

# 石英 ESR 法在黄河现代沉积物物源示踪研究中的可行性分析

汪丽君<sup>1</sup>, 陈洪云<sup>1</sup>, 赖忠平<sup>2</sup>, 杨振京<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061

2. 汕头大学 海洋科学研究院, 汕头 525063

**摘要:** 石英 ESR 信号示踪法作为一种新的物源示踪方法, 已经被较好地应用于东亚地质历史时期风尘堆积物和现代沙尘沉降物的物源示踪研究中。首先简要回顾了石英 ESR 信号示踪法的研究现状, 进一步基于石英 ESR 信号示踪法的母岩年代和结晶度原理, 探讨该方法对黄河沉积物物源示踪的可行性及应用前景。

**关键词:** 石英; ESR 信号强度; 河流沉积物; 物源示踪

## Feasibility analysis of quartz Electron Spin Resonance method in tracing provenance of modern sediments in the Yellow River

WANG Lijun<sup>1</sup>, CHEN Hongyun<sup>1</sup>, LAI Zhongping<sup>2</sup>, YANG Zhenjing<sup>1</sup>

1. Institute of Hydrogeology and Environment Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China

2. Institute of Marine Sciences, Shantou University, Shantou 525063, China

**Abstract:** *Background, aim, and scope* As a new provenance tracing method, electron spin resonance (ESR) signal intensity and crystallinity index (CI) of quartz were widely used in tracing the material sources of marine dust, Asian dust and loess. Firstly, the present researches about the ESR provenance tracer were briefly reviewed. Based on this, we take the Yellow River Basin as the research area to analyze the feasibility of quartz ESR method to trace modern Yellow River sediments. **Materials and methods** As one of the most common and abundant minerals on the earth, the quartz has been selected to study material owing to its stability in the process of weathering, denudation and sedimentation, which may preferably save the primitive character of the host rocks. ESR signal intensity of the E' centre (an indication of the age of the host rock) and CI (an index reflecting the formation condition of the mineral such as temperature and crystallization speed) of quartz have been tested for the provenance identification. **Results** Based on the application successes and feasibility analysis on provenance of the marine sediments, Asian dust and loess, the provenance tracing the Yellow River will be proposed by the method of the ESR and CI. **Discussion** If the method of ESR and CI could successful trace the identification of

收稿日期: 2018-11-13; 录用日期: 2019-03-22; 网络出版: 2019-03-30

**Received Date:** 2018-11-13; **Accepted Date:** 2019-03-22; **Online first:** 2019-03-30

**基金项目:** 中国地质科学院基本科研项目 (SK201607); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20189262)

**Foundation Item:** Basic Scientific Research Projects of the Chinese Academy of Geological Sciences (SK201607); Geological Survey of China Geological Survey (DD20189262)

**通信作者:** 陈洪云, E-mail: hychhy812@163.com

**Corresponding Author:** CHEN Hongyun, E-mail: hychhy812@163.com

**引用格式:** 汪丽君, 陈洪云, 赖忠平, 等. 2020. 石英 ESR 法在黄河现代沉积物物源示踪研究中的可行性分析 [J]. 地球环境学报, 11(2): 181–189.

**Citation:** Wang L J, Chen H Y, Lai Z P, et al. 2020. Feasibility analysis of quartz Electron Spin Resonance method in tracing provenance of modern sediments in the Yellow River [J]. Journal of Earth Environment, 11(2): 181–189.

the Yellow River sediments, the following chief characters should be needed: (1) the stability of the chose object (keeping the primitive character in the process of the physical and chemical weathering ); (2) identification of provenance tracer (having the obvious identification in rock age and formation condition ); (3) the stability of provenance material (having the preferably supply relation between the provenance and deposition ); (4) the accessibility of sediments (having the unanimous mixed sediments among the main steam and other branches ).

**Conclusions** Compared with the provenance tracer of eolian sediments, the provenance of the river sediments had more spatial cause and temporal variability. The paper discussed the feasibility of the method of ESR and CI in the sediments of the Yellow River, which perfectly accorded with the stability of the object, identification of signal intensity, stability of provenance material and accessibility of sediments. Therefore, the provenance tracer of ESR and CI of quartz was considered as a promising method to trace the Yellow River sediments.

**Recommendations and perspectives** The quartz ESR method is feasible for the study of sediment tracing in the Yellow River, but the Yellow River has the characteristics of large basin, complex and diverse rocks, and the single tracing method is difficult to accurately identify the source area information of sediment, so this method still needs to be cautiously applied sediment tracing in the Yellow River.

**Key words:** quartz; ESR signal intensity; river sediments; provenance tracing

近年来，贯通大河的发育演化历史颇受国内外地学研究者的关注，其演化历史是研究全球或区域构造与气候之间耦合机制的桥梁，也是深入了解“山 - 河 - 湖 - 海”之间互动规律的纽带。河流也是世界上陆源碎屑物质搬运入海的主要途径，发源于亚洲内陆的几条入海河流的发育过程揭示了青藏高原隆升过程、河流流域构造演化、沉积物从剥蚀源区到沉积区的过程及对大气 CO<sub>2</sub> 消耗和季风变化之间的耦合关系（陈明扬，1991；李长安等，2000；汪品先，2005；李长安，2015）。自上世纪 70 年代以来，随着电子自旋共振（Electron Spin Resonance，简称 ESR）年代学的发展，在第四纪沉积物年法学测定的研究方面取得成功的应用实例（Beerten and Stesmans, 2007; Blackwell et al, 2007; Dobosz and Krzyminiewski, 2007; Gongming et al, 2007; Duval et al, 2009; Ribeiro et al, 2013）。近年来石英 ESR 法在地球科学领域物源示踪研究中也取得了较好的成果，部分学者将石英 ESR 信号强度与结晶度指数（Crystallinity Index，简称 CI）相结合得方法应用到东亚地质历史时期得风尘堆积物及现代沙尘沉降物的物源示踪研究中并取得较好的研究成果（Ono et al, 1998; Toyoda and Naruse, 2002; Nagashima et al, 2007; Sun et al, 2007, 2008, 2013; 陈洪云, 2011; Toyoda et al, 2016; Shimada et al, 2016）。基于此，在石英 ESR 信号强度及石英结晶度物源示踪的基础上，结合石英 ESR 法在东亚沙尘沉降物物

源示踪中的应用研究，尝试分析探讨其在黄河沉积物物源示踪研究中的可行性。

## 1 石英 ESR 法物源示踪研究现状

石英 ESR 法物源示踪是一种随着电子自旋共振年代学发展而发现的新的沉积物示踪方法。近年来，一些研究将石英 ESR 信号强度与石英结晶度指数相结合作为地球科学领域研究的新方法，在沉积物物源示踪研究方面取得了较好的应用效果（Ono et al, 1998; Toyoda and Naruse, 2002; Nagashima et al, 2007; Sun et al, 2007, 2008, 2013; 陈洪云, 2011; Toyoda et al, 2016; Shimada et al, 2016）。

### 1.1 石英 ESR 法对地质历史时期风尘堆积物的示踪应用

为研究日本群岛风成沉积物源时空变化特征，Ono et al (1998) 对比研究了日本岛南部与北部地区细颗粒 (<20 μm) 石英的 ESR 信号强度空间分布特征，根据其研究结果表明日本北部地区物质来源于分布前寒武纪岩石的西伯利亚与蒙古国地区；日本中部和南部物质源区为分布有古生代—中生代岩石的中亚地区；而日本最南部的群岛地区物质来源于以前寒武地层为主的喜马拉雅山脉。基于以上研究结果，前述研究还得出日本东部和北部地区主要受冬季风的影响，夏季副热带高压主要对日本西部和南部地区有影响，日本最南部岛屿地区主要受冬季副热带高压的影响。

为了进一步研究末次冰盛期东亚季风和西风带的变化特征及全新世东亚风尘在日本地区的传播路径和沉积地区, Toyoda and Naruse (2002) 对日本群岛 MIS1 和 MIS2 阶段堆积的黄土沉积物中的石英 ESR 信号强度进行了一系列的研究, 结果表明在 MIS1 阶段日本黄土沉积物的石英 ESR 信号强度与中国黄土高原和塔克拉玛干沙漠的值域比较相似; 在 MIS2 阶段, 日本南部地区风成沉积物石英 ESR 信号强度与 MIS1 阶段值域范围较为一致, 而北部地区沉积物石英 ESR 信号强度高于南部地区。以上研究表明由西伯利亚高压产生的冷锋在末次盛冰期 MIS2 阶段主要影响日本岛中部地区, 而到 MIS1 阶段则影响日本北部地区。Nagashima et al (2007) 对采集于日本海地区 2 个钻孔沉积物石英的 ESR 信号强和结晶度指数特征进行了系统的测试来分析日本海地区沉积物的物质来源, 研究结果表明日本海风尘物质主要来源于西伯利亚 / 蒙古的戈壁沙漠、中国北方的戈壁沙漠以及中国西部沙漠地区。

基于石英 ESR 法在日本群岛风成沉积物示踪研究中的成功应用, 有的学者尝试将此方法应用到亚洲粉尘的示踪研究。中亚地区是全球重要的风

沙尘土释放中心之一, 为了研究亚洲粉尘的释放强度、运输量及路径等对气候的直接和间接影响, Sun et al (2007, 2008, 2013) 和陈洪云 (2011) 对亚洲内陆塔克拉玛干沙漠、古尔班通沙漠、巴丹吉林沙漠、毛乌素沙漠、腾格里沙漠、库布奇沙漠、浑善达克沙地、科尔沁沙地及蒙古国南部戈壁沙漠九大沙漠表土样品中石英的 ESR 信号强度和结晶度指数进行了系统的测试和分析 (图 1)。结果表明不同粒径石英颗粒的 ESR 信号强度和结晶度存在显著差异: 粗颗粒石英的 ESR 信号强度空间变化不明显; 细颗粒石英的 ESR 信号强度和结晶度指数测试结果显示在同一个源区内的石英 ESR 信号强度的变化较小, 表明该地区石英来自于同一个源区或者不同源区的石英经过比较好的混合后沉积在该地区, 不同地区的石英 ESR 信号则表现出明显差异性, 从图 1 也可以看出, 根据细颗粒石英 ESR 信号强度可以将主要粉尘源区有效的区分开来, 即中国西部低 ESR 信号区、中国北方中 ESR 信号区和蒙古南部高 ESR 信号区。根据此研究的结果表明利用细颗粒石英 ESR 信号特征可以有效的示踪东亚粉尘的物质源区。

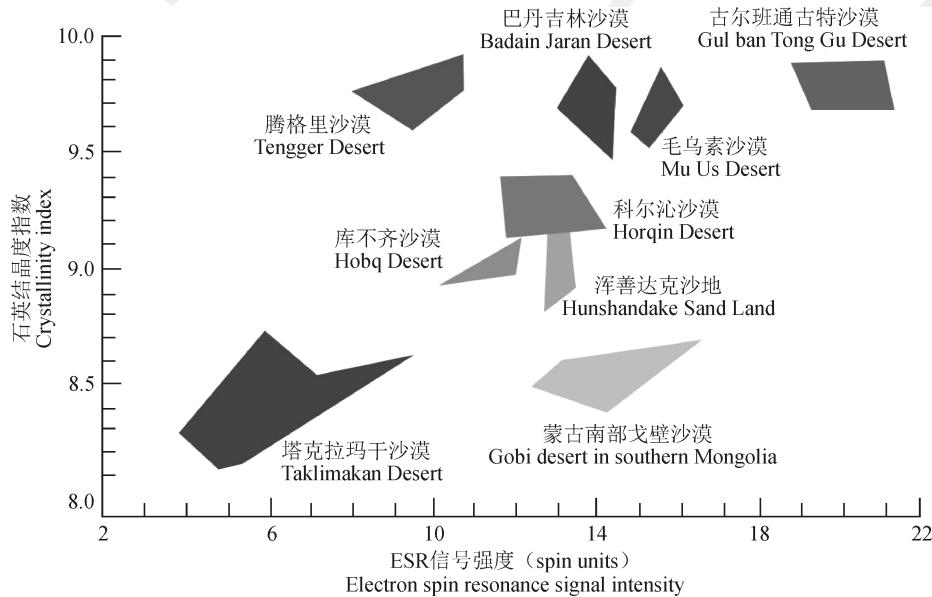


图 1 东亚地区各沙漠表层沉积物 ESR 信号强度和 CI 值图 (据 Sun et al (2007, 2008) 和陈洪云 (2011) 修改)

Fig.1 ESR signal intensity and CI of desert surface sediments in East Asia  
(modified from Sun et al (2007, 2008) and Chen H Y (2011))

## 1.2 石英 ESR 法对现代沙尘沉降物的示踪应用

在中国北部、中国西部和蒙古国南部分布有广泛的戈壁、沙漠及沙化土地, 并且这些地区处

于亚洲内陆, 气候干旱, 加之主要受高空的西风环流和近地面的东亚季风的影响, 成为全球重要的风尘释放中心之一, 其中来自北方和西北方的

东亚季风是粉尘产生和传输的主要驱动力。从广义上讲，这些地区都可能是现代沙尘黄土高原风尘沉积的物源区（刘东生，1985）。对黄土高原风尘物质来源的判定，多基于黄土样和沙漠表土样的矿物组成、元素特征及 Sr-Nd 同位素比值的直接对比。前人诸多研究表明，黄土高原风尘沉积是青藏高原构造隆升和东亚季风系统共同影响下的产物（An, 2000; Ding et al, 2000; An et al, 2001; Guo et al, 2002），黄土的物质来源不仅仅于亚洲内陆的干旱化过程、大气环流格局的变迁及其所控制的粉尘释放、迁移、沉积过程密切相关，并且可以直接反演亚洲内陆粉尘源区的形成和演化过程（An, 2000; Guo et al, 2002; Ding et al, 2005; Sun, 2005）。然而，不同学者对中国黄土高原风尘物质的主要源区的认识上却存在明显的争议。近年来，也有学者将石英的 ESR 信号示踪法应用到黄土的风尘沉积序列研究当中，进一步探讨此方法对黄土和古土壤序列时间尺度上的物源指示意义。例如：Sun et al (2007, 2008, 2013) 和陈洪云（2011）对黄土高原黄土 - 古土壤序列中的粗、细颗粒石英做了 ESR 信号强度和石英结晶度指数分析，进而与不同地区的粉尘源区进行结果对比，结果表明在空间尺度上黄土高原中部粗颗粒石英来自较近的如毛乌素沙地和腾格里沙漠，细颗粒则比较混杂，近源（毛乌素沙漠和腾格里沙漠）和远源物质（巴丹吉林和蒙古国南部）都有贡献；而黄土高原西部则有部分黄河的贡献，粗细颗粒都主要来自巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠及蒙古国南部的戈壁；在时间尺度上粗颗粒石英不具有冰期 - 间冰期波动；而细颗粒石英表现出冰期 - 间冰期的变化，间冰期时中国北部的腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠及毛乌素沙漠是主要的供给区；冰期时较远的蒙古国南部戈壁供给增大，这可能是与冬季风的增强有关。

## 2 石英 ESR 法在河流沉积物源示踪研究中的探讨——以黄河为例

### 2.1 可行性分析

石英是地球表面最常见也是含量最丰富的矿物之一，其物理化学性质较为稳定，在风化、剥蚀、搬运、沉积过程中不易受到破坏，较好的保存了能够反映母岩信息的原始特征（Basu et al, 1975; Jackson, 1981; Wronkiewicz and Condie, 1987; McLennan et al, 1993; Smith and Pell,

1997; Aléon et al, 2002）。石英 ESR 法物源示踪的原理是石英颗粒在受到宇宙银河射线和沉积环境存在的 U、Th、K 等放射性元素衰变过程中的电离辐射作用下会产生顺磁性的自由电子或者空穴中心，这些顺磁中心的数量会随时间的累积而增加；而在实验室内所测得的 ESR 信号强度即为时间累积的结果，即石英 ESR 信号强度反映的是在地质历史时期某一地质体因发生某地质事件以后其所含石英所接受的宇宙射线和放射性元素衰变的积累量。石英所积累的 ESR 信号强度与母岩的形成时间呈函数关系，在实验中所给辐射剂量相同的情况下，母岩年龄越老，其石英 ESR 信号强度越高，母岩越年轻，其石英 ESR 信号强度越弱（Odom and Rink, 1989; Ono et al, 1998; 高璐, 2011）。石英结晶度指数是指岩石中结晶质部分和非晶质部分之间的比例，矿物的结晶程度反映了矿物颗粒形成时的结晶温度和结晶速率，不同地质条件下形成的矿物，其结晶度指数差异显著（王河锦和周健, 1988; 杨献忠, 1993; 何明跃和王濮, 1994）。已有研究表明，不同的地质条件下形成的岩石类型不同，不同的岩石类型又具有不同的石英含量和 CI 值，因此可以通过石英 CI 值来辨别岩石类型的异同（赵剑波等, 2012）。基于以上分析，学者们已将石英 ESR 信号强度与石英结晶度指数相结合的方法作为一种新的沉积物示踪方法应用于不同的研究对象中。

从研究对象来看，石英 ESR 示踪法在日本海沉积物示踪、东亚粉尘示踪研究及黄土高原物源时空变化等研究中都取得较好的研究成果（Ono et al, 1998; Sun et al, 2001; Toyoda and Naruse, 2002; Nagashima et al, 2007; Sun et al, 2007, 2008, 2013; Yin et al, 2007; 陈洪云, 2011; Toyoda et al, 2016）。目前国内外将石英 ESR 信号强度应用于河流沉积物示踪上的研究还不多，但是 Toyoda et al (2016) 和 Shimada et al (2016) 尝试分别用石英 ESR (Al 心和 Ti 心) 定量分析两条支流对干流沉积物的供给，其实验结果与数据模拟结果具有很好的一致性，从而认为石英 ESR 法可以定量示踪沉积物质的来源。魏传义等（2017）综合分析了长江流域的地质背景、流域岩石的分布及水系特征等，认为利用石英 ESR 法对长江流域的沉积物进行示踪研究是可行的。从侧面反映了石英 ESR 示踪法在河流沉积物物源示踪研究中也将有较好的应用潜力和前景。基于此，石英 ESR 法是研究东

亚沙尘沉降物源的良好示踪方法之一, 其示踪的可行性解释为: 在东亚粉尘物质的供给区由于原岩的形成时代和岩石类型不同造成了不同的源区之间具有不同特征的石英 ESR 信号强度和 CI 值; 在粉尘的沉降区由于受搬运介质和搬运举例的影响, 不同的时间尺度和空间尺度上的沉积物质供给呈现多源性特征, 因此不同的空间区域和不同的地质历史时期沉积物石英 ESR 信号强度和结晶度指数值域范围是具有差异性的。对比到黄河沉积物, 一方面黄河不同的河段沉积汇中沉积物物质来源具有空间上的多源性和时间上的多变性, 另一方面随着搬运距离和水动力的变化, 不同支流沉积物对黄河干流的贡献也不一。综上分析, 黄河沉积物在物质来源的时空变化与沙尘沉降物具有较好的对比性, 因此提出设想: 石英 ESR 示踪方法是否同样适合应用于大河流域沉积物的物源示踪研究工作? 相对于风尘沉积, 河流沉积物来自不同地貌类型的不同流域, 其物质沉积具有空间上的多源性和时间上的多变性。因此, 此研究方法的成功应用需满足下列几个基本条件: (1) 研究载体的稳定性, 即选择载体不受外界物理风化及水动力的影响; (2) 信号的可识别性, 即不同流域的岩石类型及其组合要有明显的差异性; (3) 物源的稳定性, 即物源区和沉积区要有稳定的供给关系; (4) 沉积物的通达性, 即河流沉积物在水力搬运后的通达一致性。

以黄河为例, 黄河是中国的“母亲河”, 其形成演化对了解青藏高原的隆升及东亚季风的形成有着重要的意义, 黄河流经我国黄土高原携带大量泥沙进入平原地区, 认识黄河沉积物源对黄河治理也有重要意义(刘志杰和孙永军, 2007)。基于此, 拟选择黄河及黄河流域作为研究对象和研究区, 用石英 ESR 法示踪黄河沉积物物源的可能性表现为以下几个方面: (1) 研究载体的稳定性石英 ESR 法的示踪载体是石英, 石英是地表最常见的造岩矿物, 其物化性质稳定, 在搬运过程中不易受风化剥蚀的影响, 并且能够较好地保存源岩信息, 是良好的示踪载体(McLennan et al., 1993), 现代黄河沉积物中石英较为丰富, 是黄河沉积物源示踪研究稳定的研究载体。(2) 沉积物信号的可识别性: 由于黄河流域面积较大, 沉积物具有多源性的特征, 在沉积物沉积区由于搬运距离和搬运介质的影响表现为多源性, 由图 2 和图 3 可知, 黄河流域岩石类型以及岩石地质年

代都不同, 且黄河沉积物是典型的碎屑沉积物, 其流经区域的岩石成分及源区都可靠的记录在了沉积物中, 以内蒙古自治区的河口镇和河南郑州桃花峪分为上游、中游和下游, 由图 3 可知上游的黄河主要出露三叠系、石炭系一二叠系的岩石; 中游以黄土和少量三叠系、白垩系砂岩为主; 下游则是以黄河携带的大量沉积物为主(林晓彤等, 2003); 综上可知, 黄河沉积物在物质的供给区由于源岩的形成时代以及岩石类型的不同致使不同的源区具有不同的石英 ESR 信号特征和 CI 值, 则黄河流域不同地区沉积物都具有可识别性。

(3) 物源稳定性: 黄河干流不同河段在不同历史时期都具有连续沉积的特点, 沉积物的物源区和沉积区具有比较稳定的供给关系。(4) 沉积物的通达性: 黄河干流与其支流形成了庞大的水系(图 3), 使得在广阔流域内干流及支流沉积物在搬运过程中充分混合, 沉积物在河流搬运前后通达一致。基于此研究前提, 可以尝试运用石英 ESR 法来示踪黄河流域沉积物的物质源区。

## 2.2 黄河河流沉积物源示踪的构想

综合石英 ESR 法在东亚地质历史时期风尘堆积物源示踪及现代沙尘沉降物源示踪研究中的成功应用, 可知石英 ESR 法对有空间多源性和时间上多变性的沉积物源具有良好的指示性; 对比到黄河沉积物, 黄河不同的河段沉积汇中沉积物物质来源具有空间上的多源性, 基于此, 认为可以尝试将石英 ESR 法应用到黄河沉积物物源示踪研究中。其应用研究的基本构想如下: (1) 从黄河源头至入海口采集现代黄河河漫滩泥沙样品, 基于前人利用石英 ESR 法在日本海风尘沉积、东亚粉尘及现代黄土示踪研究结果表示需要来将采集的样品分为 $<16 \mu\text{m}$ 、 $16—32 \mu\text{m}$ 、 $32—63 \mu\text{m}$ 三个粒级来提取不同粒级的石英(Ono et al., 1998; Toyoda and Naruse, 2002; Nagashima et al., 2007; Sun et al., 2007, 2008, 2013; 陈洪云, 2011; Shimada et al., 2016; Toyoda et al., 2016); 细颗粒石英差异性更明显, 则用筛洗法提取粗颗粒( $32—63 \mu\text{m}$  与  $>63 \mu\text{m}$ )、“Stoke”沉降法(Temam, 1984)提取细颗粒样品分为 $<16 \mu\text{m}$ 、 $16—32 \mu\text{m}$ 。(2) 为了确保石英结晶度和 ESR 信号强度的准确性, 在进行仪器测量前对分粒级样品进行化学前处理, 包括除去样品中的碳酸盐、有机质、铁锰化合物等杂质等, 最后冲洗烘干得到纯净的石英(Rea and Janecek, 1981)。(3) 测

定不同粒级石英的结晶度和石英含量，通过辐照实验、热退火实验后，测量样品石英 ESR 信号强度，基于此测试结果结合前人研究结果来分析黄河流域

沉积物的物质源区。（4）分段研究黄河流域沉积物与可能源岩中石英 ESR 信号之间的特征及对比关系，尝试分析黄河流域沉积物的物质源区。

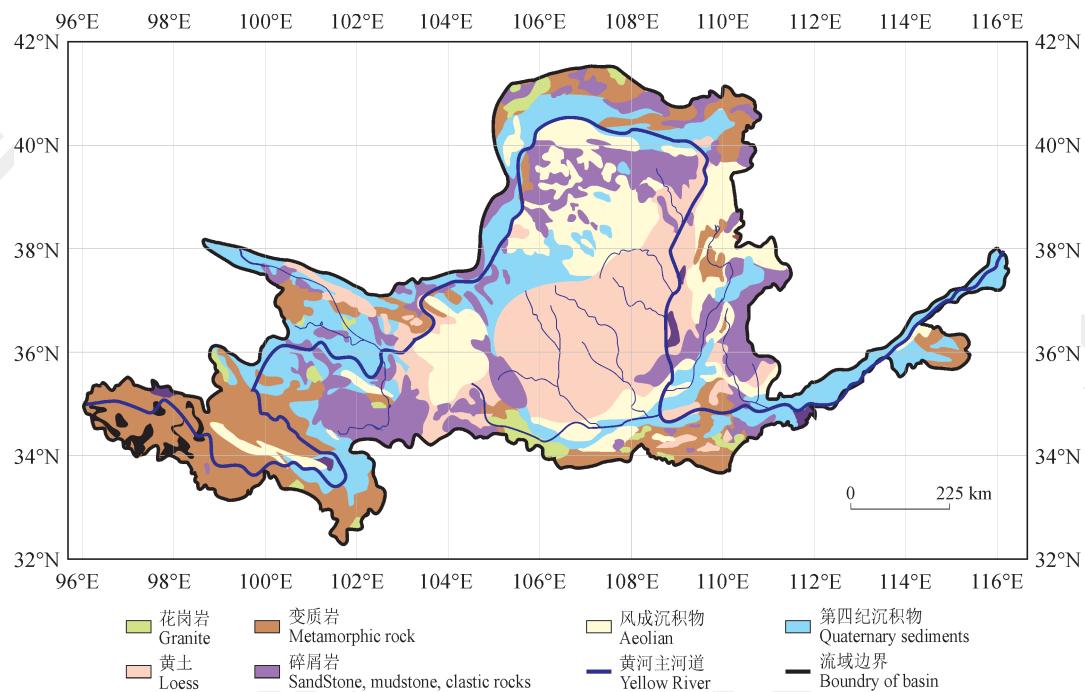


图 2 黄河流域岩石类型分布图（据 Pang et al (2018) 修改）  
Fig.2 Distribution pattern of rock types in the Yellow River Basin (modified from Pang et al (2018))

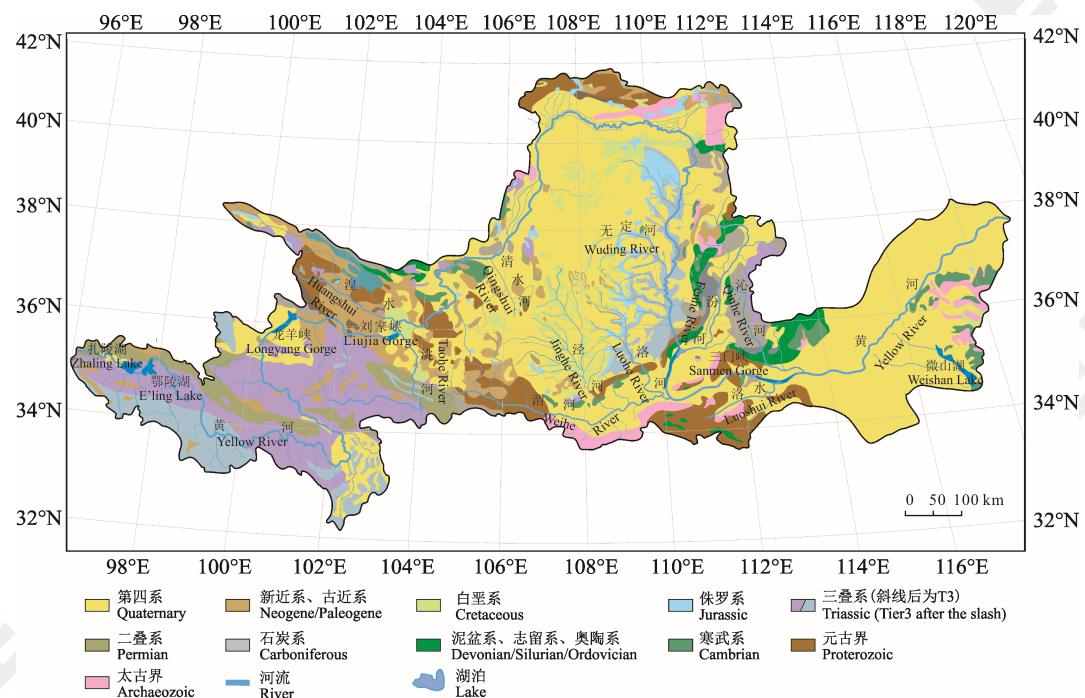


图 3 黄河流域基岩年代分布图（据水利部黄河水利委员会 (1989) 修改）  
Fig.3 Age distribution of bedrock in the Yellow River Basin  
(modified from Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources (1989))

### 3 结论和展望

基于石英ESR信号强度和石英结晶度物源示踪的原理及其在东亚地区现代风尘沉积物、日本海洋沉积物及中国黄土物源示踪上的成功应用,综合黄河河流沉积物的物质特征和黄河流域特征,认为可以将石英ESR法应用于黄河沉积物示踪研究中。与此同时,作为一种新的正在探讨中的河流示踪方法,也存在着一定的局限性和不足,具体表现在:

(1) 对河流样品采集有一定的要求,由于不同地质历史时期的石英具有不同的ESR信号值和CI值据此来分辨沉积物不同的物源区,黄河流域面积较为广泛,沉积物可能是异地搬运后沉积物的物质,为避免异地沉积物对实验结果的干扰,应采集不同流域内原地沉积下的沉积物。(2) 在已知河流不同流域石英ESR信号值后,有效区分后期沉积物以及分析寻找可能源区工作较复杂。(3) 石英ESR信号强度及结晶度在不同等级河流系统中的识别度是不一样的,因此,该方法适用于多大等级的河流沉积物示踪是未来工作需解决的问题。

### 参考文献

- 陈洪云. 2011. 沙漠表土和黄土高原风尘沉积中石英颗粒的ESR信号强度和结晶度指数研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院. [Chen H Y. 2011. ESR signal intensity and crystallinity of quartz in desert surface sediments and eolian deposits on the Chinese Loess Plateau [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences.]
- 陈明扬. 1991. 中国风尘堆积与全球干旱化 [J]. 第四纪研究, 11(4): 361–372. [Chen M Y. 1991. The evolution of Chinese aeolian deposits and global aridification [J]. Quaternary Sciences, 11(4): 361–372.]
- 高璐. 2011. 石英ESR信号特征研究 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所. [Gao L. 2011. Study on ESR signal characteristics of quartz [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration.]
- 何明跃, 王濮. 1994. 石英的结晶度指数及其标型意义 [J]. 矿物岩石, 14(3): 22–28. [He M Y, Wang P. 1994. The crystallinity of quartz and its typomorphic significance [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 14(3): 22–28.]
- 李长安, 殷鸿福, 俞立中, 等. 2000. 流域环境系统演化概念模型: 山-河-湖-海互动及对全球变化的敏感响应——以长江为例 [J]. 长江流域资源与环境, 9(3): 358–363. [Li C A, Yin H F, Yu L Z, et al. 2000. Concept model on the fluvial environmental system: mountain-river-lake-sea interaction and sensitive responding to global change [J]. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 9(3): 358–363.]
- 李长安. 2015. 基于“人-水-地和谐”的长江堤防功能 [J]. 地球科学, 40(2): 261–267. [Li C A. 2015. The relationship among human, water and land: optimizing function of the embankment in the Yangtze River [J]. Earth Science, 40(2): 261–267.]
- 林晓彤, 李巍然, 时振波. 2003. 黄河物源碎屑沉积物的重矿物特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 23(3): 17–21. [Lin X T, Li W R, Shi Z B. 2003. Characteristics of mineralogy in the clastic sediments from The Yellow River provenance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 23(3): 17–21.]
- 刘东生. 1985. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社. [Liu T S. 1985. Loess and environment [M]. Beijing: Science Press.]
- 刘志杰, 孙永军. 2007. 青藏高原隆升与黄河形成演化 [J]. 地理与地理信息科学, 23(1): 79–82, 91. [Liu Z J, Sun Y J. 2007. Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau and formation, evolution of the Yellow River [J]. Geography and Geo-Information Science, 23(1): 79–82, 91.]
- 水利部黄河水利委员会. 1989. 黄河流域地图集 [M]. 北京: 中国地图出版社. [Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. 1989. Huanghe River valley atlas [M]. Beijing: SinoMaps Press.]
- 汪品先. 2005. 新生代亚洲形变与海陆相互作用 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 30(1): 1–18. [Wang P X. 2005. Cenozoic deformation and history of sea-land interactions in Asia [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 30(1): 1–18.]
- 王河锦, 周健. 1988. 关于伊利石结晶度诸指数的评价 [J]. 岩石学报, 14(3): 128–138. [Wang H J, Zhou J. 1988. On the indices of Illite crystallinity [J]. Acta Petrologica Sinica, 14(3): 128–138.]
- 魏传义, 刘春茹, 李长安, 等. 2017. 石英ESR法在河流沉积物源示踪中的探讨及应用 [J]. 地球与环境, 45(2): 157–163. [Wei C Y, Liu C R, Li C A, et al. 2017. A study on ESR signal intensity and CI provenance-tracing of quartz and its potential application to river system sediments [J]. Earth and Environment, 45(2): 157–163.]
- 杨献忠. 1993. 伊利石的结晶度及其地质意义综述 [J]. 沉积学报, 11(4): 92–98. [Yang X Z. 1993. Illite crystallinity and its geological significances [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 11(4): 92–98.]
- 赵剑波, 陈洪云, 宋友桂, 等. 2012. 黄土中石英的含量与结晶

- 度指数的测定 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 32(5): 131–135.
- [Zhao J B, Chen H Y, Song Y G, et al. 2012. Determination of quartz content and crystallinity index from loess samples [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(5): 131–135.]
- Aléon J, Chaussidon M, Marty B, et al. 2002. Oxygen isotopes in single micrometer-sized quartz grains: tracing the source of Saharan dust over long-distance atmospheric transport [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(19): 3351–3365.
- An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times [J]. *Nature*, 411(6833): 62–66.
- An Z S. 2000. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate [J]. *Quaternary Science Reviews*, 19(1/2/3/4/5): 171–187.
- Basu A, Young S W, Suttner L J, et al. 1975. Re-evaluation of the use of undulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz for provenance interpretation [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 45(4): 873–882.
- Beerten K, Stesmans A. 2007. ESR dating of sedimentary quartz: Possibilities and limitations of the single-grain approach [J]. *Quaternary Geochronology*, 2(1/2/3/4): 373–380.
- Blackwell B A B, Montoya A, Blickstein J I B, et al. 2007. ESR analyses for teeth from the open-air site at Attirampakkam, India: Clues to complex U uptake and paleoenvironmental change [J]. *Radiation Measurements*, 42(6/7): 1243–1249.
- Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. 2005. Stepwise expansion of desert environment across northern China in the past 3.5 Ma and implications for monsoon evolution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(1/2): 45–55.
- Ding Z L, Rutter N W, Sun J M, et al. 2000. Re-arrangement of atmospheric circulation at about 2.6 Ma over northern China: evidence from grain size records of loess-palaeosol and red clay sequences [J]. *Quaternary Science Reviews*, 19(6): 547–558.
- Dobosz B, Krzyminiewski R. 2007. Characteristic of paramagnetic centres in burnt clay and pottery by the EPR method [J]. *Radiation Measurements*, 42(2): 213–219.
- Duval M, Grün R, Falguères C, et al. 2009. ESR dating of Lower Pleistocene fossil teeth: Limits of the single saturating exponential (SSE) function for the equivalent dose determination [J]. *Radiation Measurements*, 44(5/6): 477–482.
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 416(6877): 159–163.
- Jackson M L. 1981. Oxygen isotopic ratios in quartz as an indicator of provenance of dust [M]// Péwé T L. Desert dust: origin, characteristics, and effect on man. Geological Society of America Special Papers, volume 186. Geological Society of America. DOI: 10.1130/SPE186-p27.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [M]// Johnsson M J, Basu A. Processes controlling the composition of clastic sediments. Geological Society of America Special Papers, volume 284. Geological Society of America. DOI: 10.1130/SPE284-p21.
- Nagashima K, Tada R, Tani A, et al. 2007. Contribution of aeolian dust in Japan Sea sediments estimated from ESR signal intensity and crystallinity of quartz [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(2). DOI: 10.1029/2006GC001364.
- Odom A L, Rink W J. 1989. Natural accumulation of Schottky-Frenkel defects: Implications for a quartz geochronometer [J]. *Geology*, 17(1): 55–58.
- Ono Y, Naruse T, Ikeya M, et al. 1998. Origin and derived courses of eolian dust quartz deposited during marine isotope stage 2 in East Asia, suggested by ESR signal intensity [J]. *Global and Planetary Change*, 18(3/4): 129–135.
- Pang H L, Pan B T, Garzanti E, et al. 2018. Mineralogy and geochemistry of modern Yellow River sediments: Implications for weathering and provenance [J]. *Chemical Geology*, 488: 76–86.
- Rea D K, Janecek T R. 1981. Mass-accumulation rates of the non-authigenic inorganic crystalline (eolian) component of deep-sea sediments from the western Mid-Pacific Mountains, Deep Sea Drilling Project Site 463 [M]// Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 62: 653–659.
- Ribeiro R C, Kinoshita A, Figueiredo A M G, et al. 2013. Electron spin resonance dating of the Late Quaternary megafauna fossils from Baixa Grand, Brazil [J]. *Quaternary International*, 305: 91–96.
- Shimada A, Takada M, Toyoda S. 2016. Electron spin resonance

- signals of quartz in present-day river bed sediments and possible source rocks in the Kizu River basin, Western Japan [J]. *Geochronometria*, 43(1): 155–161.
- Smith M A, Pell S. 1997. Oxygen-isotope ratios in quartz as indicators of the provenance of archaeological ochres [J]. *Journal of Archaeological Science*, 24(9): 773–778.
- Sun J M, Zhang M Y, Liu T S. 2001. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960—1999: relations to source area and climate [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D10): 10325–10333.
- Sun J M. 2005. Nd and Sr isotopic variations in Chinese eolian deposits during the past 8 Ma: Implications for provenance change [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(2): 454–466.
- Sun Y B, Chen H Y, Tada R, et al. 2013. ESR signal intensity and crystallinity of quartz from Gobi and sandy deserts in East Asia and implication for tracing Asian dust provenance [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(8): 2615–2627.
- Sun Y B, Tada R, Chen J, et al. 2007. Distinguishing the sources of Asian dust based on electron spin resonance signal intensity and crystallinity of quartz [J]. *Atmospheric Environment*, 41(38): 8537–8548.
- Sun Y B, Tada R, Chen J, et al. 2008. Tracing the provenance of fine-grained dust deposited on the central Chinese Loess Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 35: L01804. DOI: 10.1029/2007GL031672.
- Temam R. 1984. Navier-stokes equations: theory and numerical analysis [M]. 3rd edition. Amsterdam: North-Holland Publishing Company.
- Toyoda S, Nagashima K, Yamamoto Y. 2016. ESR signals in quartz: applications to provenance research—a review [J]. *Quaternary International*, 397: 258–266.
- Toyoda S, Naruse T. 2002. Eolian dust from the Asian deserts to the Japanese islands since the last glacial maximum: the basis for the ESR method [J]. *Transaction, Japanese Geomorphological Union*, 23: 811–820.
- Wronkiewicz D J, Condie K C. 1987. Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source-area weathering and provenance [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(9): 2401–2416.
- Yin G M, Lin M, Lu Y C, et al. 2007. Preliminary ESR dating results on loess samples from the loess-paleosol sequence at Luochuan, Central Loess Plateau, China [J]. *Quaternary Geochronology*, 2(1/2/3/4): 381–385.