

沉浸式虚拟现实技术在地球科学中的应用

罗珽, 冷伟*

中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽合肥 230026

* 通讯作者. E-mail: wleng@ustc.edu.cn

摘要: 近年来,随着科学技术的发展,地球科学领域的各种测量和模拟数据呈爆炸式增长,对数据的可视化和实时分析也提出了新的挑战,传统的二维可视化方法已经不能充分满足地球科学的科研和教学需求.新一代沉浸式虚拟现实技术使观察者能够直观地观察和分析三维地球的科学数据,并与数据进行交互,实现沉浸式地实时分析或远程虚拟野外考察,这将帮助地球科学领域的研究人员更快更准确地理解三维地球科学数据.同时虚拟现实技术也能促进新的科学发现的产生,并能够帮助地球科学的成果在大众中的科普推广.目前已经有不少学者进行了相关的探索,并取得了一系列的重要成果.本文回顾了过去几十年沉浸式虚拟现实技术的基本原理和在地球科学领域的各种具体应用方式,讨论了该技术在地球科学领域的优势与前景,以及进一步拓展应用水平还需要解决的相关问题.

关键词: 沉浸式;虚拟现实;地球科学;数据可视化

中图分类号: P31 **文献标识码:** A

1 引言

地球科学的相关研究不断产生大量新的科学数据分析需求.首先,地球科学的研究领域十分广泛,不仅涉及地球整体系统的研究,广义上,还包括对太阳系中其他天体的相关研究,这些数据往往分布于三维空间,甚至是随时间演化的四维数据;其次,地球科学的研究方法也很多,包括了数学、物理、化学、生物、计算机等分析方法.数据来源的多种多样以及仪器设备和技术的快速发展,导致了数据量正呈指数级增长;最后,地球科学研究重视野外实地考察工作,很多野外考察点或是由于地处偏远很难到达,或是由于危险而无法到达,这使得实地分析数据变得十分困难^[1].所以,对大体量的复杂地球科学数据进行可视化十分重要,传统的二维显示方法要求研究者在大脑中一系列相关的二维图像数据转化为三维结构,这给地球科学的研究带来很大不便,也会影响研究结果的准确性,因此对三维数据体进行实时沉浸式分析是地球科学领域重要的研究方向^[2,3].

近年来,沉浸式虚拟现实技术(immersive virtual reality)快速发展,在军事、医学、工业和教育文化等领域的应用都得到了深入的研究并取得了一系列的

重要进展^[4].针对地球科学研究领域,沉浸式虚拟现实技术也提供了全新的可视化工具,为地球科学数据的可视化提供了更大的空间、更多的维度和更直观的体验,能够大幅提升地球科学家的科研效率和数据分析的准确性^[2].特别的,通过沉浸式虚拟现实技术能够实现虚拟地质考察.结合数据可视化重构技术,研究者不仅能在实验室中直接观察地球表面偏远危险区域的地形地貌,甚至可以针对月球和火星等天体的表面地质地貌进行身临其境般的科学考察和分析,这为地球科学实现新的科学发现提供了全新的研究手段^[5,6].

目前,沉浸式虚拟现实技术在地球科学研究领域已经得到了一定的应用^[3,7].本文首先介绍沉浸式虚拟现实技术的特点和地球科学研究的相关领域,然后对近些年该技术在地球科学各个领域的具体应用进行综合比较和分析,进而总结出沉浸式虚拟现实技术应用于地球科学领域的优势、目前尚存在的问题以及未来的发展方向.

2 沉浸式虚拟现实技术简介

沉浸式虚拟现实技术是指通过计算机模拟产生一个三维的虚拟世界,进而通过模拟视觉、听觉、触觉

Citation: 罗珽,冷伟. 沉浸式虚拟现实技术在地球科学中的应用. 中国科学技术大学学报, 2021, 51(6): 431-440.

LUO Ting, LENG Wei. The application of immersive virtual reality technology in geoscience. J. Univ. Sci. Tech. China, 2021, 51(6): 431-440.

等多方感官来使体验者达到仿佛身临其境的沉浸式体验效果^[4]. 沉浸式虚拟现实技术虽然被视为当前最热门的新兴技术之一,但实际上早在 1956 年,电影制作人 Heilig 就创造了一台名为 Sensorama 的虚拟现实系统,能够给观众提供视觉、听觉、嗅觉和触觉的同步刺激^[8]. 第一款支持运动追踪的头戴式显示器于 1961 年由 Cumeau 和 Bryan 合作开发,它可以实现通过头部运动来移动远程摄像机,使用户可以自然地观察远程摄像机的周边环境^[9]. Sutherland 在 1968 年研制出了第一款能与计算机进行交互的带跟踪定位功能的头戴式显示器,由于设备过于笨重,它需要悬挂在天花板上,也因此被命名为“达摩克利斯之剑”^[10]. 1985 年, VPL (Visual Programming Language) 公司在美国成立,这是最早的销售虚拟现实头盔的商业公司,它的创始人 Lanier 让“virtual reality”一词广为人知,并且成为这一研究领域的专业术语^[4]. 由于硬件成本高昂,且体验效果并不尽如人意,之后的几十年中虚拟现实技术虽然不断发展,但是一直没有被大众所广泛接受,应用范围也只限于航空航天、军事、工业等领域的特殊需求方向. 直到 2012 年之后, OculusRift、HTCVIVE、SonyPSVR 等一批面向个人消费者的虚拟现实设备相继问世,使得个人消费者也能够体验到高质量的虚拟现实产品^[11]. 这吸引了越来越多的商业公司进入到虚拟现实领域,推动了虚拟现实技术在医学、机器人、航空、教育、艺术、娱乐等领域的广泛应用,对虚拟现实技术在特定领域应用的相关研究也得到了快速发展.

Burdea 和 Coiffet 概括了虚拟现实技术的“3I”特征: immersive-interaction-imagination, 即沉浸-交互-想象^[12]. 为了能够实现“3I”特性,沉浸式虚拟现实系统主要有两种:头戴式显示器(head mounted display, HMD) (图 1(a)) 和洞穴式虚拟现实环境(cave automatic virtual environment, CAVE)^[13] (图 1(b)). HMD 设备是通过两块小的高清屏幕分别向人的双目投射画面来产生立体视觉,使用运动传感器来实时追踪用户的头部运动,然后经过高性能处理器根据当前的头部状态进行计算并实时更新渲染画面^[14]. 而 CAVE 系统是在一个房间大小的空间,用户戴上 3D 眼镜身处其中,投影仪向四周的墙壁投射 3D 影像,并且动作捕捉系统实时获取用户的位置和姿态,计算机根据用户当前的位置和姿态来更新 3D 影像^[15]. 在 CAVE 系统中用户只需要戴着普通的 3D 眼镜就能体验到沉浸式的效果,而 HMD 设备的头戴显示器虽然已经轻量化很多,但相比普通的 3D 眼镜,仍然不

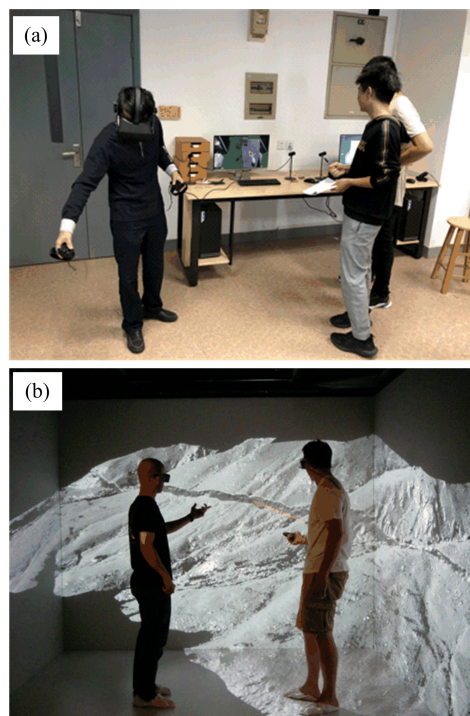


图 1 HMD 系统(a)与 CAVE 系统(b).

Figure 1. HMD system (a) and CAVE system (b).

便于长时间佩戴. 总体来说, HMD 设备相较于 CAVE 系统体量更小, 在沉浸式体验上效果更好, 成本更低, 配置方便, 使用起来对于消费者也更友好, 所以市场占有率较高, 是未来发展的主流方式.

3 沉浸式虚拟现实技术在地球科学中的应用

沉浸式虚拟现实技术能够打破时间和空间的限制, 为地球科学的研究提供更广泛的空间、更多的维度和更直观的体验, 地球科学家们已经针对该技术的具体应用方式开展了广泛的科研工作.

沉浸式虚拟现实技术对地球科学的应用主要存在于两个领域. 第一个应用领域是地质地貌的精细重建和虚拟地质考察. 野外实地考察工作对于地球科学家十分重要, 是认识地球系统演化的主要手段之一^[1,16]. 但是, 一方面, 很多野外考察点地处偏远很难到达, 比如沙漠、戈壁、南北极等区域; 或者由于危险几乎无法到达, 比如活火山、深海等区域. 另一方面, 行星科学的发展使得测量与重建其他行星的地表地质成为可能, 如火星等^[17]. 虚拟现实技术能够在虚拟空间精细重建通过各种观测方式得到的地表地质和演化过程, 使得地球科学家们能够对其进行沉浸式分析, 大大拓展了野外考察的地域范围和时间范围, 对于推动地球科学的进步具有重要意义.

第二个应用领域是海量数据的三维分析. 地球科学的数据类型多种多样, 如: 地形高程数据、卫星图像、二维场数据(如重力场、磁场、放射性、电阻率、化学成分、热流等)、三维的物质属性数据(如层析成像)、探地雷达数据、测井数据、点云数据等^[3]. 随着仪器设备和研究技术的发展, 展示三维空间随时间演化的数据量呈指数级增长, 对大体量的复杂数据进行可视化分析变得尤为重要. 目前常用的数据分析主要基于二维的计算机平面显示器, 方法包括等值面法、体积渲染法、切片法等^[2,3]. 这些可视化方法通常要求地球科学家从二维图像中获取信息, 在大脑中将这些信息转化成三维结构, 以此来分析和解释科学数据^[18]. 这样的过程需要优秀的空间思维能力和丰富的科研经验, 才能够在头脑中将很多相关联的二维图像数据合成三维的数据体, 否则容易忽略掉数据在三维空间的特征^[19]. 即使是经验丰富的地球科学家, 也需要花费很大一部分时间来解析这些复杂的多维度的地球科学数据, 对于初入地学科研领域的学生和爱好者来说更是十分困难. 因此, 使用沉浸式虚拟现实技术直观地观察、分析和解释三维地球科学数据具有广泛的应用前景, 对于准确理解数据蕴含的科学价值起到十分重要的作用.

3.1 地质地貌的精细重建和虚拟地质考察

典型的地学三维数据包括地表地质地形数据和地球内部结构数据等. 地表地质地形数据展示了地表的实际形态, 是地球科学数据的基本数据类型. 近年来随着科学技术的发展, 基于遥感和地基测量获取的随时间演化的地表特征数据大幅增加^[20,21], 传统的分析方法是地球科学家通过分析地质剖面、等值线图、伪3D图像等数据来研究地表的特征, 这些方法要求科学家有丰富的经验和良好的空间思维能力^[19]. 而通过虚拟现实技术结合地表数据, 科学家可以在3D虚拟现实系统中重构出准确的、具有科学意义的地质场景, 再结合特定的工具, 直观地观察和分析数据的特征.

目前已经有很多地球科学家采用沉浸式虚拟现实技术来观察分析地表数据. Kinsland 等使用3D虚拟现实系统对墨西哥尤卡坦半岛的 Chicxulub 撞击坑(图2)^[20-24]和美国路易斯安那州的 Vermilion 河口地形进行可视化^[25-27], 并进行沉浸式的观察与分析. 如果使用传统的剖面、等值线方法, 他们往往需要数周的时间来解释这些数据, 但是在虚拟现实环境中只需要几个小时就能漫游整个数据空间, 并且直观的3D观测也能够带来不同的灵感, 激发科学创新思维.

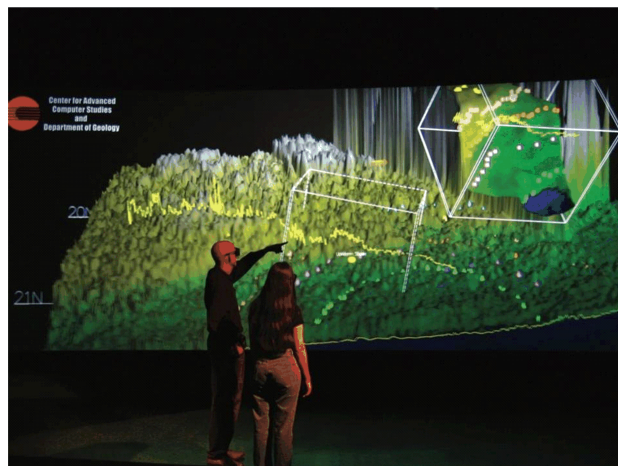


图2 Chicxulub 撞击坑结构在 LITE 设备上的显示^[19].

Figure 2. SRTM data from over the Chicxulub Impact Structure are displayed in the 170-seat 3D auditorium of the LITE(Louisiana Immersive Technologies Enterprise) facility^[19].

所以他们预测随着3D虚拟现实显示系统更加普及, 将会有更多的地球科学家利用3D虚拟现实技术来解释地质或地球物理数据^[19]. 2010年的Haiti地震是第一次震后有大规模LiDAR测量的大地震, 数据量高达67GB. Eric等在虚拟现实中对LiDAR数据进行可视化分析, 大大压缩了实地考察构建地图所需的时间, 能够针对地震灾害实行快速的科学响应^[16]. Wang等开发了一套虚拟现实可视化流程来研究、分析和展示地球物理学数据, 在虚拟现实中有更大的显示空间(图3), 而且可以将数据的相关信息显示在任意位置的平面上而对数据观察本身不造成干扰, 这说明虚拟现实系统具有很好的易用性, 可以帮助科研人员提高效率^[28].

近些年无人机技术不断成熟, 通过无人机按设定路线飞行, 获取一系列地表图像^[29,30], 然后使用Structure-from-Motion(SfM)算法将图像数据转化为地表高程数据, 正在被越来越多的科学家用来获取局部的地表数据(图4). 首先, 基于该方法重构的数字高程数据, Gerloni等在2018年发布了一个沉浸式虚拟现实平台ARGO3D^[11], 并根据数据构建虚拟现实场景, 搭建了虚拟地质观测点. 这种在实验室中重建的地质观测点, 可以拓展目标区域的时空限制, 使得科学家可以在方便的时间对任何区域进行虚拟实地研究. 其次, 地震灾害造成的地表断层对于灾害分析十分重要, 但是其可观测时间往往都很短暂. Trexler等将SfM方法应用于快速构建地表三维偏移特征^[31], 以2014年8月24日的South Napa 6.0级地震为例, 结合3D虚拟现实系统实现了对地震造成的

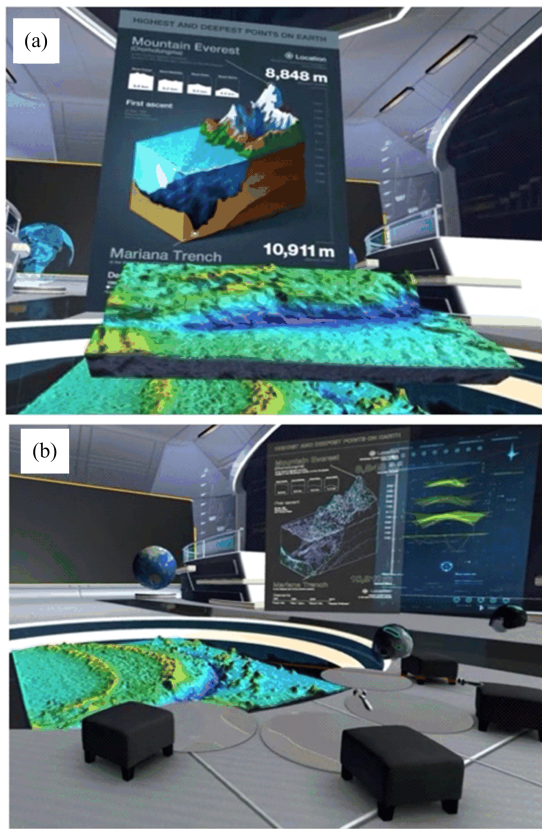


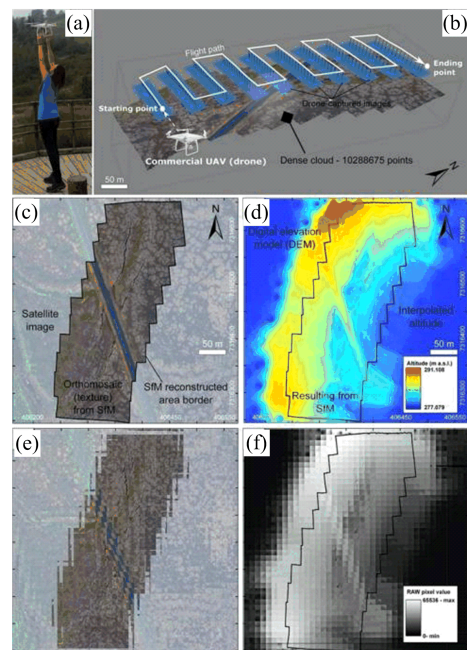
图 3 丰富的马里亚纳海沟数据信息显示^[28].

Figure 3. Rich display of data information of Mariana Trench^[28].

断层滑移进行精确且可重复的测量,有效避免了地震造成的地表断层的细节特征由于风化或修复作用而快速衰减的问题.最后,直接的野外露头观察和实地数据采集对活动火山的研究十分重要,然而活火山附近复杂的地质环境和危险的火山活动使得很多露头都很难到达,同时传统的卫星遥感和飞机测量都很昂贵,分辨率也很难达到要求,特别是对于火山周围垂直的悬崖地区. Tibaldi 等采用 SfM 算法,利用无人机获取的图像信息构建真实的三维 Digital Outcrop Models (DOMs) 数据,然后通过 3D 虚拟现实技术搭建火山地质场景,实现在虚拟场景中观测一些难以进行实地考察的地质露头,这项技术在火山的研究、教学和科普中发挥了十分重要的作用^[32]. Zhao 等结合卫星图像数据、地形 LiDAR 数据和 SfM 方法重构了冰岛 Thrihnukar 火山模型^[33]. Federico 等选取了冰岛的 25 个野外地质点,通过实景照片、无人机照片和三维建模技术进行可视化,打造了冰岛户外地质博物馆^[34]. 这项工作不仅具有很高的科学意义,而且能够促进地球科学的科普和推广,吸引更多的大众了解地球科学.

除了对地球表面区域的实地考察和分析,通过卫星获取的其他天体的数据,在沉浸式虚拟现实环境中同样可以实现对其他天体的虚拟地质考察. Head 等开发了 ADVISER (Advanced Visualization in Solar System Exploration and Research) 系统,进行天体数据的可视化.该系统使用卫星图像和高分辨率数字高程数据 (DTM) 重构了火星场景,通过 CAVE 系统运行 ADVISER,能够实现对火星表面的虚拟地质观测和分析^[17].

综上,通过卫星遥感、无人机等技术可以高效地获取地表地质地貌的特征数据,构建高质量的虚拟地质场景,之后通过沉浸式虚拟现实技术随时进行模拟现场的考察和分析工作.这种技术一方面大大降低了地质考察研究的成本和扩大了空间可及性,另一方面也使得非专业人员能够方便地观察与体验各种复杂地质工作的过程,激发大众对地球科学的兴趣,促进



(a) 无人机(大疆)用于数据采集;(b) 飞行路径的 3D 表示,无人机捕获的照片(带有位置和方向)和密集的点云数据(由 SfM 方法产生);(c) 黑色边界内是 SfM 算法处理得到的正交马赛克图,分辨率为 0.02 m/pixel,黑色边界外的区域来自高分辨率的卫星图像,分辨率为 50 cm/pixel;(d) 黑色边界内是 SfM 算法处理得到的 DEM 数据,分辨率为 0.02 m/pixel,黑色边界外的区域来自 IDW (inverse distance weighted) 差值。(e) 和 (f) 分别是分块的纹理贴图 and DEM 数据,可以导入 3D 图形引擎,分块贴图是 JPG 格式,DEM 被转化为灰度 16 位 RAW 格式.

图 4 ARGO3D VR 平台主要的 3D 重构和处理步骤^[1].

Figure 4. Main steps involved in 3D reconstruction and processing for the input of the ARGO3D VR platform^[1].

地球科学知识的普及^[35].

3.2 地球内部结构和演化数据的三维分析

地球内部的三维结构和演化是地球科学研究的重要领域. 三维的地球科学数据快速增加, 使得未来地球科学的研究需要更多地面向三维空间的联系、复杂的空间结构和多种尺度的演化过程, 而传统的二维平面分析方式不足以满足相关科研的需求. 沉浸式虚拟现实技术提供了直接观察三维数据的工具, 能够帮助地球科学家更好地分析和解释多个物理场相互叠加的复杂三维数据, 从而更准确地理解地球内部结构和演化特征.

对于深度较浅的地球内部区域能够通过测井等方法进行原位测量得到结构数据并进行分析, 如 Kinsland 等利用 3D 虚拟现实技术显示数字化的测井数据(图 5)^[36,37]. 在 3D 虚拟现实环境中, 他们可以将三维地表地形和测井数据同时显示, 观察者可以使用手持设备控制缩放, 穿透通过各个测井, 观察这些井在三维空间中可能存在的相互关系. 这种技术使得测井数据与地形之间、测井之间的关系能够被直观地观察和分析, 帮助科学家更快更准确地认识到这些特征之间的三维联系.

地球半径接近 6400 km, 对于更深部的结构, 科学家无法到达地球内部进行原位测量和观测, 而主要是通过地震、地电、地磁等数据反演出地下结构的物理属性, 并做进一步地分析和解释. 比如, 地球科学家通过地震数据来识别板块边界, 研究俯冲带的特征. 随着数据量的增大和认识的不断深入, 科学家们开始认识到俯冲板块的形态沿走向和深度都存在复杂的变化, 因此充分认识板块的三维形态是理解上覆板块变形和下部地幔对流模式的关键^[38-42]. Margarete 等通过 ShowEarthModel 揭示了全球俯冲带系统的三维结构模型^[43], 将俯冲带系统的解释研究工作从二维平面图像转移到了三维空间, 进而通过可交互的 3D

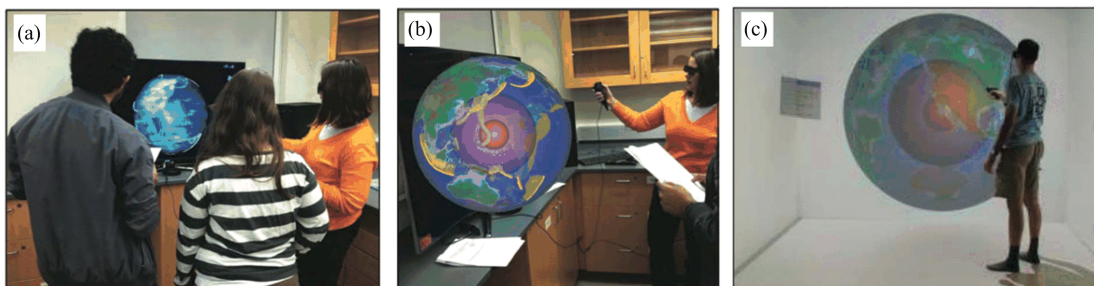
虚拟现实技术实现在地球内部数据点阵中的漫游和分析(图 6). 这大幅提升了对俯冲板块形态的认识, 比如俯冲板块的倾角随深度的变化、不同板块之间的交叉和堆叠、板块空洞等, 有效提高了科学家对地球内部结构的研究水平.



图 5 数字化测井数据从对应的井口位置悬挂着显示在路易斯安那州北部部分地区的 SRTM(Shuttle radar topography mission) 地图下^[19].

Figure 5. Digitized well logs are displayed hanging from their well-head locations under an SRTM(Shuttle radar topography mission) map of a portion of northern Louisiana^[19].

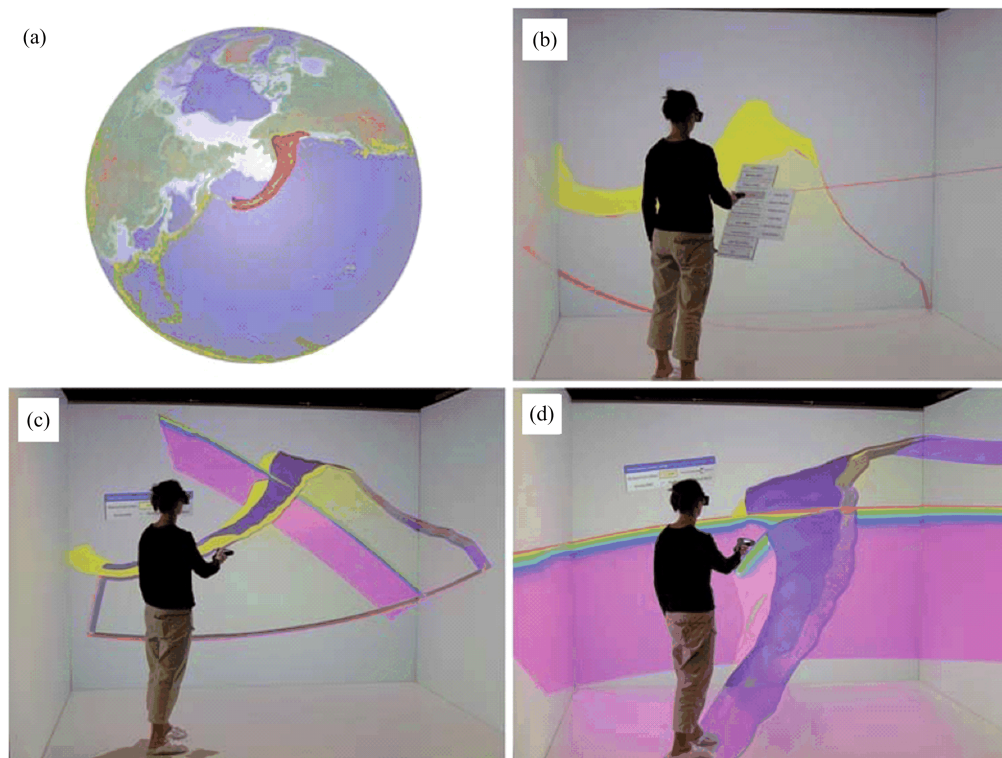
随着高性能计算机的发展, 借助超级计算机和并行算法, 科学家可以通过数值模拟的方法对地球内部的动力学过程进行三维定量的研究^[44,45], 但是大尺度三维数值模拟的数据量巨大, 为三维可视化带来了不小的挑战. Kellogg 等使用交互式可视化软件“Visualizer”, 在 KeckCAVES 系统中以沉浸式虚拟现实的形式对有限元模型中的温度场和黏度场进行分析(图 7). Wiedemann 等提出了一套渲染框架^[47], 利用多线程和数据解耦机制对三维数据进行实时渲染, 并通过高性能的虚拟现实显示设备(CAVE)对地表



(a) 和 (b) 使用的是低成本的 3D 虚拟现实系统(3D 电视机, Razor 游戏手柄和 Linux 工作站), (c) 使用的是 CAVE 系统.

图 6 在交互式 3D 虚拟现实系统中使用 ShowEarthModel 的例子^[43].

Figure 6. Examples of interactive 3D VR systems using ShowEarthModel^[43].



(a) 在透明球体内显示的全球地震分布. (b) 黄色表面是通过地震数据构造的贝尼奥夫带, 标志着俯冲板块的顶部. 3D 菜单和对话框是用于选择交互工具. (c) 在 CAVE 中叠加显示俯冲带有限元模型中的多个数据场. 观察者能够使用切片工具生成初始温度场(彩虹色)的任意切片. 使用等值面工具生成黏性等值面(紫色). (d) 在 CAVE 中能够很容易地对数据进行旋转和放大操作.

图 7 构建、查看和完善一个俯冲板块模型^[2,46].

Figure 7. Constructing, viewing, and refining a model of a slab (adapted from the work of JADAMEC and BILLEN)^[2,46].

以下数千公里深处的地幔对流进行三维虚拟现实可视化, 实现了在地球深部的快速复杂数据分析, 这为科学家们理解地幔对流特征和板块构造运动驱动力发挥了重要作用.

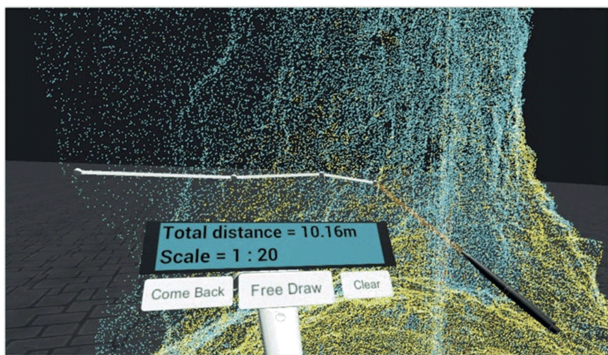
3.3 先进交互方式的引入

交互, 即输入和输出, 是虚拟现实系统的重要组成部分. 为了更好地实现沉浸式的体验和分析, 将先进的虚拟现实交互方式引入地球科学研究十分必要.

虚拟现实系统中的输入大致可以分为两类: 手动操作和自动捕捉操作^[12,48,49]. 手动操作是指通过键盘、鼠标、摇杆等通用设备和定制操控设备进行手动输入, 这一类输入方式目前比较成熟, 输入准确; 自动捕捉是指通过陀螺仪、加速度计、摄像头、麦克风等传感器对头部、手、眼睛、身体、声音、位置等信息进行自动捕捉, 并结合算法自动识别交互, 这一类输入方式更接近人类的自然习惯, 几乎不需要学习即可上手, 但是目前准确性还不够好^[50]. 虚拟现实系统的输出主要针对人类的视觉、听觉、嗅觉、触觉和味觉, 根据 Mazuryk 等的研究, 视觉和听觉分别占据了人类五感获取信息量的 70% 和 20%^[48], 所以目前常见的沉浸

式虚拟现实设备 HMD 和 CAVE 也以视觉和听觉输出为主, 而在地球科学中的应用更是以视觉为主.

针对不同的应用场景, 相应的交互方式也会有所区别. 在地球科学的研究中, 科学家往往关注的是在大范围地质场景中的穿梭, 以及对距离、倾角、走向、面积、体积等特性的测量. 按照操作对象的不同, 交互可以大致分为三类: 对观察者自身的操作, 对场景中物体(可视化数据等)的操作和对 3D 交互界面的操作. 对观察者自身的操作即观察者可以通过自己身体的自然移动(头部转动和走动等)对场景进行直观地探索, 这种交互方式目前的沉浸式虚拟现实设备大多都能提供. 在此基础上, 使用手柄等输入设备直接控制场景移动, 可以扩大观察者的观测范围. 对场景中物体的操作即观察者使用输入设备对场景中的物体进行操作, 常用的如移动、旋转、缩放等(图 7(d)), 也包括根据特定需要开发的交互功能, 比如对地质构造距离特征的测量(图 8)、使用切片工具或等值面工具对数据的操作(图 7(c))等等. 对 3D 交互界面的操作能极大地丰富虚拟现实系统的功能(图 7(b)), 观察者可以通过操作界面选取所显示的数据类型、探



距离信息和比例尺显示在左控制器的迷你面板上。按“Clear”按钮,点和线段将被删除,重置总距离值。用户可以点击“Free Draw”按钮,切换到其他距离测量模式(Level Draw 或 Curve Draw)。

图 8 使用 Free draw 模式绘制点和线段进行距离测量或勾勒地质特征的过程^[33]。

Figure 8. The process of using the Free Draw option to draw points and line segments for distance measurement or outlining geologic features^[33].

索模式、测量工具等,此外,3D 交互界面还可以作为显示屏用来显示各种辅助资料信息等。

目前,虚拟现实系统的交互方式还都比较初级,但是相比传统的 2D 显示方法,沉浸式虚拟现实交互分析在地球科学中已经体现出强大的空间显示和分析能力,能够帮助科学家更加有效地与地球科学数据进行交互,并且运用相应的工具进行定性和定量的分析。

4 讨论与结论

4.1 虚拟现实技术在地学领域的积极作用

①沉浸式虚拟现实技术应用于虚拟地质考察能够打破时间、空间对实地野外考察的限制。在沉浸式虚拟现实系统中可以对精细构建的三维地质地貌进行随时和反复观测。对于活火山口、海底洋中脊、月球、火星这样难以到达的高风险区域,也都可以通过沉浸式虚拟现实技术进行虚拟实地考察,具有节省成本和提高安全性等一系列优势。

②三维的地球科学数据在虚拟现实环境中能够被直观地可视化,地球科学家可以穿梭于数据之中,深入地观察三维的结构特征,避免了传统方法中 2D 图像到 3D 结构的转化过程,大大提升了信息获取的效率,从而帮助科学家更加高效准确地分析和解释地球科学数据。

③在虚拟现实环境中能够直接操作三维数据,这样的交互方式更贴近人们的自然感官,相比传统的专

业性强的工具更易上手,也更能发挥观察者的主观能动性,提升创新能力。

④虚拟现实技术不仅对地球科学的科研工作有很大帮助,也能够帮助刚进入地球科学专业的学生和大众直观地理解地球科学数据,激发普通群众了解地球科学的兴趣,助力地球科学的教育和科普工作。

4.2 需要解决的问题

(I) 目前主流消费级虚拟现实头盔,如 Oculus-Rift 和 HTC VIVE 等,在首次使用时都需要完成手柄配对、定位器校准、虚拟边界设定等一系列配置,相较于传统桌面显示器的即插即用,这往往会让很多科学家觉得烦琐,从而阻碍他们使用。

(II) 虽然现在虚拟现实设备的显示质量大幅提升,但是眩晕的问题依旧存在,尤其是对部分敏感人群,这关乎虚拟现实设备用户使用时长的问题,需要从软件和硬件两个方面共同推进解决。

(III) 目前的虚拟现实系统还需要更友好更方便的交互方式。目前在虚拟现实系统中能够供地球科学家使用的工具并不多,需要开发更多合适的工具。这一方面可以提高用户在虚拟现实环境中的使用效率,另一方面也能够吸引更多的人来使用虚拟现实系统。

(IV) 传统的平面媒体是学术成果发表的主要平台,随着沉浸式虚拟现实技术的不断普及,学术期刊等媒介也要顺应趋势,结合自身特点作出改进。首先可以采用传统的桌面显示器或移动端显示设备(手机、平板等)开发出可交互式的 3D 可视化内容,培养科研工作者使用虚拟现实系统的习惯,并逐步形成虚拟现实内容的制作流程,推动沉浸式虚拟现实技术在学术成果传播领域中的应用。

(V) 地球科学研究的数据量十分巨大,如何对海量数据进行实时可视化,对于虚拟现实系统的渲染架构是很大的挑战。

(VI) 大多数地球科学的科研工作需要多人协作才能完成,如何让多人在虚拟现实环境中进行实时高效地沟通协作也是虚拟现实技术必须要解决的问题。

4.3 结论和展望

本文总结了近年来沉浸式虚拟现实技术在地球科学领域的具体应用并讨论了其优势和存在的问题。在地质地貌的精细重建和虚拟地质考察领域,沉浸式虚拟现实技术让地球科学家们能沉浸式地分析地表地质和演化过程,不仅大大降低了野外考察的成本和危险性,而且拓展了野外考察的地域范围和时间范围。在地球内部结构和演化数据的三维分析领域,地

球科学家们使用沉浸式虚拟现实技术能够直接观察、分析和解释复杂的三维数据,从而更准确地理解地球内部结构和演化特征.除了在科研领域发挥的重要作用之外,沉浸式虚拟现实技术还能够推动地球科学的教育和科普工作,帮助普通群众了解地球科学知识.但是,沉浸式虚拟现实技术目前还存在硬件成本较高、使用过程较烦琐、软件工具不完善等问题,需要不断地提升软件和硬件的水平,以此提供更好的沉浸式体验和交互方式,这样才能推动沉浸式虚拟现实技术更好地应用于地球科学领域.

虚拟现实技术被认为将会成为未来主流的显示技术,广泛地应用到各个领域.沉浸式虚拟现实技术未来的发展方向首先是需要通过硬件和软件的提升来增强沉浸式的体验效果、提高系统的可交互性以及易用性,以此来吸引更多的用户;其次是通过互联网的连接来突破空间的限制,实现在虚拟现实环境中开展学术交流、举办学术会议等活动,这样能够促进科研成果的广泛交流;最后,对于地球科学的研究者来说,还需要开发出更多在虚拟现实场景中使用的地球科学研究工具,以此来推动地球科学的研究工作.随着低成本高质量的虚拟现实设备不断问世,虚拟现实技术的沉浸式体验和可交互性必将吸引越来越多的地球科学家使用其进行科研和教学工作,使得沉浸式虚拟现实技术在地球科学领域发挥越来越重要的作用.

致谢

本文工作得到国家自然科学基金(41688103, 41820104004, 41774105)资助.

利益冲突

作者声明本文没有利益冲突.

作者信息

罗琰,博士研究生,现就读于中国科学技术大学,导师是冷伟教授.研究方向为地球动力学,虚拟现实,地球科学数据可视化.

冷伟(通讯作者),中国科学技术大学教授.2010年在美国科罗拉多大学博得分校获地球物理博士学位,之后在加州理工学院从事博士后研究工作.2012年入选海外高层次人才引进青年项目,就职于中国科学技术大学,2014年获国家自然科学基金优秀青年科学基金资助.长期从事地球动力学和地球内部物理的研究工作,已在 Nature Geoscience, Earth and Planetary Science Letters, Journal of Geophysical Research 等国

际著名期刊上发表论文 30 多篇.

参考文献

- [1] Gerloni I G, Carchiolo V, Vitello F R, et al. Immersive virtual reality for earth sciences. In: 2018 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS). IEEE, 2018: 527-534.
- [2] Kellogg L H, Bawden G W, Bernardin T, et al. Interactive visualization to advance earthquake simulation. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165(3): 621-633.
- [3] Sherman W R, Kinsland G L, Borst C W, et al. Immersive visualization for the geological sciences. In: Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.
- [4] Zhao Q. A survey on virtual reality. Science in China Series F: Information Sciences, 2009, 52(3): 348-400.
- [5] Patterson C, Ortiz D, Hall E M, et al. Folding LiDAR and scientific data into virtual reality: Creating a planetary cave exploration utility for future missions to Mars. AGU Fall Meeting Abstracts, 2020: P055-0002.
- [6] Tullo A, Mancini F, Ori G. Virtual reality at regional scale: Exploring terrestrial bodies in immersive 3D environments. In: AGU 2021 Fall Meeting, New Orleans, LA. Washington DC: American Geophysical Union, 2021.
- [7] Hyde D A B, Hall T R, Caers J. VRGE: An immersive visualization application for the geosciences. In: 2018 IEEE Scientific Visualization Conference (SciVis). IEEE, 2018: 1-5.
- [8] Heilig M L. Sensorama Simulator. US Patent 3050870, 1962.
- [9] Comeau C. Headsight television system provides remote surveillance. Electronics, 1961: 86-90.
- [10] Sutherland I. The ultimate display. Proceedings of IFIP Congress, 1965: 506-508.
- [11] DeVito N, Ngalamou L. VR implementation in user-interactive simulation environments. In: 2021 IEEE 7th International Conference on Virtual Reality (ICVR). IEEE, 2021: 172-179.
- [12] Burdea G C, Coiffet P. Virtual Reality Technology. Hoboken, NJ: Wiley, 2003.
- [13] Cruz-Neira C, Sandin D J, DeFanti T A, et al. The CAVE: Audio visual experience automatic virtual environment. Communications of the ACM, 1992, 35(6): 64-73.
- [14] Shibata T. Head mounted display. Displays, 2002, 23: 57-64.
- [15] Cruz-Neira C, Sandin D J, DeFanti T A. Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the CAVE. In: Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: Association for Computing Machinery, 1993: 135-142.
- [16] Cowgill E, Bernardin T S, Oskin M E, et al. Interactive terrain visualization enables virtual field work during rapid

- scientific response to the 2010 Haiti earthquake. *Geosphere*, 2012, 8(4): 787–804.
- [17] Head J W III, van Dam A, Fulcomer S G, et al. ADVISER: Immersive scientific visualization applied to Mars research and exploration. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2005, 71(10): 1219–1225.
- [18] Bagher M M, Sajjadi P, Carr J, et al. Fostering penetrative thinking in geosciences through immersive experiences: A case study in visualizing earthquake locations in 3D. In: 2020 6th International Conference of the Immersive Learning Research Network (iLRN). IEEE, 2020: 132–139.
- [19] Kinsland G L, Borst C W. Visualization and interpretation of geologic data in 3D virtual reality. *Interpretation*, 2015, 3(3): SX13–SX20.
- [20] Whitmeyer S J, Nicoletti J, De Paor D G. The digital revolution in geologic mapping. *GSA Today*, 2010, 20(4/5): 4–10.
- [21] Pavlis T L, Mason K A. The new world of 3D geologic mapping. *GSA Today*, 2017, 27(9): 4–10.
- [22] Borst C W, Kinsland G L. Visualization and interpretation of 3D geological and geophysical data in heterogeneous virtual reality displays: Examples from the Chicxulub Impact Crater. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 2005, 55: 23–34.
- [23] Borst C W, Kinsland G L, Baiyya V B, et al. System for interpretation of 3-D data in virtual-reality displays and refined interpretations of geophysical and topographic data from the Chicxulub Impact Crater. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 2006, 56: 87–100.
- [24] Kinsland G L, Borst C W, Indugula A P, et al. 3-D virtual reality database of the Chicxulub Impact Structure and new interpretations within. In: 38th Lunar and Planetary Science Conference, March 12 – 16, 2007, League City, Texas. Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 2007.
- [25] Kinsland G L, Borst C W, Best C M, et al. Geomorphology and Holocene fluvial depositional history in the Mississippi River Valley near Lafayette, Louisiana: Interpretations of LIDAR data performed in 3D virtual reality. In: 2007 GCAGS 57th Annual Convention, Corpus Christi, Texas. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, 2007.
- [26] Kinsland G L, Borst C W, Tiesel J P, et al. Interpretation and mapping in 3D virtual reality of Pleistocene Red River distributaries on the surface of the Prairie complex near Lafayette, Louisiana. In: 2008 GCAGS 58th Annual Meeting, Houston, Texas. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, 2008.
- [27] Kinsland G L, Borst C W, Tiesel J P, et al. Cross-cutting relationships of features on the Pleistocene Prairie Complex near Lafayette, Louisiana: Imaged with LIDAR data and interpreted in 3D virtual reality. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 2009, 59: 413–424.
- [28] Wang X, Guo C, Yuen D A, et al. GeoVRReality: A computational interactive virtual reality visualization framework and workflow for geophysical research. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2020, 298: 106312.
- [29] Snavely N, Seitz S M, Szeliski R. Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 835–846.
- [30] James M R, Robson S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2012, 117(F03017).
- [31] Trexler C C, Morelan A E, Oskin M E, et al. Surface slip from the 2014 South Napa earthquake measured with structure from motion and 3-D virtual reality. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(12): 5985–5991.
- [32] Tibaldi A, Bonali F L, Vitello F, et al. Real world-based immersive Virtual Reality for research, teaching and communication in volcanology. *Bulletin of Volcanology*, 2020, 82(5): 38.
- [33] Zhao J, Wallgrün J O, LaFemina P C, et al. Harnessing the power of immersive virtual reality-visualization and analysis of 3D earth science data sets. *Geo-spatial Information Science*, 2019, 22(4): 237–250.
- [34] Mariotto F P, Bonali F L, Venturini C. Iceland, an open-air museum for geoheritage and Earth science communication purposes. *Resources*, 2020, 9(2): 14.
- [35] Rossa P, Horota R K, Junior A M, et al. MOSIS: Immersive virtual field environments for earth sciences. In: 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2019: 1140–1141.
- [36] Kinsland G L, Borst C W, Tiesel J P, et al. Imaging digital well logs in 3D virtual reality: Investigation of northern Louisiana Wilcox fluvial/coal strata for coalbed natural gas. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 2008, 58: 517–524.
- [37] Kinsland G L, Borst C. Visualization of petroleum well-logs from northern Louisiana in 3D immersive virtual reality. In: AAPG Hedberg Conference, Interpretation Visualization in the Petroleum Industry, Houston, Texas, June 1–4, 2014. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, 2014.
- [38] Fischer K M, Parmentier E M, Stine A R, et al. Modeling anisotropy and plate-driven flow in the Tonga subduction zone back arc. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105(B7): 16181–16191.
- [39] Billen M I, Gurnis M, Simons M. Multiscale dynamics of the Tonga-Kermadec subduction zone. *Geophysical Journal International*, 2003, 153(2): 359–388.
- [40] Tassara A, Götz H J, Schmidt S, et al. Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B9): B09404.
- [41] Miller M S, Kennett B L N. Evolution of mantle structure beneath the northwest Pacific: Evidence from seismic tomography and paleogeographic reconstructions.

- Tectonics, 2006, 25(4): TC4002.
- [42] Miller M S, Gorbatov A, Kennett B L N. Three-dimensional visualization of a near-vertical slab tear beneath the southern Mariana arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(6): Q06012.
- [43] Jadamec M A, Kreylos O, Chang B, et al. A visual survey of global slab geometries with ShowEarthModel and implications for a three-dimensional subduction paradigm. *Earth and Space Science*, 2018, 5(6): 240–257.
- [44] Tackley P J. Mantle convection and plate tectonics: Toward an integrated physical and chemical theory. *Science*, 2000, 288(5473): 2002–2007.
- [45] McNamara A K, Zhong S. Thermochemical structures beneath Africa and the Pacific Ocean. *Nature*, 2005, 437(7062): 1136–1139.
- [46] Jadamec M A, Billen M I. Influence of slab geometry on diffuse plate boundary deformation: 3D numerical models of the plate boundary corner in southern Alaska. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2006: T23B-0491.
- [47] Wiedemann M, Schuberth B S A, Colli L, et al. Visualising large-scale geodynamic simulations: How to dive into Earth's mantle with virtual reality. In: 22nd EGU General Assembly Conference Abstracts. Munich Germany: European Geosciences Union, 2020: 5714.
- [48] Mazuryk T, Gervautz M. Virtual reality: History, applications, technology and future. Vienna, Austria: Vienna University of Technology, 1996.
- [49] Mihelj M, Novak D, Beguš S. Virtual Reality Technology and Applications. Berlin: Springer, 2014.
- [50] Zhang H. Head-mounted display-based intuitive virtual reality training system for the mining industry. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(4): 717–722.

The application of immersive virtual reality technology in geoscience

LUO Ting, LENG Wei *

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

* Corresponding author. E-mail: wleng@ustc.edu.cn

Abstract: In recent years, with the development of science and technology, a large amount of measurement and simulation data in the field of geoscience has emerged, posing challenges to data visualization and real-time analysis. Traditional two-dimensional visualization methods can no longer fully meet the scientific research and teaching needs of geoscience. The new generation of immersive virtual reality technology enables observers to intuitively observe and analyze the scientific data of the three-dimensional earth, and interact with the data to achieve immersive real-time analysis or remote virtual field surveys. This will help researchers in the field of geoscience to understand the three-dimensional geoscience data more quickly and accurately; promote the generation of new scientific discoveries; and help popularize the results of geoscience among the general public. At present, many scholars have carried out related explorations and achieved a series of important results. This article reviews the basic principles of immersive virtual reality technology and various specific applications in the field of geoscience in the past few decades, discusses the advantages and prospects of this technology in the field of geoscience, and the related issues that need to be resolved to further expand the application level.

Keywords: immersive; virtual reality; geoscience; data visualization