

徐俊杰,陈松,刘广宁,等. 鄱阳湖湖滨多宝沙山成因机制. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(4):1383-1395. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230092.

Xu Junjie, Chen Song, Liu Guangning, et al. Genetic Mechanism of Duobao Desert on Shore of Poyang Lake. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (4): 1383 - 1395. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230092.

鄱阳湖湖滨多宝沙山成因机制

徐俊杰,陈松,刘广宁,刘道涵,余绍文

中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心),武汉 430205

摘要: 鄱阳湖地区属于亚热带季风性湿润气候带,湖滨却多处发育沙漠。多宝沙山是湖滨面积最大的沙漠,给当地环境造成了非常严重的危害。前人多认为多宝沙山是风成的;然而,沙山多处沿岸露头的地层层理均表现为水成特征。为进一步明确多宝沙山成因,本研究进行了物探(高密度电阻率法和瞬变电磁法)和野外地质露头调查,发现第四系除风成特征外,还具有水成的厚度分布及层序地层特征。本研究认为多宝沙山是风力搬运和水下沉积共同作用的结果,其形成与湖平面多次起伏、彭蠡泽南扩、湖底平坦的地形、三角洲快速沉积、断块差异运动、强劲的冬季风等多重因素在时间和空间上的耦合相关。多宝沙山形成于全新世时期,位于古赣江三角洲前缘亚相,后期发生构造抬升,多宝沙山被强风改造,风沙覆盖了除西山、笔架山之外的古构造高地,最终形成了现今的多宝沙山。

关键词: 南方沙漠;鄱阳湖;多宝沙山;高密度电阻率法;瞬变电磁法;成因机制

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230092

中图分类号:X141:P631

文献标志码:A

Genetic Mechanism of Duobao Desert on Shore of Poyang Lake

Xu Junjie, Chen Song, Liu Guangning, Liu Daohan, Yu Shaowen

Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, China

Abstract: The Poyang Lake area is located in a humid subtropical monsoon climate zone, but deserts are developed in many places along the lakeside. Duobao Desert is the largest desert among them, which has caused severe harm to the local environment. Previous researchers mostly believed that Duobao Desert was eolian, however, the stratigraphic stratification of many coastal outcrops is characterized by water formation. For further verifying the genesis of Duobao Desert, a combination of geophysical exploration (high-density resistivity method and transient electromagnetic method) and field geological outcrop investigation were applied in this study. It was found that the thickness distribution and sequence stratigraphy of the Quaternary of Duobao Desert are also hydrogenic, besides the eolian features. This study indicated that Duobao Desert was the result of the combined action of both wind

收稿日期:2023-04-13

作者简介:徐俊杰(1988—),男,工程师,博士,主要从事地球物理勘查与研究,E-mail: m13554408248@163.com

通信作者:陈松(1985—),男,高级工程师,硕士,主要从事地球物理勘查与研究,E-mail: anhuisongchen@163.com

基金项目:中国地质调查局项目(DD20190263,DD20230237)

Supported by the Projects of China Geological Survey (DD20190263, DD20230237)

transport and underwater sedimentation, and its formation was related to the coupling of multiple factors in time and space, including the multiple fluctuations in the lake level, the southward expansion of the Penglize, a flat landform of the lake bottom, the rapid sedimentation of the delta, the differential movement of fault blocks, and the strong winter monsoon. Duobao Desert was developed in the Holocene, located in the subfacies of the front edge of the ancient Ganjiang River delta. After tectonic uplift, Duobao Desert was reconstructed by strong winds. The sand covered the paleotectonic highlands except for Xishan Mountain and Bijia Mountain, and finally made the current Duobao Desert.

Key words: southern desert; Poyang Lake; Duobao Desert; high-density resistivity method; transient electromagnetic method; genetic mechanism

0 引言

土地荒漠化是当今世界面临的重大环境、社会经济问题之一,通常发生在干旱、半干旱地区^[1-4],不仅对当地的生态环境造成破坏,还会产生沙尘暴危害其他地区。鄱阳湖是我国第一大淡水湖,地处南方亚热带季风性湿润气候带^[5-9],然而鄱阳湖地区却多处发育沙漠:一是北部长江以南沿岸地带,即彭泽湖口沿江一带;二是中部星子—都昌水道沿岸地带,沿水道两侧及南缘分布星子县沙岭,都昌县多宝,永修县松门山、吉山等;三是南部新建县丰城市赣江西侧沿岸低山丘陵地带,如老虎山、龙王庙等沙山。其中位于都昌县多宝乡的多宝沙山面积最大,总面积达到 $1.92 \times 10^8 \text{ m}^2$ 。近几十年来,沙化给多宝乡造成了非常严重的危害。据调查,多宝乡多个自然村因风沙位移而远迁他乡,多宝水库也被淤塞超过四分之一^[10]。鄱阳湖地区的荒漠化是如何形成的?是否会扩张或者在南方其他地区发育?需要引起重视和深入研究。

鄱阳湖多宝沙山地区土地沙化属于南方荒漠化的一种典型类型,是在湖滨沙质阶地的基础上形成的,它既有别于北方的土地沙漠化,又区别于南方其他类型的荒漠化。关于该沙漠的形成,目前的研究主要分为“风成论”和“水成论”两种不同的观点。“风成论”的基本观点是:鄱阳湖年平均水位为 15.02 m,年内水位变幅多在 5 m 以上,老爷庙地区除航道外,大部分水域的水深多小于 5 m,并且湖底坡度小,所以该地区水面具有“枯水一线,洪水一片”的特点^[11],每年冬季的枯水期也是老爷庙地区风力最强劲的时期,加之湖区两岸庐山和多宝沙山造成的“狭管效应”,偏北冬季风可将湖滩裸露的泥沙吹扬起来,再经短距离搬运到湖滨地带堆积,日积月累,最终形成了多宝沙山。“水成论”的基本观点是:第四

纪中更新世末期或晚更新世初期,多宝一带发生地质抬升,湖域退化成陆域,原先湖底的沉积沙层伴随着构造运动抬升成为沙山。

南京大学韩志勇等^[12]通过对该地区沙层样品进行光释光测年,发现构成垄状地形的上风区沙层堆积于约 20 ka BP 以前的末次冰期,下风区沙层则堆积于约 20 ka BP 之后,这一沙漠形成于更新世末期至全新世时期,现今多宝沙山和湖底最大高差近 200 m,水下沉积的沙层很难在短时间内发生如此规模的抬升,该沙山必定是风成的。此外,鄱阳湖湖滨其他地区的研究也表明湖滨沙山的形成都与风力搬运相关:党淑青等^[13]对鄱阳湖西岸沙岭沙山的沙丘背风坡、山脊和迎风坡采样并进行光释光测年,发现最大、最小的光释光年龄分别为 (37.64 ± 2.63) 和 (0.16 ± 0.05) ka BP,表明沙岭沙山形成于 40 ka 左右,并且风力作用一直持续至现今;吴艳宏^[14]对九江—彭泽一带沙山进行研究发现,沙丘表面可见明显的风成波痕,砂层中无明显的河床沉积,末次冰期地层发育泥炭层是风成沙漠中的沼泽相,并且沙层高度和厚度悬殊只会出现在风成沙丘中,认为沙层来源于古长江及其支流赣江的河床沙,经月平均最大风速可达 20 m/s ^[10] 的强风吹扬短距离搬运,在近岸堆积形成沙山;李徐生等^[15]对江西境内岗丘顶部表土层之下的偏红松散沉积物进行了采样测试,发现沿主风方向沉积序列的粒度变化呈现出规律性变细趋势,对打鼓岭红土进行光释光测试,发现其属于晚更新世中晚期的堆积,主要为末次冰期以来的风尘沉积。上述这些研究都从侧面佐证了多宝沙山的“风成论”的观点。

然而,韩志勇等^[12]的研究发现,多宝沙山松散沙层发育水成层理结构,并且朱海虹等^[16]研究发现多宝沙山的沙子来源于赣江和抚河;这些发现均表明多宝沙山也可能形成于水下。而目前的研究主要

集中在地表露头和光释光测年,缺乏深部证据,如地表风成构造可能只代表发生了后期风力改造,并不能排除沙山水下沉积的可能,需要结合深部观察进行确定。本文结合高密度电阻率法、瞬变电磁法两种物探手段以及钻井取心和地质露头资料,揭示鄱阳湖湖滨多宝沙山的成因机制。

1 研究区概况

多宝沙山位于江西省都昌县多宝乡境内,其东侧为陆地,南、北、西三侧为鄱阳湖通江湖道(图1),绵延20余km,平均海拔13.25m。沙山主要表现为垄状地貌,垄状沙丘走向沿南北方向,垂直沙垄方向地形高地起伏。沙山所在地区雨量丰沛,多年平均年降雨量为1500mm左右。年内分配极不均匀,4—6月降水约占全年的48%,6月最大,占全年的17%,12月最小,只占3%。该地区冬春常受西伯利亚冷气流影响,多寒潮,盛行偏北风,气温低。

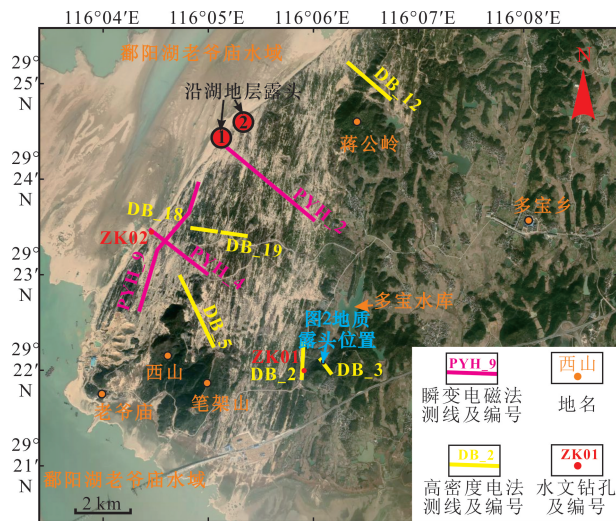


图1 多宝沙山物探测线部署图

Fig.1 Map of geophysical lines in Duobao Desert

2 材料与方法

沙漠是物探工作的难点区域,地质勘探通常采用多道地震和非接地的电磁法进行^[17-21],电法却极少开展。由于多宝沙山为南方沙漠,含水量充足,并且沙漠主要由粒度较小的细沙和粉沙组成,接地电阻相对一般沙漠地区较好。因此,为了进一步确定多宝沙山成因,本研究在多宝沙山地区开展了包括高密度电阻率法和瞬变电磁法在内的物探工作,相

关物探测线布设见图1。

2.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法是以岩土体导电性差异为基础的一种阵列勘探方法,与普通的电阻率法相比,采集的信息丰富且数据量庞大^[22-23]。本研究高密度电阻率法使用美国AGI公司生产的Super Sting R8/IP高密度电法仪,该仪器具有直观、高效、高分辨率、高精度等特点。本研究高密度电阻率法工作开展于温纳、偶极-偶极和倒置测深等多种装置,测量点距主要为5、10m。

2.2 瞬变电磁法

瞬变电磁法也称时间域电磁法,其基本原理为电磁感应定律,是利用不接地回线或接地线源向地下发射一次脉冲磁场,在一次脉冲磁场间歇期间,利用线圈或接地电极观测二次涡流场的方法^[24-25]。本研究瞬变电磁法采用澳大利亚Monex Geosope研发制造的terra TEM瞬变电磁仪,主要以100m×100m重叠回线装置进行数据采集,点距为50m。

2.3 地质剖面观察

本研究地质剖面主要分为两种:一种位于物探测线附近,剖面露头的地层岩性、层内构造特征等信息可辅助物探资料解译;另一种位于湖边,可为物探资料解译提供的信息有地层的岩性、年代、厚度、层理、层序地层结构以及沉积环境。

3 结果

3.1 沙山东部边缘

DB_3测线北段所在公路基岩类型为砂岩,路边地质露头(位于DB_3测线30m处)上可见地层从上往下依次为棕黄色—棕红色黏土层(网格状结构)、褐红色(冰碛)泥砾层、冰碛含砾泥岩地层、冰碛含砾砂岩地层和冰碛含砾泥岩地层,且可见小规模正断层(断距约0.5m,图2),表现为同沉积断层特征;DB_3测线南段路边地质露头地层主要为棕黄色—棕红色黏土层。

多宝乡DB_3测线反演结果(图3a)显示:该区电性特征较为明显,高阻层与低阻层交替发育并且各层发生明显错位,推断45~50、85~90、110~115和145m处可能发育断层;剖面南侧两条断层断距较小,一般小于20m。

DB_3测线北段主要分为4个电性层。第一电性层电阻率介于20~200Ω·m之间,厚度为0~10m,在剖面北段0~45m范围厚度为0,在剖面其



图 2 多宝沙山 DB_3 测线附近地质露头

Fig.2 Geologic outcrop near Line DB_3 in Duobao Desert

他部位表现为楔状,上盘断层面附近厚度较大,可至 10 m 左右,远离断层面逐渐减小为 0;推断为第四系望城岗组(Qp₂₋₃w)网纹状红黏土,该层为剖面部位的基岩覆盖层。第二、第三、第四电性层依次根据地质露头推断为震旦系南沱组(Z₁n)冰碛泥岩、含水冰碛砂岩和冰碛泥岩地层,它们一起组成了该处的基岩地层。

DB_3 测线南段主要分为 3 个电性层。第一电性层电阻率介于 20~200 Ω·m 之间,厚度为 0~

22 m,总体上厚度由北向南逐渐增厚;结合地表地质特征推断为第四系望城岗组网纹状红黏土,该层为剖面部位的基岩覆盖层。第二、第三电性层分别推断为震旦系南沱组冰碛泥岩和含水冰碛砂岩地层。

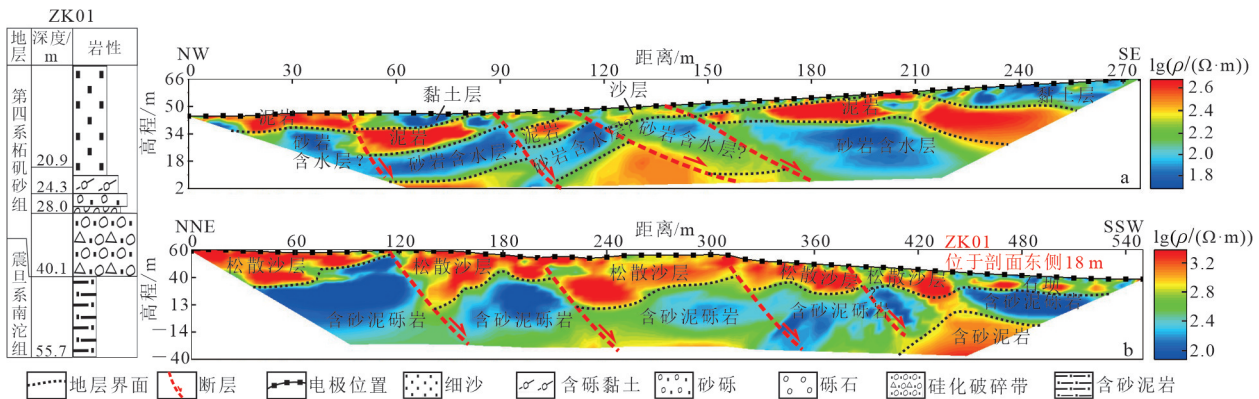
多宝乡 DB_2 测线反演结果(图 3b)显示:高阻层底部边界出现了 3 次主要突变,与低阻层同时表现出多处明显错动,推断 110~120、200、300~310 和 380 m 处可能发育断层,断层上盘通常为高阻,下盘为低阻;这些断层的断距由北向南逐渐减小,北侧断层的断距可达 50 m 左右,南侧断层的断距则小于 10 m,它们将剖面分割成多个断块。

该剖面主要由两个电性层组成。第一电性层电阻率通常大于 1 500 Ω·m,厚度为 10~50 m,在靠近断层面的位置下盘较薄,最小厚度不到 10 m,上盘较厚,可达 55 m 以上;结合 ZK01 钻井数据推断为第四系新港组(Qp₃x)细沙层。第二电性层结合 ZK01 钻井数据推断为新近系含砂泥砾岩地层。

3.2 沙山西部沿岸

PYH_9 测线总体平行于湖岸线(图 1),被赣江断裂的东支分隔为电性结构截然不同的两段(图 4a)。

PYH_9 测线北段分为上、中、下 3 个完全不同的电性结构层。第一电性层电阻率主要介于 200~1 000 Ω·m 之间,推断其为第四系柘矶砂组(Qp₃z)松散沙层的下部地层(底部和基岩面之间可能因下雨存在尚未渗漏的地下水,故显示为相对低阻特征)。该层厚度较大,分布不均,介于 20~100 m 之



a. DB_3 测线; b. DB_2 测线。ρ. 电阻率。

图 3 多宝沙山东部边缘高密度电阻率法反演结果解译图

Fig.3 Interpreted inversion results of high density resistivity method on the eastern margin of Duobao Desert

间,650~1 600 m处厚度在北侧厚,向南逐渐减薄;地层由北向南向上翘倾,符合分支河道的沉积充填特征。第二电性层和第三电性层分别推断为震旦系皮园村组(Z_2p)硅质岩地层和陡山沱组(Z_2d)含铁矿泥岩地层。跨过赣江断裂东支进入PYH_9测线南段,只有一个电性结构层,推断为震旦系陡山沱组含铁矿泥岩地层和震旦系南沱组泥砾岩地层。

PYH_2测线呈NW—SE走向,位于多宝沙山北部沙漠地区(图1),西侧到达鄱阳湖湖边,全长1 800 m,向东地形逐渐升高,剖面上部有80 m左右的数据空白区(图4b)。

剖面分为上下两个完全不同的电性结构层。第一电性层电阻率主要介于1 200~3 200 $\Omega \cdot m$ 之间,推断其上部为第四系柘矶砂组松散沙层,是三角洲砂体的一部分;而下部为震旦系皮园村组硅质岩地层,两者之间界线不清晰(或者柘矶砂组位于数据空白区)。该层西北段出现极低电阻率异常,介于50~200 $\Omega \cdot m$ 之间,推断可能是柘矶砂组松散沙层底部的含水层。该层厚度分布不均匀,剖面西部厚度较大,最大厚度可达近180 m,东部厚度较小,厚度约110 m,地层总体向坡顶方向翘倾。第二电性层电阻率介于100~1 600 $\Omega \cdot m$ 之间,推断为震旦系陡山沱组含铁矿泥岩地层和南沱组泥砾岩地层。该层厚度较大,未见底,最大厚度大于250 m。该套地层内900~1 600 m之间发育低阻异常体,电阻率介于100~500 $\Omega \cdot m$ 之间,推断为陡山沱组内的含铁矿地层。

PYH_4测线呈NW—SE走向,测线位于多宝沙山中部的沙漠地区(图1),西侧到达鄱阳湖湖边,测线全长1 050 m,向东地形逐渐升高,海拔从剖面西侧的20 m左右到达东侧的180 m左右;剖面西段120 m处有一口钻井,钻井深度47.4 m,钻入震旦系皮园村组中约26.6 m,未钻穿这一地层;剖面上部约有80 m的数据空白区(剖面左侧的上部为数据内插结果,图4c)。

剖面分为上下两个完全不同的电性结构层。第一电性层电阻率主要介于800~2 100 $\Omega \cdot m$ 之间,推断其上部为第四系柘矶砂组松散沙层,是三角洲砂体的一部分,钻井显示该层厚度为20 m左右,而下部为震旦系皮园村组硅质岩地层,两者之间界线不清晰(或者柘矶砂组位于数据空白区)。结合钻井数据,发现该层厚度较大,最大厚度近100 m,厚度较为均匀,地层总体向坡顶方向翘倾。第二电性层

电阻率介于50~1 200 $\Omega \cdot m$ 之间,推断为震旦系陡山沱组含铁矿泥岩地层和南沱组泥砾岩地层。该层厚度较大,未见底,最大厚度约为180 m;发育3处低阻异常体,分别位于0~50 m处,电阻率介于100~500 $\Omega \cdot m$ 之间,200~550 m处,电阻率介于50~500 $\Omega \cdot m$ 之间,670~970 m处,电阻率介于50~500 $\Omega \cdot m$ 之间,推断皆为陡山沱组内的含铁矿地层(该地层可能对周围有屏蔽效应,导致低阻异常范围非常大和厚)。

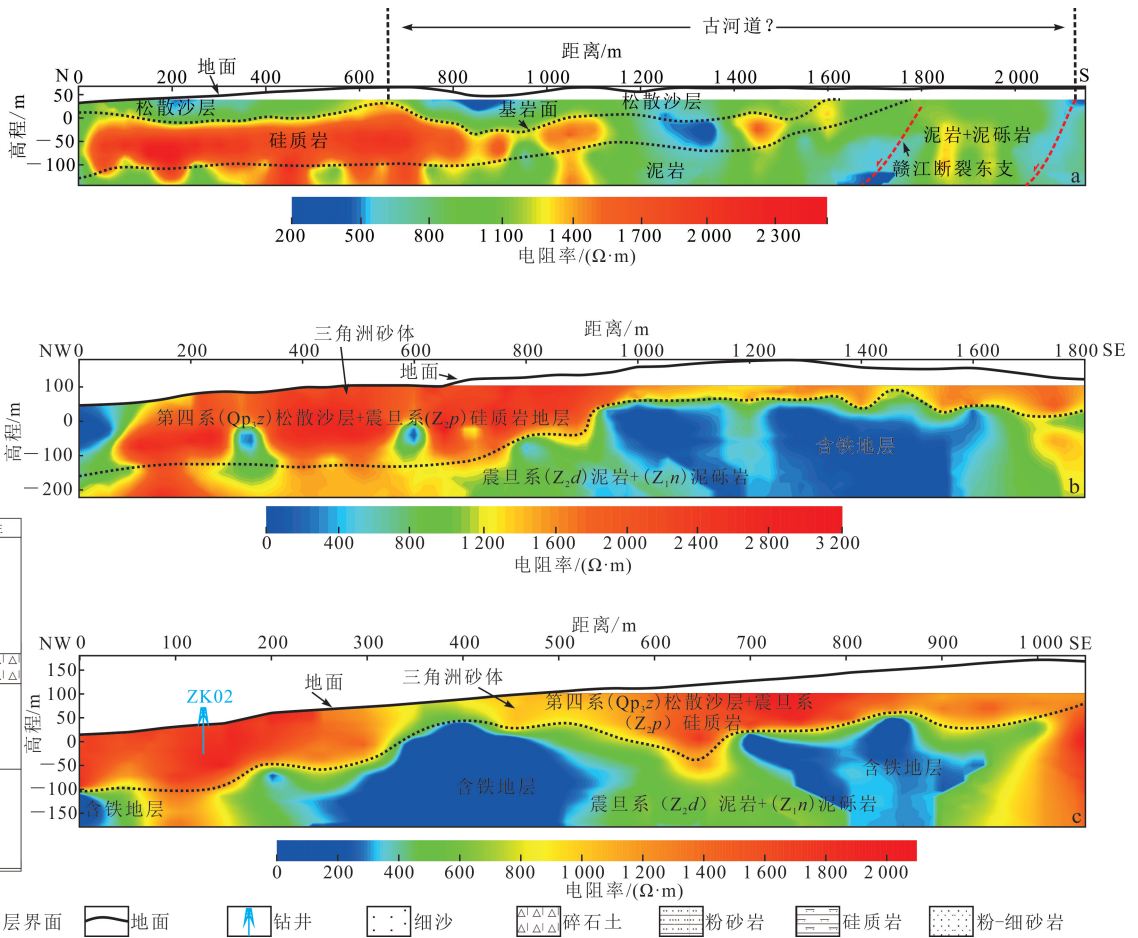
3.3 沙山中部

DB_12测线反演结果(图5a)显示,剖面上部发育高阻层,下部发育低阻层,高阻层底部边界出现了一次主要突变,与低阻层同时表现出明显的错动,推断320 m处可能发育断层。剖面320 m处的断层将剖面分割成南北两段。

DB_12测线北段主要由两个电性层组成。第一电性层的主体部分电阻率多大于900 $\Omega \cdot m$,厚度由北向南逐渐增厚,北端厚度约为30 m,南端厚度可达55 m;结合地表地质特征推断该层为第四系望城岗组细沙层(其底部相对低阻地层的形成可能与降雨渗滤有关)。第二电性层北端电阻率较低,主要介于90~600 $\Omega \cdot m$ 之间,南端电阻率较高,通常大于950 $\Omega \cdot m$,推断该层为震旦系皮园村组硅质岩地层。

DB_12测线南段主要由5个电性层组成。第一电性层主要分布在剖面480~850 m范围内,电阻率介于100~1 300 $\Omega \cdot m$ 之间。该电性层厚度较小,底界面向南逐渐降低,厚度介于10~35 m之间,结合地表地质特征推断该层为第四系望城岗组细沙层,最北侧断层靠湖一侧沙层厚度介于30~35 m之间,较为均匀,符合三角洲沙体的沉积充填特征。第二、第三、第四、第五电性层分别推断为震旦系陡山沱组泥岩地层、南沱组含砂泥岩地层、莲沱组(Z_1l)砂砾岩地层和中元古界修水组(Pt_2x)板岩地层。

DB_18测线反演结果(图5b)显示,该剖面由3个主要的电性层组成。第一电性层主要分布在剖面110~390 m范围内,电阻率多大于1 500 $\Omega \cdot m$;结合地表地质特征推断为第四系望城岗组细沙层。第二电性层电阻率多小于1 000 $\Omega \cdot m$,推断该层与上覆地层一致,为第四系望城岗组细沙层(受渗滤的降雨影响),该层在剖面110 m以东厚度较为稳定,介于20~40 m之间,110 m以西厚度逐渐减小至小于



a. PYH_9 测线; b. PYH_2 测线; c. PYH_4 测线。

图 4 多宝沙山西部沿岸瞬变电磁法反演结果解译图

Fig.4 Interpreted inversion results of transient electromagnetic method along the west coast of Duobao Desert

10 m,符合三角洲沙体的沉积充填特征。第三电性层推断为南沱组砂岩地层。

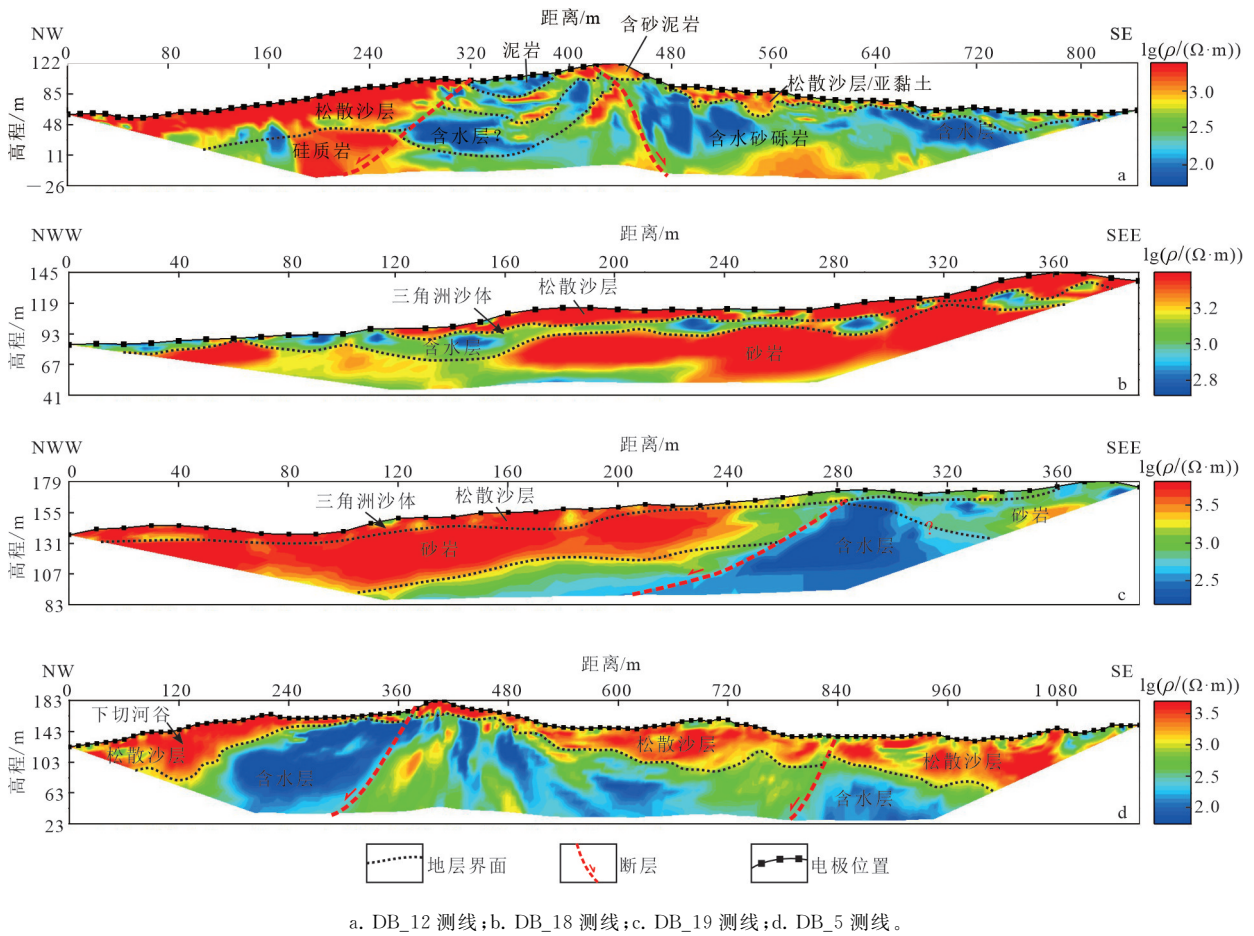
DB_19 测线反演结果(图 5c)显示,剖面主要由 3 个电性层组成。第一电性层电阻率通常大于 2 500 Ω·m,在 190 m 以北较厚,最大厚度约 18 m,在 190 m 以南则较薄,最小厚度约 2 m;结合地表地质特征推断为第四系望城岗组细沙层。与 DB_18 剖面对比,该剖面松散沙层厚度更薄,两条剖面所反映的松散沙层厚度向湖方向缓缓变薄的特点与三角洲沙体的沉积充填特征吻合。第二电性层推断为震旦系南沱组砂岩地层。第三电性层推断为南沱组泥岩/砂岩地层,被断层分割的南段顶界面不明显,可能受其上覆含水层影响。

DB_5 测线反演结果(图 5d)显示,剖面上部发育高阻层,下部发育低阻层,高阻层底部边界出现了一次主要突变,与低阻层同时表现出明显的错动,推

断 380 m 处和 820~830 m 处可能发育断层。

该剖面主要由两个电性层组成。第一电性层电阻率多大于 1 400 Ω·m,厚度很大,400 m 附近地表最高点厚度最小,为 0~20 m,该部位向两侧厚度逐渐增大,最大厚度位于剖面 1 030 m 处,厚度可达 70 m;结合地表地质特征推断该层为第四系望城岗组细沙层。其中剖面 360 m 以北厚度介于 0~60 m 之间,中间厚,两侧薄,符合分支河道沙体的透镜状充填特征。第二电性层推断为震旦系南沱组砂岩地层。

对比两种不同的物探方法,高密度电阻率法抗干扰能力更强,横向和纵向分辨率更高。然而,在多宝沙山地区,表层松散沙层电阻率极高,并且接地电阻很难降低,高密度电阻率法施工难度极大。瞬变电磁法探测深度较大,在多宝沙山地区可以探测到深度 200 m 以下,但分辨率较低,通常无法区分上



a. DB_12 测线; b. DB_18 测线; c. DB_19 测线; d. DB_5 测线。

图 5 多宝沙山中部高密度电阻率法反演结果解译图

Fig.5 Interpreted inversion results of high density resistivity method on central Duobao Desert

层松散沙层和下部高阻硅质岩,探测范围在表层有盲区,并且抗干扰能力弱;但由于该方法不需要接地,因此不受表层高阻地层的影响。总而言之,在多宝沙山地区两种不同的物探方法可以形成很好的互补。

多宝沙山基岩地层年代不一,部分地区为新近系,部分地区为震旦系。本次物探工作发现:多宝沙山沙层厚度为 0~80 m,等厚线总体上与沙山西北侧岸线平行;沙山东部厚度较小,仅 5~20 m,靠近西北侧和南侧砂体厚度逐渐增大,可至 60~80 m (图 6)。沙山的这一厚度分布特征与现今赣江向北的延伸方向基本一致,可能是三角洲砂体的一部分,该三角洲朵体厚度中心位于多宝沙山以东。此外, DB_5 剖面疑似发育大型河道砂体, DB_12、DB_18、DB_19 剖面砂体厚度分布规律符合三角洲前缘砂体的特征。在垂直沙垄方向,沙层在沙垄顶部厚度较小,最小可为 0,向沙垄两侧的构造低部位厚度逐渐增大,断层上下盘沙层厚度发生突变,体现了先存

基岩构造对沙层厚度的控制;在平行沙垄的冬季风主风方向,沙层没有出现明显厚度变薄的特征。

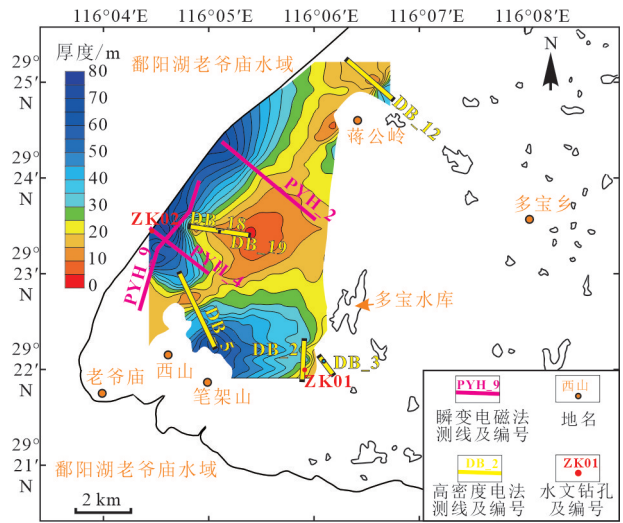


图 6 多宝沙山第四系沙层厚度图

Fig.6 Isopach map of the Quaternary in Duobao Desert

3.4 沿湖地质剖面

图 7 展示了湖岸两处相对小尺度的地层露头沉积结构特征。①号露头处地质剖面的沉积地层主要为粉沙—细沙夹薄层泥,除冲刷面之上发育厚度可达 4 cm 的中沙层外,层理单层厚度均介于 1~3 mm 之间。①号露头下部主要表现为平行层理,上

部则表现为槽状交错层理。②号露头处沉积地层主要为泥—粉沙沉积,层理单层厚度通常介于 1~10 mm 之间,并且单层表现为等厚特征。②号露头 A 处表现为明显的水道沉积地层特征,其下部为水平层理,向上跨过冲刷面也表现为水平层理的透镜状充填特征,冲刷面下部的另一侧则表现为水道沉

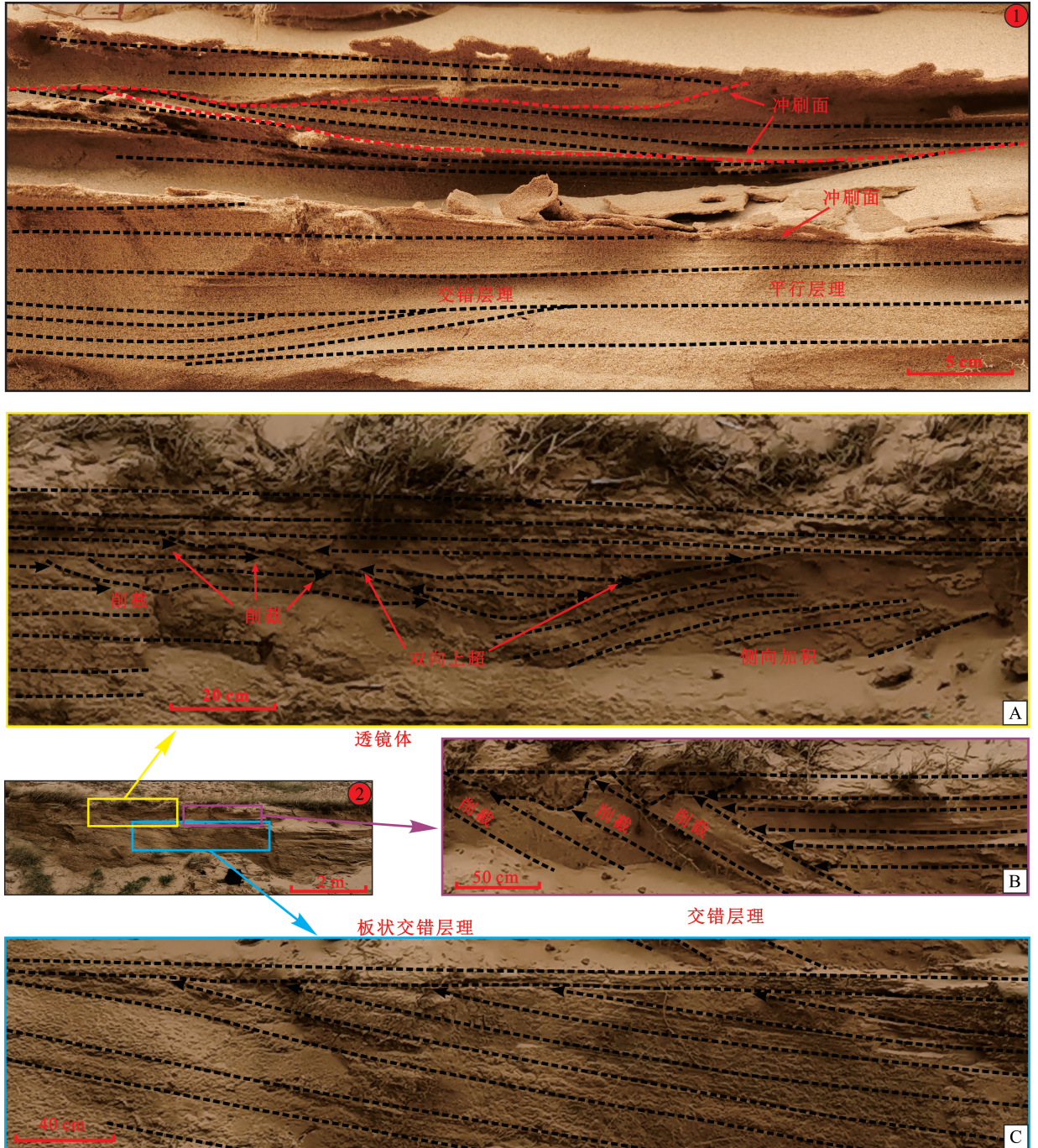


图 7 多宝沙山沿岸三角洲前缘亚相沉积地层层理特征

Fig.7 Stratigraphic bedding characteristics of delta front subfacies along the coast of Duobao Desert

积独有的侧向加积的沉积特点。②号露头 B 处和 C 处则主要表现为板状交错层理特征,其中 B 处上部也可见明显的冲刷面。

通过水上更大尺度的观测(图 8),多宝沙山西侧有明显下超和顶超的层序地层学特征,露头地层向 NE 方向倾斜,粒度更细的薄层泥或者泥质粉沙地层植被明显更茂盛,而粒度较粗的松散沙层植被覆盖很少,形成了地层结构分明的“条带状”植被覆盖特征。地层通常下超于湖面附近,表现出明显的前积特征,地层内部甚至可见双向下超特征;结合露头①②的调查及高密度电阻率法、瞬变电磁法反演及解译结果,推断露头 NE 段为三角洲前缘亚相。露头 SW 段没有发现明显的下超特征,地层主要是分选较好的细砂,露头点的层理构造主要是水平层理;结合高密度电阻率法和瞬变电磁法解译结果,推断该处为三角洲朵体供沙的大型下切河谷,即三角洲前缘亚相中的水下分流河道微相。

4 讨论

鄱阳湖地区在 8 ka 以来经历了 4 次冷暖交替^[26],多宝沙山可能也经历了多次湖侵和湖退,为该地区大风侵蚀形成平行于主风向的垄状风蚀地形及风沙沉积于震旦系基岩之上提供了有利条件。4.1~3.8 ka BP 时期,湖口梅家洲钻井孢粉资料显示彭蠡泽主要位于长江以北并向南扩张,湖口地区位于赣江三角洲的前缘三角洲环境^[14],与本研究水域视角地质露头的调查结果相同;因此,多宝沙山部分区域覆盖于新近系之上的第四系松散沙层,极有可能是水下沉积。韩志勇等^[12]的研究及本研究观察到的水成沉积层理也佐证了这一点。与此同时,

水流切割也可导致上述垄状地形的形成。多宝沙山的沙粒粒度、矿物成分以及沙粒表面特征等与现代赣江、抚河沉积物相似^[16],而赣江、抚河在多宝沙山南侧,鄱阳湖地区的冬季风为方向相反的北风,进一步证明多宝沙山的形成有水下沉积作用的参与。沉积物²¹⁰Pb定年结果揭示老爷庙地区沉积速率最大可达 0.8 cm/a^[27],在几万年的时间内可以形成百米厚度的沙层。老爷庙地区在更新世—全新世时期经历了明显的断块差异运动^[28-33],中更新世以来庐山地区的构造抬升可达 400~500 m^[34],全新世时期形成的多宝沙山可能也发生了大幅度抬升,最终形成现今的沙山。然而,短暂的全新世很难形成现今规模的构造抬升,因此,构造高部位的沙层沉积必然有风沙沉积作用的参与。综上所述,多宝沙山的形成既有风沙沉积作用的参与,也有水下沉积作用的参与。

同处亚热带季风性湿润气候的洞庭湖沉积速率也非常大,其湖口在 1968—1984 年的年平均沉积速率可达 4.2 cm/a^[35],并且也经历了复杂的气候变化以及湖盆的大幅萎缩^[36-39];此外,湖底大部分区域地形平坦,枯水期暴露地表,为风力搬运提供了有利条件。然而,全新世时期洞庭湖地区没有有利的风力资源^[40],也没有经历大幅度的差异沉降或者抬升^[41],因此,与鄱阳湖对比,其周边并形成没有明显的沙漠地貌。综上,多宝沙山的形成与气候快速变化导致的湖平面多次起伏、彭蠡泽南扩、湖底平坦的地形、三角洲快速沉积、断块差异运动和强劲的冬季风等多重因素在时间和空间上的耦合相关。

多宝沙山是由水流和大风共同作用而形成的:全新世早期,多宝沙山位于水面之下,赣江、饶河、信



图 8 多宝沙山西侧水域视图解译

Fig.8 Interpretation of west view on Duobao Desert

江向北汇合向该处输沙,这一分支河道在西山和笔架山两次发生分叉,此时老爷庙附近的西山、笔架山以及部分构造高地位于水面之上,多宝沙山地区快速沉积了很厚三角洲前缘砂体(图 9);全新世中期老爷庙地区湖面发生萎缩,多宝沙山暴露地表,并在断块差异运动的情况下,水底地形本就高于周围的三角洲相对现今的老爷庙湖底持续上升,形成了多宝沙山的雏形;最终老爷庙地区冬季强风在枯水期改造了三角洲表层,风沙覆盖了除西山、笔架山之外的古构造高地,形成了现今的多宝沙山。

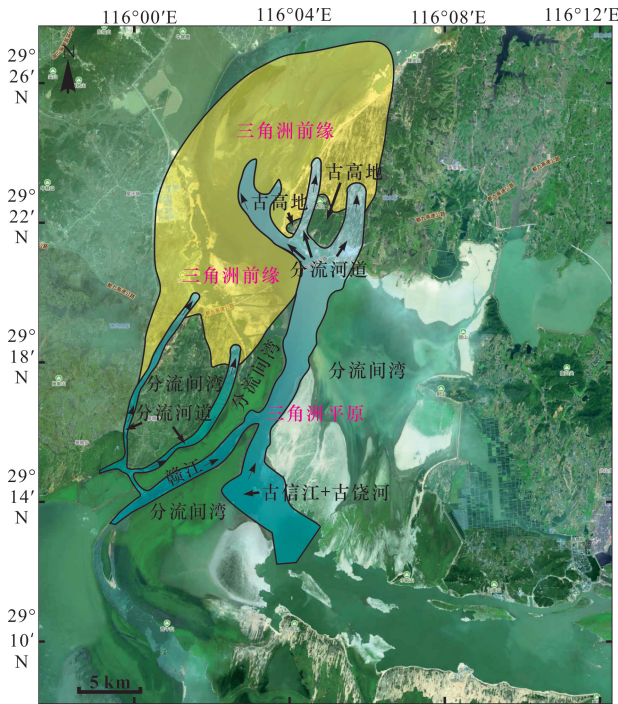


图 9 老爷庙水域及多宝沙山第四系平面沉积相示意图

Fig.9 Diagram of Quaternary sedimentary facies in Laoyemiao Waters and Duobao Desert

5 结语

通过高密度电阻率法、瞬变电磁法和野外地质露头的调查,发现多宝沙山松散沙土层理、沉积结构及厚度的分布特征更加符合水下沉积的特征,而沙山部分地区基岩为震旦系则表明,沙山的形成有风力的参与,因此本研究认为多宝沙山的形成是水下沉积和风力搬运共同作用的结果,水下沉积发生于古赣江三角洲的三角洲前缘亚相环境。

参考文献 (References):

- [1] 王式功,王金艳,周自江,等. 中国沙尘天气的区域特征[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 193-200.
Wang Shigong, Wang Jinyan, Zhou Zijiang, et al. Regional Characteristics of Dust Events in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(2): 193-200.
- [2] 郭泽呈,魏伟,石培基,等. 中国西北干旱区土地沙漠化敏感性时空格局[J]. 地理学报, 2022, 75(9): 1948-1965.
Guo Zecheng, Wei Wei, Shi Peiji, et al. Spatiotemporal Changes of Land Desertification Sensitivity in the Arid Region of Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 75(9): 1948-1965.
- [3] 程东会,王文科,侯光才,等. 毛乌素沙地植被与地下水关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(1): 184-189.
Cheng Donghui, Wang Wenke, Hou Guangcai, et al. Relationship Between Vegetation and Groundwater in Mu Us Desert[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(1): 184-189.
- [4] 李智佩,岳乐平,薛祥煦,等. 毛乌素沙地沉积物粒度特征与土地沙漠化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(3): 578-586.
Li Zhipai, Yue Leping, Xue Xiangxu, et al. Grain-Size Distribution Characteristics of Different Geo-Genetic Type Sediments and Land Desertification in Mo Us Desert[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(3): 578-586.
- [5] 吴华武,欧阳勇峰,姜鹏举,等. 水汽来源和环境因子对典型亚热带季风区降水稳定同位素的影响:以湖口地区为例[J]. 地理科学, 2022, 42(8): 1502-1512.
Wu Huawu, Ouyang Yongfeng, Jiang Pengju, et al. Effects of Moisture Sources and Environmental Factors on Precipitation Stable Isotopes in a Typical Subtropical Monsoon Region: A Case of Hukou Region [J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(8): 1502-1512.
- [6] 吴娟,张奇,李云良,等. 鄱阳湖洪泛系统水位-面积迟滞关系的形成机制及演变[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(10): 2155-2165.
Wu Juan, Zhang Qi, Li Yunliang, et al. Formation Mechanism and Evolution of Stage-Area Hysteretic Relationships in Floodplain System of Poyang Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(10): 2155-2165.
- [7] Huang C, Wei G J, Wu X, et al. A Geochemical

- Record of the Link Between Chemical Weathering and the East Asian Summer Monsoon During the Late Holocene Preserved in Lacustrine Sediments from Poyang Lake, Central China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154: 17 - 25.
- [8] Li, X., Yang H., Yao Y., et al. Precipitation Changes Recorded in the Sedimentary Total Organic Carbon Isotopes from Lake Poyang in the Middle and Lower Yangtze River, Southern China over the Last 1 600 Years [J]. *Quaternary International*, 2016, 425(15): 292 - 300.
- [9] Yao J., Li Y., Zhang D., et al. Wind Effects on Hydrodynamics and Implications for Ecology in a Hydraulically Dominated River-Lake Floodplain System: Poyang Lake [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 103 - 113.
- [10] 丁明军, 郑林, 聂勇. 鄱阳湖沙山地区沙化土地特征及成因分析[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 159 - 163.
Ding Mingjun, Zheng Lin, Nie Yong. Characteristics and Driving Factors of Sandy Desertification in the Sandy Hill Area of Poyang Lake [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(2): 159 - 163.
- [11] 杨超, 朱红涛, 牛成民, 等. 陆相盆地浅水背景河湖交互特征及其模式[J]. *地球科学*, 2021, 46(5): 1771 - 1782.
Yang Chao, Zhu Hongtao, Niu Chengmin, et al. Characteristics and Models of Shallow-Water Environmental River-Lake Interaction in Continental Basins [J]. *Earth Science*, 2021, 46(5): 1771 - 1782.
- [12] 韩志勇, 李徐生, 张兆干, 等. 鄱阳湖湖滨沙山垄状地形的成因[J]. *地理学报*, 2010, 65(3): 331 - 338.
Han Zhiyong, Li Xusheng, Zhang Zhaogan, et al. Genesis of Ridgelike Landform on Sand Hill on the Shore of the Poyang Lake [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(3): 331 - 338.
- [13] 党淑青, 韩志勇, 李徐生, 等. 鄱阳湖湖滨沙山线性风蚀地貌的发育模式 [J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2): 388 - 397.
Dang Shuqing, Han Zhiyong, Li Xusheng, et al. Evolution Mode of Linear Wind Eroded Landforms on Sand Hills on the Shore of the Poyang Lake [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(2): 388 - 397.
- [14] 吴艳宏. 鄱阳湖湖口地区 4 500 年来环境变迁[J]. *湖泊科学*, 1999, 11(1): 40 - 44.
Wu Yanhong. Environmental Evolution Since 4 500 a BP in Hukou Area, Poyang Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1999, 11(1): 40 - 44.
- [15] 李徐生, 韩志勇, 杨达源, 等. 末次冰期鄱阳湖西南缘地区的风尘堆积[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(1): 101 - 108.
Li Xusheng, Han Zhiyong, Yang Dayuan, et al. Aeolian-Dust Deposit to the Southwest of the Poyang Lake During the Last Glacial Age [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(1): 101 - 108.
- [16] 朱海虹, 郑长苏, 王云飞, 等. 鄱阳湖现代三角洲沉积相研究[J]. *石油与天然气地质*, 1981, 2(2): 89 - 103, 201.
Zhu Haihong, Zheng Changsu, Wang Yufei, et al. A Study of the Sedimentary Facies of the Deltas in Poyang Lake [J]. *Oil & Gas Geology*, 1981, 2(2): 89 - 103, 201.
- [17] 朱文科. EH-4 在尼日尔沙漠地区找水中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2016, 13(3): 299 - 303.
Zhu Wenke. The Application of EH - 4 Water Exploration in Desert Area in Niger [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2016, 13(3): 299 - 303.
- [18] 成锁, 田钢, Xia Jianghai, 等. 多道面波分析技术在沙漠低降速带调查中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, 35(1): 113 - 117.
Cheng Suo, Tian Gang, Xia Jianghai, et al. Investigation of the Low-Depression Velocity Layer in Desert Area by Multichannel Analysis of Surface-Wave Method [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2005, 35(1): 113 - 117.
- [19] 张志发, 王者江, 张凤蛟, 等. 特殊耦合地震波检测与匹配滤波技术试验研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(增刊1): 185 - 189.
Zhang Zhifa, Wang Zhejiang, Zhang Fengjiao, et al. Special Coupling Seismic Detection and the Technology of Matched Filtering [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(Sup. 1): 185 - 189.
- [20] 任伟, 金胜. 应用音频大地电磁法探测内蒙古巴丹吉林高大沙山结构及成因[J]. *现代地质*, 2011, 25(6): 1167 - 1173.
Ren Wei, Jin Sheng. Applying Audio-Magnetelluric Method to the Study of Megadune Structure and Formation in Badain Jaran Desert, Inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 2011, 25(6): 1167 - 1173.
- [21] 王卫江, 兰险, 刘学清. 电磁法在新疆干旱区找水效果及适应性探讨[J]. *新疆地质*, 2004, 22(3): 265 -

270.
Wang Weijiang, Lan Xian, Liu Xueqing. Discussion About Effect and Adaptability of Electromagnetic Method in Seeking Water in Xinjiang Arid Region[J]. *Xinjiang Geology*, 2004, 22(3): 265 - 270.
- [22] 覃剑文, 姜晓腾, 谢贵城, 等. 基于高密度电法的城市复杂环境岩溶探查研究: 以贵港市北环新村为例[J]. *物探与化探*, 2023, 47(2): 530 - 539.
Qin Jianwen, Jiang Xiaoteng, Xie Guicheng, et al. Karst Exploration in Urban Complex Environments Based on Electrical Resistivity Tomography: A Case Study of Beihuan New Village in Guigang City[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2023, 47(2): 530 - 539.
- [23] 丁超, 解阳波, 张家豪, 等. 三维高密度电法揭示 SAGD 地面窜漏通道[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(6): 2021 - 2033.
Ding Chao, Xie Yangbo, Zhang Jiahao, et al. Imaging the Ground Leakage Channel of SAGD Based on Three-Dimensional Electrical Resistivity Tomography [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(6): 2021 - 2033.
- [24] 何胜, 王万平, 董高峰, 等. 等值反磁通瞬变电磁法在城市地质调查中的应用[J]. *物探与化探*, 2023, 47(5): 1379 - 1386.
He Sheng, Wang Wanping, Dong Gaofeng, et al. Application of the Opposing-Coils Transient Electromagnetic Method in Urban Geological Surveys [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2023, 47(5): 1379 - 1386.
- [25] 齐彦福, 李貅, 孙乃泉, 等. 电性源短偏移距瞬变电磁地形影响特征分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(1): 247 - 260.
Qi Yanfu, Li Xiu, Sun Naiquan, et al. Analysis of Influence Characteristics of Topography on Grounded-Source Short-Offset Transient Electromagnetic Responses [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(1): 247 - 260.
- [26] 马振兴, 黄俊华, 魏源, 等. 鄱阳湖沉积物近 8 ka 来有机质碳同位素记录及其古气候变化特征[J]. *地球化学*, 2004, 33(3): 279 - 285.
Ma Zhenxing, Huang Junhua, Wei Yuan, et al. Organic Carbon Isotope Records of the Poyang Lake Sediments and Their Implications for the Paleoclimate During the Last 8 ka [J]. *Geochimica*, 2004, 33(3): 279 - 285.
- [27] 叶崇开, 张怀真, 王秀玉, 等. 鄱阳湖近期沉积速率的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1991, 22(3): 272 - 278.
Ye Chongkai, Zhang Huaizhen, Wang Xiuyu, et al. Survey of Recent Sedimentation Rate in Poyang Lake [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1991, 22(3): 272 - 278.
- [28] 周松源, 张介辉, 徐克定, 等. 赣江断裂带对南鄱阳拗陷成盆的控制作用[J]. *天然气工业*, 2005, 25(2): 24 - 27.
Zhou Songyuan, Zhang Jiehui, Xu Keding, et al. Control Effect of Ganjiang Fault Belts on the Basing of South Poyang Depression [J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(2): 24 - 27.
- [29] 崔学军, 夏斌, 曾佐勋, 等. 赣江断裂与郟庐断裂接合作用及其成矿意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(1): 1 - 7.
Cui Xuejun, Xia Bin, Zeng Zuoxun, et al. Junction Between Ganjiang Fault and Tanlu Fault and Its Significance to Mineralization [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004, 28(1): 1 - 7.
- [30] 李中兰, 崔学军, 王冉, 等. 庐山星子地区中生代构造-岩浆事件与赣江断裂多期活动的关系[J]. *岩石学报*, 2007, 23(4): 839 - 848.
Li Zhonglan, Cui Xuejun, Wang Ran, et al. Relationship Between the Cenozoic Tectono-Magmatic Events in Xingzi Area, Lushan and the Multiphase Activities of Ganjiang Fault Zone [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(4): 839 - 848.
- [31] 梁兴, 吴根耀. 赣江断裂带中生代的演化及其地球动力学背景[J]. *地质科学*, 2006, 41(1): 64 - 80.
Liang Xing, Wu Genyao. Mesozoic Evolution of the Ganjiang Fault Zone and Related Geodynamic Settings [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2006, 41(1): 64 - 80.
- [32] 曹令敏, 袁怀玉, 赵亮, 等. 背景噪声成像揭示区域断层对华夏中部岩浆活动及矿床沉积的控制作用[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(9): 1764 - 1784.
Cao Lingmin, Yuan Huaiyu, Zhao Liang, et al. Fault-Controlled Regional Magmatism and Mineral Deposition in Central Cathaysia: Evidence from Ambient Noise Tomography [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2022, 52(9): 1715 - 1735.
- [33] 杨晓东, 吴中海, 张海军. 鄱阳湖盆地的地质演化、新构造运动及其成因机制探讨[J]. *地质力学学报*, 2016, 22(3): 667 - 684.
Yang Xiaodong, Wu Zhonghai, Zhang Haijun. Geological Evolution, Neotectonics and Genetic Mechanism of the Poyang Lake [J]. *Journal of*

- Geomechanics, 2016, 22(3): 667-684.
- [34] 毕华, 项新葵, 朱元松. 庐山隆起-滑脱构造[J]. 大地构造与成矿学, 1998, 22(1): 21-28.
Bi Hua, Xiang Xinkui, Zhu Yuansong. Lushan Uplift Bedding-Delamination Structure [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1998, 22(1): 21-28.
- [35] 王东坡, 陈宗团, 汪碧华. 湘江株洲至洞庭湖口江段现代沉积速率研究[J]. 长春地质学院学报, 1987, 17(1): 29-34.
Wang Dongpo, Chen Zongtuan, Wang Bihua. Research on Modern Sedimentation Rate of Xiang River in the Reach Between Zhuzhou and the Mouth of Lake Dongting, Hunan Province [J]. Journal of Changchun College of Geology, 1987, 17(1): 29-34.
- [36] 杜耘, 殷鸿福. 洞庭湖历史时期环境研究[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(2): 214-218.
Du Yun, Yin Hongfu. Study on Historical Environment in Dongting Lake Area [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(2): 214-218.
- [37] 柏道远, 李长安. 洞庭盆地第四纪地质研究现状[J]. 地质科技情报, 2010, 29(5): 1-8, 14.
Bai Daoyuan, Li Chang'an. Status of Quaternary Geology Research of Dongting Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(5): 1-8, 14.
- [38] 王影, 柴立和. 生态承载力水平评价的动态模型及其应用: 以洞庭湖生态经济区为例[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1859-1865.
Wang Ying, Chai Lihe. The Dynamic Evaluation Model of Ecological Carrying Capacity and Its Application: A Case Study of Dongting Lake Ecological Economic Zone [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(5): 1859-1865.
- [39] 杨达源, 李徐生, 张振克. 长江中下游湖泊的成因与演化[J]. 湖泊科学, 2000, 12(3): 226-232.
Yang Dayuan, Li Xusheng, Zhang Zhenke. Lake Evolution Along Middle-Lower Reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Lake Sciences, 2000, 12(3): 226-232.
- [40] 朱丽东, 谷喜吉, 叶玮, 等. 洞庭湖周边地区第四纪红土粒度特征及环境意义[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 13-22.
Zhu Lidong, Gu Xiji, Ye Wei, et al. Grain-Size Features of Quaternary Red Earth in Dongting Lake Area and Their Paleoenvironmental Significance [J]. Progress in Geography, 2014, 33(1): 13-22.
- [41] 柏道远, 王先辉, 李长安, 等. 洞庭盆地第四纪构造演化特征[J]. 地质论评, 2011, 57(2): 261-276.
Bai Daoyuan, Wang Xianhui, Li Chang'an, et al. Characteristics of Quaternary Tectonic Evolution in Dongting Basin [J]. Geological Review, 2011, 57(2): 261-276.