

# 宁南地区地电阻率变化特征对比分析

马继文<sup>1</sup>, 丁凤和<sup>2</sup>, 栾博文<sup>1</sup>, 马治宁<sup>3</sup>

<sup>1</sup>固原地震监测中心站, 宁夏 固原

<sup>2</sup>宁夏地震台, 宁夏 银川

<sup>3</sup>中卫地震监测中心站, 宁夏 中卫

收稿日期: 2022年6月17日; 录用日期: 2022年8月15日; 发布日期: 2022年8月22日

## 摘要

宁夏南部地区地质构造复杂, 地震活动活跃, 因此, 对宁南地区地电阻率数据的相关特性进行分析研究对地电阻率异常信息的研判具有现实意义。本课题就固原地电阻率和海原地电阻率数据的相关性和差异性进行分析, 对自2014年以来产生的数据进行处理计算, 分析两者地电阻率数据的年变相关性, 并通过相关性的数据量化与典型地震事件进行分析, 提取异常信息的研判参数。其次, 通过对地电阻率数据的加速度、测值比进行计算分析, 产出两者之间的差异性指标, 并分析季节性变化对地电阻率数据的影响, 从而为地电阻率数据的异常信息判定提供依据。

## 关键词

地电阻率, 对比分析, 相关性, 差异判定

# The Southern Region of Ningxia Georesistivity Data Variation Characteristics Comparative Analysis

Jiwen Ma<sup>1</sup>, Fenghe Ding<sup>2</sup>, Bowen Luan<sup>1</sup>, Zhining Ma<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Guyuan Earthquake Monitoring Center, Guyuan Ningxia

<sup>2</sup>Ningxia Seismic Station, Yinchuan Ningxia

<sup>3</sup>Zhongwei Earthquake Monitoring Center, Zhongwei Ningxia

Received: Jun. 17<sup>th</sup>, 2022; accepted: Aug. 15<sup>th</sup>, 2022; published: Aug. 22<sup>nd</sup>, 2022

## Abstract

The southern region of Ningxia has a complex geological structure and active seismic activity. There-

fore, it is of practical significance to analyze and study the correlation characteristics of the georesistivity data in southern Ningxia for the judgment of the anomalous information on georesistivity. This topic analyzes the correlation and difference of the georesistivity data of Guyuan and Haiyuan, processes and calculates the data produced since 2014, and analyzes the annual correlation of the two georesistivity data; the data quantification of correlation is analyzed with typical earthquake events, and the judgment parameters of abnormal information are extracted. Secondly, by calculating and analyzing the acceleration and measured value ratio of the georesistivity data, the difference index between the two is produced, and the influence of seasonal changes on the georesistivity data is analyzed, so as to provide a basis for the determination and improvement of abnormal information of the georesistivity data.

## Keywords

Georesistivity Data, Comparative Analysis, Correlation, Difference Judgment

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

自 1966 年邢台地震后,我国便开展了各项前兆观测工作,地电阻率观测作为最先开展的观测项目之一,大多数台站的地电阻率年变形态呈“冬高夏低”的“正常年变”,台址表层介质的地电阻率相对变化的影响系数为正,部分台站年变呈“冬低夏高”的“反向年变”形态[1],固原台就是反向年变较为典型的台站之一。同属宁南地区的海原台,其地电阻率是近几年新架设的观测项目,数据质量较为稳定,由于固原和海原地电阻率观测站直线距离约为 80 公里,相距较近,因此,对两者数据进行相关性对比分析,有助于我们对该地区及邻区的地电阻率观测状况和数据变化信息进行系统性观测分析[2],从而为宁南地区地电阻率数据在异常信息的提取和研判方面提供一个可信度较高的依据,为以后的地震预报工作提供一个有力的支持。

## 2. 台站地质构造背景简介

### 2.1. 固原地电台地质构造背景

固原地电台位于固原市原州区彭堡乡彭堡村,距离固原市区 14 km。该台地处宁夏南部山区,属大陆干旱性气候。多年平均降雨量为 478 mm,年平均蒸发量为 1772 mm 左右,年均气温 6.2℃,年温差在 27℃左右。测区位于清水河压陷型盆地内,清水河盆地展布于香山-桃山、马东山-六盘山山脉与烟筒山-窑山和由“南北古脊梁”构成的残山丘陵、黄土丘陵之间,长约 180 km,宽 5~13 km,海拔 1260~1400 m。基底由古近系寺口子组、清水营组和新近系红柳沟组构成,盆地充填物以第四系冲、洪积相砂砾石-粘质砂土、砂质粘土为主,厚 10~400 m,构成清水河盆地的主要含水岩组。盆地内的次级地貌主要为清水河冲积平原,地电观测区在清水河古冲沟塬面上,地势相对平坦。

### 2.2. 海原地电台地质构造背景

海原地电台测区位于海原盆地西北边缘,海原盆地展布于南、西华山北麓,走向北西西,南界为海原断裂带,北侧可能亦为断裂控制,沉降中心位于山前地带,地质构造上属于全新统冲积物层,海拔 1805

m。台站所属地属宁夏中部干旱带，大陆性季风气候明显，特点是春暖迟、夏热短、秋凉早、冬寒长。年均气温 7℃，一月均温 -6.7℃，七月均温 19.7℃。年降水量，多年平均 286 mm，最多 706 mm，最少 325 mm。该场地在地貌上处于海原盆地之内，周围地势平坦开阔，测区为干旱农田，地形高差小于 20 m。勘选场地位于海原断裂北侧，距离海原断裂 10.5 km。据钻孔资料，盆地第四系厚度超过 430 m，表层为上更新统风积黄土，观测环境较好。

### 3. 宁南地电阻率年变趋势对比分析

固原彭堡地电测区位于清水河压陷型盆地内，存在的主要断裂为海原~六盘山东麓断裂。观测区域南偏西约 6 km 是海原 8.5 级地震断裂带，北偏西约 5 km 是清水河断裂带。海原高台地电台位于海原盆地西北边缘，海原盆地展布于南、西华山北麓，走向北西西，南界为海原断裂带。两台站相距约 80 km (如图 1 所示)，均邻近海原断裂带和六盘山断裂带，地理位置特殊，两地地电阻率数据具有很好的对比可观测性[3]，掌握它们联合特性对异常信息的研判能够提供可信度较高的依据，因此以下我们首先对宁南地区地电阻率数据进行整体年变形态进行对比分析。

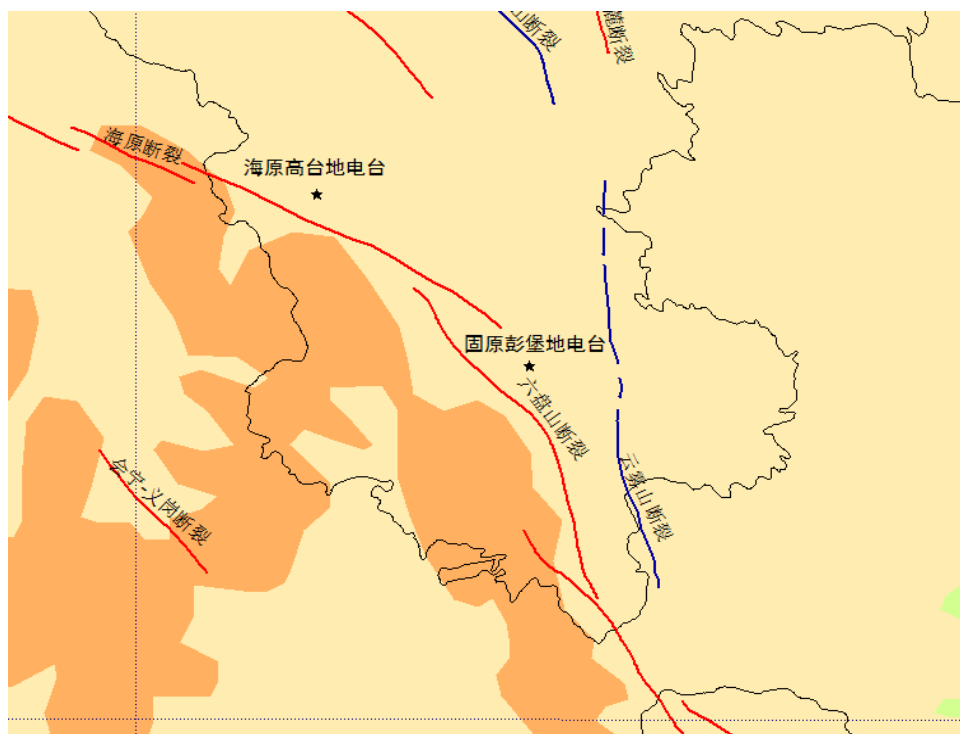


Figure 1. Distribution of georesistivity stations in southern Ningxia  
图 1. 宁南地区地电台分布图

#### 3.1. 年变幅度进行统计分析

首先对固原和海原地电阻率逐年的年变幅度进行统计分析，统计公式为

$$\delta = \rho_H - \rho_L$$

( $\delta$  为年变幅度， $\rho_H$  为地电阻率年变最高值， $\rho_L$  为地电阻率年变最低值)，发现固原地电阻率的年变幅度整体要高于海原地电阻率的年变幅度，幅度比大于 1.5 的占到全部统计结果的 41.6%，幅度比小于 1.0 的只有 16.6% (如表 1 所示)。

**Table 1.** Comparison of annual variation of georesistivity in southern Ningxia (unit:  $\Omega \cdot m$ )  
**表 1.** 宁南地区地电阻率年变幅度对比表(单位:  $\Omega \cdot m$ )

年份		2014	2015	2016	2017	2018	2019
台站	测向	年变幅度					
固原		0.055	0.0642	0.0946	0.0548	0.0662	0.0808
海原	NS	0.0512	0.102	0.0416	0.0311	0.0666	0.07
比值		1.07	0.63	2.27	1.76	0.99	1.15
固原		0.057	0.045	0.14	0.188	0.126	0.127
海原	EW	0.0562	0.0615	0.0492	0.068	0.0554	0.092
比值		1.01	0.73	2.85	2.76	2.27	1.38

从整体变化趋势来看, 固原和海原东西向数据年变幅度趋势变化较为一致, 海原地电阻率北南向变化趋势与其它测向相反[4], 进行反向处理后, 数据变化趋势与固原地电阻率北南向变化趋势基本吻合(如图 2 所示); 地电阻率东西向两测项数据年变趋势 2016 年 7 月之前变化相对一致, 自 2016 年下半年以来变化趋势逐渐分离(如图 2 所示), 其原因可能是固原东西向地电阻率自 2016 年下半年以来长期受环境因素干扰有关, 造成固原东西向地电阻率数据出现显著的下降趋势性变化, 且变化幅度较大, 致使整体年变幅度较以往有较大幅度变化, 呈现破年变变化。

### 3.2. 宁南地区地电阻率相关性分析

固原地电阻率和海原地电阻率东西向观测数据都是呈现“夏高冬低”的“反向年变”形态[5], 只有海原地电阻率北南向观测数据呈现的是“冬高夏低”的年变形态[6] [7] [8]。

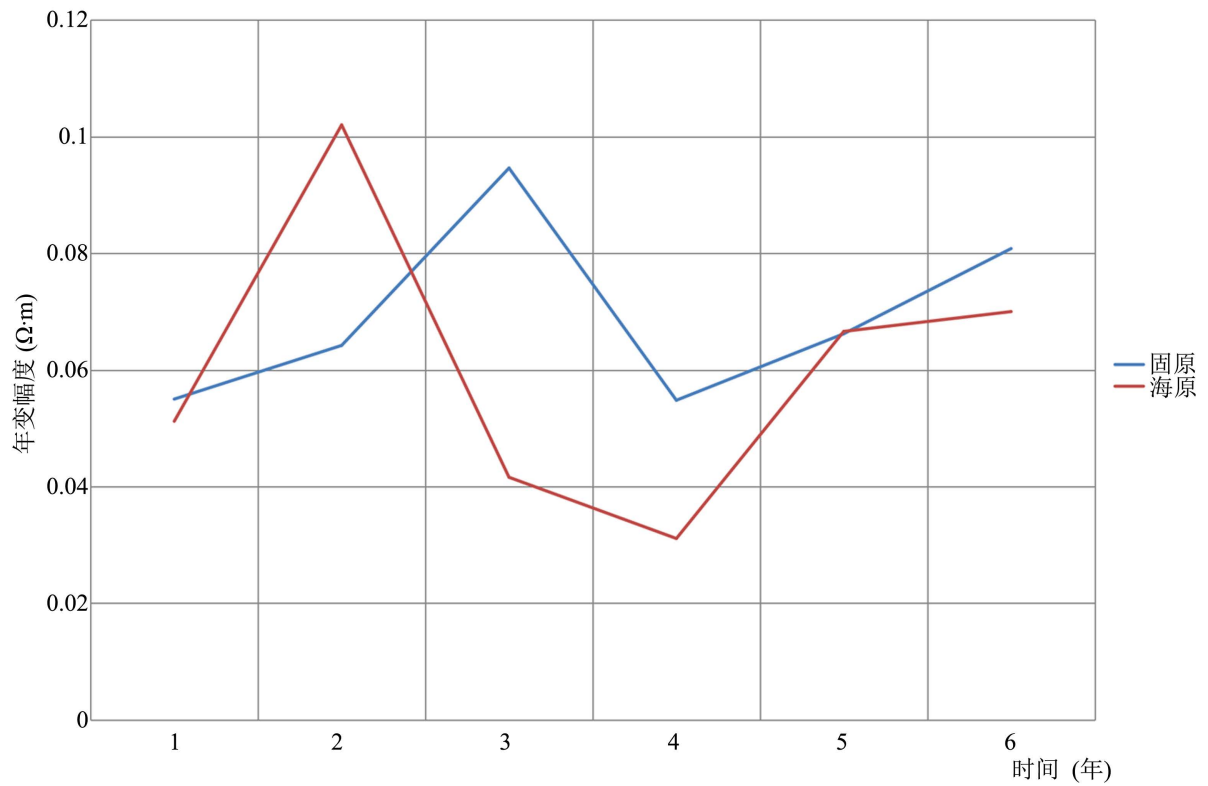
对于两台站地电阻率数据均呈现正弦波式变化, 因此我们对两台站相同测道的数据进行相关性分析, 首先对海原地电阻率北南向数据进行反向坐标变换, 然后与固原地电阻率北南向数据进行对比分析, 由图 3 可以看出两者数据的变化整体趋势一致, 年变态势具有较高的相关性, 特别是在一些典型事件如数据的同时下降或上升等破年变现象出现时, 可以排除是受测区环境干扰或者设备系统故障等局部因素所造成的数据变化, 如图 3 所示, 2017 年 7、8 月间固原和海原数据同时出现的上升和下降破年变变化, 2018 年 7 月、2019 年 5 月和 2020 年 6 月两地数据也同时出现的破年变变化, 这些数据变化都可以推断为地表介质的运动造成本地区介质电性结构的变化[9], 只是由于能量的累积问题, 有些此类变化并没有能够转化为地震。

在对地电阻率东西测向数据进行分析时也是采用以上相同的推论依据进行判定, 但是在对典型事件的分析中, 不论是北南向还是东西向数据如图 4 所示, 固原和海原的数据变化趋势基本都是呈反向变化, 这一现象需要我们在以后的工作中做进一步分析。

## 4. 宁南地区地电阻率差异性分析

由于宁夏南部地区属于阴湿和半阴湿地区, 因此全年降雨相对较多, 特别是在夏季降水量较大, 降雨较为频繁, 因此夏季降雨等环境干扰因素对地电阻率观测会产生一定程度的影响[5] [10] [11] [12], 造成夏天数据的离散度和波动性较大[13]; 冬季宁南地区降雪量较少, 雪水不易融化入地, 因此对地电阻率的干扰较小, 冬季数据也较为稳定[14]。因此我们对两台站夏季和冬季的地电阻率数据变化情况做一些对比分析, 研究它们之间的一些差异性变化, 从而为数据的变化分析提供依据。

固原-海原地电阻率NS向年变幅度对比图



固原-海原地电阻率NS向年变幅度对比图

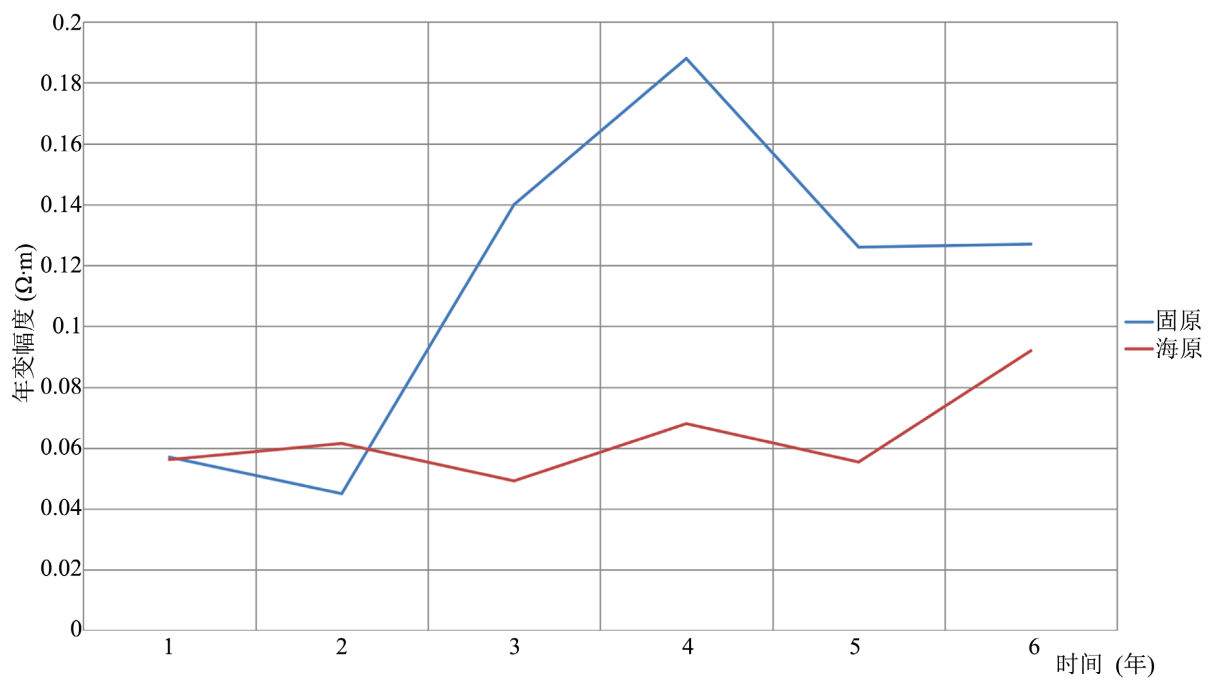
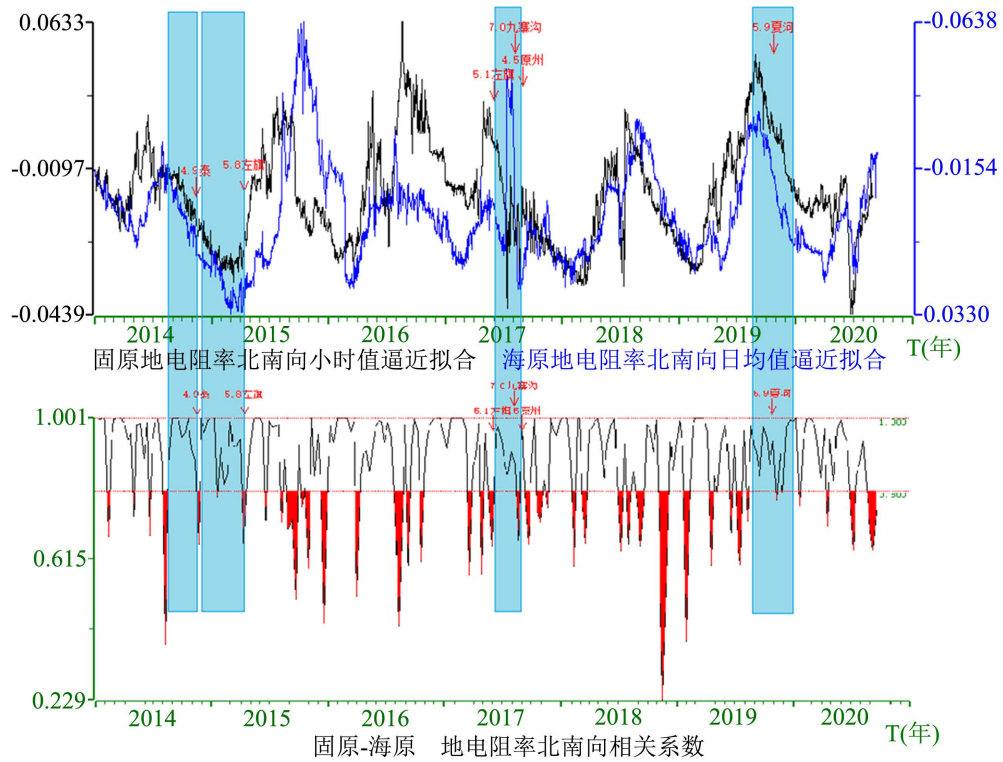
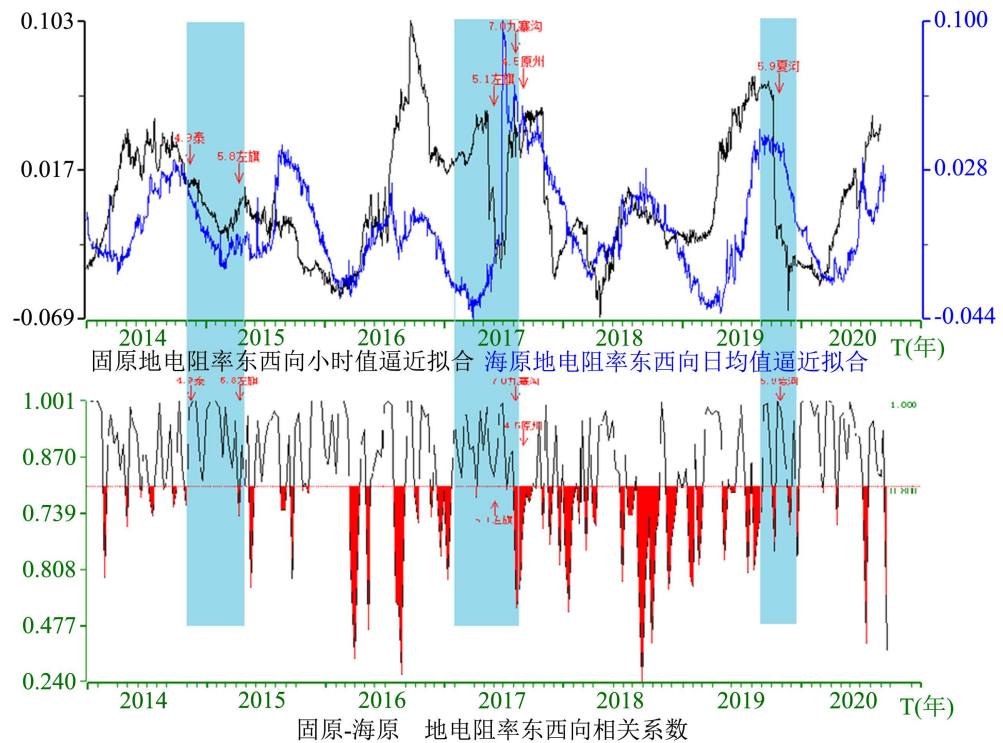


Figure 2. Comparative analysis of the annual variation of georesistivity in NS and EW directions. (Upper) NS direction; (Below) EW direction

图 2. 北南向和东西向地电阻率年变幅度对比分析图。(Upper) 北南向; (Below) 东西向



**Figure 3.** Comparative analysis of NS georesistivity correlation in southern Ningxia  
**图 3.** 宁南地区北南向地电阻率相关性对比分析图



**Figure 4.** Comparative analysis of EW georesistivity correlation in southern Ningxia  
**图 4.** 宁南地区东西向地电阻率相关性对比分析图



### 4.1. 加速度分析

首先我们运用二阶差分函数建立一个加速度计算模型[15],以此来分析研究固原和海原地电阻率数据之间及夏季和冬季之间数据变化的差异性,对比量化两者之间的差异指标[16];在此我们定义  $X(t)$  是一个基于地电阻率  $\rho_s(t)$  取样均值  $\bar{\rho}_s$  的时间  $t$  相关离散函数:

离散函数  $X(t) = \rho_s(t) - \bar{\rho}_s$ ;  $\rho_s(t)$  为随机变量;

$Y(t) = X(t+1) - X(t)$  为一阶差分函数;

$Z(t) = Y(t+1) - Y(t) = X(t+2) - 2 * X(t+1) + X(t)$  为二阶差分函数。

通过计算出地电阻率测值  $\rho_s$  变化的速度为函数  $Y(t)$  值,地电阻率测值  $\rho_s$  变化的加速度为函数  $Z(t)$  值,产出的加速度即表明一定时间段内岩石介质的电性结构是否稳定,从而为介质的变化提供依据。因此本课题对固原和海原北南和东西两测向的时测值做加速度分析,得出表 2 数据内容。表 2 数据显示每年固原和海原各测道地电阻率数据加速度值固原要显著低于海原,固原 NS 测向加速度区间为 0.026  $\Omega \cdot m$ ~0.040  $\Omega \cdot m$ ,海原 NS 测向加速度区间为 0.026  $\Omega \cdot m$ ~0.049  $\Omega \cdot m$ ,除个别年份外固原比海原普遍都低于 20% 以上,最大为 58.0%;EW 测向固原加速度值全部低于海原,固原 EW 测向加速度区间为 0.023  $\Omega \cdot m$ ~0.042  $\Omega \cdot m$ ,海原 EW 测向加速度区间为 0.038  $\Omega \cdot m$ ~0.059  $\Omega \cdot m$ ,前者比后者变化加速度值平均降低了 52.3%,最大为 77.8%。

**Table 2.** Guyuan-Haiyuan georesistivity data acceleration value (unit:  $\Omega \cdot m$ )

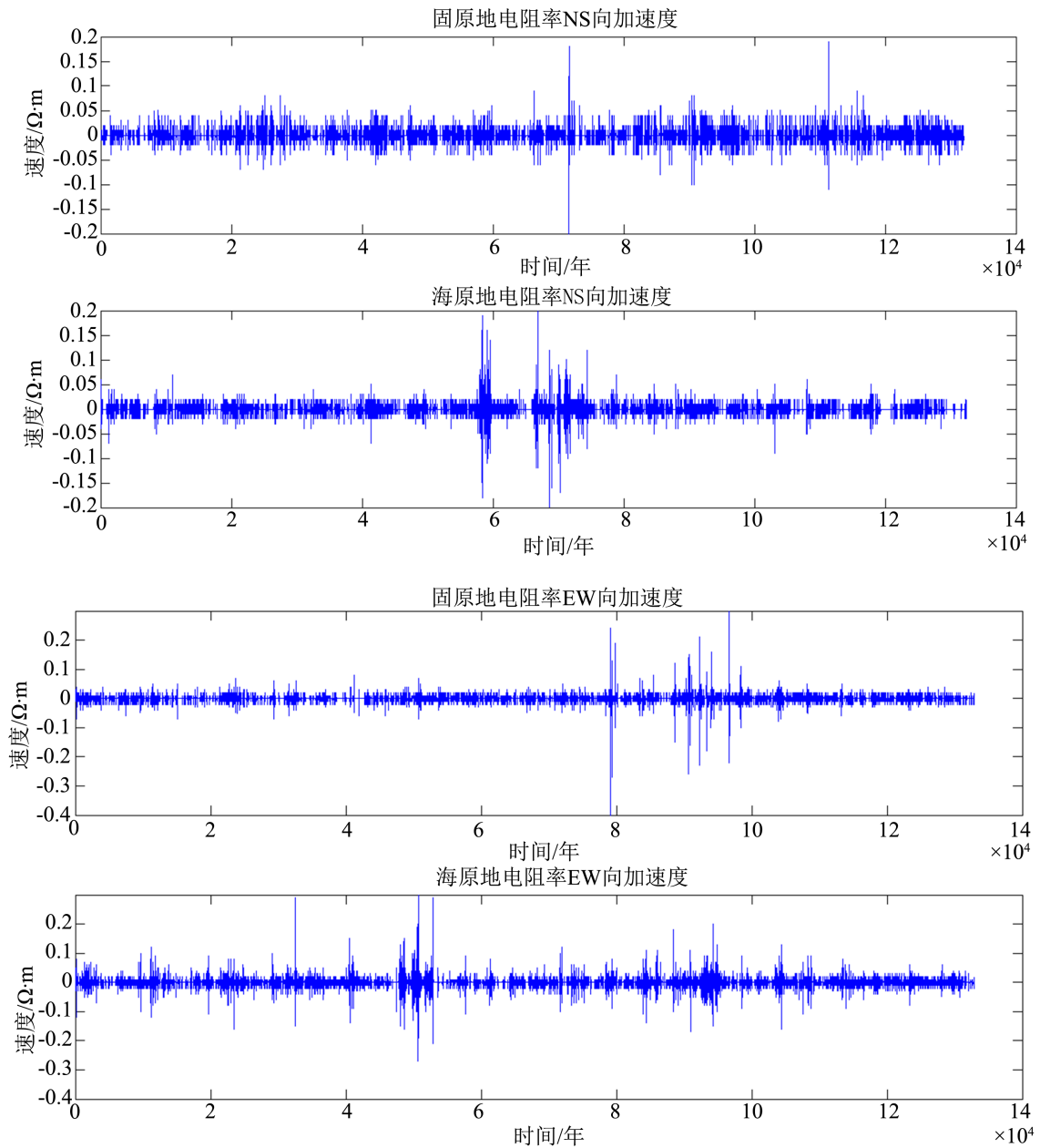
**表 2.** 固原 - 海原地电阻率数据加速度值(单位:  $\Omega \cdot m$ )

测向	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
固原	NS	0.029	0.031	0.031	0.033	0.028	0.040
海原		0.026	0.049	0.037	0.040	0.038	0.030
比值(%)		-10.3	58.0	19.4	21.2	35.7	-25.0
固原	EW	0.030	0.030	0.027	0.034	0.023	0.042
海原		0.044	0.043	0.048	0.044	0.038	0.059
比值(%)		46.7	43.3	77.8	29.4	65.2	40.5

对固原和海原北南向地电阻率数据进行对比加速度分析(如图 5 所示),在相同计算参数及绘图参数条件下,可以由下图计算结果看到固原地电阻率北南向的整体变化离散度要小于海原地电阻率北南向数据。对固原和海原东西向地电阻率数据进行对比加速度分析,在相同计算参数及绘图参数条件下,可以由下图计算结果看到海原地电阻率东西向的整体变化离散度要大于固原地电阻率东西向数据。

对于地电阻率冬季和夏季的数据处理分析[17],我们是提取了 5 月至 9 月为夏季数据区间,11 月至次年 3 月为冬季数据区间来对地电阻率区间内的数据进行加速度计算求平均值(如表 3 和表 4 所示)。

对于固原和海原地电阻率冬夏季数据加速度值进行计算分析后,由表可以看出固原地电阻率不管是冬季还是夏季加速度值都是显著低于海原地电阻率,NS 测向冬季固原比海原低 11.2%,夏季低 20.5%,EW 测向冬季固原比海原低 35.6%,夏季低 46.7%。由以上计算分析得出(如图 6 和图 7 所示),固原地电阻率观测数据的离散度要显著低于海原地电阻率,即使是在固原地电阻率观测环境较海原复杂,干扰因素更多的情况下,也要高出 20 至 40 个百分点。因此,推断出固原地电阻率对于异常信息的捕获能力要高于海原地电阻率观测数据,从而具有更好的分析异常变化的研判能力。



**Figure 5.** Guyuan-Haiyuan NS and EW directions of georesistivity data acceleration analysis. (Upper) NS direction; (Below) EW direction

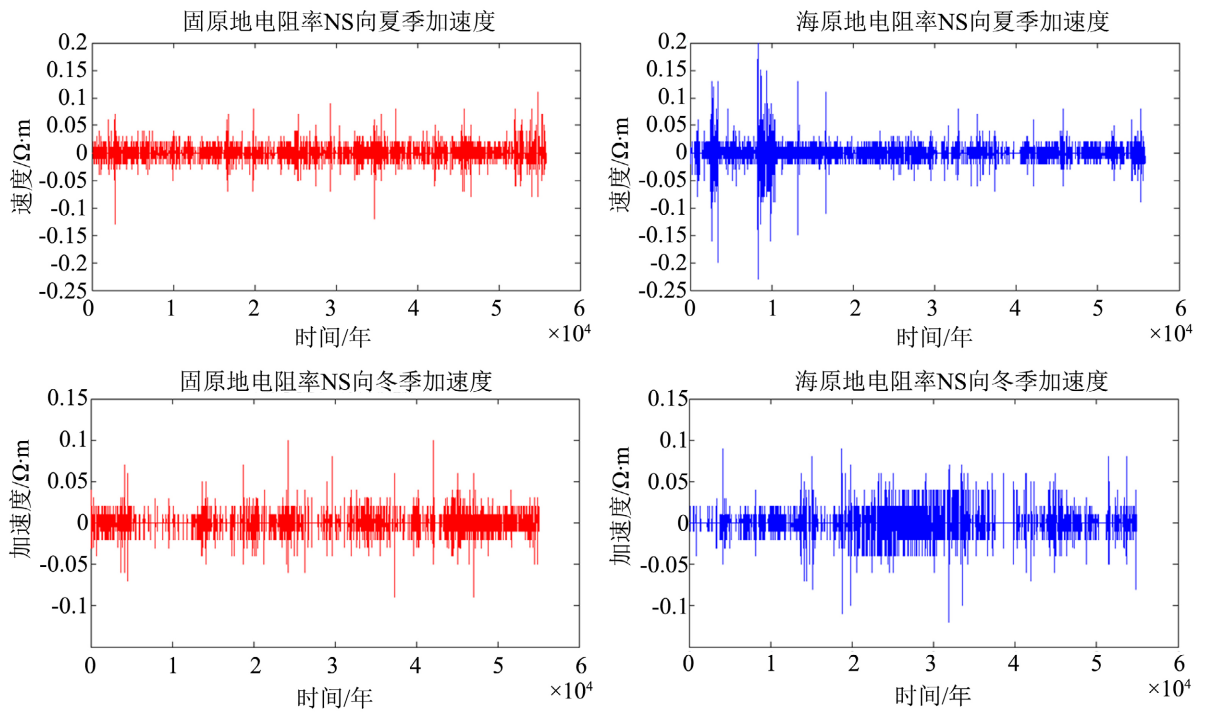
**图 5.** 固原 - 海原北南向和东西向地电阻率加速度分析图。(Upper) 北南向; (Below) 东西向

**Table 3.** Guyuan winter and summer georesistivity data acceleration value (unit: Ω·m)

**表 3.** 固原冬夏季地电阻率数据加速度值(单位: Ω·m)

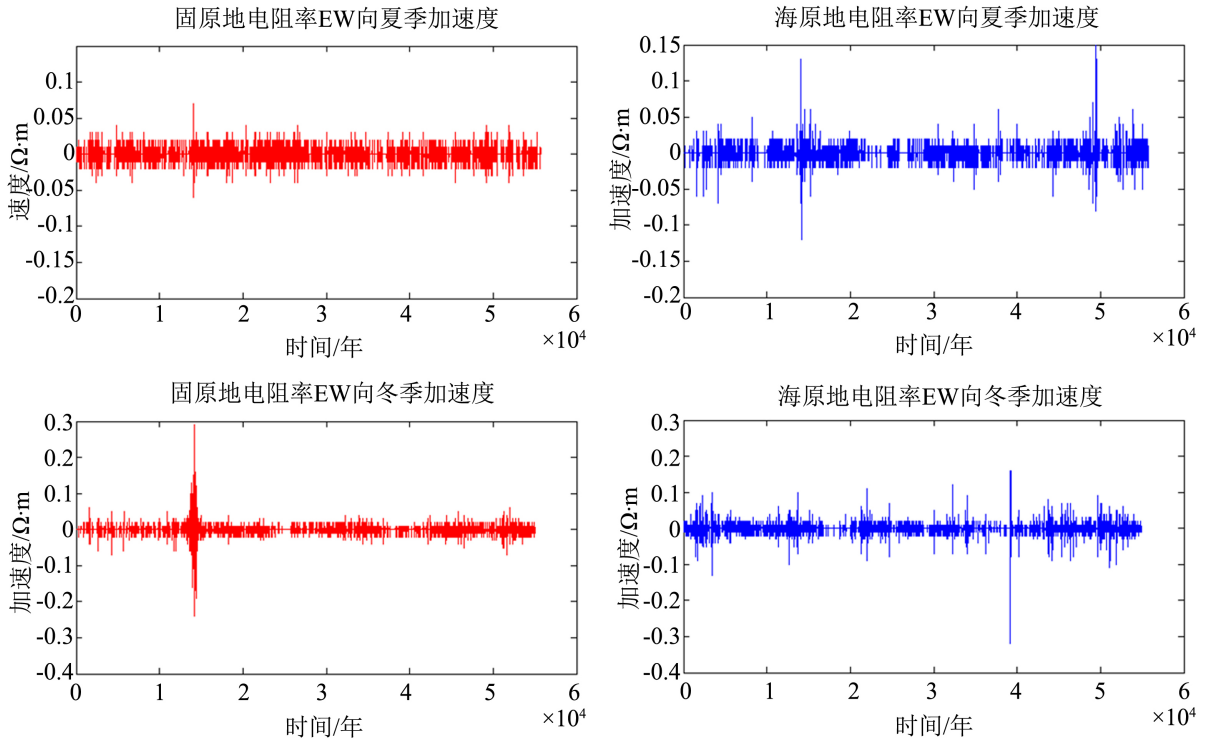
测向	季节	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
NS	冬季	0.035	0.029	0.026	0.028	0.031	0.031	
	夏季	0.023	0.034	0.033	0.038	0.027	0.048	0.0274
EW	冬季	0.033	0.027	0.0229	0.0208	0.025	0.046	
	夏季	0.0235	0.032	0.031	0.045	0.024	0.043	0.025





**Figure 6.** Analysis of NS direction georesistivity acceleration in winter and summer in southern Ningxia. (Left) Data of Guyuan; (Right) Data of Haiyuan

**图 6.** 宁南地区冬夏季地电阻率北南向加速度分析图。(左) 固原数据; (右) 海原数据



**Figure 7.** Analysis of EW direction georesistivity acceleration in winter and summer in southern Ningxia. (Left) Data of Guyuan; (Right) Data of Haiyuan

**图 7.** 宁南地区冬夏季地电阻率东西向加速度分析图。(左) 固原数据; (右) 海原数据

**Table 4.** Haiyuan winter and summer georesistivity data acceleration value (unit:  $\Omega\cdot\text{m}$ )  
**表 4.** 海原冬夏季地电阻率数据加速度值(单位:  $\Omega\cdot\text{m}$ )

测向	季节	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
NS	冬季	0.028	0.038	0.030	0.034	0.043	0.025	0.0179
	夏季	0.022	0.051	0.043	0.046	0.039	0.039	0.043
EW	冬季	0.044	0.043	0.039	0.036	0.031	0.0248	
	夏季	0.025	0.039	0.057	0.052	0.040	0.080	0.057

#### 4.2. 地电阻率测值比分析

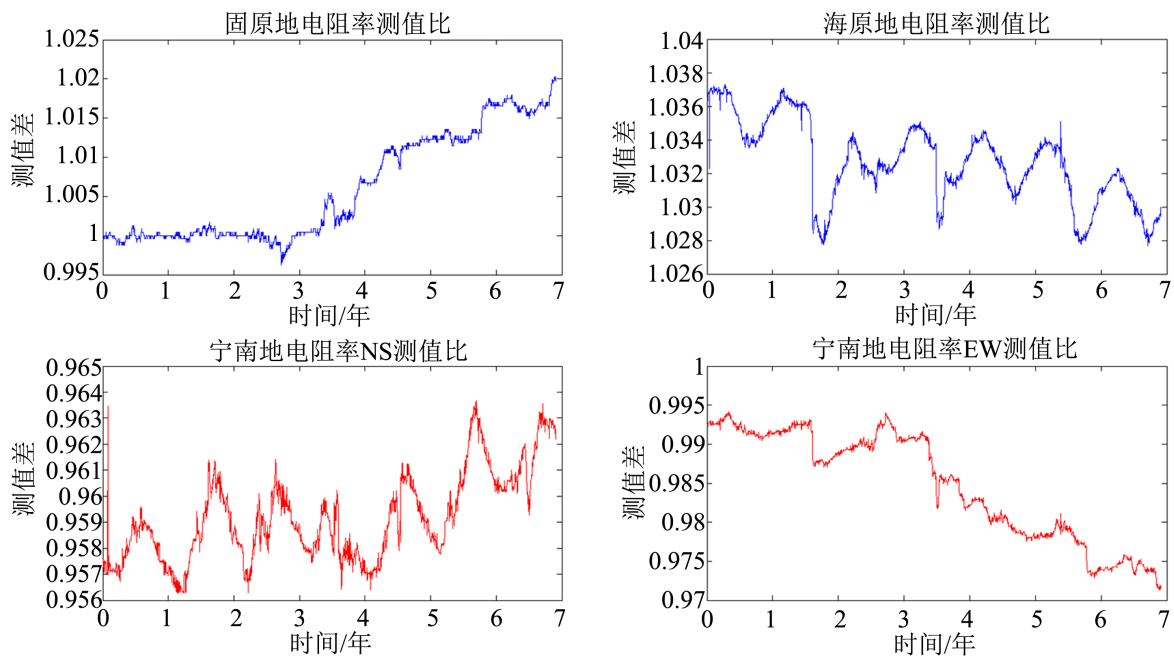
本课题首先对固原和海原地电阻率北南和东西向数据做测值比分析, 计算公为

$$\beta = \rho_{\text{NS}} / \rho_{\text{EW}}$$

( $\beta$  为测值比,  $\rho_{\text{NS}}$  为北南向地电阻率,  $\rho_{\text{EW}}$  为东西向地电阻率), 以此来分析研判该地区地层介质地电阻率的方位性变化, 并通过相同地点地电阻率的正交方向分量变化, 拟合成地电阻率虚拟方位角的变化。

图 8 左 1 图是 2014 年到现在固原地电阻率计算出的测值比结果, 由图可以看出数据一致在上升, 这主要是受东西向数据自 2016 年下半年以来的持续性下降所致。图 8 右 1 图是海原地电阻率计算出的测值比结果, 由图可以看出数据虽然出现周期性变化, 但整体变化趋势是呈现线性的下降变化, 出现周期性变化是由于北南向数据和东西向数据呈反向变化所致; 数据的持续下降推断出地层的表面介质在东西方向上承受的压力在逐渐增大, 或者推断为在南北方向上承受的压力在减小。

图 8 右 2 图是固原和海原北南向地电阻率的测值比, 变化整体呈上升趋势, 出现正弦波式变化也是因为海原地电阻率北南向出现与其它测道呈反向年变形态所致。图 8 左 2 图是固原和海原东西向地电阻率的测值比, 变化整体自 2016 年下半年开始呈线性下降态势, 受固原地电阻率东西向数据下降变化所致。



**Figure 8.** Analysis of the measured value ratio of georesistivity in southern Ningxia  
**图 8.** 宁南地电阻率测值比分析图

对于宁南地区地电阻率数据的测值比计算结果显示, 在宁南地区及邻区中强地震震前数据都会出现显著破年变变化, 测值比震前值较正常值变化幅度超出范围为 0.0037~0.0060, 对于地方震可能对异常信息的提取更为显著, 因此, 测值比为震前异常信息的研判提供了一个依据。

## 5. 结论

1) 通过对宁夏南部地区地电阻率数据整体年变形态及相关性分析研究, 认为在年变形态上固原和海原地电阻率较为一致, 相关地电阻率测项之间的数据相关性较高, 通过数据之间的相关性分析可以推断出相同测项数据在中强地震震前 2 至 3 个月内相关性会显著提高 10 个百分点左右, 对于震前异常信息的提取提供了一个很好的依据。通过对相邻地区地电阻率相关性的分析, 了解数据之间存在的异同, 在一定程度上提升了对异常信息研判的能力。

2) 通过对固原和海原地电阻率冬夏季数据加速度值进行计算分析, 得出固原地电阻率不管是冬季还是夏季加速度值都是显著低于海原地电阻率, NS 测向冬季固原比海原低 11.2%, 夏季低 20.5%, EW 测向冬季固原比海原低 35.6%, 夏季低 46.7%。从整体数据情况来看, 固原地电阻率观测数据的离散度要显著低于海原地电阻率, 即使是在固原地电阻率观测环境较海原复杂, 干扰因素更多的情况下, 也要高出 20 至 40 个百分点。因此, 推断出固原地电阻率对于异常信息的捕获能力要高于海原地电阻率观测数据, 从而具有更好的分析异常变化的研判能力。

3) 通过对宁南地区地电阻率数据的测值比计算, 结果显示在宁南地区及邻区中强地震震前数据都会出现显著破年变变化, 测值比震前值较正常值变化幅度超出范围为 0.0037~0.0060, 对于地方震可能对异常信息的提取更为显著, 因此测值比为震前异常信息的研判提供了一个依据。

## 基金项目

宁夏地震局青年基金课题和宁夏地震局地下流体监测与应用研究创新团队资助。

## 参考文献

- [1] 钱家栋. 地震电磁学理论基础与观测技术(试用本) [M]. 北京: 地震出版社, 2010: 284-286.
- [2] 王兰炜, 朱旭, 朱涛, 等. 地电阻率多极距观测系统及试验研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2011, 31(1): 20-31.
- [3] 张晓阳, 魏小刚, 缙亚江. 天水台视电阻率月速率变化特征研究[J]. 甘肃科技, 2019, 35(2): 70-73.
- [4] 解滔, 李飞, 沈红会, 等. 新沂地震台地电阻率反向年变分析[J]. 地震学报, 2013, 35(6): 856-864.
- [5] 沈红会, 王丽, 王维, 等. 地电阻率长期趋势变化及其预测意义[J]. 地震学报, 2017, 39(4): 495-505.
- [6] 曹晓斌, 吴广宁, 付龙海, 等. 温度对土壤电阻率影响的研究[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 1-6.
- [7] 罗娜, 宋昭, 乔子云, 等. 河北大柏舍地电台地电阻率观测数据分析[J]. 山西地震, 2017(2): 11-15+21.
- [8] 刘川琴, 金艳, 裴红云, 等. 安徽省数字化地电阻率观测数据的干扰分析与处理方法[J]. 地震, 2017, 37(2): 167-178.
- [9] 张学民. 地电阻率的年变畸变异常分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2003, 25(2): 68-74.
- [10] 卫定军, 马继文, 余生勤, 等. 固原地地电阻率 N45°E 向异常变化原因分析[J]. 华南地震, 2016, 36(1): 24-29.
- [11] 王焱坤, 隆爱军, 黄显良, 等. 安徽省地电阻率观测干扰因素的分析研究[J]. 防灾科技学院学报, 2011, 13(4): 52-56.
- [12] 赵志远, 宋昭, 罗娜, 等. 大柏舍地电阻率干扰分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(3): 137-140.
- [13] 孙昱, 张炜超, 张剑军, 等. 陕西省地电阻率观测干扰因素分析研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(2): 489-499.
- [14] 赵斐, 张远富, 李旭升. 平凉崆峒台井下地电阻率观测数据分析研究[J]. 山西地震, 2017(3): 34-39.
- [15] 杜学彬, 孙君嵩, 陈军营. 地震预测中的地电阻率数据处理方法[J]. 地震学报, 2017, 39(4): 531-548.
- [16] 乔子云, 白云刚, 关华平, 等. 河北柏合台深井与浅层地电阻率观测对比分析[J]. 国际地震动态, 2012, 32(6): 293.
- [17] 赵斐, 张远富. 平凉深井地电阻率与地层温度关系的研究[J]. 内陆地震, 2017, 31(3): 316-324.