

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.06.01

引用格式: 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,2021,8(6): 1-8. (Nie H F, Xiao C L, Ren W X, et al. Progress and prospect of ecogeological research[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(6): 1-8.)

生态地质研究进展与展望

聂洪峰¹, 肖春蕾¹, 任伟祥^{1,2,3}, 刘建宇¹, 戴蒙¹

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要:生态地质学是研究生态系统与地质环境之间关系的一门交叉学科,对国土空间生态保护修复工作有重要理论支撑作用。我国生态地质研究工作虽然经过了多年的发展与积淀,但时至今日生态地质学仍然处于研究和探索阶段。鉴于此,基于前人的大量研究,总结了国内外生态地质研究进展:国际上,俄罗斯建立了生态地质学研究体系,美国发起的地球关键带研究是与生态地质研究十分契合的主题;在国内,生态地质研究主要着眼于“生态-地质”相互作用过程与机理以及地质环境影响下的系统性生态修复研究。在此基础上,提出了生态地质学涵义及其研究内容、方法技术创新及学科体系构建思路,以期以服务山水林田湖草沙整体保护、系统修复、综合治理和生态地质系统深化研究提供借鉴。

关键词:生态地质调查; 国土空间生态保护修复; 地球关键带; 进展; 展望

中图分类号: X14; Q142; X171.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2021)06-0001-08

0 引言

山水林田湖草沙一体化的国土空间生态保护修复是新时代提升人们生活品质与幸福感的一项重要工作举措^[1-3];采用系统性、综合性研究视角,统筹考虑自然生态各要素,全方位全过程开展山水林田湖草沙的耦合研究是实现上述目的的重要手段^[4-6]。这一系列工作以人为核心,涉及与人生存相关的地下-地表-地上多重环境要素,旨在研究岩石圈、水圈、生物圈、土壤圈等多圈层内部与圈层之间物质的发生、迁移、转化、归宿过程,各系统之间的响应关系,以及对人们生产生活产生的影响^[7-9]。上述研究涉及的学科包括生态学、环境地理学、地质学、地球化学等等,但都没有完整地覆盖这一命题的研究范围。例如:生态学是研究生物与环境之间相互关系的学科,是生物学与地理学的交叉学科,它的研究范围多集中在地球表层生态系统,并没有深入考虑岩石圈带来的发生学影响;环

境地理学是以人类与地理环境的关系为对象,研究地理环境的发生和发展、组成和结构、调节和控制、改造和利用的学科,也有类似生态研究的不足^[10-11];地质学是以地球为研究对象的一门自然科学,其研究内容主要包括地球的物质组成、构造及其演化历史等,但涉及地质与生态响应的研究不足;地球化学则更多关注元素、物质的迁移转化过程,虽然有地下-地上的沟通,但是很少涉及生物环境的影响。因此,拓宽上述学科的研究范围,形成新的交叉学科——生态地质学来支撑山水林田湖草沙整体保护与系统修复是十分必要的。

较系统地研究和使用的“生态地质”这一概念的是俄罗斯学者 Trofimov 等^[12],国内有王长生等^[13]、汪振立等^[14]。但我国地学界对生态地质学的概念理解、研究范围与对象划定等存在差异,目前尚未形成系统的、统一的认识。本文基于前人的研究成果,初步总结了生态地质的相关研究进展,展望了生态地质学的研究方向和发展趋势,为服务山水林田湖草沙整体保护、系统修复和生态地质学科体系

收稿日期: 2021-10-16; 修订日期: 2021-11-16。

基金项目: 中国地质调查局“生态地质调查工程(编号: 0703)”“全国地球关键带遥感地质调查(编号: DD20190536)”项目联合资助。

第一作者简介: 聂洪峰(1964—),男,正高级工程师,生态地质调查工程首席专家,主要从事遥感地质、生态地质、水工环地质领域的调查研究工作。Email: nie_hongfeng@qq.com。

的研究提供借鉴与参考。

1 国际生态地质研究

俄罗斯(包括前苏联)学者较早提出了生态地质的有关概念并展开相应的研究,其研究为生态地质的学科发展奠定了基础^[12]。Troll 和 Trofimov 分别于 20 世纪 30 年代和 90 年代提出了“生态地质学”的有关概念,指出生态地质主要研究自然地质环境与作用及人为地质作用对生物及人类的影响,这是俄罗斯(包括前苏联)的生态地质萌芽研究^[12,15]。21 世纪初,Trofimov 又进一步指出在地质学的四大研究任务中,为生态系统的稳定运行作地质论证是生态地质的主要任务,即论证生态系统正常运转前提下的岩石圈资源合理利用,确定岩石圈近地表的人为污染对生物群的影响,针对生物群落或整体生态系统的管理,为制定和调整解决方案进行地质论证^[16]。2006 年,俄罗斯学者 Vartanyan 出版了《The Geological Environment and Ecosystems》一书,进一步论述了地质环境与生态系统之间的相互关系^[17]。之后,以 Trofimov、Korolev 等为代表的俄罗斯学者对生态地质学的研究内容、系统类型、学科分类、学科地位以及与工程地质、环境地质等相似学科之间的关系与区别展开了研究,为生态地质学的学科建立与发展提供了宝贵基础与先验资料^[18-21]。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。

生态-地质系统是多圈层、多尺度高度耦合的综合系统,当前国际上与之十分契合的一类研究是地球关键带(Earth's Critical Zone)研究。关键带的概念首次由德国物理化学家 Tsakalotos 于 1909 年在描述两类流体的混合区域时提出,1962 年被应用于地球科学领域^[22-23]。目前所使用的地球关键带的概念及含义是由美国国家研究委员会(National Research Council, NRC)所提出,并确定为 21 世纪地球科学的前沿研究方向和亟需深入研究的重点领域^[24]。地球关键带是耦合了岩石圈、土壤圈、水圈、生物圈的地球表层系统,是自然地理环境整体性与差异性的集中体现带,是与人类活动息息相关的综合系统,能够直接影响生态系统的过程与结构^[25-27]。地球关键带要素丰富,范围宽广,结构与过程复杂多样,目前其研究多集中在对其结构、过

程进行调查研究,建立关键带地质框架模型^[28-29]。朱永官等按关键带作用的性质将这些过程分为生态过程、水文过程、生物地球化学过程 3 类,并进行综合性分析评价研究^[30]; Goldhaber 等对草原坑洞地区的地质与水文地球化学过程进行研究,发现关键带是地下水和湿地发生作用的重要地带,黄铁矿的氧化作用直接驱动了硫酸盐类物质在草原坑洞地区的积累^[31]; Akob 和 Küsel 总结了陆地原核生物和微真核生物在地质环境影响下的生存特征,深层地下的微真核生物丰度很低,那里的微生物依赖于沉积有机质和化学自养代谢来获得能量,形成了独立于地上系统的食物网^[32]; Reiss 和 Chiffard 系统分析了泉水作为地下水-地表水和陆地-水生生态系统的桥梁作用、对地下无脊椎动物群落生存的贡献以及在地球化学循环中扮演的角色,它既是宏观景观尺度地上和地下的集水区,也是微观斑块尺度上的水流出^[33]。

2 国内生态地质研究

2.1 生态-地质相互作用研究

生态-地质之间的相互关系是目前生态地质学范畴内最主要的研究内容,包括研究生态-地质的相互作用机理、地球化学特性和地质环境产生的生态作用与生态功能等^[13-14,34]。例如李正积研究了岩土植物大系统的特色和现状,重点阐述了岩石→土壤→果树多维动态特征,形成了农业地质背景系统及植物(果树)大生态系统应用方向研究的新认识^[35];汪振立较系统地研究总结了自然植被、作物、微生物、动物以及人与地质环境的相互控制、制约响应关系,并讨论了生态地质环境修复方法技术^[14];陈树旺等以辽宁铁岭地区为研究对象,深入开展了该地区的生态地质调查、研究和评价工作,取得了创新性认识^[36-37];张慈等使用 2003—2018 年 MODIS 数据研究青藏高原东部地区地质环境对植被覆盖的影响,结果显示地形起伏、坡向坡度和地质条件复杂度能很好地解释了植被覆盖与变化状况,中等地质复杂度的区域有更好的植被覆盖度,靠近断层的地方更有利于植被发育^[38];曾锐等从蒙自断陷盆地地质环境基础出发,研究岩溶断陷盆地地区的农业生态需水问题,研究划定了需要人工补水的地区以及不同地区适宜种植的作物类型与种植模式,如万寿菊和玉米适合在该区域的高原地区合种,研究结果为当地生态结构改善与规范耕

作模式提供了参考^[39]。

目前有大量研究针对脆弱区的生态系统和土壤地质环境之间的关系展开,尤其是关于区域草场退化的研究,是脆弱生态系统的保护与治理的重要先验理论研究^[40]。这一系列研究表现出地质条件与生态系统之间的双向作用,尤其是变化的生态环境如何反作用于地质环境,说明生态-地质系统是一个深度耦合的复杂系统。冯瑞章等对高寒地区草地退化造成的土壤理化性质及生物特性改变展开研究,结果表明土壤含水量、水稳定性团聚体百分数、全钾、速效氮、土壤酶活性、有机质、过氧化氢酶等均随草地退化程度的提升而下降,土壤容重则相反,其他如全氮、全磷等的变化分布规律更加复杂,它们与土壤微生物的关系也十分密切^[40];干友民等对轻度、中度和重度3种退化程度的草地土壤状况进行研究,得出草地退化对土壤有机质和全氮的影响较大,而与全钾变化关系不密切,且对表层土壤的影响大于对深层土壤的影响,对速效成分的影响大于对全价成分的影响^[41];杨军等选取拉萨市当雄县不同退化程度的高山嵩草草甸研究草场退化与土壤性质和植物群落变化之间的关系,结果显示随着退化程度增加,豆科生物量增加而莎草科下降,禾本科先下降后增加,各类生物多样性指数、丰富度指数均在中度退化条件下达到最大^[42]。若尔盖地区由于受人为活动的影响出现了大面积的草场退化,陈秋捷等针对其植被覆盖变化研究土壤养分和团聚体的变化特征,结果显示土壤团聚体的平均重量、几何均径随沙化程度的增加而显著降低,土壤养分也随之减少,处理好土壤结构与土壤养分之间的关系对草地退化防治十分重要^[43]。

在人类利用自然的漫长历史中,逐渐总结出了不同地质条件、地理单元中适宜生长的生物类群,按需求类型包括地方牲畜产品、农产品和道地性中药材等,针对这一方面的研究也是生态地质学应用性研究的一个重要方面^[14]。地质环境作用于生态系统的因素是土壤地球化学特性^[44]。陈敬忠对米槁果实的道地地质环境与产品品质特点进行研究,对云贵地区的米槁生长区域进行划分,贵州大部分地区均适宜其生长,而云南西南一带则不适宜,适宜的全氮浓度为 $0.08 \sim 0.33 \text{ g}/100\text{g}$ 、全磷含量为 $0.15 \sim 1.17 \text{ g}/\text{kg}$ ^[44];汪振立总结指出不同药用功效的中药材有不同的微量元素富集带谱,例如有明目功效的中药材往往富含锌、锰、铜等元素,而具有补血益气功效的药材中铁、锰、锌的含量

较高,相应的也会选择在这些元素富集的地质环境下生存^[14];周志等对武夷山优质茶叶的生长条件展开研究,证明土壤养分状况显著影响了茶叶的生长,各成分的最适范围为pH值介于 $4.5 \sim 5.0$ 之间、有效磷介于 $10 \sim 100 \text{ mg}/\text{kg}$ 之间、有机质介于 $20 \sim 40 \text{ g}/\text{kg}$ 之间^[45]。

另外,也有一些研究在原位条件下开展控制实验,以更强的目的性和针对性了解生态-地质间的作用关系。如有研究探讨了不同营养元素条件下植物根-土复合体的抗剪切能力,得出了营养元素含量高的区域,植物体根-土复合体的抗剪切能力也越强,这为高寒地区水土流失等问题的治理措施提供了参考^[46]。

2.2 地质环境影响下的生态修复研究

国土空间的综合整治和生态修复是当前社会着力解决的一项关键问题,统筹山水林田湖草沙系统治理,需要从自然地理单元的发生性出发,系统入手^[47]。区域的自然地理、地质环境是影响区域生态过程与结构的基础,它可以通过控制土壤成分与结构、区域水文特性等调控局地生态系统,探讨地质环境影响下的生态修复问题也是生态地质的研究重点。

生态脆弱地区的生态环境相对恶劣,由于地质环境与气候环境的综合影响更容易进一步恶化,基于区域地质条件的生态修复措施研究能够为当地人民生活与发展带来帮助^[48]。例如,云贵高原部分地区由于自然地理条件的影响,水土流失严重、基岩裸露,石漠化普遍发育,制约了当地的发展。段华超等针对石漠化地区的地质条件、气候条件、生物活动等的差异性进行石漠化区域划分,针对不同片区特点分析适宜的生态修复方法,形成共4类23种治理模式^[48];肖林颖等以云南省2个典型岩溶断陷盆地地区为对象,基于2007—2017年Landsat系列影像数据等研究石漠化盆地的治理效果^[49],均取得了明显成效;王京彬等在“承德市国家生态文明示范区综合地质调查”中总结了研究区的生态地质调查方法,分析了自然资源优势,评价环境风险,提出生态修复策略^[50]。

矿山开采是人们利用地质资源的直接手段之一,而开采后矿区的生态修复问题是生态地质学的重要研究内容^[51]。矿山开采往往造成土地的破坏、生态环境的退化和地下水资源的破坏等等,针对这些问题,国内专家学者进行了卓有成效的调查研究,研发了源头管控、过程阻断、末端修复的矿山

生态修复模式,形成了不同地质条件与气候条件下矿山生态修复技术与典型修复案例^[52-54]。崔潇等以平朔的露天矿区为对象,研究复垦土壤母质的源头性状,为露天煤矿复垦与修复提供参考^[52];周金余等对黄河流域各矿区的生态修复措施作了总结,划分了高寒区、黄土区、风沙区、冲积区、采空区等区域类型,分析保护冻土、保护水资源、恢复管理植被、湿地构建等理论技术的适宜方向,提出目前面对的问题与不足之处^[53];周智勇利用遥感技术对新疆北部的矿山区域进行监测,分层分析并构建了该区矿山地质环境评价体系,促进该区矿山综合可持续发展^[54];殷亚秋等利用国产高分辨率影像对长江沿线的废弃矿区的土地损毁与生态修复进行研究,结果显示上游地区的废弃矿坑更多引发地质灾害,中下游地区更多引发原料性污染,针对各区域提出综合使用降坡削坡等物理方法和引进耐受植物、增引微生物等生物方法进行修复^[55]。

3 “生态地质调查工程”研究进展

为了服务生态文明建设,促进人与自然和谐共生,科学推进生态系统整体保护和系统修复,中国地质调查局于 2019 年设立了“生态地质调查工程”。该工程在全国范围内以不同的空间尺度开展了生态地质调查,获取了大量第一手资料,如:森林、草原、湿地等生态类型的空间分布格局与变化,土地沙化、盐碱化、水土流失、石漠化、湖泊湿地萎缩等生态问题,成土母岩、水文地质要素、土壤、地形地貌等生态地质条件分布,以及生态地质垂向剖面测试分析等数据;分析了生态-地质之间相互制约影响关系,剖析了主要生态问题的成因机理,提出了相应的生态保护修复对策建议;建立了不同尺度生态地质调查技术体系,划分了全国生态地质单元,建立了典型生态地质图谱,总结了不同地区生态-地质相互作用模式,探索了用地球系统科学理论解决重大生态问题的新路径,为国内的生态地质调查研究提供了宝贵经验^[2]。

3.1 生态问题成因机理研究

采用空-天-地相协同的调查技术,建立了遥感先行摸清生态问题变化特征-地上地下一体化调查研究成因机理-综合分析评价提出因地制宜生态保护修复对策建议的技术模式。探索了土地沙化、湖泊湿地萎缩、人工林退化、石漠化等生态问题与赋存地质条件的耦合关系及其成因机理。调

查研究结果表明,这些生态问题的分布变化受到了地形地貌条件、区域成土母岩(质)特性、水文条件等的基础性控制制约作用。

在青海共和盆地龙羊峡地区广泛分布的冲洪积物和风积物质地松散,在强风蚀作用下,表层沙质土层结构破坏形成风蚀坑,就地起沙导致土地沙化程度加剧;在鄂尔多斯高原北部和晋陕峡谷地区,砒砂岩的广布奠定了该区水土流失程度加深的物质基础,砒砂岩结构松散,矿物成分组成主要为长石、石英、方解石和蒙脱石,抗侵蚀能力差,水土流失严重,治理难度大,成为黄河粗泥沙的主要来源;毛乌素沙地因其有利的垂向地层结构,形成地下水埋深浅、水量丰富、水质较好、土壤中全碳含量达到 1.5% 的适宜基础条件,在年降水量 350 ~ 500 mm、相对湿度 51% 的气候背景下,有利于植被恢复,该区生态修复效果显著;坝上高原地区存在多个受断层控制的山间凹陷盆地,盆地周边的花岗岩、玄武岩风化析出了大量 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子,这些离子在降水和径流的作用下向凹陷洼地汇聚,使得该地区的土壤更容易形成钙积层,对植被生长造成负面影响,同时该区地表水截流工程多,错峰蔬菜种植面积和水浇地面积大,地下水超采严重,导致地表水和地下水入湖量大幅减少。研究认为,上述自然与人类的综合作用,是出现高原湖淖萎缩、草原退化、人工林退化等生态问题的主要原因,因此提出了坚持节水优先、自然恢复为主,以保持流域水平衡为前提,充分考虑生态地质条件的差异性,量水而行,因地施策的整体生态保护修复对策。

西南岩石山地区石漠化发育,成土母岩的岩性差异造成风化速率及其风化产物营养元素含量具有明显差异,导致石漠化发育程度不同、植被的自然恢复能力各异。泥质灰岩夹薄层泥岩、粉砂岩、砂岩等岩性组合区,由于碎屑岩成土能力较强,发育轻度石漠化;厚层灰岩、白云岩、大理岩化灰岩、硅质灰岩等岩性组合的碳酸盐岩区域,发育中度及以上石漠化,降水条件差异影响了植被可恢复潜力。此外,石漠化程度还受到构造控制,构造发育地区岩石破碎程度更高,利于风化,石漠化程度较低。对西南岩溶地区的生态地质研究使用了 $(Ca + Mg)/(Si + Al)$ 比值来衡量区域成壤能力, $(Ca + Mg)/(Si + Al)$ 比值越大,难溶组分含量越高,成壤能力就越强。同时,研究中也发现坡度等地形因素也会对生态问题的形成与发展产生影响,如坡度较

大的区域更容易发生石漠化。

3.2 生态地质单元划分与技术体系研究

在生态地质区划和生态地质调查方法方面,综合考虑地质要素、地形地貌、气象气候和生态状况等4种因子的相互响应关系,建立了全国生态地质单元分类分级指标体系,按照综合性与主导因素、差异性与典型性、相对一致性及区域共轭性原则,全国陆域共分了7个一级单元、52个二级单元和240个三级单元,总结了三级单元的生态地质基本特征,建立了典型生态地质图谱和生态-地质相互作用模式。建立了遥感解译-路线调查-剖面测量-测试分析与综合研究相协同的生态地质调查技术体系,研究形成了矿物成分与粒径热红外光谱反演方法和林草湿信息遥感解译方法,探索了成土母岩(质)图、土壤地质图和生态地质图的表达方式,编制了《生态地质调查技术要求(1:50 000)(试行)》,对生态地质调查的流程,调查内容、方法和成果表达形式作了梳理和规范。

4 生态地质研究展望

生态地质学作为一门新兴交叉学科,目前仍有很大的发展空间,生态地质学研究任务内容、方法技术及生态地质学科体系构建等仍需要进一步讨论。

4.1 生态地质学涵义与研究内容需要明晰

笔者认为,生态地质学是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的一门交叉学科,它是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,完整地获取地上地下一体化的生态-土壤-水-风化壳(或包气带)-岩石信息,识别与诊断重大生态问题及其成因机理,科学评估生态状况,进而提出生态保护修复基于自然的解决方案。作为研究生态系统与地质环境之间关系的交叉学科,这一概念强化了地质学与生态学的融合,能够更好地表达生态环境的系统性过程,突出了生态-地质系统之间地上地下一体化的相互作用与响应。

生态地质研究目的是寻求人与自然和谐共生和可持续发展,提高生态系统与地质环境相互作用认知程度,让受损的生态系统得到保护恢复和治理,提高生态系统的质量与稳定性,从而为科学编制生态保护修复规划、合理部署生态修复工程、

高效辅助国土空间利用和生态保护修复管理决策提供技术支持,因此生态地质学具有研究内容广泛和多层级、多尺度、多维度及交叉融合的特性。研究内容应该包括:①学科理论。生态地质学将地质学(地貌及第四纪地质学、水文地质学、环境地质学等)、生态学、土壤学、地理学等融为一体,应注重学科交叉融合理论研究,在地球系统科学的大框架下研究生态系统与地质环境的耦合机制,尤其是在现代地质作用下(包括人类活动)产生的生态系统问题与地质环境的相互响应机制。②生态系统与地质环境客观实体(岩石、风化壳或包气带、土壤、地下水和地表水、植被群落、生物多样性等)时空状况与演变特征。空间上包括生态系统与地质环境的组成、结构、功能及其相互作用关系;时间上包括生态地质环境与生态系统问题的历史演变历程、现状及其变化和未来发展趋势。③科学生态保护修复策略、模式、技术及其标准规范与典型案例。

4.2 生态地质学研究方法技术需要创新

生态地质学研究内容广泛,应以地球系统科学理论为指导,突出山水林田湖草生命共同体理念,从国家、区域或流域、景观、生态系统、场地或典型地段等不同层级开展研究,并注重工作的相互衔接,强化生态系统时空演替规律与内在机理研究。在研究过程中应充分应用现代遥感技术、物探钻探化探技术、野外调查技术、定位观测技术、测试分析技术、GIS与综合评价技术等等。重点研发重大生态问题快速识别、生态要素智能化提取、生态质量信息定量反演和风化壳、包气带结构探测等技术,创新生态系统水循环与区域生态水平衡分析评价方法、生态系统恢复力与适应性评价方法,以及生态修复效果评估指标体系与方法等,研发源头防护、过程控制、末端修复等生态修复关键技术,建立生态地质调查监测-定量评价-预测预警-修复示范-动态监管技术体系,提高生态地质研究的工作效率和质量。

4.3 生态地质学科体系需要构建

生态地质学是研究生态系统与地质环境之间关系的一门交叉新兴学科,它在学科门类设置中的学科地位与层级尚未确定,从重点研究任务内容和服务应用前景看,属于地质学的学科分支比较合理。随着生态地质学的研究理论、任务内容、方法技术及其应用服务逐渐深入与完善,需要系统整理生态地质分支学科,构建生态地质学科体系。

参考文献 (References):

- [1] 张惠远,李圆圆,冯丹阳,等.明确内容标准强化实施监管——山水林田湖草生态保护修复的路径探索[J].中国生态文明,2019,30(1):66-69.
Zhang H Y, Li Y Y, Feng D Y, et al. Clarify the content standard and strengthen the implementation of supervision: Exploring the path of ecological protection and restoration of mountain - river - forest - field - lake - grassland[J]. China Ecol Civilizat, 2019, 30(1): 66-69.
- [2] 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,2021,8(1):1-12.
Nie H F, Xiao C L, Dai M, et al. Progresses and main achievements of ecogeological survey project[J]. Geol Survey China, 2021, 8(1): 1-12.
- [3] 张箫,牟雪洁,王夏晖,等.国土空间生态修复分区研究——以海南岛为例[J].生态经济,2021,37(2):183-189.
Zhang X, Mou X J, Wang X H, et al. Study on the ecological restoration zoning of territorial space: Taking Hainan Island as an example[J]. Ecol Economy, 2021, 37(2): 183-189.
- [4] 王军,钟莉娜.生态系统服务理论与山水林田湖草生态保护修复的应用[J].生态学报,2019,39(23):8702-8708.
Wang J, Zhong L N. Application of ecosystem service theory for ecological protection and restoration of mountain - river - forest - field - lake - grassland[J]. Acta Ecol Sin, 2019, 39(23): 8702-8708.
- [5] 白中科.生态优先绿色发展——生态文明理念下的国土空间生态保护与修复[J].自然资源科普与文化,2021(3):4-11.
Bai Z K. Ecology gives priority to green development: Ecological protection and restoration of national space under the concept of ecological civilization[J]. Sci Cultur Popularizat Nat Resour, 2021(3): 4-11.
- [6] 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(4):4-13.
Nie H F, Xiao C L, Guo Z C. Explore the secret of the operation and evolution of ecosystem: The interpretation of ideas and methods of ecogeological survey[J]. Sci Cultur Popularizat Land Resour, 2019(4): 4-13.
- [7] 燕乃玲,虞孝感.生态系统完整性研究进展[J].地理科学进展,2007,26(1):17-25.
Yan N L, Yu X G. Summary comments on ecosystem integrity[J]. Progr Geogr, 2007, 26(1): 17-25.
- [8] Green S M, Dungait J A J, Tu C L, et al. Soil functions and ecosystem services research in the Chinese karst critical zone[J]. Chem Geol, 2019, 527: 119107.
- [9] Correa - Burrows J P, Navarrete - Calvo Á, Valenzuela - Díaz M J, et al. The role of local geochemical and mineralogical backgrounds as essential information to build efficient sediment quality guidelines at high - mountainous hydrothermally - altered basins (Mapocho basin, Chile) [J]. Sci Total Environ, 2021, 785: 147266.
- [10] 李博,杨特,林鹏.生态学[M].北京:高等教育出版社,2000.
- Li B, Yang C, Lin P. Ecology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [11] 戈峰.现代生态学[M].2版.北京:科学出版社,2008:1-7.
Ge F. Modern Ecology [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2008: 1-7.
- [12] Trofimov V T, Ziling D G. Ecological geology in the program of "Universities of Russia" [J]. Geocologiya, 1994, 3: 117-120.
- [13] 王长生,王大可.生态地质学的创立及其在大巴山区的初步应用[J].大自然探索,1998,17(4):69-71.
Wang C S, Wang D K. Production of ecological geology and its applications in the Daba Mountain [J]. Explorat Nat, 1998, 17(4): 69-71.
- [14] 汪振立.生态地质[M].2版.北京:地质出版社,2016.
Wang Z L. Ecological Geology [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [15] 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.
Lin J X, Zhang J, Shi S Y, et al. Ecoenvironmental geology: A rising branch of earth science during the 21st century [J]. Geol Bull China, 2003, 22(7): 459-469.
- [16] Trofimov V T. Ecological geology: A novel branch of geological sciences [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(1): 27-35.
- [17] Vartanyan G. The Geological Environment and Ecosystems [G]// Zektser I S, Marker B, Ridgway J, et al. Geology and Ecosystems. Boston: Springer, 2006: 9-14.
- [18] Trofimov V T. The ecological - geological system, its types and position in the structure of an ecosystem [J]. Moscow Univ Geol Bull, 2009, 64(2): 111-115.
- [19] Trofimov V T. Ecological - geological conditions and factors of their formation [J]. Moscow Univ Geol Bull, 2010, 65(1): 54-57.
- [20] Korolev V A, Buslaeva O V. A system of proper environmental geology categories [J]. Moscow Univ Geol Bull, 2012, 67(5): 298-307.
- [21] Dmitrievich P A, Aleksandrovich P I. Engineering - geological or geocological processes and phenomena; their development in the present - day environment [J]. Vestn MGSU, 2012(9): 191-196.
- [22] Tsakalotos D E. The inner friction of the critical zone [J]. Zeitschr Physikal Chem Stochiometr Verwandtschaftsl, 1909, 68: 32-38.
- [23] Cameron E N. Structure and rock sequence of the critical zone of the eastern bushveld complex [J]. Mineral Soc Am Spec, 1963(1): 93-107.
- [24] Consensus Study Report. Basic Research Opportunities in Earth Science [M]. Washington D C: The National Academies Press, 2001: 168.
- [25] Lin H. Earth's critical zone and hydrogeology: Concepts, characteristics, and advances [J]. Hydrol Earth Syst Sci, 2010, 14(1): 25-45.
- [26] Richter D D, Billings S A. 'One physical system': Tansley's ecosystem as earth's critical zone [J]. New Phytol, 2015, 206(3): 900-912.
- [27] Banwart S A, Bernasconi S M, Blum W E H, et al. Soil functions

- in earth's critical zone: Key results and conclusions[J]. *Adv Agronomy*, 2017, 142: 1–27.
- [28] Zhu Y G, Gillings M, Simonet P, et al. Human dissemination of genes and microorganisms in earth's critical zone[J]. *Glob Change Biol*, 2018, 24(4): 1488–1499.
- [29] Zhang Z C, Chen X, Cheng Q B, et al. Coupled hydrological and biogeochemical modelling of nitrogen transport in the karst critical zone[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 732: 138902.
- [30] 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. *地理学报*, 2015, 70(12): 1859–1869.
- Zhu Y G, Li G, Zhang G L, et al. Soil security: From Earth's critical zone to ecosystem services[J]. *Acta Geograph Sin*, 2015, 70(12): 1859–1869.
- [31] Goldhaber M B, Mills C T, Morrison J M, et al. Hydrogeochemistry of prairie pothole region wetlands: Role of long-term critical zone processes[J]. *Chem Geol*, 2014, 387: 170–183.
- [32] Akob D M, Küsel K. Where microorganisms meet rocks in the earth's critical zone[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(12): 3531–3543.
- [33] Reiss M, Chiffard P. An opinion on spring habitats within the earth's critical zone in headwater regions[J]. *Water*, 2017, 9(9): 645.
- [34] Bui E N. Data-driven critical zone science: A new paradigm[J]. *Sci Total Environ*, 2016, 568: 587–593.
- [35] 李正积. 岩土植物大系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- Li Z J. The Largescale System Studies of Rock-Soil-Plant[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [36] 陈树旺, Zhukovskaya A A, 邢德和, 等. 铁岭地区生态地质研究[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- Chen S W, Zhukovskaya A A, Xing D H, et al. Eco-geological Study in Tieling Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [37] 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 S W, Xing D H, Ding Q H, et al. Ecogeological survey and evaluation: A case study of Tieling area, Liaoning Province[J]. *Geol Resour*, 2012, 21(6): 540–545.
- [38] 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*, 2021: 1–11. [2021-07-17]. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03010>.
- Zhang C, Zhao Y B, Ouyang Y, et al. Influence of geological environment on vegetation coverage in the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Mianning[J/OL]. *Sediment Geol Tethyan Geol*, 2021: 1–11. [2021-07-17]. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03010>.
- [39] 曾锐, 张陶, 蒲俊兵, 等. 典型岩溶断陷盆地农作物生态需水研究——以蒙自地区为例[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(6): 873–882.
- Zeng R, Zhang T, Pu J B, et al. Ecological water requirements of crops in typical karst fault-depression basins: A case study of the Mengzi area, Yunnan Province[J]. *Carsol Sin*, 2020, 39(6): 873–882.
- [40] 冯瑞章, 周万海, 龙瑞军, 等. 江河源区不同退化程度高寒草地土壤物理、化学及生物学特征研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(2): 263–269.
- Feng R Z, Zhou W H, Long R J, et al. Characteristics of soil physical, chemical and biological properties on degraded alpine meadows in the headwater areas of the Yangtze and Yellow Rivers, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chin J Soil Sci*, 2010, 41(2): 263–269.
- [41] 干友民, 李志丹, 泽柏, 等. 川西北亚高山草地不同退化梯度草地土壤养分变化[J]. *草业学报*, 2005, 14(2): 38–42.
- Gan Y M, Li Z D, Ze B, et al. The changes of grassland soil nutrition at different degradation subalpine meadow of north-west in Sichuan[J]. *Acta Pratacult Sci*, 2005, 14(2): 38–42.
- [42] 杨军, 刘秋蓉, 王向涛. 青藏高原高山嵩草高寒草甸不同退化阶段植物群落与土壤养分[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4067–4072.
- Yang J, Liu Q R, Wang X T. Plant community and soil nutrient of alpine meadow in different degradation stages on the Tibetan Plateau, China[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2020, 31(12): 4067–4072.
- [43] 陈秋捷, 张楠楠, 仲波, 等. 若尔盖高寒草地退化沙化过程中土壤养分与团聚体结构的变化特征[J]. *生态科学*, 2019, 38(4): 13–20.
- Chen Q J, Zhang N N, Zhong B, et al. Change of soil nutrient and aggregate structure during the desertification process of grassland in Zoige[J]. *Ecol Sci*, 2019, 38(4): 13–20.
- [44] 陈敬忠. 米槁果实化学成分地理变异及道地性成因分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- Chen J Z. Geographical variation of chemical composition of *Cinnamomum migao* and cause analysis of its geoherbism[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [45] 周志, 刘扬, 张黎明, 等. 武夷茶区茶园土壤养分状况及其对茶叶品质成分的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(8): 1425–1434.
- Zhou Z, Liu Y, Zhang L M, et al. Soil nutrient status in Wuyi tea region and its effects on tea quality-related constituents[J]. *Sci Agric Sin*, 2019, 52(8): 1425–1434.
- [46] 刘昌义, 胡夏嵩, 李希来, 等. 黄河源区高寒草地根-土复合体抗剪强度与土壤营养元素分布关系[J]. *山地学报*, 2020, 38(3): 349–359.
- Liu C Y, Hu X S, Li X L, et al. Relationship between shear strength of root-soil composite systems of alpine grassland and distribution of soil nutrient elements in the source region of the Yellow River, China[J]. *Mount Res*, 2020, 38(3): 349–359.
- [47] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 64–69.
- Fu B J. Several key points in territorial ecological restoration[J]. *Bull Chin Acad Sci*, 2021, 36(1): 64–69.
- [48] 段华超, 郑鑫华, 李世民, 等. 云南石漠化地区植被恢复模式及优化建议[J/OL]. *中国岩溶*, 2021. (2021-04-13) [2021-07-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20210413.1323.002.html>.
- Duan H C, Zheng X H, Li S M, et al. Vegetation restoration model and optimization suggestions in rocky desertification area of Yun-

- nan Province[J/OL]. Carsol Sin, 2021. (2021-04-13) [2021-07-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20210413.1323.002.html>.
- [49] 肖林颖, 吴秀芹, 周金星, 等. 岩溶断陷盆地典型县域石漠化治理综合效益评价——以云南建水县为例[J]. 地球学报, 2021, 42(3): 444-450.
- Xiao L Y, Wu X Q, Zhou J X, et al. Comprehensive benefit evaluation of rocky desertification control in the typical county of karst fault basin: A case study of Jianshui County, Yunnan Province[J]. Acta Geosci Sin, 2021, 42(3): 444-450.
- [50] 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 J B, Wei X F, Zhang H Q, et al. The eco-geological survey based on geological formation, exemplified by integrated geological survey of national ecological civilization demonstration area in Chengde City, Hebei Province[J]. Geol China, 2020, 47(6): 1611-1624.
- [51] 白中科, 师学义, 周伟, 等. 人工如何支持引导生态系统自然修复[J]. 中国土地科学, 2020, 34(9): 1-9.
- Bai Z K, Shi X Y, Zhou W, et al. How does artificiality support and guide the natural restoration of ecosystems[J]. China Land Sci, 2020, 34(9): 1-9.
- [52] 崔潇, 周妍如, 刘孝阳, 等. 平朔露天煤矿复垦区不同地质层组岩土质量综合评价[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 164-173.
- Cui X, Zhou Y R, Liu X Y, et al. Comprehensive evaluation of rock and soil quality of different geological stratum groups in Ping-shuo opencast coal mine reclamation area[J]. Hydrogeol Eng Geol, 2021, 48(2): 164-173.
- [53] 周金余, 李平, 张贺. 黄河流域煤矿生态修复技术研究现状及展望[J/OL]. 中国矿业, 2021. (2021-04-07) [2021-07-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3033.TD.20210406.1810.002.html>.
- Zhou J Y, Li P, Zhang H. Research status and prospect of ecological restoration technology for coal mines in the Yellow River basin[J/OL]. China Min Magaz, 2021. (2021-04-07) [2021-07-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3033.TD.20210406.1810.002.html>.
- [54] 周智勇. 基于 RS 与 GIS 的新疆北部地区矿山地质环境评价[J]. 西部资源, 2021(2): 179-180, 183.
- Zhou Z Y. Evaluation of mine geological environment in northern Xinjiang based on RS and GIS[J]. West Resour, 2021(2): 179-180, 183.
- [55] 殷亚秋, 杨金中, 汪洁, 等. 长江经济带废弃矿山占损土地遥感调查与生态修复对策[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 170-176.
- Yin Y Q, Yang J Z, Wang J, et al. Remote sensing survey of land occupied and damaged by abandoned mines along the Yangtze River Economic Belt and research on ecological remediation countermeasures[J]. Remote Sens Land Resour, 2020, 32(2): 170-176.

Progress and prospect of ecogeological research

NIE Hongfeng¹, XIAO Chunlei¹, REN Weixiang^{1,2,3}, LIU Jianyu¹, DAI Meng¹

(1. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Ecological geology is an interdisciplinary subject to study the relationship between ecosystem and geological environment. which plays an important theoretical support role in the ecological protection and restoration of land and space. The ecogeology in China is still in the exploratory stage after years of development and sedimentierung. The authors in this paper summarize the relevant research progress of ecogeology at home and abroad, based on a large number of previous studies. Internationally, Russia has established an ecogeological survey and research system, and the United States has conducted the research on the earth's critical zone, which is a theme very consistent with the ecogeological research. In China, ecogeological researches mainly focus on the process and mechanism of ecology-geology interaction and systematic ecological restoration under the influence of geological environment. On this basis, the authors in this study put forward the understanding of the meaning of ecogeology and the understanding and thinking of the research content, method and technology innovation of ecogeology and the construction of discipline system, which would provide reference for serving the overall protection of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands, system restoration, comprehensive management and deepening research of ecogeological system.

Keywords: ecogeological survey; land and space ecological restoration; earth's critical zone; progress; prospect (责任编辑: 刁淑娟)