

DOI: 10.12401/j.nwg.2023073

西南山区生态地质调查技术方法研究

欧阳渊¹, 刘洪^{1,2,*}, 张景华¹, 唐发伟¹, 张腾蛟¹, 黄勇¹, 黄瀚霄¹,
李富¹, 陈敏华¹, 宋雯洁³

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610200; 2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;
3. 防灾科技学院地质工程学院, 河北 廊坊 430074)

摘要: 生态地质调查以区域地质调查成果为基础, 查明调查区生态地质现状和主要生态地质问题, 研究生态环境与地质条件之间的联系, 并开展生态地质综合评价。笔者利用在大凉山区和三峡库区生态地质调查的探索经验, 总结了西南山区生态地质调查与评价思路和技术方法, 主要取得以下认识: ①地质条件是生态系统的物质基础和孕育环境, 地质条件通过制约土壤、水文、地形地貌、动力作用、地质灾害等生态地质条件, 而制约生态系统质量和生态环境发展差异。②西南山区成土母质主要是下伏基岩原地风化或风化后近距离迁移形成的, 存在明显的岩石-土壤-植被物质传导链条, 地质条件是制约该地区生态环境质量的重要因素。③对地质建造和地质构造等地质条件的分析和研究, 是在该地区进行生态地质调查的基础。④提出了西南山区生态地质调查的目的任务、工作思路、工作内容、技术路线和主要技术方法。该成果可为西南山区开展生态地质调查提供借鉴案例, 同时对生态地质学科的建设 and 全国生态地质调查方法体系的建立也具有一定支撑作用。

关键词: 生态地质; 地球关键带; 地球表层系统; 宜居地球; 西南山区

中图分类号: P66; P622; X-1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)04-0218-25

Exploration Techniques and Methods of the Eco-Geological Survey in Mountainous Region, Southwest China

OUYANG Yuan¹, LIU Hong^{1,2,*}, ZHANG Jinghua¹, TANG Fawei¹, ZHANG Tengjiao¹, HUANG Yong¹,
HUANG Hanxiao¹, LI Fu¹, CHEN Minhua¹, SONG Wenjie³

(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610200, Sichuan, China; 2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. School of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, Hebei, China)

收稿日期: 2023-02-10; 修回日期: 2023-04-21; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金(92055314、42272106、42202105), 中国地质调查项目(DD20221776、GC20230706、DD20230013), 宁夏生态地质调查示范项目(NXCZ20220201), 广东省地质勘查与城市地质专项([2022]-21), 国家重点研发计划(2021YFC2901903), 国际地球科学计划(IGCP 741)和西南地质科技创新中心“刘宝珺院士基金”联合资助。

作者简介: 欧阳渊(1982-), 男, 正高级工程师, 硕士生导师, 从事遥感地质、生态地质研究和自然资源综合调查工作。E-mail: ouyangyuan@mail.cgs.gov.cn。

* 通讯作者: 刘洪(1987-), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 从事矿床学、岩石学、生态地质研究和自然资源综合调查工作。E-mail: liuh@mail.cgs.gov.cn。

Abstract: Eco-geological survey is a kind of foundational geological survey, which is based on regional geological survey to find out the current situation and the problems of eco-geology, study the relationship between ecological environment and geological conditions, and carry out eco-geology comprehensive evaluation. The purpose is to serve the security and management of natural resources, ecological protection and restoration. Based on the experience of eco-geological survey and exploration in Daliangshan area, this paper summarizes the ideas and technical methods of eco-geological survey and evaluation applicable to the mountainous area in SW China, and mainly obtains the following understandings: ① geological conditions are the material basis of the ecosystem, and geological conditions restrict the quality of the ecosystem and the difference of the ecological environment by restricting the eco-geological conditions such as soil, hydrology, topography, dynamic action and geological disasters. ② The soil forming parent materials in the southwest mountainous area are mainly formed by in-situ weathering or by near migration after weathering, and there is an obvious rock-soil-vegetation material transmission chain, therefore, geological conditions are an important factor restricting the ecological environment quality in this area. ③ The analysis and study of geological formations and structures is the basis of eco-geological survey in this area. ④ The purpose, task, working idea, working content, technical route and main technical methods of eco-geological survey this area put forward. This study can provide a reference case for the eco-geological survey in Southwest China, and also has a certain supporting role for the construction of the ecological geology discipline and the establishment of the eco-geological survey method system of China.

Keywords: eco-geology; earth critical zone; surface-earth system; habitable earth; mountainous region in Southwest China

从地球系统多圈层交互作用角度,认识地质环境的变化规律(孙枢等, 2005; 任纪舜等, 2019; 朱日祥等, 2021), 研究人-地相互关系、促进人类与地质环境协调共处, 维护好地球的生态平衡, 是人类生存发展面临的重大课题(张永双等, 2017; 吴中海等, 2021)。新时代自然资源工作的新职责赋予了地质调查工作新使命和定位(李仰春等, 2018), 促使了地质调查工作与生态保护修复和国土空间用途管制的结合(李金发等, 2014, 2016; 殷志强等, 2018; 张永双等, 2021)。生态地质学是研究生态与地质环境相互关系及作用机理的科学(聂洪峰等, 2019), 调查及研究对象是岩石圈-水圈-土壤圈-大气圈-生物圈相互作用的地球表层系统(杨巍然, 2006; 丁永建等, 2013; 杨建锋等, 2014; 石建省等, 2019; 侯红星等, 2021; 刘媛媛等, 2021; 张甘霖等, 2021)。生态地质调查是基于区域地质调查成果的综合性地质调查工作, 调查的目的是服务于国土空间用途管制和生态保护与修复(袁国礼等, 2023)。

中国生态地质调查工作起步较晚, 迫切需要地质工作者通过深入实践和探索来总结适用于不同地区的生态地质调查评价技术方法。为更好地支撑西南地区生态文明建设和生态屏障建设, 探索总结一套适

用于西南山区的生态地质调查评价方法, 中国地质调查局成都地质调查中心选择大凉山区和三峡库区开展生态地质调查调查和研究生态地质分区和评价, 提出了区域生态保护与修复和国土空间用途管制的对策建议。在大凉山区和三峡库区生态地质调查及方法探索的基础上, 笔者系统总结了适用于西南山区的生态地质调查评价思路和方法, 以期为其他地区的工作提供借鉴案例。该思路和技术方法可进一步推广到全国亚热带、温带山区的生态地质调查与评价工作中, 对全国生态地质调查方法体系的完善和生态地质学科的建设也具有一定支撑作用。

1 生态地质调查现状

1.1 国际现状

20 世纪 30 年代, 前苏联学者 Troll 首次提出地质学与生态学交叉学科——“地质生态学(Geoecology)”概念(Trofimov et al., 1994a; 何政伟等, 2003)。俄罗斯学者 Trofimov 等(1994b)进一步建立了“生态地质学(Eco-Geology)”的概念, 把生态地质学定义为地质学的分支学科, 并认为生态地质学是把地质环境(岩石圈表层)作为生态系统的组成部分进行研究。此外,

比利时、英国、印度和新西兰等国家的学者先后撰文从不同角度阐述了有关生态地质学的定义、理论和研究内容(Swennen et al., 1994; Kellaway, 1995; Panda et al., 1995; Williams et al., 1995; Dickinson et al., 1996; Kucha et al., 1996)。20世纪90年代以来,面对人与地球可持续发展问题,许多国家都开始生态地质相关的调查和研究工作。其中,俄罗斯的先后出版了1:20万、1:10万、1:5万和1:2.5万等各类比例尺的生态地质调查相关规范(Trofimov, 2008; Dmitrievich et al., 2012),还进行了诸如农业生态地质、城市生态地质、大江大河及大型湖泊的生态地质、大型工程的生态地质等专项地质调查(李瑞敏等, 2004; 李仰春等, 2018)。

进入21世纪以来,美国科学家提出“地球关键带(Earth Critical Zone)”的概念(National Research Council, 2001),以地球关键带这一概念对地球表层系统进行了具有操作意义上的划分(Lin, 2010; Giardino et al., 2015; Zhang et al., 2019; 张丽等, 2021),也更加具体化了生态地质学的调查和研究对象。目前,俄罗斯已经建立了生态地质学研究体系开展了一系列生态地质调查及填图+生态地质监测(国家环境监测系统)+生态地质模拟和生态地质功能分析评价等工作(聂洪峰等, 2021a)。各国学者从各自的角度进一步撰文陈述了各自对生态地质学的理解,将生态地质的概念进一步扩展(Vartanyan et al., 2006; Trofimov, 2009, 2010, 2013; Trofimov et al., 2010; Korolev et al., 2012; Kumar et al., 2015; Ulrikh et al., 2016)。然而,国际上对生态地质学的定义和认识至今尚不统一。

1.2 国内现状

20世纪50~90年代,中国老一辈科学家就提出了与社会经济密切相关的“地球表层系统(Surface-Earth System)”的概念(钱学森, 1994; 李廷栋, 1999),认为地球表层研究是“跨地理学、气象学、地质学、工农业生产技术、技术经济和国土经济的新学科”(钱学森, 1994; 黄润秋, 2001; 胥勤勉等, 2014)。20世纪90年代以来,中国学者也开始涉足生态地质调查研究领域(陶于祥等, 1998; 卢耀如, 1998; 林景星等, 1999, 2003; 朱裕生, 1999)。1994年,中国首次在大巴山地区开展了1:5万生态地质调查试点,并对生态地质环境进行了总体评价(王长生等, 1997)。20世纪90年代末,原地质矿产部部署实施了“1:5万四万幅生态环境地质调查”试点项目,评价了调查区自

然生态质量,提出了区域国土资源开发利用规划和建设(蒋惠忠等, 2002)。

21世纪以来,中国学者从地质条件对土壤及生态环境的制约机制(汪振立等, 2009; 张腾蛟等, 2020; 李樋等, 2021a; 张慈等, 2021)、新构造运动的生态环境效应(刘洪等, 2021)、地层岩性对植物群落分布的影响(张恋等, 2021)、岩石-土壤-植物的元素传导过程(李樋等, 2022, 2023)、成土母质及土壤地质单元分类(刘洪等, 2020; 欧阳渊, 2021)、土壤厚度调查(李富等, 2021a, 2021b)、岩石-土壤-植被一体化数据系统(何政伟, 2002)、地质背景与生态系统演化(张景华等, 2021c)、地质背景与农业种植(张振平, 2004; 冯乃琦等, 2022)、生态地球化学(金雄伟等, 2020; 姬华伟等, 2021; 于俊博等, 2021; 王乔林等, 2021; 曾琴琴等, 2021; 张亚丽等, 2021; 居宇龙等, 2022)、生态地质环境系统(谢亚军等, 2018; Sun et al., 2019; 彭建兵等, 2022; 王颖维等, 2023)、岩溶区生态地质(曹建华等, 2004; 郭纯青等, 2005; 张连凯等, 2021)、荒漠区生态地质(古琴等, 2007; 刘建宇等, 2021)、人类世生态地质学(孙立广等, 2017)、小流域生态地质(许向宁等, 2004; 韩玉等, 2020; 杜尚海等, 2022; 王尧等, 2023)、生态地质编图方法(刘洪等, 2023)、生态环境演化与监测(程朋根等, 2015; 方正等, 2020; 黄振兴等, 2022)、矿山生态修复(李保杰等, 2015; 朱鹏等, 2016; 徐嘉兴等, 2017; 杨志, 2019; 张昊等, 2021; 胡振琪等, 2022; 冯立等, 2023)、生态地质评价与区划(王宁涛等, 2012; 李万钰等, 2020; 张景华等, 2020, 2021a; 杜华明, 2021; 王鹏等, 2021; 刘子金等, 2022; 张林等, 2022)、生态环境地质承载力(赵银兵, 2009; 倪忠云, 2011; 赵银兵等, 2022; 王化齐等, 2023; 张景华等, 2023)和生态地质教育(汪振立等, 2012)等不同方面对生态地质学进行了相关论述。

中国地质调查局先后开展了多项生态地质调查工作。例如,2001年在“1:25万区域地质调查”工作中增加生态地调查内容;2003年开展“1:25万铁岭市幅生态地质调查”,并与俄罗斯相关机构合作开展了系统的生态地质调查与研究,探索以城镇阿赫农林规划为中心的生态调查方法的体系(陈树旺等, 2012)。2017年开展“承德市国家生态文明示范区综合地质调查”,探索基于地质建造适用于华北浅山区的生态地质调查方法(王京彬等, 2020; 殷志强等, 2020a);2019年以来实施新一轮生态地质调查计划和

工程(聂洪峰等, 2019; 肖春蕾等, 2021b), 在全国层次、西南大凉山区、东北大兴安岭林区、黄河源高原寒区、华南赣南山地丘陵区 and 滇西北山区, 以及《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021~2035年)》中的“三区四带”, 包括高原生态屏障区、黄河重点生态区(含黄土高原生态屏障)、长江重点生态区(含川滇生态屏障)、东北森林带、北方防沙带、南方丘陵山地带和海岸带等地区(聂洪峰等, 2021a; 肖春蕾等, 2021a; 李文明等, 2022), 部署了多个生态地质调查试点项目, 目的在于初步探索不同尺度、不同地质背景和不同地理景观地区 and 不同生态功能区的生态地质调查、评价和监测技术方法。此外, 广东、浙江、宁夏、湖北、河南、广西、河北、重庆和陕西等地也陆续开展了省级生态地质调查项目的探索。这些工作将生态保护修复和国土空间用途管制列为生态地质调查的新使命, 将中国的生态地质调查工作推向一个新的高潮。

1.3 生态地质调查方向评述

目前来看, 虽然各个团队开展了一些生态地质调查评价方法的初步探索, 逐渐丰富了生态地质调查的定义。但还有一些诸如定义不够准确、研究内容不够明晰、成果的表达也不够统一和学科体系和人才团队亟须构建等问题, 适用于不同地质—地理条件的生态地质调查评价方法也需进一步探索和规范。

生态地质调查评价工作仍需在以下4个方面突破: ①开展生态地质关键理论和技术问题攻关, 加强典型地段多圈层交互作用分析, 揭示大气圈、生物圈、土壤圈、岩石圈、水圈等多圈层各相关要素间的相互作用过程, 分析生态系统演化的地质学机理。②创新地球关键带(生态地质交互带)生态地质调查技术方法, 研发土壤矿物质组分、土壤含水量、森林覆盖度、生态问题等生态地质调查要素智能化提取、生态空间变化趋势模拟等方法, 建立生态地质单元类分级指标体系, 划分生态地质单元, 形成生态地质适宜性评价、生态地质分区评价、重大生态地质问题评估、生态修复效果评估等方法。③建立星空地网一体化的生态地质调查监测评价技术体系。④探索绿色矿山勘查、矿山生态修复治理地复垦方法技术。

2 西南山区生态地质特征

2.1 西南山区生态地质背景

文中所定义的“西南山区”, 是指生态地质调查

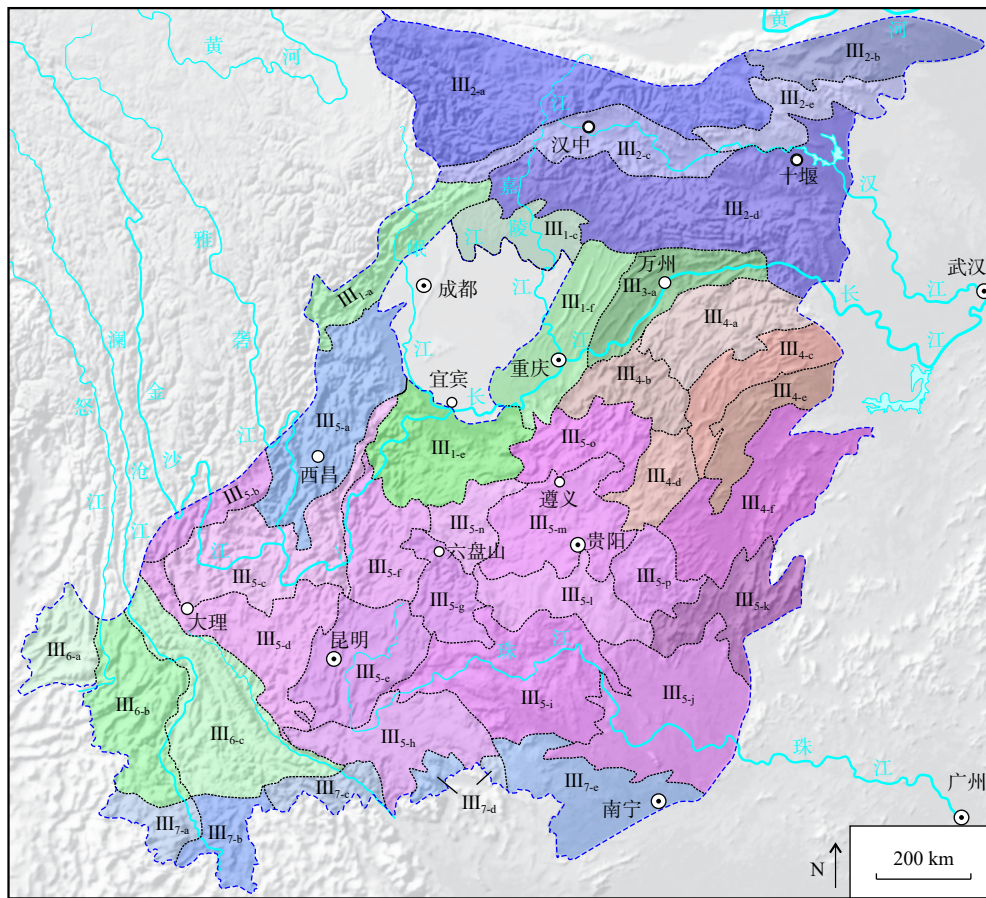
工程划分的全国生态地质分区(聂洪峰等, 2021b)中“西南生态地质大区(Ⅲ)”(图1), 除去平原农业区和浅丘农业区以外的山区部分。该区域主要包括四川盆地生态地质区(Ⅲ₁)、秦巴山地生态地质区(Ⅲ₂)、三峡水库生态地质区(Ⅲ₃)、武陵-雪峰山生态地质区(Ⅲ₄)、云贵高原生态地质区(Ⅲ₅)、滇中西山地生态地质区(Ⅲ₆)和滇桂南部生态地质区(Ⅲ₇)等7个Ⅱ级生态地质分区(图1), 以及四川盆地西部岷山-邛崃褶断低山云杉冷杉林常绿阔叶林生态地质亚区(Ⅲ_{1-a})、四川盆地北部褶断低山农林复合生态地质亚区(Ⅲ_{1-c})、四川盆地南缘岩溶常绿-落叶阔叶林生态地质亚区(Ⅲ_{1-e})等42个三级生态地质分区(图1, 表1)。

西南山区在一级大地构造划分上, 主体属扬子陆块区(YZ)(图2), 北缘属秦祁昆造山系(QK)和华北陆块区(NC)小部分, 西南角为西藏-三江造山系(XS)(图2)(潘桂棠等, 2009; 尹福光等, 2021)。跨越的二级大地构造分区主要包括豫皖陆块(YW)、秦岭弧盆系(QL)、上扬子陆块(UY)、三江弧盆系(SJ)、羌塘-保山地块(QB)和拉萨-腾冲地块(LT)(图2)。三级构造分区包括川中前陆盆地(UY₃)、扬子陆块南部碳酸盐岩台地(UY₄)和上扬子东南缘被动边缘盆地(UY₅)等24个分区(图2)。该地区属于特提斯-喜马拉雅与滨太平洋两大全球巨型构造域结合部位, 地质构造复杂、沉积建造多样、变质作用强烈、陆块周缘岩浆活动频繁(江新胜等, 2020; 王立全等, 2021)。特殊的地质条件制约了西南山区地形地貌、气候环境和生态系统形成和发展。

西南山区主要为海拔1000~3500 m的山地、高山地, 局部地区海拔在1000 m以下, 同时也存在少量4000 m以上的雪山。整体为亚热带湿润季风气候, 局部为热带湿润季风气候和温带湿润-半湿润季风气候; 地貌上包括起伏山地、低山岭谷、丘陵、盆地和岩溶石山区等; 土壤类型主要为红壤、黄壤、紫色土、淋溶土和水稻土, 局部为砖红壤和高山地土; 植被分带上主要为热带常绿阔叶林, 局部为热带常绿季雨林、温带落叶栎林。西南山区自然条件的复杂性, 生态环境存在一定的脆弱性, 同时具有环境变化的敏感性和影响范围的广泛性(李文华等, 2000)。

2.2 地质条件对生态环境的影响

地质条件是地质环境的物质载体, 地质环境则深刻地影响着其上发育的生态系统(图3)。一个地区在相近的气候条件下, 地质建造条件和地质构造条件的



生态地质分区代号解释见表 1

图 1 西南山区生态地质分区简图(据聂洪峰等, 2021b 修改)

Fig. 1 Eco-geological division of mountainous region in SW China

不同会直接导致区内土壤性质、水文条件、地形地貌和地球表层系统稳定性等环境要素的不同,而这些环境要素的不同又会引起热量、空气、水分、养分和空间等生态因子的变化,从而造成生态系统质量和生态环境的差异(Gruber et al., 2019; Wilson, 2019; 张腾蛟等, 2021; 周爱国等, 2021; Li et al., 2022)。因此,地质条件与生态环境之间有着密切的联系(图 3)。地质条件对生态环境的制约可以从地质建造和地质构造 2 个方面来解读。

2.2.1 地质建造条件对生态环境的影响

岩石的类型、结构、构造、矿物组成影响土壤的质地、结构、厚度等物理特征,从而产生不同的植物立地条件。例如,在大凉山区,牦牛山区等地的中酸性岩建造区,因岩石含有大量的石英颗粒,抗风化能力强,形成的土壤质地普遍较粗;而普格、雷波等碳酸盐岩建造区土壤黏粒含量高而砂粒含量低(图 4);安宁河谷等经河流冲积形成的冲积建造区上发育的土

壤多是砂黏土层相间;而山麓洪积岩石碎屑(洪积母质)上发育的土壤常会有粗大的角砾石。

岩石的矿物组成、化学成分影响土壤的化学性质,直接影响生态系统发育的物质基础。例如,中酸性岩风化形成的土壤含石英多,含铁锰矿物少,土壤盐基离子少,土壤往往偏酸;由中性岩或基性岩风化形成的土壤,一般富含丰富的钙和磷,盐基含量较为丰富,土壤多为中性;碳酸盐岩风化形成的土壤,因其盐基含量十分丰富,土壤多为碱性。

地质建造的化学组成影响其形成土壤的元素含量(刘洪等, 2015, 2019; 严明书等, 2018),尤其是营养元素和重金属元素的含量水平(Bonfatti et al., 2020; 李槌等, 2021b; 刘洪等, 2023),从而对地域性植被、特色农产品、道地药材(卫晓锋等, 2020)具有重要的影响。

岩石的类型、矿物组成、化学成分对土壤形成发育的方向和速率也有决定性的影响,从而影响稳定生

表1 西南地区生态地质分区表(据聂洪峰等, 2021b 修改)

Tab. 1 Eco-geological division mountains region in SW China

一级生态地质分区	二级生态地质分区	三级生态地质分区
西南生态地质大区(Ⅲ)	四川盆地生态地质区(Ⅲ ₁)	四川盆地西部岷山-邛崃褶皱低山云杉冷杉林常绿阔叶林生态地质亚区(Ⅲ _{1-a})
		四川盆地北部褶皱低山农林复合生态地质亚区(Ⅲ _{1-c})
		四川盆地南缘岩溶常绿-落叶阔叶林生态地质亚区(Ⅲ _{1-e})
		三峡库区褶皱溶蚀平行岭谷农林复合生态地质亚区(Ⅲ _{1-f})
	秦巴山地生态地质区(Ⅲ ₂)	秦岭褶皱山地落叶阔叶-针阔混交林生态地质亚区(Ⅲ _{2-a})
		豫西南褶皱山地丘陵落叶阔叶林生态地质亚区(Ⅲ _{2-b})
		汉江上游褶皱丘陵、冲洪积堆积盆地农业生态地质亚区(Ⅲ _{2-c})
		米仓山-大巴山褶皱山地落叶阔叶-针阔混交林生态地质亚区(Ⅲ _{2-d})
		伏牛山褶皱山地、溶蚀山地常绿落叶阔叶林生态地质亚区(Ⅲ _{2-e})
		南阳盆地堆积岗坡、冲湖积平原农业生态地质亚区(Ⅲ _{2-f})
		鄂中褶皱丘陵、堆积坡岗农林生态地质亚区(Ⅲ _{2-g})
	三峡水库生态地质区(Ⅲ ₃)	三峡水库褶皱低山生态地质亚区(Ⅲ _{3-a})
	武陵-雪峰山生态地质区(Ⅲ ₄)	鄂西南岩溶中、低山常绿阔叶林生态地质亚区(Ⅲ _{4-a})
		渝东南岩溶中、低石山林草生态地质亚区(Ⅲ _{4-b})
		武陵山地岩溶中、低山常绿阔叶林岩溶生态地质亚区(Ⅲ _{4-c})
		武陵山地东南褶皱低山常绿阔叶林生态地质亚区(Ⅲ _{4-d})
		黔东南岩溶中、低山常绿阔叶林-农业生态地质亚区(Ⅲ _{4-e})
雪峰山褶皱中、低山地常绿阔叶林与农业生态地质亚区(Ⅲ _{4-f})		
云贵高原生态地质区(Ⅲ ₅)	川西南褶皱山地偏干性常绿阔叶林生态地质亚区(Ⅲ _{5-a})	
	沙鲁里山南部岩溶褶皱亚高山半干旱、半湿润暗针叶林生态地质亚区(Ⅲ _{5-b})	
	金沙江下游褶皱中山干热河谷常绿灌丛-稀树草原生态地质亚区(Ⅲ _{5-c})	
	滇中褶皱中山滇青冈-元江栲林-云南松林生态地质亚区(Ⅲ _{5-d})	
	滇中岩溶低山、丘陵滇青冈-元江栲林-云南松林生态地质亚区(Ⅲ _{5-e})	
	乌蒙山岩溶山地云南松林-羊草草甸生态地质亚区(Ⅲ _{5-f})	
	乌蒙山褶皱中山云南松林-羊草草甸生态地质亚区(Ⅲ _{5-g})	
	蒙自、文山岩溶中、低山峡谷云南松、红木荷林、罗浮栲、截果石栎生态地质亚区(Ⅲ _{5-h})	
	桂西北褶皱中、低山半湿润季风常绿阔叶林生态地质亚区(Ⅲ _{5-i})	
	桂中喀斯特常绿、落叶阔叶混交林生态地质亚区(Ⅲ _{5-j})	
	桂东北褶皱中山湿润常绿阔叶林生态地质亚区(Ⅲ _{5-k})	
	黔南褶皱山地、盆谷常绿阔叶林生态地质亚区(Ⅲ _{5-l})	
	黔中丘原盆地山原中山常绿阔叶林喀斯特脆弱生态地质亚区(Ⅲ _{5-m})	
	黔西北喀斯特中山针阔混交林生态地质亚区(Ⅲ _{5-n})	
	黔北喀斯特山原中山常绿、落叶阔叶混交林生态地质亚区(Ⅲ _{5-o})	
	黔东南褶皱山地、丘陵常绿落叶阔叶-农林业生态地质亚区(Ⅲ _{5-p})	
滇中西山地生态地质区(Ⅲ ₆)	滇西南褶皱中山宽谷北热带季雨林生态地质亚区(Ⅲ _{6-a})	
	怒江、澜沧江下游喀斯特中低山印栲林、刺斗石栎林生态地质亚区(Ⅲ _{6-b})	
	澜沧江、元江中游褶皱中山山原刺栲、思茅松林生态地质亚区(Ⅲ _{6-c})	
滇桂南部生态地质区(Ⅲ ₇)	西双版纳西部褶皱山中盆地北热带季雨林生态地质亚区(Ⅲ _{7-a})	
	西双版纳东部褶皱山中盆地北热带季雨林生态地质亚区(Ⅲ _{7-b})	
	滇南褶皱中山峡谷热带湿润雨林、山地苔藓林生态地质亚区(Ⅲ _{7-c})	
	桂西南褶皱中、低山北热带季雨林生态地质亚区(Ⅲ _{7-d})	
	桂西南喀斯特北热带季雨林生态地质亚区(Ⅲ _{7-e})	

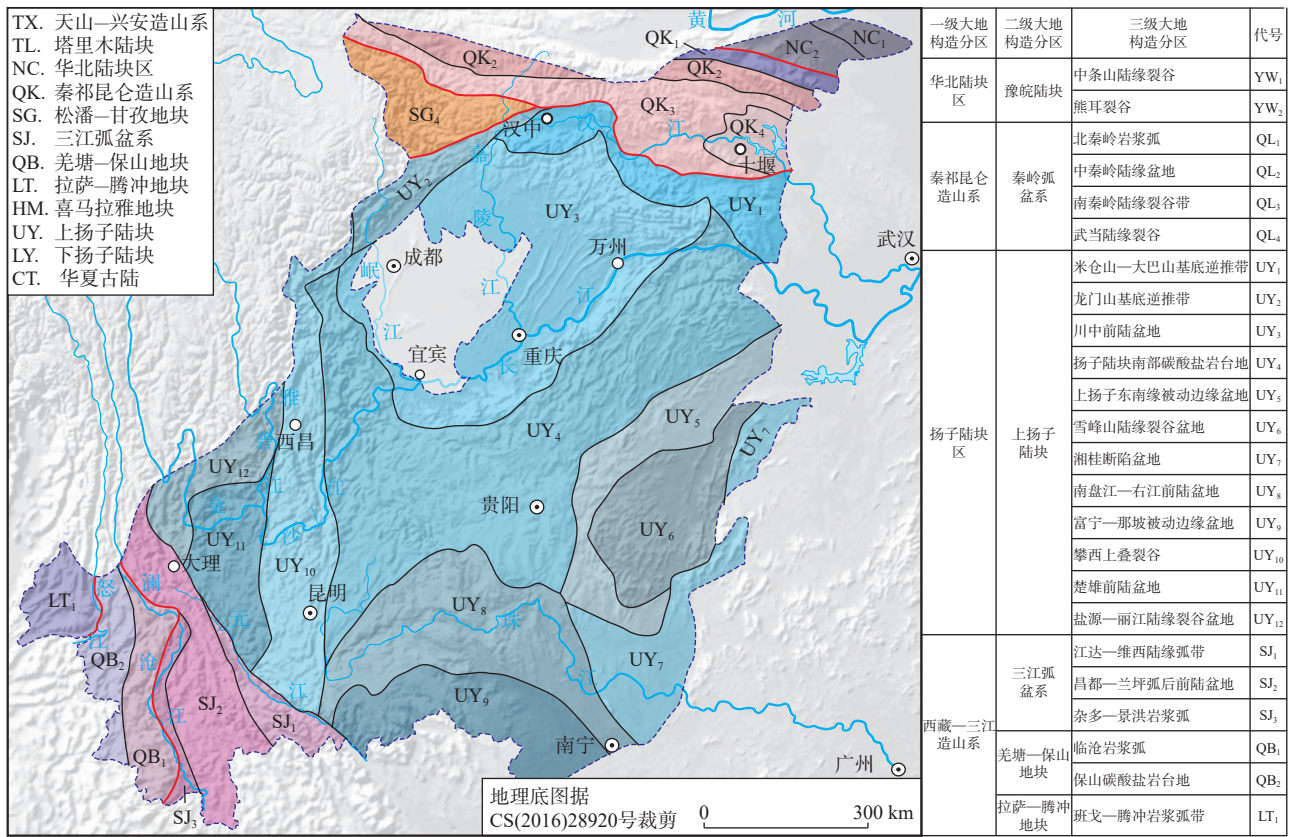


图 2 西南山区大地构造分区简图(据潘桂棠等, 2009 修改)

Fig. 2 Geotectonic division of mountainous region in SW China

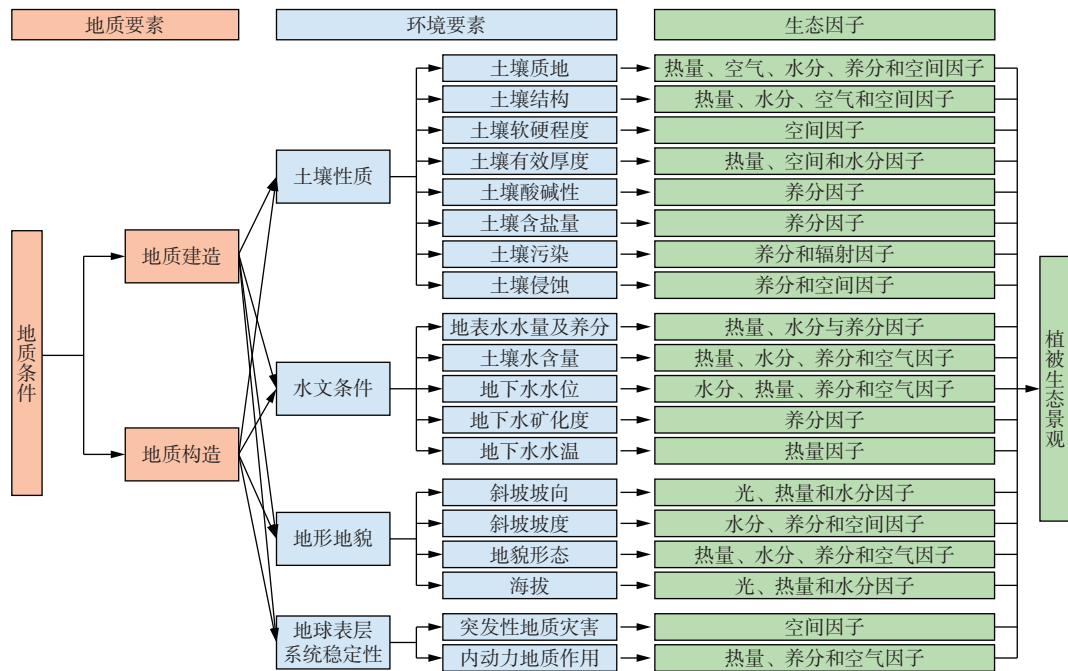


图 3 地质条件对生态环境的制约示意图

Fig. 3 Schematic diagram of restriction of geological conditions on ecological environment

态系统的形成速率。在相似的气候条件下,疏松质软的砂泥岩风化成土的速率更快,而坚硬固结的花岗岩

风化成土的速率就慢得多。

不同岩石风化破碎后形成的成土母质的透水性



A. 腐殖层; B. 淀积层; C. 母质层; R. 基岩层

图4 雷波地区碳酸盐岩风化壳剖面图

Fig. 4 Carbonate weathering crust in Leibo area

对成土作用和植被生长有显著影响。砂性母质透水性强,水分易于通过,其化学风化作用弱,可淋溶物质少,剖面分异不明显。碎屑岩和岩浆岩形成壤质母质有适当的透水性,在水分下渗的影响下,母质易发生化学风化,风化产物又能随水下移淀积,较易发生层次分化。泥质岩形成的黏质母质由于透水不良,水分在土壤中移动缓慢,土壤物质由上向下的垂直移动慢,剖面发生分异慢。

2.2.2 地质构造条件对生态环境的影响

在地质构造条件方面。生态环境变迁和地质灾害与构造活动,尤其是新构造活动密切相关(刘洪等, 2023)。岩石的褶皱、断裂、劈理以及其他面状、线状构造等。地质构造对岩石的风化成土、宏观地貌的形成、水文条件、地球表层系统的稳定性等环境要素方面都具有显著的影响(刘洪等, 2023),进而引起生态因子的变化,造成生态系统质量和生态环境的差异。

地质构造条件对土壤的形成和保存具有显著的影响。在构造破碎带上,岩石往往更容易风化形成更厚的土壤,水平或低角度岩层地区,土壤分布一般较为稳定,而在高角度或者陡立岩层地区,土壤往往更难保存。

全球尺度的板块俯冲碰撞和拉张的大地构造作用可分别形成巨大的构造山系和大陆裂谷盆地。区

域尺度的褶皱构造可以形成褶皱山地、挤压盆地、穹窿等原生褶皱地貌,还可以形成向斜山、背斜谷、单面山、猪背脊等次生褶皱地貌。区域尺度的断层作用可以形成断块山地、断陷盆地、断层崖、断裂谷地貌以及一些错断地貌和派生地貌。局部性的火山活动可以形成火山地貌和熔岩丘、熔岩垄岗、熔岩湖等火山熔岩地貌。

地质构造作用可造成岩石破裂形成断裂和裂隙,如褶皱构造中的纵裂隙、横裂隙、斜裂隙、层面裂隙和断裂构造中的断裂带及其次生断裂。这些断裂和裂隙常具有良好的导水和储水功能,尤其是张性情况下,常形成裂隙网络和裂隙含水系统,成为地下水的重要储集空间和运移通道。

地球表层系统的稳定性直接与构造活动尤其是新构造活动密切相关,构造活动直接或间接地控制着当地的地质环境演化、地质灾害和地震的发育,进而影响生态系统的发展。

2.3 地形条件对生态环境的影响

地形地貌景观是地球构造动力学过程和气候相互作用的产物,前者使地表形态直接发生变化,后者通过流域系统沉积物迁移,使地貌形态发生变化。地貌形态还是研究地质作用、气候变化和生物过程等其他过程关键边界条件(Tristan et al., 2023)。

地形地貌包括海拔、坡度和景观等,这些对岩石

的风化成土过程,以及土壤的组成、结构和厚度均有影响。在一定的区域内,海拔的不同会直接影响局部的气温、降雨等小气候因素及地形地貌的差异,从而导致土壤和植被出现明显的垂直分带现象(图5)。

地形地貌条件可能会加速或延迟气候对风化作用的影响,从而影响土壤和岩石风化层的厚度和结构。陡坡通常会加速水土流失,导致植被覆盖较少,使该地区难以形成较厚的土壤,甚至形成裸岩区。因此,在相同气候、地质和植被条件,与更平坦的场地相比,陡峭地形区土壤和岩石风化层往往较薄,土壤成熟度也较低。在缓坡区或者洼地,通常风化作用的深度更深,风化物的厚度通常会更大。在低洼地区,由于水的饱和,一些矿物的风化和有机物的分解可能会延缓,而铁和锰的流失则会加速,最终形成特有的湿地型土壤,如沼泽地、泥炭地和黑土地。在山地-平原过渡带,

树木通常很难生长在高度饱水的洼地,而被限制在靠山区一侧,低洼地区可能会形成草地或者泥炭沼泽,因为山前-平原过渡带通常也是森林-草原过渡区。同时,坡向和地形的起伏情况可能影响光照条件。地形还可影响可溶性盐的积累,山地斜坡上部的溶解盐可通过地下水位移动到低洼地区,随着水分蒸发,低洼处的溶解盐含量会增高。不同的地形区,岩石风化成土过程、物质继承关系、元素迁移往往有所不同。山区斜坡的上部或者鞍部,其成土母质类型为残积母质,物质来源于下伏基岩的风化;斜坡的中下部及山麓,母质类型为坡积母质,由基岩风化后通过近距离搬运沉积形成,物源的建造类型可能与下伏基岩相同;河谷等低洼地区母质类型为冲洪积母质,经过较长距离的搬运,其物质来源就较为复杂,与下伏基岩并无直接的物质继承关系(图6)。

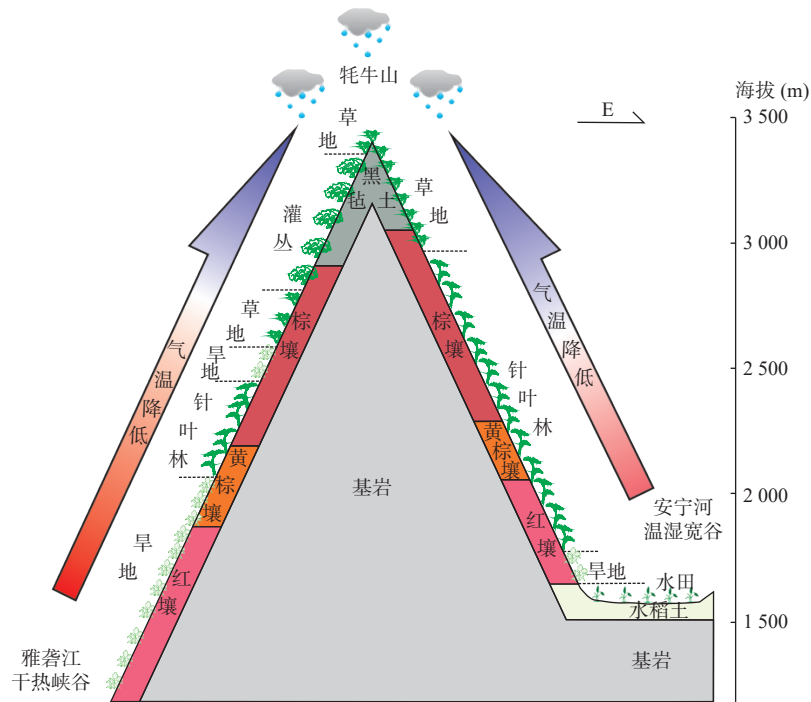


图5 四川西昌牦牛山土壤和植被的垂直分带特征图

Fig. 5 Vertical zonation characteristics of soil and vegetation in Miaoniushan, Xichang, Sichuan

2.4 地质-地形地貌-气候条件制约下的生态系统分带性案例

以四川西昌牦牛山为例,受气候、地质条件、地形地貌等因素的影响,大凉山区土壤类型和植被具有明显的垂直分带和横向分带的特征(图5)。从高到低,由于海拔引起的局部小气候和人类活动强度的差异,导致土壤和植被具有垂直分带性(欧阳渊等, 2021)。

土壤类型由高山/亚高山土壤→淋溶土→红壤、紫色土、石灰土变化,植被类型由高寒草甸→灌木→针叶林→阔叶林→旱地农作物→水田农作物变化。从东向西,由于海拔、气候、地质条件等差异,导致土壤和植被也出现横向分带性(欧阳渊等, 2021): 黄壤和石灰土带→黄棕壤、紫色土带和红壤带→棕壤、红壤带和石灰土带,黄茅埂以东为偏湿性常绿阔叶林,以西

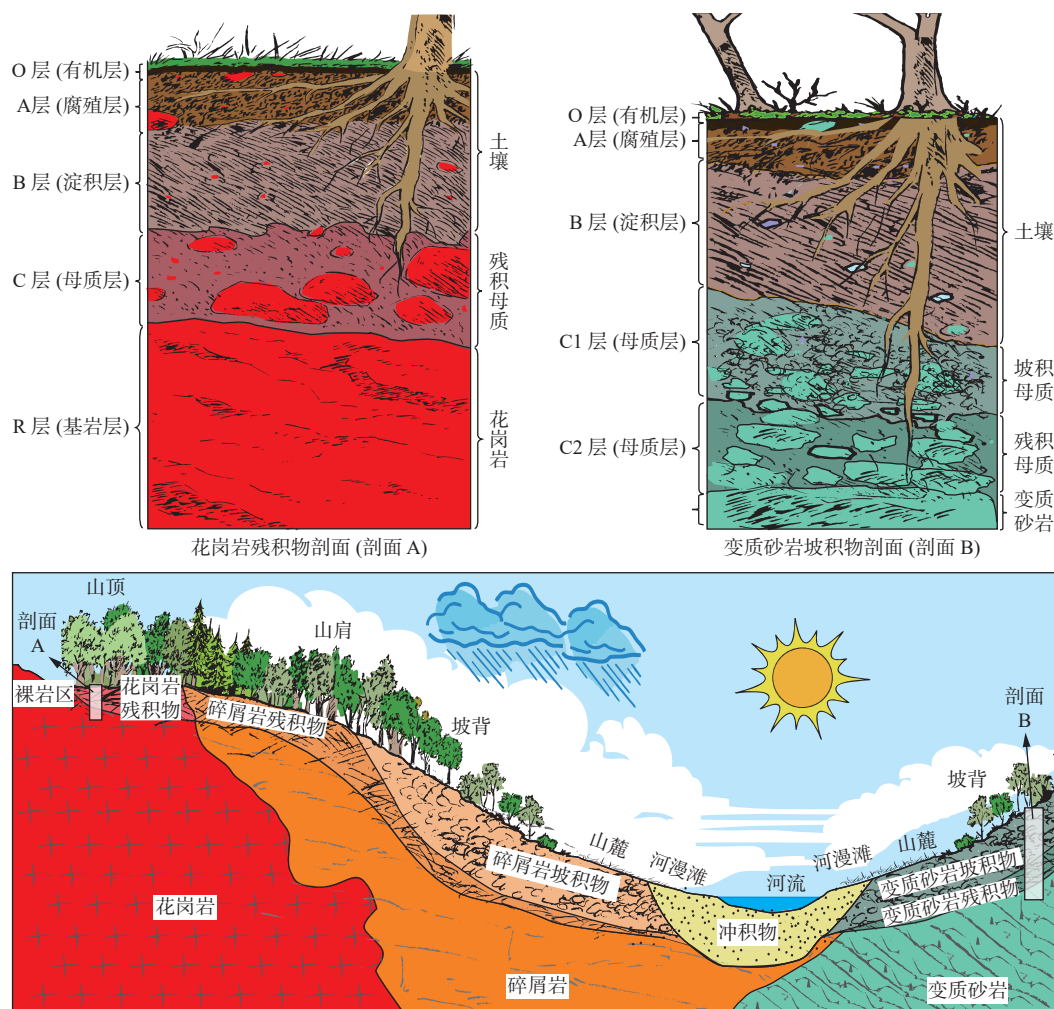


图6 地形-岩石-土壤结构模式图(据贾磊等, 2022 修改)

Fig. 6 Model map of terrain-rock-soil substrate

为偏干性常绿阔叶针叶林。

3 讨论

3.1 西南山区生态地质调查的主要思路

3.1.1 调查层次

围绕调查区生态文明建设和国土空间规划与管制对地质工作的重要需求,在详细分析已有资料的基础上,开展区域性林地、草地、湿地、耕地和建设用动态监测和重点地区生态地质详细调查。在此基础上开展生态研究工作,为解决生态地质问题提供地质资料支撑。

第一层次为市域或完整地理区域全域综合研究与评价(1:25万)。选县市域(如凉山彝族自治州、广安市等)或者完整的地理单元(如岷江上游流域、大凉山区、大娄山区等)开展全域的1:25万林草湿地

历史空间动态变化解释和1:25万生态地质调查与评价,分析调查区全域的生态地质背景。基于地质建造的分析和研究,划分调查区的生态地质调查单元(成土母质单元和土壤地质单元等),并在全国三级生态地质分区基础上进行生态地质分区和评价。

第二层次为以典型小流域或者标准图幅为调查对象的重点调查(1:5万)。前人在承德地区生态地质调查探索中指出:小流域具有相对独立的生态地质(子)系统,为人类提供了丰富的生态系统服务功能(陈莉薇等, 2014; 蒋洪强等, 2015; 王京彬等, 2020)。因此,可把小流域作为对象,开展生态地质调查评价工作。同时,为了更好的和全国1:5万区域地质调查、矿产地质调查、水工环地质调查等各类调查数据库匹配,需要选择标准图幅开展生态地质调查。为更好地建设全国层次完整的生态地质空间数据库,便于地质调查项目和资料的管理与使用,1:5万尺度的生

态地质调查工作还可以以重点调查区所在的标准图幅范围来开展地面调查,以调查区覆盖的小流域范围来开展综合评价,以调查区覆盖的行政区域(县域、乡域)进行成果集成,提供应用服务产品(王京彬等, 2020)。主要工作包括:分析生态地质背景,划分成土母质单元、土壤地质单元等生态地质调查单元,编制生态地质系列图件;有针对性、目的性地确定实地调查内容、路线以及重点区段开展生态地质路线调查,查明调查区的生态地质条件和生态地质要素,识别主要的生态地质问题。

第三层次为典型地段生态地质交互带剖析。选择各个生态地质分区内的典型地段,以生态地质垂向剖面测制为主要调查手段,深入了解不同地貌,不同地质背景条件下的岩、土、生物(覆被)关系及其纵横向变化规律,查明各个生态地质调查单元(成土母质单元和土壤地质单元等)的生态地质属性,编制主要单元的生态地质图谱。

3.1.2 工作思路

西南山区生态地质调查对象包括气候、地貌、地

质体、土壤、植被、水文、地质灾害及人类工程活动等诸多方面。从实际情况出发,地质体、土壤、植被作为调查工作的对象;气候、地貌、地质灾害、人类工程活动等方面以资料收集与分析为主。总体上主要包括岩石-土壤-植被的地球关键带结构、地质建造、地质构造、土壤、植被、生态系统、水文、气象、地貌、人类活动、地质灾害等方面,其中岩石-土壤-植被的地球关键带结构和各层位的特征以实地调查为主,岩石、土壤、植被、水的理化性质以采样和测试分析为主,生态系统类型分布的历史及现状以遥感解译和资料收集整编为主,地质建造、地质构造、土壤类型、水文条件、气象条件、地貌类型、人类活动和地质灾害以资料收集整编为主。重点研究内容为岩石-土壤-生态系统(植物)之间的相互作用,区域地质条件对生态系统现状和演化的制约机制。

具体步骤可分为:资料收集整理、长时序遥感解译、野外调查和综合评价。总体思路可概括为“背景分析、现状调查、机理剖析、动态监测和综合评价”5个方面(图7)。

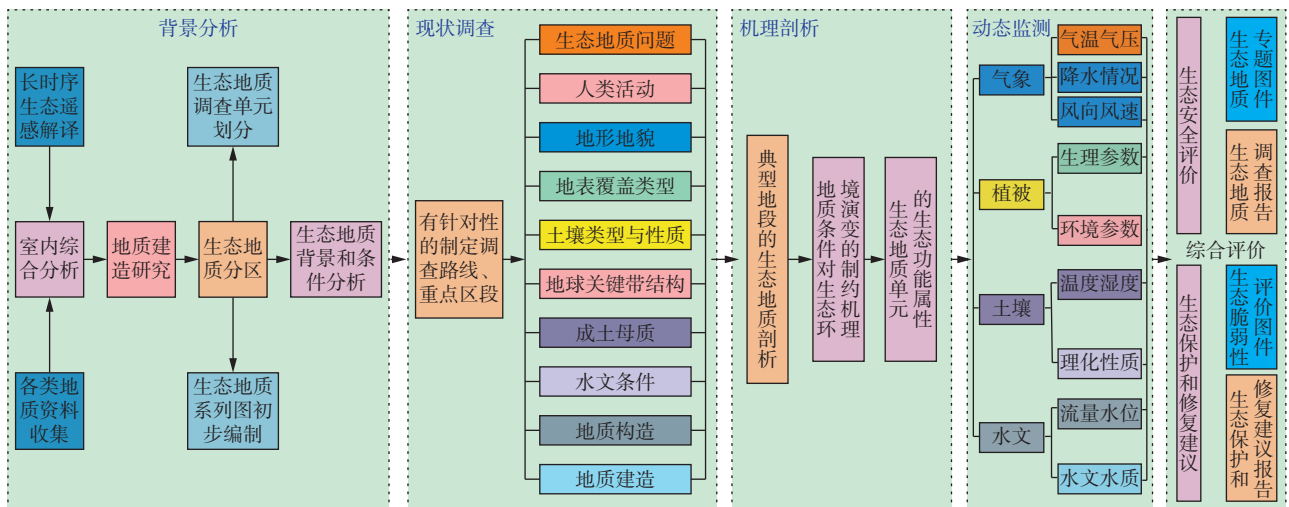


图7 西南山区生态地质调查评价一般技术路线图

Fig. 7 General technical roadmap for eco-geological survey and evaluation, mountainous region in SW China

(1)背景分析:系统收集区内的地质、地球物理、地球化学、地震、气象、水文、植被、土壤、林业、农业、区划、生态环境和国土空间规划等资料,对研究区开展预研究,总结工作区的气候条件、降雨的时空分布规律、主要的土壤类型、植被类型、国土空间规划和生态问题等生态地质背景,编制工作区相应的生态地质图件。

(2)现状调查:以遥感解译和典型地段生态地质路线调查作为工作手段,辅以地球化学和地球物理手

段,结合收集的各类自然资源数据开展各类生态地质要素的调查。查明调查区典型的岩土-土壤风化壳的结构、地质建造、地质构造、地球化学场背景和地球物理场背景等要素特征。查明调查区土壤及成土母质的类型、分布、厚度、肥力、理化性质、土地质量等要素特征。查明调查区植被的组合、分布现状及历史变化情况;查明调查区主要生态地质问题的分布和典型特征。总结海拔、小气候、地质条件和地形地貌等引起的垂直分带、横向分带和坡向分异等特征。

(3)机理剖析:在调查的基础上,针对典型地段开展生态地质剖析。通过生态地质剖面调查和生态地质垂向剖面调查调查编测等手段,剖析岩石-成土母质-土壤-植被之间的关系,研究植被类型和质量与气候、地貌、土壤、地质和水等因素的关系。研究不同气候、不同地理和地形地貌条件下岩石风化形成土壤过程的物质转化机制。研究主要营养元素和重(内)金属元素在岩石-土壤-植被中的迁移过程。研究地质条件对生态环境演化的制约机理,认识地质-生态作用的过程和制约因素。分析每个生态地质单元的生态功能属性,建立各生态地质单元的生态地质图谱。

(4)动态监测:通过人工和自动检测设备检测水文、土壤、植被和气象条件的变化,分析变化趋势和规律,研究背后的制约机理,设置阈值,实现监测预警。

(5)综合评价:将“山水林田湖草”等自然资源各个要素,视作一个生态共同体。在地质作用过程和地质条件对生态系统分布和演化机制研究的基础上,提取生态地质综合评价指标。采用相应的数学地质量化分析技术手段来进行生态地质综合评价,并预测演化趋势。利用生态地质综合评价成果,开展生态功能分区,为生态系统管理、保护与修复、国土空间用途管制、农业林业种植布局和地质灾害防治等提供和基础数据地球系统科学解决方案。

3.2 西南山区生态地质调查评价技术方法

3.2.1 生态地质调查及评价方法总结

(1)生态系统长时序遥感解译

采用多源、多时空分辨率遥感数据,通过遥感解译获取区内的自然地理、地质环境和自然资源等各种

专题信息。主要解译内容应包括土地利用类型、生态地质问题(水土流失、石漠化等)、植被覆盖度、生态系统类型。开展长时序遥感解译,获得调查区生态系统类型/质量动态变化信息,分析生态系统的数量结构特征与变化方向,研究生态系统变化的生态环境效益。

以大凉山区为例(图8),通过生态系统与土地覆被长时序遥感解译得出以下信息。大凉山区的耕地在1990~2018年具有面积持续减少的变化趋势。大凉山区除安宁河谷外,经济欠发达,其主要的、分布最广的人类工程经济活动为垦殖(耕种),受环境限制和传统观念影响,以坡地旱作耕种为主,且生产方式较落后,带来植被破坏、水土流失等生态问题,随着经济发展,国家实施退耕还林、还草,耕地面积持续减少。林地在1990~2018年整体持续增加。随着天保工程、退耕还林工程的实施,大凉山区在1990~2000年和2000~2010年2个阶段的森林生态系统有所恢复,森林的面积持续增加,而耕地的面积的有所下降,相关一部分的农田生态系统向森林和草地生态系统演化(图8)(张景华等,2020)。1990~2018年,草地生态系统面积变化趋势为减少→增加。随着植树造林活动的其加强,部分草地转变为林地,相当一部分人工林由于不适应当地的生态地质条件,又逆演化为草地,导致草地面积不断的增加。1990~2018年,增加的草地主要还是由耕地转化而来。水域和湿地出现快速增长,陆地水生生态系统得到进一步的发展和保护。其原因主要有2个方面:①近些年在大凉山区修建了大量的水利工程(张景华等,2021b)。②随

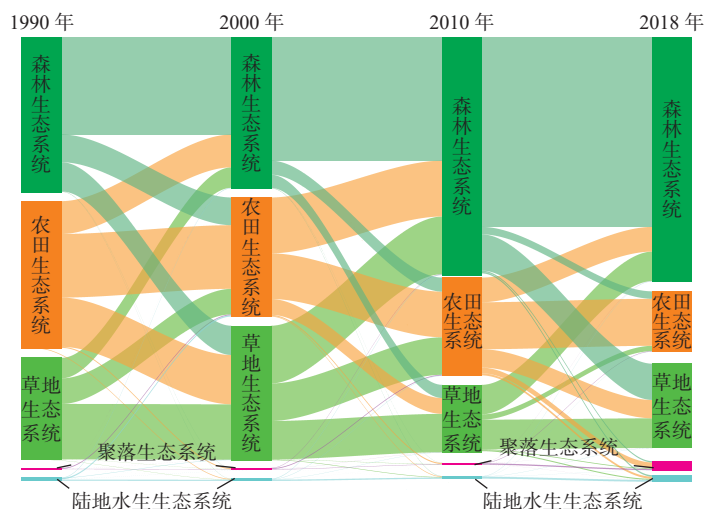


图8 大凉山1990~2018年生态系统变化示意图

Fig. 8 Schematic diagram of ecosystem changes in Daliang Mountain from 1990 to 2018

着湿地保护得到社会的重视,区内一些重要湿地得到更好的保护和修复,湿地的面积不断扩大(张景华等, 2021b)。

(2) 生态地质调查单元划分

技术方法成熟的区域地质调查以地层岩组和岩浆岩单元为基本调查单元。不同于区域地质调查,生态地质调查的概念、工作内容还没有较为统一的认识,导致不同项目不同团队对生态调查单元认识差别很大。笔者认为生态地质调查单元指的是成土母质单元和土壤地质单元等调查和成图的单元。地质条件通过制约土壤、水文、地形地貌、动力作用、地质灾害等的生态地质要素的性质和分布,而制约生态系统质量和生态环境的差异(刘洪等, 2020; 张腾蛟等, 2021)。西南山区成土母质主要是下伏基岩原地风化或风化后近距离迁移形成的,存在明显的岩石-土壤-植被物质传导链条,地质条件是制约该地区生态环境质量的重要因素。因此,对地质建造和地质构造的分析和研究,是进行生态地质调查单元划分和生态地质调查的基础(刘洪等, 2023)。

成土母质是岩石经过初步风化后形成的疏松堆积物(刘洪等, 2023),是岩石→土壤的中间产物,可以理解为“未成熟的土壤”,它具有发育成成熟土壤的潜力。不同学科不同团队对成土母质的分类有不同的方案,土壤学中往往按照成因类型开展,如残积母质、坡积母质、冲积母质、洪积母质、湖积母质等(王果等, 2009)。地质学家则更重视成土母岩对成土母质物理化学性质的制约(王京彬等, 2020; 殷志强等, 2020b),因而提出了岩性和成因类型结合的成土母质划分方案。相似岩性的岩石具有相似的造岩矿物组成和主量元素组成,但不同地质建造条件下形成的相似岩性岩石的微量元素组成差别却可能很大,而这些微量元素中的一部分对上覆植被的生长和生态系统的发育具有重要作用。成土母质的划分除了考虑母岩的岩性意外还应该考虑母岩的建造环境,并提出了基于地质建造的成土母质单元划分方案(刘洪等, 2020; 欧阳渊等, 2021)。以大凉山区为例,基于地质建造单元研究,划分出了“侏罗纪—白垩纪泥质岩类残坡积物”13个成土母质单元(欧阳渊等, 2021)。具体划分方案、命名方式和编图方式可相关参考文献(刘洪等, 2021, 2023; 欧阳渊等, 2021)的相关论述。

为区别同一地质建造上的不同土壤类型和不同地质建造上的同一土壤类型,笔者在大凉山区生态地

质调查探索中,参考前人思路(朱朝晖等, 2004),提出了基于地质建造和土壤类型研究的“土壤地质单元”概念(刘洪等, 2020)。土壤地质单元是成土母质单元(基于地质建造划分)和土壤类型相结合而成,其分类和命名表达成土母岩形成的时代和地质环境、成土母质类型、土壤类型等多重信息(刘洪等, 2020)。以大凉山区为例,共划分出了“侏罗纪—白垩纪泥质岩类紫色土”等27个土壤地质单元。具体划分方案、命名方式和编图方式可参考文献(刘洪等, 2020)及《大凉山区生态地质调查成果报告》(中国地质调查局成都地质调查中心, 2022)的相关论述。

(3) 地面调查

通过地面调查查清区域的地貌形态、成因和微地貌与土壤、植被的组合规律,为生态地质评价分区提供依据。野外调查主要分为遥感解译验证和生态地质路线调查(图9)。

遥感野外验证主要针对遥感解译中不确定的图斑开展野外核查,对可解译程度高的地区随机抽取图斑开展验证调查,以确定遥感解译的准确度。

生态地质路线调查在充分收集已有资料和遥感解译的基础上,划分成土母质单元、土壤地质单元、生态地质单元等,有针对性、目的地确定实地调查内容、路线以及重点区段的生态地质条件和主要生态问题。野外调查的工作方法主要有GPS定点、填卡式调查、代码化调查、实地影像资料数码化、现场勘查、样品采集、土壤垂向剖面测制和信手剖面编制等。野外调查内容主要包括:地形地貌、植被情况、土地利用类型、地球关键带结构、土壤性质、成土母质特征、地质条件、水文地质和地质灾害等。典型调查段采用穿越和追踪观测路线布置观测点,调查路线和观测点的布置不宜平均布置,充分考虑调查单元内备生态地质环境系统的特征及相互联系。在地质路线信手剖面的基础上,编制代表调查区典型生态地质特点的生态地质剖面图(图9)。具体的调查记录表格可查阅《西南山区生态地质调查评价技术方法总结专题报告》(中国地质调查局成都地质调查中心, 2022)的相关论述。

生态地质垂向剖面测量的目的是调查各个生态地质调查单元(成土母质单元和土壤地质单元等)的生态地质属性。剖面测制地段应选择岩石类型、地貌单元和土壤种类相对齐全,构造较为简单,岩、土、水、生观测条件良好,森林植被(包括农作物)发育完好的



图9 长江巫峡生态地质综合剖面图

Fig. 9 Eco-geological profile of Wuxia on the Yangtze River

各具特点而又通行便利的典型地区。剖面应远离各生态地质调查单元的界线,代表本单元的基本特征,优先选取残积物剖面。为便于反映地质特征,剖面方向尽可能垂直与地层走向。为刻画每个生态地质调查单元典型地段的岩、土、水、生的相互关系,剖面长度应选择30~60 m,比例尺以1:100~1:500为宜。每条生态地质垂向剖面应配套2~5条土壤垂向剖面(图10)。

3.2.2 生态地质脆弱性评价方法总结

基于大凉山区生态地质调查评价探索,笔者总结

了基于生态地质条件,针对主要生态地质问题开展的生态地质脆弱性评价方法,主要包括以下几个方面。

(1) 评价因子

从地球系统科学和多圈层交互作用来看,影响西南山区生态环境的因素主要为气象、水文、地形地貌、地质环境、人类活动,作为一级评价指标;二级指标需要依据实际情况确定,一般选取最为关键和敏感的因素。西南山区生态地质脆弱性评价的二级指标可参考大凉山区生态地质脆弱评价确定的二级指标(图11)(张景华等, 2021b)。

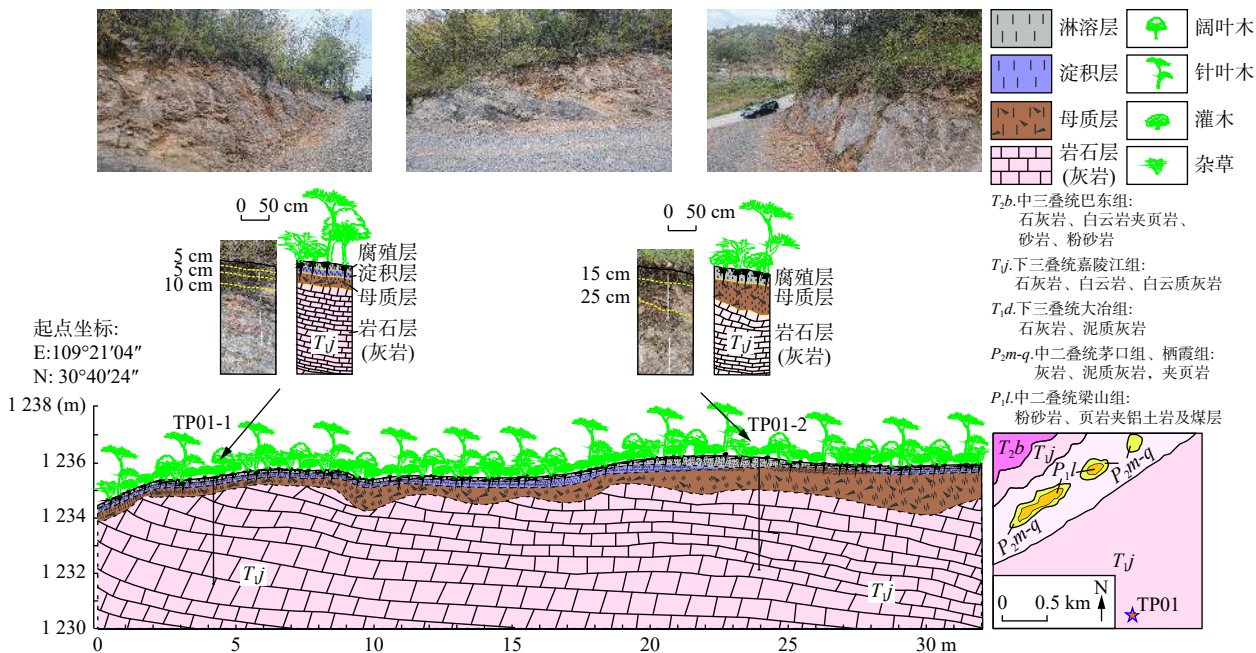


图 10 生态地质垂向剖面图实例

Fig. 10 Example of ecological geology vertical profile

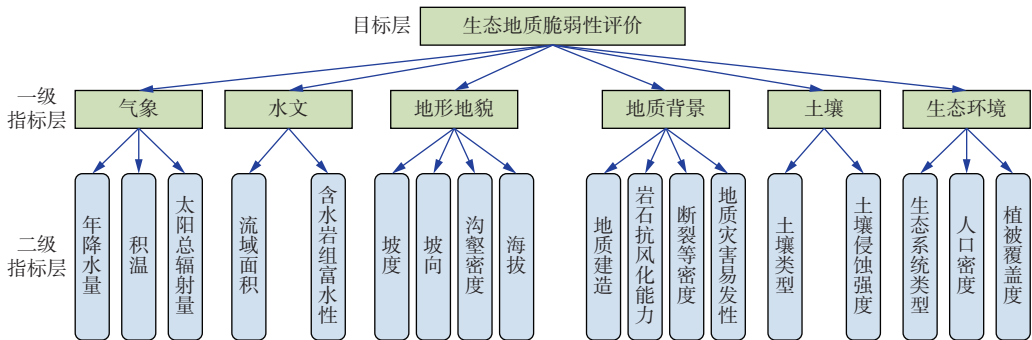


图 11 大凉山区生态地质脆弱性评价因子

Fig. 11 Evaluation factors of eco-geological vulnerability in Daliangshan Area

(2)主要评价方法

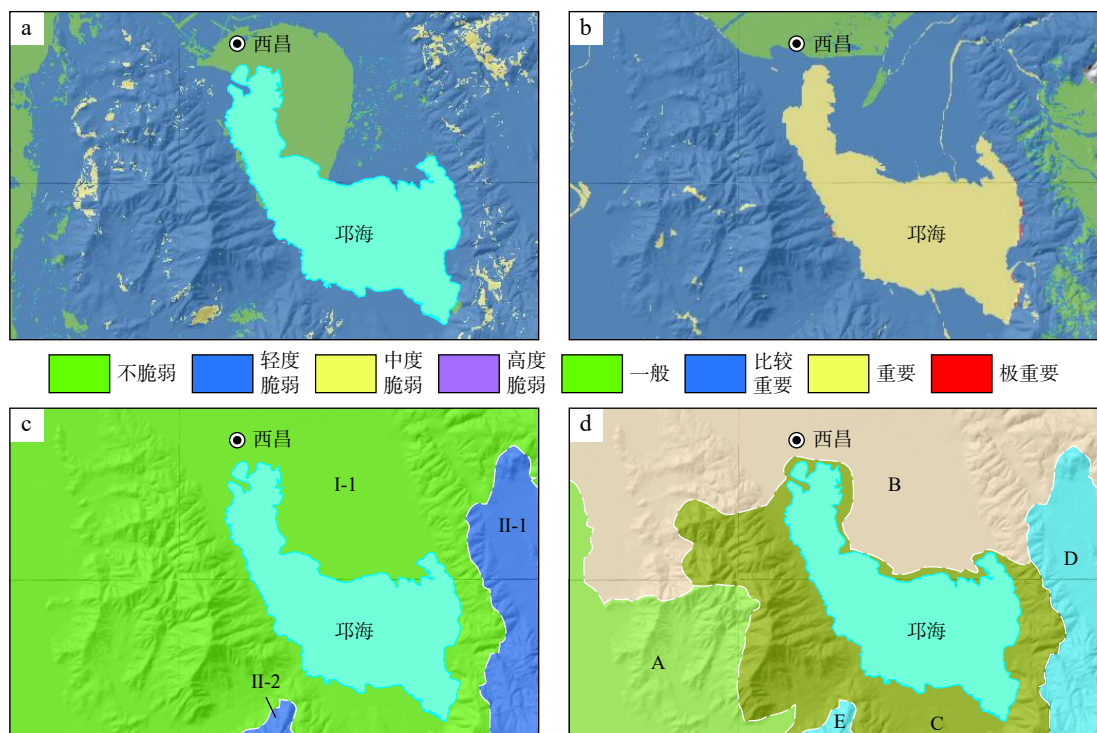
生态地质脆弱性评价是用地质、地理、生态、环境、生物、水文、土壤、农业和林业等多学科的知识,采用合适的数学地质定量分析技术手段来进行生态地质综合评价,并预测生态系统和生态地质问题的演化趋势(张景华等, 2021b)。通过在大凉山区的探索实践,认为以图层叠置法和脆弱性函数模型评价法较为适用于西南山区(张景华等, 2021b)。由于在开展生态地质脆弱性评价前,通常会开展大量的生态地质调查和综合研究工作,分析各个生态地质要素,并在 GIS 中编制生态地质系列图件。因此,可将图层叠置法和脆弱性函数模型评价法结合起来,开展西南山区生态地质脆弱性评价。

(3)评价流程

生态地质评价工作步骤主要包括指标筛选、特征抽取与量化、数据预处理、单要素生态地质脆弱性评价、生态地质脆弱性综合评价、生态地质脆弱性分区和保护修复建议提出。具体的评价过程可参考文献(张景华等, 2021b)的相关论述。

(4)评价结果

对研究区开展气象、水文、地形地貌、地质环境、土壤和生态环境等多因子指标生态脆弱性评价和生态系统服务重要性评价,形成调查评价区生态地质脆弱性评价图(图 12a)和生态系统服务重要性评价图(图 12b)。根据生态地质脆弱性等级与空间分布的相似性与差异性,并尽可能保持研究区地域和自然地理



a.生态脆弱性评价图; b.生态系统服务重要性评价图; c.生态脆弱性分区图; d.生态系统服务功能分区图; I-1. 邛海-泸山生态地质轻度脆弱区; II-1. 大兴生态地质轻度脆弱区; II-2. 大箐生态地质轻度脆弱区; A.安宁河谷农业功能区; B.西昌城镇功能区; C.邛海-泸山自然景观与水源保护功能小区; D.大兴水土保持与水源涵养功能区; E. 大箐水土保持与水源涵养功能区

图 12 西昌地区生态地质评价和生态系统服务功能分区图

Fig. 12 Ecological geological evaluation and ecosystem service functional district maps in Xichang, Sichuan

单元的完整性,开展了生态地质脆弱性分区。已川南西昌地区为例,将调查评价区划分为了3个生态脆弱性分区(图12c),5个生态系统服务功能分区(图12d),为生态保护与修复、国土空间规划提供了科学依据,并为环境管理和决策提供了资料,也为下一步生态功能区划提供依据。

3.3 推广意义

地质条件是生态系统的物质基础和孕育环境,地质条件通过制约土壤、水文、地形地貌、动力作用、地质灾害等生态地质条件,从而制约生态系统质量和生态环境发展差异。因此,查明一个地区的生态地质背景、研究生态地质系统三维结构特征和相互作用机理、开展生态地质综合评价,对这个地区生态保护修复和国土空间用途管制非常重要。前文已叙述,目前生态地质调查处于探索阶段,针对不同尺度、不同地质背景和地理景观地区系统的生态地质调查方法总结还相对缺乏。文中提出了基于地质建造研究的成土母质单元和土壤地质单元等生态地质调查单元的概念,为生态地质调查和成图指出了基本调查单元和基本

成图单元;探索了基于地质建造的生态地质调查的层次、思路和方法,探索了基于生态地质条件的脆弱性评价方法。在西南山区开展生态地质调查和评价工作提供了借鉴思路和案例范本,同时该思路和技术方法也可进一步推广到全国亚热带、温带山区的生态地质调查与评价工作中,对全国生态地质调查方法体系的完善和生态地质学科的建设也具有一定支撑作用。

4 结论

(1)西南山区成土母质主要是下伏基岩原地风化或风化后近距离迁移形成的,存在明显的岩石-土壤-植被物质传导链条,地质条件是制约该地区生态环境质量的重要因素。因此,对地质建造和地质构造的分析与研究,是进行生态地质调查的基础。

(2)文中提出了基于地质建造研究的成土母质单元和土壤地质单元等生态地质调查单元的概念,为生态地质调查和成图指出了基本调查单元和基本成图单元。

(3)利用大凉山区生态地质调查探索的经验,系统的总结了适用于西南山区的生态地质调查评价思路和方法,该思路和技术方法也可进一步推广到全国亚热带、温带山区的生态地质调查与评价工作中,对全国生态地质调查方法体系的完善和生态地质学科的建设也具有一定支撑作用。

致谢:中国地质调查局西安地质调查中心李建星正高级工程师,中国自然资源航空物探遥感中心聂洪峰正高级工程师、肖春蕾高级工程师,中国地质调查局武汉地质调查中心王宁涛高级工程师,中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心张连凯研究员、中国地质调查局成都地质调查中心张建龙正高级工程师、周清研究员、曹华文副研究员,中国环境监测院李瑞敏正高级工程师,中国地质科学院岩溶地质研究所夏日元研究员,中国地质大学(北京)张振杰副教授、吴君毅硕士生和邵璐硕士生,中国地质大学(武汉)孙自永教授、高文龙硕士生,四川省地质矿产勘查开发局攀西地质队谢恩顺高级工程师、李雁龙高级工程师、肖启亮高级工程师、曾建高级工程师、文登奎高级工程师和侯谦工程师,成都理工大学赵银兵副教授,以及华东冶金地质勘查局测绘总队段声义助理工程师对本研究的开展和本文的完善提供了无私的帮助和中肯的建议,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- 曹建华,袁道先,章程,等.受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J].*地球与环境*,2004,32(1):1-8.
- CAO Jianhua, YUAN Daoxian, ZHANG Cheng, et al. Karst ecosystem constrained by geological conditions in Southwest China[J]. *Earth and Environment*, 2004, 32(1): 1-8.
- 曾琴琴,王永华,刘才泽,等.四川省南部县土壤地球化学元素分布特征研究[J].*沉积与特提斯地质*,2021,41(4):656-662.
- ZENG Qinqin, WANG Yonghua, LIU Caize, et al. A study on distribution of elements of soil in Nanbu County, Sichuan Province[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2021, 41(4): 656-662.
- 陈莉薇,徐晓春,王军,等.铜陵相思河流域重金属分布特征研究[J].*环境科学*,2014,35(8):2967-2973.
- CHEN Liwei, XU Xiaochun, WANG Jun, et al. Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8): 2967-2973.
- 陈树旺,邢德和,丁秋红,等.生态地质调查评价——以辽宁铁岭地区为例[J].*地质与资源*,2012,21(6):540-545.
- CHEN Shuwang, XING Dehe, DING Hongqiu, et al. Ecogeological survey and evaluation: A case study of Tieling area, Liaoning province[J]. *Geology and Resources*, 2012, 21(6): 540-545.
- 程朋根,童成卓,聂运菊,等.基于RS与GIS技术的城市生态环境监测与评价系统设计及其应用[J].*东华理工大学学报(自然科学版)*,2015,38(3):314-318.
- CHENG Penggen, TONG Chengzhuo, NIE Yunju, et al. Design and application of urban ecological environment monitoring and evaluation system using remote sensing and GIS[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2015, 38(3): 314-318.
- 丁永建,周成虎,邵明安,等.地表过程研究进展与趋势[J].*地球科学进展*,2013,28(4):407-419.
- DING Yongjian, ZHOU Chenghu, SHAO Mingan, et al. Studies of Earth surface processes: Progress and prospect[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(4): 407-419.
- 杜华明.西秦岭地区景观生态风险评价及格局优化研究[J].*资源环境与工程*,2021,35(3):347-354.
- DU Huaming. Study on Landscape Ecological Risk Assessment and Landscape Pattern Optimization of West Qinling Area[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2021, 35(3): 347-354.
- 杜尚海,古成科,张文静.随机森林理论及其在水文地质领域的研究进展[J].*中国环境科学*,2022,42(9):4285-4295.
- DU Shanghai, GU Chengke, ZHANG Wenjing. A review on the progresses in random forests theory and its applications in hydrogeology[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(9): 4285-4295.
- 方正,张延飞,丁木华,等.基于RSEI的国家生态文明试验区(江西)生态环境质量变化分析——以抚州市为例[J].*东华理工大学学报(自然科学版)*,2020,43(3):271-279.
- FANG Zheng, ZHANG Yanfei, DING Muhua, et al. Ecological changes analysis based on RSEI in the national ecological civilization experimental area (Jiangxi): a case study of Fuzhou city[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 43(3): 271-279.
- 冯乃琦,杨晓玲,张永康,等.“地质+生态农业”模式的江西省高滩地质文化村建设方向研究[J].*资源环境与工程*,2022,36(4):512-521.
- FENG Naiqi, YANG Xiaoling, ZHANG Yongkang, et al. Study on the Construction Direction of Gaotan Geological Cultural Village in Jiangxi Province Based on the Model of “Geology + Ecological Agriculture” [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2022, 36(4): 512-521.
- 冯立,张鹏飞,张茂省,等.新时期榆林煤矿区生态保护修复与综合治理策略及路径探索[J].*西北地质*,2023,56(3):19-29.

- FENG Li, ZHANG Pengfei, ZHANG Maosheng, et al. Strategies and Practical Paths for Ecological Restoration and Comprehensive Management in Yulin Coal Mining Area in the New Era[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 19–29.
- 古琴, 周爱国, 邢新丽. 荒漠区植被斑块格局演化的生态地质学机制[J]. *中国水土保持*, 2007, (1): 38–40.
- GU Qin, ZHOU Aiguo, XING Xinli. Eco-Geology mechanism of desert vegetation patches pattern evolution[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2007, (1): 38–40.
- 郭纯青, 王莉, 王洪涛. 中国岩溶生态地质研究[J]. *生态环境*, 2005, 14(2): 275–281.
- GUO Chunqing, WANG Li, WANG Hongtao. The Research of karst ecological geology in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(2): 275–281.
- 韩玉, 卢文喜, 李峰平, 等. 浑河流域地表水地下水水质耦合模拟[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(4): 1677–1686.
- HAN Yu, LU Wenxi, LI Fengping, et al. Water quality coupling simulation of surface water and groundwater in Hunhe river basin[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(4): 1677–1686.
- 何政伟, 黄润秋, 孙传敏, 等. 浅议“生态地质学”[J]. *国土资源科技管理*, 2003, 3(20): 69–72.
- HE Zhengwei, HUANG Runqiu, SUN Chuanmin, et al. A brief discussion on “Eco-geology”[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2003, 3(20): 69–72.
- 何政伟, 孙传敏, 吴柏青, 等. 岩石-土壤-植被信息系统建立探讨[J]. *矿物岩石*, 2002, 22(2): 100–104.
- HE Zhangwei, SUN Chuanmin, WU Boqing, et al. Discussion on the establishment of rock-soil-vegetation information system[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2002, 22(2): 100–104.
- 侯红星, 张蜀冀, 鲁敏, 等. 自然资源地表基质层调查技术方法新经验——以保定地区地表基质层调查为例[J]. *西北地质*, 2021, 54(3): 277–288.
- HOU Hongxing, ZHANG Shuji, LU Min, et al. Technology and Method of the Ground Substrate Layer Survey of Natural Resources: Taking Baoding Area as an Example[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(3): 277–288.
- 胡振琪, 李勇, 陈洋. 黄河泥沙在生态修复中的作用机理与关键技术[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(1): 1–15.
- HU Zhenqi, LI Yong, CHEN Yang. The mechanism and key technology of the Yellow River sediment in ecological rehabilitation[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(1): 1–15.
- 黄润秋. 生态环境地质的基本特点与技术支持[J]. *中国地质*, 2001, 28(11): 20–24.
- HUANG Runqiu. Basic characteristics and technical support of the eco-environmental geology[J]. *Geology in China*, 2001, 28(11): 20–24.
- 黄振兴, 李满根, 封志兵, 等. 基于遥感生态指数的生态环境质量变化分析——以抚州市东乡区为例[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(1): 60–66.
- HUANG Zhenxing, LI Mangen, FENG Zhibing, et al. Ecological Environment Change in Dongxiang District based on Remote Sensing Ecological Index[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2022, 45(1): 60–66.
- 姬华伟, 任蕊, 陈继平, 等. 关中不同类型土壤硒含量特征及其对玉米籽粒硒含量的影响[J]. *西北地质*, 2021, 54(4): 239–249.
- Ji Huawei, REN Rui, CHEN Jiping, et al. Characteristics of Selenium Content in Different Soil Types in Guanzhong and Its Influence on Selenium Content of Corn Grain[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(4): 239–249.
- 贾磊, 刘洪, 欧阳渊, 等. 基于地质建造的南方山地-丘陵区地表基质填图单元划分方案——以珠三角新会-台山地区为例[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 140–157.
- JIA Lei, LIU Hong, OUYANG Yuan, et al. Division scheme of surface substrate mapping units based on geological formations research, mountainous-hilly area in South China: exemplified by Xinhui – Taishan area, Pearl River Delta[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 140–157.
- 江新胜, 崔晓庄, 卓皆文, 等. 华南扬子陆块西缘新元古代康滇裂谷盆地开启时间新证据[J]. *沉积与特提斯地质*, 2020, 40(3): 31–37.
- JIANG Xinsheng, CUI Xiaozhuang, ZHOU Jiewen, et al. New evidence for the opening time of the Neoproterozoic Kangdian rift basin, western Yangtze Block, South China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2020, 40(3): 31–37.
- 蒋洪强, 吴文俊, 姚艳玲, 等. 耦合流域模型及在中国环境规划与管理中的应用进展[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(3): 539–546.
- JIANG Hongqiang, WU Wenjun, YAO Yanling, et al. Coupling watershed environmental model with optimizing method to provide least cost alternatives in environmental planning and management[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(3): 539–546.
- 蒋惠忠, 邹立芝, 李绪谦, 等. 四平地区生态地质环境的研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2002, 32(1): 87–91.
- JIANG Huizhong, ZOU Lizhi, LI Xuqian, et al. Circumstance assessment of eco-geological environment in siping district[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2002, 32(1): 87–91.
- 金雄伟, 马国桃, 张林奎, 等. 藏南扎西康矿集区土壤盐渍化空间分布及成因分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 2020, 40(4): 83–94.
- JIN Xiongwei, MA Guotao, ZHANG Linkui, et al. Spatial distribution and genesis of the surface soil's salinization in Zhaxikang

- mine area, southern Tibet[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2020, 40(4): 83–94.
- 居字龙, 袁航, 张小波, 等. 县域生态地质调查土壤重金属污染评价及来源分析——以红安县为例[J]. *资源环境与工程*, 2022, 36(1): 124–131.
- JU Zilong, YUAN Hang, ZHANG Xiaobo, et al. Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in County Ecological Geological Survey: Take Hong'an County as an Example[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2022, 36(1): 124–131.
- 李保杰, 顾和和, 纪亚洲. 矿区土地生态风险时空分异研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(3): 573–580.
- LI Baojie, GU Hehe, JI Yaya. Study of spatial-temporal change of land eco-risk in mining area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(3): 573–580.
- 李富, 欧阳渊, 陈敏华, 等. 物探方法在泥炭调查中的应用研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2021a, 44(9): 1137–1143.
- LI Fu, OUYANG Yuan, CHEN Minhua, et al. Application of geophysical prospecting in peat investigation[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2021a, 44(9): 1137–1143.
- 李富, 欧阳渊, 刘洪, 等. 高密度电阻率法与地质雷达法在土壤厚度调查中应用效果——以西昌市土壤厚度调查为例[J]. *华北地质*, 2021b, 44(1): 27–32.
- LI Fu, OUYANG Yuan, LIU Hong, et al. Application of high density resistivity and geological radar in soil thickness survey: A case study of the soil thickness survey in Xichang[J]. *North China Geology*, 2021b, 44(1): 27–32.
- 李金发. 为生态文明服务的地质调查工作[J]. *资源环境与工程*, 2014, 28(1): 1–4.
- LI Jinfa. The geological survey for ecological civilization[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2014, 28(1): 1–4.
- 李金发. 认清经济新形势 顺应改革新趋势——加快中国地质调查工作的调整与改革[J]. *中国地质调查*, 2016, 3(1): 1–6.
- LI Jinfa. Recognizing the new economic situation and conforming to the new trend of reform: accelerating the adjustment and reform of geological survey in China[J]. *Geological Survey of China*, 2016, 3(1): 1–6.
- 李瑞敏, 侯春堂, 王轶. 农业地质研究进展及主要研究问题[J]. *水文地质工程地质*, 2004, 31(2): 110–113.
- LI Ruimin, HOU Chuntang, WANG Yi. A discussion on the agrogeology[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004, 31(2): 110–113.
- 李廷栋. 加强地球表层系统的研究和地质制图工作[J]. *第四纪研究*, 1999, 20(3): 191–196.
- LI Tingdong. Strengthening study and geological mapping of the earth surface system[J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 20(3): 191–196.
- 李槌, 李佑国, 刘洪, 等. 西昌普诗地区侏罗系小坝组-紫色土剖面重金属迁移富集特征初探及生态风险评价[J]. *矿物学报*, 2023, 43(1): 125–136.
- LI Tong, LI Youguo, LIU Hong, et al. Migration and enrichment characteristics of heavy metals in purple soil profile and ecological risk assessment in Pushi clastic rock area, Xichang[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2023, 43(1): 125–136.
- 李槌, 刘洪, 李佑国, 等. 基于地统计学及 GIS 的西昌地区中生代红层区紫色土营养元素空间变异性及影响因素研究[J]. *地球科学进展*, 2022, 37(6): 627–640.
- LI Tong, LIU Hong, LI Youguo, et al. Study on Spatial Variability and Influencing Factors of Nutrient Elements in Purple Soil in Mesozoic Red Layer Region in Xichang Area Based on Geostatistics and GIS[J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(6): 627–640.
- 李槌, 刘小念, 刘洪, 等. 基于地质建造的土壤营养元素空间分布特征研究——以大凉山地区为例[J]. *安全与环境工程*, 2021a, 28(6): 127–137.
- LI Tong, LIU Xiaonian, LIU Hong, et al. Study on Spatial Distribution Characteristics of Soil Nutrient Elements Based on Geological Construction—Take Daliangshan Region as an Example[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2021a, 28(6): 127–137.
- 李槌, 刘小念, 刘洪, 等. 西昌普诗地区中-下白垩统小坝组岩石-紫色土剖面稀土元素地球化学特征分析[J/OL]. *沉积与特提斯地质*, 2021b, 1–15. DOI: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.06002.
- LI Tong, LIU Xiaonian, LIU Hong, et al. Geochemistry of rare earth elements of purple soil layers in the middle-lower cretaceous Xiaoba Formation, Pushi area, Xichang [J/OL]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2021b, 1–15. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.06002.
- 李万钰, 陈晓勇, 易洁, 等. 基于遥感生态指数的赣江新区生态质量评价[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(1): 83–89.
- LI Wanyu, CHEN Xiaoyong, YI Jie, et al. Ecological quality assessment in Ganjiang new district based on remote sensing ecological index[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2020, 43(1): 83–89.
- 李文华. 我国西南山区生态建设的几个问题[J]. *云南畜牧兽医*, 2000, (1): 1–2.
- LI Wenhua. Some problems of ecological construction in southwest mountainous areas of china[J]. *Yunnan Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2000, (1): 1–2.
- 李文明, 李健强, 徐永, 等. 西北生态地质调查研究进展与展望[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 108–119.
- LI Wenming, LI Jianqiang, XU Yong, et al. Progress and Prospects

- of Ecological Geological Survey in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 108–119.
- 李仰春, 杨宗喜, 杨建锋. 生态地质调查新使命: 服务生态保护与修复[N]. *中国矿业报*, 2018-06-12.
- LI Yingcun, YANG Zongxi, YANG Jianfeng. New mission of ecological geological survey: serving ecological protection and restoration[N]. *China Mining News*, 2018-06-12.
- 林景星, 王绍芳, 翟红, 等. 生态环境地质学概述[J]. *环境保护*, 1999, (9): 37–39.
- LIN Jingxing, WANG Shaofang, ZHAI Hong, et al. An Outline on the Ecological Environmental Geology[J]. *Ecology and Natural Conservation*, 1999, (9): 37–39.
- 林景星, 张静, 史世云, 等. 生态环境地质学—21世纪新兴的地球学科[J]. *地质通报*, 2003, 22(7): 459–469.
- 刘洪, 黄瀚霄, 李光明, 等. 因子分析在藏北商旭金矿床地球化学勘查中的应用[J]. *中国地质*, 2015, 42(4): 1126–1136.
- LIU Hong, HUANG Hanxiao, LI Guangming, et al. Factor analysis in geochemical survey of the Shangxu gold deposit, northern Tibet[J]. *Geology in China*, 2015, 42(4): 1126–1136.
- 刘洪, 黄瀚霄, 欧阳渊, 等. 新构造活动的生态地质环境效应讨论——以扬子西缘西昌市为例[J]. *中国地质调查*, 2021, 8(6): 63–77.
- LIU Hong, HUANG Hanxiao, OUYANG Yuan, et al. Discussion on the eco-geo-environment effects of Neotectonic activities: A case study of Xichang City in western Yangtze block[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(6): 63–77.
- 刘洪, 黄瀚霄, 欧阳渊, 等. 基于地质建造的土壤地质调查及应用前景分析——以大凉山地区西昌市为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 2020, 40(1): 91–105.
- LIU Hong, HUANG Hanxiao, OUYANG Yuan, et al. Soil's geologic investigation in Daliangshan, Xichang, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2020, 40(1): 91–105.
- 刘洪, 李文昌, 欧阳渊, 等. 基于地质建造的西南山区生态地质编图探索与实践——以邛海-泸山地区为例[J]. *地质学报*, 2023, 97(2): 623–638.
- LIU Hong, LI Wenchang, OUYANG Yuan, et al. Exploration and practice of the compilation of ecological geology series maps based on Geological Formations research, mountainous region in Southwest China: exemplified by Qionghai-Lushan area, western margin of Yangtze Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(2): 623–638.
- 刘洪, 夏祥标, 黄瀚霄, 等. 西藏冈底斯成矿带西段学修玛尔幅水系沉积物地球化学统计分析与找矿前景[J]. *桂林理工大学学报*, 2019, 39(4): 847–855.
- LIU Hong, XIA Xiangbiao, HUANG Hanxiao, et al. Geochemical statistics analysis of stream sediment and prospecting potential of Xuexiumaer area in western Gangdese metallogenic belt, Tibet[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2019, 39(4): 847–855.
- 刘建宇, 聂洪峰, 肖春蕾, 等. 2010—2018年中国北方沙质荒漠化变化分析[J]. *中国地质调查*, 2021, 8(6): 25–34.
- LIU Jianyu, NIE Hongfeng, XIAO Chunlei, et al. Evolution of sandy desertification in North China from 2010 to 2018[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(6): 25–34.
- 刘媛媛, 马腾飞, 陈旸, 等. 表生地球化学反应的尺度效应[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40(5): 1107–1120.
- LIU Yuanyuan, MA Tengfei, CHEN Min, et al. Scaling Behavior of Surficial Geochemical Reactions[J]. *Mineral and Rock Geochemistry Bulletin*, 2021, 40(5): 1107–1120.
- 刘子金, 徐存东, 朱兴林, 等. 干旱荒漠区人工绿洲土壤盐碱化风险综合评估与演变分析[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(1): 367–379.
- LIU Zijin, XU Cundong, ZHU Xinglin, et al. Comprehensive assessment and evolution analysis of soil salinization in artificial oasis in arid desert area[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(1): 367–379.
- 卢耀如. 国土地质-生态环境综合治理与可持续发展——黄河与长江流域防灾兴利途径讨论[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1998, (S1): 95–103.
- LU Yaoru. Sustainable Development and Comprehensive Harness on Territory Geo-ecological Environment: The Ways for Promoting Benefits and Taking Precautions Against Natural Hazards in the Valley of Yellow River and Yangtze River[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998, (S1): 95–103.
- 倪忠云. 西藏曲水—桑日地区生态地质环境承载力研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011: 1–155.
- NI Zhongyun. Study on the Eco-geological Environmental Carrying Capacity of Qushui-Sangri Area in Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 1–155.
- 聂洪峰, 肖春蕾, 任伟祥, 等. 生态地质研究进展与展望[J]. *中国地质调查*, 2021a, 8(6): 1–8.
- NIE Hongfeng, XIAO Chunlei, REN Weixiang, et al. Progress and prospect of ecogeological research[J]. *Geological Survey of China*, 2021a, 8(6): 1–8.
- 聂洪峰, 肖春蕾, 戴蒙, 等. 生态地质调查工程进展与主要成果[J]. *中国地质调查*, 2021b, 8(1): 1–12.
- NIE Hongfeng, XIAO Chunlei, DAI Meng, et al. Progresses and main achievements of ecogeological survey project[J]. *Geological Survey of China*, 2021b, 8(1): 1–12.
- 聂洪峰, 肖春蕾, 郭兆成. 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*, 2019, 6(4): 4–13.
- NIE Hongfeng, XIAO Chunlei, GUO Zhaocheng. Exploring the secret of ecosystem operation and evolution: an interpretation of the ideas and methods of Eco-geological survey[J]. *Popular Science and Culture of Land and Resources*, 2019, 6(4): 4–13.

- 欧阳渊, 张景华, 刘洪, 等. 基于地质建造的西南山区成土母质分类方案——以大凉山区为例[J]. 中国地质调查, 2021, 8(6): 50–62.
- OUYANG Yuan, ZHANG Jinghua, LIU Hong, et al. Classification of soil parent materials in mountain areas of Southwest China based on geological formations: A case study of Daliangshan region[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(6): 50–62.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 1–28.
- PAN Guitang, XIAO Qinghui, LU Songnian, et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 1–28.
- 彭建兵, 兰恒星. 略论生态地质学与生态地质环境系统[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 877–893.
- PENG Jianbing, LAN Hengxing. Ecological Geology and Eco-geological Environment System[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(6): 877–893.
- 钱学森. 论地理科学[M]. 杭州: 浙江教育出版社, 1994, 36–46.
- QIAN Xuesen. On the geographical sciences[M]. Hangzhou: Zhejiang Education Press, 1994, 36–46.
- 任纪舜, 牛宝贵, 赵磊, 等. 地球系统多圈层构造观的基本内涵[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 607–612.
- REN Jishun, NIU Baowei, ZHAO Lei, et al. Basic ideas of the multi-sphere tectonics of earth system[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 607–612.
- 石建省, 马荣, 马震. 区域地球多圈层交互带调查探索研究[J]. 地球学报, 2019, 40(6): 767–780.
- SHI Jiansheng, MA Rong, MA Zhen. Regional investigation of the earth's critical zone[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2019, 40(6): 767–780.
- 孙立广, 杨仲康. 人类世生态地质学研究方法及应用研究[J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 958–967.
- SUN Liguang, YANG Zhangkang. New Research Methods and Their Applications in Anthropocene Ecogeology[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(5): 958–967.
- 孙枢. 对我国全球变化与地球系统科学研究的若干思考[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 6–10.
- SUN Su. Some Thoughts of Global Change and Earth System Science Studies in China[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1): 6–10.
- 陶于祥, 毛建仁, 孙玉华, 等. 生态环境地质学初探[J]. 江苏地质, 1998, 22(3): 60–65.
- TAO Yuxiang, MAO Jianren, SUN Yuhua, et al. Preliminary discussion about eco environmental geology[J]. Jiangsu Geology, 1998, 22(3): 60–65.
- 王长生, 王大可. 试论 1:5 万生态地质调查[J]. 中国区域地质, 1997, 16(01): 57–60.
- WANG Changsheng, WANG Dake. On the 1:50000 ecological geological investigation[J]. Regional Geology of China, 1997, 16(01): 57–60.
- 王果. 土壤学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- WANG Guo. Soil Science[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- 王京彬, 卫晓锋, 张会琼, 等. 基于地质建造的生态地质调查方法——以河北省承德市国家生态文明示范区综合地质调查为例[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1611–1624.
- WANG Jingbing, WEI Xiaofeng, ZHANG Huiqiong, et al. The ecological survey based on geological formation: exemplified by integrated geological survey of National Ecological Civilization Demonstration Area in Chengde City, Hebei Province[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1611–1624.
- 王化齐, 尹立河, 李彦娥, 等. 宁夏沿黄生态经济区生态系统服务价值及其提升对策[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 196–203.
- WANG Huaqi, YIN Lihe, LI Yan'e, et al. Ecological System Service Value Assessment and Improving Countermeasures in Ningxia Yellow River Ecological Economic Zone[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 196–203.
- 王立全, 王保弟, 李光明, 等. 东特提斯地质调查研究进展综述[J]. 沉积与特提斯地质, 2021, 41(2): 283–296.
- WANG Liquan, WANG Baodi, LI Guangming, et al. Major progresses of geological survey and research in East Tethys: An overview[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2021, 41(2): 283–296.
- 王宁涛, 彭轲, 黎清华, 等. 基于 RS 和 GIS 的地质灾害易发性定量评价: 以湖北省五峰县为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 221–229.
- WANG Ningtao, PENG Ke, LI Qinghua, et al. Quantitative evaluation of geological disaster liability based on RS & GIS analysis: A case study of Wufeng County[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(6): 221–229.
- 王鹏, 刘拓, 邱德明. 基于局部惩罚型变权的建设用地生态适宜性空间模糊评价——以陕西延安宝塔区为例[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 232–241.
- WANG Peng, LIU Tuo, QIU Deming. Spatial Fuzzy Assessment of Ecological Suitability for Urban Land Use Based on Local Penalty Variable Weights: A Case Study of Yan'an Baota District[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 232–241.
- 王乔林, 宋云涛, 王成文, 等. 滇西地区土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 中国环境科学, 2021, 41(8): 3693–3703.
- WANG Qiaolin, SONG Yuntao, WANG Chengwen, et al. Source identification and spatial distribution of soil heavy metals in Western Yunnan[J]. China Environmental Science, 2021, 41(8): 3693–3703.
- 王尧, 张茂省, 陈华军, 等. 佳芦河流域山水林田湖草沙生态保护修复实践研究[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 121–128.
- WANG Yao, ZHANG Maosheng, CHEN Huajun, et al. Ecological

- Protection—Restoration Practice of Mountains Rivers Forests Farmlands Lakes Grasslands Sands in the Jialu River Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 121–128.
- 王颖维, 张亚峰, 钱信禹, 等. 南水北调中线工程丹江源地区生态地质格局动态演变[J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 129–140.
- WANG Yingwei, ZHANG Yafeng, QIAN Xinyu, et al. Dynamic Evolution of Eco-geological Pattern: Taking Danjiangyuan Area of Central Line Project of South-to-North Water Diversion[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 129–140.
- 汪振立. “生态地质”课程教学初探[J]. *中国地质教育*, 2012, 21(1): 17–20.
- WANG Zhenli. Preliminary Study on Teaching the Course of Ecological Geology[J]. *Chinese Geological Education*, 2012, 21(1): 17–20.
- 汪振立, 邓通德, 王瑞敏, 等. 岩石-土壤-脐橙系统中稀土元素迁移特征[J]. *中国地质*, 2009, 36(6): 1382–1394.
- WANG Zhenli, DENG Tongde, WANG Ruimin, et al. Characteristics of migration and accumulation of rare earth elements in the rock-soil-avel orange system[J]. *Geology in China*, 2009, 36(6): 1382–1394.
- 卫晓锋, 孙厚云, 张竞, 等. 承德特色林果资源的生态地球化学过程及其品质提升意义[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 99–108.
- WEI Xiaofeng, SUN Houyun, Zhang Jing, et al. Eco-geochemical process of characteristic forest fruit resources and its significance of quality improvement in Chengde city[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2020, 47(6): 99–108.
- 吴中海, 张会平. 新构造与环境[J]. *地质力学学报*, 2021, 27(2): 157–158.
- WU Zhonghai, ZHANG Huiping. Neotectonics and environment[J]. *Journal of Geomechanics*, 2021, 27(2): 157–158.
- 肖春蕾, 郭艺璇, 薛皓. 密西西比河流域监测、修复管理经验对我国流域生态保护修复的启示[J]. *中国地质调查*, 2021a, 8(6): 87–95.
- XIAO Chunlei, GUO Yixuan, XUE Hao. Implications of the Mississippi River watershed monitoring and restoration for the watershed ecological protection and restoration in China[J]. *Geological Survey of China*, 2021a, 8(6): 87–95.
- 肖春蕾, 聂洪峰, 刘建宇, 等. 生态-地质作用模式: 诠释表生地质过程与生态特征的耦合[J]. *中国地质调查*, 2021b, 8(6): 9–16.
- XIAO Chunlei, NIE Hongfeng, LIU Jianyu, et al. Ecological and geological interaction model: The coupling of supergene geological processes and ecological characteristics[J]. *Geological Survey of China*, 2021b, 8(6): 9–16.
- 谢亚军, 梁越, 肖红伟, 等. 中国陆地生态系统叶凋落物分解的格局及控制因素[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(3): 271–276.
- XIE Yajun, LIANG Yue, XIAO Hongwei, et al. Pattern and controlling factors of terrestrial leaf litters decomposition in China[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2018, 41(3): 271–276.
- 胥勤勉, 袁桂邦, 辛后田, 等. 平原区 1: 5 万区域地质调查在生态文明建设中的作用——以渤海湾北岸为例[J]. *地质调查与研究*, 2014, 37(2): 85–89.
- XU Qinmian, YUAN Guibang, XIN Houtian, et al. Functions of 1: 50 000 regional geological survey in ecological civilization construction: a case study on northern coast of Bohai Bay[J]. *Geological Survey and Research*, 2014, 37(2): 85–89.
- 徐嘉兴, 赵华, 李钢, 等. 矿区土地生态评价及空间分异研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(1): 192–200.
- XU Jiaxing, ZHAO Hua, LI Gang, et al. Land ecological assessment and its spatial variation in coal mining area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(1): 192–200.
- 许向宁, 黄润秋. 川西安宁河流域生态地质环境动态演化分析[J]. *水文地质工程地质*, 2004, 31(5): 31–34.
- XU Xiangning, HUANG Runqiu. An analysis of dynamic evolution of the eco-geological environment in the Anninghe River watershed in western Sichuan Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004, 31(5): 31–34.
- 严明书, 黄剑, 何忠庠, 等. 地质背景对土壤微量元素的影响——以渝北地区为例[J]. *物探与化探*, 2018, 42(1): 199–205.
- YAN Mingshu, HUANG Jian, HE Zhongxiang, et al. The influence of geological background on trace elements of soil: a case study of Yubei area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(1): 199–205.
- 杨建锋, 张翠光. 地球关键带: 地质环境研究的新框架[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(3): 98–106.
- YANG Jianfeng, ZHANG Cuiguang. Earth's critical zone: a holistic framework for geo-environmental researches[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(3): 98–106.
- 杨巍然. 地球表层系统与中国区域大地构造的研究发展[J]. *地学前缘*, 2006, 13(6): 102–110.
- YANG Weiran. Earth surface system and research history of the regional geotectonics of China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6): 102–110.
- 杨志. 陕北榆神矿区生态地质环境特征及煤炭开采影响机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- YANG Zhi. Study on the Characteristics of Eco-geological Environment and the Mining Effect Mechanism in Yushen Coal Mine District of Northern Shaanxi[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- 袁国礼, 侯红星, 刘建宇, 等. 服务生态文明的生态地质调查工作方法浅析——以地表基质调查为例[J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 30–38.

- YUAN Guoli, HOU Hongxing, LIU Jianyu, et al. Introduction to the Methods of Ecology-Geological Survey for Servicing Ecological Civilization: Example from Ecology-Supporting Sphere Survey[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 30-38.
- 殷志强, 李瑞敏, 李小磊, 等. 地质资源环境承载能力研究进展与发展方向[J]. *中国地质*, 2018, 45(6): 1103-1115.
- YIN Zhiqiang, LI Ruimin, LI Xiaolei, et al. Research progress and future development directions of geo-resources and environment carrying capacity[J]. *Geology in China*, 2018, 45(6): 1103-1115.
- 殷志强, 秦小光, 张蜀冀, 等. 地表基质分类及调查初步研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020a, 47(6): 8-14.
- YIN Zhiqiang, QIN Xiaoguang, ZHANG Shuji, et al. Primary study on classification and investigation of surface substrate[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020a, 47(6): 8-14.
- 殷志强, 卫晓锋, 刘文波, 等. 承德自然资源综合地质调查工程进展与主要成果[J]. *中国地质调查*, 2020b, 7(3): 1-12.
- YIN Zhiqiang, WEI Xiaofeng, LIU Wenbo, et al. Progresses and main achievements of comprehensive geological survey project of natural resources in Chengde[J]. *Geological Survey of China*, 2020b, 7(3): 1-12.
- 尹福光, 潘桂棠, 孙志明. 西南三江构造体系及演化、成因[J]. *沉积与特提斯地质*, 2021, 41(2): 265-282.
- YIN Fuguang, PAN Guitang, SUN Zhiming. Genesis and evolution of the structural systems during the cenozoic in the Sanjiang orogenic belt, Southwest China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2021, 41(2): 265-282.
- 于俊博, 周传芳, 梁中恺, 等. 重要生态功能区土壤化学元素的空间分布模式——以大兴安岭松岭区为例[J]. *中国地质调查*, 2021, 8(6): 105-113.
- YU Junbo, ZHOU Chuanfang, LIANG Zhongkai, et al. Spatial distribution patterns of soil chemical elements in important ecological function areas: A case study in Songling area of the Greater Khingan Mountains[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(6): 105-113.
- 张慈, 赵银兵, 欧阳渊, 等. 青藏高原东缘地质环境对植被覆盖度的影响研究: 以冕宁县为例[J/OL]. *沉积与特提斯地质*, 2023, 1-11. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03010.
- ZHANG Ci, ZHAO Yinbing, OUYANG Yuan, et al. Influence of Geological Environment on Vegetation Coverage in the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau: a Case Study of Mianning[J/OL]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2023, 1-11.
- 张甘霖, 宋效东, 吴克宁. 地球关键带分类方法与中国案例研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2021, 51(10): 1681-1692.
- ZHANG Ganlin, SONG Xiaodong, WU Kening. A classification scheme for Earth's critical zones and its application in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 51(10): 1681-1692.
- 张昊, 张强, 左小, 等. 生态环境保护性的采选充系统设计及应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(3): 548-557.
- ZHANG Hao, ZHANG Qiang, ZUO Xiao, et al. Design and application of mining-separating-backfilling system for mining ecological and environmental protection[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3): 548-557.
- 张景华, 欧阳渊, 陈远智, 等. 基于无人机遥感的四川省昭觉县农业产业园土地适宜性评价[J]. *中国地质*, 2021a, 48(6): 1710-1719.
- ZHANG Jinghua, OUYANG Yuan, CHEN Yuanzhi, et al. Land suitability evaluation of agricultural industrial park based on UAV remote sensing in Zhaojue County of Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 2021a, 48(6): 1710-1719.
- 张景华, 欧阳渊, 刘洪, 等. 西昌市生态地质特征与脆弱性评价[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 2020.
- ZHANG Jinghua, OUYANG Yuan, LIU Hong, et al. Ecological Geology characteristics and vulnerability assessment of Xichang City[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2020.
- 张景华, 欧阳渊, 刘洪, 等. 基于主控要素的生态地质脆弱性评价——以四川省西昌市为例[J]. *自然资源遥感*, 2021b, 33(4): 181-191.
- ZHANG Jinghua, OUYANG Yuan, LIU Hong, et al. Eco-geological vulnerability assessment based on major controlling factors: A case study of Xichang City, Sichuan Province[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021b, 33(4): 181-191.
- 张景华, 欧阳渊, 刘洪, 等. 西昌市 1989—2018 年林地草地湿地动态变化特征分析[J]. *中国地质调查*, 2021c, 8(6): 135-143.
- ZHANG Jinghua, OUYANG Yuan, LIU Hong, et al. Analysis of the dynamic change characteristics of forest land, grassland and wetland in Xichang City from 1989 to 2018[J]. *Geological Survey of China*, 2021c, 8(6): 135-143.
- 张景华, 张建龙, 欧阳渊, 等. 基于形成机理的石漠化敏感性评价: 以贵州省黔西县为例[J/OL]. *沉积与特提斯地质*, 2023, 1-11[2023-04-19]. DOI: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.07005.
- ZHANG Jinghua, ZHANG Jianlong, OUYANG Yuan, Gao Hui, Liu Hong, Liu Xiaoxia. Sensitivity evaluation of karst rock desertification based on its formation mechanism: An example from Qianxi County of Guizhou Province[J/OL]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 1-11[2023-04-19]. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.07005>.
- 张丽, 夏炎, 陈琪, 等. 基于地球关键带科学的土壤生态系统服务评价方法研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2021, 57(3): 345-355.
- ZHANG Li, XIA Yan, CHEN Qi, et al. Research on soil ecosystem service assessment method based on Earth's Critical Zone sci-

- ence[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2021, 57(3): 345–355.
- 张连凯, 季宏兵, 刘秀明, 等. 热带地区碳酸盐岩上覆红色风化壳的成因机理及元素演化[J]. 中国地质, 2021, 48(2): 651–660.
- ZHANG Liankai, JI Hongbing, LIU Xiuming, et al. Genetic mechanism and elemental evolution of weathering laterite crust overlying carbonate rocks in tropical areas[J]. Geology in China, 2021, 48(2): 651–660.
- 张恋, 王宇飞, 罗建林, 等. 地层岩性对植物群落分布特征的影响[J]. 中国地质调查, 2021, 8(6): 78–86.
- ZHANG Lian, WANG Yufei, LUO Jianlin, et al. The effects of lithology on the plant community distribution characteristics[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(6): 78–86.
- 张林, 李来新, 马东民, 等. 景观格局及生态系统服务价值响应——以千阳县为例[J]. 西北地质, 2022, 55(1): 274–283.
- ZHANG Lin, LI Laixin, MA Dongmin, et al. On the Landscape Pattern Change and the Ecological Service Value Response: Taking Qianyang County as an Example[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(1): 274–283.
- 张腾蛟, 刘洪, 欧阳渊, 等. 中高山区土壤成土母质理化特征及主控因素初探——以西昌市为例[J]. 沉积与特提斯地质, 2020, 40(1): 106–114.
- ZHANG Tengjiao, LIU Hong, OUYANG Yuan, et al. A preliminary discussion on the physical and chemical characteristics and main controlling factors of soil and parent material in the middle and high mountain area: take Xichang as an example[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2020, 40(1): 106–114.
- 张腾蛟, 刘洪, 欧阳渊, 等. 不同地质建造类型的生态环境功能特征——以西昌地区为例[J]. 中国地质调查, 2021, 8(6): 35–49.
- ZHANG Tengjiao, LIU Hong, OUYANG Yuan, et al. Ecological environment function of different geological formations: A case study of Xichang area[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(6): 35–49.
- 张亚丽, 张志敏, 张继军, 等. 安康西部农田土壤硒形态及农作物富硒特征[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 229–235.
- ZHANG Yali, ZHANG Zhimin, ZHANG Jijun, et al. Soil Selenium Speciation in Cropland of Western Ankang and the Characteristics of Crop Selenium Enrichment[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 229–235.
- 张永双, 郭长宝, 李向全, 等. 川藏铁路廊道关键水工环地质问题: 现状与发展方向[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 1–12.
- ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, LI Xiangquan, et al. Key problems on hydro-engineering-environmental geology along the Sichuan-Tibet Railway corridor: current status and development direction[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 1–12.
- 张永双, 孙璐, 殷秀兰, 等. 中国环境地质研究主要进展与展望[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 901–912.
- ZHANG Yongshuang, SUN Lu, YIN Xiulan, et al. Progress and prospect of research on environmental geology of China: a review[J]. Geology in China, 2017, 44(5): 901–912.
- 张振平. 中国优质烤烟生态地质背景区划研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- ZHANG Zhenping. Study of Ecological and Geological Zonization for the Production of High-quality Flu-cured Tobacco of China[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2004.
- 赵银兵, 倪忠云, 欧阳渊, 等. 生态地质环境承载力研究进展[J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(4): 529–541.
- ZHAO Yinbing, NI Zhongyun, OUYANG Yuan, et al. Research progress of eco-geological environment carrying capacity[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(4): 529–541.
- 赵银兵. 面向矿产资源开发的地质生态环境研究——以甘孜藏族自治州东部为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- ZHAO Yinbing. Study on Geo-ecological Environment Based on Mineral Resources Development- Case Study in Eastern Ganzi[D]. Chengdu: Chengdu University of technology, 2009.
- 中国地质调查局成都地质调查中心. 大凉山区生态地质调查成果报告[R]. 中国地质调查局成都地质调查中心, 2022.
- 周爱国, 孙自永, 徐恒力, 等. 地质环境生态适宜性评价指标体系研究[J]. 地质科技情报, 2021, 40(2): 71–74.
- ZHOU Aiguo, SUN Ziyong, XU Hengli, et al. Study of indexes for assessment of geoenvironmental ecology suitability[J]. Geological Science and Technology Information, 2021, 40(2): 71–74.
- 朱朝晖, 宋明义, 覃兆松, 等. 土壤地质单位的建立与研究——以浙江省为例[J]. 中国地质, 2004, 31(S1): 51–61.
- ZHU Chaohui, SONG Mingyi, QIN Zhaosong, et al. Establishment and study of soil-geological units: a case study of Zhejiang Province[J]. Geology in China, 2004, 31(S1): 51–61.
- 朱鹏, 张轶群, 陈建昌, 等. 某废弃矿山生态破坏与环境修复研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2016, 39(4): 341–346.
- ZHU Peng, ZHANG Yiqun, CHEN Jianchang, et al. Study on the design scheme of ecological environment restoration and management for one abandoned mine[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2016, 39(4): 341–346.
- 朱日祥, 侯增谦, 郭正堂, 等. 宜居地球的过去、现在与未来——地球科学发展战略概要[J]. 科学通报, 2021, 66(35): 4485–4490.
- ZHU Rixiang, HOU Zengqian, GUO Zhengtang, et al. Summary of “the past, present and future of the habitable Earth: Development strategy of Earth science” [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(35): 4485–4490.

- 朱裕生. 基础地质调查的新任务-关于地质-生态环境调查新概念的探讨[J]. 中国区域地质, 1999, 18(2): 122-126.
- ZHU Yushang. A new task of fundamental geological investigations- A discussion of the new concept of geological-ecological mapping[J]. Geological Bulletin of China, 1999, 18(2): 122-126.
- Bonfatti B R, Demattê J A M, Marques K P P, et al. Digital mapping of soil parent material in a heterogeneous tropical area[J]. *Geomorphology*, 2020, 367: 107305.
- Dickinson W W, Dunbar G B, McLeod H. Heavy metal history from cores in Wellington Harbour, New Zealand[J]. *Environmental Geology*, 1996, 27(1): 59-69.
- Dmitrievich P A, Aleksandrovich P I. Engineering-geological or geoeological processes and phenomena; their development in the present-day environment[J]. *Vestnik Mgsu*, 2012, (9): 191-196.
- Giardino J R, Houser C. Principles and dynamics of the critical zone. In: Shroder J J F, eds. *Developments in Earth Surface Processes* [J]. Amsterdam: Elsevier, 2015, 1-13.
- Gruber F E, Baruck J, Mair V, et al. From geological to soil parent material maps - a random forest-supported analysis of geological map units and topography to support soil survey in south tyrol[J]. *Geoderma*, 2019, 354: 113884.
- Kellaway G A. Environmental geology of Bath, England[J]. *Environmental Geology*, 1995, 26(3): 189-191.
- Korolev V A, Buslaeva O V A. system of proper environmental geology categories[J]. *Moscow University Geology Bulletin*, 2012, 67(5): 298-307.
- Kucha H, Martens A, Ottenburgs R, et al. Primary minerals of Zn-Pb mining and metallurgical dumps and their environmental behavior at Plombières, Belgium[J]. *Environmental Geology*, 1996, 27(1): 1-15.
- Kumar A, Deshmukh B. A review on 'Geo-ecological Studies'-An interdisciplinary approach for evaluation and sustainable management of 'Geo-ecosystems' [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2015, 86-91.
- Li Tong, Li Yuoguo, Liu Hong, et al. Chemical weathering intensity and geochemical characteristics of Cretaceous terrigenous clastic rock-purple soil profiles in the Pushi area, Xichang [J]. *Geological Journal*, 2022, 1-18. (on line).
- Lin H S. Earth's Critical Zone and hydopedology: Concepts, characteristics, and advances[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14: 25-45.
- National Research Council, USA. Basic Research Opportunities in Earth Sciences[M]. Washington D C: National Academy Press, 2001, 1-154.
- Panda D, Subramanian V, Panigrahy R C. Geochemical fractionation of heavy metals in Chilka Lake (east coast of India)-a tropical coastal lagoon[J]. *Environmental Geology*, 1995, 26(4): 199-210.
- Sun Xiyong, Zhang Ruijiang, Huang We, et al. The response between glacier evolution and eco-geological environment on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *China Geology*, 2019, 2: 1-7.
- Swennen R, Keer I V, Vos W D. Heavy metal contamination in overbank sediments of the Geul river (East Belgium): Its relation to former Pb-Zn mining activities[J]. *Environmental Geology*, 1994, 24(1): 12-21.
- Tristan S, Laurent H, Patrice R, et al. Hundred million years of landscape dynamics from catchment to global scale[J]. *Science*, 2023, 379: 918-923.
- Trofimov V T, Ziling D G, Averkina T I. Geoecology as a term and interdisciplinary science[J]. *Vest Mosk Univ Geologiya*, 1994a, 49(5): 43-55.
- Trofimov V T. Theoretical methodological basis of creation of ecological geological maps[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(6): 199-207.
- Trofimov V T. The ecological-geological system, its types and position in the structure of an ecosystem[J]. *Moscow University Geology Bulletin*, 2009, 64(2): 111-115.
- Trofimov V T. Ecological-geological conditions and factors of their formation[J]. *Moscow University Geology Bulletin*, 2010, 65(1): 54-57.
- Trofimov V T. Current state, tasks, and problems of the further development of ecological geology[J]. *Moscow University Geology Bulletin*, 2013, 68(3): 155-164.
- Trofimov V T, Andreeva T V. Ecological geological systems and their types, position in the ecosystems structure and tasks of the investigation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 425-438.
- Trofimov V T, Ziling D G. Ecological geology in the program of "Universities of Russia"[J]. *Geoecologiya*, 1994b, 3: 117-120.
- Ulrikh D V, Butakova M D. Soil-cement of normal hardening on the basis of the argillaceous raw material and copper ore processing of waste in eco-geology and construction[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 150: 1510-1515.
- Vartanyan, G. The Geological Environment and Ecosystems. *Geology and Ecosystems* [J]. Springer US, 2006: 9-14.
- Williams M A J, Balling R C. Interactions of desertification and climate[M]. London and New York: Arnold and Halsted Press (co-publishers), 1995: 1-300.
- Wilson M J. The importance of parent material in soil classification: A review in a historical context[J]. *Catena*, 2019, 182: 104131.
- Zhang Ganlin, Zhu Yongguan, Shao Mingan. Understanding sustainability of soil and water resources in a critical zone perspective[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2019, 602: 1716-1718.