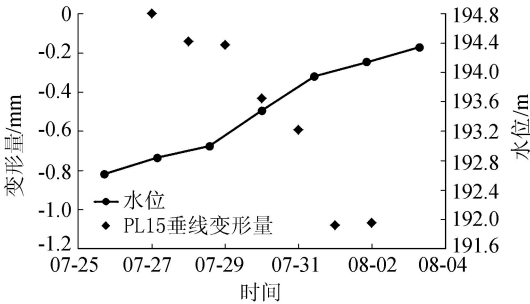


图 9 大坝中部 PL15 垂线 169 m 高程径向
变形与水位关系

考虑大气延迟相位在雷达视线向的一致性,选择稳定区域高相干像元作为参考点,将其他像元与参考点求差以消除大气影响,为此在大坝右岸靠近坝体的基岩处选取高相干像元 R 作为参考点,图 10 显示了去除大气影响后图 6 中部分像元的变形时间序列。

从图 10 可以看出:①大气延迟相位消除明显;

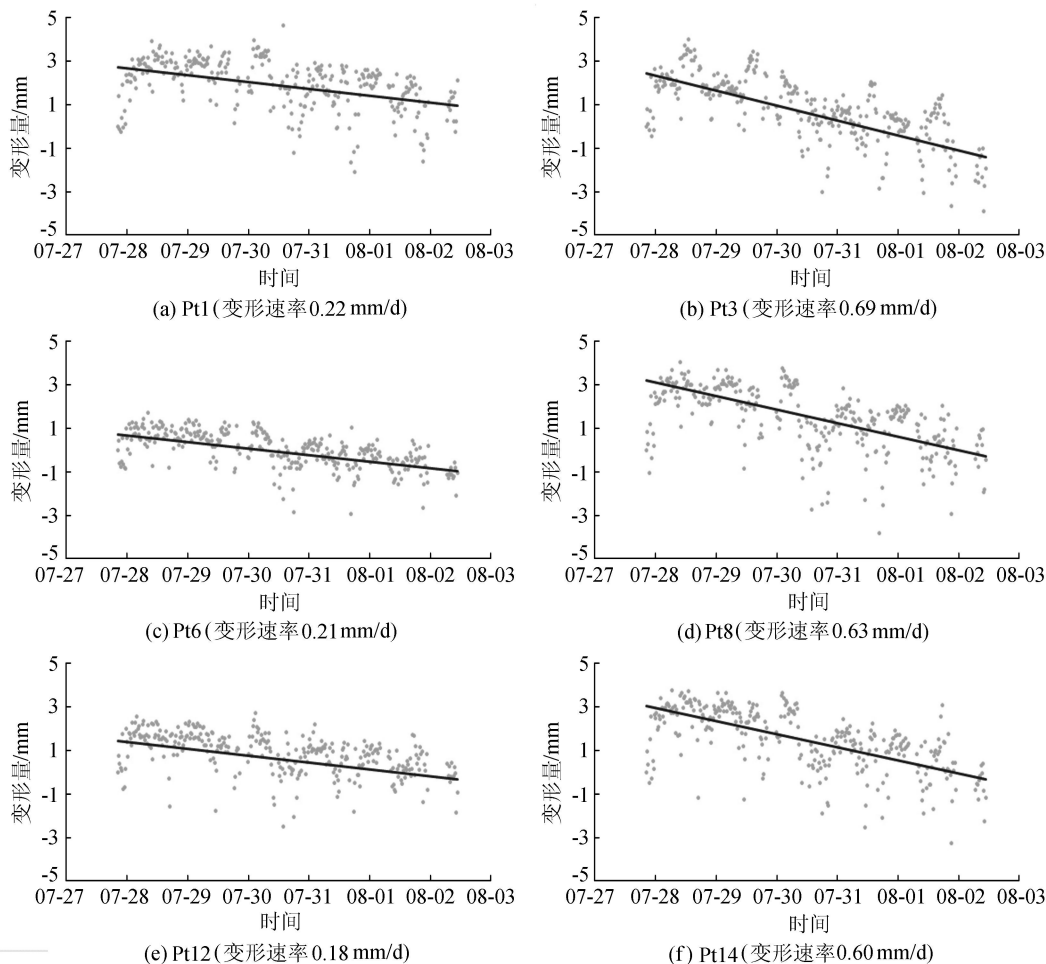


图 10 GBIInSAR 监测的坝体及表孔排水闸变形时间序列

②所有点都存在沿水流方向的径向位移,且水位上升时,径向位移向下游增大;③坝体上点位的变形速率在 0.2 mm/d 左右,明显小于表孔内泄水闸 0.6 mm/d 的变形速率,这说明水位上升时,表孔泄水闸发生了相对较大的变形;④6 d 的监测时间内坝体总体变形约 1.2 mm,坝体形变速率与垂线监测速率 (0.197 mm/d) 结果相当;⑤变形序列中还存在较小的周期性大气扰动。

3 结 论

a. GBIInSAR 监测获取的是区域性大面积形变信息,相对传统单点监测信息量更大。

b. 影响 GBIInSAR 变形监测精度的主要因素是雷达视线向大气扰动(如气温、气压和相对湿度的变化),隔河岩大坝变形监测试验结果表明,在 1 300 m 的距离上大气扰动的影响可达 85 mm,其大气扰动与雷达传播距离有关,距离越远影响越大。

c. 采用稳定参考点法消除大气影响后,GBIInSAR 变形监测结果与垂线监测结果一致性较好。

d. 采用 GBIInSAR 技术监测的大坝表孔泄洪闸变形量大于坝体变形,且随着库区水位的增长,变形

沿水流向逐渐增大。

本文大气扰动相位仅采用像元间简单的差分消除法,没有考虑像元距离的远近;另外 GBIInSAR 仅能获取雷达视线向的变形,采集大坝区域高精度的 DTM,将 GBIInSAR 监测结果进行地理编码将是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 郑守仁. 我国水能资源开发利用的机遇与挑战[J]. 水利学报, 2007, 38 (增刊 1): 1-6. (ZHENG Shouren. Development and utilization of hydropower resources in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (Sup1): 1-6 (in Chinese))
- [2] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatters in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8-20.
- [3] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential interferograms [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40 (11): 2375-2383
- [4] 陈强, 刘国祥, 李永树, 等. 干涉雷达永久散射体自动探测: 算法与实验结果[J]. 测绘学报, 2006, 35(2): 112-

117. (CHEN Qiang, LIU Guoxiang, LI Yongshu, et al. Automated detection of permanent scatterers in radar interferometry: algorithm and testing results [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35 (2): 112-117. (in Chinese))
- [5] 黄其欢, 张理想. 基于 GBInSAR 技术的微变形监测系统及其在大坝变形监测中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (3): 84-87. (HUANG Qihuan, ZHANG Lixiang. Ground based synthetic aperture radar Interferometry and its application to deformation monitoring[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31 (3): 84-87. (in Chinese))
- [6] STROZZI T, FARINA P, CORSINI A, et al. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry[J]. Landslides, 2005, 2 (3): 193-201.
- [7] NOFERINI L, PIERACCINI M, MECATTI D, et al. Using GB-SAR technique to monitor slow moving landslide[J]. Engineering Geology, 2007, 95 (3/4): 88-98.
- [8] LUZI G, NOFERINI L, MECATTI D, et al. Using a ground-based SAR interferometer and a terrestrial laser scanner to monitor a snow-covered slope: results from an experimental data collection in Tyrol (Austria) [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47 (2): 382-393.
- [9] TARCHI D, CASAGLI N, FANTI R, et al. Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy [J]. Engineering Geology, 2003, 68 (1/2): 15-30.
- [10] LEVA D, NICO G, TARCHI D et al. Temporal analysis of a landslide by means of a ground-based SAR interferometer [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2003, 41 (4): 745-752.
- [11] HERRERA G, FERNÁNDEZ-MERODO A, MULAS J, et al. A landslide forecasting model using ground based SAR data: the portalet case study [J]. Engineering Geology, 2009, 105 (3/4): 220-230.
- [12] LUZI G, PIERACCINI M, MECATTI D, et al. Monitoring of an alpine glacier by means of ground based SAR interferometry [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4 (3): 495-499.
- [13] ALBA M, BERNARDINI G, GIUSSANI A, et al. Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques [EB/OL]. (2008-06-23) http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/23.pdf.

(收稿日期: 2015 - 04 - 21 编辑: 郑孝宇)

(上接第 19 页)

- [5] DETWEILER Z R, FERRIS J B. Interpolation methods for high-fidelity three-dimensional terrain surfaces [J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47 (4): 209-217.
- [6] 李晓军, 王长虹, 朱合华. Kriging 插值方法在地层模型生成中的应用[J]. 岩土力学, 2009 (1): 157-162. (LI Xiaojun, WANG Changhong, ZHU Hehua. Kriging interpolation and its application to generating stratum model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009 (1): 157-162. (in Chinese))
- [7] 张殿新, 袁德奎, 陶建华. 波浪、潮流数值模拟中的网格数字地形的生成及可视化[J]. 港工技术, 2005 (4): 5-8. (ZHANG Dianxin, YUAN Dekui, TAO Jianhua. Digital terrain is produced and visualized in wave and tide[J]. Port Engineering Technology, 2005 (4): 5-8. (in Chinese))
- [8] 包世泰, 廖衍旋, 胡月明, 等. 基于 Kriging 的地形高程插值[J]. 地理与地理信息科学, 2007 (3): 28-32. (BAO Shitai, LIAO Yanxuan, HU Yueming, et al. Terrain interpolation based on Kriging method[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007 (3): 28-32. (in Chinese))
- [9] 杜国明, 汪光松, 吴超羽, 等. 克里金在珠江河道地形空间数据内插中的应用[J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2007, 46 (1): 119-122. (DU Guoming, WANG Guangsong, WU Chaoyu, et al. Application of Kriging interpolation to spatial data of Pearl River riverway [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, 46 (1): 119-122. (in Chinese))
- [10] 曾怀恩, 黄声享. 基于 Kriging 方法的空间数据插值研究[J]. 测绘工程, 2007, 16 (5): 5-8. (ZENG Huaien, HUANG Shengxiang. Research on spatial data interpolation based on Kriging interpolation [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2007, 16 (5): 5-8. (in Chinese))
- [11] 蔡迪花, 郭锐, 李崇伟. 基于 DEM 的气温插值方法研究 [J]. 干旱气象, 2009, 27 (1): 10-17. (CAI Dihua, GUO Ni, LI Chongwei. Interpolation of air temperature based on DEM over eastern region of Gansu [J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, 27 (1): 10-17. (in Chinese))
- [12] 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展, 2000, 15 (3): 260-265. (LI Xin, CHENG Guodong, LU Ling. Comparison of spatial interpolation methods[J]. Advances in Earth Science, 2000, 15 (3): 260-265. (in Chinese))

(收稿日期: 2015 - 10 - 16 编辑: 熊水斌)