doi:10.3969/j.issn.1674-1803.2019.11.01
文章编号:1674-1803(2019)11-0001-06

编者按:中国经济进入新常态,传统的地勘业务逐渐萎缩,随着党的十九大明确把生态文明建设纳入新时代中国特色社会主义建设的“五位一体”总体布局和“四个全面”战略布局,国民经济和社会发展对地勘工作和地勘行业改革发展提出了新要求,地勘单位纷纷开展了大地质、大市场、地质+等的探索。面对新时代新的挑战,煤炭地质行业如何通过创新驱动,优化供给侧,提供更多更好的满足国民经济发展和社会需求的新技术、新产品?为了答好这份时代问卷,中国煤炭地质总局审时度势提出“三个地球”(“透明地球”“美丽地球”和“数字地球”)建设的发展理念和战略愿景,融入“三个地球”建设对扩大煤炭地质勘查工作范围意义深远。但“三个地球”的内涵是什么?煤炭地质单位如何投身“三个地球”建设?重点发展方向是什么?……,为此《中国煤炭地质》编辑部特约这一专题稿件展开论述,供大家参考。

煤炭地质“三个地球”的理论技术探讨与展望

赵 平
(中国煤炭地质总局,北京 100038)

摘 要:目前地勘行业正处于转型升级的关键时期,绿色发展和生态文明建设对地质勘查工作提出了新的要求,中国煤炭地质总局适时提出了建设“三个地球”的理念及愿景,在诠释“透明地球”“数字地球”和“美丽地球”的基础上,指出“三个地球”的内涵和相互关系,并从地球系统科学、大数据、人工智能和人地关系等角度探讨了地勘领域“三个地球”的技术体系与发展方向。“三个地球”的理念在新时代背景下对地勘行业转型升级具有重要的战略意义,在地勘领域构建“三个地球”,可以促进传统地质学向地球系统科学转变;促进传统地勘工作向协调人地关系转变;促进地质勘探向人工智能转变;以此促进地球系统的透明、数字与美丽。

关键词:“透明地球”;“数字地球”;“美丽地球”;“三个地球”
中图分类号:P621 **文献标识码**:A

“Triple Earth” Theory in Coal Geology: Discussion and Prospect

Zhao Ping
(China National Administration of Coal Geology, Beijing 100038)

Abstract: At present, the geological exploration industry is just in the critical period of transformation and upgrade. New requirements from the green development and ecological civilization construction on geological exploration have been put forward. The China National Administration of Coal Geology has put forward to construct “triple earth” idea and vision at the right moment. On the basis of “transparent earth”, “digital earth” and “beautiful earth” annotations have pointed out their correlativity and “triple earth” connotation. From earth system science, big data, artificial intelligence and man-land relationship points of view have discussed geological exploration domain “triple earth” technological system and development orientation. The “triple earth” idea under the background of the new era has fundamental significance in geological exploration industry transformation and upgrade. The “triple earth” construction in geological exploration domain can promote traditional geology transform to earth system science; traditional geological exploration transform to coordination of man-land relationship; geological exploration transform to artificial intelligence; finally can promote earth system transparent, digital and beautiful.

Keywords: “transparent earth”; “digital earth”; “beautiful earth”; “triple earth”

0 引言

地质勘查在国民经济建设和社会发展中起着重要作用。党的十九大提出了“一带一路”建设、京津冀协同发展和长江经济带发展三大战略、推进“雄

作者简介:赵平(1962—),男,中共党员,工商管理硕士,工学博士,教授级高级工程师,现为中国煤炭地质总局党委书记,局长。

收稿日期:2019-11-10
责任编辑:孙常长

安新区建设”和“粤港澳大湾区建设”等,其基础设施建设对大宗矿产资源潜在需求巨大;以航空装备、卫星及应用、轨道交通装备、海洋工程装备、智能制造装备等为主的高端装备,对我国的战略性新兴矿产保障提出了更高要求[1]。十九大把生态文明建设纳入新时代中国特色社会主义建设的“五位一体”总体布局,打造美丽中国,为绿色发展和生态文明建设提供基础支撑和全方位服务,对于清洁能源和绿色勘探提出了新的要求。基于国内地勘行业正处于转型升级的关键时期,中国煤炭地质总局适时提出了建设“透明地球”“数字地球”和“美丽地球”的理念(简称“三个地球”),本研究从地球系统科学、大数据和人地关系等角度来探讨“三个地球”,为“三个地球”的提供理论和技术支撑。

1 “三个地球”理论和技术研究进展

1.1 理论技术亟待完善的“透明地球”

地球是一个不透明的球体。而法国作家儒勒·凡尔纳在他1864年出版的科幻小说《地心游记》中从艺术的角度给读者呈现出一个透明的地下世界。与其不同,崇尚科学的的地质学家们则致力于在理论和实践上将地球透明化。

1.1.1 理论基础与实践成果

①理论成果。国外科学家如南斯拉夫地震学家莫霍洛维奇、德国科学古登堡相继发现了地壳与地幔分界面(莫霍面)与地幔与地核分界面(古登堡面),魏格纳提出了大陆漂移说,其后发展为海底扩张说和板块构造说;在国内李四光等其他地质学家也提出了地质力学说、多旋回构造学说、地洼说、断块构造说等,丰富了地质理论成果。

②深地探测成果。国内外的钻探计划在为“地球透明化”做出不懈努力,前苏联在科拉半岛历时15a完成了12 262m超深钻,由我国吉林大学自主研制的“地壳一号”也完成了7 018m的钻探。

1.1.2 技术方向

尽管如此,但是距离“地球透明化”还有巨大的差距。为此1999年澳大利亚Carr博士第一次提出了“玻璃地球”的概念,其他国家也纷纷做出响应。如加拿大的岩石圈探测计划、美国的“地球透镜”计划、瑞士与意大利的地壳探测计划、德国的大陆反射地震计划、俄罗斯的深度地壳探测计划、以及中国的深部探测计划等[2]。

世界各国的“透明地球”建设大都以三维地质填图和深部探测计划相结合的方式[3]。

(1)国外。澳大利亚的“玻璃地球”计划主要采用新一代探测技术,提高对风化层及下伏基岩中地质过程的认识[4];加拿大的岩石圈探测计划所采用的技术有地震反射测量、地震折射测量、重力和磁法测量、大地电磁测量、地球化学等[5];美国“地球透镜计划”主要采用深部钻探技术、反射地震技术、全球定位系统、激光应变计、加速度计和大地测量成像观测以及干涉雷达卫星技术。

(2)国内。我国的“深部探测计划”采用了多种技术集成的方案,具体包括①地球物理探测技术:“深地震反射剖面法”“宽角反射与折射地震剖面法”“宽频带数字地震移动台站法”和“大地电磁测深法”等探测技术,以及大尺度地幔成像技术;②地球化学分析技术:等离子体质谱仪(ICP-MS)、等离子体光学发射光谱仪(ICP-OES)和X射线荧光光谱仪(XRF)等,配合其他专用分析仪器及技术而组成的技术体系[6];③深部钻探技术;④数据集成和管理技术。

利用信息技术建立透明地球,使地质过程可视化,将为地质勘探带来巨大变革。刘树臣指出,玻璃地球计划的基础是技术开发 ,关键是技术的融合 ,核心是信息技术。吴冲龙也认为:“玻璃地球”建设的核心技术是信息技术,其中包括能满足大数据一体化储存与管理的三维地质信息系统技术,能实现地质结构和地质过程快速、动态、精细和全息构建的三维地质建模技术,能支持地质时空大数据分析与挖掘的三维地质信息处理技术等[3-4]。采用可视化的方式进行三维建模,能让地质学家直观地感知和理解地质体、地质现象和地质过程,更有助于发现大型隐伏矿床,也将揭示地质灾害孕育机理[6-7]。

综上,国内外从地球物理、地球化学、钻探、地质建模、数据管理等不同角度推动“透明地球”的研究和应用。在大数据时代,数据的可视化、数据挖掘将进一步推进“透明地球”建设。然而,也有专家指出“玻璃地球”概念虽然成为目前的研究重点,但相关理论与方法仍需不断探索。

1.2 大数据造就新一代“数字地球”

“数字地球” 是地球观测、地理信息系统、全球定位系统、通信网络、传感器网、电磁标识符、虚拟现实、网格计算等技术的集成(数字地球北京宣言,2009),本质是建立一个以空间位置为主线, 将信息组织起来的复杂系统。从1998年美国副总统戈尔第一次提出“数字地球”的概念到现在已经20a,其后“数字城市”“数字社区”“数字矿山”“数字油田”等各种概念不断涌现。

在数字地球这样一个复杂的巨系统里,集成了

海量的对地观测数据、导航数据、监测站点数据、轨迹数据、地球物理、地球化学、钻探数据,还包括传感网数据,甚至于包括含有空间信息的文本、视频、经济数据,这些数据具有海量、多源、多尺度、多时相、多维、异构、非结构化、非平稳和非线性等特点。

随着大数据、物联网、云计算、人工智能等信息技术的不断发展,带动数字地球的不断革新。新一代数字地球是利用海量、多分辨率、多时相、多类型对地观测数据和社会经济数据,采用相应分析算法和模型构建的虚拟地球。2012 年,美国《国家科学院院刊》发表了由 Goodchild 和郭华东等撰写的题为《新一代数字地球》的文章。该文提出了大数据时代数字地球面临的挑战与机遇,赋予了数字地球新的理解和诠释,标志着大数据开启了新一代数字地球的序幕[8]。

1.3　“人类世”和绿色发展观催生“美丽地球”

18 世纪末,瓦特改良了蒸汽机,人类进入了工业文明时期,人类对地球的改造达到前所未有的强度,全球只有不到 1/4 的土地未受人类影响,人类改变了森林、河流、土壤和大气,甚至于人类已经成为了影响地质发展的主导因素。人类在地球上留下了不可磨灭的印记,正在地质记录中创建一个独特的标志层,使其成为 45 亿 a 地质发展史中地质记录的一部分。荷兰诺贝尔化学奖获得者保罗·克鲁岑因此在 2000 年提出“人类世”的概念,他认为,由于人类对全球环境的巨大影响,地球已经告别了全新世,已经进入“人类世”。

2019 年 5 月,“人类世工作组”宣告地球已进入新地质时代——“人类世”,正式确认了人类发展对地球产生的深远影响。

20 世纪上半叶,在“凯恩斯主义”影响之下,强调以经济增长为中心的西方各国,大肆破坏地球自然环境、狂热推进经济快速发展,不但造成自然能源的浪费,还直接导致了日益严重的环境污染和生态问题。

严重的环境污染事件和生态危机,迫使人们反思一味强调社会高速发展的旧发展观。1987 年,世界环境与发展委员会发布《我们共同的未来》报告,提出了世界发展的新思路即可持续发展。1992 年 6 月,联合国在里约热内卢召开环境与发展大会,提出了人类社会发展的新战略:可持续的发展战略,批判和否定了西方近现代化进程中形成的“高生产、高消费、高污染”的传统发展模式[9]。

同年,中国发布《中国 21 世纪议程》,首次把可持续发展战略纳入我国经济和社会发展的长远规划。党的十四届五中全会正式把可持续发展作为我国的重大发展战略提了出来,指出“在现代化建设中,必须把实现可持续发展作为一个重大战略。要把控制人口、节约资源、保护环境放到重要位置,使人口增长与社会生产力的发展相适应,使经济建设与资源、环境相协调,实现良性循环”。[10]

随着我国经济社会环境的变化,党的十八届五中全会确立了创新、协调、绿色、开放、共享五大发展新理念。其中,绿色发展观是可持续发展战略的新形态,是对当代中国发展的理性把握,是人与自然和谐共生的发展模式。

2　三个地球建设理论探讨

2.1　三个地球关系

16 世纪之前,地理学发展比较迟缓,这个时期的成果只是对一些地理现象的描述。航海技术促进了地理大发现。随着对地球的更多的了解,地球科学逐渐分化出地质学、水文学、气象学等。20 世纪 80 年代,化石燃料的无节制使用向大气中排放了大量 CO_2,造成的温室效应改变了陆地和海洋生态系统。这些全球环境问题所涉及的已不仅仅是地球的一个部分或者地球的某一个圈层。因此美国的 NASA 提出地球系统科学的观点,强调应该从地球系统的观点来研究全球环境变化,将地球的岩石圈、水圈、大气圈、生物圈当做一个有机的整体。

中国煤炭地质总局提出的“透明地球”“数字地球”和“美丽地球”实际上正是地球系统科学研究面临的三个问题:地球系统的内部运行规律问题;地球系统信息化问题;自然系统和人类系统相互作用问题,从社会学角度也可以称之人地关系问题和可持续发展问题。“三个地球”是辩证统一的,三个地球之间既有区别又相互联系、相互渗透(图 1)[11]。

从内容上,透明地球强调地球系统的整体性及各子系统之间的相互作用,它研究地球的四大圈层(大气圈、生物圈、水圈和岩石圈)及其三大过程(物理过程、化学过程和生物过程)的驱动机理和运行规律;数字地球强调对地球系统的观测、模拟和预测等;美丽地球则强调人地关系和可持续发展问题。

从学科上,透明地球依托地球科学(地质学、地理学、大气科学、地球化学、地球物理学、生态学)与系统科学的交叉渗透,强调应用系统科学的观点来研究系统内(外)部的物质、能量的相互作用;数字地球依托地球科学与信息科学的深度融合,强调信息论、计算机理论和人工智能理论来研究各种与地球相关的信息观测、集成、反演和预测,以实现地球的数字化、可视化表达,以及多尺度、多分辨率动态

交互;美丽地球则依托地球科学与社会科学的交叉渗透,强调利用社会学、哲学、生态文明理论等来研究人地关系,以实现可持续发展问题。

从方法论上,透明地球主要依托“地物化遥钻”等手段获得地球系统各圈层相互作用的机理来实现;数字地球通过地球空间观测、表层监测和大陆深部探测等,并利用各类系统模型来实现对地球的观测和模拟;美丽地球则是在理解自然系统和人类活动相互作用的机理的基础上,在可持续发展观和生态文明理论的指导下,通过规范相应的人类活动来实现。

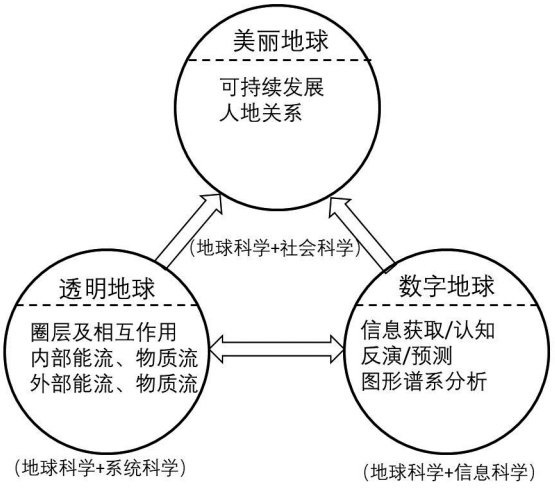

图 1 三个地球关系

Figure 1 Relationship among “transparent earth”, “digital earth” and “beautiful earth”

2.2 透明地球——传统地质学向地球系统科学转变

以遥感技术为代表的空间信息技术的发展让科学家的视线从地表观测转向了太空对地观测,地球系统科学由此逐步形成。地球系统是由岩石圈、水圈、大气圈和生物圈组成统一整体,它是多圈层相互作用的复杂巨系统,具有整体性、层次性、开放性、目的性、突变性、稳定性、自组织、相似性等特点。地球系统科学是地球科学与系统科学深度交叉的一门学科,其主要的理论包括系统论、耗散结构、非线性理论等,所采用方法包括传统地质方法、地球物理、地球化学、钻探和遥感等方法(图 2)。

透明地球建设应在地球系统科学的指导下进行,着眼于多圈层、多尺度、多学科集成的研究手段,通过大跨度的学科交叉,构建地球系统演变框架,了解当前正在发生的过程和机制,揭示全球资源生态环境社会多要素协同过程与机理,为我国可持续发展与生态文明建设及全球生态环境保护提供科学支撑。

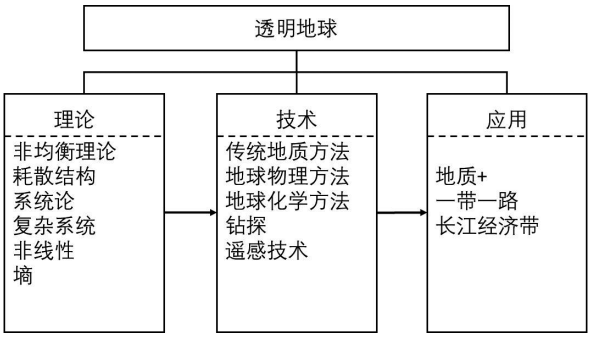

图 2 透明地球理论与技术体系

Figure 2 Theoretical and technological systems of “transparent earth”

2.2.1 多圈层作用和地质

地球的板块运动生成了不同的地质构造和岩石,造就了高原丘陵和高山峡谷,产生了迥异的地理、植物分区,形成了空间分异的土壤,也孕育了不同的地质灾害类型。地球深处的岩浆动力过程驱动着浅表的生物地球化学过程,在浅表部分,又受到人类活动的改造,岩石圈-土壤圈-水圈-生物圈形成一个系统,相互作用,塑造出当今的地球。

2019 年,中国煤炭地质总局提出了“地质+”的理念,致力于构建大地质、大产业的“地质+”新格局,内容涵盖了资源绿色勘查、民生地质、矿山地质、城市地质、农业地质、生态地质、水文地质、工程地质、环境地质、海洋地质、军事地质、地质旅游、地下管廊、国土整治、地理信息、地灾预测与治理、生态环境建设等方面(图 3)。

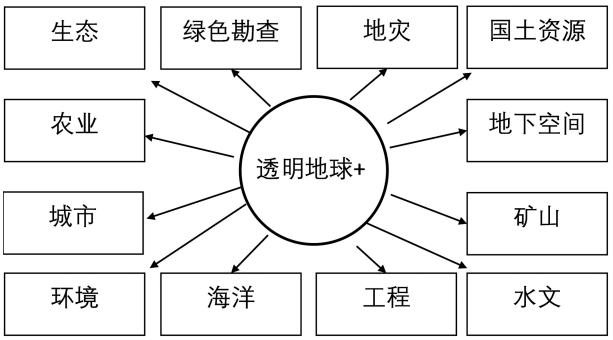

图 3 透明地球与地质+

Figure 3 “Transparent earth” and “Geology +”

2.2.2 局地-区域-全球思想

唯物辩证法主张任何事物都不能孤立存在,都与其他事物处于一定的相互联系中。地球系统观认为地球各要素是关联的。地理学第一定律主张“任何事物都是与其他事物相关的,只不过相近的事物关联更紧密”。

由于技术限制,传统的地质勘探侧重局地规律的认识。在实际勘探中通过露头、钻探等方式获取出露或深部的岩矿情况,然而露头、岩心等只是复杂岩矿的“一孔之见”,这种方式通常会造成“管中窥豹”的结果。我国推进“一带一路”、京津冀协同、长江经济带建设等重大战略,为地勘企业转型升级的重大机遇,也是地勘理论转型的重大机遇。地勘企业发展需要建立局地-区域-全球的研究战略,以地球系统科学为指导,对区域矿产资源、生态环境和地质灾害的宏观格局、形成演化规律、勘查和治理等开展系统研究,为区域协同发展提供支撑。

2.3　数字地球——地质勘探向人工智能转变

数字地球是地球科学与信息科学、计算机科学的交叉融合。来源于地球系统的信息流在加工、处理、分析和模拟过程中,信息形态经历了数据-信息-知识-数据的变化,信息属性也经历了客观信息-主观信息-客观信息的变化,地球空间认知在这种信息转变过程中完成[12]。数字地球的相关理论是信息科学理论在地球科学中的应用,包括信息流、自组织、自相似、突变和混沌、相关性和异质性等(图 4)。1998 年戈尔初次提出“数字地球”时,数字地球技术主要指空间信息技术(遥感、地理信息系统、全球定位系统)、网络技术和虚拟现实。随着技术的发展,数字地球的内涵也在不断发生变化。

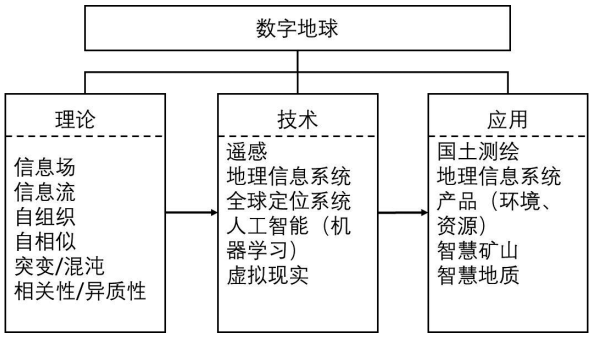

图 4　数字地球理论与技术体系

Figure 4　Theoretical and technological systems of “digital earth”

2007 年,图灵奖得主吉姆·格雷在“科学方法的革命”的演讲中将科学研究分为四类范式:分别为经验科学、理论科学、计算科学和数据密集型科学,其中“数据密集型”科学,现在也被我们称之为“大数据科学”。

1956 年,在达特茅斯学院的一次会议上首次提出了人工智能的概念,其后人工智能渗透到各个行业。网络技术的发展催生了大数据概念,大数据概念使得人工智能重新成为热点。机器学习、深度学习、神经网络都可以归纳为人工智能的范畴。

中国煤炭地质总局已经积累了 60 多年的煤炭、化工等矿产资源海量数据,以及区域地质、遥感、物探、水文地质等专业数据。虽然这些数据在地质填图、数据建模、可视化方面发挥了作用,但与对地球系统的认识和理解方面还远远不足。通过利用机器学习、深度学习等前沿技术为发展趋势的人工智能,是大数据时代地质发展的重要方向。未来地勘行业要基于大数据理念,运用现代数学理论、云计算、物联网、移动通信等新一代信息技术,加快推进庞大地质数据的智能处理和分析、可视化步伐,逐步实现勘查技术手段智能化、精细化、快捷化,加快推进由“数字地质”向“智慧地质”转变,加快“数字矿山”、“智慧矿山”研发建设步伐;提高资料数字化率,建立煤炭、化工矿产资源信息网络服务系统,提高地质信息资料综合利用率和社会化服务水平。

2.4　美丽地球——协调的人地关系

在早期地质勘探和矿山开采时,常常以资源为导向,未能充分考虑可持续发展和协调“人地关系”,对人类生存空间造成了不同程度的危害。如日本富士县 1955—1972 年的骨痛病事件是由于神通川上游的铅锌矿在采矿和冶炼中排放未处理的废水,导致大量含镉废水污染了周围的耕地和水源。油气钻探过程中的井喷会造成毁灭性的灾害,残留在地面上钻井液中,其含有的化学药剂,能够造成较长时间的生态影响。石油开发和炼制过程中泄露的原油、天然气、排出含有化学药品的污水和废泥浆等,构成了生态环境恶化的一个重要因素[13-15]。

2.4.1　人地关系的发展

人地关系是人类和自然环境间关系的简称。在漫长的人类历史中,人地关系的思想经历了崇拜自然、改造自然、征服自然和人地协调的几个过程。

在人类社会的早期,生产力极为低下,人类依靠采摘和狩猎生存,只能被动地适应自然,这个阶段人类对自然恐惧和崇拜。

新石器时期人类文明进入了刀耕火种时代,产生了原始农牧业。人与自然的关系由先前的完全依赖转化为顺应自然规律进而利用自然的阶段。其人地关系思想主要表现为“环境决定论”“或然论”[16]。古典时期地理环境决定论,如希波克拉底认为人类特性产生于气候,气候和季节变换可以影响人类的肉体和心灵;近代地理决定论,如:黑格尔将地理环境看作是精神的舞台,是历史的

“主要的而且必要的基础”,不同的环境会有不同的历史进程;美国历史学家巴克尔的历史学,认为地理、气候条件影响人的生理,生理差异导致人的不同精神和气质,从而有不同的历史进程[17]。

18 世纪中叶,人类进入了工业文明时期,随着生产工具的革新和生产力的提高,人类利用和改造自然的能力大大增强。此时人类从顺服自然转为征服自然,这个阶段的人地关系论转变为“人定胜天论”和“人类中心论”。

2.4.2 生态文明思想

“美丽地球”作为专业概念是新近才出现的。20 世纪中叶,西方发达国家相继发生一系列环境事件,促使人们反思人与自然的关系,警惕工业化、城市化、现代化过程中地球环境破坏的危险。慢慢地,原先多少带有一些浪漫主义色彩的“美丽地球”审美,开始越来越多渗透进环境评价中,“美丽”的艺术框架里融入环境保护的内容。

21 世纪初,习近平总书记在浙江工作时提出“两山理论”,强调:绿水青山就是金山银山,科学处理了环境与发展、生态与经济的关系。2012 年,党的十八首次提出了“美丽中国”执政理念。2015 年,十八届五中全会又把“美丽中国”纳入“十三五”规划。2019 年 4 月 28 日,国家主席习近平在北京出席世界园艺博览会开幕式,并发表题为《共谋绿色生活,共建美丽家园》的重要讲话,首次提出了“美丽地球”的理念。

可持续发展的要求地勘进行转变,构建一种和谐的人地关系。中国煤炭地质总局提出在地勘领域开展“美丽地球”建设,是对习近平总书记“美丽地球”理念的贯彻落实与行业实践。地勘行业应该在可持续发展理论、生态文明理论、人地关系理论的指导下,开展绿色勘探、环境监测与修复和灾害防治,以实现地勘领域的“美丽地球”(图 5)。

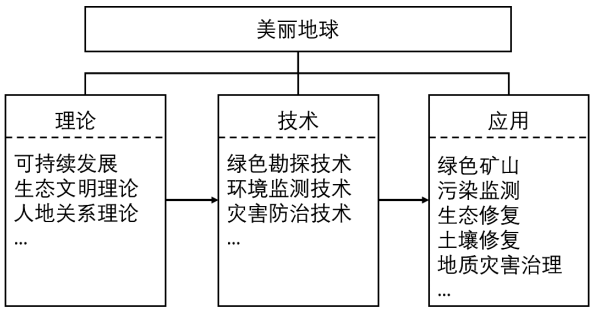

图 5 美丽地球理论与技术体系

Figure 5 Theoretical and technological systems of “beautiful earth”

3 结论

地勘行业面临转型升级的重大关键时期,中国煤炭地质总局提出了建设“透明地球”“数字地球”和“美丽地球”的战略愿景,本文从地球系统科学、大数据时代、生态文明等角度探讨了“三个地球”的理论和技术,明确了“三个地球”的相互关系,并探讨了“三个地球”的未来发展方向。主要的结论包括:

(1)“三个地球”是新时代背景下,地勘行业转型升级的重要战略;

(2)“三个地球”在地球系统科学框架下,相互区别,相互联系;

(3)在地勘领域,传统地质学应该向地球系统科学转变,传统地勘应该向人工智能转变,传统地勘应该向协调的人地关系转变,共同促进地球系统的透明、数字化和美丽。

参考文献:

[1]张万益,曹佳文. 建设美丽中国离不开矿产资源的有力支撑[N]. 中国矿业报,2018-01-13.

[2]赵平. 构建新时代“透明地球、数字地球、美丽地球”的地勘战略愿景[J]. 中国煤炭地质,2019,31(9).

[3]吴冲龙,刘刚. “玻璃地球”建设的现状、问题、趋势与对策[J]. 地质通报,2015(07):30-37.

[4]刘树臣. 发展新一代矿产勘探技术——澳大利亚玻璃地球计划的启示[J]. 地质与勘探,2003(05):54-57.

[5]徐宝慈. 关于加拿大岩石圈探测计划[J]. 世界地质,1992(4):5-9.

[6]王学求,谢学锦,张本仁,等. 地壳全元素探测——构建“化学地球”[J]. 地质学报,2010,84(6).

[7]滕艳. “玻璃地球”,大数据时代的选择[N]. 中国国土资源报,2014-09-25(006).

[8]Goodchild M F, Guo H, Annoni A, et al. Next-generation digital earth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(28):11088-11094.

[9]余谋昌,生态文明与可持续发展下载[J]. 绿色中国,2019(4).

[10]王佳玲. 中国特色社会主义新时代视域下绿色发展问题及对策研究[D]. 辽宁锦州:渤海大学,2019.

[11]陈述彭,陈星. 地球信息科学的理解与实践[J]. 地球信息科学学报,2012,6(1):4-10.

[12]千怀遂,孙九林,钱乐祥. 地球信息科学的前沿与发展趋势[J]. 地理与地理信息科学,2004(02):4-10.

[13]胡旭忠. 浅谈矿产资源勘探的开发与环境保护[J]. 科学技术创新,2018(31):195-196.

[14]范明霏. 油田勘探开发过程中的环境问题[J]. 环境工程,2014,32(S1):1051-1054.

[15]王玉涛,张蕾. 矿产资源开发与环境保护协调发展——以鄂尔多斯市为例[J]. 经济论坛,2015(10):88-89+122.

[16]张秀清,周巧姝. 不同历史阶段的人地关系思想对自然环境的影响[J]. 长春师范学院学报(自然科学版),2009,28(04):64-67.

[17]鲁西奇. 人地关系理论与历史地理研究[J]. 史学理论研究,2001(02):36-46.