

doi: 10.12097/gbc.2024.01.019

生态地质图谱的理论、方法与实践

聂洪峰¹, 肖春蕾², 刘建宇¹, 戴蒙¹, 刘刚¹, 袁国礼³, 张策⁴

NIE Hongfeng¹, XIAO Chunlei², LIU Jianyu¹, DAI Meng¹, LIU Gang¹, YUAN Guoli³, ZHANG Ce⁴

1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083;

2. 中国地质环境监测院, 北京 100081;

3. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

4. 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002

1. China Aero Geophysical Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China;

2. China Geological Environment Monitoring Institute, Beijing 100081, China;

3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

4. Nuclear Industry Aerial Survey Remote Sensing Center, Shijiazhuang 050002, Hebei, China

摘要:【研究目的】自2019年中国地质调查局部署“生态地质调查”工程以来,在全国范围内,生态地质调查已取得了涵盖岩石、风化壳、土壤、水文、生态格局、问题的现状与变化多维度的调查成果,以及结合地球化学、气候气象、地形地貌、人类活动等多方面因素的结论与认识。这些成果与认识已超越了传统地质成果图件的图面承载力和表达内容范畴,因此亟需对成果形式进行创新,形成适合生态地质调查成果的新型地质调查成果图。【研究方法】通过梳理“图”、“谱”和“地学图谱”的概念,结合生态地质学的内涵,提出了生态地质图谱这一新型地质调查成果图,并明确了生态地质图谱的内涵、意义、主要内容、图面构成及编制流程。【研究结果】生态地质图谱突破了传统地质图件的局限,全面展示了宏观遥感调查、地面典型剖面测量与微观测试分析结果,实现了生态学与地质学认识的融合。【结论】通过坝上地区和南方丘陵山区的实践,证明生态地质图谱是符合新时期基础性、公益性地质调查需求的成果表达方式,可作为国土空间生态保护和修复的重要参考与决策工具。然而,生态地质图谱仍处于初步发展阶段,为更好地实现其服务价值,建议在未来的工作中,加强全国生态地质图谱库建设,以及生态地质图谱信息化、智能化相关工作。

关键词: 生态地质; 生态地质图谱; 生态学; 生态地质调查; 坝上地区; 赣东南丘陵区

创新点: 根据生态地质调查取得的成果与认识,通过梳理“图”、“谱”和“地学图谱”的概念,提出了新型地质调查成果图,即生态地质图谱,可为生态保护修复工作提供支撑和参考。

中图分类号: P28; X141 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)05-0735-11

Nie H F, Xiao C L, Liu J Y, Dai M, Liu G, Yuan G L, Zhang C. Theory, methodology and practice of the Eco-Geological Tupu. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(5): 735-745

Abstract: [Objective] Since the deployment of the "Ecological Geological Survey" project by the China Geological Survey in 2019, eco-geology surveys have yielded multidimensional investigative results covering rocks, weathered crust, soil, hydrology, ecological patterns, and related issues nationwide. These findings, combined with factors such as geochemistry, climate and meteorology, topography, and human activities, have exceeded the traditional geological survey results in terms of graphical representation and content. Therefore, there is an urgent need for innovative forms of presenting these results to create a new type of geological survey map suitable for eco-geology surveys. [Methods] This article explored the concepts of maps, spectra and geoscientific tupu in conjunction with the essence of ecological geology and introduced the concept of the "Eco-Geological Tupu" as a novel form of

收稿日期: 2024-01-13; 修订日期: 2024-04-26

资助项目: 中国地质调查局项目《重要生态脆弱区生态遥感监测》(编号: DD20242481)

作者简介: 聂洪峰(1964-), 男, 教授级高级工程师, 从事生态地质、遥感地质研究。E-mail: nie_hongfeng@qq.com

geological survey representation. The article defined the eco-geological tupu, highlighted its significance, outlined its main components, discussed its graphical composition, and outlined the compilation process. **[Results]** The eco-geological tupu breaks through the limitations of traditional geological maps and comprehensively presents macro-scale remote sensing surveys, ground-based typical profile measurements, and microscopic testing and analysis results, thus achieving the integration of ecological and geological knowledge. **[Conclusions]** Through practical applications in the Bashang Plateau and the Guangxi-Guangdong hilly region, it has been demonstrated that the eco-geological tupu is a suitable means of expressing survey results that meet the foundational and public interest needs of geological surveys in the new era. It can serve as a crucial reference for ecological protection and restoration in national land space and as a decision-making tool for eco-civilization. However, the eco-geological tupu is still in its initial development stage. To enhance its service value in the future, it is recommended to strengthen the construction of a national eco-geological tupu database and work on the informationization and intelligentization of eco-geological tupu.

Key words: eco-geology; eco-geological tupu; theoretical connotation; significance; components; practice

Highlights: Based on the findings gained from "Ecological Geological Survey", this paper proposed a new type of geological map, Eco-Geological Tupu, by exploring the concepts of maps, spectra and geoscientific tupu. The Eco-Geological Tupu can serve as a crucial reference for ecological protection and restoration.

19 世纪 30 年代, Unger(1836)提出岩石和土壤中的矿物成分是影响基质特异性植物分布的主要因素,之后相关研究进一步支持了该观点(Von Marilaun, 1895),开启了研究探索地质作用对生态系统与生态过程的影响的序幕。在后续的研究中,中外学者认为,宏观上地质构造运动通过塑造区域地形地貌,决定气候条件,进而影响不同生态系统的分布(Swanson et al., 1988; Parker and Bendix, 1996);微观上地质作用对生态系统的影响主要体现在不同岩性的化学成分和风化成土过程方面(Schulten and Leinweber, 2000; Blanco-Canqui and Lal, 2008; Churchman and Lowe, 2012; Hahm et al., 2014; Jiang et al., 2020)。

鉴于地质作用与生态问题形成、生态系统演化、生态过程发展等方面的复杂关系,生态地质调查完整地获取地上地下一体化的生态-土壤-水-风化壳-岩石信息,进而科学评估生态状况,全面认识生态系统的演变规律及发展趋势(聂洪峰, 2021a)。中国生态地质调查工作始于 20 世纪 90 年代,如开展了“1:5 万大巴山区生态地质调查”和“1:25 万铁岭市幅生态地质调查”试点项目,探索了生态地质调查成果图件编制。李廷栋(1999)提出,加强地球表层系统研究,并建议有计划地开展地球表层系统系列地质图件编制。国内有学者翻译引入了俄罗斯学者关于生态地质图件的讨论(奇 AB 和刘吉成, 1997; 科切特科夫, 1998)。当时的生态地质调查工作程度有限,并未形成像区域地质调查、矿产地质调查、水文地质调查成果这样较统一的表达形式和要求。不过,以上学者们认为,生态地质调查成果图件应为系列性图件,图件应包

括岩石、土壤、植被、地下水、地表水等多类要素。

2019 年中国地质调查局部署“生态地质调查工程”以来,在全国范围内已开展大量生态地质调查工作。然而,目前仍缺少合适的成果表达方式,限制了其成果的推广与应用。本文以 2019 以来的工作实践为基础,提出生态地质图谱的概念,以期促进生态地质调查工作的发展。

1 生态地质图谱的内涵与意义

1.1 生态地质图谱的内涵

“图”通常是指地图、图像、图形、图表等,用于表达地表各要素的类型及其空间关系;“谱”是对相关事物或现象有规律的序列编排,具有系统性和规律性,也可以理解为“谱”即是系统(陈述彭, 2001b; 齐清文和池天河, 2001; 廖克等, 2001; 廖克, 2002)。“图谱”是“图”与“谱”的结合,兼有“图形”与“谱系”双重特性,是时间与空间动态变化的统一描述,同时也是反映与揭示事物和现象空间结构特征与时空动态变化规律的图形表现形式和分析研究手段(廖克, 2002; 杨存建, 2020)。“地学图谱”是图谱在地学研究中的应用与发展,是对地学对象时空特征及规律的概念性表达,主要展现地学要素的时空脉络及其耦合关系(陈述彭, 2001a; 张洪岩等, 2003; 杨存建, 2020)。

生态地质学是地质学的新分支和特殊研究领域,是生态学和地质学之间的新兴交叉科学,研究生态问题或生态过程的地学机理、地质作用过程及其环境条件,将生态空间分布格局、生态问题及其变化规律与地质作用过程作为一个整体,分不同层级

和维度进行研究,研究对象涉及岩石圈、土壤圈、水圈、大气圈及生物圈(王长生和王大可,1997; Trofimov, 2001, 2004, 2008; 何政伟等, 2003; 聂洪峰等, 2021a, b)。

本文以地学图谱和生态地质学的概念为基础,明确了生态地质图谱的内涵。生态地质图谱是在调查研究区地质条件和自然地理景观的基础上,刻画植被、土壤、风化壳、地下水、岩石等生态地质要素空间分布及其成生联系和相互作用影响,展现生态地质条件、主要生态问题和区划布局的一种地学图谱。因此,生态地质图谱是系列成果,通常按生态系统类型、生态问题建立不同的生态地质图谱。

1.2 生态地质图谱的意义

中国生态问题分布面积广,空间跨度大,具有东西分野、南北有别的特点。不同的地质、地貌和气候单元生态问题的主要驱动因素差异较大,为生态保护修复工作的科学合理开展构成了挑战。因此,迫切需要一套完整的生态地质图谱,展示生态地质调查地上一地下一体化成果,揭示岩石-土壤-水-植被之间相互作用关系,为生态-地质相互作用机理研究、国土空间生态保护修复建议和政府科学决策提供全面、详实的基础资料。编制生态地质图谱的意义可归纳为以下3点。

(1)生态地质内在机理研究的有利支撑。生态地质图谱在宏观上展示地形地貌、气象条件等背景信息,限定了生态过程发生的环境,微观上深入到土壤、风化壳和岩石的理化性质,从物质组成、元素含量等方面将岩石与植被联系起来,为生态-地质相互作用研究提供有利支撑。

(2)国土空间生态保护修复的重要参考。完善的生态地质图谱系包含了生态退化区与顶级演替区的图谱,一方面展示了生态退化区的问题与原因,另一方面展示了同样生态地质条件下的生态系统最优状态,因此可作为生态保护修复工作的重要参考。

(3)服务政府决策的重要基础资料。全面展示生态地质条件的生态地质图谱集,是流域、区域甚至全国范围内生态地质工作部署的基础,生态地质图谱在生态文明建设,如工程部署、修复目标制定等方面可提供重要的科学依据。

2 生态地质图谱的特点与图面构成

自1910年邝荣光先生编制并发表《直隶地质

图》以来,中国近代区域地质调查或地质填图至今已走过了一个世纪的路程(陈克强, 2011)。在发展过程中,逐渐形成了图件中部为主图区,展示主要调查成果,主图两侧分为图例、地层表、辅助性图件等相关必要信息,底部为剖面的整体结构(《DZ/T 0264—2014 遥感解译地质图制作规范(1:250 000)》)(中华人民共和国自然资源部, 2014);《EJ/T 20003.8—2011 地浸砂岩型铀矿地质图件编制规定 第8部分:水文地球化学图》;《DD 2019—01 区域地质调查技术要求(1:50 000)》)(中国地质调查局, 2019a)。同时,为满足经济发展的需求,地质工作者编制了城市地质图、工程地质图、环境地质图,与区域地质图等传统地质图件相比,这些图件的主要创新性体现在主图区内对新型地质调查成果的准确展示(刘长礼等, 2019; 孟庆华等, 2019; 邢怀学, 2019; 曾庆铭, 2020),其图件整体布局并未突破传统地质图件的框架。

生态地质调查主要任务包括调查生态与生态地质条件的现状分布及变化,调查生态地质问题类型及其分布,并分析生态-地质相互作用过程,查明生态问题主要影响因素,服务国土空间保护修复(聂洪峰等, 2019)。传统地质图件的表达形式,适合于展示生态地质条件、生态系统、生态问题的空间分布与变化。但是存在宏观和微观不同尺度,横向和纵向不同维度,地质、生态等不同专业调查成果难以统一表达的局限性。因此,为解决以上问题,本次针对性地设计了生态地质图谱的图面构成。

生态地质图谱的图面构成总体分为3部分,即顶部的背景信息区、左下方的景观特征区和右下方的典型剖面区(图1)。顶部背景信息区的作用是展示宏观横向上的生态地质条件调查成果,是对单类型系列成果图件的概括性描述。左侧的地理位置图,以全国影像图为底图,标明该图谱代表的区域范围;右侧介绍了区域地质、地貌、气候、生态、土壤等方面的背景信息。

左下方景观特征区的作用是在景观尺度的展示生态地质线路调查成果。该区域上部通常为剖面所在位置的景观照片,下部介绍该剖面的地理位置、周边生态景观特征、地貌类型、成土母岩(质)类型、突出生态问题等。与背景信息相比,景观区域的描述更具体,如生态方面的描述从生态系统类型的分布变化为优势群落。

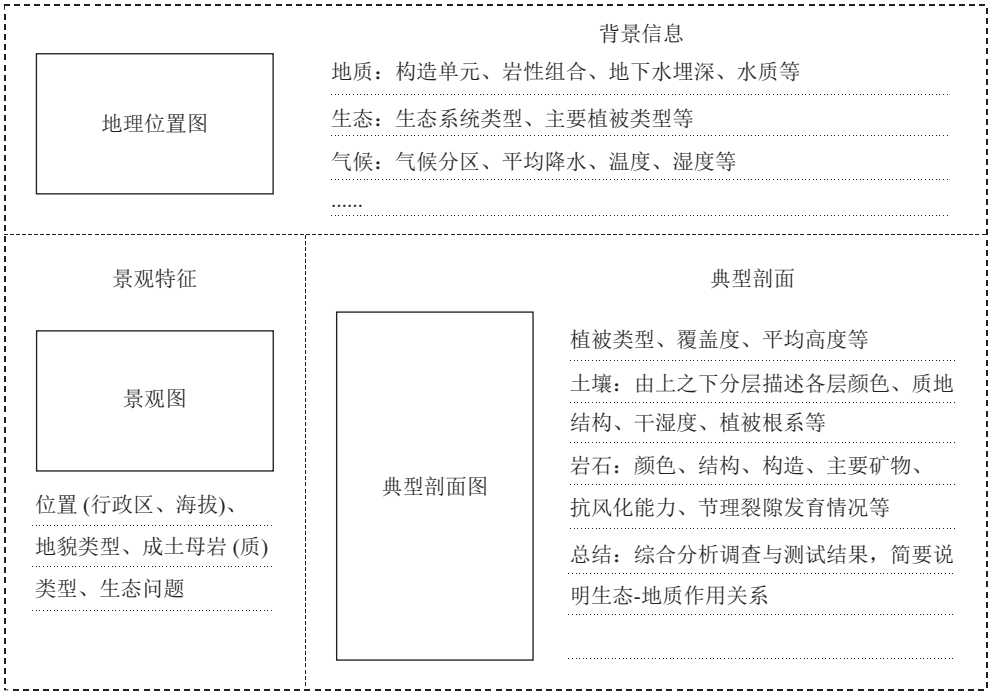


图 1 生态地质图谱图面构成

Fig. 1 The components of Eco-Geological Tupu

右下方典型剖面区的作用是展示筛选出的典型剖面特征,并结合土水的分析测试结果与区域生态地质条件分析简要阐述区域生态过程或生态问题成因。典型剖面区左侧为实测典型剖面照片、CIA 等指数随深度变化图,照片中标明了剖面不同的土壤发生层。在其右侧,自上而下分层描述植被、土壤、岩石特征。此处描述更详细,生态相关描述以植被类型、植被覆盖度、平均高度为主。土壤各层描述包括土壤颜色、厚度、干湿状况、植物根系、质地、结构等(张甘霖和李德成, 2022),成土母岩描述包括类型、结构构造、主要矿物、节理裂隙发育情况等调查成果(中国地质调查局, 2019b)。

生态地质图谱的布局将三个尺度、两个维度、多个专业的综合调查成果,以一种逻辑清晰,简洁美观的形式展现出来,突破了传统地质图件的局限性,是更符合生态地质调查需求的表达方式。

3 生态地质图谱编制过程

生态地质图谱的编制以区域资料分析和实际调查为基础,通过深入全面分析已有成果资料,并结合遥感和野外线路调查结果,选择典型剖面,绘制图谱。

生态地质图谱的编制参考图面构成,分为 3 部分,即首先编制顶部的背景信息,之后编制景观特

征,最后完成典型剖面部分。一般包括资料收集、室内分析、野外调查、采样分析、综合研究、图件编制等工作环节。通过收集分析研究区地质、地貌、气象、水文和生态方面的成果,梳理研究区的生态地质条件,发现生态问题,总结生态演化趋势,制定野外调查计划。此步骤一方面为背景信息编制准备了充分的素材,另一方面为编制后两部分奠定了基础。野外调查中首先在工作区进行线路调查,掌握研究区生态地质条件变化规律,查明不同生态系统的代表性植被类型、分布区域、土壤类型、成土母岩(质)类型等,筛选出典型剖面。通过以上调查,获取景观特征部分所需信息。剖面调查中不仅需要详细记录各分层特征,同时需要在不同分层内至少采集 1 件样品进行分析测试。最后结合区域生态演化趋势或突出生态问题,综合分析调查和测试结果,简要说明生态-地质相互作用关系,完成图谱编制。主要工作步骤如下(图 2)。

(1) 根据实际工作的需求,选择合理的范围。单元内应具有相似的生态地质条件和主导因素,并与周边地区存在较显著的差异。

(2) 收集所需的区域资料,开展全面分析研究,总结单元生态地质条件特征等,确定工作重点和技术路线。

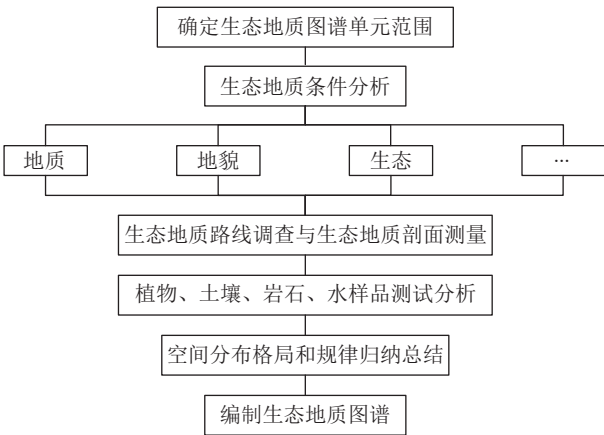


图 2 生态地质图谱编制流程

Fig. 2 The compilation process of Eco-Geological Tupu

(3)以穿越不同成土母岩(质)、土壤、地貌单元、植被类型区的方式开展生态地质调查,并在典型地区进行详细的生态地质剖面测量,分层采集样品。

(4)对样品进行测试分析,分析项目包括但不限于

于植物主要营养元素,土壤养分、粒度、主量和微量元素,岩石主量、微量元素等。

(5)对调查与测试结果进行综合分析研究,参考相关图件编制标准和规范,结合应用需求编制区域生态地质图谱。

4 生态地质图谱编制的实践

《中国陆域生态基础分区(试行)》旨在为分区分类科学开展生态修复、生态监测评价预警等工作提供技术性基础框架和参考(中华人民共和国自然资源部, 2023)。该方案将全国陆域(不含港澳台地区)生态系统在不同区域尺度上分为 3 级,结合已有生态地质调查成果资料的精度,认为较适合建立二级生态分区生态地质图谱。目前,已在全国陆域范围内已完成生态地质调查图谱 78 幅,覆盖了 31 个二级生态区,甘肃北部、新疆与青藏高原工作程度相对较低(图 3)。已有生态地质图谱相对平均地覆盖了

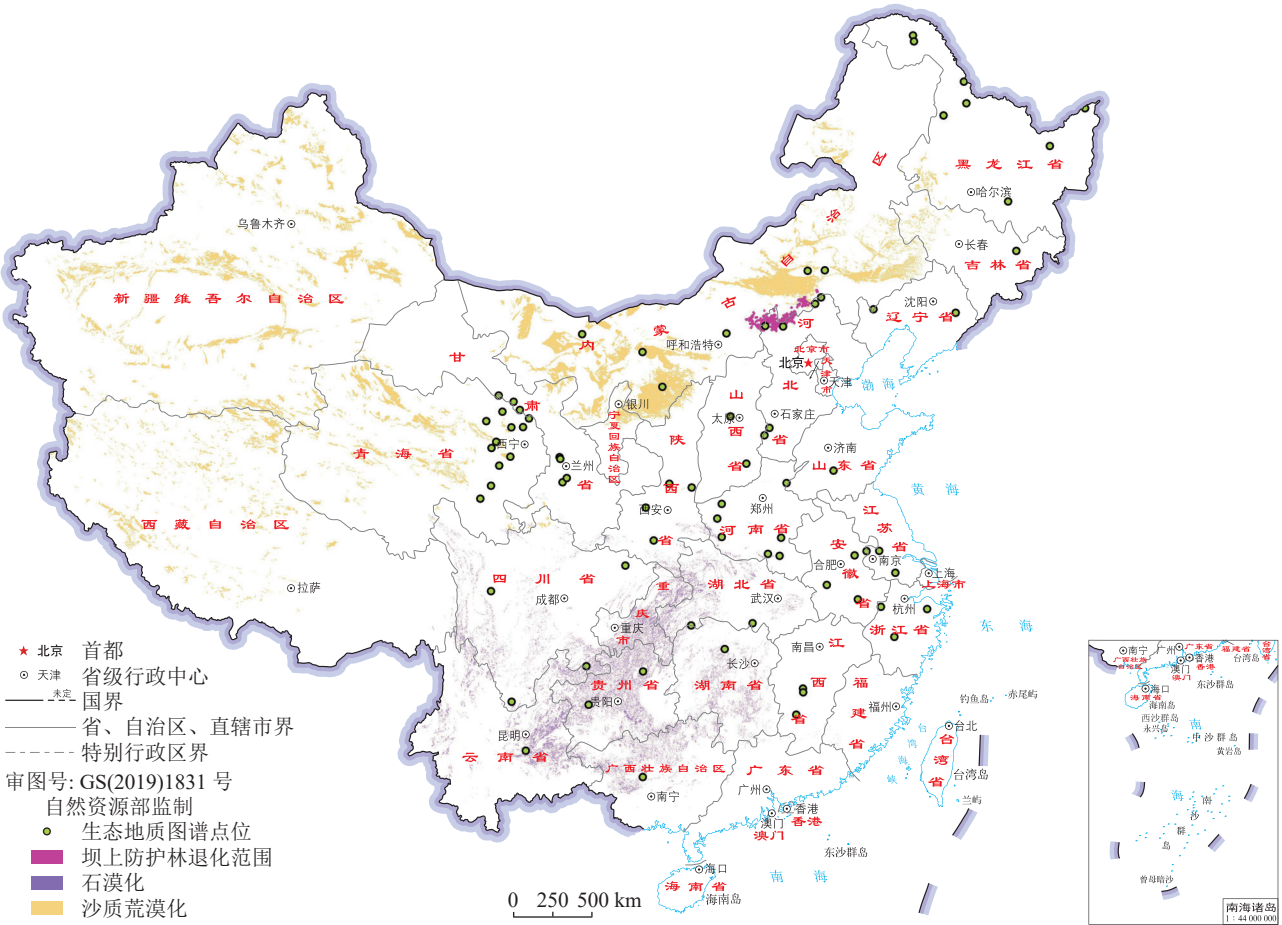


图 3 已完成生态地质图谱位置图

Fig. 3 The location map of Eco-Geological Tupu

一级类成土母岩(质)类型和土纲,跨越了中国三级地势阶梯,祁连山、太行山、南岭、东北平原、华北平原等主要地貌单元内均有分布,涵盖了森林、草原、草甸、荒漠等生态类型。本文以防护林退化严重的坝上地区 and 水土流失严重形成“红色荒漠”的赣东南丘陵区生态地质图谱为例,展示生态地质图谱编制实践。

4.1 阴山-鄂尔多斯生态地质区防护林退化问题生态地质图谱

该图谱位于张家口市张北县西北部,属于内蒙古-黄土高原生态地质大区的阴山-鄂尔多斯生态地质区。该区地貌类型为高原、山地、河谷、冲洪积平原、台地、盆地和残丘,属中温带干旱—半干旱气候,年平均降水量 150~350 mm,多集中在 7—9 月,年总蒸发量 2000~3400 mm。主要生态类型为人工针阔混交林生态系统、草地生态系统、农田生态系统和荒漠生态系统。主要成土母岩(质)为中等风化型中—酸性侵入岩类、易风化型基性(超基性)火山岩类等。主要土壤类型为栗钙土、风沙土、盐碱土、灰褐土、棕钙土等(图 4)。图谱所在的坝上高原西部属“三区四带”中的“北方防沙带”,较突出的生态问题有防护林退化、湖泊萎缩等。该剖面分为 A 层、E 层、B 层、C 层和 R 层。A 层厚 50 cm 左右,呈浅褐色、土黄色,以砂为主,含有少量粘土,属砂质壤土。E 层与 A 层呈渐变关系,颜色相对较浅,主要为浅黄色,其物质组成与 A 层接近。A 层和 E 层植被根系较发育。B 层颜色发生明显变化,呈白色、灰白色,主要由淋溶堆积的次生碳酸盐引起,该层硬度较上部、下部明显变大。C 层为风化较强的玄武岩,岩石破碎严重,原岩结构构造大部分破坏,矿物色泽明显变化,斜长石已风化蚀变。R 层为玄武岩,灰绿色,块状构造,弱风化,发育风化裂隙,已被切割成岩块。

化学蚀变指数(CIA , $CIA=[Al_2O_3/(Al_2O_3+K_2O+Na_2O+CaO^*)]\times 100\%$)是判断化学风化程度的重要指标(Nesbitt and Young, 1982),在岩石风化研究中应用广泛。式中, CaO^* 指硅酸盐中 CaO 的含量,即需要去除碳酸盐和磷酸盐中的 CaO 。从土壤和沉积物中准确分离和提纯硅酸盐矿物难度较大,因此采用 McLennan et al.(1993)提出的方法对 CaO 的含量进行校正,若土壤或沉积物样品中 CaO 的摩尔数小于 Na_2O 的摩尔数, $CaO^*=CaO$;若土壤或沉积

物样品中 CaO 的摩尔数大于 Na_2O 的摩尔数, $CaO^*=Na_2O$ 。通常, CIA 值越大代表风化程度越强,寒冷干燥气候条件下较低的化学风化程度, CIA 值介于 50~60 之间;湿润条件下中等的化学风化程度, CIA 值介于 60~80 之间;气候环境的炎热、潮湿条件下的强风化程度, CIA 值介于 80~100 之间(Fedo et al., 1995)。

根据测试分析结果计算,剖面各层 CIA 值均在 50~60 之间,符合寒冷干燥气候条件下风化程度趋势,但是由岩石至土壤, CIA 值并未随风化程度增强而增加,出现了 B 层 CIA 值最小的异常现象。这种现象与野外观察到的该层发育钙积层,以及剖面 $CaCO_3$ 含量测试结果一致。B 层 $CaCO_3$ 含量高达 323 g/kg,是 A 层的 10.81 倍,为 E 层的 4.51 倍。钙积层的形成主要是由于该区域地势较低的冲洪积扇前缘和凹陷盆地中心,汇聚了成土母岩(以玄武岩为主)风化析出的碱性离子。受碳酸钙胶结作用影响,该层成了较致密坚硬的隔水层,阻碍了地下水对表层土壤的补给,也阻碍了植被根系向土壤深处生长,因此不利于乔木生长,成为人工林退化的主要影响因素之一。建议在该区域进一步开展大比例的生态地质调查工作,查明钙积层分布、地下水埋深等与乔木生长关系的生态地质条件。遵循“宜林则林、宜草则草”的原则,调整土地利用结构,将部分杨树种植区转换为灌木林地或天然草地。

4.2 桂粤山地丘陵生态地质区生态地质图谱

该图谱位于赣州市信丰县中部,属于东南生态地质大区的桂粤山地丘陵生态地质区。该区地貌形态主要为中低山、丘陵、台地、盆地相互交错,南亚热带季风气候区,夏季暖热,冬季温和,年平均气温 17~21℃,年降雨量在 1000~2000 mm 之间。主要生态类型为阔叶林生态系统、农田生态系统和荒漠生态系统。主要成土母岩(质)为中等风化型中—酸性侵入岩类、易风化型泥质砂-砾岩类、难风化型碳酸盐岩类和松散堆积型冲-洪堆积类、滨海沉积类等。主要土壤类型有赤红壤、黄壤、红壤、水稻土等(图 5)。

图谱所在区域属“三区四带”中的“南方丘陵山地带”,水土流失和石漠化问题较突出,图谱展示了红层分布区,因水土流失形成“红色荒漠”的剖面特征。该剖面分为 A 层、C 层和 R 层,该区域成土母岩整体为紫红色砂岩。A 层呈红褐色,厚约 50 cm,以粉砂粒、砂粒为主,属壤土,植被根系发育,有机质

含量 1.24%, pH 值为 5.65。B 层颜色与 A 层较接近, 两者呈过渡关系, 植被根系较少, 有机质含量明

显降低, 为 0.40%, pH 值降低至 5.22。B 层为土红色, 湿润, 有机质含量持续降低至 0.17%, pH 值为

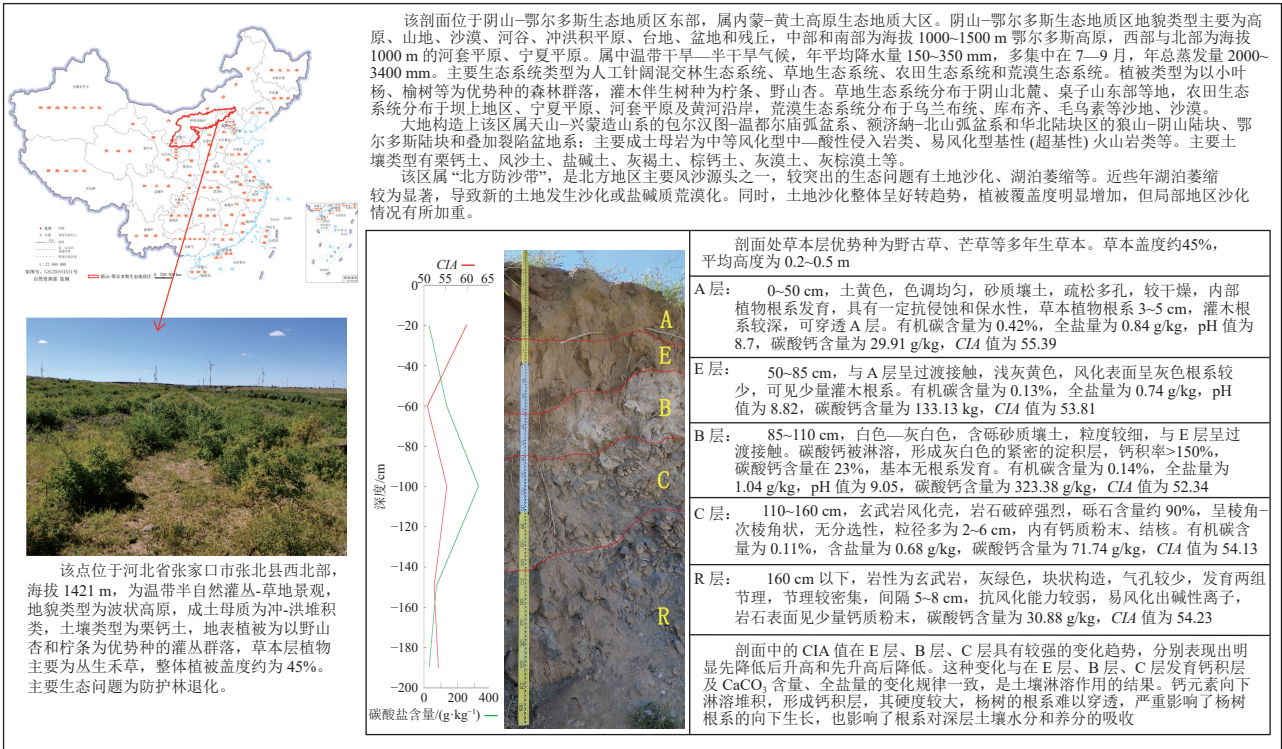


图 4 阴山-鄂尔多斯生态地质区防护林退化问题生态地质图谱

Fig. 4 The Eco-Geological Tupu of shelter belt degradation in Yinshan-Ordos eco-geological area

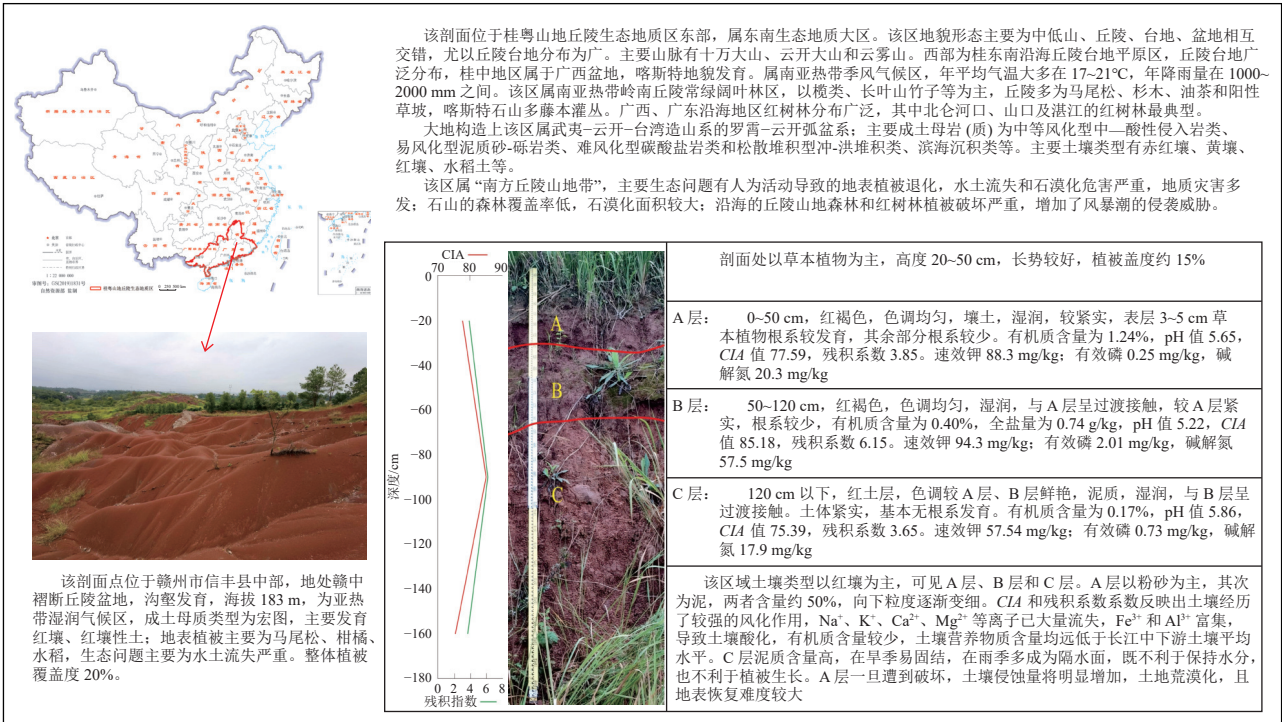


图 5 桂粤山地丘陵生态地质区红色荒漠问题生态地质图谱

Fig. 5 The Eco-Geological Tupu of desertification of red layer in Guangxi-Guangdong hilly eco-geological area

5.86。剖面整体有机质含量低、呈酸性,土壤质量相对较差。

Nesbitt and Young(1982)依据元素的活动性与矿物稳定性,将化学风化过程划分为早期脱 Ca、阶段、中期去 K 阶段和晚期脱 Si 阶段。Al、Fe 作为稳定元素,随着土壤风化程度加深,其含量会逐步增加,残积系数 $(Al_2O_3+Fe_2O_3)/(CaO+MgO+Na_2O)$ 反映了稳定性元素 Fe、Al 相对富集或残积的程度(毛沛妮等,2017),也可以从侧面反映 Ca、Na 等易溶性元素的淋溶迁移程度。剖面 CIA 值均大于 75,风化程度较强,残积系数介于 3.65~6.15 之间,反映剖面中易溶元素 Ca^{2+} 、 Na^+ 被大量迁移淋失, Fe^{3+} 、 Al^{3+} 富集或残积程度高。在这种风化较强的情况下,由云母、长石风化形成的蒙脱石等矿物会进一步风化直至形成高岭石和三水铝石。高岭石对阳离子的吸附能力远低于蒙脱石、蛭石,因此土壤保肥能力较差,有机质含量较低(熊毅和陈家坊,1989)。而且,土壤呈酸性,pH 值较低同样与强风化条件下土壤中大量 Al^{3+} 有关。 Al^{3+} 具有较强的吸附能力,可以通过交换反应将土壤中的盐基离子代换出来,使之进入土壤并被淋溶,导致土壤酸化(王清等,1991),进一步加快土壤有机质的分解,降低有机质含量。

该区域红层中的砾岩和砂砾岩等强硬层,透水性强、土层瘠薄,一旦天然植被破坏,坡顶土层将很快流失并不可逆转;粉砂岩、泥质岩等软弱层中的粘土矿物和易溶盐类含量较高,地表与地下水化学溶蚀和动力侵蚀强烈;雨季时坡面侵蚀强烈,水土流失严重,形成红层区特有的红色荒漠化,即“红色荒漠”(彭华,2011;彭华等,2015)。在荒漠化程度较轻的地区可采取封禁治理,使其自然恢复;在程度较严重的地区,建议一方面选择种植耐酸耐贫瘠,且根系发达的植物,同时选择纯草、草和灌木、草和乔木、灌木、乔木等混合种植方式,提升水土保持能力;另一方面则综合利用多种土壤改良技术,通过添加土壤改良剂,改善土壤物理化学性质,使其适宜植物生长。

以上 2 个生态地质图谱均按照设计的图面构成,在 3 个区域全面展示了背景信息、景观特征和典型剖面。同时根据 2 类生态问题的调查和分析结果,以阐明问题为目的,在典型剖面区域的总结描述和测试结果展示部分,两者存在一定差异。阴山-鄂尔多斯生态地质区防护林退化问题生态地质图谱的总结中侧重于 $CaCO_3$ 在地表的运移、堆积及其影

响,因此 $CaCO_3$ 含量被列为测试结果展示的重要内容。桂粤山地丘陵生态地质区红色荒漠问题生态地质图谱更注重强烈的风化作用对土壤性质的改变及其影响,因此风化指数成为测试结果的主要展示内容。

以上 2 个例子展示了生态地质图谱在中温带干旱一半干旱气候区、亚热带季风气候区,针对防护林退化和红色荒漠 2 类典型生态问题,均取得较好的应用效果。形式上,位于不同地区针对不同问题的生态地质图谱达到高度统一,表明生态地质图谱图面构成设计合理。内容上,不仅包括相对固定调查成果描述,而且结合实际强调了特色内容,验证了编制方法的可行性。

5 展 望

随着经济社会发展和人类文明进步,地质工作的内涵和服务对象都在发生着深刻变化。目前,建设生态文明,建设美丽中国的号角已经吹响,应建立生态保护与修复体系使其成为地质工作服务生态文明建设的重要支柱之一(李金发,2014)。因此,生态地质调查工作应以服务生态文明建设为目标。生态地质图谱这种创新的成果表达方式,全面、简洁、直观地展示了生态地质调查成果,增强了调查成果的普及性和实用性,能够有利支撑生态保护修复工作。但是目前,生态地质调查和生态地质图谱的编制目前仍处在发展的初期阶段,无论在数量还是在品类上还不能满足实际需求,因此建议加强以下几个方面的工作。

(1) 建成全国生态地质图谱库。依托生态地质调查工作,在目前工作相对薄弱的新疆、青藏高原等地区,建立区域生态地质图谱,支撑完成全国生态地质图谱库。同时以具有重要生态功能的山脉、流域(如秦岭、黄河流域)为单元,建立重点区生态地质图谱集。形成一套覆盖范围广,重点区域特色显著的基础性资料。

(2) 研发生态地质图谱综合信息平台。该平台可嵌入地质云平台,通过“地调在线”系统,收集生态地质调查项目成果,为全国范围编制生态地质图谱做好数据准备。该平台一方面作为生态地质图谱数据库,存储大量调查、测试结果数据,另一方面作为生态地质图谱库的外界访问窗口,具有网页端、移动端多种访问途径,既服务于生态地质图谱成果展示,

也是调用、查看基础数据的便捷途径。

(3) 拓展生态地质图谱应用领域。目前生态地质图谱主要作为基础资料,展示从植被到基岩各圈层的基本特征。未来工作中,应利用机器学习、大数据分析等先进技术,将生态学领域的评价、预测模型与生态地质图谱数据库融合,发展出生态地质现状评价、生态问题趋势预测等不同类型的图谱,在多个环节支撑中国生态文明建设。

致谢:感谢中国地质调查局、中国地质调查局成都地质调查中心、西安地质调查中心、武汉地质调查中心、中国地质大学(北京)、吉林大学等单位相关领域专家和专业技术人员在多次交流研讨中提出的非常宝贵的意见和建议,以及对生态地质图谱编制给予的指导和支持。

References

- Blanco-Canqui H, Lal R. 2008. Principles of soil conservation and management[M]. Springer Science & Business Media.
- Chen K Q. 2011. Emergence, development and usage of geologic maps[J]. Chinese Journal of Nature, 33(4): 222–230(in Chinese with English abstract).
- Chen S P. 2001a. Exploratory research on geo-informatic Tupu [M]. The Commercial Press (in Chinese with English abstract).
- Chen S P. 2001b. Along The historical way up to knowledge innovation[J]. Acta Geographica Sinica, 56(B09): 1–7(in Chinese with English abstract).
- China Geological Survey. 2019. Technical requirements for regional geological survey (1 : 50 000) [S]. DD 2019-01.
- China Geological Survey. 2019. Technical requirements for ecogeological survey (1 : 50 000) [S]. DD 2019-09.
- Churchman G J, Lowe D J. 2012. Alteration, formation, and occurrence of minerals in soils[M]. CRC Press.
- Fedo C M, Wayne Nesbitt H, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 23(10): 921–924.
- Hahm W J, Riebe C S, Lukens C E, et al. 2014. Bedrock composition regulates mountain ecosystems and landscape evolution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9): 3338–3343.
- He Z W, Huang R Q, Sun C M, et al. 2003. A Brief Discussion on “Eco-Geology” [J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 3: 69–72(in Chinese with English abstract).
- Jiang Z, Liu H, Wang H, et al. 2020. Bedrock geochemistry influences vegetation growth by regulating the regolith water holding capacity[J]. *Nature Communications*, 11(1): 2392.
- Kochetkov. 1998. Concept of Geocological mapping in Russia[J]. Sichuan Geological Science and Technology Information, (4): 43–43(in Chinese).
- Li J F. 2014. Geological survey work serving ecological civilization[J]. Resources Environment & Engineering, 28(1): 1–4(in Chinese with English abstract).
- Li T D. 1999. Strengthening study and geological mapping of the Earth Surface System[J]. Quaternary Sciences, 19(3): 193–197(in Chinese with English abstract).
- Liao K. 2002. The discussion and prospect for geo-informatic Tupu[J]. Journal of Geo-information Science, 4(1): 14–20(in Chinese with English abstract).
- Liao K, Qin J X, Zhang Q N. 2001. On geo-informatic Tupu and digital Earth[J]. Geographical Research 20(1): 55–61(in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Zhang Y, Zhang J Y, et al. 2019. Compilation method of 1 : 50 000 comprehensive engineering geological map[J]. Geological Survey of China, 6(1): 86–93(in Chinese with English abstract).
- Mao P N, Pang J L, Huang C C, et al. 2017. Chemical weathering characteristics and regional comparative study of the loess deposits in the upper Hanjiang River[J]. Acta Geographica Sinica, 72(2): 279–291(in Chinese with English abstract).
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 101(2): 295–303.
- Ministry of Land and Resources, PRC. 2014. Specifications for remote sensing interpretation of geological maps (1 : 250 000) [S]. DZ/T 0264-2014(in Chinese).
- Ministry of Natural Resources. 2023. Notice on issuing the “ecological base zoning of China's Land Territory (Trial)”[Z]. No. 19 [2023] of the General Office of the Ministry of Natural Resources. http://gi.mnr.gov.cn/202306/t20230614_2791436.html(in Chinese with English abstract).
- Meng Q H, Yang Q Q, Xie H L, et al. 2019. Discussion on the compilation of environmental geological map of the economic zone in the Circum-Bohai-Sea region[J]. Geological Survey and Research, 42(2): 129–134(in Chinese with English abstract).
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715–717.
- Nie H F, Xiao C L, Dai M, et al. 2021a. Progress and Main Achievements of ecogeological survey project[J]. Geological Survey of China, 8: 1–12(in Chinese with English abstract).
- Nie H F, Xiao C L, Guo Z C. 2019. Exploring the secrets of ecosystem operation and evolution: Interpretation of ecological geological survey ideas and methods[J]. Scientific and Cultural Popularization of Land and Resources, 21: 6–15(in Chinese with English abstract).
- Nie H F, Xiao C L, Ren W X, et al. 2021b. Progress and prospects of ecogeological research[J]. Geological Survey of China, 8: 1–8(in Chinese with English abstract).
- Nuclear Industry Standardization Institute, et al. 2014. Specification for geological map compilation of In-situ leachable sandstone-type uranium deposits—Part 8: Hydrogeochemical map [S]. EJ/T 20003.8-2011.

- Parker K C, Bendix J. 1996. Landscape-scale geomorphic influences on vegetation patterns in four environments[J]. *Physical Geography*, 17(2): 113–141.
- Peng H. 2011. Perspectives on the red beds landforms in humid area of Southern China and some related problems[J]. *Geographical Research*, 30(10): 1739–1752 (in Chinese with English abstract).
- Peng H, Yan L B, Chen Z, et al. 2015. A preliminary study of desertification in red beds in the humid region of Southern China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 70(11): 1699–1707 (in Chinese with English abstract).
- Qi A B, Liu J C. 1997. On the method of geoecological mapping[J]. *Land and Resources Informatization*, (2): 7–10.
- Qi Q W, Chi T H. 2001. Research on the theory and method of Geo-Info-TUPU[J]. *Acta Geographica Sinica*, 56: 8–18(10): 1739–1752.
- Schulten H R, Leinweber P. 2000. New insights into organic-mineral particles: Composition, properties and models of molecular structure[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 30: 399–432.
- Swanson F J, Kratz T K, Caine N, et al. 1988. Landform effects on ecosystem patterns and processes[J]. *BioScience*, 38(2): 92–98.
- Trofimov V T. 2001. Ecological geology—A novel branch of geological sciences[J]. *Earth Science Frontiers*, 8: 27–35.
- Trofimov V T. 2004. Approaches, principles and criteria of evaluation of ecological, geological conditions[J]. *Earth Science Frontiers*, 11: 533–542.
- Trofimov V T. 2008. Ecological geology, environmental geology, geoecology: Contents and relations[J]. *Moscow University Geology Bulletin*, 63: 59–69.
- Unger F. 1836. Über den Einfluss des Bodens auf die Vertheilung der Gewächse: Nachgewiesen in der Vegetation des nordöstlichen Tirol's[M]. Bei Rohmann und Schweigerd.
- Von Marilaun A K. 1895. The natural history of plants, their forms, growth, reproduction, and distribution[M]. London: Blackie and Son.
- Wang Q, Tang D X, Zhang Q Y, et al. 1991. Study on composition and structural characteristics of granite residual soils in Eastern China[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, (1): 73–81(in Chinese with English abstract).
- Wang C S, Wang D K. 1997. On the 1 : 50 000 ecological geological investigation[J]. *Geological Bulletin of China*, 16(1): 56–59 (in Chinese with English abstract).
- Xing H X, Li L, Ge W Y, et al. 2019. Establishment of environmental geological map of economic zone on the west side of the Taiwan Straits based on the division of environmental geological problems[J]. *Geological Review*, 65(4): 1031–1037(in Chinese with English abstract).
- Xiong Y, Chen J F. 1989. Soil Colloids (Volume 3): Properties of Soil Colloids [J]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Yang C J. 2020. The idea of geo-information tupu and its practices[J]. *Journal of Geo-information Science*, 22(4): 697–704(in Chinese with English abstract).
- Zhang G L, Li D C. 2022. Field manual for soil description and sampling[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Zhang H Y, Wang Q M, Lu X J, et al. 2003. On geographic framework of geo-informatic Tupu method[J]. *Journal of Geo-information Science*, 5(4): 101–103(in Chinese with English abstract).
- Zeng Q M, Wang Y P, Zhu H, et al. 2020. Research on the compilation of environmental geological map of the Guanzhong basin urban agglomeration[J]. *Northwestern Geology*, 53(1): 215–221(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈克强. 2011. 地质图的产生、发展和使用[J]. *自然杂志*, 33(4): 222–230, 250–251.
- 陈述彭. 2001a. 地学信息图谱探索研究[M]. 北京: 商务印书馆.
- 陈述彭. 2001b. 历史轨迹与知识创新[J]. *地理学报*, 56: 1–7.
- 核工业标准化研究所, 等. 2014. 地浸砂岩型铀矿地质图件编制规定 第 8 部分: 水文地球化学图. EJ/T 20003.8—2011.
- 何政伟, 黄润秋, 孙传敏, 等. 2003. 浅议“生态地质学”[J]. *国土资源科技管理*, (3): 69–72.
- 科切特科夫. 1998. 关于俄罗斯地质生态制图的构想[J]. *四川地质科技情报*, (4): 43–43.
- 李金发. 2014. 为生态文明服务的地质调查工作[J]. *资源环境与工程*, 28(1): 1–4.
- 李廷栋. 1999. 加强地球表层系统的研究和地质制图工作[J]. *第四纪研究*, (3): 193–197.
- 廖克. 2002. 地学信息图谱的探讨与展望[J]. *地球信息科学*, (1): 14–20.
- 廖克, 秦建新, 张青年. 2001. 地球信息图谱与数字地球[J]. *地理研究*, (1): 55–61.
- 刘长礼, 张云, 张建羽, 等. 2019. 1 : 5 万综合工程地质图编制方法[J]. *中国地质调查*, 6: 86–93.
- 毛沛妮, 庞奖励, 黄春长, 等. 2017. 汉江上游黄土常量元素地球化学特征及区域对比[J]. *地理学报*, (2): 279–291.
- 孟庆华, 杨青齐, 谢海澜, 等. 2019. 浅谈环渤海经济区环境地质图编图[J]. *地质调查与研究*, 42(2): 129–134.
- 聂洪峰, 肖春蕾, 戴蒙, 等. 2021a. 生态地质调查工程进展与主要成果[J]. *中国地质调查*, 8: 1–12.
- 聂洪峰, 肖春蕾, 郭兆成. 2019. 探寻生态系统运行与演化的秘密——生态地质调查思路及方法解读[J]. *国土资源科普与文化*, 21: 6–15.
- 聂洪峰, 肖春蕾, 任伟祥, 等. 2021b. 生态地质研究进展与展望[J]. *中国地质调查*, 8: 1–8.
- 彭华. 2011. 中国南方湿润区红层地貌及相关问题探讨[J]. *地理研究*, 30(10): 1739–1752.
- 彭华, 闫罗彬, 陈智, 等. 2015. 中国南方湿润区红层荒漠化问题[J]. *地理学报*, 70: 1699–1707.
- 奇 A B, 刘吉成. 1997. 论地质生态制图方法[J]. *国土资源信息化*, (2): 7–10.
- 齐清文, 池天河. 2001. 地学信息图谱的理论和方法[J]. *地理学报*, 56: 8–18.
- 王清, 唐大雄, 张庆云等. 1991. 中国东部花岗岩残积土物质成分和结构特征的研究[J]. *长春地质学院学报*, (1): 73–81.
- 王长生, 王大可. 1997. 试论 1 : 5 万生态地质调查[J]. *地质通报*,

- 16(1): 56–59.
- 邢怀学, 李亮, 葛伟亚, 等. 2019. 基于环境地质问题分区的海峡西岸经济区环境地质图编图研究[J]. 地质评论, 65: 1031–1038.
- 熊毅, 陈家坊. 1989. 土壤胶体 (第三册): 土壤胶体的性质[M]. 北京: 科学出版社.
- 杨存建. 2020. 地学信息图谱思想与实践探索[J]. 地球信息科学学报, 22(4): 697–704.
- 曾庆铭, 王祎萍, 朱桦, 等. 2020. 关中盆地城市群环境地质图编图研究[J]. 西北地质, 53(1): 215–221.
- 张甘霖, 李德成. 2022. 野外土壤描述与采集手册[M]. 北京: 科学出版社.
- 中国地质调查局. 2019a. 区域地质调查技术要求 (1 : 50 000)[S]. DD 2019—01.
- 中国地质调查局. 2019b. 生态地质调查技术要求 (1 : 50 000)[S]. DD 2019—09.
- 中华人民共和国自然资源部. 2014. 遥感解译地质图制作规范 (1 : 250 000)[S]. DZ/T 0264—2014.
- 中华人民共和国自然资源部. 2023. 自然资源部办公厅关于印发《中国陆域生态基础分区 (试行)》的通知. 自然资办发〔2023〕19 号. http://gi.mnr.gov.cn/202306/t20230614_2791436.html.
- 张洪岩, 王钦敏, 鲁学军, 等. 2003. 地学信息图谱方法研究的框架[J]. 地球信息科学学报, 5: 101–103.