

基于亚失稳理论分析 2021 年云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震前岩石圈磁场变化特征*

陈政宇¹, 倪喆^{1♣}, 周思远¹, 王振东², 王 粲², 赵育飞¹

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 回溯 2021 年云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震前 2017—2021 年云南地区岩石圈磁场水平矢量逐年变化的空间分布特征, 并与亚失稳理论中稳态—亚稳态—亚失稳态—失稳态的各阶段进程进行对比分析。结果表明: 漾濞地震前, 在震中及其附近区域出现的岩石圈磁场水平矢量弱变现象是震前的典型特征, 其“弱变区域”的形成对应亚失稳 O 点, 是野外观测当中最易识别的重要标识; 漾濞地震前连续 4 期弱变区域存在有“重叠”区域, 同时其外围水平矢量量级增大且方向改变, 则是进入到了“不可逆”的亚失稳 OB 阶段, 预示着地震将要发生且震中在“重叠”区域的边缘, 利用这种时空变化特征可以提前预判发震地点与时间。此外, 该分析也是将亚失稳研究从室内实验走向野外观测的有益尝试。

关键词: 漾濞 $M_s 6.4$ 地震; 岩石圈磁场; 水平矢量; 亚失稳理论

中图分类号: P318.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2021)03-0391-08

0 引言

地震预报的基础是地震监测, 只有不断地对监测结果进行分析研究, 识别孕震过程和发震机理的本质, 才有可能真正解决地震预报的科学难题。马瑾院士提出的亚失稳理论正是通过实验室的模拟和野外地震监测所获得的结果来探寻地震发生的本质, 从而希望解决地震预报的需求。亚失稳理论的核心是地震是一个力学过程, 断层处于应力峰值强度后的亚失稳阶段时, 已进入一个不可逆的变形阶段, 标志着地震发生已不可避免, 因此这个阶段与地震的发生有唯一性的关系(马瑾, 2016)。

地震预测预报是世界性的科学难题之一, 其难点在于众多的独立地震事件孕育过程中所受到的构造条件、介质条件和应力状态等不同, 所产生的“前兆”或“异常”都无法总结出共同的、

有效的、单一的特征规律。早在 20 世纪中期, 美国、俄罗斯、日本、哈萨克斯坦和中国等科学家就开展了地磁变化与地震之间的相关研究, 研究内容多数是基于固定地磁台观测数据来预测地震三要素(冯志生等, 2010; 解滔等, 2018; Han *et al.*, 2014, 2017), 如哈奇基扬等(2008)发现地震震中与磁偏角零变线之间有较好的对应关系。汶川地震后, 中国地震局流动地磁技术团队开展了大华北、南北带和南北天山地区的区域地磁场年度观测, 获取的岩石圈磁场中的磁偏角零变线、总强度梯度带和磁化率变化与震中位置也有较好的映震关系(顾春雷等, 2010; 陈斌等, 2011; 张忠龙等, 2017, 倪喆等, 2017)。目前, 区域岩石圈磁场异常变化的研判结果也逐渐成为年度地震危险区判定中地点预测的有力支撑手段之一。近年来, 在中国大陆发生的每一个中强地震前, 通过流动地磁观测所获得的区域岩石圈磁场年度变化异常都有相似的异常特征, 提炼出这些异常

* 收稿日期: 2021-07-01.

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC150330504)、云南省地震局科技专项(地磁异常与地震活动关系的深入分析)和云南省地震局地震地磁分析与地震预报创新团队联合资助。

第一作者简介: 陈政宇(1993-), 助理工程师, 主要从事流动地磁观测与震磁关系研究工作。

E-mail: 1415714262@qq.com.

♣通讯作者简介: 倪喆(1982-), 高级工程师, 主要从事地震地磁分析与地震预报. E-mail: 317326451@qq.com.

特征的“共性”规律，是提升地震预报水平的可选路径之一。

岩石圈磁场，有时称地壳磁场，作为地球物理场之一，是地壳和上地幔中岩石磁性的总和。一般来说，岩石圈磁场变化的时间尺度是以地质年代计算的。然而，有时在局部地区里的火山爆发、地震孕育与发生常常会受到火山磁效应 (Sasai, 1991; Mueller, Johnsson, 1989, 1998) 或压磁效应 (Johnston *et al*, 2006; 袁浩浩等, 2017; Wang *et al*, 2018) 影响，这时的震源区及其周围区域的岩石圈磁场会发生快速变化。区域岩石圈磁场年度变化的观测结果显示，孕震过程中在未来震中及其附近的区域岩石圈磁场会出现显著差异性变化。

本文先以单轴压力作用下岩石磁化率变化结果为切入点，使断层变形过程中 4 个应力变化与岩石圈磁场变化有相对应的物理关系，在此基础上，分析 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 $M_s6.4$ 地震前云南地区岩石圈磁场水平矢量的年度变化特征，并分析其与亚失稳理论中稳态、亚稳态、亚失稳态和失稳态 4 个阶段（以下简称“亚失稳”）中应力状态的对应关系，识别失稳前区域岩石圈磁场年度变化显著的特征标识，为亚失稳研究从室内实验走向野外观测提供更多佐证。

1 亚失稳与岩石圈磁场异常对应特征简述

寻找从稳态到失稳态各阶段与岩石圈磁场异常特征的对应关系，磁化率是应力状态与岩石圈磁场变化之间的物理关联点。基于多种强磁性火成岩石标本的压磁实验结果表明，两类压磁曲线中磁化率都具有随应力增加而下降的特点（高龙生，李松林，1985）。在外部磁场 H 作用下，物质的磁化强度 M 与磁化率 κ 有如下关系：

$$M = \kappa \cdot H$$

(1)

假设外部磁场稳定时，磁化率与磁化强度成正比关系。当岩石的磁化率变大时则磁场强度增强，岩石圈磁场值也相应增加；反之，则相反。表 1 为应力与岩石圈磁场变化对应的物理关系。

实验室里进行的差应力 - 时间研究显示，

表 1 应力与岩石圈磁场变化对应的物理关系

Tab. 1 The physical relationship between stress and the changes in lithospheric magnetic field

应力	应变	磁化率	介质	岩石圈磁场
加载	积累	降低	退磁	减小
卸载	释放	升高	磁化	增大

断层变形过程分别存在稳态、亚稳态、亚失稳态和失稳态共 4 种状态，本文主要研究单个岩石磁值到区域岩石圈磁场变化的转变。如图 1 所示，LM 是稳态阶段，断层处于应力匀速增加的弹性变形阶段；MO 是亚稳态阶段，断层处于应力非均速增加的弹性与非弹性转换变形阶段；OB 是亚失稳阶段，断层处于应力下降与应变非匀速释放阶段，其中 OA 以应变的准静态释放为主，AB 以应变的准动态释放为主；B 是失稳阶段，此时断层发生错动而产生地震（马瑾，2016）。断层变形过程中各阶段应力状态与磁场值的对应变化也如图 1 所示，其中图 1a 为在 L 点对应的磁场值变化，表示应力加载处于初始阶段，样品磁值维持原状；图 1b 包括应力加载的 LM、MO 两个阶段，样品磁值出现减小；图 1c 为应力加载已趋缓且几乎不变的 O 点所对应的磁场值变化，其变化也趋于零；图 1d 为应力卸载、应变释放开始的 OA 阶段对应的磁场值变化，样品磁值逐步出现反向增大；图 1e 为应力卸载、应变释放加速的 AB 阶段对应的磁场值变化，样品磁值反向快速增大；B 阶段后，样品破裂。

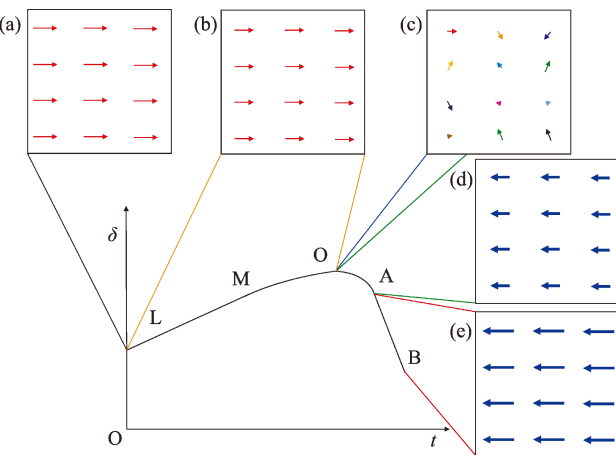


图 1 差应力 - 时间曲线所对应的磁场值变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the change of the magnetic field values corresponding to the differential stress - time curve

局部区域的应力加载或温度上升伴随着岩石圈磁场水平矢量呈现“弱变”现象。应力加卸载过程中空间不均匀性会导致水平矢量“弱变区域”存在相互转移的区域特点。图2是孕震过程中应力的加卸载对应岩石圈磁场变化的示意图，图中 L_{11} 、 $L_{12} \cdots L_{43}$ 分别表示一个局部区域，箭头表示该局部区域磁场的大小和方向。图2a为无应力作用下区域岩石圈磁场的原始状态。图2b为开始有应力加载，应力开始从左向右传递，相应的 L_{21} 、 L_{22} 、 L_{31} 、 L_{32} 区域的局部岩石圈磁场量级出现减小，此时由于其它区域应力还未加载其岩石圈磁场仍维持原始状态。随着应力的不断传递与加载， L_{21} 、 L_{22} 、 L_{31} 、 L_{32} 区域的应力达到峰值，这4个局部区域的岩石圈磁场变化最小；同时应力还继续向右和右下传递与加载， L_{23} 、 L_{33} 、 L_{42} 、 L_{43} 区域的岩石圈磁场量级也开始减小（图2c）； L_{21} 、 L_{22} 、 L_{31} 区域应力超过峰值后逐步卸载，其对应的岩石圈磁

场量级同步逐渐反向增大，而此时的 L_{33} 、 L_{42} 、 L_{43} 区域应力达到峰值，其对应的岩石圈磁场变化最小（图2d）； L_{32} 区域应力达到峰值后未发生改变， L_{23} 区域应力仍处在加载过程（图2e）。图2e中 L_{21} 、 L_{22} 、 L_{31} 区域应力卸载加速，岩石圈磁场量级也随之增大； L_{32} 、 L_{33} 、 L_{42} 区域仍处于应力峰值，岩石圈磁场变化为最小； L_{23} 区域应力达到峰值后岩石圈磁场变化最小；而 L_{43} 在接近峰值但未突破峰值后，应力又重新恢复到加载过程。

从图2中还可以看出，随着时间的推移应力在该区域的加载、卸载和相互传递的过程当中，伴随着局部岩石圈磁场的相应变化。图2a处在稳态的L点；图2b分别存在稳态L点、LM阶段和亚稳态MO阶段；图2c、d分别存在了稳态LM阶段、亚稳态MO阶段和峰值O点，但相应区域发生了迁移；图2e分别存在峰值O点和亚失稳OA、AB阶段，其中在岩石圈磁场变化量级最大的地方发生了地震。

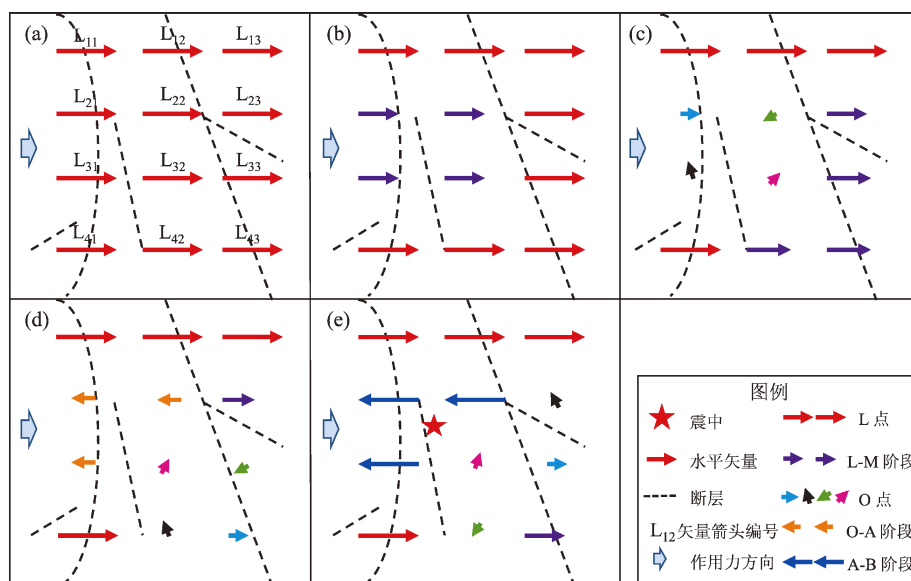


图2 孕震过程中区域应力加卸载对应岩石圈磁场变化的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of lithospheric magnetic field variation in the corresponding region of stress loading and unloading during seismogenic process

综上所述，从稳态、亚稳态到峰值O点、再到亚失稳阶段，以及相对应岩石圈磁场水平矢量弱变范围的空间迁移变化来看，未来震中及其周边区域水平矢量先出现弱变现象，随着时间的推移，已出现弱变现象的区域开始向周围迁移，原有弱变现象的部分区域转化为磁场逐渐增强。图2中弱变现象的区域有重叠、扩展、缩小等不同情

况发生，但地震的发震位置是水平矢量量级和方向的差异性最为显著的地方。

2 漾濞地震前云南地区岩石圈磁场变化与亚失稳对应关系

本文研究区域为云南及周边地区（ $21^{\circ} \sim 29^{\circ}N$ ，

97°~106°E), 该区域现有流动地磁测点 121 个 (图 3), 观测要素为地磁场的总强度、磁偏角和磁倾角, 使用数据资料为 2017—2021 年每年 1 期流动地磁观测数据。数据处理过程主要包括: ①日变通化, 利用与测点相邻台站的连续观测分钟值数据对野外观测数据进行日变通化, 消除地磁场日变化等外源场成分; ②长期变改正, 采用“中国地区地磁基本场长期变化 6 阶 NOC 非线性模型”进行长期变化改正, 消除主磁场长期变化成分; ③计算相邻期差值中抵消主磁场后获取岩石圈磁场年度变化, 并通过曲面样条差值方法获取区域岩石圈磁场年度变化模型 (顾左文等, 2009; 陈斌等, 2017)。经过以上数据处理, 可获得岩石圈磁场 7 个地磁要素及水平矢量、垂直矢量的年度变化。对大华北地区 (苏树朋等, 2017)、甘青川区域 (汤筱麒等, 2019)、新疆地区 (丁新娟等, 2017), 以及芦山、洱源 (倪喆, 2014a, b) 等地震的震磁研究表明, 岩石圈磁场水平矢量的年度变化异常特征与震中的映震效果最好, 故本文以该要素的时空演化对应亚失稳进行孕震过程分析。

2021 年 5 月 21 日云南漾濞县发生 $M_s6.4$ 地震, 发震断裂为维西—乔后断裂的次级断裂 (李传友等, 2021), 该断裂处于川滇菱形块体西边

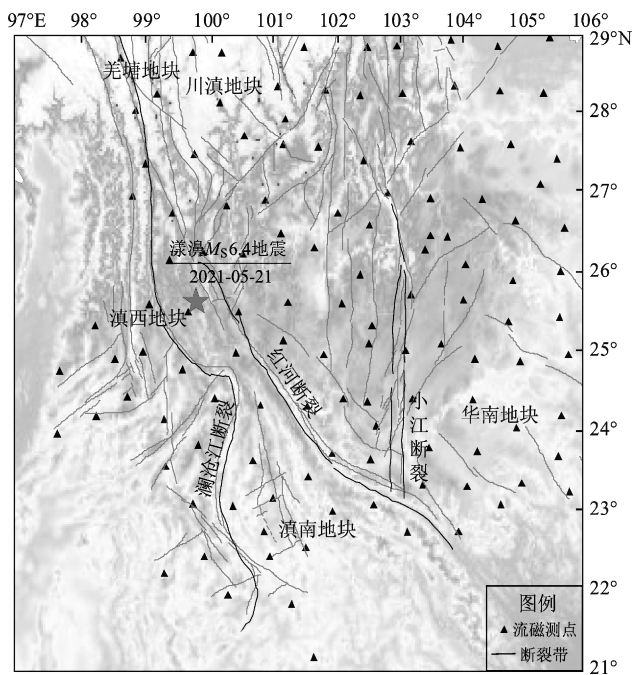


图 3 云南及周边地区流动地磁测点分布图

Fig. 3 Distribution of geomagnetic, mobile, observational points in Yunnan and its surrounding areas

界。为获取漾濞 $M_s6.4$ 地震前云南地区岩石圈磁场水平矢量逐年演化过程与亚失稳的对应关系, 笔者从 2017—2018 年、2018—2019 年、2019—2020 年和 2020—2021 年共 4 个相邻期的变化分别进行研究, 结果如图 4 所示。

图 4a 中 2017—2018 年云南地区的岩石圈磁场水平矢量形成了 2 个量级小且方向散乱的弱变区域, 即川滇菱形块体中部及其西侧的大部分和川滇菱形块体南端局部及其以南区域, 2018 年 8 月 13、14 日通海 2 次 $M_s5.0$ 、9 月 8 日墨江 $M_s5.9$ 地震就分别发生在川滇菱形块体南端局部的东、西两侧; 而在弱变区域外围水平矢量量级大且方向趋同的区域又可分为 2 个: 一是以川滇菱形块体东侧边界小江断裂带以东, 水平矢量方向大致具有由东向西的整体一致性, 二在川滇菱形块体西侧, 水平矢量方向的整体趋势由南向北穿过滇南地块南部和滇西地块。

从图 4b 可以看到, 之前发生 3 次地震的弱变区域向北迁移且其范围扩大, 同时原北侧弱变区域范围缩小至川滇菱形块体西侧的局部, 原两个弱变区域合并后分布在川滇菱形块体中部西侧。弱变区域外围的水平矢量有东、西 2 个趋同方向, 弱变区域西矢量方向呈现出整体趋同的由西南向东北、再向北穿过滇南、滇西地块大致终止在川滇菱形块体西侧, 右侧则是覆盖小江断裂带从北至南的整体趋同特征。

从图 4c 可以看到, 2018—2019 年的单个弱变区域在川滇菱形块体中部和南端于 2019—2020 年扩大、分解后转化成了 3 个弱变区域, 其中川滇菱形块体中部东、西两侧的弱变区域范围较小, 而南端弱变区域较大并向东南方向延展至广西境内。2019—2020 年中 3 个弱变区域之外的地区, 水平矢量方向分别呈现出 3 个区域特征: 在川滇菱形块体西侧, 矢量方向由南向北展布于穿过滇西、滇南地块; 二是川滇菱形块体东侧, 其矢量方向为由北向南展布于华南块体西南局部; 三是在川滇菱形块体内的中南部矢量方向显示为由北向南。

与 2019—2020 年相比, 图 4d 中云南地区的水平矢量特征发生了较大的变化, 川滇菱形块体中部东、西两侧的弱变区域扩展、合并后向西北方向延伸到滇藏交界处, 上一年度川滇菱形块体

南端较大弱变区域从广西交界处缩小到川滇菱形块体南端东侧的局部,另一个弱变区域在滇西南地区中出现。除这3个弱变区域之外的地区,滇西和滇南地块的水平矢量方向仍继续保持由西向东的主要整体趋同特征,该特征向东还穿过了小江断裂带。

将野外观测的2018—2021年4个相邻期云南

地区的岩石圈磁场水平矢量年度变化与图2中的示意过程进行对比发现,在漾濞 $M_s6.4$ 地震孕震过程中,云南地区受到了不同方向上应力及其相互作用的变化,影响了弱变区域及其外围区域不断的相互转换,出现了弱变现象与其它现象共存的差异特性。这些差异性特征表明:在更大的地区中,当某个区域未来没有地震发生时,该区域的

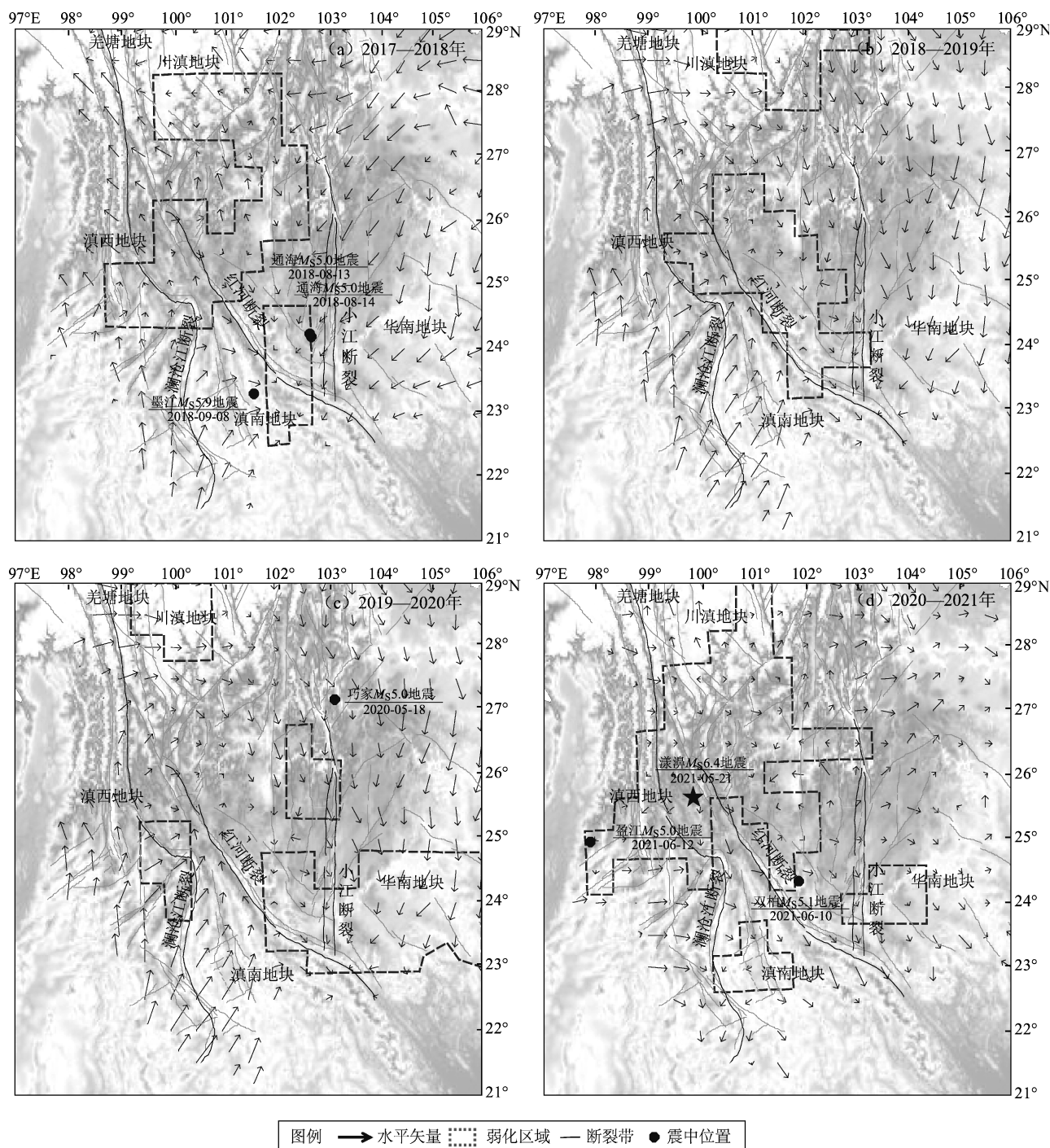


图4 2018—2021年云南地区岩石圈磁场水平矢量分布图

Fig. 4 Distribution of the horizontal vectors of the lithospheric magnetic field in Yunnan from 2018 to 2021

变化包括 L 点、LM 阶段、MO 阶段和 O 点中的一种或几种；反之，当该区域未来有地震发生时，则包括 O 点、OA 阶段、AB 阶段和 B 点（表 2）。由此可以看出，云南地区岩石圈磁场水平矢量变化的弱变区域对应 O 点，它是未来有无地震的临界点，也是岩石圈磁场野外观测中最易识别的典型标志。

表 2 有无地震的岩石圈磁场变化与亚失稳阶段的对应关系

Tab. 2 The relationship between the earthquake-related and earthquake-unrelated changes of lithospheric magnetic field and the meta-instability stage

亚失稳阶段	岩石圈磁场变化 对应地震发生	岩石圈磁场变化 对应无地震发生
L	—	对应
LM	—	对应
MO	—	对应
O	对应	对应
OA	对应	—
AB	对应	—
B	对应	—

基于表 2，再对图 4 中的云南地区岩石圈磁场水平矢量年度变化与亚失稳的关系进行研究。图 4a 中川滇菱形块体南端弱变区域的东、西边界上分别发生了通海 2 次 5.0 级地震和墨江 5.9 级地震，表明此弱变区域及周边共同存在亚失稳 O 点、OA 阶段、AB 阶段和失稳 B 点，而在同时期川滇菱形块体中部及西侧的弱变区域及周边处在稳态 L、LM 阶段、亚稳态 MO 和亚失稳 O 点。随时间的推移，图 4b~d 中川滇菱形块体中部及其西侧弱变区域范围出现了缩小、分解和扩展的变化，其相对应当期中弱变区域及周边的矢量量级和方向出现了动态同步的增大与改变。在这个时间演化过程中，区域岩石圈磁场的空间分布在稳态、亚稳态、亚失稳态和失稳态 4 个阶段不断的转换，当川滇菱形块体中部西侧区域进入到了亚失稳的 AB 阶段和 O 点时，在维西—乔后的次级断裂上发生了漾濞 $M_s 6.4$ 地震。

另一个值得关注的现象是：在震前 3 期的云南地区岩石圈磁场水平矢量时空演化过程中，可以清晰看到弱变区域在空间上有迁移、扩展和缩小等演化过程，但漾濞地震震中及其附近局部地区

的弱变区域却始终存在。即震前 3 期的弱变区域中的部分在空间上发生了“重叠”。根据之前的分析，“重叠区域”是一直处于亚失稳 O 点，而重叠的“周边区域”是在亚稳态 MO 点和亚失稳态 OB 阶段中相互转换，当转换过程里“重叠区域”和“周边区域”出现水平矢量量级大与小的突然跳跃、矢量方向改变具有明显差异性时将会有地震发生，其震中位于水平矢量高值到低值的转换区域。

从漾濞震例来看，云南地区岩石圈磁场水平矢量年度变化中“弱变区域”的异常特征是对应亚失稳 O 点的关键时刻，发现其存在 2 期及其多期“重叠区域”是亚失稳从 O 点向 OA、AB 阶段发展的重要标志，预示着地震将要发生了。因此，寻找其“弱变区域”的形态、量级变化、迁移和重叠区域与时间是进行亚失稳状态分析的前提基础。

3 结论和讨论

以亚失稳理论作为指导，回溯 2021 年漾濞 6.4 地震震前云南地区岩石圈磁场水平矢量变化，将水平矢量的弱变现象作为主要异常特征进行研究分析，可以得到如下主要结论：

(1) 岩石圈磁场水平矢量年度变化的弱变区域形成与震中的关系。弱变区域的空间分布是跨越块体和断层的，而震中出现在弱变区域边界的断层上。这说明块体之间的作用是相互的，所产生的能量传递、转移和汇聚是穿越断层跨越块体的。仅当某局部区域应力传递受阻，加载持续不变时，未来受到某种触发后会在该弱变区域边缘最脆弱断层上发生地震。

(2) “弱变区域”的形成是亚失稳阶段在野外观测的重要标识，也是亚失稳 O 点上的时间尺度表现。当连续 2 期及其以上弱变区域存在有“重叠”，同时其外围出现矢量量级增大且方向改变时，则是可以确认该局部区域周边已过亚失稳态的 O 点，开始进入到 OA 与 AB 阶段，表明地震将要发生了。

(3) 野外观测所获结果远比室内实验复杂，且充满了各种不确定性。针对大范围、区域性的地球物理场观测而言，随时间进程来自不同方向

对各个区域里受到的应力加载、持续和卸载不同, 导致岩石圈磁场变化及其表现在不同局部区域里存在差异, 这种显著差异的特性就恰好体现在弱变区域边界。

本文论述的野外观测得到的云南地区岩石圈磁场水平矢量的异常演化过程与亚失稳的对应关系, 从场分布的概念去践行亚失稳理论应用于野外双测的可行性, 以期能从野外观测现象及其发展规律对地震预测预报起到促进作用。目前, 作者针对磁场异常的识别方法更多是经验性、定性的, 后期可发展数学模型, 构建可定量描述磁场异常的参数和方法, 实现由定性到定量, 由主观经验判定到客观参数指示的转变。同时可以考虑将磁场异常区域与地震活动性异常 (Wang *et al.*, 2021)、应力场变化 (Wu *et al.*, 2020) 区域进行对比, 实现多物理量、多预测手段的交叉验证。

在本文撰写过程中, 中国地震局地球物理研究所顾左文研究员给予了思路上的启示, 两位审稿专家提出了宝贵意见与建议, 在此一并表示衷心感谢!

参考文献:

- 陈斌, 顾左文, 狄传芝, 等. 2011. 2009—2010 年大华北岩石圈磁异常分布及其变化特征[J]. 云南大学学报(自然科学版), 33(5): 548–553.
- 陈斌, 袁洁浩, 王黎, 等. 2017. 流动地磁监测数据处理流程[J]. 地震研究, 40(3): 335–339.
- 丁新娟, 杨福喜, 贾路, 等. 2017. 2015 年新疆皮山 6.5 级地震前岩石圈磁场局部异常特征分析[J]. 地震研究, 40(3): 362–367.
- 冯志生, 李琪, 卢军, 等. 2010. 基于磁通门秒值数据的地震 ULF 磁场可靠信息提取研究[J]. 华南地震, 30(2): 1–7.
- 高龙生, 李松林. 1985. 单轴应力作用下两种不同方法研究岩石磁化率变化的结果[J]. 地震学报, 7(3): 285–299.
- 顾春雷, 张毅, 徐如刚, 等. 2010. 地震前后岩石圈磁场变化特征分析[J]. 地球物理学进展, 25(2): 472–477.
- 顾左文, 陈斌, 高金田, 等. 2009. 利用 NOC 方法研究中国地区地磁时空变化[J]. 地球物理学报, 52(10): 2602–2612.
- 哈奇基扬 Т Я, 斯基哈尔娜娅 Г Г, 斯基哈尔内 А П, 等. 2008. 地震震中和地磁偏角的空间分布[J]. 内陆地震, 22(3): 264–270.
- 解滔, 刘杰, 卢军, 等. 2018. 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震前定点观测电磁异常回溯性分析[J]. 地球物理学报, 61(5): 1922–1937.
- 李传友, 张金玉, 王伟, 等. 2021. 2021 年云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震发震构造分析[J]. 地震地质, 43(3): 706–721.
- 马瑾. 2016. 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起[J]. 科学通报, 6(4–5): 409–414.
- 倪喆. 2014a. 洱源 5.5 级地震前后磁场变化异常特征分析[J]. 地震研究, 37(3): 471–476.
- 倪喆, 陈斌, 崔兴平, 等. 2017. 地震孕育过程中地下磁化率结构的变化分析[J]. 地震研究, 40(3): 382–387.
- 倪喆, 陈双贵, 伊伟, 等. 2014b. 芦山 7.0 级地震前后岩石圈地磁变化异常的研究[J]. 地震研究, 37(1): 61–65.
- 苏树朋, 赵慧琴, 李博, 等. 2017. 大华北地区岩石圈磁场空间分布与地震地质特征[J]. 地震研究, 40(3): 345–351.
- 汤筱麒, 陈政宇, 赵育飞, 等. 2019. 2010–2017 年甘川交界地震前震磁异常特征分析[J]. 华南地震, 39(4): 69–74.
- 袁洁浩, 顾左文, 陈斌, 等. 2017. 2016 年 EMSEV 学术研讨会与震磁研究新进展[J]. 地震研究, 40(3): 340–344.
- 张忠龙, 赵育飞, 顾健. 2017. 小江断裂带及邻区岩石圈磁场变化特征分析[J]. 地震研究, 40(3): 372–376.
- Han P, Hattori K, Hirokawa M, *et al.* 2014. Statistical analysis of ULF seismomagnetic phenomena at Kakioka, Japan, during 2001–2010 [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics 119(6): 4998–5011.
- Han P, Hattori K, Zhuang J, *et al.* 2017. Evaluation of ULF seismo-magnetic phenomena in Kakioka, Japan by using Molchan's error diagram [J]. Geophysical Journal International, 208(1): 482–490.
- Johnston M, Sasai Y, Egbert G, *et al.* 2006. Seismomagnetic effects from the long-awaited 28 September 2004 $M_6.0$ Parkfield earthquake [J]. Bull Seism Soc Am, 96(4B): S206–S220.
- Mueller R, Johnson M. 1989. Large-scale magnetic field perturbation arising from the May 18, 1980 eruption from Mount St. Helens' Washington [J]. Phys Earth Plan Int, 57(1–2): 23–31.
- Mueller R, Johnson M. 1998. Review of magnetic field monitoring near active faults and volcanic calderas in California; 1974–1995 [J]. Phys Earth Plan Int, 105(3–4): 131–144.
- Sasai Y. 1991. Tectonomagnetic modeling on the basis of linear piezomagnetic theory [J]. Earthquake Res Inst Bull, 66(4): 585–722.
- Wang R, Chang Y, Miao M, *et al.* 2021. Assessing earthquake forecast performance based on b value in Yunnan Province, China [J]. Entropy, 23(6): 730.
- Wang Z D, Chen B, Yuan J H, *et al.* 2018. Localized geomagnetic field anomalies in an underground gas storage [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 283: 92–97.
- Wu W W, Long F, Liang M J, *et al.* 2020. Spatial and temporal variations in earthquake stress drops between the 2008 Wenchuan and 2013 Lushan Earthquakes [J]. Acta Geologica Sinica (English edition), 94(5): 1635–1650.

Analysis Based on the Meta-instability Theory of the Variation Characteristics of the Lithospheric Magnetic Field in Yunnan before the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ Earthquake

CHENG Zhengyu¹, NI Zhe¹, ZHOU Siyuan¹, WANG Zhendong², WANG Can², ZHAO Yufei¹

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract

The purpose of this paper is to explain the annual variation characteristics of the lithospheric magnetic field before the Yangbi $M_s6.4$ earthquake with the meta-instability theory. The spatial distribution characteristics year by year of the horizontal vector of lithospheric magnetic field in Yunnan province from 2017 to 2021 before the Yangbi $M_s6.4$ earthquake is reviewed and compared with the process of steady state – met-astable state – meta-instability state – instability state. The results show that the weakening region of the horizontal vector in the meta-instability O stage is the most easily recognized typical mark in field observation; There are “overlapping” zones in the weakening region for two consecutive periods or more, and the outer horizontal vector increase and change their direction. These mark the “irreversible” meta-instability OB stage, which indicates that the earthquake will occur at the edge of the “overlapping” region. It is a meaningful attempt to change the study of meta-instability theory from laboratory to field observation in addition.

Keywords: the Yangbi $M_s6.4$ earthquake; lithospheric magnetic field; horizontal vector; the meta-instability theory